

PROGRAMA
INTERINSTITUCIONAL DE
DOCTORADO EN
ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES
UNIVERSIDAD DE COLIMA
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



UNIVERSIDAD MICHOACANA SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA VIVIENDA VERNÁCULA DE ADOBE EN MÉXICO: ANÁLISIS CONSTRUCTIVO Y CARACTERIZACIÓN MATERIAL PARA SU CONSERVACIÓN

TESIS

Que para obtener el grado de
Doctor en Arquitectura

PRESENTA

Adrià Sánchez Calvillo

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Morelia, Michoacán, noviembre de 2022

PROGRAMA
INTERINSTITUCIONAL DE
DOCTORADO EN
ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES
UNIVERSIDAD DE COLIMA
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



UNIVERSIDAD MICHOACANA SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA VIVIENDA VERNÁCULA DE ADOBE EN MÉXICO: ANÁLISIS CONSTRUCTIVO Y CARACTERIZACIÓN MATERIAL PARA SU CONSERVACIÓN

MESA SINODAL

Directora de tesis

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Codirectores

Dra. Antonia Navarro Ezquerro

Dr. Carlos Javier Esparza López

Sinodales:

Dra. M^a del Carmen López Núñez

Dr. Javier Ortega Heras

Morelia, Michoacán, noviembre de 2022

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis no habría sido posible sin el apoyo brindado por varias instituciones: en primer lugar, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) con su programa de becas nacionales (número de becario 814875). También a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo (CIC-UMSNH) con el proyecto “Módulos de Poisson y elasticidad, estáticos y dinámicos, para materiales de tierra cruda”. A la Asociación Universitaria Iberoamericana de Posgrado (AUIP) y a la Red de Científicos Españoles en México (RECEMX) por su apoyo económico con los programas de becas de movilidad que permitieron realizar estancias de investigación en Cali, Colombia y Madrid, España respectivamente. Por último, el soporte económico del CIMNE Congress Bureau de Barcelona a partir del proyecto de desarrollo y cooperación DBMC 2020 que fue uno de los máximos apoyos logísticos para llevar a cabo la investigación.

Dejando de lado todas las instituciones que apostaron por mí y apoyaron económicamente el proceso de investigación a lo largo de estos años, no podría haber logrado tantos resultados sin la ayuda de muchas personas, empezando por todos los miembros de la mesa sinodal.

Primero debo agradecer a la doctora Elia Mercedes Alonso, mi directora de tesis, por ser mucho más que eso, un modelo de conducta intachable y una gran amiga que sacó lo mejor de mí; no hay palabras para expresar toda la gratitud que siento. El agradecimiento se traslada también a ambos, incluyendo al Dr. Wilfrido Martínez Molina, por adoptarme, apoyarme en todos los proyectos, también económicamente y por ser nuestro modelo a seguir en el Laboratorio de Materiales.

A la doctora Antonia Navarro por inmediata disposición a colaborar desde que le mostré este proyecto, por su paciencia y ganas de enseñar y trasladar sus conocimientos, la vinculación tan positiva que hemos logrado con la UPC, y por venir a Michoacán y conocer este rincón del mundo que tanto me apasiona.

Al doctor Carlos Javier Esparza por su pronta disposición e interés en este trabajo y siempre darme los mejores ánimos y consejos sin dejar de ser razonable con los tiempos y alcances de la investigación.

A la doctora Carmen López por apoyarme desde antes de los inicios del doctorado, con quien ya tuve el placer de trabajar en la Especialidad en Restauración de Sitios y Monumentos. Gracias por su disponibilidad, buenos consejos y guía metodológica en todo el proceso de tesis siempre con el mejor carácter y depositando una gran confianza en mí.

Al doctor Javier Ortega por su amabilidad desde el primer contacto, por darme la oportunidad de trabajar con él, aprender tanto y dedicar tanto tiempo a las asesorías y excesivas consultas que le hice. También debo agradecerle el recibimiento en su grupo de trabajo, el G-CARMA del ITEFI-CSIC, donde me acogieron como uno más y me sentí muy a gusto durante la estancia de investigación.

También a los otros académicos e instituciones con quienes tuve el placer de aprender, como el doctor Gabriel Castañeda por su amistad y la oportunidad de realizar mi primera estancia de investigación doctoral, además de todo el del COCOVI-UNACH por su cálido recibimiento. A la doctora Ruby Mejía y el doctor Ricardo Hincapié de la Universidad del Valle por permitirme hacer la segunda estancia de investigación en Cali y ayudarme a recorrer gran parte de la arquitectura de tierra del país. Y por supuesto al Instituto Tecnológico de Zacatepec, especialmente al maestro Osvaldo de la Paz por recibirnos y mantener esta colaboración hasta el día de hoy.

A todo el conjunto de compañeros del Laboratorio de Materiales: Noel, Sandra, Ernesto, Hugo, Mauricio, Rosalía, Judith, Berna, Marco Navarrete, Jorge y muchos más; especialmente a Elena, compañera de fatigas. Por su asesoría, colaboración en la realización de las pruebas y la amistad y convivencia en tantas actividades y proyectos a lo largo de los últimos cuatro años. También a los tesisistas David Preciado y Melissa Ruiz, sin quienes esta tesis no habría sido posible y de quienes aprendí tantísimo durante todo el proceso de caracterización.

En general a todos aquellos amigos, familia y personas que me han ayudado a poder crecer y desarrollarme en el ámbito personal además del profesional en estos últimos cuatro años.

Por último, tengo que agradecer de todo corazón a Adrián, Vania y Miguel por todo lo vivido, por el increíble equipo que formamos en Xirangua y por siempre confiar en mí y apoyar todas mis locuras.

RESUMEN

El abandono de la arquitectura de tierra en México, ejemplificado en la vivienda de adobe tradicional, la tipología más representativa del país, es un fenómeno acuciante que se está intentando revertir debido al potencial sostenible de estas edificaciones y su importante legado cultural. Por otro lado, la vulnerabilidad sísmica de estas viviendas ha generado una mayor desconfianza por parte de la sociedad, que relega de estos sistemas desfasados y los asocia a las clases socioeconómicas más bajas y a una sensación constante de fragilidad estructural.

Distintas estrategias han sido aplicadas en los últimos años para la salvaguarda y conservación de este patrimonio vernáculo, sin embargo, los datos nos indican que la construcción con tierra decrece a un alto ritmo año tras año. En este documento se presentan cuatro acercamientos a la vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe: desde la geografía cultural y la percepción de sus usuarios, desde la caracterización tipológica y tecnológica-constructiva, desde el análisis estructural y los métodos de evaluación, y desde la caracterización del material en el laboratorio.

Los resultados permitieron identificar aquellos patrones territoriales, socioculturales y constructivos de las viviendas a partir de cinco casos de estudio representativos; evaluar las herramientas de análisis de vulnerabilidad sísmica para estas tipologías arquitectónicas y finalmente, desarrollar una metodología de caracterización de materiales de tierra que permita alcanzar un mayor conocimiento técnico de estos sistemas. Por último, todo el proceso quedó enmarcado dentro de algunos proyectos de investigación y de cooperación al desarrollo que pudieron generarse para la arquitectura vernácula del estado de Michoacán, generando dinámicas muy positivas respecto a la revalorización y divulgación de este valioso patrimonio.

Palabras clave: arquitectura de tierra, vulnerabilidad sísmica, vivienda vernácula, propiedades de materiales, divulgación científica.

ABSTRACT

The abandonment of earthen architecture in Mexico, exemplified with the traditional adobe house, the most representative typology in the country, is an overwhelming phenomenon which we are trying to turn back due to the sustainable potential of these dwellings and their important cultural legacy. On the other hand, the seismic vulnerability of these constructions has provoked the mistrust of society, which relegates from these ancient systems and associate them with the lower socioeconomic levels and a sense of structural fragility.

In recent years, different strategies have been applied for the safeguard and conservation of this vernacular heritage, however, the data shows us how the earthen construction decreases at a high rate year by year. In this document, four approaches to the seismic vulnerability of the adobe dwelling are presented: from the cultural geography and the conception of the users, from the typological and technological-constructive characterization, from the structural analysis and the evaluation methods, and from the material characterization in the laboratory.

The results obtained allowed to identify those territorial, sociocultural and constructive patterns of the dwelling of five representative study cases; to evaluate the seismic vulnerability analytical tools for these architectural typologies and finally, to develop a methodology of characterization for earthen materials which helps to achieve a better scientific knowledge of these systems. At last, all the process was framed within some investigation and cooperation to development projects created for the preservation of the vernacular architecture of the State of Michoacan, generating positive dynamics regarding the reappraisal and dissemination of this meaningful heritage.

Keywords: earthen architecture, seismic vulnerability, vernacular housing, materials properties, scientific dissemination.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos	i
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
Índice de contenido.....	vii
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xxvii
Índice de abreviaciones y acrónimos	xxix
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes de la investigación y justificación	2
Estructura metodológica de la investigación y herramientas de análisis	7
Gestión del proyecto y presentación de la investigación	17
CAPÍTULO I. LA VIVIENDA MEXICANA DE ADOBE: UN ACERCAMIENTO TERRITORIAL Y SOCIOCULTURAL	23
Introducción	25
1.1. Marco conceptual de la investigación	31
1.2. El territorio como medio físico-geográfico articulador de la vivienda	39
1.2.1. La vivienda como respuesta al modo de habitar un territorio	43
1.2.2. El territorio y la vivienda de adobe. Simbiosis y adaptación cultural en la construcción con tierra.....	46
1.2.3. El abandono de las culturas constructivas: tradición y modernidad	51
1.3. Territorio y fenómenos naturales: sismicidad y vulnerabilidad	58
1.3.1. Culturas sísmicas. La adaptación constructiva al medio habitable	62

1.3.2. Los sismos y el patrimonio cultural en México. La destrucción y pérdida irreparable de una identidad nacional	68
1.3.3. Punto de partida: el Terremoto de Puebla de 2017 y sus consecuencias en Jojutla de Juárez	71
Conclusiones del capítulo.....	78
CAPÍTULO II. LA TIERRA COMO LEGADO ARQUITECTÓNICO: CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICO-CONSTRUCTIVA DE LAS UNIDADES DE ESTUDIO	81
Introducción: La Situación de la Arquitectura de Tierra en el Siglo XXI.....	83
2.1. La vivienda de adobe en México: orígenes tecnológicos y perspectiva actual	94
2.1.1. Construcción con tierra en México y la tecnología del adobe	96
2.1.2. La desaparición de la arquitectura de tierra en México	103
2.2. El trabajo de campo a partir de la gestión de proyectos.....	113
2.2.1. Casos de estudio, elección y condicionantes	115
2.2.2. Prospección y caracterización constructiva mediante fichas de inspección	119
2.2.3. El levantamiento arquitectónico y fotográfico de las viviendas tradicionales	123
2.2.4. Instrumentos de apoyo de la investigación	129
2.2.5. Xirangua, el uso de los medios audiovisuales para el acervo cultural de la arquitectura vernácula.....	137
2.3. Caracterización tipológica-constructiva de las unidades de estudio.....	142
2.3.1. Jojutla de Juárez, Morelos: la vulnerabilidad sísmica en su máximo exponente...	143
2.3.2. San Pablo Etla, Oaxaca: la vivienda rural y el abandono de estos espacios	157
2.3.3. Copainalá, Chiapas: la alteración de la tradición constructiva de adobe con materiales industrializados.....	162
2.3.4. Ario de Rosales, Michoacán: la importancia del adobe en los centros históricos .	166
2.3.5. Santa Cruz de Morelos, Michoacán. La adaptación bioclimática de la vivienda de adobe en Tierra Caliente	171

Conclusiones del capítulo.....	178
 CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA VIVIENDA DE ADOBE MEXICANA. ESTUDIO Y APLICACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS	 183
 Introducción.....	 185
 3.1. Vulnerabilidad sísmica y riesgos.....	 190
3.1.1. Riesgo sísmico en México y su afectación al patrimonio cultural	191
3.1.2. La vulnerabilidad sísmica de la arquitectura de tierra y la vivienda de adobe	194
 3.2. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica.....	 198
3.2.1. Historia y clases de métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica.....	198
3.2.2. Aplicación y desarrollo de MEVS en América Latina y casos de estudio análogos	201
3.2.3. Elección de los MEVS para su aplicación a los casos de estudio	204
 3.3. Estudio de los parámetros de vulnerabilidad sísmica	 218
3.3.1. Relación de esbeltez	220
3.3.2. Separación máxima entre elementos portantes.....	224
3.3.3. Calidad del sistema resistente.....	227
3.3.4. Resistencia convencional del sistema estructural	229
3.3.5. Organización y conexión del sistema estructural	232
3.3.6. Sistema de cimentación y características del terreno	234
3.3.7. Sistema de diafragma horizontal	237
3.3.8. Sistema de cubierta.....	239
3.3.9. Relación de huecos/vanos	241
3.3.10. Desalineación de las aberturas	243
3.3.11. Número de niveles del inmueble	244
3.3.12. Daño estructural previo y estado de conservación	245
3.3.13. Índice de masa de la construcción.....	248

3.3.14.	Irregularidad en planta.....	250
3.3.15.	Irregularidad en altura	252
3.3.16.	Posición e interacción del edificio con otros inmuebles	254
3.3.17.	Presencia de elementos no-estructurales	256
3.3.18.	Presencia de edificios adyacentes con diferente altura.....	257
3.3.19.	Efecto de la heterogeneidad estructural y/o tipológica entre edificios adyacentes 259	
3.3.20.	Diferencia en porcentaje de aberturas con edificios adyacentes	261
3.3.21.	Número de estructuras horizontales interpuestas	263
3.4.	Aplicación de MEVS en casos de estudio de viviendas de adobe en la región centro y sur-occidente de México.....	266
3.4.1.	Resultados obtenidos con el método GNDT.....	267
3.4.2.	Resultados obtenidos con el método propuesto por R. Vicente	275
3.4.3.	Resultados obtenidos con el método SVIVA	284
3.4.4.	Resultados obtenidos con el método SAVVAS	291
	Conclusiones del capítulo.....	297
	CAPÍTULO IV. EN BUSCA DE UNA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE TIERRA	307
	Introducción.....	309
4.1.	Antecedentes de la investigación y la caracterización de materiales de tierra	314
4.1.1.	Perspectiva global del estado del arte en la caracterización de materiales y sistemas constructivos de tierra.....	314
4.1.2.	Casos de estudio, toma de las muestras y preparación de los materiales.....	319
4.2.	Propuesta metodológica para la caracterización de adobes	327
4.2.2.	Resistividad eléctrica	332
4.2.3.	Colorimetría	334
4.2.4.	Granulometría	337

4.2.5. Límites de Atterberg	338
4.2.6. Medición del potencial de hidrógeno.....	341
4.2.7. Fluorescencia de Rayos X.....	343
4.2.8. Difracción de Rayos X.....	344
4.2.9. Microscopía Electrónica de Barrido	345
4.2.10. Compresión simple uniaxial	347
4.2.11. Ensayo de carga puntual point load	349
4.2.12. Ensayo triaxial no consolidado no drenado	353
4.2.13. Esfuerzo de ruptura a flexión.....	355
4.2.14. Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	356
4.2.15. Esfuerzo-deformación unitaria y módulo de elasticidad.....	358
4.2.16. Prueba de absorción capilar	360
4.3. Discusión de resultados	362
4.3.1. Caracterización físico-química del material	362
4.3.2. Caracterización mecánica	380
4.3.3. Caracterización de la durabilidad frente al agua.....	389
Conclusiones.....	391
CONCLUSIONES GENERALES	397
BIBLIOGRAFÍA	403

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0.1. Afectación sísmica y desplazamientos del macrolemento fachada del conjunto conventual de San Miguel Charo, Michoacán, México (Sánchez Calvillo A. , 2017).....	2
Figura 0.2. Antiguo inmueble de adobe abandonado en la localidad de Villa de Leyva, Boyacá, Colombia. (Fotografía: A. Sánchez-Calvillo, 2021).	6
Figura 0.3. Esquema metodológico de la investigación.....	12
Figura 0.4. Viviendas de adobe con distinta afectación sísmica en la localidad de Jiquipilas, Chiapas, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	19
Figura 0.5. Arquitectura de adobe y tapia en Cartago, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).....	20
Figura 0.6. Arquitectura de bahareque en el Cairo, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).....	20
Figura 1.1. La vivienda de adobe como objeto de estudio y ejemplo de la adaptación cultural al entorno habitado. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).	26
Figura 1.2. Daños presentados en viviendas de adobe de Jojutla de Juárez, Morelos, México. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza; A. Sánchez-Calvillo, 2018).....	27
Figura 1.3. Categorías, conceptos y subconceptos teóricos de la investigación.	33
Figura 1.4. Escala metodológica del fenómeno de estudio, la vivienda de adobe. Niveles de lectura: 1) Territorio, 2) Vivienda, 3) Sistema, 4) Material. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís-Sánchez, 2021; A. Sánchez-Calvillo, 2019; A. Sánchez Calvillo <i>et. al.</i> , 2020).	36
Figura 1.5. Recuperación y reutilización del patrimonio arquitectónico afectado por desastres naturales en Antigua Guatemala, Guatemala. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).....	37
Figura 1.6. Capilla de la ex hacienda de San Andrés Coapa, municipio de Acuitzio del Canje, Michoacán, México. Fotografía de dron: (A. Solís Sánchez, 2021).	38
Figura 1.7. Hacienda de Tahuejo, Taretan, Michoacán. Fotografía aérea tomada con dron, ejemplo de la inserción de las prácticas espaciales y espacios de producción en el territorio. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).....	41
Figura 1.8. Paisaje en el Cairo, en la región del Eje Cafetero del Valle del Cauca, Colombia. El cultivo del café, una planta no endémica de la región, ha transformado el modo de vida de las comunidades. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).	43
Figura 1.9. Troje purépecha rodeada por un cultivo de maíz en Charapan, Michoacán. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).	44
Figura 1.10. Casa con recuerdos nº13 en Antigua Guatemala, Guatemala. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	45
Figura 1.11. Usuarios de una vivienda de adobe en Ihuatzio, Michoacán. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz, 2021).....	46
Figura 1.12. Vivienda tradicional de bajareque en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).....	47
Figura 1.13. Producción y secado de adobes en Erongarícuaro, Michoacán, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).....	50

Figura 1.14. Tzintzuntzan, Michoacán, cuando la transición entre lo tradicional y lo moderno carece de buenas prácticas y sensibilidad. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).	54
Figura 1.15. Distribución municipal del porcentaje remanente de vivienda vernácula en el estado de Michoacán. Mapa elaborado por el autor en ArcMap 10.3. Fuente: (INEGI, 2015).	55
Figura 1.16. Entrevista a antigua usuaria de una construcción de adobe actualmente abandonada. Fuente: Documental Xirangua (Sánchez, 2021).	56
Figura 1.17. Placas tectónicas, regiones sísmicas y principales volcanes de México. Fuente: INEGI	59
Figura 1.18. Viviendas de adobe en Antigua Guatemala, Guatemala, rodeadas por un paisaje volcánico altamente sísmico. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	61
Figura 1.19. Viviendas de adobe y su distinta respuesta sísmica en Jiquipilas, Chiapas, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	63
Figura 1.20. Refuerzo de madera en esquina de una vivienda de adobe en Buga, Valle del Cauca, Colombia. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).	65
Figura 1.21. Viviendas tradicionales de adobe en Hueyapan, Morelos. Fotografías: (Ríos Ramírez & Porcayo Victoriano, 2019)	67
Figura 1.22. Efectos del Terremoto de Puebla de 2017 en el patrimonio cultural de Jojutla de Juárez, Morelos. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo; E.G. Navarro-Mendoza, 2018).	68
Figura 1.23. Ayuda humanitaria proporcionada en Jojutla de Juárez, mayo 2018. Fotografías: (E.G. Navarro-Mendoza; A. Sánchez-Calvillo, 2018).	71
Figura 1.24. Mapa de intensidad sísmica del sismo de Puebla de 2017 y escala de intensidad MacroSísmica. Fuente: Atlas Nacional de Riesgos, mapa generado por el Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM).	72
Figura 1.25. Daños graves en la Iglesia de San Miguel de Jojutla. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).	73
Figura 1.26. Colapso total de vivienda de adobe en Jojutla. Fotografía: (E. G. Navarro-Mendoza; A. Sánchez-Calvillo, 2018).	74
Figura 1.27. Escuela Taller de Jojutla, por Alberto Kalach. Fotografías: (Cortesía de Taller de Arquitectura X – Alberto Kalach, 2020)	76
Figura 1.28. Jardines centrales de Jojutla. Fotografía: (D. Alonso, 2019).	76
Figura 2.1. Vivienda abandonada en San Andres Coapa, Michoacán México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).	85
Figura 2.2. Factores de deterioro de la arquitectura de tierra: (a) Vivienda abandonada en San Nicolás Obispo, Michoacán; (b) Ejemplo de mala intervención constructiva en Quiroga, Michoacán. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2020; A. Sánchez-Calvillo, 2019).	86
Figura 2.3. Talleres de construcción con tierra realizados durante el SIACOT 2019 en Oaxaca, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	88
Figura 2.4. Gando Teacher's Housing en Gando, Burkina Faso, por Kéré Architecture. Fotografía: (E. J. Ouwerkerk, 2021).	89
Figura 2.5. Módulo experimental de bajareque en la Escuela Taller de Boyacá en Tunja, Boyacá, Colombia. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).	91

Figura 2.6. Vivienda tradicional de adobe en Jiquipilas, Chiapas, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	94
Figura 2.7. Yácatas de Ihuatzio, Michoacán, México. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).	98
Figura 2.8. Muro de tapia en vivienda de Cartago, Valle del Cauca, Colombia. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).	99
Figura 2.9. Modelo de casa maya en San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	100
Figura 2.10. Imagen urbana tradicional en Pátzcuaro, Michoacán, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2018).	102
Figura 2.11. Comparativa de la vivienda mexicana según el material predominante en muros en los censos de 2000 y 2020. (a) XII Censo General de Población y Vivienda 2000; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2000) (INEGI, 2021).	104
Figura 2.12. Gráfico de distribución porcentual de la vivienda de adobe en México y las entidades federativas estudiadas entre los años 2000 y 2020. Gráfico elaborado por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2000) (INEGI, 2015).	105
Figura 2.13. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Morelos (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).	106
Figura 2.14. Porcentaje de vivienda de adobe respecto al total por municipios en el estado de Morelos. Mapa elaborado por A. Sánchez-Calvillo en ArcMap 10.3. Fuente: (INEGI, 2015).	107
Figura 2.15. Comparación entre arquitectura de tierra y variables poblacionales y socio-económicas en el estado de Morelos, México. (a) Mapa coroplético de arquitectura en tierra por municipio; (b) Mapa coroplético de población y principales núcleos por municipio; (c) Mapa coroplético de densidad de población por municipio; (d) Mapa coroplético de ingresos medios por municipio. Mapas elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015).	108
Figura 2.16. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Michoacán de Ocampo (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).	109
Figura 2.17. Porcentaje de arquitectura tradicional y su presencia por municipios en el estado de Michoacán. Mapa elaborado por el autor en ArcMap 10.3. Fuente: (INEGI, 2015).	110
Figura 2.18. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Oaxaca (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).	111
Figura 2.19. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Chiapas (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).	112
Figura 2.20. Trabajo de campo en Jojutla de Juárez, con el apoyo del Instituto Tecnológico de Zacatepec. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).	116
Figura 2.22. Llenado de las fichas de inspección durante el trabajo de campo. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	121
Figura 2.23. Modelo de la ficha de inspección con instrucciones para los estudiantes.	122

Figura 2.24. Ejemplo de llenado de ficha de inspección.....	123
Figura 2.25. Proceso del levantamiento arquitectónico de viviendas de adobe en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (V. M. Pompa-Pureco, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).	124
Figura 2.26. La fotografía como reflejo: (a) Hombre fumando en la puerta de su vivienda en El Cairo, Valle del Cauca, Colombia; (b) Perro en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís Sánchez, 2021).	125
Figura 2.27. La fotografía para el estudio espacial y compositivo de la vivienda: (a) Panorámica de vivienda de bajareque en El Cairo, Valle del Cauca, Colombia; (b) Interior de estancia en vivienda de adobe en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís Sánchez, 2021).	126
Figura 2.28. La fotografía para el estudio de la técnica constructiva: (a) Muro combinado de tapia y adobe en Buga, Valle del Cauca, Colombia; (b) Sistema constructivo de bahareque en El Cairo, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).	126
Figura 2.29. La fotografía para el registro y documentación de la experimentación en el laboratorio. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).	127
Figura 2.30. Proceso de levantamiento fotográfico en las viviendas de Ario de Rosales. Fotografías: (L. Arriaga-Vitela, 2021)	128
Figura 2.31. Taller de uso de dron en las instalaciones de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2022).	129
Figura 2.32. Distribución de los encuestados nacionales respecto a su institución educativa. Fuente: Google MyMaps.	131
Figura 2.33. Resultados del cuestionario aplicado a alumnos de educación superior relacionados con el ámbito de la construcción.	132
Figura 2.34. Vivienda sustentable BTC en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas. Fotografía cortesía de Bienal de Arquitectura de Chiapas.	133
Figura 2.35. Entrevista a dos hermanos propietarios de una troje en Charapan. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz y L. Arriaga-Vitela, 2021).	136
Figura 2.36. Pósters promocionales de Xirangua, elaborados por J. D. Machorro-Santacruz... ..	138
Figura 2.37. Grabación de entrevista a usuarios de viviendas tradicionales en la localidad de Ihuatzio. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz, 2021).	139
Figura 2.38. Estreno de Xirangua en el Centro Cultural Clavijero de Morelia.	140
Figura 2.39. Pósteres promocionales del festival CINETEKTON 2022 de Puebla.	141
Figura 2.40. Daños en los inmuebles del centro de Jojutla. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E.G. Navarro-Mendoza, 2018).	144
Figura 2.41. Equipo de trabajo con los responsables del Instituto Tecnológico de Zacatepec. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).	145
Figura 2.42. Reporte de daños del Sismo de Puebla de 2017. Zonificación de los inmuebles dañados en Jojutla de Juárez. Mapa elaborado por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: Brigadas de emergencia.	146
Figura 2.43. Vivienda severamente dañada tras el sismo con claras modificaciones al sistema constructivo original. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).	149

Figura 2.44. Obras de emergencia en el ayuntamiento de Jojutla. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).....	150
Figura 2.45. Separación de aplanado de cemento tras el Sismo de Puebla de 2017. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).	151
Figura 2.46. Equipo de salvamento proporcionado por Japón. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).....	153
Figura 2.47. Demolición en predio. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).	154
Figura 2.48. Horno tabiquero con material de desecho usado como combustible. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).	155
Figura 2.49. Precipitación mensual (mm), en Jojutla de Juárez 1977-2016. Fuente: Base de Datos Climatológica Nacional CLICOM.	156
Figura 2.50. Localización de las viviendas muestreadas en San Pablo Etla, Oaxaca, México. Fuente: Google Earth.	159
Figura 2.51. Vivienda tradicional típica de San Pablo Etla, Oaxaca. Fotografía: (I. Velasco-Hernández y K. L. Salvador-Alcalá, 2020).....	160
Figura 2.52. Elementos constructivos en las viviendas de adobe de San Pablo Etla, Oaxaca, México: (a) Columnas de ladrillo cerámico en pórtico; (b) Sistema de cimentación de mampostería irregular; (b) Mampostería de adobe rejuntada con mortero de barro. Fotografías: (I. Velasco-Hernández y K. L. Salvador-Alcalá, 2020).....	161
Figura 2.53. Entramados característicos de los sistemas de cubierta en San Pablo Etla, Oaxaca, México: (a) Entramado a base de tablones de madera; (b) Entramado a base de carrizos. Fotografías: (I. Velasco-Hernández y K. L. Salvador-Alcalá, 2020).....	161
Figura 2.54. Precipitación mensual (mm) y promedio de días con precipitaciones en CO, Chiapas. Fuente: Meteonorm v8.1.1	163
Figura 2.55. Viviendas de adobe de Copainalá. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020).	164
Figura 2.56. Sustitución de las cubiertas en Copainalá, Chiapas, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020).	165
Figura 2.57. Soluciones constructivas en muros de adobe: (a) Revestimiento con mortero de cemento; (b) Acabado aparente de la mampostería. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020).....	165
Figura 2.58. Toma aérea de Ario de Rosales. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021). ..	166
Figura 2.59. Trabajo de campo y prospección de viviendas en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	168
Figura 2.60. Viviendas señoriales AR26 y AR27 en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	168
Figura 2.61. Configuraciones y plantas arquitectónicas de las viviendas de Ario de Rosales, Michoacán, México. Escala 1/500.	169
Figura 2.62. Inmuebles de uso comercial en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	170
Figura 2.63. Sistema tradicional de cubierta y modificación mediante láminas plásticas. Fotografías: (A. Solís Sánchez, 2021; A. Sánchez-Calvillo, 2020).	170

Figura 2.64. Viviendas abandonadas a las afueras de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).	171
Figura 2.65. Vista aérea de la configuración urbana de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).....	172
Figura 2.66. Paisaje de Santa Cruz de Morelos en estación seca y estación húmeda. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, A. Sánchez-Calvillo, 2021).	173
Figura 2.67. Tipologías constructivas en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	174
Figura 2.68. Fachadas porticadas en viviendas de adobe de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	174
Figura 2.69. Distintas tipologías de cubiertas en viviendas tradicionales de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	175
Figura 2.70. Cocinas tradicionales de otate en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	176
Figura 2.71. Trojes de bajareque en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).....	177
Figura 2.72. Experiencias en el trabajo de campo con los usuarios de las viviendas tradicionales. Fotografías: (M. A. Pérez-Coeto, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).	179
Figura 2.73. Actividades de formación generadas en los proyectos con estudiantes de licenciatura: (a) Conferencia sobre construcción con tierra; (b) Taller Test Carazas en el laboratorio de mecánica de suelos. Fotografías: (M. A. Navarrete-Seras, A. Solís-Sánchez, 2021).	180
Figura 3.1. Destrucción de la Iglesia de San Miguel Arcángel en Jojutla de Juárez, Michoacán, México. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).....	186
Figura 3.2. Regionalización sísmica de la República Mexicana. Fuente: Atlas Nacional de Riesgos.	192
Figura 3.3. Ayuntamiento de Jojutla de Juárez, Morelos, México. Fotografía: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).	192
Figura 3.4. Daños producidos en viviendas de adobe tras el terremoto de Chiapas de 2017 (b) Grieta en muro de vivienda de San Andrés Hueyapan, Oaxaca; (b) Colapso de muro en Jiquipilas, Chiapas. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).....	195
Figura 3.5. Estructuras de adobe afectadas en Jojutla de Juárez. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).	197
Figura 3.6. Resumen de métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica (Flores Salazar & Ferreira, 2019).....	199
Figura 3.7: Centro urbano de Ario de Rosales. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021)	211
Figura 3.8: Distribución del parámetro Relación de esbeltez.	222
Figura 3.9. Relación de esbeltez en los casos de estudio: (a) Medición del grosor de muro en SPE; (b) Visualización de la esbeltez en muros de vivienda en SC. Fotografías: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).....	222
Figura 3.10. Variabilidad del parámetro Esbeltez de los muros en las viviendas de los diferentes casos de estudio con la aplicación de SVIVA y SAVVAS.	223

Figura 3.11. Ejemplos de distribuciones espaciales y separación entre muros portantes: (a) Vivienda en SC; (b) Vivienda en AR. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	224
Figura 3.12. Distribución del parámetro Separación máxima entre elementos portantes.	226
Figura 3.13. Variabilidad del parámetro Separación máxima entre elementos portantes en las viviendas de los diferentes casos de estudio con la aplicación de SVIVA y SAVVAS.	226
Figura 3.14. Distribución del parámetro Calidad del sistema resistente.	229
Figura 3.15. Distribución del parámetro Resistencia convencional del sistema estructural.	232
Figura 3.16. Organización y conexión del sistema estructural: (a) Cuatrapeo de mampostería de adobe en San Pablo Etla, Oaxaca, México; (b) Refuerzo de madera en esquina de una vivienda en Buga, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (K. L. Salvador-Alcalá y Y. Velasco-Hernández, 2020; A. Sánchez-Calvillo, 2021).	233
Figura 3.17. Distribución del parámetro Organización y conexión del sistema estructural.	233
Figura 3.18. Sistemas de cimentación en viviendas de adobe: (a) Cimentación y sobrecimentación tradicional con piedra volcánica en Tzintzuntzan, Michoacán, México; (b) Pérdida y disgregación por humedad de capilaridad en vivienda de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez Calvillo, 2020; 2021).	235
Figura 3.19. Diferencia de cota e inclinación del terreno en viviendas de adobe: (a) Vivienda con cimentación tradicional de roca e inclinación ligera del terreno en SPE, Oaxaca; (b) vivienda en vialidad con pendiente pronunciada en CO, Chiapas. Fotografías: (K. L. Salvador-Alcalá y Y. Velasco-Hernández, 2020; L. J. Díaz-Juárez, 2020).	236
Figura 3.20. Distribución del parámetro Sistema de cimentación y características del terreno.	236
Figura 3.21. Sistemas de diafragma en viviendas de adobe: (a) Sistema con viguería simple de madera apoyada sobre los muros en vivienda de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México; (b) Sistema de viguería encastada en los muros y tableros de madera en vivienda de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	238
Figura 3.22. Distribución del parámetro Sistema de diafragma horizontal.	238
Figura 3.23. Toma aérea de dron del centro de Ario de Rosales. Pueden observarse los sistemas originales de cubierta y la incipiente sustitución en algunas áreas. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021)	239
Figura 3.24. Alteraciones de las cubiertas tradicionales en los casos de estudio: (a) Sustitución por cubierta metálica en vivienda en San Pablo Etla, Oaxaca, México; (b) Extensión del alero mediante cubierta semiplástica en vivienda de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020; A. Sánchez-Calvillo, 2020).	240
Figura 3.25. Distribución del parámetro Sistema de cubierta.	241
Figura 3.26. Vanos en fachada de vivienda en San Pablo Etla, Oaxaca, México. Fotografía: (K. L. Salvador-Alcalá y I. Velasco-Hernández, 2020).	242
Figura 3.27. Distribución del parámetro Relación de huecos.	242
Figura 3.28. Ejemplos de desalineación de aberturas en los casos de estudio: (a) Apertura de puerta secundaria en vivienda de Copainalá, Chiapas, México; (b) Muro con vanos excesivos en vivienda de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).	243
Figura 3.29. Distribución del parámetro Desalineamiento de las aberturas.	244

Figura 3.30. Ejemplos de distribución de niveles en viviendas de adobe: (a) Edificio de dos plantas en el centro de Cartago, Valle del Cauca, Colombia; (b) Vivienda aislada de un nivel en San Pablo Etla, Oaxaca, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; K. L. Salvador-Alcalá y I. Velasco-Hernández, 2020).....	245
Figura 3.31. Distribución del parámetro Número de niveles.	245
Figura 3.32. Vivienda SC01 en grave estado de deterioro en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	246
Figura 3.33. Vivienda en grave estado de deterioro en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).	247
Figura 3.34. Distribución del parámetro Daño estructural previo y estado de conservación.....	248
Figura 3.35. Distribución del parámetro Índice de masa.	249
Figura 3.36. Vivienda en forma de U o U invertida en AR. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).	251
Figura 3.37. Distribución del parámetro Irregularidad en planta en los métodos GNDT, Formisano y Vicente.	252
Figura 3.38. Irregularidad en altura de la vivienda AR29 por cambio de uso a estacionamiento. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).	253
Figura 3.39. Distribución del parámetro Irregularidad en altura en los métodos GNDT, Formisano y Vicente.	253
Figura 3.40. Conjunto de agregados urbanos en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021)	254
Figura 3.41. Distribución del parámetro Posición e interacción del edificio con otros inmuebles.	255
Figura 3.42. Distribución del parámetro Presencia de elementos no estructurales.	256
Figura 3.43. Alteración de los sistemas tradicionales y las fachadas mediante cornisas y ménsulas en aberturas de viviendas de AR. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).....	257
Figura 3.44. Asignación de clases de vulnerabilidad según la interacción en altura entre edificios (Formisano A. et al., 2011).	258
Figura 3.45. Distribución del parámetro Presencia de edificios adyacentes con diferente altura.	258
Figura 3.46. Viviendas de adobe situadas junto a edificaciones de mayor altura: (a) Vivienda entre dos edificaciones más altas en Copainalá, Chiapas, México; (b) Vivienda junto a construcción de concreto armado de mayor altura en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).....	259
Figura 3.47. Heterogeneidad estructural entre construcciones: (a) Vista desde una vivienda de adobe en Copainalá, Chiapas, México; (b) Vivienda de adobe en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021)	260
Figura 3.48. Heterogeneidad estructural en las mismas viviendas: (a) Columna de tabique recocido con mortero de unión a base de tierra; (b) Combinación entre sistemas de muros: adobe, madera y bloque de cemento. Fotografías: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020).....	260
Figura 3.49. Distribución del parámetro Efecto de la heterogeneidad estructural entre edificios adyacentes.	261

Figura 3.50. (a) Agregado de viviendas de bahareque con porcentaje de aberturas similar; (b). Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021, A. Solís-Sánchez, 2020).	262
Figura 3.51. Clases de vulnerabilidad según la diferencia en porcentaje de aberturas en fachadas de edificios adyacentes (Formisano A. et al., 2011)	262
Figura 3.52. Distribución del parámetro Diferencia en porcentaje de aberturas en edificios adyacentes.	263
Figura 3.53. Clases de vulnerabilidad según el número de estructuras horizontales interdispuestas (Formisano A. et al., 2011).	263
Figura 3.54. Distribución del parámetro Número de estructuras horizontales interpuestas.	264
Figura 3.55. Viviendas de adobe con estructuras horizontales interdispuestas en el agregado urbano: (a) Vivienda CO10 en Copainalá, Chiapas, México; (b) Vivienda AR28 en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).	264
Figura 3.56. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros del método GNDT.	267
Figura 3.57. Histograma de distribución del índice de vulnerabilidad (I_v) con la aplicación del método GNDT.	268
Figura 3.58. Distribución normal ajustada del I_v de los casos de estudio según el método GNDT.	269
Figura 3.59. Predicción del grado de daño en función de la aceleración sísmica.	270
Figura 3.60. Grado de daño (d) en función de la aceleración sísmica (g) con los I_v obtenidos de los distintos casos de estudio.	271
Figura 3.61. Aceleraciones máximas del terreno para la República Mexicana. Fuente: (Comisión Federal de Electricidad , 2008).	272
Figura 3.62: Correlación del grado de daño (d) en función de la aceleración sísmica (g) de los distintos casos de estudio y la aceleración de diseño sísmico generada en PRODISIS.	272
Figura 3.63. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros P11-P15 adicionados del método de Formisano.	273
Figura 3.64. Conjuntos de agregados y traza urbana de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).	274
Figura 3.65. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros del método propuesta por Romeu Vicente.	276
Figura 3.66. Histograma de distribución del índice de vulnerabilidad (I_v) con la aplicación del método de Vicente.	277
Figura 3.67. Distribución normal ajustada del I_v de los casos de estudio según el método de Vicente.	277
Figura 3.68. Curvas de vulnerabilidad generadas con el método de R. Vicente.	279
Figura 3.69. Comparativa de las curvas de vulnerabilidad de los casos de estudio con el método de R. Vicente.	280
Figura 3.70. Curvas de fragilidad obtenidas por el método de R. Vicente.	281
Figura 3.71. Probabilidades de colapso y viviendas inutilizables obtenidas por el método de R. Vicente.	282

Figura 3.72. Probabilidades de personas damnificadas y sin hogar obtenidas por el método de R. Vicente.	283
Figura 3.73. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros del método SVIVA.	284
Figura 3.74. Histograma de distribución del índice de vulnerabilidad (I_v) con la aplicación del método SVIVA.	285
Figura 3.75. Distribución normal ajustada del I_v de los casos de estudio según el método SVIVA.	286
Figura 3.76. Curvas de vulnerabilidad generadas con SVIVA.	287
Figura 3.77. Comparativa entre las curvas de vulnerabilidad de los cuatro casos de estudio generadas con SVIVA.	288
Figura 3.78. Curvas de fragilidad generadas con SVIVA.	289
Figura 3.79. Probabilidad de colapso e inmuebles inservibles en función de la intensidad sísmica.	290
Figura 3.80. Estimación de damnificados y personas sin hogar en función de la intensidad sísmica.	290
Figura 3.81. Histograma de distribución de los factores de carga por estado límite con la aplicación del método SAVVAS.	291
Figura 3.82. Curvas de vulnerabilidad generadas con SAVVAS.	294
Figura 3.83. Comparativa entre las curvas de vulnerabilidad de los cuatro casos de estudio generadas con SAVVAS.	294
Figura 3.84. Curvas de fragilidad generadas con SAVVAS.	295
Figura 3.85. Probabilidades de colapso y viviendas inutilizables obtenidas con SAVVAS.	296
Figura 3.86. Probabilidades de personas damnificadas y sin hogar obtenidas con SAVVAS.	296
Figura 3.87. Gráfica de correlación logística entre el método de Vicente y SVIVA para los casos de estudio de Ario de Rosales y Santa Cruz de Morelos.	298
Figura 3.88. Vivienda SPE09 con elementos de refuerzo. Fotografía: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020).	299
Figura 3.89. Estado de conservación de la vivienda AR14. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).	300
Figura 3.90. Correlación de la distribución normal de los métodos de índice de vulnerabilidad y su adecuación a las clases definidas por la EMS-98 para las tipologías de vivienda de adobe.	302
Figura 4.1. Materiales tradicionales de la arquitectura vernácula de Michoacán: roca, madera y tierra. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2019; A. Sánchez-Calvillo, 2020).	310
Figura 4.2. Construcciones de adobe con intervenciones no compatibles: (a) Vivienda en Tzintzuntzan, Michoacán, México; (b) Muro perimetral en Quiroga, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).	310
Figura 4.3. Proceso de caracterización de los adobes en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”. Fotografías: (D. Preciado-Villicaña, 2019; A. Sánchez-Calvillo, 2020).	313
Figura 4.4. Recolección de muestras de adobe en Jojutla de Juárez. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).	320

Figura 4.5. Localización de las muestras de adobe en viviendas afectadas por el sismo de 2017 y comparativa con la zonificación de daños de la localidad de Jojutla de Juárez. Mapa elaborado por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: Brigadas de emergencia.	322
Figura 4.6. Localización de muestras de suelos inalterados de Jojutla de Juárez: (a) Excavación en la colonia Emiliano Zapata; (b) Banco de arcilla local. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).	322
Figura 4.7. Hacienda en Santa Cruz de Morelos. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).	323
Figura 4.8. Hacienda de la rancharía el Cuatro, en La Huacana. Fotografías: (F. Tobón, 2016).	323
Figura 4.9. Casos de estudio de arquitectura monumental del proyecto DBMC 2020: a) Hacienda de San Joaquín Jaripeo; b) Capilla de San Andrés Coapa; c) Templo Inconcluso de Taretan. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).	324
Figura 4.10. Labrado y preparación de las muestras de la Huacana y Santa Cruz de Morelos. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).	325
Figura 4.11. Labrado y preparación de las muestras de Jojutla de Juárez. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	326
Figura 4.12. Proceso de trituración de las muestras en polvo. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	326
Figura 4.13. Metodología de caracterización de materiales de tierra diseñada para la investigación y grupos de ensayos.	330
Figura 4.14. Equipo de medición de la humedad y procedimiento de ensayo. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).	331
Figura 4.15. Ensayo de resistividad eléctrica. (a) Equipo de medición; (b) Procedimiento de ensayo en muestra de adobe de Tierra Caliente. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021).	333
Figura 4.16. Tonalidades de adobes (a) Sección de muro en Ihuatzio, Michoacán; (b) Muro del Templo Inconcluso de Taretan, Michoacán. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).	334
Figura 4.17. Equipo y proceso de medición del color (a) Colorímetro CLRM-200; (b) Lecturas con el equipo colorimétrico en adobes de Tierra Caliente. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2018; M. Ruiz-Mendoza, 2020).	336
Figura 4.18. Instrumental de tamices ASTM y procedimiento de cribado. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019; M. Ruiz-Mendoza, 2020).	337
Figura 4.19. Material separado y clasificado tras el proceso de cribado de las muestras de Jojutla de Juárez. Fotografías: (D. Preciado-Villicaña, 2019).	338
Figura 4.21. Procedimiento del ensayo de los límites de consistencia: (a) Determinación del límite líquido mediante la copa de Casagrande; (b) Formación de los cilindros para el cálculo del límite plástico. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).	340
Figura 4.22. Material resultante del límite líquido, límite plástico, contracción lineal y contracción volumétrica. Muestras de Taretan y Santa Cruz de Morelos. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).	340
Figura 4.23. Equipo y proceso de lectura del potencial de hidrógeno con medidor de pH digital. Fotografías: (D. Preciado-Villicaña, 2019).	342

Figura 4.24. Equipo y proceso de medición del potencial de hidrógeno con tiras reactivas. Fotografías: (D Preciado-Villicaña, 2019).	343
Figura 4.25. Cabeceado de las muestras de Jojutla de Juárez. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	347
Figura 4.26. Proceso de cabeceado de los cilindros de la Huacana y Santa Cruz de Morelos. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).	348
Figura 4.27. Ensayo de compresión simple uniaxial y rotura del espécimen de adobe. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021).	349
Figura 4.28. Fragmentos y esquirlas de bloques de adobe de Jojutla de Juárez. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).	351
Figura 4.29. Modo de falla de los especímenes durante el ensayo point load. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).	353
Figura 4.30. Cámara triaxial y manómetro y válvulas para la presión de confinamiento. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).	354
Figura 4.31. Ensayo de ruptura a flexión. (a) Viga de adobe antes de aplicar la carga; (b) Modo de falla y ruptura de la viga de adobe. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021).	356
Figura 4.32. Equipo y procedimiento de ensayo de la velocidad de pulso ultrasónico. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019; M. Ruiz-Mendoza, 2021).	357
Figura 4.33. Preparación del equipo y las muestras para el ensayo de determinación del módulo de elasticidad estático. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).	359
Figura 4.34. Falla de los especímenes de adobe tras el ensayo de esfuerzo-deformación. Fotografías: M. Ruiz-Mendoza, 2020).	360
Figura 4.35. Procedimiento del ensayo de sortividad o absorción capilar. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021).	361
Figura 4.36. Tonalidades de materiales en distintos casos de estudio. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza, 2018; C. Bernabé-Reyes, 2018; A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís-Sánchez, 2021).	365
Figura 4.37. Valores colorimétricos a^* y b^* de los casos de estudio.	365
Figura 4.38. Curvas granulométricas de adobes y suelos naturales.	366
Figura 4.39. Adobes de Jojutla de Juárez con proporciones muy distintas de fibras vegetales. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2018).	368
Figura 4.40. Carta de plasticidad y localización de las muestras.	369
Figura 4.41. Resultados XRF de JO, elementos de mayor concentración.	371
Figura 4.42. Resultados XRF de JS, elementos de mayor concentración.	372
Figura 4.43. Resultados FRX de los casos de estudio de adobes patrimoniales.	373
Figura 4.44. Difractograma de adobe de Jojutla de Juárez. Cortesía A. Navarro-Ezquerria.	375
Figura 4.45. Difractograma de adobe de la Huacana. Cortesía A. Navarro-Ezquerria, UPC.	376
Figura 4.46. Difractograma de adobe Santa Cruz de Morelos. Cortesía A. Navarro-Ezquerria, UPC.	376
Figura 4.47. Difractograma de adobe de Taretan. Cortesía A. Navarro-Ezquerria, UPC.	376

Figura 4.48. Imagen SEM de la muestra JO8, microscopio de bajo vacío, muestra sin metalizar. Cortesía E. M. Alonso-Guzmán, FIC-UMSNH y LANCIC-IFUNAM.	377
Figura 4.49. Análisis puntual de la composición elemental de la muestra JO8 a 500 magnificaciones, sin recubrimiento. Cortesía E. M. Alonso-Guzmán, FIC-UMSNH y LANCIC-IFUNAM.	378
Figura 4.50. Mapeo elemental de la muestra JO8 500 magnificaciones, sin recubrimiento. Cortesía E. M. Alonso, FIC-UMSNH y LANCIC-IFUNAM.	378
Figura 4.51. Microfotografías de las fibras contenidas en los adobes de Jojutla de Juárez, la Huacana, Santa Cruz de Morelos y Taretan. Cortesía E. M. Alonso-Guzmán y FIC-IIMM-UMSNH.	379
Figura 4.52. Correlación entre la Resistencia a compresión simple uniaxial y la Resistencia obtenida por el ensayo de Point-Load. (Sanchez-Calvillo, et al., 2021)	382
Figura 4.53. Ecuación de correlación y su variabilidad. Imagen elaborada mediante MATLAB R2017b por M. A. Navarrete-Seras (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).	383
Figura 4.54. Gráfica esfuerzo-deformación de los adobes de Tierra Caliente resultante del ensayo triaxial no consolidado no drenado con distintos grados de confinamiento.....	384
Figura 4.55. Gráfico de esfuerzo-deformación unitaria de adobes de Tierra Caliente.....	388
Figura 4.56. Curvas de absorción capilar de los adobes de Tierra Caliente.....	389
Figura 4.57. Construcción de adobe en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México y la adaptación a un entorno extremadamente cálido y seco. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).	393
Figura C.1. Entrevista a pobladores de Ihuatzio, Michoacán, México (Sánchez, 2021).....	398
Figura C.2. en Charapan, Michoacán, México. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz, 2021).	399
Figura C.3. Diseño y aplicación de revestimientos de tierra mejorada con geles de origen vegetal en la comunidad de Santa Ana Chapitiro, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2022).	402

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 0.1. Parámetros básicos de la investigación doctoral.....	7
Tabla 0.2. Decisiones estratégicas del proyecto de investigación.....	14
Tabla 2.1. Parámetros climáticos promedio mensuales de Jojutla de Juárez.....	145
Tabla 2.2. Revisión e interpretación del Reglamento de Construcción de Jojutla y relación con los daños observados tras el Sismo de Puebla de 2017.....	149
Tabla 2.3. Parámetros climáticos promedio mensuales de San Pablo Etla.....	158
Tabla 2.4. Parámetros climáticos promedio mensuales de Copainalá.....	162
Tabla 2.5. Parámetros climáticos promedio mensuales de Ario de Rosales.....	167
Tabla 2.6. Parámetros climáticos promedio mensuales de Santa Cruz de Morelos.....	172
Tabla 3.1. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método GNDT.....	207
Tabla 3.2. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método propuesto por Antonio Formisano.....	209
Tabla 3.3. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método propuesto por Romeu Vicente.....	212
Tabla 3.4. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método SVIVA.....	214
Tabla 3.5. Relación y peso de parámetros de vulnerabilidad sísmica y presencia en los distintos MEVS aplicados.....	219
Tabla 3.6. Correlación entre aceleraciones de estados límite y espectros de diseño en roca.....	293
Tabla 3.7. Correlación entre índices de vulnerabilidad (V) del EMS-98 e (I_v) de los MEVS de Vicente y Ortega para construcciones de adobe.....	303
Tabla 4.1. Casos de estudio de la investigación.....	320
Tabla 4.2. Inventario, clasificación, fecha de recolección y localización de las muestras de Jojutla de Juárez.....	321
Tabla 4.3. Densidad aparente y humedad de los casos de estudio de la investigación.....	362
Tabla 4.4. Resultados de resistencia y resistividad eléctrica de los adobes ensayados.....	363
Tabla 4.5. Valores de colorimetría de las muestras y representación respecto al sistema CIE..	364
Tabla 4.6. Composición de los adobes y porcentaje de fibras vegetales.....	367
Tabla 4.7. Resumen de las propiedades índice y clasificación SUCS de los distintos casos de estudio.....	370
Tabla 4.8. Resultados de potencial de hidrógeno y contenido de materia orgánica en los adobes y suelos naturales ensayados.....	370
Tabla 4.9. Resultados FRX de las muestras de adobe. Cortesía A. Navarro-Ezquerria.....	372
Tabla 4.10. Cristalografía DRX de suelos de Jojutla (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).....	374
Tabla 4.11. Cristalografía DRX de adobes de Jojutla (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).....	374
Tabla 4.12. Cristalografía DRX de los adobes de los casos de estudio. Cortesía A. Navarro-Ezquerria.....	375

Tabla 4.13. Resultados y parámetros estadísticos de la resistencia mecánica a compresión uniaxial de los adobes ensayados.....	380
Tabla 4.14. Parámetros de cálculo del ensayo point load y resultados de los adobes analizados.	381
Tabla 4.15. Correlación de la resistencia a compresión uniaxial y el esfuerzo point load.....	381
Tabla 4.16. Resumen de resultados del ensayo triaxial no consolidado no drenado y las envolventes de falla generadas para los adobes de Tierra Caliente.	384
Tabla 4.17. Cálculo del esfuerzo de ruptura a flexión de adobes patrimoniales de Tierra Caliente.	385
Tabla 4.18. Correlación de la resistencia a compresión uniaxial y el esfuerzo de ruptura a flexión de adobes patrimoniales de Tierra Caliente.	386
Tabla 4.19. Densidad, velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad dinámico de los adobes ensayados.	387
Tabla 4.20. Resultados del esfuerzo máximo a compresión y módulo de elasticidad estático de los adobes de Tierra Caliente.....	388
Tabla 4.21. Relación entre módulos de deformación de adobes de Tierra Caliente.	389
Tabla 4.22. Coeficiente de absorción capilar de los adobes de Tierra Caliente.....	390
Tabla 4.23. Resumen de propiedades de los adobes a partir de la caracterización.	392

ÍNDICE DE ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS

AR: Ario de Rosales;	pH: Potencial de hidrógeno
CO: Copainalá;	PLT: Point load test, prueba de carga puntual;
DD: Dirección del viento;	PRODISIS: Programa de Diseño Sísmico;
DRX: Difracción de Rayos X;	Q: Grado de ductilidad;
EDS: Energy Dispersive Spectroscopy;	RD: Días con precipitación al mes;
E_d: Módulo de elasticidad dinámico;	RH: Humedad relativa;
E_s: Módulo de elasticidad estático;	RR: Precipitación;
EPSEB: Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona;	SAVVAS: Seismic Assessment of the Vulnerability of Vernacular Architecture Structures;
FF: Velocidad del viento;	SC: Santa Cruz de Morelos;
FRX: Fluorescencia de Rayos X;	SD: Duración de la insolación;
GNDT: Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti;	SPE: San Pablo Etla;
H: Muestras de adobes de la Huacana, estado de Michoacán;	SVIVA: Seismic Vulnerability Index for Vernacular Architecture;
ICOMOS: Consejo Internacional de Monumentos y Sitios;	T_a: Temperatura promedio del aire
I_v: Índice de Vulnerabilidad;	T_{a min}: Media de los valores mínimos diarios de T _a
JJ: Jojutla de Juárez;	T_{a max}: Media de los valores máximos diarios de T _a
JO: Muestras de adobes de Jojutla de Juárez, estado de Morelos;	TA: Muestras de adobes de Taretan, estado de Michoacán;
JS: Muestras de suelos inalterados del municipio Jojutla, estado de Morelos;	UMSNH: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
MEB: Microscopía Electrónica de Barrido;	UPC: Universidad Politécnica de Cataluña
MEVS: Métodos de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica;	VPU: Velocidad de Pulso Ultrasónico
PGA: Aceleración sísmica;	



El mundo está cambiando; tan rápido que a veces no nos damos cuenta. Pero hubo un tiempo en el que todo era distinto, en el que nosotros construíamos nuestros hogares.

Nuestros antepasados nos transmitieron los conocimientos, nos enseñaron a tomar únicamente lo necesario, a respetar la naturaleza, a estar en consonancia con ella, a trabajar la roca, la madera, la tierra... Generación tras generación, con nuestro esfuerzo, con nuestras propias manos. Una cultura, una identidad... que ya no reconocemos en las nuevas generaciones. Pero no queremos perder nuestras raíces, debemos preservarlas, mostrarle al mundo nuestra cultura, y seguirla transmitiendo de generación en generación

Xirangua

INTRODUCCIÓN

Experimentar de primera mano los efectos y consecuencias de un evento sísmico es un hecho que queda marcado en la memoria de un individuo. Estos sucesos destacan por permanecer en la memoria colectiva y constituyen, por lo tanto, un estudio obligado para nuestra sociedad, que está obligada a dejar de cometer los mismos errores que la lectura de la historia nos señala incansablemente. No podemos evitar estos eventos, sin embargo, sí podemos protegernos de ellos al minimizar los efectos durante su ocurrencia (Spence, 2007).

El estudio de estos eventos y el análisis de la vulnerabilidad sísmica son obligados en nuestra sociedad moderna por el elevado impacto que suponen y la minimización de pérdidas que podemos lograr con una mejor gestión de riesgos. Por otro lado, la arquitectura vernácula y la construcción con tierra son una de las materializaciones más representativas que existen de nuestras propias culturas, y este retorno a las raíces es un fenómeno obligado cada vez más demandado por varios sectores de la población (Sánchez, 2021).



Por ello, la unión de ambos universos y el poder analizar la respuesta sísmica de estas construcciones, recuperar y aumentar los conocimientos actuales de la tierra y del adobe, caracterizar el material con la misma tecnología que aplicamos a los sistemas modernos, revalorizar las técnicas tradicionales, etc.; son todas acciones ambiciosas con un último fin, la conservación de este patrimonio universal.

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Los antecedentes de investigación y anteriores trabajos científicos a nivel personal siempre tuvieron un nexo de unión: el patrimonio, representado principalmente en la arquitectura monumental y su afectación sísmica. Parte del interés surgió del curso de los estudios de posgrado de la Especialidad en Restauración de Sitios y Monumentos que estudié en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en la que se realizó un acercamiento a la vulnerabilidad sísmica a partir del análisis por macroelementos del conjunto conventual de San Miguel Charo (ver Figura 0.1), en Michoacán (Sánchez Calvillo A. , 2017).

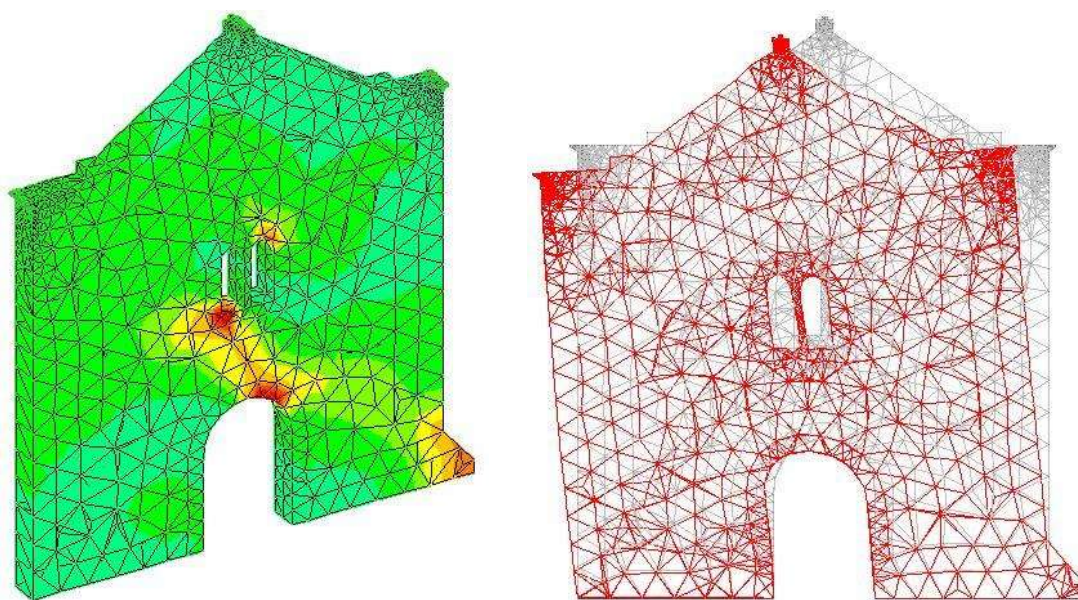


Figura 0.1. Afectación sísmica y desplazamientos del macroelemento fachada del conjunto conventual de San Miguel Charo, Michoacán, México (Sánchez Calvillo A. , 2017).

Sin embargo, para la tesis doctoral se buscó un acercamiento al patrimonio vernáculo, debido a la desprotección sufrida y los mayores retos que presenta a nivel social, económico,



ecológico y cultural. Muchos autores han denunciado la escasez de esfuerzos destinados a preservar esta arquitectura residencial, tan asociada a lo rural, lo indígena, lo pobre o simplemente a la otredad causada por los procesos de globalización e industrialización de la edificación.

El primer acercamiento real al problema de investigación de la tesis doctoral se efectuó en la localidad de Jojutla de Juárez (JJ), tras los eventos sísmicos de 2017, como una inquietud personal por encaminar una serie de esfuerzos e intereses en aportar nuevos conocimientos a un ámbito de la arquitectura. En estas primeras visitas se evidenció un conjunto de problemáticas que generaban en última instancia la pérdida total del patrimonio construido en tierra de la localidad, un fenómeno además totalmente trasladable al resto del país que es propenso a sufrir movimientos telúricos. No obstante, mediante la revisión del estado del arte pudo comprobarse que la vulnerabilidad sísmica sólo es otro atenuante más en la desaparición de la arquitectura vernácula, siendo este un fenómeno global (Correia & Duarte Carlos, 2021).

La tierra es uno de los materiales de construcción más antiguos que se conocen, contando evidencias arqueológicas que atestiguan su uso desde hace miles de años, siendo la base de las primeras grandes urbes de la humanidad. Estos sistemas constructivos se encuentran presentes en todos los continentes habitados, presentando innumerables técnicas y variaciones de las mismas. El uso continuado de estos materiales por milenios ha dado lugar a una gran variedad de arquitecturas y culturas constructivas de tierra alrededor del globo, con una presencia en todos los continentes habitados y una riqueza de soluciones y variaciones regionales que la hacen un interesante objeto de estudio.

Por su parte, México cuenta con un extenso patrimonio de construcciones de tierra, incluyendo el arqueológico y el cultural, y la presencia de diversas técnicas tradicionales como la mampostería de adobe (Guerrero Baca L. F., 2007), la tapia pisada (Guerrero Baca L. F., 2011), o el bajareque (Flores Calvario & Rodríguez Licea, 2020). Existen evidencias del uso de estos sistemas desde los primeros periodos de las civilizaciones prehispánicas, con interesantes ejemplos en sitios arqueológicos residenciales y monumentales (Cuéllar López, 2013). Con la llegada de los españoles al continente americano, el conocimiento constructivo del adobe y de la tapia pisada fue transmitido para la edificación de nuevas ciudades, como



parte de la fuerte tradición constructiva que se trajo desde la Península Ibérica (Correia, Merten, Vegas, Mileto, & Cristini, 2011).

Sin embargo, a partir de la llegada de los materiales modernos, especialmente el concreto armado, los sistemas constructivos de tierra perdieron influencia en el país y empezó un periodo de transición y sustitución que transformó diametralmente la imagen urbana. El nuevo modelo de edificación no tuvo en cuenta los condicionantes del territorio, los recursos locales o las costumbres autóctonas; por ello, la arquitectura vernácula siempre ha destacado y sido reconocida por su perfecta adaptación al entorno.

Precisamente el término de adaptación cultural hace referencia a la integración e interacción del hombre en un territorio, creándose una simbiosis entre los dos; las relaciones que surgen determinarán las identidades del lugar, siendo la arquitectura una de ellas (Niglio, 2015). Son los conceptos de cultura e identidad los que distinguen al ser humano de las demás especies, además de su facultad cognitiva que le permite analizar y procesar la información recibida, dando lugar a la adaptación al medio para su supervivencia (Villalobos, 2017). Por medio de esta adaptación del ser humano a su hábitat, que puede ser más o menos tardía según el caso, se desarrollan un conjunto de actividades que conforman la cultura local e identidad, como son ejemplos el arte o la gastronomía y por supuesto la arquitectura.

Esta última representa la apropiación del medio natural por parte del hombre, una más de sus conquistas, sin embargo, los orígenes de la misma se basaron en el equilibrio entre ambas partes. “[...] la arquitectura en tierra y sus procesos constructivos han mantenido el sentido de propiedad y pertenencia, la autorregulación social, el reforzamiento de grupo, el rito, y el conocimiento situado, favoreciendo así, una constante mantención y construcción de identidades como invariantes vivas.” (Villalobos, 2017, pág. 597) Por ello, la conservación de este patrimonio no implica únicamente la cuestión física de la arquitectura o los bienes muebles, sino que también supone la preservación cultural: “Cultura, pues, es un sistema exclusivamente humano, de hábitos y costumbres que se adquieren por medio de un proceso extrasomático, realizado por el hombre en sociedad, como recurso fundamental para adaptarse al medio ambiente” (Chanfón Olmos, 1983, pág. 51).

Siendo este un fenómeno replicable a todo el continente latinoamericano debido al proceso de colonialismo que inició en el siglo XV, todo el patrimonio construido, física y socialmente,



a través de complejos procesos humanos, generó un gran impacto en la sociedad que dio uso y disfrute a estos objetos arquitectónicos. Campos Goenaga (2018) relata que los inmuebles patrimoniales afectados en el Estado de Morelos fungían en las relaciones sociales de la comunidad y en la preservación y transmisión de los valores culturales. Igualmente, en el enfoque de la vivienda como unidad básica, la importancia para las relaciones humanas es fundamental, obrando como la transición entre cuerpo y comunidad (Ramírez Velázquez & López Levi, 2015, pág. 133). Los procesos de transformación de la sociedad también afectan al objeto arquitectónico, la vivienda, y mientras que algunos modos de vida permanecen en el tiempo como remanente de culturas pasadas, el inexorable avance cambia muchos de estos modos, desapareciendo algunos y transformando o evolucionando otros.

Con los siglos la construcción en tierra ha sufrido un progresivo abandono, quedando desplazada por los nuevos sistemas y materiales y quedando asociada a las clases socio-económicas más bajas contando con una muy baja apreciación. Todos estos factores pueden ser identificados en arquitecturas de tierra y de adobe a nivel global, siendo esta transición entre la arquitectura vernácula y la modernidad un conflicto presente en pueblos y culturas totalmente alejadas una de otra. La consecuencia más directa y visible de esta situación es el abandono de estos inmuebles que antaño fungían como núcleos familiares, dejando únicamente las ruinas de este pasado reciente (ver Figura 0.2).



Figura 0.2. Antiguo inmueble de adobe abandonado en la localidad de Villa de Leyva, Boyacá, Colombia. (Fotografía: A. Sánchez-Calvillo, 2021).

Para poder comprender el estado actual de la construcción en tierra es esencial entender el conjunto de procesos que históricamente se dieron para producir esta tipología constructiva; entendiendo la tipología como aquel conjunto espacial de elementos arquitectónicos que permanecen en el tiempo en un contexto histórico-geográfico (Muntañola Thornberg, 2002). Siendo menospreciada en ocasiones, no puede negarse que recientemente ha surgido una proliferación de la literatura científica referida al patrimonio en tierra y su conservación (Correia, 2007), además de muchos trabajos de investigación especializados de los que en el documento se realizará un estado del arte más completo. Este reciente interés reside tanto a la notable carga cultural que comportan las técnicas y construcciones ancestrales como al potencial sostenible de estos sistemas tan necesario en la edificación contemporánea.

La falta de normativas o tratados de construcción en tierra es otra de las principales causas de su acelerada pérdida, más teniendo en cuenta que la especialización y artesanía en los trabajos disminuye en pos de nuevas técnicas industrializadas y automatizadas y potenciadas por el sistema económico vigente. Las normativas o reglamentaciones existentes son escasas y hacen referencia a las tipologías constructivas de cada país, además de ser en muchos casos específicas para ciertas actividades, técnicas o materiales (Cid et al., 2011). Para evitar estas



problemáticas son especialmente importantes los manuales (Martins Neves et al., 2009), que permiten acceder a un conocimiento menos especializado pero de gran valor para el desarrollo en las comunidades, especialmente en la autoconstrucción.

ESTRUCTURA METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

Bajo este supuesto, la caracterización tipológica, constructiva y material de estos sistemas debería ser obligada por parte de las instituciones y la academia. En la medida de componer un trabajo de investigación que aporte nuevos conocimientos para la comprensión de los fenómenos de vulnerabilidad sísmica de la arquitectura de tierra es necesario aplicar una estrategia metodológica fundamentada. En primer lugar, encontrando una justificación en la necesidad de una mayor exploración de la temática tratada que pueda aportar nuevas sapiencias a la comunidad académica.

Factores como la elección de las unidades de análisis y el tamaño de muestra son claves; pese a los antecedentes de investigación y el interés despertado en las primeras campañas de campo, fue esencial establecer una estrategia de actuación en función de los intereses y preguntas que se querían responder. En este mismo sentido, posteriormente fue necesario comprender que el análisis de un caso de estudio concreto, como el de Jojutla de Juárez, permite una replicación de problemáticas encontradas a un nivel integral y con ello poder lograr una mejor comprensión de estos fenómenos que indudablemente son globales.

Por ello, fue extremadamente útil el uso de una tabla de coherencia o congruencia que permitió ligar las preguntas, objetivos e hipótesis de la investigación con las lecturas, métodos y herramientas de análisis que se emplearon en la tesis doctoral. En primer lugar, se buscó definir los parámetros más básicos (ver Tabla 0.1):

Tabla 0.1. Parámetros básicos de la investigación doctoral.

Título de la tesis
La vulnerabilidad sísmica de la vivienda vernácula de adobe en México: análisis constructivo y caracterización material para su conservación
Objeto de estudio
La vulnerabilidad sísmica
Unidad de análisis
La vivienda tradicional de adobe mexicana



A continuación, se plantean las preguntas de investigación, de las cuáles se tiene una hipótesis inicial y que buscarán responderse con los objetivos del estudio. Es decir, que existe una correlación directa entre cada pregunta, hipótesis y objetivo. Precisamente es a partir del estudio fenomenológico del caso de estudio surgen los interrogantes: cada uno de estos conjuntos pregunta-hipótesis-objetivo será abordado con distintas herramientas (actividades, fuentes e instrumentos) que serán presentadas más adelante en el documento. Por este motivo es crucial en una tesis de doctorado contar con una metodología de investigación bien definida, ya que la coherencia del trabajo final depende directamente de la pertinencia del método.

Preguntas de investigación

- ¿Cuáles han sido los factores territoriales, sociales y culturales más relevantes, que unidos al desarrollo de la construcción en las últimas décadas han sido cruciales en pérdida y olvido de la arquitectura de tierra en México y su relación con la vulnerabilidad sísmica de estas viviendas?
- ¿Qué factores tipológicos, constructivos y tecnológicos presenta la vivienda de adobe en México y que alteraciones y/o modificaciones se detectan respecto a los sistemas constructivos tradicionales y sus estrategias de adaptación sismo-resistente?
- ¿Qué parámetros asociados a la vivienda tradicional de adobe mexicana pueden incidir en la vulnerabilidad sísmica y cómo estos pueden ser analizados mediante métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica?
- ¿Cómo afecta la falta de conocimiento especializado respecto a la caracterización de materiales de tierra a su progresivo abandono, falta de mantenimiento y consecuente vulnerabilidad sísmica?

Hipótesis de la investigación:

- La vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe en México es multifactorial, potenciada por la escasa atención que ha recibido en los últimos años. La vivienda tradicional de adobe, en todas sus tipologías, es especialmente vulnerable ante los movimientos telúricos que presenta gran parte del territorio mexicano. La pérdida de



la tradición constructiva y la alteración y modificación de las viviendas tradicionales ha resultado en una deficiente respuesta sísmica de estos sistemas constructivos debido a un conjunto de razones de varia índole.

- La arquitectura vernácula responde a las necesidades de una cultura específica respecto a su hábitat, incluyendo el uso de materiales y suelos locales. Es posible relacionar el medio físico, el territorio y la cultura con los procesos actuales de abandono y degradación de la vivienda de adobe mexicana.
- La arquitectura vernácula y las viviendas tradicionales de adobe incorporan estrategias sismo-resistentes fruto de la experiencia de adaptación al medio físico y sus fenómenos. Por ello, las decisiones y variantes tipológicas tienen una razón de ser estructural. Las regiones más propensas a sufrir este tipo de fenómenos presentan una cultura sísmica característica que se traduce en elementos constructivos fácilmente identificables, que pueden ser identificados mediante el estudio, documentación y catalogación de las viviendas.
- Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica permiten reconocer la respuesta estructural de estas edificaciones en función de los parámetros tipológicos, constructivos y materiales. Un análisis más adecuado de estas construcciones puede ayudar a minimizar los efectos mediante la gestión y la mitigación del riesgo.
- Mediante la experimentación en laboratorio y las técnicas de caracterización podrá obtenerse un mejor conocimiento de las técnicas tradicionales de tierra y sus propiedades, generando una metodología de análisis todavía no definida en la literatura internacional.

Objetivos de la investigación:

- Mediante la investigación cualitativa y cuantitativa identificar aquellos factores territoriales, sociales y culturales que afectan directamente la vulnerabilidad de la vivienda de adobe, tomando en cuenta la implicación del territorio y el medio físico y los fenómenos que provocan su abandono.



- Definir mediante el estudio arquitectónico tipológico, tecnológico y constructivo las características básicas y principales variantes de la vivienda de adobe mexicana y cuáles de estas propiedades benefician la sismorresistencia de las mismas.
- Evaluar la vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe mexicano bajo distintas herramientas de análisis a partir de una serie de parámetros de carácter geométrico, morfológico, constructivo y tecnológico.
- Reconocer mediante la caracterización de materiales y el estudio arquitectónico tipológico, las particularidades y características de materiales a base de tierra, específicamente adobes, pudiendo establecer una metodología de análisis en laboratorio que pueda ser replicada.

Sin embargo, con el transcurso de la investigación apareció un último objetivo, más general, que fue transmitir estos conocimientos mediante proyectos audiovisuales para revalorizar este patrimonio cultural. Estos trabajos, que surgieron sin una planeación, demostraron ser altamente efectivos y funcionar como plataformas idóneas para transmitir las sapiencias tradicionales de la arquitectura de tierra.

Siguiendo con la estructura metodológica, el uso de las categorías de variables en un trabajo o investigación científica que se precie es esencial para lograr la coherencia del documento o resultado final. El fenómeno de estudio debe poder caracterizarse, siendo este un proceso de gran complejidad, pero fundamental para desarrollar la estructura metodológica que guiará los pasos de la investigación. Milton Santos nos habla de categorías de análisis en *Metamorfosis del espacio habitado* (1996), tomando su concepción como punto de partida para esta estrategia metodológica:

Un sistema de realidades, o sea, un sistema formado por las cosas y la vida que las anima, supone una legalidad: una estructuración y una ley de funcionamiento. La explicación, es decir, su teoría, es un sistema construido desde una filosofía cuyas categorías de pensamiento reproducen la estructura que asegura el encadenamiento de los hechos, Si la llamáramos de organización espacial, estructura espacial, organización del espacio, estructura territorial o simplemente espacio, sólo cambiaría la denominación y esto no es fundamental. El problema es encontrar las categorías de análisis que nos permitan su conocimiento sistemático, es decir, la posibilidad de proponer un análisis y una síntesis cuyos elementos constituyentes sean los mismos. (Santos, 1996, pág. 27)



Santos resta importancia a las cuestiones semánticas que implican el uso de uno u otro vocablo,¹ pero magnifica la necesidad de encontrar categorías de análisis para la generación del conocimiento, hecho que se replica en la comunidad internacional. También es posible extraer de estas líneas el reflejo o correlación de este sistema de categorías con el marco teórico sustantivo del trabajo, del que Santos habla como teoría o filosofía. El problema de investigación debe encuadrarse dentro del marco de una teoría para poder discernir cuál será la estrategia metodológica a seguir y la argumentación que se pretende desarrollar (Maletta, 2009, pág. 152).

En otros trabajos de tecnología arquitectónica esta cuestión teórica y metodológica tiende a quedar relegada debido al carácter experimental de estas investigaciones, siendo un problema grave para la generación de nuevo conocimiento científico. Pablo Chico Ponce de León aborda esta problemática en su tesis doctoral “Hablamos aquí de la necesidad de que la disciplina arquitectónica tenga el control y maneje los hilos de su orientación y desarrollo, con la definición, por parte de quienes la practican, de los tipos de conocimiento que se requieren producir, en que prioridades y cantidades y con qué cualidades” (Chico Ponce de León, 2000, pág. 164). Estableciendo este control sobre la misma generación de conocimiento que practicamos podrá discernirse cuales son los alcances y límites de la investigación, tomando en cuenta todos aquellos factores que afectan al problema principal o enunciado.

Posteriormente debe definirse el enfoque, la direccionalidad y visión con el que se trate el objeto arquitectónico. Cada autor cuenta con un acercamiento distinto al fenómeno de investigación, encontrando trabajos encaminados a ángulos historiográficos, tecnológicos, culturales, etc. La vulnerabilidad como concepto puede tratarse desde muchos de estos puntos de vista, pero al acotar a la vulnerabilidad sísmica estos se reducen a un tratamiento mucho más técnico.

Son pocas las investigaciones que relacionan vulnerabilidad sísmica con otras variables que no sean las de tipo constructivo-tecnológico, por ello parte de la fundamentación de la tesis

¹ Se trata de un debate permanente en la geografía el uso de términos derivados del espacio o espacialidad, como puede observarse en el libro Espacio, paisaje, región, territorio y lugar: la diversidad en el pensamiento contemporáneo de Blanca Ramírez y Liliana López, quienes tratan el empleo de estos términos en la geografía y otras disciplinas afines.



doctoral consiste en la determinación del problema de investigación, el encauzamiento dentro de una corriente teórica contrastada y finalmente la propuesta de la estrategia metodológica. Esta propuesta es fácilmente apreciable mediante la imagen del mapa mental (ver Figura 0.3), pudiendo encontrarse las relaciones lógicas entre categorías de análisis, conceptos, lecturas, unidades y herramientas de análisis.

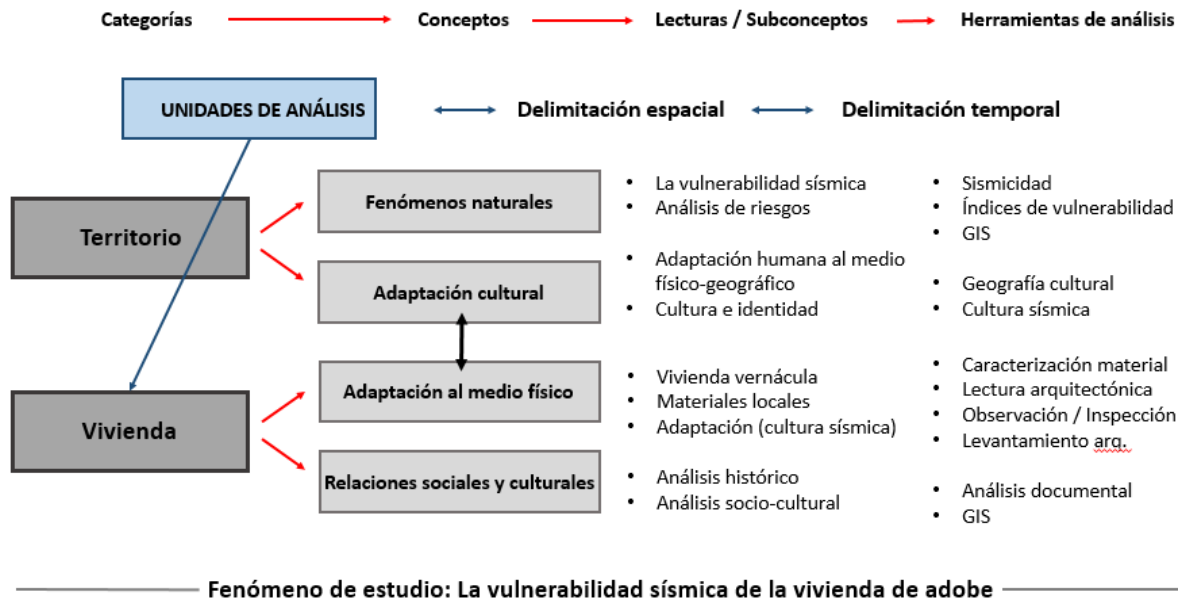


Figura 0.3. Esquema metodológico de la investigación.

Fue necesario realizar una abstracción para entender el fenómeno de la vulnerabilidad sísmica como un objeto de estudio divisible en categorías de análisis. Las dos categorías principales que fundamentarán la tesis son la vivienda y el territorio, inseparables para la correcta comprensión de la vulnerabilidad sísmica, derivando de igual forma los conceptos clave de la investigación. Es importante entender que cada categoría y concepto, aun siendo independientes tienen interrelación con el resto, y precisamente las conclusiones que se derivan entre las variables son las que dan validez al trabajo de investigación.

Una vez delimitados los conceptos y las lecturas que se aplicarán en el estudio, mediante esta propuesta metodológica pueden definirse las herramientas de análisis como parte del diseño de investigación y la experimentación entre variables (Hernández Sampieri, Fernández Collado , & Baptista Lucio, 1991). Antes es preciso definir también la estrategia



metodológica en relación al esquema conceptual antes presentado (ver Figura 0.3) así como el carácter de la investigación en cuanto a la tipología.

Se tiende a definir un trabajo de esta clase por su tipología: principalmente exploratoria, descriptiva, explicativa o correlacional (Hernández Sampieri, Fernández Collado , & Baptista Lucio, Metodología de la investigación, 1991), también pudiendo ser validatoria, predictiva o tecnológica como indican otros autores (Maletta, 2009). Es importante definir los alcances y objetivos de la investigación, no obstante, puede llegar a ser contraproducente delimitarla según uno de estos términos, puesto que los estudios pueden contener elementos de las diversas clases. Por ello, es prudente tener una noción básica de los alcances y objetivos del trabajo para trazar una ruta y una o varias tipologías de investigación: “[...] son dos los factores que influyen en que una investigación se inicie como exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa: el estado del conocimiento en el tema de investigación que nos revele la revisión de la literatura y el enfoque que el investigador pretenda dar a su estudio” (Hernández Sampieri, Fernández Collado , & Baptista Lucio, 1991, pág. 76).

Por ello y tras la revisión exhaustiva de la literatura pueden empezar a delimitarse los alcances de la investigación y realizar la propuesta de estrategia metodológica. Para el caso del presente trabajo se tomó la estrategia planteada por Maletta (2009). Respecto a la tipología y considerando siempre los antecedentes de la revisión bibliográfica se descartó en primer lugar la investigación exploratoria, ya que el fenómeno estudiado ha sido tratado y retomado ampliamente por la comunidad científica. La investigación descriptiva no es tampoco en este caso el objetivo último, puesto que la sismicidad y la vulnerabilidad han sido definidas; la investigación, en cambio, sí será correlacional por el hecho de tener diferentes casos de estudio con variables que antes no han sido comparadas: “La utilidad y el propósito principal de los estudios correlacionales son saber cómo se puede comportar un concepto o variable conociendo el comportamiento de otra u otras variables relacionadas” (Hernández Sampieri, Fernández Collado , & Baptista Lucio, 1991, pág. 73). Por último, las investigaciones explicativas buscan responder a los fenómenos físicos y/o sociales más allá de encontrar relaciones entre variables, buscando trascender en las causas, siendo el objetivo final y lo pertinente en un trabajo de doctorado, como puede observarse en la Tabla 0.2.



Tabla 0.2. Decisiones estratégicas del proyecto de investigación.

Propósito de la investigación
Investigación explicativa y correlacional
Tipo de metodología explicativa
Diseño experimental en la parte de caracterización. No experimental en el resto de la investigación con diseño longitudinal
Escala de la investigación
Partirá de un nivel local y regional para explicar un fenómeno, el de la vulnerabilidad, que tiene presencia a nivel global
Alcance temporal de la investigación
En el presente, tomando en cuenta la arquitectura vernácula como un conjunto de procesos históricos
Nivel de análisis (mínima unidad de estudio considerada)
La vivienda de adobe. El adobe como elemento y material constructivo
Uso de datos empíricos
Será por un lado empírica, basada en datos primarios obtenidos de los análisis de vulnerabilidad sísmica y la caracterización secundaria y en datos secundarios de investigaciones afines. También contará con un soporte no empírico derivado de la teoría y el análisis documental, además de encuestas, entrevistas y material audiovisual para entender el fenómeno de la arquitectura vernácula mediante una concepción más amplia.
Forma de los datos empíricos
Principalmente serán datos cuantitativos, por la vertiente tecnológica del trabajo de investigación; no obstante, se tomarán como sustento datos cualitativos, principalmente los derivados de la lectura histórica y sociocultural



Por otro lado, el planteamiento de las herramientas de análisis es fundamental para dar respuesta a las necesidades que plantean los conceptos y posibles lecturas de la investigación. Al ser una metodología mixta que responde al análisis y lectura de conceptos físicos y sociales se determinarán las herramientas respecto a dos vertientes: por un lado, el estudio de la vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe, partiendo de varias herramientas como la investigación histórica, el análisis estructural y formal de la arquitectura, y los factores de cambio social y cultural en la vivienda; y por el otro lado, la caracterización de los materiales de construcción.

Uno de los principales problemas que ha experimentado la investigación histórica de la arquitectura, es que, en sus inicios, el enfoque venía desde la disciplina del historiador, dejando de lado muchos de los aspectos que atañen a la edificación y experiencia incluyendo el ejercicio práctico del oficio que enriquece el conocimiento del arquitecto. Esta problemática ha sido referida por diversos teóricos que buscaban un acercamiento distinto a la disciplina, y que han logrado un cambio de mentalidad en muchas de las instituciones académicas y científicas en México. Salazar expone: “Tradicionalmente, la historia de la arquitectura se ha hecho con un enfoque evolutivo o en el otro extremo, relativista; desligada de la teoría de la arquitectura y con escasa atención a aspectos morfológicos y tecnológicos” (Salazar González, 2011, pág. 13).

Por estos motivos el acercamiento a la arquitectura desde un enfoque concreto debe sin embargo contar con una visión global del fenómeno. En el caso de la tecnología constructiva tiende a menospreciarse el factor humano social y cultural en pos de la concreción material de los sistemas constructivos; pero estos responden a un proceso de evolución técnica y relación con el medio físico cuyas dimensiones van mucho más allá del objeto arquitectónico. Retomando el concepto del hombre como ser técnico (Leff, 1977), pueden entenderse el avance tecnológico, así como las permanencias y remanencias de lo pasado desde la disciplina arquitectónica (Salazar González, 2011), pero contando con herramientas completas, como explica Ponce de León: “[...]debemos considerar que la investigación arquitectónica es mucho más amplia que sólo la búsqueda de información aplicable a la solución de un problema de diseño (Chico Ponce de León, 2000, pág. 36)”.



Sin embargo, esta investigación de la arquitectura tiene varios soportes y fuentes, trascendiendo más allá del carácter documental, como expone nuevamente Ponce de León: “La historia de la arquitectura no se hace sólo a partir de documentos, ni sólo a partir del contacto directo con los edificios; se requiere de la integración de ambos enfoques: el documental y el monumental” (Chico Ponce de León, 2000, pág. 167). Por ello las herramientas de análisis del estudio histórico de la arquitectura incluyen actividades como la prospección, levantamiento fotográfico, levantamiento arquitectónico, y en general, un acercamiento al objeto de estudio que implica una comprensión espacial y temporal que no puede lograrse únicamente mediante el estudio documental. El trabajo de campo será parte básica en el desarrollo de la investigación ya que la comprensión del fenómeno sísmico y su afectación en la sociedad es fundamental en el entendimiento de sus causas y efectos.

No obstante, esta problemática referida a la investigación histórica es reflejada en todos los ámbitos de la investigación en arquitectura, sesgada como los autores citados exponen, y dejando de lado factores importantes o bien enfocándose sobremanera en algunos puntuales. El estudio histórico de la vivienda de adobe será una de las bases sobre la que partirá la investigación, pero se empleará como herramienta, como fundamentación y sobre todo como refuerzo del resto de la metodología, en la que se tratará el concepto de la vulnerabilidad desde una visión extensa: esto significa, aunque el tema central sea la vivienda, que no únicamente serán estudiados los factores físicos-mecánicos, sino también las dimensiones sociales, culturales y económicos (Chardon, 2010, pág. 20).

La caracterización de los materiales de construcción es igualmente una disciplina fundamental para la metodología de investigación arquitectónica, puesto que lo material es una parte básica para la comprensión de la arquitectura. Citando a Portales puede relacionarse el avance tecnológico y cultural de las sociedades a través del método científico: “El gran salto hacia la aplicación del conocimiento científico a la construcción se produce con la caracterización de las propiedades resistentes de los materiales, mediante el módulo elástico o el de deformación, según se trate de materiales elásticos o plásticos, y los momentos de inercia. tradición constructiva de generación en generación” (Portales Pons, 2013, pág. 24). Igualmente en el campo del patrimonio y de la conservación monumental, es esencial conocer la resistencia de los materiales para lograr su preservación en el tiempo, y ante los eventos naturales que puedan enfrentar (Tassios, 2009).



GESTIÓN DEL PROYECTO Y PRESENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para finalizar la parte introductoria del documento es necesario hacer énfasis en todo el trabajo de gestión, manejo de recursos, vinculación con otras instituciones y cumplimiento del programa. Respecto a la inclusión de la investigación en otros proyectos, se realizó una importante gestión para conseguir recursos, equipo y colaboración interinstitucional; en el Capítulo II se hace hincapié en este proceso y la relevancia que tuvo para el ejercicio del trabajo de campo.

También cabe destacar el apoyo logístico que se tuvo en todo momento a partir de la inclusión de los alumnos de la Facultad de Ingeniería Civil. Retomando a Pablo Chico (2000), la incorporación y colaboración con los estudiantes de licenciatura y otros grados académicos resulta un apoyo indispensable para completar investigaciones de cierto alcance y ambición. La participación de estudiantes de licenciatura, tanto en los proyectos de investigación y cooperación al desarrollo, como parte del trabajo en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH fue esencial para la parte experimental de caracterización de los adobes. La codirección de las tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil de David Preciado Villicaña² y Melissa Ruiz Mendoza fue capital para el desarrollo y consecución de la investigación.

Otros aspectos metodológicos básicos fueron delimitados por el plan de estudios del PIDA, principalmente la consecución de publicaciones indexadas y la realización de una estancia de investigación. La difusión del proyecto de investigación en medios especializados y de alto impacto es uno de los objetivos principales del programa, siendo la publicación de un artículo uno de los requisitos de egreso, contribuyendo a la generación de conocimiento original en la línea de investigación de la conservación de la arquitectura. En este sentido, los requerimientos fueron cumplidos con creces al lograr varios trabajos a lo largo de los

² La tesis *Caracterización y propiedades índice en adobes de Jojutla de Juárez, Morelos, México* de David Preciado Villicaña fue un aporte de gran ayuda para proponer y validar la metodología de caracterización de adobes que posteriormente se detalla en el Capítulo IV del presente documento. La dificultad para analizar las muestras patrimoniales de Jojutla dañadas por el terremoto de Puebla de 2017, así como la importancia de crear conciencia ante la pérdida de las construcciones de adobe del estado de Morelos hacen de esta tesis de licenciatura un trabajo muy valioso y una referencia a tener en cuenta para el estudio de la arquitectura de tierra.



cuatro años. Además, no puede obviarse todo el trabajo de difusión logrado a partir de múltiples memorias de congreso, conferencias magistrales, ponencias en sectores especializados y divulgación científica en todo tipo de medios.

Respecto a la realización de estancias de investigación, pudieron efectuarse un total de tres. En el tercer semestre del programa se pudo realizar la primera de ellas, entre septiembre y noviembre de 2019 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, en el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables - Sede Chiapas, ubicado en las instalaciones de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), bajo la supervisión y dirección del Dr. Gabriel Castañeda Nolasco. El interés de esta vinculación partía del trabajo de ambas instituciones con las comunidades afectadas por los eventos sísmicos, especialmente a partir del terremoto de Chiapas de 2017.

Como parte de la estancia se pudo colaborar y aprender de las iniciativas para recuperar las viviendas y concientizar sobre la importancia de una reconstrucción sostenible, fomentando el diseño participativo con los usuarios de los inmuebles.³ Durante el transcurso de estas actividades pudo comprobarse la desconfianza de los habitantes de las comunidades en los materiales locales, prefiriendo en la gran mayoría de casos la reconstrucción de sus casas con materiales industriales, principalmente block de hormigón para los muros y estructura, y lámina metálica para las cubiertas.

En algunos casos, pese a presentar sus viviendas daños leves y encontrarse en un buen estado aparente, las familias mostraron su preferencia por derruir estos inmuebles y edificar otros nuevos con materiales y recursos ofrecidos en compensación a los daños. Esta es una de las mayores dificultades que enfrentan los expertos al visitar las comunidades, el poder convencer de los problemas que presentan los materiales modernos, especialmente a las personas más mayores del lugar (Cornerstones Community Partnerships, 2006).

Estos trabajos se realizaron principalmente en la localidad de Jiquipilas, en la región oeste de Chiapas, donde el confort térmico es realmente apreciado por las condiciones climáticas tan calurosas. Esta característica permite a los profesionales confrontar las buenas propiedades

³ El diseño participativo busca implicar activamente a todas las partes involucradas, que en este caso fueron tanto los usuarios de las viviendas afectadas por los sismos como los estudiantes y profesores de la Facultad de Arquitectura de la UNACH.



que ofrecen el adobe y las cubiertas de teja cerámica frente al block de hormigón y el techo de lámina, cuya inercia térmica es mucho menor. Mediante esta estrategia los usuarios ponen en valor los materiales locales, debido a que aquellas viviendas que conservaron los sistemas constructivos tradicionales fueron las que sufrieron menos daños (ver Figura 0.4).



Figura 0.4. Viviendas de adobe con distinta afectación sísmica en la localidad de Jiquipilas, Chiapas, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Posteriormente, en los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2021, pudo realizarse una segunda estancia de investigación en la Universidad del Valle, en Cali, Colombia, bajo la dirección de la doctora Ruby Mejía de Gutiérrez y el doctor Ricardo Hincapié Aristizábal. El planteamiento de la estancia contó con un enfoque práctico a partir de visitas técnicas y entrevistas en localidades del país con un reconocido patrimonio arquitectónico de tierra: Guadalajara de Buga, Popayán, Cartago, el Cairo, Tunja y el centro histórico de Cali (ver Figuras 0.5 y 0.6). Adicionalmente, en el transcurso de estas visitas técnicas pudieron incluirse actividades de encuentro con instituciones y expertos, con ejemplos como las Escuelas Taller de Popayán y de Boyacá. Precisamente en Popayán, bajo la dirección del arquitecto Javier Barrera, pudieron organizarse encuentros con los máximos autores encargados de la restauración patrimonial de la ciudad tras el terremoto de Popayán de 1983.



Figura 0.5. Arquitectura de adobe y tapia en Cartago, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).



Figura 0.6. Arquitectura de bahareque en el Cairo, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

Por último, la tercera estancia de investigación del proyecto se realizó durante los meses de mayo y junio de 2022 en Madrid, España, en el Grupo de Caracterización de Materiales mediante evaluación no destructiva (G-CARMA) del Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (TTEFI) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC); bajo la dirección del doctor Javier Ortega Heras. En esta última estancia se priorizó el procesado de los datos obtenidos con el trabajo de campo y el proyecto DBMC 2020 para aplicar y evaluar los MEVS en casos de estudio de la vivienda tradicional de adobe mexicana.



Por ello, a partir de la definición del marco metodológico puede comprenderse mejor la estructuración del documento. La carencia de conocimientos técnicos de los materiales a base de tierra respecto al resto de sistemas constructivos de amplia utilización en la edificación contemporánea es alarmante, mostrándonos que todavía desconocemos muchos aspectos de una cultura constructiva tan antigua. Con cada capítulo de la tesis se buscó profundizar en aspectos específicos que en última instancia contribuyan a la salvaguarda y conservación de este patrimonio.

El primer capítulo presenta el marco teórico de la investigación para entrar en los aspectos más profundos y significativos de la arquitectura de tierra, entendiendo el fenómeno como una de las transformaciones más puras del territorio por parte del ser humano. A partir del enfoque de la geografía cultural se define el territorio como el eje articulador de la vivienda de adobe y se introduce el concepto de la vulnerabilidad sísmica presentando el caso de estudio tan significativo de Jojutla de Juárez.

El segundo capítulo se centra en presentar las problemáticas existentes en el país y reflejar la situación actual de la arquitectura de tierra y su alarmante desaparición. Posteriormente se definen las herramientas de análisis con énfasis en el trabajo de campo y el levantamiento arquitectónico para con estos instrumentos lograr una caracterización tipológica y tecnológica-constructiva de cinco casos de estudio con representación de la vivienda tradicional de adobe.

En el tercer capítulo se hace un análisis de los casos de estudio mediante cinco métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica haciendo una inspección detallada de los distintos parámetros de vulnerabilidad identificados en las viviendas de adobe. Con el procesamiento de los datos recolectados en campo se generan las curvas de vulnerabilidad y fragilidad en función de los distintos escenarios sísmicos, así como la estimación de las pérdidas materiales y humanas con la finalidad de utilizar estas herramientas para la prevención y mitigación del riesgo en estas localidades.

Por último, el cuarto capítulo del documento refleja las carencias actuales de la caracterización de materiales de tierra en México, empezando por una revisión del estado del arte a nivel global mostrando los principales avances en las últimas décadas al respecto. Se define y propone una metodología de caracterización exhaustiva de estos sistemas



constructivos, enfocada en este caso en adobes históricos. Los ensayos y resultados se dividen en tres grupos según los parámetros a analizar: las propiedades físico-químicas, las propiedades mecánicas y la durabilidad y comportamiento frente al agua. La finalidad de este capítulo es hacer posible una investigación más precisa de los sistemas constructivos a base de tierra que nos permita una mejor comprensión de sus características y comportamiento

**CAPÍTULO I. LA VIVIENDA
MEXICANA DE ADOBE: UN
ACERCAMIENTO
TERRITORIAL Y
SOCIOCULTURAL**







Tranquilo. No hace frío. No hace calor. La casa es muy tranquila. Sí, sí me gusta, Porque mi apá aquí me donó, Y hasta que no me muera, salgo.

Cipriano Gaona, Xirangua (2021)

INTRODUCCIÓN

La vivienda de adobe es el resultado de generaciones y generaciones de usuarios y su modo propio de habitar un territorio determinado. En las últimas décadas, la academia ha puesto sus ojos en las tecnologías constructivas tradicionales, como respuesta inmediata a las problemáticas sociales y ambientales derivadas de la construcción industrial en masa, aunado a una creciente concientización con la sostenibilidad y el medioambiente. Si hablamos de la vivienda mexicana rural, fácilmente identificable con estos sistemas constructivos vernáculos, destaca por su popularidad el adobe, que representa de forma muy clara la adaptación cultural y material del ser humano en un contexto inmediato.

En el caso de México, donde distintas culturas se encontraron y mezclaron dando lugar a una nueva identidad nacional, estas representaciones tangibles y materiales del habitar cobran una mayor importancia⁴. Por lo tanto, esta arquitectura de tierra encarna valores y simbolismos que nos hablan del desarrollo de la comunidad, y que pueden ser leídos a partir de su evolución espacial y temporal, y constituyen una representación de los modos de vida

⁴ La construcción con tierra fue una constante presente en las civilizaciones mesoamericanas, que construyeron gran parte de su patrimonio con estos sistemas; por otro lado, la llegada de la cultura ibérica y europea no limitó el uso de estos materiales, debido a que ya eran reconocidos y tecnificados por parte de los recién llegados al continente.



y los territorios donde los hogares fueron edificados. Muchas veces estos procesos generan imaginarios colectivos en la sociedad, siendo la vivienda de adobe un ente imposible de desligar de la imagen urbana y rural de una gran parte del país (ver Figura 1.1), contándonos historias que pueden ser leídas a partir de una actividad tan simple como la contemplación de un muro y su oposición al paso del tiempo.



Figura 1.1. La vivienda de adobe como objeto de estudio y ejemplo de la adaptación cultural al entorno habitado. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).

Como se dejó claro en la introducción del presente documento, los organismos e iniciativas entorno al estudio y protección del patrimonio cultural han dejado clara su preocupación por el estado actual de la arquitectura de tierra. En el caso de México la degradación y la desatención de la vivienda de adobe ha sido notable en las últimas décadas, con una disminución drástica del patrimonio construido.⁵ Esta relegación de la tipología responde además a factores socioculturales, con una percepción muy baja por parte de la gran mayoría de la población (Guerrero Baca L. F., 2007), que asocia estas construcciones a un nivel socioeconómico inferior y a un atraso tecnológico. Incluso algunos fenómenos humanos, como la migración, acrecientan la situación (Ettinger, 2010), haciendo que los usuarios opten

⁵ Anteriormente abordado en la introducción, con un decrecimiento de las viviendas de adobe aproximadamente a la mitad en términos porcentuales.



por otros sistemas constructivos importados o que gozan de una mayor popularidad en otras regiones.

Por otro lado, los condicionantes y los factores externos causantes del abandono de estos modos de construir también deben ser tomados en cuenta. Dejando de lado los factores socioculturales, económicos y tecnológicos, que son obviamente esenciales para entender el fenómeno; los factores naturales son una de las principales causas de destrucción del patrimonio, y al ser externos resultan inevitables. La vivienda vernácula sale muy malparada en estas situaciones, ya que se percibe como insegura y muy frágil, cuando en la mayoría de casos la vulnerabilidad presentada responde a muchos otros condicionantes que no se evalúan o bien se pasan por alto (ver Figura 1.2). Por otro lado, el desconocimiento y la falta de interés obvian una de las soluciones más lógicas para la preservación de este patrimonio, que es la mitigación de los riesgos.



Figura 1.2. Daños presentados en viviendas de adobe de Jojutla de Juárez, Morelos, México.
Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza; A. Sánchez-Calvillo, 2018).

Es en este punto que cobra importancia la sismicidad del territorio, un fenómeno endémico en muchas regiones de México. Para estudiar la vulnerabilidad sísmica como el fenómeno físico que afecta a las viviendas, independientemente de sus tipologías, es necesario estudiar antes el territorio como el medio físico en el que se insertan; así como la propia vivienda como resultado de la adaptación del ser humano a este medio y a los recursos que ofrece. El



adobe es un sistema constructivo que destaca por su sencillez e inmediatez, siendo producido a partir de la misma tierra que pisamos. Por este motivo, el fenómeno puede ser abordado a partir de la tecnología y la cultura constructiva local, una vez más ligados estrechamente al territorio como medio físico y geográfico.

Todos estos conceptos se caracterizan por el elevado grado de discusión y teorización que pueden alcanzar. Territorio, región, cultura, vivienda, habitar, vulnerabilidad... son conceptos que engloban y comportan varias significancias según el cariz y la connotación con los que se emplean. Los dos ejes vertebradores del marco conceptual de este documento de investigación giran en torno a dos categorías: territorio y vivienda, entendiendo las construcciones de adobe como una consecuencia directa de la inmediatez y la importancia del entorno natural y los recursos que permiten dar abrigo al ser humano en la tierra.

La elección y argumentación de las disciplinas y corrientes teóricas/ideológicas en las que se encauza la investigación es de vital importancia para el desarrollo de la misma. Muchas de las investigaciones referentes a fenómenos arquitectónicos suelen obviar la relación del objeto de estudio (p. ej. un centro histórico, cierta corriente estilística, la vivienda social) con el entorno y sus características físicas (López Núñez M. d., 2009). Por ello, queda justificado el uso de la geografía como una de las disciplinas centrales, y el pensamiento de varios autores para canalizar ciertas corrientes teóricas que ayuden a sustentar las hipótesis de la investigación.

En particular, la geografía cultural como herramienta de análisis contribuye enormemente a entender los fenómenos de la arquitectura vernácula. Más aún, cuando decidimos considerar estas construcciones como patrimonio cultural⁶, lo cual implica un grado de contemplación del fenómeno mucho más amplio y debatible. Retomando a López Núñez (2009), debemos estudiar la vivienda como un hecho arquitectónico complejo⁷, entendiendo todas las

⁶ Muchas de las críticas al *statu quo* por parte de los expertos en arquitectura de tierra pasan por la no consideración de estas construcciones como patrimonio cultural o bien la apreciación como patrimonio menor; de cualquier modo, la consecuencia directa supone una desprotección de las edificaciones que en última instancia entraña la pérdida de las mismas.

⁷ En la tesis de doctorado *Los espacios para la producción y la estructuración del territorio en la región de Valladolid. Una interpretación de la concepción del espacio en el Michoacán virreinal* (2009), Carmen López asevera a las haciendas como hechos arquitectónicos complejos, una definición que es trasladable a la vivienda tradicional. Entendiendo la relación que se establece entre



dimensiones de la problemática y ello implica analizar todas las aristas presentes y ponderar su trascendencia.

Otra visión que no puede desligarse de la arquitectura de tierra, y que muchos autores han abordado en los últimos años es la sostenibilidad⁸, fungiendo como la primera motivación a la recuperación de estas técnicas constructivas más allá del legado cultural que nos traspasan. En este sentido las mayores fundamentaciones son la salvaguarda de nuestro planeta y las crisis ambiental y humana en la que estamos inmersos (Guerrero Baca & Soria López, 2018). El uso de la tierra se percibe por lo tanto como esencial para la construcción de nuevos modelos de edificación, con la difícil tarea de cambiar las percepciones negativas que encarnan estos sistemas (Moriset et al., Can earthen architectural heritage save us?, 2021). Esta es precisamente una de las principales justificaciones del documento de tesis, que no busca sino ampliar los conocimientos acerca de estos sistemas constructivos que deberán ser la base de la presente y futura arquitectura universal.

En este capítulo se deliberará acerca del trasfondo territorial y sociocultural de la vivienda de adobe en México, con una abstracción de este elemento a un nivel mucho más humano dejando de lado las cuestiones tecnológicas y constructivas tan comunes en el estudio de la arquitectura y los aspectos mucho más técnicos que se tratarán en el tercer y cuarto capítulo del documento de tesis. Empezando por el citado encauzamiento y argumentación del marco teórico y conceptual, tan necesario para la comprensión del fenómeno de estudio, se continuará deliberando acerca de las dos principales categorías que modelan esta investigación: territorio y vivienda.

El primer subcapítulo abordará el concepto territorial desde la geografía cultural buscando un nexo de unión con el fenómeno del habitar y la vivienda vernácula construida con tierra, generando varias lecturas de la situación actual y el abandono de estas prácticas milenarias.

la arquitectura, el territorio y todas las actividades humanas es cuando puede analizarse, y más importante aún, lograr un entendimiento real del fenómeno de estudio.

⁸ Existe un amplio y tedioso debate por la utilización de los términos sostenibilidad y sustentabilidad, generando varias discusiones acerca del vocablo más acertado, debido a que en la lengua inglesa únicamente existe el término *sustainability*. Generalmente se acepta que la sostenibilidad engloba los campos de la sociedad, la economía y la ecología manteniendo un equilibrio con los recursos naturales. En el presente documento se usará el concepto de sostenibilidad a la hora de abordar el uso de la tierra como material de construcción.



Posteriormente, en el segundo, se buscará discernir y abordar el concepto de vulnerabilidad, y las implicaciones tan intensas que comporta actualmente en todos los ámbitos, presentando de paso el detonante (a nivel personal) de la investigación, a raíz de los eventos sísmicos ocurridos durante el mes de septiembre de 2017. Partiendo de la vulnerabilidad observada en la localidad de Jojutla de Juárez, en Morelos, México, que se articula como el primer acercamiento al fenómeno citado, y fundamenta la necesidad de aportar trabajos científicos más trascendentes sobre la arquitectura de tierra y la vivienda de adobe, elementos culturales de gran importancia para México.

Partiendo de este primer acercamiento y una escala de lectura integral del fenómeno de habitar es como el resto del documento cobra sentido, al poder comprender favorablemente que la construcción con tierra es una manifestación y expresión del carácter de los pueblos. Como expresión cultural engloba muchos más factores que los constructivos y técnicos y precisamente eso hace que sea un fenómeno de estudio tan interesante y con un potencial escasamente explotado.



1.1. MARCO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

La arquitectura es, por tanto, la materialización de las formas de vida; es una huella del modo en el que nos movemos en el espacio y construimos el territorio; es reflejo de los saberes sociales, desde los básicos de la vida diaria hasta aquellas actividades especializadas y en constante transformación con el perfeccionamiento de la tecnología.

(López Núñez M. , 2020)

La arquitectura como disciplina, reiteradamente ha generado un dilema sobre su posición dentro de las principales ramas de la ciencia, encontrándose a medio camino entre las ciencias básicas y las ciencias aplicadas. Esta situación de encrucijada ha dado lugar a un intenso debate entre los partidarios de ambas posturas, o los que se decantan por un término medio; sin embargo, este sincretismo es el que para muchos hace de la arquitectura una disciplina fascinante, permitiendo un sinnúmero de abordajes de los distintos fenómenos.

El apoyo de otras disciplinas tan diversas como la geografía, la historiografía, la sociología, la ingeniería de materiales, la geología, etc., es fundamental en el oficio de la investigación, aportando una riqueza y una perspectiva y abordajes mucho más amplios de las problemáticas a las que se busca dar solución. La interdisciplinariedad ha cobrado fuerza y sentido en los últimos años, siendo hoy exigida en los proyectos de investigación y todas las actividades que prioricen la cooperación al desarrollo⁹.

Teorizar sobre cuestiones que podrían parecer mucho más técnicas, problemas tangibles, como el estudio y/o desarrollo de materiales de construcción, supone un ejercicio complejo, pero no por ello es una quimera como podría parecer en un principio. Son muchos los ejemplos que demuestran la viabilidad, especialmente en el área patrimonial, donde objetos

⁹ La cooperación al desarrollo incluye todas aquellas acciones e iniciativas que contribuyan al desarrollo sostenible. Varios proyectos de esta índole, relacionados con la construcción tradicional en Michoacán y mostrados más adelante en el documento, fueron llevados a cabo como parte del proceso de la investigación doctoral.



físicos y concretos cobran una trascendencia inconcebible por razones históricas, tecnológicas, sociales, culturales, entre otras.

La vivienda de adobe no deja de ser un objeto material, palpable, y que puede ser representado de forma fiel mediante distintos códigos. Siendo un fenómeno de estudio concreto y preciso, con implicaciones que pueden llegar al nivel microscópico, como por ejemplo los procesos de caracterización material, o una visión mucho más amplia en la que la vivienda es sólo un engranaje más dentro de la escala urbana. Este ejercicio de abstracción puede llegar a ser complejo, pero no deja de resultar extremadamente positivo a la hora de definir, categorizar y comprender mejor el objeto de la investigación; de ahí la importancia de poder teorizar y estudiar la arquitectura, una acción en la que todavía queda mucho recorrido y en la que es necesaria una mayor amplitud de miras¹⁰ (Zevi, 1951).

Partiendo de los enunciados propuestos en la tesis, la definición de las categorías de estudio y de las líneas de pensamiento es fundamental para lograr una conjunción entre todos los fenómenos de la investigación, las problemáticas existentes que deben solucionarse, y la validación (o no) de las hipótesis iniciales. Las dos principales categorías del documento son el territorio y la vivienda, entrelazándose en el marco teórico de la investigación del mismo modo en el que lo hacen en el espacio y el tiempo. Si bien cada concepto debe ser analizado a partir de distintas disciplinas para lograr la correcta lectura del mismo, la constante interacción entre ambos es la que aporta un verdadero conocimiento holístico del fenómeno.

La adaptación del ser humano es la principal liga entre las dos categorías, que aparecen esquematizadas en la Figura 1.3 con las lecturas, conceptos y subconceptos que entrañan. Por un lado, la vivienda debe adaptarse al medio físico, es decir, el territorio, y la vivienda vernácula constituye la realización más pura de esta relación. Por otro lado, no puede entenderse el concepto del territorio sin la acción humana, y consecuentemente la adaptación cultural y la transformación del espacio a través de las actividades de una sociedad.

¹⁰ Bruno Zevi en *Saber ver la arquitectura* (1951) constata que la apreciación y la crítica de la arquitectura no se da de la misma forma que en el resto de artes (siendo un fenómeno mucho más extendido), debido principalmente a la carencia de una formación especializada, al desconocimiento y a la falta de interés en lograr una buena adecuación de las obras en su contexto y entorno.



Figura 1.3. Categorías, conceptos y subconceptos teóricos de la investigación.

Por un lado, es fundamental retomar las concepciones y significaciones del concepto territorial, siendo la geografía una disciplina complementaria que ayuda a entender las relaciones socioespaciales y su influencia en el patrimonio constructivo y construido, sin perder nunca de vista el fenómeno arquitectónico como la piedra angular de la investigación. No obstante, al emplear la geografía como una ciencia del espacio, ésta nos permite teorizar sobre las prácticas que acontecen en el territorio, incluyendo los modos de habitar el mismo; López (2009), tras recuperar varias de las visiones de la disciplina infiere que: “[...] se entiende que la geografía como disciplina tiene como objetivo la reflexión sobre la construcción del espacio y la creación de métodos de análisis particulares, para llegar a la explicación de la formación de los saberes y prácticas espaciales que forman parte de la naturaleza social de la especie humana.”

Por otro lado, varias son las disciplinas que teorizan sobre los fenómenos arquitectónicos, y cuando los objetos de estudio hacen alusión a lo patrimonial o lo original (vernáculo), la perspectiva histórica cobra una mayor importancia, al ser estos objetos el producto de una evolución, como explica Chico Ponce de León (2000):

En los términos más amplios, el sentido histórico o la conciencia histórica, constituyen una necesidad psicológica de todos los individuos y de todos los pueblos, de tal suerte que no hay cultura o persona para las cuales los datos sobre la génesis o la evolución de su entorno carezcan de significado, ya sea que estos datos estén denotados en el propio contexto físico a través de una serie de evidencias, o bien, que hayan sido indagados por medio de procedimientos muy diversos de búsqueda de conocimiento (la ciencia histórica entre ellos).



Otro de los conceptos que deben integrarse en el cuadro teórico y que ayudan a establecer los límites de la investigación, y consecuentemente la metodología de análisis, es la escala. El concepto de escala suele identificarse con la noción de extensión, muy ligada a la geografía o más concretamente a la cartografía, donde este elemento es básico para delimitar el rango de estudio y/o acción; sin embargo, la concepción del término entraña un trasfondo mucho más complejo del que se puede teorizar.

En cuanto a la delimitación espacial, o la extensión de la que nos hablan Ruiz Rivera y Galicia (2021), ésta se relaciona con los casos de estudio seleccionados para la investigación. La discusión y elección de los mismos no es arbitraria, si bien no todas las regiones y estados del país cuentan con el mismo nivel de vulnerabilidad o el mismo grado de riesgo sísmico¹¹, y sería ilógico analizar bajo el mismo prisma regiones y casos de estudio con condicionantes geográficos, socio-económicos y culturales tan distintos¹². Del mismo modo, la arquitectura de tierra cuenta con innumerables variaciones tipológicas que corresponden a la clase de suelos disponibles, materiales locales, presencia de agua en la región, etc.

Por ello es necesaria la diferenciación entre el concepto ideológico antes distendido del territorio y los posibles territorios que podemos identificar, como entes singulares. Entendiendo que estos territorios son distintos para cada caso de estudio, el pertinente análisis debe efectuarse singularmente para comprender cuál es su influjo sobre la vivienda y la vulnerabilidad. Por ello, la disparidad de algunos de los casos de estudio de la investigación se justifica con el análisis de las variaciones tipológicas, para encontrar cuáles de estas contribuyen mayormente al fenómeno de la vulnerabilidad.

¹¹ Existe una regionalización sísmica de la República Mexicana realizada a partir del manual de diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad (Comisión Federal de Electricidad, 2008). Esta regionalización que divide el territorio en cuatro zonas acorde a la vulnerabilidad presentada históricamente ante los sismos tomando como principales factores la frecuencia de los eventos y la aceleración del suelo.

¹² Para el análisis de vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe se analizaron cinco casos de estudio en cuatro estados de la región centro-occidente y suroeste del país, dando lugar a un estudio comparativo entre las características presentadas en cada localidad. Por otro lado, para el trabajo de caracterización material se tomaron otras unidades de análisis igualmente correspondientes



Por ello resulta muy adecuado retomar el estudio de Valenzuela¹³ (2006), que identifica las distintas concepciones de la escala geográfica y establece su propia clasificación en cuatro grupos: escala como tamaño, como nivel, como red y como relación. Esta última concepción es la más interesante y profunda, ya que permite una abstracción mucho más compleja del objeto o fenómeno de estudio, como expresa la misma autora: “[...] los elementos que se contemplan pueden ser básicamente los mismos; lo que cambia son las relaciones entre ellos y el modo en que destaca el papel que juegan algunos de esos elementos en las distintas escalas, donde adquieren una importancia distinta”.

Objetivamente, existe una gran variedad de formas de concebir la noción de escala, por ejemplo, Milton Santos (2000) la aplica como referencia a los acontecimientos en vez de la tradicional asignación a un espacio, siendo una posición bastante cercana a la de relación de Valenzuela. Estas concepciones son las que se retoman en la tesis doctoral para estudiar la vivienda de adobe como un fenómeno complejo, y lo más importante, generar un nexo de unión entre las distintas lecturas que se aplican en la investigación.

Cada capítulo de la tesis se corresponde con un nivel de lectura o escala del fenómeno estudiado, la vivienda de adobe, partiendo del nivel de análisis más general al más específico en términos de dimensión. En la Figura 1.4 encontramos la ejemplificación gráfica de esta estructura, mostrando una imagen representativa de cada nivel de análisis en los cuatro capítulos del documento.

En el presente capítulo se discute la figura de la vivienda desde la noción del territorio y el entorno natural y la importancia que llega a tener en los usuarios y sus modos de vida. En el segundo, el fenómeno de estudio incluye el objeto en sí, la vivienda, a partir de la transferencia tecnológica y la adaptación constructiva respecto a los materiales y sistemas disponibles. En el tercero, se analiza la respuesta estructural del sistema constructivo y su resiliencia o vulnerabilidad ante fenómenos sísmicos. Por último, el cuarto capítulo versa sobre la caracterización a nivel material, incluyendo aspectos como la composición mineral

¹³ Para mayor profundización en el tema se recomienda la lectura del artículo de Cristina Ofelia Valenzuela *Contribuciones al análisis del concepto de escala como instrumento clave en el contexto multiparadigmático de la Geografía contemporánea* (2006), sirviendo como una excelente herramienta a la hora de seleccionar una escala espacial para un ejercicio de investigación.



y elemental, que desde una escala espacial suponen uno de los niveles de estudio más pormenorizados.



Figura 1.4. Escala metodológica del fenómeno de estudio, la vivienda de adobe. Niveles de lectura: 1) Territorio, 2) Vivienda, 3) Sistema, 4) Material. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís-Sánchez, 2021; A. Sánchez-Calvillo, 2019; A. Sánchez Calvillo *et. al.*, 2020).

Bajo esta estructura, la concepción de escala como relación de Valenzuela citada previamente toma todo el sentido: el elemento primordial es la vivienda de adobe, no obstante, bajo el prisma de las distintas escalas de lectura se establecen unas concordancias con el resto de actores que son las que aportan una verdadera riqueza al análisis.

En cuanto a la siempre requerida justificación de la investigación, la salvaguarda del patrimonio cultural siempre aparece como un pretexto perfecto muy difícil de contrargumentar. Bajo el subterfugio de preservar las manifestaciones culturales que nos definen, podemos argüir que la construcción con tierra representa una forma primordial de la apropiación de un territorio, constituyendo unos conjuntos de técnicas llanas que permiten moldear uno de los elementos más cercanos y de fácil acceso al ser humano.

Del mismo modo que se comentaba en la introducción acerca de la importancia de la inclusión de la sostenibilidad en cualquier supuesto contemporáneo, la preservación y conservación del patrimonio son actividades que aseguran un desarrollo humano con un bajo impacto ambiental (Lourenço *et al.*, 2022) (ver Figura 1.5). Son innumerables los proyectos, trabajos, investigaciones que tratan acerca de la restauración patrimonial; de igual forma, la literatura es muy amplia y profunda, con múltiples acepciones y escuelas de pensamiento



acerca del concepto central¹⁴ y de las actividades derivadas del mismo. Capitel (1988) logra llegar a un término medio muy interesante aseverando que: “Nuestra contemporánea relación, más intensa y cercana, con la arquitectura histórica, debería facilitar la formación de una prudente mentalidad ecléctica capaz de analizar adecuadamente la arquitectura original, sus cualidades y sus problemas, con los medios teóricos pertinentes”.



Figura 1.5. Recuperación y reutilización del patrimonio arquitectónico afectado por desastres naturales en Antigua Guatemala, Guatemala. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Bajo este supuesto, también debería empezar a utilizarse el concepto de la rehabilitación de estas construcciones¹⁵, más aún al enfocarnos en el uso residencial de las mismas, por la necesidad de renovar los estándares y mejorar la habitabilidad de las viviendas (Sánchez Calvillo A. , 2017). Las diversas técnicas tradicionales de la arquitectura vernácula pueden y

¹⁴ En términos muy generales, la restauración constituye la acción de devolver algo a su estado original o auténtico (Muñoz Viñas, 2004). A partir de aquí, definir cuál es este estado original conlleva una discusión teórica muy

¹⁵ El término rehabilitación aparece como una contraposición al de restauración, estrechamente vinculado al ámbito del patrimonio cultural, y que a su vez ha variado su definición a lo largo de la historia y las diversas escuelas de pensamiento teórico. En oposición al sentido más romántico de la restauración, enfocado en la conservación y restitución de ciertos valores que pueden ser interpretados de forma muy distinta; la rehabilitación toma un cariz más tangible respecto a la habitabilidad y todos los problemas derivados del uso de las mismas construcciones.



deben ser retomadas o en algunos casos reaprendidas¹⁶, incorporando estos conocimientos olvidados en la edificación contemporánea.

En este sentido cobra gran importancia la revalorización de la arquitectura de tierra, por varios factores que luego se exponen en este capítulo, la tradición constructiva con tierra ha sido abandonada y sustituida por otros sistemas, propiciando imágenes como la presentada en la Figura 1.6, en la que estructuras que antaño fueron trascendentales en los modos de vida de la población, ahora yacen desamparadas ejerciendo como remanentes de tiempos pasados.



Figura 1.6. Capilla de la exhacienda de San Andrés Coapa, municipio de Acuitzio del Canje, Michoacán, México. Fotografía de dron: (A. Solís Sánchez, 2021).

¹⁶ Varios autores coinciden en la idea de retomar y reaprender los conocimientos ancestrales de la arquitectura vernácula además de poner en valor toda la producción y el trabajo manual que conlleva. Destacan los esfuerzos de los arquitectos e investigadores Camilla Mileto y Fernando Vegas por redescubrir todo el sistema de oficios y técnicas tradicionales actualmente en riesgo de desaparición, en *Homo Faber. Arquitectura preindustrial del Rincón de Ademuz* (2008) se sientan las bases para la revalorización de este patrimonio intangible, y posteriormente la *Colección Red Nacional de Maestros de la Construcción Tradicional* (2018) constituye un compendio excelente del conocimiento artesanal y la salvaguarda de los oficios tradicionales de la arquitectura vernácula.



1.2. EL TERRITORIO COMO MEDIO FÍSICO-GEOGRÁFICO ARTICULADOR DE LA VIVIENDA

[...] nadie puede cerrar los ojos frente a todas las edificaciones que integran la escena de la vida ciudadana y llevan el sello del hombre a los campos y al paisaje.

Bruno Zevi

No es posible entender la noción del habitar y la vivienda sin la inserción de la misma en el medio físico geográfico, pasando a tomar en cuenta el concepto de territorio. La adopción de ciertas morfologías, el trabajo constructivo de materiales locales y la propia relación de la casa con el resto de espacios exteriores responden a esta interacción del hombre y el medio. De igual forma, los saberes tradicionales y las prácticas espaciales de los habitantes de un territorio, han dado lugar a una arquitectura autóctona, con la máxima expresión en sus características formales (López Núñez & Pedraza Marrón, 2012). Esta expresión de la arquitectura, referenciada como vernácula o tradicional podría asimilarse al purismo en el arte y sus movimientos estilísticos; la diferencia, sin embargo, radica en que la pureza y simplicidad en la arquitectura vernácula no son buscadas como dogma, sino que resultan la consecuencia lógica de una adaptación a la naturaleza.

Este fenómeno, coherentemente, puede ser manifestados en muchas concreciones materiales, con la vivienda como el máximo exponente. Por este mismo motivo, territorio y vivienda son dos categorías que coexisten y no pueden entenderse sin debatir la relación simbiótica que mantienen. Cada una de las categorías debe tratarse desde una escala de análisis diferente, es decir, en un espacio y periodo temporal determinados. Esta delimitación contextual es la que permite estudiar las prácticas del habitar y promover una investigación de los fenómenos constructivos en un territorio determinado.

La noción de territorio es polémica, especialmente en el ámbito de la geografía, ya que toma un cariz político y social que entraña un conjunto de relaciones complejas que admiten una amplia discusión para la teorización del concepto. En la mayoría de trabajos académicos de y sobre arquitectura se denota una cierta confusión para el empleo de términos como lugar, espacio, territorio y región entre otros; sin una distinción clara entre uno u otro generando un



desconcierto entre estas categorías que todavía se magnifica en otras ciencias, especialmente la geografía (Ramírez Velázquez & López Levi, 2015). Varios autores concluyen que el territorio puede definirse como el espacio apropiado, por lo que necesita la acción humana para conformarse: “[...] el espacio se considera como la materia prima a partir de la cual se construye el territorio y, por lo mismo, tendría una posición de anterioridad con respecto a este último” (Giménez, 1999, pág. 6).

El principal problema que presenta el territorio es su multidimensionalidad (Altschuler, 2013, pág. 65), al poder ser abordado y tratado desde múltiples perspectivas, que no tienen nada que ver una con la otra, y que pueden derivar en graves confusiones para tratar el concepto. Todo ello genera desconocimiento y discusión entre las distintas líneas de las ciencias sociales, principalmente la antropología y sociología contra la geografía (Giménez, 1999). Por otro lado, la arquitectura e ingeniería generalmente obvian el significado de los términos empleándolos indiscriminadamente, razón de más para comprender que comporta cada uno de ellos.

Lo que distingue el territorio del espacio o el lugar es la acción humana, en todas sus vertientes, y las transformaciones que genera en el medio físico; Milton Santos (2000) teoriza sobre el término desde la disciplina geográfica dándonos las pautas para diferenciar la concepción que entraña el mismo: “El territorio es un lugar en el que desembocan todas las acciones, todas las prácticas, todos los poderes, todas las fuerzas, esto es, donde la historia del hombre se realiza plenamente a partir de las manifestaciones de su existencia. La Geografía se vuelve la disciplina más capaz de mostrar los dramas del mundo, la nación del lugar”. Encontramos aquí una coyuntura muy clara para el empleo del territorio como concepto básico de la investigación, debido a la transformación de los recursos naturales y del entorno inmediato que siempre asociamos a la construcción tradicional; siendo un ejemplo muy claro la arquitectura de los espacios de producción, con la punta de lanza de las grandes haciendas en Latinoamérica (ver Figura 1.7)



Figura 1.7. Hacienda de Tahuejo, Taretan, Michoacán. Fotografía aérea tomada con dron, ejemplo de la inserción de las prácticas espaciales y espacios de producción en el territorio. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).

El uso del término territorio en vez de espacio responde a ciertas nociones que se toman del mismo y la percepción que generan según el agente y el contexto en el que se engloba; Ramírez Velázquez y López Levi (2015) hacen un extenso recorrido de la significación del concepto a lo largo del tiempo, así como de la situación actual en las ciencias sociales y humanidades.

En este sentido, se trata de una categoría mucho más concreta y particular que la de espacio; al mismo tiempo, es más especializada ya que vincula a la sociedad con la tierra y por supuesto a la naturaleza, pero no desde su apariencia o representación, sino desde su apropiación, uso o transformación y alude tanto a una perspectiva política, como a una cultural, según sea el enfoque. (Ramírez Velázquez & López Levi, 2015)

Este enfoque diferenciador, que los geógrafos también usan para diferenciar territorio de paisaje no es otro que la cultura: “La cultura, entendida como pauta de significados, constituye una dimensión fundamental del territorio, porque la apropiación del espacio no tiene sólo un carácter instrumental sino también simbólico-expresivo” (Giménez, 2001, pág. 5). El concepto ha sido teorizado ampliamente, siendo un término complejo en su definición



y que cobra distintas concepciones según el enfoque y el acercamiento que se dé. Chanfón Olmos explica este conflicto en *Fundamentos Teóricos de la Restauración*: “De la postura que se adopte sobre el concepto de cultura [...] dependerá la idea que se tenga, selectiva o integral sobre el conjunto de objetos producto de ella. El conjunto se denomina Patrimonio Cultural” (Chanfón Olmos, 1983).

Pese a este nexo entre ambas categorías, territorio y vivienda, que constituye la cultura debe entenderse que no todas las nociones de cultura son iguales y no caer en la interpretación materialista de la arquitectura o incluso la más elitista de ciertos sectores de la restauración patrimonial. Entendiendo la cultura en el sentido más antropológico, la vivienda tradicional incluye un conjunto de saberes, prácticas y costumbres generacionales que son los que aportan una verdadera riqueza cultural y constituyen la identidad de las gentes. Retomando a Zevi (1951): “la morfología arquitectónica se explica por medio de las condiciones geográficas y geológicas de los lugares donde se yerguen los monumentos”, pero yendo más allá las condiciones geográficas también ayudan a entender el carácter de los mismos pueblos y sociedades.

Como ejemplo, la Figura 1.8 muestra el paisaje cafetero de la localidad del Cairo, en el Valle del Cauca, Colombia, una clara representación de como el territorio conforma un enlace indisoluble con el ser humano: no únicamente somos nosotros quienes transformamos el territorio, sino que el territorio influye, moldea y condiciona nuestros modos de vida y actividades. La vivienda es una concreción material más de este proceso, pero quizás la más importante y significativa en nuestra sociedad.



Figura 1.8. Paisaje en el Cairo, en la región del Eje Cafetero del Valle del Cauca, Colombia. El cultivo del café, una planta no endémica de la región, ha transformado el modo de vida de las comunidades. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

1.2.1. La vivienda como respuesta al modo de habitar un territorio

El producto de esta interacción entre el territorio y el ser humano es amplio y difícil de definir, siendo la vivienda una de las concreciones materiales más representativas de este patrimonio. Por ello es muy importante el ejercicio de aplicar un enfoque antropológico al estudio de la vivienda y su relación directa con el concepto de la cultura. Retomando la dimensión de cultura como el eje diferenciador entre el territorio y el paisaje (Giménez, 2001), la vivienda constituye parte de las acciones modeladoras del ser humano, siendo una de las representaciones más tangibles que podemos identificar.

Resulta muy interesante la objeción que hace Bonfil Batalla a este concepto tan interiorizado que es la cultura, siendo una noción concebida de forma muy positiva por la mayoría de la población; sin embargo, la crítica a la “cultura elitista” es latente en su obra, definiendo el concepto como: “un conjunto más o menos limitado de conocimientos, habilidades y normas de sensibilidad que les permiten a ciertos individuos apreciar, entender y/o producir una clase particular de bienes” (Bonfil Batalla, 2004). Precisamente esta es una de las principales reivindicaciones que muchos estudiosos e investigadores de la arquitectura vernácula hacen,



puesto que no goza de protección por parte de las instituciones y es considerada como un patrimonio menor¹⁷ (Dipasquale et al., 2020).

Partiendo del análisis no sesgado de la vivienda, y entendiéndola como un fenómeno complejo fruto de incontables interacciones con el entorno; es posible estudiar la unidad doméstica como producto material con diferentes posibilidades de lectura. De este modo no se cae en la visión práctica y sesgada que ha tenido la arquitectura hasta tiempos recientes y se puede entender la habitabilidad como una manifestación concreta en la que el investigador debe aplicar una visión global para lograr la aprehensión y comprensión de la misma (Chico Ponce de León, 2000). Por ejemplo, las trojes, tipologías vernáculas del pueblo purépecha en Michoacán (ver Figura 1.9), no pueden entenderse sin el cuadro completo de su razón de ser. Además de las cuestiones materiales y las condicionantes geográficas y climáticas, confluyen las formas de producción de la región, con la predominancia del cultivo de maíz; además de las cuestiones culturales, la jerarquía, la organización familiar o las costumbres locales.



Figura 1.9. Troje purépecha rodeada por un cultivo de maíz en Charapan, Michoacán. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).

¹⁷ El concepto de la arquitectura vernácula como patrimonio menor ha sido recurrente durante muchos años, desde las primeras discusiones y concepciones del fenómeno a partir de Rudofsky (1964). Son muchos los proyectos recientes que han buscado mayor reconocimiento y valorización de estas construcciones; el libro *From Vernacular to World Heritage* (Dipasquale et al., 2020), producto directo del proyecto 3D Past compendia varios de los retos y problemáticas que ha enfrentado el patrimonio vernáculo hasta el momento proponiendo las futuras estrategias de protección, conservación y mitigación de los riesgos existentes.



En el caso de las trojes, la distribución espacial en función de las actividades o el hecho de poder ser desmontadas y trasladadas si la familia lo requiere nos dan una idea de la capacidad de adaptación de la vivienda. Ésta, por lo tanto, entraña muchos aspectos sociales que pueden observarse por ejemplo en la organización espacial, las actividades que se realizan y los cambios de uso y evolución de la misma. Más allá de todos esos aspectos, últimamente, lo intangible y lo afectivo que puede generar un hogar no puede ser medido o cuantificado, por lo que debemos empezar a pensar en la vivienda como un objeto simbólico, que tiene una especial importancia sentimental para un grupo de personas (Muñoz Viñas, 2004), y que manifiestan un conjunto de recuerdos por el mismo (ver Figura 1.10).



Figura 1.10. Casa con recuerdos n°13 en Antigua Guatemala, Guatemala. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Igualmente, si tratamos la habitabilidad y la arquitectura como fenómenos complejos, este supuesto aplica también al territorio, del que ya habíamos discutido y definido sus alcances: “Los territorios ya no pueden ser realmente contenedores de una única cultura, en la medida en que las personas se desplazan con sus significados y los significados encuentran formas de desplazarse sin que las personas se muevan. De este modo, las diferentes experiencias y biografías de sus miembros se vuelven relevantes (Shmite & Nin, 2006)”. De aquí se



desprende la transformación de la vivienda, adelantando uno de los fenómenos que se discuten en posteriores apartados del capítulo, y que conforman la situación actual de la arquitectura vernácula.

En este sentido es de gran importancia escuchar y documentar las experiencias de los propios usuarios de este legado cultural. La forma de concebir los espacios, los materiales, los cambios y alteraciones, etc. es radicalmente distinta para los sujetos que han habitado por años estas construcciones. El testimonio tan próximo de estas personas, más aún las de más avanzada edad, puede arrojar información muy valiosa y que complementa los esfuerzos derivados de la investigación científica (ver Figura 1.11); adicionalmente, herramientas como la entrevista oral o el registro por medios audiovisuales pueden ayudar a compendiar este conocimiento y lograr una difusión más accesible al público general.



Figura 1.11. Usuarios de una vivienda de adobe en Ihuatzio, Michoacán. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz, 2021).

1.2.2. El territorio y la vivienda de adobe. Simbiosis y adaptación cultural en la construcción con tierra

Habiendo desglosado la primera categoría, el territorio, es necesario ver la relación que se produce entre éste y la vivienda, siendo la segunda la representación física del fenómeno de habitar. Se ha teorizado con la relación y el papel que juega la vivienda, la casa, o el hogar,



con el territorio habitado. Ramírez y López (2015), definen la casa como la transición que se forma de la interacción entre el cuerpo y la comunidad, y entre la sociedad y el espacio que habita. Por ello, vivienda y territorio son dos categorías que no pueden desligarse, unidas por estrechos lazos que terminan conformando las culturas constructivas¹⁸.

Acotando las dos variables, la relación entre el medio físico geográfico con la vivienda de adobe radica en las relaciones que se producen entre el objeto físico y el medio. La arquitectura de tierra constituye una materialización muy simple y a la vez muy pura de la necesidad del ser humano por ampararse y buscar protección ante un entorno muchas veces hostil (ver Figura 1.12).



Figura 1.12. Vivienda tradicional de bajareque en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México.
Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

¹⁸ La cultura constructiva es un concepto muy asentado en el ámbito arquitectónico patrimonial, haciendo referencia a aquellas soluciones constructivas tipológicas que pueden ser identificadas respecto al modo de habitar un lugar (Jorquera, 2014). Jorquera emplea el término con asiduidad, así como muchos otros autores también coinciden este fenómeno de las culturas sísmicas que se trata posteriormente en este mismo documento.



Pero, además, es a partir de la vivienda que se empiezan a forjar muchas de las interacciones sociales del hombre, como el núcleo familiar que tanto asociamos a la casa. Asimismo, debemos tomar en cuenta el resto de usos como el religioso, el administrativo, sin olvidar los espacios de producción e incluso de aprovisionamiento¹⁹. De cualquier forma, este binomio entre el objeto arquitectónico y el usuario es el que conforma una unión indisoluble que tradicionalmente se ha querido analizar por separado pero que actualmente buscamos resolver mediante el estudio multidisciplinar.

Observando que todas estas relaciones responden a una lógica, una experiencia próxima de la que nos habla Geertz (1983)²⁰, que se traduce en la técnica desde la definición más básica de este concepto y que se concretiza en la tecnología constructiva que es una de las bases sino la más importante en la investigación en la arquitectura vernácula. Todos estos aspectos tecnológicos responden a cuestiones locales de adaptación al medio, como puede apreciarse en la elección de los materiales de construcción, dando lugar a sistemas sostenibles.

Esta adaptación de la arquitectura vernácula es idealizada por muchos autores, fungiendo como una extensión de la naturaleza y minimizando el impacto del ser humano en el hábitat, Thoreau (1854) escribe: “E igual de interesante ha de resultar el hábitat del poblador urbano cuando su vida sea tan sencilla y grata a la imaginación que no se perciba en el estilo de aquél el menor esfuerzo por causar efecto²¹”. Rudofsky (1964), siendo arquitecto, se muestra crítico con la exaltación de las obras y estilos reconocidos por la academia, reclamando la arquitectura vernácula, tradicional o indígena, o como más tarde acuña “La Arquitectura sin

¹⁹ Gran parte de los espacios de producción en México, incluyendo las históricas haciendas, fueron contruidos con adobe y sistemas constructivos a base de tierra. Otro de los ejemplos más claros en el caso del uso para el almacenaje de bienes en la arquitectura vernácula son las trojes en la meseta purépecha, fungiendo tanto como núcleo familiar como espacios para el almacenamiento del maíz o el uso de cocina.

²⁰ En la obra *Conocimiento local. Ensayos sobre la interpretación de las culturas*, Geertz hace una interesante relación entre el sentido común y la cultura y el arte, desligada de cuestiones estilísticas, siendo una visión muy aplicable a las culturas constructivas y el conocimiento empírico que ha dado lugar a la arquitectura vernácula.

²¹ Henry David Thoreau, en su ensayo *Walden, o Walden, la vida en los bosques*, narra bajo su propia experiencia la construcción de una cabaña cercana al lago Walden con la finalidad de llevar una vida contemplativa, desligada de lo material y de los procesos industriales de la época. Este proyecto de vida coincide con muchos de los actuales cánones de la sostenibilidad aplicados en la arquitectura, buscando generar el mínimo impacto ambiental posible.



Arquitectos”²². Debe resaltarse que esta relación simbiótica de la vivienda con el medio físico ha llegado a ser idealizada hasta cierto punto, teniendo en cuenta que cualquier acción del ser humano generará un impacto al medioambiente por mínimo que sea; el término medio pasa por reaprender este conocimiento y aplicarlo con sentido común.

Este sentido común, guarda una aparente relación con las manifestaciones ancestrales de la arquitectura: “[...] los términos que quiero utilizar en referencia al sentido común, añadiendo un sufijo para suavizarlos, son: natural, práctico, transparente, asistemático y accesible. (Geertz, 1983)”, siendo todos estos términos asimilables a las construcciones vernáculas. Como bien expresa Geertz, si algo logra un funcionamiento tan orgánico, es totalmente lógico seguir empleando los mismos métodos y perfeccionarlos.

Aterrizando a los factores materiales, la relación entre los recursos disponibles y la concreción física del espacio habitable es directamente proporcional, y mediante el ejercicio de la simple observación podemos llegar a especular y discernir las razones de ser de un sistema constructivo determinado, pues finalmente responde a la disponibilidad material y las necesidades locales. Villalobos (2017) describe de forma muy acertada que: “la arquitectura en los seres humanos no es producto de la evolución biológica, es una resultante de tipo cultural motivada por la necesidad de adaptarse y ambientalmente sobrevivir”

Si nos centramos en el uso de la tierra, como todos sabemos uno de los recursos más accesibles con los que contamos en nuestro planeta, reconoceremos los conceptos expuestos de sentido común, sostenibilidad, identidad, entre muchos otros. La construcción con tierra puede llegar a relacionarse con los procesos de evolución culturales del ser humano, al ser una de las manifestaciones más primitivas y auténticas que existen de la transformación del entorno y el paisaje natural para satisfacer nuestras necesidades.

Villalobos (2017) incluso llega al punto de relacionar la arquitectura más remota con el desarrollo neurocognitivo y físico del ser humano debido al proceso de interacción y

²² Arquitectura sin arquitectos es una de las obras más citadas y comentadas dentro de los ámbitos de la arquitectura sostenible, bioclimática, vernácula, tradicional, entre otros términos. Sin embargo, no es tan conocido por el gran público que la primera manifestación de Rudofsky por el fenómeno resultó e una exposición itinerante en el MOMA de Nueva York, a partir de la cual se dio nombre y paso al célebre libro publicado en 1964.

<https://www.moma.org/calendar/exhibitions/3459>



aprendizaje que supuso para los primeros pobladores²³. Estas primeras técnicas originales, entre las que destaca el uso de la tierra desde épocas antiquísimas (Heathcote, 1995), constituyen un reflejo de la evolución y la organización social, por lo que aunado a todos los factores previamente comentados para justificar la preservación de este patrimonio, se suma uno de gran relevancia.

Sin embargo, el objeto de investigación de la tesis doctoral es la vivienda de adobe, por lo que es necesario destacar esta técnica de mampostería de tierra cruda ante las demás. Daneels (2022), en sus estudios arqueológicos y antropológicos de la arquitectura de tierra, destaca la técnica del adobe entre las demás, considerando que el nivel de tecnificación y desarrollo que implica la distinguen de otros sistemas más intuitivos y rudimentarios (ver Figura 1.13).

A todos los niveles, la innovación del adobe rectangular representa un hito en la profesionalización de la construcción y, hasta ahora, se asocia con el surgimiento de sistemas complejos de organización sociopolítica. A diferencia de las técnicas de bajareque y tierra modelada, que fueron inventadas de manera independiente en muchos momentos y lugares del mundo, el adobe parece haber sido una de estas invenciones, como la agricultura, la escritura y el Estado, que emergieron en unos pocos lugares y contextos sociopolíticos y que después adoptaron otras culturas. (Daneels, Introducción. La arquitectura de tierra en Mesoamérica: una línea de investigación, 2022)



Figura 1.13. Producción y secado de adobes en Erongarícuaro, Michoacán, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

²³ Se recomienda ampliamente la lectura trabajo “Construcción con tierra, evolución e identidad situada” presentado en el 17º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con tierra en la Paz, Bolivia en 2017 (Villalobos, 2017).



Precisamente esta organización funcional y sistemática que el adobe implica es una de las razones por la que el paisaje tradicional mexicano y sus asentamientos fueron construidos mayormente con esta técnica. Dejando de lado las edificaciones monumentales, es innegable que el grueso de la vivienda fue edificado principalmente con este sistema constructivo, y que, pese a su relevamiento por los materiales industrializados, todavía constituye una de las señas nacionales de identidad, siendo la cuna de un gran porcentaje de la población actual.

1.2.3. El abandono de las culturas constructivas: tradición y modernidad

Veuen venir un món essencialment distint del que havia conformat tots els estils del passat. Un món en el que la construcció s'industrialitzarà rapidíssimament, en que la màquina substituirà l'obra artesana i el treball manual, en que la casa i el mobiliari acabaran essent el producte d'un simple i racionalitzat procés de fabricació, com ho ha arribat a esser un automòvil o una nevera

(Bohigas, 1963)

Arquitectura vernácula y arquitectura tradicional suelen fungir como sinónimos, con un empleo indistinto de los términos para referirse a un mismo concepto. Así como el primer vocablo: vernáculo/a no es conocido por la gran mayoría del público, mientras que la tradición es una noción interiorizada por todas las culturas. Rudofsky (1964), mismamente critica la indiferencia de la ciencia de la arquitectura ante estas tipologías: “De ella se sabe tan poco que ni siquiera tenemos un nombre para ella, nosotros la llamaremos vernácula, anónima, espontánea, indígena o rural”.

Regresando a la dialéctica acerca del concepto, aparece un término opuesto, que es la modernidad. La modernidad cobra sentido como contraposición al clasicismo y la tradición. Sin embargo, no deben confundirse estos dos últimos conceptos, puesto que la arquitectura vernácula escapa de los formalismos o escuelas debido a su propia naturaleza; en este caso no responde a corrientes o estilismos de la era, sino que su carácter popular lo hace ante los recursos disponibles y la adaptación al hábitat. Así como Bohigás presenta un enfrentamiento



directo entre ambos²⁴, Ettinger McEnulty (2008) considera los dos términos indisolubles, como dos caras de una misma moneda que pese a ser diametralmente opuestas no pueden entenderse sin la existencia del otro.

Así como en anteriores apartados veíamos la adaptación de la arquitectura vernácula a los sistemas y medios, con el claro ejemplo de la habilitación de las viviendas para mitigar los posibles daños ocasionados por fenómenos naturales; estos conocimientos y estrategias heredados han cesado su proceso de atavismo debido a la sucesión de eventos anteriormente comentados con la llegada de la industrialización y la modernidad. En Latinoamérica se suele tomar como punto de inflexión la segunda mitad del siglo XX con la popularización del concreto (Durán Núñez & Brea García, 2009) y su consecuente asociación a un nivel socioeconómico alto, propiciando que el grueso de la población optase por este sistema en vez de los tradicionales.

Debe entenderse también, que la arquitectura, como reflejo del genio humano, sufre transformaciones con el tiempo. Esta transformación de la vivienda vernácula se da gradualmente, y corresponde a condiciones específicas para cada objeto de estudio, de ahí la importancia del estudio del contexto cuando analizamos la arquitectura. Sin embargo, todos los cambios tienen como objetivo último la mejora de la calidad de vida de los usuarios de estas construcciones, siempre como respuesta a las circunstancias locales (Vegas et al., 2020).

La sustitución y transformación de la arquitectura vernácula es un hecho consumado e imposible de evitar, aunque sí pueden minimizarse sus efectos. En Latinoamérica esta situación se ha visto acentuada los últimos años (Paredes Avilés et al., Pérdida del patrimonio edificado de los Chimbos en la provincia de Bolívar, ciudad de Guaranda, Ecuador. Recomendaciones para su conservación, 2020), también acrecentada por los riesgos naturales, principalmente los sismos por su impacto inmediato y destructivo (Sánchez Calvillo et al., 2021), fenómeno que más adelante se analizará a detalle. Tras estos eventos, los sistemas tradicionales son percibidos como inseguros por la población siendo usados

²⁴ Oriol Bohigás sobre el cambio de espíritu del momento (zeitgeist) de los arquitectos a partir de la industrialización. Estos avances irrefrenables supusieron una ruptura brusca con la tradición y los clasicismos, llevando a unos nuevos estándares de vida y progreso que muchos consideraron incompatibles con la tradición clásica y los sistemas constructivos y materiales anteriores.



como subterfugio de la daños y efectos en vez de incurrir y mejorar los planes de prevención de riesgos. Sin embargo, este es un fenómeno global, y podemos reconocer ciertas tendencias que se repiten en diferentes regiones. El término vulnerabilidad²⁵ puede ser introducido aquí como la tendencia o propensión de esta tradición constructiva a desaparecer (Mileto et al., 2021), aunque realmente implica una discusión mucho más extensa.

Otros autores prefieren emplear o entrelazan los conceptos de transformación y transfiguración de la arquitectura vernácula²⁶ (Gómez Barranco et al., Factores sociales detonantes en la transformación de la vivienda a base de muros de tierra, 2015). Por ejemplo, López Calvo y Gómez Barranco se decantan por el segundo término (2015), identificando tres factores principales de esta transfiguración: 1) la dispersión en el territorio, 2) la pérdida de los procesos constructivos y el personal calificado, 3) la vivencialidad del espacio. Esta tríada corresponde a muchas de las situaciones adelantadas en la presente discusión, en la Figura 1.14 se presenta una clara muestra del segundo factor, con la alteración del sistema tradicional sin ninguna clase de criterio o sensibilidad.



²⁵ En la sección 1.3 se distiende el concepto de vulnerabilidad y sus dimensiones. Posteriormente, en el tercer capítulo del documento, el eje central es constituido por el análisis de la vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe mediante herramientas de evaluación.

²⁶ Romero Pérez limita esta transfiguración a las dimensiones sociales, culturales, económicas y políticas.



Figura 1.14. Tzintzuntzan, Michoacán, cuando la transición entre lo tradicional y lo moderno carece de buenas prácticas y sensibilidad. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).

Retornando al concepto de transformación, si se analiza la situación en el estado de Michoacán, los materiales tradicionales han quedado asociados a las clases económicas más bajas (Martínez Aguilar & Bedolla Arroyo, 2021), y por lo tanto constituyen un atraso tecnológico para gran parte de la población que prefiere construir con materiales industrializados. Muchas de las cuestiones a nivel local en el libro *La transformación de la vivienda vernácula en Michoacán. Materialidad, espacio y representación* de Ettinger (2010) o como testimonio de los mismos usuarios en el documental *Xirangua*²⁷ (Sánchez, 2021).

Para el estado, la permanencia de estas construcciones puede ser medida y estudiada a partir datos estadísticos y sistemas de información geográfica (SIG), permitiendo visualizar el estado de la vivienda vernácula y su continuidad o abandono según las distintas regiones o municipios del estado (ver Figura 1.15). La tendencia es que aquellos municipios que contienen o son cercanos a los principales núcleos de población cuentan con menores porcentajes de preservación de la vivienda tradicional; mientras que las regiones rurales y con mayor presencia de grupos autóctonos han logrado conservar una mayor parte de este patrimonio cultural.

²⁷ *Xirangua* es un proyecto de documental que busca explorar los aspectos más significativos de la arquitectura y construcción tradicionales del estado de Michoacán, retratando la realidad de esta pérdida del patrimonio vernáculo y retratando la importancia de su conservación mediante entrevistas con distintos actores: población local, artesanos de la construcción, académicos y expertos. *Xirangua* fue un producto directo de la investigación doctoral y varios proyectos asociados, desglosándose los objetivos y alcances más adelante en el documento.

<https://cultura.michoacan.gob.mx/noticias/presentan-documental-xirangua-en-centro-cultural-clavijero/>

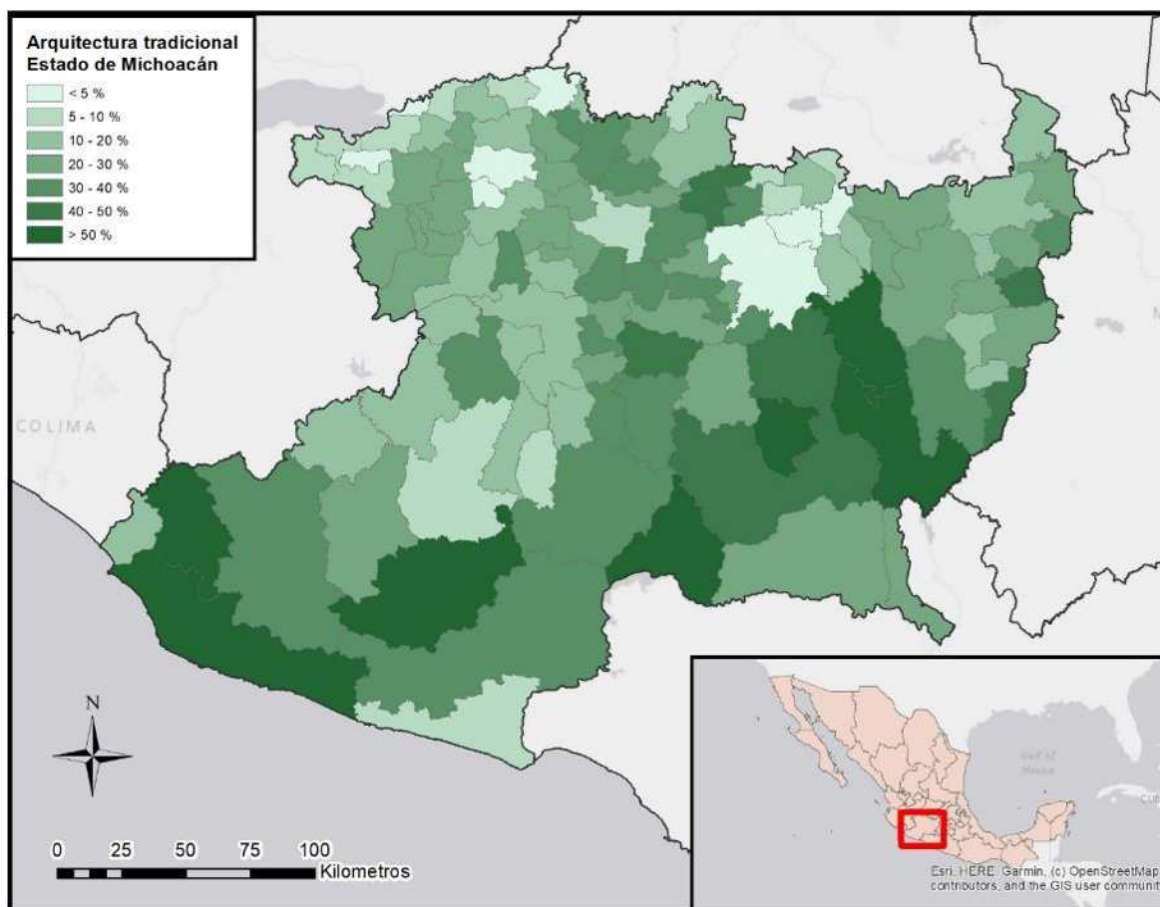


Figura 1.15. Distribución municipal del porcentaje remanente de vivienda vernácula en el estado de Michoacán. Mapa elaborado por el autor en ArcMap 10.3. Fuente: (INEGI, 2015).

En el documental *Xirangua*, Agustina Pineda, lugareña de Santa Cruz de Morelos, Michoacán (ver Figura 1.16), dilucida muy claramente el fenómeno del abandono de la arquitectura tradicional: “Yo estuve muy a gusto aquí. Viviendo aquí. Porque aquí vivió mi bisabuelo. Y al último quedé yo. Pues ya se acabó, y la casa también. Y si se hubieran tardado tantito ya ni a mí me hallan” (Sánchez, 2021). En ciertos casos no hay una fuente más fidedigna que la experiencia directa de los afectados por una situación específica; en el caso de la entrevistada, fue la última persona en habitar una gran construcción de adobe que en épocas pasadas sirvió de cobijo y espacio de producción para una amplia familia.



Figura 1.16. Entrevista a antigua usuaria de una construcción de adobe actualmente abandonada.
Fuente: Documental Xirangua (Sánchez, 2021).

Los ejemplos de casos en los que se llegó al abandono de una de estas estructuras por razones de distinta índole son innumerables, a consecuencia de todo tipo de historias que merecen ser contadas. Por ello, la transcripción de la entrevista oral a Agustina Pineda (Sánchez, 2021), refleja la situación expuesta de una forma muy clara, y además nos aporta la dimensión más humana y cercana de la problemática de investigación expuesta:

David Duque (entrevistador): ¿Y en qué momento fue en el que se dejó en descuido esto? ¿Cuánto tiempo ya?

Agustina Pineda (entrevistada): Ya hace como unos diez años yo siento. La que nos platicaba era mi mamá, que ella pues aquí había vivido. En el 72, fue cuando nos vinimos aquí con los becerritos, a criar becerros. [...] Por una parte acá, porque acá es más fresco, y esa casa no hace tanto que la hicieron. Pero yo estaba más a gusto aquí, porque aquí está más fresco, allí está bien caliente. Aquí está peligroso pues, por eso hicieron esa casa allá, para acarrearnos para allá. [...] No, esto ya se acabó, nomás que no la han tirado, pues ha sobrevivido por una máquina, para que la tire. Aquí sirve para guardar basura. Para mí, pues es una cosa muy bonita, viví aquí unos años, viví a gusto yo, porque estábamos todos juntos, pero ahorita ya estamos desapartados todos. Ya no vivo a gusto, nada, me quedé a vivir yo sola.

Dejando de lado los aspectos más desalentadores de la arquitectura vernácula, destacan varios proyectos a nivel internacional que denuncian la problemática del abandono del patrimonio



construido en tierra²⁸. También encontramos esfuerzos por recuperar este patrimonio a nivel estatal y local con las viviendas tradicionales de adobe del entorno del lago de Pátzcuaro en Michoacán, siendo localidades de gran importancia en el estado por su historia y cultura tan significativas (Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, 2015).

Varias de estas iniciativas y proyectos son explicadas con más detalle en el Capítulo II del documento, donde se analiza la situación actual de la arquitectura de tierra en el ámbito científico y académico. Para concluir en una nota más positiva, más adelante en el documento se expondrá el diseño y participación en proyectos de cooperación al desarrollo que incluyeron localidades con una fuerte presencia de arquitectura en tierra, y que quedaron integrados como parte de la investigación doctoral con alcances tanto en el ámbito académico, como el de la divulgación científica y el social.

²⁸ El proyecto RISK-Terra en la península ibérica (España y Portugal) estudia el impacto de las amenazas por fenómenos naturales en la arquitectura de tierra, pero tomando también en cuenta los agentes sociales, antrópicos y los mecanismos de deterioro y transformación de las mismas construcciones. Partiendo del análisis de todas las variables, muchos resultados de esta investigación se han visto reflejados en publicaciones especializadas y trabajos de divulgación.



1.3. TERRITORIO Y FENÓMENOS NATURALES: SISMICIDAD Y VULNERABILIDAD

En un instante las seguridades se trituran. Un paisaje inexorable desplaza al anterior. Cascajo, mares de cascajo, la desolación urbana, la escenografía apocalíptica, los edificios caídos como grandes bestias heridas del mundo perdido. El llanto. Los rostros lívidos. Las preguntas que ni siquiera deben ser dichas. El dolor como incompreensión y asimilación de la realidad. El peregrinar de los sobrevivientes, ansiosos de un genuino punto de apoyo para su mirada. Los minutos y las horas que suceden a las convulsiones de la tierra, al derrumbe, al estallido de vidrios, a las salvaje demoliciones de la naturaleza

(San Juan Victoria et al., 1987, p. 163)

Partiendo de la discusión anterior acerca de la noción del territorio y su relación de influencia/dependencia con la arquitectura y el acto de habitar, deben tomarse en cuenta los impactos del medio físico en nuestras construcciones, incluyendo aquellos que no son de nuestro agrado. Estos eventos, que para el hombre son tan brutales e impactantes, forman parte del curso natural y la evolución de nuestro planeta, por lo que debemos aprender a convivir con ellos.

Los fenómenos naturales son causantes de importantes daños en el patrimonio cultural, siendo una de las mayores fuentes de destrucción, llevando en muchos casos a la desaparición total de un patrimonio tangible y de los símbolos de una sociedad, los monumentos. Actualmente, el planeamiento y la gestión de riesgos en distintas escalas, ya sean regiones, núcleos urbanos, o monumentos, es de vital importancia, y son varias las herramientas que se han desarrollado para mitigar este tipo de riesgos²⁹.

Los sismos, son precisamente los fenómenos más notables por su elevada destrucción traducida en daños materiales y pérdidas humanas. Sin embargo, los efectos psicológicos en la población son aún mayores, suponiendo un decrecimiento de la economía en las regiones y países afectados (Spence, Earthquake Risk Mitigation - The Global Challenge, 2009). Las

²⁹ En el Capítulo III del documento se hace una revisión de las metodologías de evaluación de vulnerabilidad sísmica, así como la implementación de metodologías de índice de vulnerabilidad en casos de estudio de viviendas de adobe tradicionales mexicanas.



afectaciones son, además, mucho más graves en las zonas urbanas de los países en vías de desarrollo, los cuales no cuentan con infraestructuras ni estrategias suficientes para afrontar las amenazas naturales, confluyendo en una mayor vulnerabilidad ante estos eventos (Chardon, 2008).

México es un país con una importante historia sísmica y una experiencia cuantiosa en sufrir y superar estos eventos. La ubicación geográfica de muchos estados, en el Eje Neovolcánico, así como la convergencia entre la placa Norteamericana, la placa de Cocos, la placa del Pacífico, la placa del Caribe, y la microplaca de Rivera (ver Figura 1.17), genera una alta sismicidad en ciertas regiones del país, realmente propensas a sufrir eventos sísmicos de magnitudes elevadas (Sanchez-Calvillo et al., 2020), que dejan a su paso un rastro de destrucción con el que posteriormente la sociedad debe lidiar.

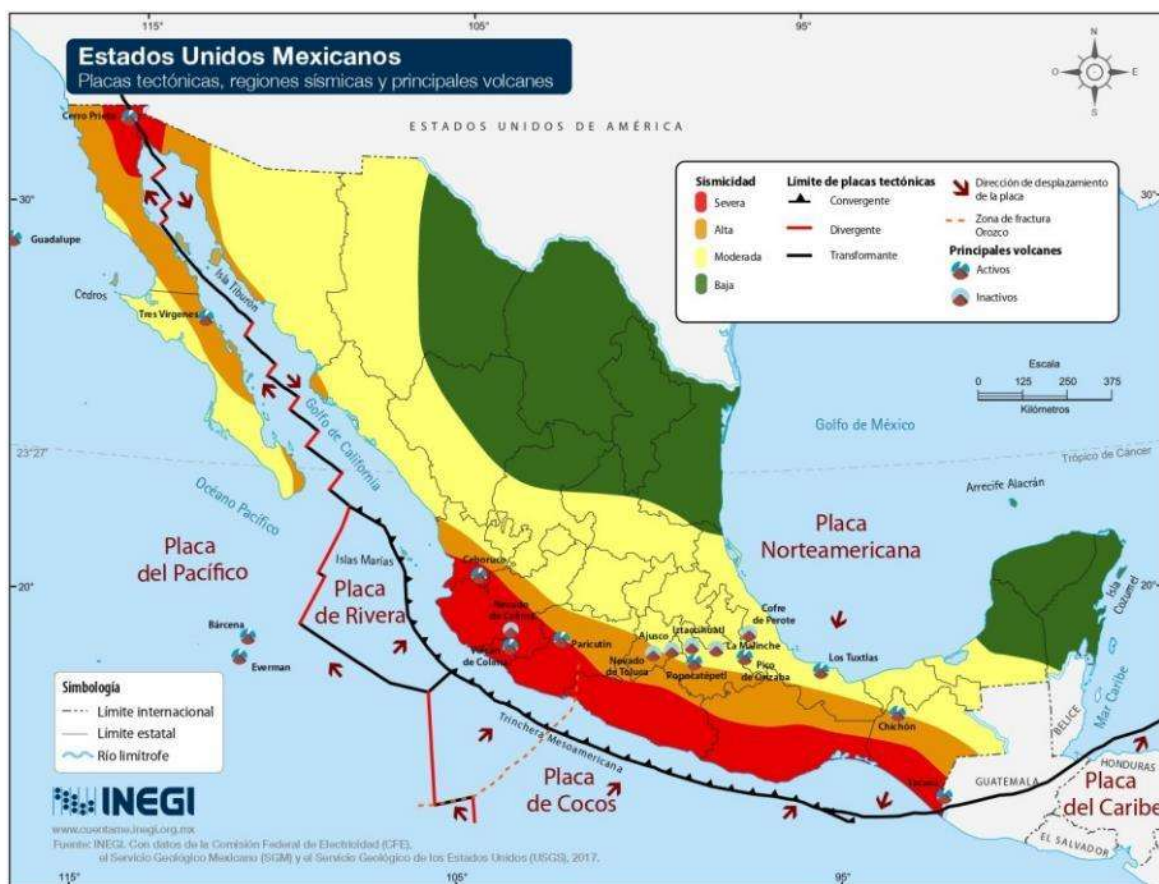


Figura 1.17. Placas tectónicas, regiones sísmicas y principales volcanes de México. Fuente: INEGI



Debido a esta compleja interacción y a la ubicación geográfica del país, los eventos destructivos han sido constantes en el territorio, formando parte incluso de la idiosincrasia de la población. Desde que empezaron a registrarse estos hechos con las primeras crónicas escritas hemos podido trazar una historia sísmica de México, que ha sido compilada en algunas obras de referencia, como *Los sismos de la historia de México*, de García-Acosta y Juárez (1996), que nos permite entender muchos de los procesos de destrucción y reconstrucción de la vivienda que hoy en día debemos afrontar. Con el consecuente avance tecnológico, la ciencia sísmica o sismología experimentó grandes avances a mediados del siglo XIX, con la subsecuente instalación del primer sismógrafo del país en 1906 (Pérez-Campos & Espíndola Castro, 2018), hecho que permitió grandes avances en la documentación de estos eventos y la correlación con los daños provocados en el patrimonio edificado.

Habiendo puesto en situación al lector sobre la delicada posición geológica de gran parte del país, es necesario en primer lugar definir la vulnerabilidad sísmica no sin antes definir el concepto principal, la vulnerabilidad, que siendo la cualidad de vulnerable refleja la propensión a sufrir cualquier tipo de daño, lesión o deterioro.

No existe un método simplificado o universal para clasificar la vulnerabilidad, sino que existen varios métodos subjetivos. Las investigaciones actuales en el tema tienen el objetivo de pasar del método cualitativo al cuantitativo. Existen entre otras vulnerabilidades la social, la física, la estructural o la económica, entre muchas otras. No obstante, cuando se habla de vulnerabilidad sea del tipo que sea deben tratar de responderse las siguientes preguntas para lograr una visión completa del fenómeno:

- ¿Quién es vulnerable? Un grupo de población, una región, un sector específico dentro de una ciudad, o todo aquel conjunto de actores que pueden verse afectados por el riesgo.
- ¿A qué se es vulnerable? En relación directa con el riesgo. El riesgo puede estar directamente relacionado con fenómenos naturales, como los ya citados sismos u otros ejemplos como movimientos de tierras, volcanes o huracanes. Sin embargo, este concepto puede ser mucho más abstracto e involucrar aspectos sociales, culturales, económicos o de casi cualquier índole.



- ¿Por qué es vulnerable? Se busca saber cuáles son las razones de esta vulnerabilidad, por qué se ven potenciadas, qué cuestiones influyen a nivel local, regional, nacional, etc., y lo más importante, cómo podemos mitigar los efectos y daños del potencial riesgo a través de nuestras acciones.

Una constante al estudiar la vulnerabilidad de un sitio, grupo u objeto es que debemos tomar en cuenta todos los matices que comporta el ya citado territorio, y cómo el ser humano siempre encuentra una forma de adecuarse al entorno pese a lo agresivo que éste pueda parecer, entrando en juego el fenómeno de la arquitectura vernácula. Todos estos conceptos cuentan con un poderoso nexo de unión al binomio territorio-vivienda previamente conceptualizado, entendiendo que no es posible desligar las representaciones materiales de su entorno inmediato (ver Figura 1.18).



Figura 1.18. Viviendas de adobe en Antigua Guatemala, Guatemala, rodeadas por un paisaje volcánico altamente sísmico. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Sin embargo, no debe tomarse la vulnerabilidad como el eje vertebrador de la problemática, sino que debe tomarse en conjunto con la importancia del medio físico y geográfico en la ocurrencia, respuesta y efectos de un sismo en una población o región. Al mismo tiempo, un contexto amplio, o bien una visión holística es necesaria para entender correctamente el



fenómeno (Chardon, 2010), tomando en cuenta todas las dimensiones implicadas. La dimensión física y natural, asociada al concepto de peligro, es esencial para conocer la exposición de determinado caso de estudio o territorio a un peligro concreto.

1.3.1. Culturas sísmicas. La adaptación constructiva al medio habitable

Por otro lado, debe tratarse el concepto de vulnerabilidad en las edificaciones, entendido como la susceptibilidad que tiene un objeto a presentar cualquier tipo de daño ya sea causado por fenómenos naturales o antropogénicos. Junto al concepto de vulnerabilidad queda ligado el de peligro o riesgo que mentalmente asociamos a catástrofes naturales como sismos (ver Figura 1.16) o fuertes vientos causados por los ciclones tropicales. Sin embargo, son muchos los factores que contribuyen a aumentar o disminuir la vulnerabilidad de un inmueble empezando por sus características constructivas y terminando en el uso y las prácticas sociales de sus beneficiarios³⁰.

En los últimos años ha cobrado importancia un nuevo enfoque respecto a los riesgos naturales y las estrategias de refuerzo o mitigación ante los mismos, basado en el estudio de las estrategias ancestrales de la arquitectura vernácula e histórica. Es en este ámbito que surge el concepto de cultura o culturas sísmicas: éste hace referencia a todas las adaptaciones que ha desarrollado un grupo de población con el objetivo de mitigar el riesgo sísmico presente en la región (Halvorson & Parker Hamilton, 2007).

Este concepto engloba varias estrategias y comportamientos sociales, hechos que se enlazan con la adaptación del ser humano al territorio que se discutió anteriormente en el capítulo. Todas aquellas acciones que fruto de la experiencia, el ensayo y el error se han generado en el tiempo pueden llegar a tener una transcendencia real en el comportamiento estructural de las viviendas, y tras los eventos más destructivos estas conductas han sido reportadas en las construcciones tradicionales (Guerrero Baca L. F., 2019)

Como ejemplo, la Figura 1.19 muestra dos viviendas de adobe de la localidad de Jiquipilas, en el estado de Chiapas, situada en una región muy afectada por los sismos del año 2017;

³⁰ Sobre las características constructivas y tipológicas, éstas serán detalladas posteriormente en el análisis tipológico de las viviendas estudiadas, así como con la revisión de las metodologías de vulnerabilidad sísmica existentes.



puede observarse como una de ellas sufrió daños de carácter muy grave, comprometiendo su seguridad estructural, mientras que la segunda no presentó ningún tipo de lesión respondiendo favorablemente a los esfuerzos y solicitaciones sísmicas. Pese a la cercanía de las dos edificaciones, prácticamente situadas en la misma vialidad, los efectos causados por el terremoto fueron diametralmente opuestos, hecho que sólo puede explicarse mediante las buenas prácticas constructivas y la cultura sísmica, ya que una de las dos viviendas había sufrido diversas alteraciones al sistema constructivo tradicional al tiempo que la otra había mantenido sus características originales.



Figura 1.19. Viviendas de adobe y su distinta respuesta sísmica en Jiquipilas, Chiapas, México.
Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

El término cultura sísmica local³¹, también ha sido ampliamente extendido, principalmente en los estudios del patrimonio cultural, la arquitectura vernácula y los materiales y sistemas constructivos. Es común descubrir referencias al concepto en autores reconocidos de procedencia diversa (Correia, Lourenço, & Varum, 2015; Guerrero & Vargas, 2015; Jorquera, 2014; Ortega et al., 2017), por lo que encontramos una multitud de “culturas sísmicas” en regiones totalmente alejadas y aisladas unas de otras, pero que curiosamente presentan estrategias similares de refuerzo de las edificaciones.

Este trabajo de documentación ha sido muy importante para generar un notable cambio de paradigma en los últimos años, especialmente a partir de los estudios sobre la protección y

³¹ Comúnmente referido como ‘local seismic culture’ en la literatura.



reforzamiento de estos sistemas constructivos ante fenómenos naturales³². Si anteriormente se comentaba la baja consideración y desplazamiento de la arquitectura tradicional, actualmente, la perspectiva de aprender sobre el pasado y retomar los conocimientos más ancestrales de nuestra cultura ha cobrado un notorio interés por parte de la comunidad científica (Ferrigni, 2015), con un acercamiento más amplio a las problemáticas tratando de integrar los avances tecnológicos junto con los aspectos históricos y tradicionales de la construcción.

Centros de investigación como el RitsDMUCH en Japón han logrado una relevante producción e instrucción acerca de estas problemáticas³³, así como generalizar la cultura de la prevención y mitigación ante los riesgos ocasionados por desastres. La importancia de compartir las experiencias e instruir en la gestión y el planeamiento ante estos eventos, aprendiendo de los mismos errores del pasado es fundamental para minimizar los daños ante eventos como los sismos.

En Latinoamérica encontramos las investigaciones de Jorquera sobre la cultura sísmica chilena (Jorquera, 2014; Jorquera et al., 2017), siendo esta una de las regiones con mayor peligro en todo el mundo³⁴. Igualmente, podemos encontrar valiosos ejemplos de las culturas peruanas, con edificaciones de adobe gruesas y robustas que incorporan en uso de la quincha³⁵ como elemento ligero para las divisiones de los espacios interiores (Blondet y otros, Behaviour of earthen structures during the Pisco earthquake of August 15, 2007, 2008). Sin embargo, la tendencia global se ha decantado a la inadvertencia de estas relaciones

³² El libro *Seismic Retrofitting. Learning from Vernacular Architecture*, de Correia, Lourenço y Varum es uno de los máximos exponentes del comentado cambio de paradigma, compilando técnicas y sistemas vernáculos alrededor del mundo con un especial énfasis en las culturas sísmicas de Portugal, país de origen de los autores.

³³ RitsDMUCH es el acrónimo de Research Center for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage de la universidad Ritsumeikan University de Kyoto, Japón. Una de las principales contribuciones del grupo es la organización anual del ITC (International Training Course) en Gestión de Riesgos provocados por Desastres para el Patrimonio Cultural, siendo una actividad conjunta con ICOMOS e ICCROM (Jigyasu & Arora, 2019).

³⁴ El mayor sismo registrado fue el Terremoto de Valdivia de 1960, con una magnitud medida de 9.5 Mw en la escala de Richter.

³⁵ Sistema constructivo tradicional a base de entramados de fibras vegetales recubiertos con tierra, siendo el equivalente o sinónimo del bajareque en Sudamérica.



geométricas y morfológicas además de la omisión del uso de los materiales locales siendo sustituidos por elementos procesados e importados.

En México podemos encontrar culturas sísmicas en las regiones más propensas a estos fenómenos naturales. Igual que en el resto de territorios latinoamericanos, la arquitectura e ingeniería son fruto de la unión entre los materiales, construcciones y mano de obra local precolombinos y las nuevas tecnologías importadas por los europeos a partir del siglo XVI (Guerrero & Vargas, 2015); generando modos de edificación nunca antes vistos. En todo el continente, las estrategias anti-sísmicas actuales cuentan con un bagaje e influencia muy notorio de esta interacción entre las técnicas precolombinas y las nuevas tecnologías aportadas tras la colonización, no tan habituadas a estos eventos (ver Figura 1.20). Destacan por mucho los estudios de Guerrero Baca, por la interesante identificación que hace de las diferentes tipologías existentes de arquitectura en tierra (Guerrero Baca L. F., 2007) y de las variantes tipológicas que encontramos en las distintas regiones del país.



Figura 1.20. Refuerzo de madera en esquina de una vivienda de adobe en Buga, Valle del Cauca, Colombia. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

Centrándonos en una de las principales regiones de estudio de la presente investigación, la arquitectura tradicional de Morelos empezó a ser estudiada como tipología constructiva en los años noventa, encontrando las primeras aproximaciones desde la perspectiva tecnológica arquitectónica gracias a la investigación de autores como el ya mencionado Guerrero Baca



(1996), quien fue de los primeros en identificar las principales características de las construcciones vernáculas locales y la adaptación al entorno natural como eje vertebrador. Precisamente esta es una de las mayores cualidades de la arquitectura tradicional, la adaptación cultural, entendida como la integración y la interacción que hacen los seres humanos en un territorio (Niglio, 2015).

Varias de las consideradas como estrategias sismorresistentes pueden ser encontradas en las remanentes viviendas tradicionales de adobe del estado de Morelos, encontrando casos de estudio documentados en la región de Valles Altos cerca de la falda del volcán Popocatepetl (Guerrero Baca L. F., 2019; Guerrero Baca et al., 2014)). Las antiguas construcciones de esta región presentan características asociadas a una cultura sísmica como son plantas simples y regulares, cimentaciones y sobrecimentaciones de piedra para evitar el ascenso de la humedad por capilaridad, muros de adobe con grosores significativos y sistemas de cubierta de madera que aportan una respuesta flexible ante esfuerzos dinámicos.

Tras el Sismo de Puebla de 2017, estas viviendas respondieron razonablemente bien a los esfuerzos sísmicos, presentando daños leves en comparación con otras tipologías edilicias, incluidas las viviendas con muros de adobe de Jojutla de Juárez, que presentaron una afectación estructural mucho mayor (Sanchez-Calvillo et al., 2020). Debido a la simplicidad constructiva de las viviendas de Valles Altos y a sus sistemas flexibles, aquellas viviendas que no vieron alterado su sistema constructivo original, pudieron resistir favorablemente el citado sismo (Guerrero Baca L. F., 2019).

Otros estudios de la arquitectura vernácula de la región, como los realizados por Ríos Ramírez y Porcayo Victoriano (2019), manifiestan la desaparición de esta arquitectura y de los oficios tradicionales derivados, perdiéndose esta cultura edilicia tan representativa del territorio. En el caso de Hueyapan, Morelos, las características de la vivienda tradicional de adobe son aún más distintivas, constando de dos niveles en su gran mayoría hasta llegar a alturas de incluso nueve metros (ver Figura 1.21).



Figura 1.21. Viviendas tradicionales de adobe en Hueyapan, Morelos. Fotografías: (Ríos Ramírez & Porcayo Victoriano, 2019)

Sin embargo, esta tipología constructiva tan valiosa se encuentra en peligro de desaparición, debido al desplazamiento de los sistemas y materiales originales por industriales además de los factores asociados a la economía, sociedad y progreso. Tras los recientes sismos, esta situación se ha acrecentado enormemente, generando un aceleramiento del abandono de la arquitectura tradicional:

En el caso particular de Hueyapan, la situación no es diferente a la anteriormente redactada, los lugareños se han visto reducidos a aceptar el apoyo de los diferentes programas gubernamentales que se abrieron paso posterior a los eventos del sismo del 19 de septiembre del 2017, los cuales si bien representan una manera para recuperar sus hogares, estos no mantienen los materiales de la región introduciendo cada vez más materiales prefabricados (Ríos Ramírez & Porcayo Victoriano, 2019).

Encontramos entonces una situación de partida para el territorio sobre el que se encuentra el primer caso de estudio de la investigación y el punto de partida de la misma, Jojutla de Juárez. En esta localidad del estado de Morelos las culturas sísmicas fueron relegadas y sacrificadas por la falsa sensación de progreso y poderío socioeconómico que representaban otros sistemas constructivos. Cuando los sismos hicieron sentir su efecto en 2017, las carencias y deficiencias de estas edificaciones se acentuaron, mostrando la importancia de recuperar el conocimiento anterior hoy olvidado.



1.3.2. Los sismos y el patrimonio cultural en México. La destrucción y pérdida irreparable de una identidad nacional

La parte más conocida de los efectos de un sismo en la población es la física. Las imágenes que asociamos a estos fenómenos son la destrucción de las estructuras y las ciudades; siendo precisamente estas imágenes las que se retransmiten y replican alrededor del mundo cuando estos eventos tienen ocurrencia. Sin embargo, los sismos no solamente entrañan la destrucción del patrimonio y la vivienda construidos, sino que también acarrearán una gran carga simbólica y sentimental negativa en las vidas de los afectados, quedando marcados en el imaginario colectivo de la sociedad como una parte importante de la misma muy presente en la memoria.

Un claro ejemplo puede encontrarse en la destrucción de los símbolos, entendidos como aquellas estructuras que gozan de una consideración excepcional por parte de la sociedad; debido a que entrañan un valor para toda la comunidad que goza de su uso compartido (Campos Goenaga, 2018), y no puede ser cuantificado en cifras o materiales. En la mayor parte del país, los principales símbolos colectivos y culturales son los templos o monumentos religiosos, que, debido a sus características constructivas, como la esbeltez de algunos de sus elementos, son particularmente vulnerables a sufrir daños severos por el efecto de los sismos (ver Figura 1.22).



Figura 1.22. Efectos del Terremoto de Puebla de 2017 en el patrimonio cultural de Jojutla de Juárez, Morelos. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo; E.G. Navarro-Mendoza, 2018).



El caso de Jojutla de Juárez será examinado con más detalle como uno de los focos de estudio de la investigación, por ser un ejemplo práctico de la afectación sísmica y la pérdida de la arquitectura vernácula y el patrimonio cultural. Precisamente el estado de Morelos sufrió daños severos en sus conjuntos conventuales (Díaz Fuentes et al., 2019), que forman parte de la lista de patrimonio mundial de la UNESCO y son uno de los mayores orgullos de la región.

Sin embargo, aunque los sismos de gran magnitud y afectación quedan marcados de por vida en los afectados, la memoria sísmica de la población funciona a corto plazo y los terremotos no son percibidos como un peligro inmediato excepto tras los primeros años de su ocurrencia (Blondet M., 2011). Se genera una sensación contradictoria en la que los sismos representan un recuerdo doloroso para las personas y un evento que ha marcado sus vidas, pero a la vez la prevención sísmica no representa una prioridad y tiende a delegarse y abandonarse hasta el momento de su aparición repentina.

Un ejemplo claro es el del terremoto de México de 1985 y su enorme impacto mediático, este evento fue especialmente reconocido a nivel mundial por las catastróficas consecuencias y daños visibles en la Ciudad de México; sin embargo, las secuelas indirectas que afectaron a la población por años no fueron tan reconocidas por el gran público. Los efectos secundarios de desastres de esta magnitud implican un factor psicológico que tiende a obviarse tras la urgencia de los primeros auxilios.

Desde la arquitectura no puede desligarse la pérdida material que acarrea un fenómeno sísmico de todas las cuestiones territoriales y sociales que han propiciado la mayor vulnerabilidad de la vivienda: “Las pérdidas de propiedades dependen especialmente del uso del suelo, los patrones de asentamiento y el diseño y ubicación de estructuras construidas. Como resultado, la explicación subyacente se relaciona con qué o quién controla la calidad y la geografía social del entorno construido” (Hewitt, 1996, pág. 11).

Una de las principales diferencias respecto a la percepción de la sociedad de los sismos de 2017 respecto al de 1985 fue el papel de los medios de comunicación, ya que, tras más de tres décadas, la irrupción de las redes sociales cambió drásticamente las formas de interacción entre las personas, así como el acceso a la comunicación. En el sismo del 19 de septiembre de 1985 el papel de los medios fue decisivo, más todavía al quedar la ciudad incomunicada



interna y externamente; especialmente importante fue el papel de la televisión, que intentó minimizar el desastre:

En la televisión (con Televisa fuera del aire la mañana del jueves), la reacción fue – pasados los instantes de la confusión extrema – útil, oportuna, sermonera y oficialista. A partir del viernes 20, el hábito se impuso. Se minimizó con entusiasmo el desastre, se mintió pródigamente (Televisa aseguró que el segundo temblor no había causado daño alguno), se aduló a los funcionarios [...] y se protegió con denuedo al mundial de fútbol: “Nada pasa. Los estadios incólumbes. La afición, idolátrica. Las camisetas, a la venta”. (San Juan Victoria et al., 1987, p. 178)

Vemos pues que las opiniones despertadas por la actuación de los medios, además de la ya conocida respuesta del gobierno causaron un rechazo y malestar entre los afectados por el temblor, así como en la sociedad mexicana; por ello los damnificados organizaron su propia sociedad civil recibiendo cierto reconocimiento por parte de la prensa y más tarde de las universidades y centros de investigación del país, que pusieron por escrito la organización popular en los barrios y colonias más afectados. Varias son las publicaciones académicas que tratan el tema de la vulnerabilidad social asociada al Sismo de 1985 (Briseño Guerrero & De Gortari Krauss, 1987; San Juan Victoria et al., 1987).

En el caso de estudio de los Sismos de septiembre del 2017, aunque pasaron más de 20 años, los medios y el tratamiento de los eventos telúricos por parte del gobierno, también manipularon y tergiversaron la información en los primeros momentos de la catástrofe. La repercusión de los eventos a nivel internacional fue considerable, recibiendo México una fuerte atención por parte de los medios extranjeros y una consecuente asistencia durante la crisis.

La ayuda humanitaria recibida tras el sismo fue notable, por parte de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, consistiendo en todo tipo de víveres, herramientas, equipo sanitario y de salvamento, e incluso el envío de brigadistas y perros de rescate, especialistas en ingeniería estructural, médicos y operadores de comunicación. Un reflejo de la deficiente gestión del desastre fue la situación de las familias, que muchos meses después de los eventos todavía estaban viviendo en las tiendas de salvamento (ver Figura 1.23) debido a que la reconstrucción de las infraestructuras y viviendas no se había solucionado.



Figura 1.23. Ayuda humanitaria proporcionada en Jojutla de Juárez, mayo 2018. Fotografías: (E.G. Navarro-Mendoza; A. Sánchez-Calvillo, 2018).

Estas experiencias presentadas, pese al considerable lapso de tiempo entre ellas, 32 años exactos, permiten una conceptualización muy interesante de la vulnerabilidad sísmica. Ambos eventos presentaron muchas características similares desde la perspectiva de la afectación social y principalmente evidenciaron el deficiente manejo de las autoridades en la mitigación y prevención de riesgos naturales del país. Como comentaba Blondet (2011) estos eventos nos recuerdan la frágil memoria de la población, que pese a habitar zonas de especial vulnerabilidad y exposición ante el riesgo sísmico, prácticamente no son conscientes de la situación hasta que llegan las circunstancias más críticas. El caso de Jojutla, ya mencionado anteriormente, funciona como un perfecto modelo de los conceptos tratados: la influencia del territorio habitado, la vulnerabilidad y (el olvido de) las culturas sísmicas.

1.3.3. Punto de partida: el Terremoto de Puebla de 2017 y sus consecuencias en Jojutla de Juárez

Uno de los principales focos de la afectación sísmica es la destrucción del patrimonio, siendo este una representación física de la sociedad y su cultura. El principal detonante de la presente investigación consistió en los eventos sísmicos experimentados durante el mes de septiembre de 2017 en México, principalmente dos grandes catástrofes que tuvieron un gran impacto en el país, comúnmente conocidos como el terremoto de Chiapas y el terremoto de Puebla de 2017. En primer lugar, fue reportado un sismo de gran magnitud el día 7 de septiembre, alcanzando el valor de 8.2 Mw, siendo el segundo mayor en la historia de México desde que existen registros. Este terremoto, originado en la Placa de Cocos, golpeó principalmente a la



región sur-oeste del país, con gran afectación en los estados de Chiapas, Oaxaca y Tabasco (Servicio Sismológico Nacional, 2017).

Asimismo, el terremoto de Puebla fue reportado por el Servicio Sismológico Nacional el día 19 de septiembre, coincidiendo con el infame terremoto de México de 1985. Presentó una magnitud de 7.1 Mw y su epicentro se detectó entre los estados de Puebla y Morelos, a 12 km de la localidad de Axochiapan (ver Figura 1.24); en este caso los estados más afectados fueron los localizados en la zona central de México, incluyendo Puebla, Estado de México, Tlaxcala, Morelos, Guerrero y la Ciudad de México (Servicio Sismológico Nacional, 2017).

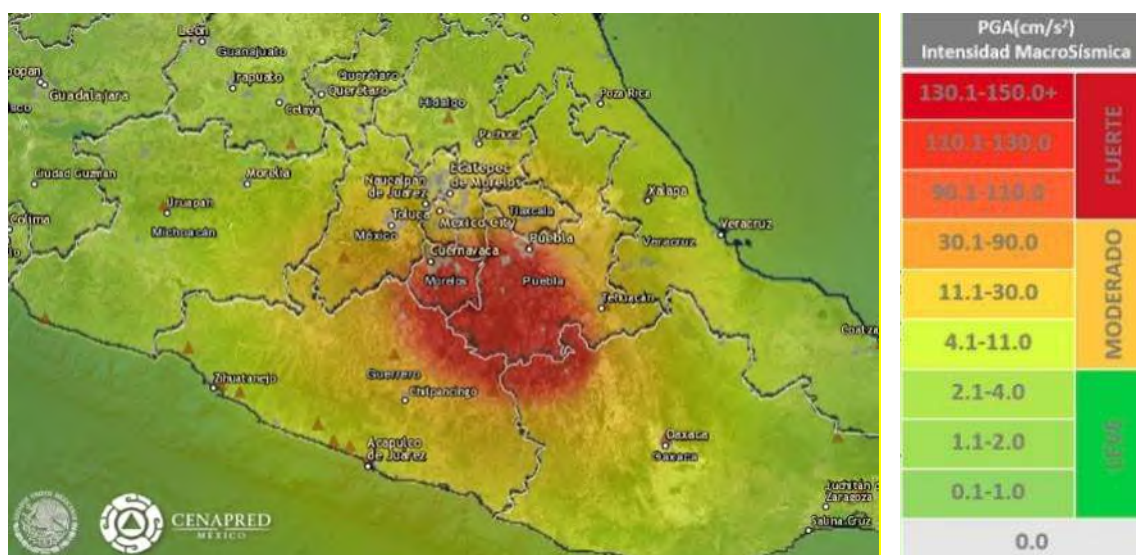


Figura 1.24. Mapa de intensidad sísmica del sismo de Puebla de 2017 y escala de intensidad MacroSísmica. Fuente: Atlas Nacional de Riesgos, mapa generado por el Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM).

Centrándonos en el sismo del 19 de septiembre, el estado de Morelos fue uno de los más afectados del país, experimentando graves pérdidas en su patrimonio cultural debido a sus características³⁶, muy parecidas a las del sismo de Tehuacán de 1999, que también afectó a la misma región del país, siendo un evento de falla normal cuyo epicentro se encuentra tierra

³⁶ La cercanía del epicentro de un sismo a los centros históricos afectados por estos eventos es uno de los factores más importantes junto con la magnitud y la frecuencia de vibración. Para estos sismos las aceleraciones verticales son casi tan significativas como las horizontales, por lo que los edificios históricos ven comprometida su estabilidad al tratarse de edificaciones robustas diseñadas para soportar su única carga; del mismo modo las viviendas de adobe suelen experimentar grandes daños, al contar con resistencias mecánicas mucho menores que otros materiales y presentar numerosas variaciones y alteraciones respecto al sistema constructivo tradicional (Meli Piralla, 2018).



adentro y presenta una menor magnitud a sismos producidos en la cosa pero que por su cercanía a los núcleos urbanos termina generando daños catastróficos (Meli Piralla, 2018).

Resultó especialmente notable la prevalencia de daños catalogados como severos o graves por parte de los expertos: “Éstos supusieron un 47.10% del total; por poner en perspectiva, los siguientes estados en la lista fueron Ciudad de México y Puebla con 25.89 y 20.13% respectivamente” (Meli Piralla, 2018, Sánchez Calvillo et al., 2021). La afectación del fenómeno sísmico se tradujo en la destrucción de todo el patrimonio de la localidad, pasando desde las construcciones monumentales (ver Figura 1.25) al grueso de la vivienda residencial.



Figura 1.25. Daños graves en la Iglesia de San Miguel de Jojutla. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).

Los primeros acercamientos al problema de investigación se dieron con las visitas técnicas al estado de Morelos, durante el mes de julio de 2018, concretándose en los municipios de Jojutla y Zacatepec. La elección de esta región se fundamentó en los graves daños sufridos tras el sismo del 2017 y la encomiable actuación de las brigadas de emergencia. Los responsables de estas brigadas, vinculados directamente al Instituto Tecnológico de Zacatepec, facilitaron enormemente el trabajo de campo estableciendo desde ese momento una vinculación entre ambas instituciones que ha continuado hasta el presente día.³⁷

³⁷ Fruto de esta vinculación entre la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo y el Instituto Tecnológico de Zacatepec ambas instituciones han desarrollado actividades conjuntas, como la



Aterrizando al estudio de la vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe, la cabecera del municipio de Jojutla mostraba unas características excelentes para el análisis de la vulnerabilidad observada (ver Figura 1.26) y el registro de daños en sus inmuebles: “Jojutla de Juárez fue la localidad más afectada del estado de Morelos, presentó graves daños estructurales y la pérdida de gran parte del patrimonio construido. Los edificios más vulnerables al sismo fueron las viviendas de adobe del centro histórico, en muchos casos llegaron al colapso y generaron daños irreparables (Sanchez-Calvillo et al., 2020)”. La cantidad de viviendas afectadas, en mayor o menor grado, pueden ser cuantificadas por las brigadas; sin embargo, los daños morales que experimentó la población no pueden ser reflejados de ningún modo en cifras o estadísticas.



Figura 1.26. Colapso total de vivienda de adobe en Jojutla. Fotografía: (E. G. Navarro-Mendoza; A. Sánchez-Calvillo, 2018).

En el caso de estudio de Jojutla de Juárez, las culturas sísmicas locales, que podemos suponer que existieron con el estudio arquitectónico e histórico de la región, fueron olvidadas y

invitación y participación mediante conferencias en las Jornadas Académicas de Innovación, Tecnología, Liderazgo y Sostenibilidad 2021; y el Congreso Internacional en Tecnología, Innovación y Docencia (CITID 2021), actividades organizadas por el Tecnológico Nacional de México.



reemplazadas por nuevos paradigmas de modernidad. Las antiguas viviendas tradicionales comenzaron a incorporar nuevos elementos y materiales constructivos no compatibles con los originales, contribuyendo a aumentar la vulnerabilidad sísmica y estructural de los edificios. Todas estas cuestiones tecnológicas de la arquitectura en Jojutla quedan tratadas con mayor detalle en el segundo capítulo del documento, a partir del análisis de los daños reportados y el estudio de la gestión de riesgos en el municipio.

También resulta muy importante en los casos como el de Jojutla el ejercicio de reconstrucción, tomando en cuenta no únicamente la responsabilidad gubernamental sino la situación de emergencia de las familias afectadas. En las entrevistas informales realizadas durante el trabajo de campo en 2017, varios de los habitantes de la localidad expresaban su urgencia por reconstruir o empezar de cero sus viviendas. De forma esperada, los materiales aportados por autoridades e instituciones

La investigación y el trabajo realizados por Galeana-Cruz (2021) indica que gran parte de los esfuerzos fueron destinados a la colonia Emiliano Zapata, una de las más afectadas por el sismo pero a la vez de más reciente construcción, por lo que la mayoría de viviendas afectadas estaban construidas con materiales modernos y no contaban con las características formales, espaciales y de habitabilidad que presentan las edificaciones de carácter tradicional.

Algunas iniciativas de reconstrucción pasaron por arquitectos reconocidos y contaron con unos financiamientos y alcances que no resultarían creíbles si no hubiese impactado un sismo de tan considerable magnitud e intensidad. Por ejemplo, el proyecto de la Escuela de Jojutla (ver Figura 1.27), diseñada por Alberto Kalach recibió cuantiosa atención por parte de los medios y el sector más especializado, resultando ganador del segundo lugar del premio Obra del año 2020³⁸, otorgado por la reconocida plataforma web ArchDaily.

³⁸ <https://oda.archdaily.cl/cl/2020>; <https://www.archdaily.mx/mx/928303/escuela-jojutla-taller-de-arquitectura-x-alberto-kalach>.



Figura 1.27. Escuela Taller de Jojutla, por Alberto Kalach. Fotografías: (Cortesía de Taller de Arquitectura X – Alberto Kalach, 2020)

Los jardines centrales de Jojutla, diseñados por Estudio MMX (ver Figura 1.28) fueron otro de los grandes proyectos destinados a la recuperación de la localidad incluyendo la actividad civil y social de la misma³⁹, como espacio de encuentro y tránsito, manteniendo algunos de los símbolos de la comunidad como la figura de Emiliano Zapata. En estos proyectos se buscó una mayor concientización y sensibilidad a la hora de generar un resultado satisfactorio para todos, retomando los conceptos del diseño participativo.



Figura 1.28. Jardines centrales de Jojutla. Fotografía: (D. Alonso, 2019).

³⁹ Para mayor información visitar: <https://www.archdaily.mx/mx/926323/jardines-centrales-de-jojutla-mmx>.



Pese a las iniciativas, la cooperación y la concreción material de estas obras, la reconstrucción y revitalización de Jojutla pasa por el retorno de las personas a la normalidad, tratando de generar ahora sí una correcta gestión de riesgos para evitar que una situación así vuelva a ocurrir. En este caso de estudio, la preservación de la vivienda tradicional claramente fue un fracaso, derivando en la pérdida absoluta del patrimonio construido en tierra; sin embargo, pese al desastre este debería ser un antimodelo a tomar en el futuro, sobre qué aspectos debemos evitar para conservar la vivienda de adobe en México.



CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El principal objetivo del primer capítulo de la tesis doctoral pasaba por explorar y comprender la ascendencia del territorio habitado en los modos de construir, especialmente en la arquitectura vernácula representada por la vivienda de adobe. Se pudo demostrar que este vínculo entre el territorio y la vivienda es indisoluble, funcionando como una simbiosis cuasi perfecta en la que la influencia de cada categoría genera cambios en la otra. No obstante, también quedó claro que esta relación no es idílica, y los cambios sociales y culturales experimentados por el ser humano en las últimas épocas, principalmente a raíz de la globalización, tienen una afectación directa en nuestras formas de edificar y habitar los espacios.

Por ello, el enfoque y la discusión teórica fue una parte fundamental del proceso de investigación, sin la cual no sería posible generar una discusión de los resultados confiable. A partir de la disección del fenómeno de estudio mediante distintas disciplinas, las hipótesis de la investigación pudieron ser validadas, siempre buscando generar un conocimiento sólido y justificado. La riqueza que aportan los distintos enfoques y escuelas de pensamiento aporta un prisma mucho más amplio que comporta un discernimiento y comprensión de las problemáticas mucho más completo.

El marco conceptual generado durante el transcurso de la investigación fue el que permitió reconocer las dos principales categorías de la tesis, así como la relación entre ellas. Los conceptos y subconceptos a tratar generaron un aporte teórico muy interesante en el que el nexo común siempre fue la adaptación y resiliencia del ser humano en un territorio en ocasiones agreste y peligroso. Se pudo argumentar cómo el cambio de paradigma a partir de la industrialización de los sistemas constructivos ha generado una pérdida de identidad que está llegando a un punto crítico, justificando todas aquellas iniciativas que buscan retomar y revalorizar el patrimonio vernáculo.

Otro de los principales aportes del capítulo fue la vinculación del fenómeno de la arquitectura de tierra al concepto del territorio, y la explicación de estas técnicas constructivas respecto a las necesidades más vitales del ser humano, buscando una abstracción compleja de esta manifestación más allá de los motivos más básicos. Una de las justificaciones de la presente investigación siempre fue el nicho de oportunidad y la necesidad de producir un mayor



conocimiento científico y especializado de la arquitectura vernácula, por este mismo motivo fue necesaria primero la conceptualización del fenómeno para en los capítulos posteriores generar análisis extensivos por medio del método científico.

No obstante, además de los conocimientos técnicos aportados por todas las disciplinas que permiten diseccionar la arquitectura y construcción, es necesario tomar en cuenta la componente social y cultural que comporta la vivienda desde su fase de producción hasta el final de su vida útil. El testimonio de los principales actores de esta vivienda vernácula de adobe nos deja reflexiones que deben ser tomadas en cuenta al mismo nivel que los estudios especializados publicados por la academia. Los modos de vivir, habitar, incluso producir estas viviendas constituyen un legado invaluable del que debemos tomar constancia. Este fue otro de los pilares de la investigación, buscando en todo momento combinar la investigación cualitativa y cuantitativa para lograr un plano perfecto de la situación.

Retomando el hilo principal, la discusión del papel de la arquitectura vernácula en el mundo moderno, esta es una de las realidades que enfrentamos en la actualidad, la pérdida de unos sistemas constructivos tradicionales y generacionales que conforman un patrimonio cultural no suficientemente valorado por las instituciones a cargo. Un patrimonio extremadamente rico que Correia y Duarte Carlos (2021) identifican como global y que Guerrero Baca (2007) remarca y ejemplifica en el caso de México con el mayor protagonismo del adobe.

Es innegociable que la pérdida de las tradiciones constructivas, hablando en términos generales de cualquier tipología de arquitectura vernácula, es multifactorial y presenta características únicas en función del territorio y los modos de habitar de los usuarios. Sin embargo, resulta evidente que muchos de los factores convergen en regiones y territorios con condiciones dispares, por lo que podemos hablar de culturas constructivas en riesgo de desaparición

Con la presentación del caso de estudio de Jojutla se pretende ejemplificar de forma evidente la problemática de la desaparición del patrimonio arquitectónico mexicano construido en tierra, a partir de un caso extremo condicionado por factores externos e internos que ha propiciado la pérdida total de viviendas de adobe en la localidad. Los proyectos arquitectónicos presentados en el último apartado del capítulo sirven de demostración que, si



bien las iniciativas y programas de reconstrucción buscaron la recuperación de la localidad y sus espacios, obviaron el factor de la tradición constructiva de la región.

No obstante, debe apuntarse que resulta innegable como en los últimos años la producción de conocimiento especializado en arquitectura de tierra está siendo notable y el incremento de una literatura que trata de exponer, comprender y también denunciar estos fenómenos ha sido verdaderamente notable. Cada vez son más los profesionales que toman estos sistemas constructivos como una alternativa viable o incluso una obligación moral (Moriset et al., 2021), y las instituciones educativas jugarán un papel trascendente en el futuro cambio de paradigma que muchos ya vaticinan.

Como nota positiva podemos encontrar testimonios muy esperanzadores, como el de Evelia Gómez en el documental *Xirangua* (2022), quien manifiesta una gran valoración de la arquitectura vernácula y la vivienda de adobe, expresando su disposición a seguir preservando este legado, siendo esta una conclusión perfecta y confortante a toda la discusión expresada en este primer capítulo del documento.

En Charapan de niña nací aquí. Muy contenta, con mis papás, mis hermanos... Esta casa la compramos hace 25 años aproximadamente, estaba muy destruida, es de adobe, y pues la estamos todavía restaurando. Vivimos muy contentos. Los beneficios de vivir en esta casa, pues son importantes, porque son térmicas. Aquí no hace frío ni calor y se vive muy a gusto. Cuenta con sus recámaras, su cocina, su patio, traspatio... Son muy grandes, las casas de pueblo son muy grandes, ¿verdad? y todo lo de antes, lo queremos conservar.

Evelia Gómez

**CAPÍTULO II. LA TIERRA
COMO LEGADO
ARQUITECTÓNICO:
CARACTERIZACIÓN
TECNOLÓGICO-
CONSTRUCTIVA DE LAS
UNIDADES DE ESTUDIO**







Ahora se derrumbaba poco a poco con el paso del tiempo, prácticamente olvidada en el seno del bosque, al igual que las circunstancias que motivaron su edificación. Reliquias de este tipo, que representan el avance y el esfuerzo del hombre, [...] y constituyen una especie de ruinas, íntimamente asociadas con la historia colonial, además de servir para resaltar el carácter romántico de los ambientes sobre los que se asientan.

James Fenimore Cooper

INTRODUCCIÓN: LA SITUACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA EN EL SIGLO XXI

Cuando se habla de la problemática de la desaparición y deterioro de la arquitectura en tierra, este es un hecho totalmente aceptado por la comunidad científica, con una presencia de este fenómeno a nivel global. La consideración de esta arquitectura, catalogada por muchos autores como patrimonio menor con la intención de reivindicarla, coincide con la desprotección y falta de reconocimiento por las instituciones reguladoras, hecho que puede relacionarse con el concepto de “cultura elitista” referenciado y discutido en el Capítulo I del documento⁴⁰.

En primer lugar, para poder comprender el estado actual de la construcción en tierra es esencial entender el conjunto de procesos que históricamente se dieron para producir esta tipología constructiva, aspecto que se trata en el primer apartado de este capítulo. Se entiende la tipología como aquel conjunto espacial de elementos arquitectónicos que permanecen en

⁴⁰ La vivienda constituye una respuesta al modo de habitar un territorio, siendo la arquitectura de tierra la concreción material más inmediata y primitiva de este fenómeno. En el apartado 1.2.1. La vivienda como respuesta al modo de habitar un territorio, se examinan las razones por las cuales la vivienda de adobe ha sido ignorada y denostada en las últimas décadas.



el tiempo en un contexto histórico-geográfico (Muntañola Thornberg, 2002). Otra definición es la de Guerrero Baca (2021) que considera la tipología arquitectónica como una disciplina y método de análisis y síntesis. En cualquier caso, el estudio de la tipología es esencial en un ejercicio de investigación que toma como objeto central la vivienda y su cuestión material.

Retomando la pérdida de la arquitectura de tierra, una clara demostración del fenómeno es la tardía aceptación del término y su regulación, como podemos comprobar con la ratificación y publicación de la *Carta del Patrimonio Vernáculo Construido* (1999) por el ICOMOS, pese a que el concepto de Patrimonio Mundial⁴¹ ya llevaba muchos años establecido sin referenciar (Guerrero Baca L. F., 2020). Como ya se discutió, arquitectura vernácula y tradicional pueden ser sinónimos a todos los efectos, pero no ha sido hasta hace relativamente pocos años que este patrimonio ha cobrado importancia y consideración.

La arquitectura de tierra ha sido desplazada por otras técnicas materiales de construcción quedando relegada a un segundo plano o llegando al punto de desaparecer totalmente en la memoria colectiva de la población, dando lugar a situaciones como la observada en la Figura 2.1, muy comunes y representativas de gran parte de las localidades rurales en México. Las razones de este repentino abandono responden a factores diversos, siendo uno de los más críticos la falta de mantenimiento que experimentan o han experimentado gran parte de estas edificaciones, y que lógicamente se correlaciona con el olvido de los conocimientos ancestrales y el ‘saber-hacer’.

⁴¹ Los términos Patrimonio Mundial o Patrimonio de la Humanidad hacen referencia a los sitios considerados e incluidos por la UNESCO en lista del Programa de Patrimonio Mundial, a partir de la publicación de la *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural* en París en 1972. Cabe destacar que gran parte de los sitios culturales de la lista de patrimonio mundial están basadas o incorporan sistemas constructivos y materiales a base de tierra.



Figura 2.1. Vivienda abandonada en San Andres Coapa, Michoacán México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

Correia y Duarte (2021) indican otros factores como la gentrificación o las malas prácticas e intervenciones en el patrimonio edificado. El primer fenómeno, asociado principalmente a los centros históricos, termina generando una pérdida de la cultura e identidad locales a todos los niveles (Sánchez Calvillo A. , 2017), siendo el factor constructivo uno de los implicados. Del mismo modo, las edificaciones de tierra son percibidas por gran parte de la población como anticuadas y arcaicas (Moriset et al., Can earthen architectural heritage save us?, 2021), siendo una total contraposición al concepto de modernidad y desarrollo. Asimismo, en determinados contextos, el habitar o poseer una vivienda de adobe ofrece una imagen social pobre y ello termina provocando el abandono de las viviendas (ver Figura 2.2a).

Por otro lado, la mala ejecución de las estrategias de reparación, restitución o preservación de los sistemas es también un fenómeno frecuente, generando situaciones en las que la intención por alargar la vida útil de estas construcciones es magnífica, pero los resultados terminan siendo contraproducentes (ver Figura 2.2b). Estas intervenciones no logran su



cometido y en muchos casos pueden llegar a poner en riesgo la estabilidad estructural⁴². Este hecho ha sido ampliamente documentado en la investigación formal (Guerrero Baca L. F., 2020; Paredes Avilés et al., 2020) y denunciado en publicaciones de carácter divulgativo (Olaya-García et al., Soluciones de tierra en la Vivoteca: una plataforma de selección, divulgación y transferencia ecotecnológica, 2022).



Figura 2.2. Factores de deterioro de la arquitectura de tierra: (a) Vivienda abandonada en San Nicolás Obispo, Michoacán; (b) Ejemplo de mala intervención constructiva en Quiroga, Michoacán. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2020; A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Asimismo, Ettinger (2010) introduce también el fenómeno de la migración como uno de los elementos potenciadores del abandono de la arquitectura vernácula, en un territorio definido y demarcado como es el estado de Michoacán, pero extrapolable a muchos contextos similares en los países de Latinoamérica. Mediante el trabajo de campo puedo corroborarse como este factor goza de más importancia de la que podría suponerse, siendo el estado uno de los que presenta mayor migración internacional de todo el país⁴³, principalmente a los Estados Unidos.

⁴² Más adelante en el capítulo se expone el caso de Jojutla de Juárez, un ejemplo muy claro de malas intervenciones y mala compatibilidad de soluciones constructivas en viviendas tradicionales de adobe.

⁴³ <https://coespo.michoacan.gob.mx/wp-content/uploads/2020/12/Migracion-y-Remesas-2020.pdf>



Esta pérdida y abandono de la que tanto se habla tiene una traslación directa en la generación de conocimiento y literatura especializada. Sin embargo, pese al menosprecio y la ignorancia a la que ha sido sometida en muchas ocasiones, no puede negarse que recientemente ha surgido una “proliferación de la literatura científica referida al patrimonio en tierra y su conservación” (Correia M. , 2007, pág. 202), además de muchos más trabajos de investigación relacionados, en parte gracias a la notable carga cultural que comportan las técnicas y construcciones ancestrales.

La situación actual en todos los sectores relacionados con la arquitectura, se encuentra más concienciada en la recuperación de estas tipologías, y también es más favorable para ejercer la investigación de la arquitectura de tierra. En los últimos años, se ha puesto una mira en los sistemas basados en la tierra, en parte por la búsqueda de la sustentabilidad, en parte por sus excelentes propiedades y en parte por un retorno a los orígenes de la edificación y a la arquitectura vernácula. Es evidente el cambio de paradigma que ha ocurrido, en el que técnicas tradicionales, usadas desde los orígenes de la civilización, pasan hoy día a ser consideradas como innovación en ámbitos educativos y académicos.

Son varias las instituciones que a lo largo de los años han fomentado y potenciado la construcción en tierra, en el ámbito iberoamericano destaca la Red Proterra⁴⁴, y a nivel académico y científico la organización y celebración de los SIACOT (Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra)⁴⁵, que reúnen a los científicos y profesionales del sector generando nuevos conocimientos y publicaciones de las memorias del congreso, siendo una de las principales fuentes de consulta en el ámbito, además de la labor de divulgación que se genera con los talleres (ver Figura 2.3).

⁴⁴ La Red Iberoamericana de Arquitectura y Construcción con Tierra, creada en 2006, ha sido una de las asociaciones punteras en el ámbito del estudio, desarrollo e intervención de la arquitectura de tierra en Latinoamérica, contemplando tanto el campo científico como las actividades de cooperación.

⁴⁵ Los avances y resultados de la presente investigación fueron expuestos en las ediciones del 2019 y 2022 del SIACOT, en Oaxaca, México; y Trinidad, Cuba respectivamente. Los artículos en extenso fueron incluidos en las memorias publicadas de las dos ediciones, pudiendo ser consultados en el apartado de anexos del presente documento.

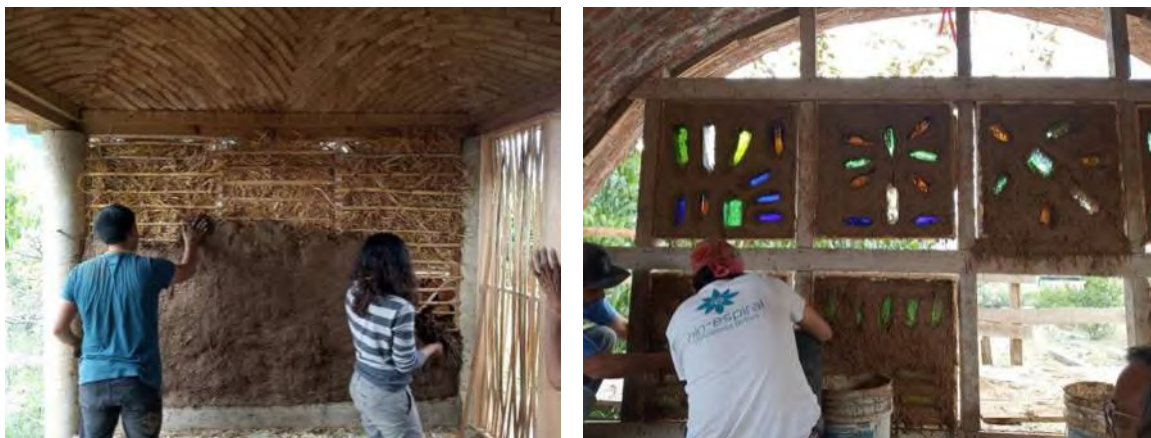


Figura 2.3. Talleres de construcción con tierra realizados durante el SIACOT 2019 en Oaxaca, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Respecto a las iniciativas de concienciación y capacitación encontramos los reconocidos workshops TICRAT (Taller Internacional de Conservación y Restauración de la Arquitectura de Tierra), organizados por el INAH en asociación con la institución estadounidense National Park Service y la ONG Cornerstones Community Partnerships⁴⁶, para la especialización del personal de trabajo en patrimonio arquitectónico y sitios históricos de tierra.

La falta de normativas o tratados de construcción en tierra es otra de las principales causas de su acelerada pérdida, más teniendo en cuenta que la especialización y artesanía en los trabajos disminuye en pos de nuevas técnicas industrializadas y automatizadas y potenciadas por el sistema económico vigente. Además, los reglamentos de construcción locales tampoco contemplan qué hacer o cómo intervenir aquellas viviendas con sistemas constructivos a base de tierra, ignorando completamente estas tecnologías al no tener cabida en el sistema actual.

Las escasas normativas o reglamentaciones que encontramos sobre construcción con tierra son variadas y hacen referencia a las tipologías constructivas de cada país; además, muchas de éstas son específicas para ciertas actividades, técnicas o materiales. Por ejemplo, la mayoría de las normas hacen referencia a la selección de suelos, tratando este aspecto con más o menos relevancia; sin embargo en algunos casos las indicaciones o recomendaciones

⁴⁶ Esta organización no gubernamental inició sus actividades en 1986 para la recuperación y conservación de la arquitectura de tierra en Nuevo México y posteriormente el suroeste de Estados Unidos. Como parte de sus actividades han generado publicaciones de referencia en el sector como *Adobe Conservation. A preservation handbook*, con un carácter divulgativo y técnico enfocado a formar y normalizar las intervenciones en las viviendas de adobe.



son escasas o inexistentes (Cid et al., 2011). Para evitar estas problemáticas son especialmente importantes los manuales (Martins Neves et al., 2009), que permiten acceder a un conocimiento menos especializado pero de gran valor para el desarrollo en las comunidades, especialmente en la autoconstrucción.

Por otro lado, desde un prisma general, la presencia de estos sistemas constructivos ha ido en aumento, partiendo desde una posición muy baja en la que muy pocos profesionales apostaban por la tierra, cada vez es más común emplear estas técnicas. Un claro ejemplo lo presenta la obra arquitecto burkinés Diébédo Francis Kéré⁴⁷ (ver Figura 2.4), ganador de la edición 2022 del prestigioso premio Pritzker, que incorpora los BTC con mucho éxito en sus edificios más reconocidos⁴⁸



Figura 2.4. Gando Teacher's Housing en Gando, Burkina Faso, por Kéré Architecture. Fotografía: (E. J. Ouwerkerk, 2021).

El papel de la arquitectura de tierra en las instituciones educativas, concretamente las facultades asociadas a la arquitectura, ingeniería y diseño es una de las claves principales

⁴⁷ <https://ethic.es/2019/01/francis-kere-arquitecto-del-pueblo/>

⁴⁸ Véase el Centro de Arquitectura en Tierra: <https://www.archdaily.mx/mx/626675/centro-de-arquitectura-de-la-tierra-kere-architecture>



para entender la problemática actual y las perspectivas de cambio. No ha sido hasta los últimos años que las escuelas han empezado a incluir en sus planes de estudios materias relacionadas con la arquitectura vernácula, los sistemas sostenibles y materiales locales, y las estrategias de bajo impacto ambiental.

En México la situación no es distinta, como quedó demostrado en los resultados de las encuestas que se presentan más adelante en el capítulo. Algunos autores como Ettinger Mc Enulty y Guerrero Baca (2021) indican que una de las posibles causas es la escasa educación y formación en el estudio de la tipología arquitectónica: “La tipología mal entendida y puesta en práctica, conduce a clasificaciones estáticas y repeticiones irracionales. Pero, cuando se emplea adecuadamente, permite reconocer a la edificación como una forma cultural de tradición que tiene que ser visualizada como un proceso”.

Por estos motivos, uno de los objetivos en la planeación de la tesis doctoral fue la visita a centros de investigación, escuelas de formación, organizaciones e iniciativas privadas que tuvieran líneas de actuación con la arquitectura de tierra. Cabe destacar el programa de las escuelas taller en Colombia⁴⁹, pudiendo conocer de primera mano durante una de las estancias de investigación doctorales el funcionamiento y las actividades de la Escuela Taller de Popayán y la Escuela Taller de Boyacá.

Se realizaron sendas visitas a las escuelas para comprender el funcionamiento e iniciativas de las mismas, la primera en la ciudad de Popayán, capital del departamento de Cauca y la segunda en la ciudad de Tunja, capital del departamento de Boyacá. La última resultó de gran interés al contar con un programa de formación en Recuperación del Patrimonio Construido⁵⁰, que para esta región del país mayormente presenta materiales y sistemas constructivos basados en la arquitectura de tierra. Por estos motivos, gran parte de la

⁴⁹ El Programa Nacional de Escuelas Taller de Colombia es una iniciativa del Ministerio de Cultura de Colombia con la colaboración de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), que tiene el objetivo de formar a los jóvenes del país en oficios tradicionales vinculados al patrimonio cultural nacional y local. En la actualidad existen diez escuelas taller repartidas a lo largo del amplio territorio de Colombia, para mayor información revisar *Programa Nacional Escuelas Taller Colombia herramientas de paz* (2011).

⁵⁰ <https://escuelatallerdeboyaca.org/>



capacitación de los alumnos contempla estas temáticas, con la inclusión de soluciones y tecnologías modernas para la preservación del patrimonio construido (ver Figura 2.5).



Figura 2.5. Módulo experimental de bajareque en la Escuela Taller de Boyacá en Tunja, Boyacá, Colombia. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

Encontramos un ejemplo local del desconocimiento en las técnicas constructivas tradicionales por parte de los estudiantes de arquitectura, con la escasa identificación del sistema constructivo de bajareque, pese a su presencia en varias regiones del estado de Michoacán (ver apartado 2.2.4 de este capítulo). Por el mismo motivo, uno de los resultados más favorables durante todo el proceso de investigación fue poder realizar actividades de divulgación y formación en estas temáticas, a partir de la participación en congresos, seminarios y foros culturales. La culminación de este proceso fue la organización e impartición del workshop “Arquitectura vernácula, materiales tradicionales y su implementación en proyectos de cooperación al desarrollo”, cuyos resultados quedan recogidos más adelante en el capítulo de conclusiones del documento.



Por último, gran parte de las problemáticas y los motivos expuestos que generan el abandono de la arquitectura de tierra se ven reflejadas en la localidad de Jojutla de Juárez. La ciudad es un claro ejemplo de comunidad que olvidó y delegó las llamadas culturas sísmicas, un concepto extendido y aceptado en la investigación sísmica que designa la capacidad de resiliencia de las culturas para adaptarse a estos fenómenos y reducir los posibles daños mediante todo tipo de estrategias y variables de tipo constructivo (Jorquera, 2014; Ortega et al., 2018).

Considerando la existente situación de riesgo y abandono de la arquitectura de tierra en México, la ocurrencia de sismos incrementa todavía más la pérdida de edificaciones de adobe. Estas construcciones se perciben como inseguras, poco resistentes, y además implican una baja concepción social, siendo típicas de las clases más pobres (Guerrero Baca L. F., 2007). Sin embargo, este no es un problema local de Morelos, ya que el resto de estados del país afectados por sismos en los últimos años han experimentado situaciones similares, y la correlación puede extenderse a todos los países latinoamericanos proclives a estos fenómenos naturales.

Es un hecho que los usuarios de viviendas tradicionales damnificadas prefieren iniciar una reconstrucción con nuevos materiales ofrecidos por las instituciones como compensación de los daños sufridos, a tratar de reparar los sistemas constructivos originales. Este es uno de los mayores problemas a los que se enfrentan los expertos cuando trabajan con comunidades de este tipo, tratar de convencer de las bondades de la arquitectura tradicional y el impacto de los materiales modernos en el medioambiente (Cornerstones Community Partnerships, 2006).

Desde la arquitectura no puede desligarse la pérdida material que acarrea un fenómeno sísmico de todas las cuestiones territoriales y sociales que han propiciado la mayor vulnerabilidad de la vivienda: “Las pérdidas de propiedades dependen especialmente del uso del suelo, los patrones de asentamiento y el diseño y ubicación de estructuras construidas. Como resultado, la explicación subyacente se relaciona con qué o quién controla la calidad y la geografía social del entorno construido (Hewitt, 1996, pág. 11)”.

Retomando todos los factores expuestos, en este segundo capítulo se analizarán los factores tecnológicos, constructivos y materiales de la vivienda de adobe en México, a partir de cinco



casos de estudio repartidos en cuatro entidades federativas. Partiendo de la introducción donde se ha expuesto el estado de la cuestión a nivel global y los retos que enfrentamos para la producción de conocimiento e investigación acerca de la arquitectura de tierra, se estructurará en tres secciones: el primero abordando la tierra como material de construcción y su situación actual, el segundo planteando la estructura metodológica del trabajo de campo y las herramientas de análisis, y el tercero haciendo la discusión de los resultados obtenidos en las cinco localidades estudiadas.

Primeramente, se buscará generar un acercamiento esencial a la arquitectura de tierra y la tecnología constructiva del adobe, partiendo de los orígenes históricos y el desarrollo de la técnica en el continente americano con un énfasis en el territorio mexicano. También se analizará la situación actual en el país discutiendo los datos estadísticos que evidencian la pérdida de este patrimonio a pasos agigantados.

A continuación, se expone y aclara la metodología de trabajo en campo, que incorporó tanto las herramientas de análisis clásicas en el estudio arquitectónico y patrimonial como serían la prospección o el levantamiento, así como el uso de nuevas tecnologías y medios audiovisuales para la documentación y representación del este patrimonio vernáculo, mostrando los resultados obtenidos a partir de las campañas *in situ* en forma de catalogación, digitalización de las unidades, procesamiento de datos en fichas técnicas de inspección y proyectos documentales.

Por último, el capítulo termina con la caracterización tecnológica-constructiva de las unidades de estudio de las cinco localidades estudiadas, haciendo un análisis reflexivo de sus características para posteriormente procesar la información obtenida a partir del trabajo de campo y todas las herramientas de análisis aplicadas. Uno de los principales aportes lo constituye la comparación entre los casos de estudio, identificando aquellas variables tipológicas que responden a una adaptación al medio local característica de la arquitectura vernácula; y por otro lado, todos aquellos aspectos de degradación y alteración observados en las viviendas de adobe, que a su vez podemos correlacionar con los factores socio-culturales y las características propias de cada región.



2.1. LA VIVIENDA DE ADOBE EN MÉXICO: ORÍGENES TECNOLÓGICOS Y PERSPECTIVA ACTUAL

El adobe es sin dudas la técnica de construcción en tierra más representativa de México, siendo conocida y reconocida por gran parte de la población y suponiendo una de las tipologías arquitectónicas más comunes en el país. La imagen de la casa tradicional mexicana de adobe forma parte del imaginario colectivo y gran parte de la población actual ha crecido familiarizándose con estos inmuebles (ver Figura 2.6). Sin embargo, este sistema constructivo, basado en la edificación mediante bloques de tierra cruda no es un fenómeno nacional y local, sino que se encuentra extendido por todo el mundo, con la constatación de que culturas muy distintas y sin contacto previo llegaron a una solución tecnológica idéntica.



Figura 2.6. Vivienda tradicional de adobe en Jiquipilas, Chiapas, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Respecto a la tecnología constructiva Duarte Carlos et. al. (2020) definen adecuadamente la arquitectura vernácula como el encuentro entre los recursos materiales disponibles y el conocimiento empírico. La tierra es un recurso abundante y fácil de encontrar y trabajar, por lo que no resulta extraño que el ser humano la haya identificado e incorporado en las primeras estructuras conocidas para resguardarse del entorno físico.



Siendo la tierra el material de construcción más antiguo del que tenemos constancia, el adobe siempre fue una de las soluciones tipológicas más evidentes y simplificadas, encontrando las primeras evidencias de estructuras en Mesopotamia alrededor del año 10000 a. C. (Heathcote, 1995). En el caso del continente americano, tardíamente poblado⁵¹, las estructuras de mayor antigüedad datan del 5100 a. C. (Mauricio et al., 2021), correspondiendo a adobes de la región andina del Perú. Sin embargo, debe entenderse que la construcción con tierra es tan antigua como los primeros asentamientos conocidos, por lo que las dataciones tienen una relevancia científica pero no dejan de ser un valor numérico que no expresa la inestimable significación de estas manifestaciones del ser humano.

Adicionalmente, cabe destacar que el adobe no es la única técnica constructiva a base de tierra que podemos encontrar en México, aunque sea con mucha diferencia la más común y reconocida. Otras tipologías como la tapia pisada no lograron extenderse por el profundo territorio del país, quedando relegadas a ciertos estados del centro-oriente (Guerrero Baca L. F., 2011), mientras que el bajareque no es factible en muchos territorios al ser una técnica mixta que emplea material vegetal del género de las guaguas o cañas.

Sin embargo, el objeto de estudio de la investigación es la vivienda de adobe, por lo que el enfoque y énfasis en esta técnica son indispensables. Partiendo de la aprehensión de la tecnología constructiva del adobe y sus orígenes, este apartado del capítulo tratará de aprehender las condiciones de desarrollo de la técnica, entendiendo la influencia del territorio y la cultura y la situación actual que ha llevado a un abrupto cambio de paradigma en el que la arquitectura de tierra ya no tiene lugar en la sociedad moderna.

En esta línea, y pese al acervo cultural que representan todas estas edificaciones del país edificadas en tierra, la mayor parte de la población no es consciente del valor y del potencial de estos sistemas constructivos, y ni siquiera las escuelas de arquitectura e ingeniería los consideran en sus planes de estudios. Esto ha generado el fenómeno de la ‘desaparición’ del

⁵¹ Pese a que no existe un consenso, las distintas teorías sobre el poblamiento de América, que pudo consistir de varias fases, datan la llegada del ser humano entre el 14000 y el 15000 a. C. hasta el 33000 a. C. para las teorías del poblamiento más temprano.



adobe en México, como podrá entenderse a partir de los datos estadísticos presentados más adelante.

El hecho distintivo y característico de la vivienda de adobe es el uso de la tierra cruda en sus sistemas constructivos. Si partimos del material, la tierra, comúnmente referida también con la terminología de suelos, es el material resultante de la deterioración de rocas por diversos agentes atmosféricos y procesos de degradación (Torraca, 2009). La cuestión material será analizada con más detalle en el Capítulo IV del documento, centrado en la caracterización de estos sistemas en el laboratorio.

En cambio, en el presente apartado se hará un recorrido por los orígenes tecnológicos e históricos de la construcción con tierra y el caso específico del adobe en México hasta reconocer la situación actual de la vivienda tradicional. Posteriormente, se analizará el escenario contemporáneo, entendiendo que la construcción con materiales ha desplazado plenamente los sistemas tradicionales y vernáculos. Pese a las circunstancias poco favorables, es importante conocer este punto de partida y el estado del arte para plantear estrategias de preservación de este patrimonio, siendo este el principal objetivo de la investigación.

2.1.1. Construcción con tierra en México y la tecnología del adobe

Si hablamos de construcción con tierra en México, el elemento central o la imagen que puede proyectar la mayoría de la población es el adobe, siendo la técnica más reproducida y extendida en el país. En las encuestas realizadas a estudiantes de licenciatura de carreras afines a la edificación 98.9% identificaba este sistema, lo que demuestra el amplio reconocimiento por parte del público general.

Como se comentó anteriormente, prácticamente cualquier persona en México cuenta con una referencia clara de la vivienda tradicional de adobe; sin embargo, las técnicas de construcción con tierra son muy variadas, y podemos encontrar tanto soluciones tradicionales como nuevos



desarrollos como el BTC⁵² (Bloque de Tierra Comprimida) o el hormigón de tierra⁵³. Encontramos una amplia obra literaria al respecto, desde obras de referencia más enfocadas a la divulgación, como *Técnicas de construcción con tierra* (2012), editado por Proterra; hasta trabajos científicos de mayor especialidad y especificidad en aspectos concretos (Ben Mansour et al., 2016).

Volviendo a la tierra, respecto a su uso como material de construcción, éste es tan antiguo como lo son las primeras edificaciones datadas; en el continente americano podemos encontrar una fuerte tradición constructiva de tierra en Mesoamérica⁵⁴, que en los últimos años ha fungido como una fuerte línea de investigación en la arqueología, antropología, arquitectura y construcción⁵⁵. Sin embargo, cuando se habla de arquitectura de tierra en México, la investigación ha referenciado y priorizado en gran medida la etapa colonial, obviando en muchos casos la importante herencia prehispánica (Daneels, 2015).

Si nos centramos en esta última por su mayor antigüedad, encontraremos que por cuestiones lógicas las construcciones monumentales son las que han sobrevivido hasta hoy en día, mientras que el análisis de la arquitectura vernácula y residencial prehispánica es mucho más complejo y debe recurrirse a herramientas especializadas. Sin embargo, la riqueza y variedad de técnicas que podemos encontrar en función del territorio son extraordinarias.

Los reconocidos basamentos, construcciones soporte o terrazas donde se desplantaban los conjuntos religiosos monumentales, fueron contruidos con la técnica de la tierra apisonada, acumulando grandes cantidades de material seco o ligeramente húmedo (Daneels, 2015). La

⁵² Los Bloques de Tierra Comprimidos, BTC o CEB en la literatura anglosajona, son elementos de albañilería manufacturados a partir de la mezcla suelos arcillosos y estabilizantes químicos compactados mediante una prensa manual o hidráulica.

⁵³ La tierra vertida, concreto u hormigón de tierra es una técnica de construcción que consiste en una mezcla dosificada de grava, arena y limos, aglomerados por la arcilla como elemento cementante. **Fuente especificada no válida..**

⁵⁴ Mesoamérica es el término geográfico propuesto para referirse al territorio del continente ocupado por las grandes civilizaciones precolombinas. La región comprende el centro-sur de México, la totalidad de los actuales estados de Guatemala, El Salvador, Belice, Honduras, y la parte occidental de Nicaragua y Costa Rica.

⁵⁵ Los dos volúmenes publicados por Annick Daneels hasta el momento: *Arquitectura mesoamericana de tierra, volumen I* y *Arquitectura mesoamericana de tierra, volumen II* compendian y profundizan en la investigación principalmente arqueológica de la arquitectura y los sitios de tierra



mayoría de las construcciones piramidales o semipiramidales en Mesoamérica emplearon este sistema constructivo, aunque al estar revestidas con piedra la gran población piensa que fueron edificadas con este segundo material. En los casos de Tzintzuntzan e Ihuatzio (ver Figura 2.7), en la cuenca lacustre de Pátzcuaro en Michoacán, el deterioro de algunas secciones de las yácatas⁵⁶ permite observar directamente este fenómeno y comprobar como el material base de estos monumentos es la tierra compactada.



Figura 2.7. Yácatas de Ihuatzio, Michoacán, México. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Estos sistemas que usaban tierra compactada y apisonada, del mismo modo que los adobes, son soluciones tecnológicas que fueron desarrolladas por culturas diversas y totalmente alejadas. En este sentido, el sistema y los métodos constructivos de la tapia⁵⁷, importados por los españoles, supusieron una tecnificación de los procesos mediante el uso de encofrados y herramientas manuales para la compactación. Sin embargo, el sistema fue desarrollado en

⁵⁶ Zona arqueológica de México por el Instituto Nacional de Antropología e Historia: <https://lugares.inah.gob.mx/es/zonas-arqueologicas/zonas/estructuras/9894-329-la-gran-plataforma.html>

⁵⁷ Debe entenderse que al hablar del sistema constructivo de la tapia se incluyen los métodos y herramientas para su elaboración, destacando el uso de los encofrados llamados tapiales, que son los que realmente dan la denominación a la técnica. Sin embargo, el empleo de tierra compactada con medios mecánicos ya era conocido por muchas sociedades prehispánicas.



una región limitada del país, documentándose principalmente en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz (Tepale Gamboa et al., 2020). Sorprende la poca relevancia de la tapia en México en contraste con otros países latinoamericanos que edificaron gran parte de su patrimonio colonial con esta técnica (ver Figura 2.8); Tepale Gamboa et al. (2021) teorizan con el primer establecimiento de los españoles en esta región y los antecedentes prehispánicos de la tierra compactada como posible explicación del arraigo de este sistema constructivo.

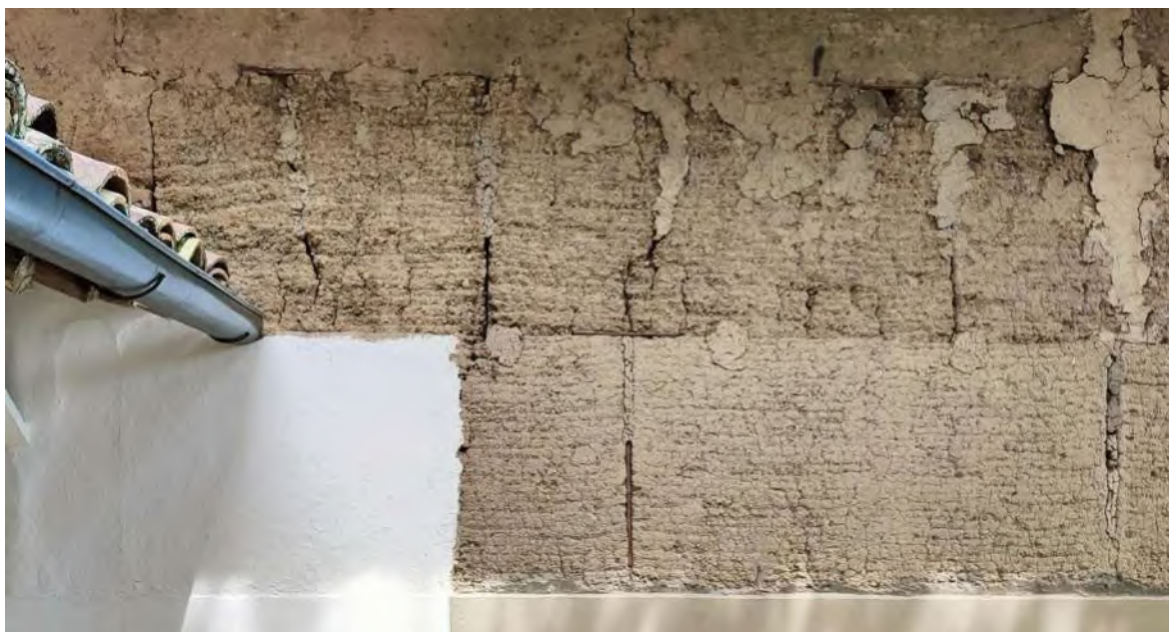


Figura 2.8. Muro de tapia en vivienda de Cartago, Valle del Cauca, Colombia. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

Otra de las técnicas ancestrales que podemos encontrar en el territorio mexicano es el bajareque (con muchísima más presencia que la tapia, pero menos que el adobe), una técnica constructiva mixta que combina entramados vegetales de caña o especies de bambú con barro y fibras vegetales. En este caso el sistema estructural corresponde a la madera, sin embargo, suele clasificarse como una técnica de construcción con tierra (Neves & Faria, 2011). Este sistema se ha preservado hasta la actualidad, encontrándose muy extendido en el sur del país y los estados de la costa del Pacífico, incluso con presencia en la región de Tierra Caliente, que destaca por su clima seco y extremadamente cálido.



Una de las cuestiones más relevantes del bajareque, es que dejando de lado el patrimonio arqueológico monumental que se comentó anteriormente, las investigaciones históricas han demostrado que gran parte de la vivienda habitacional de las civilizaciones prehispánicas fue construida con este sistema. Guerrero Baca (2017) indica que el origen de esta técnica podría superar los 6000 ó 7000 años de antigüedad, y son varias las evidencias arqueológicas que reportan el uso de estos sistemas en asentamientos primitivos, encontrando soluciones arquitectónicas similares en sitios totalmente diferentes y alejados geográficamente (Mateu Sagués, 2019). La reconocida casa maya (ver Figura 2.9) es una variante tipológica más del bajareque, demostrando la enorme influencia de esta técnica en la arquitectura habitacional y los modos de vida de muchas comunidades del país.



Figura 2.9. Modelo de casa maya en San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Respecto a su permanencia, en México la tradición constructiva con guadua u otate se focaliza en las regiones costeras y la región sureste del país, con una gran presencia en los



estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán (Sánchez-Calvillo et al., 2022), Colima (Rodríguez Licea, 2017), Jalisco, y también la Ciudad de México, con una importante tradición constructiva en la región del humedal de Xochimilco (Díaz Ruíz et al., 2017).

En el estado de Colima, la construcción de bajareque recibe coloquialmente el nombre de pajarete (Flores Calvario & Rodríguez Licea, 2020), mientras que en la región de Tierra Caliente en Michoacán recibe el apelativo de otate y las construcciones son llamadas coloquialmente casas de otate o cocinas de otate. A partir de estas situaciones nos damos cuenta que los fenómenos de la arquitectura vernácula son completamente locales y adaptados al medio disponible; es significativo como en cada región los sistemas constructivos cuentan con distintas nomenclaturas y variantes tipológicas, pese a que el funcionamiento de las construcciones es muy similar.

Sin embargo, el sistema constructivo por excelencia del país, y reconocido por la gran mayoría de la población⁵⁸ es el adobe, que además constituye el elemento central de estudio en esta investigación. La palabra adobe proviene del término árabe attob y hace referencia al bloque de tierra cruda dejado secar al sol para su uso en la edificación; la derivación del término en la península y el posterior proceso de colonización llevaron a que la población local hoy conozca el vocablo ya citado.

Retomando a Mauricio et al. (2021), los primeros adobes datados para el continente Latinoamericano se remontan al 5100 a.C.; en el caso de México Daneels (2015) reporta las unidades más antiguas reconocidas en torno al periodo Preclásico Temprano en Oaxaca (1150-700 a.C.); sin embargo, destaca la identificación de la técnica en sitios arqueológicos tan importantes como Teotihuacán, Cholula, la Venta o la Joya. Para Michoacán, en la región del río Balsas se han encontrado evidencias del uso de adobes y revocos de cal con una posible antigüedad de 1500 años (Punzo Díaz et al., 2015).

Contrariamente a la situación ocurrida con la tapia, tras los eventos de la colonización, las nuevas ciudades fueron edificadas en gran medida gracias a la tecnología del adobe, siendo una técnica conocida por los españoles que contaban con sus propias herramientas y códigos no escritos para la edificación. En este sentido han sido muy importantes los esfuerzos

⁵⁸ Revisar apartado 2.2.4. Instrumentos de apoyo de la investigación.



realizados en los últimos años para la identificación, catalogación y análisis tipológico de estas construcciones y cómo se asentaron los nuevos modelos importados de ciudad (Romero Olguín & Guerrero Baca, 2020).

En consecuencia, la vivienda de adobe forma parte de la imagen y el paisaje urbano de gran parte del país, debido a que los suelos arcillosos son abundantes y gran parte del territorio tiene fácil acceso al agua. Esto ha generado que muchas localidades cimienten su personalidad en torno a estas tipologías (ver Figura 2.10), siendo elementos significativos tanto para los pobladores y usuarios como para los visitantes, que no pueden desligar el lugar de la tradición constructiva.



Figura 2.10. Imagen urbana tradicional en Pátzcuaro, Michoacán, México. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo, 2018).

Sin embargo, la idílica imagen presentada en la última imagen es cada vez más difícil de encontrar y apreciar. En las últimas décadas, los materiales industrializados como el cemento, el concreto y el acero han sustituido de modo acelerado al adobe y a la madera. Incluso un fenómeno real es que las nuevas viviendas edificadas emulen a las viviendas tradicionales de adobe mediante estrategias de camuflaje, como por ejemplo seguir los mismos esquemas cromáticos, compartir el ritmo de los edificios aledaños, seguir proporciones similares, etc.; generando los denominados falsos históricos. Por ello, en los últimos años muchos especialistas han denunciado la situación de riesgo del patrimonio construido con tierra,



proponiendo estrategias para su conservación y adaptación a los tiempos modernos (Mileto et al., 2021).

2.1.2. La desaparición de la arquitectura de tierra en México

Centrándonos en los límites de la presente investigación, México no escapa a esta problemática del abandono de su patrimonio en tierra, al contrario presenta datos mesurables que ponen de manifiesto la desaparición de esta cultura constructiva (Guerrero Baca L. F., 2007). Técnicas tradicionales de construcción en tierra, como por ejemplo la tapia, se encuentran en un estado de riesgo muy grave, ya que la tecnología ha sido prácticamente olvidada en las comunidades donde esta tipología constructiva proliferó (Guerrero Baca L. F., 2011).

La problemática de la desaparición de la arquitectura en tierra en México puede razonarse y cuantificarse: el Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI muestra que el 4.03 % de la vivienda particular habitada en México está construida con muros de adobe. Teniendo en cuenta que existen 34,892,977 viviendas censadas, más de 1,400,000 conforman el patrimonio arquitectónico de tierra del país, cifra a la que si sumamos otros sistemas constructivos tradicionales como la madera, bambú y el embarro o bajareque se obtiene un monto superior a las 2,600,000 viviendas vernáculas (INEGI, 2021).

Pese a esta muestra considerable del patrimonio construido vernáculo, si comparamos los datos con el censo del año 2000 el total de viviendas de adobe ascendía a 2,135,694 sobre una cifra total de 21,513,235 lo que representó un porcentaje del 9.93% del total de los inmuebles de ese periodo (INEGI, 2000). La disminución del sistema constructivo es alarmante, en los primeros 20 años del siglo XXI no sólo el número total de viviendas de adobe se ha estancado, sino que se han perdido más de 700,000 viviendas, cuando la cifra total de inmuebles se ha disparado en más de 13 millones. Por otro lado, en consecuencia, el porcentaje de viviendas de adobe ha disminuido gravemente a menos de la mitad en beneficio de los llamados materiales globales con su máximo exponente en el uso del concreto (ver Figura 2.11). Muchas de las razones por las que la arquitectura de tierra ha sido abandonada y olvidada se han discutido en la introducción del presente capítulo, sin embargo, el análisis estadístico muestra una situación extrema cada vez más difícil de revertir.

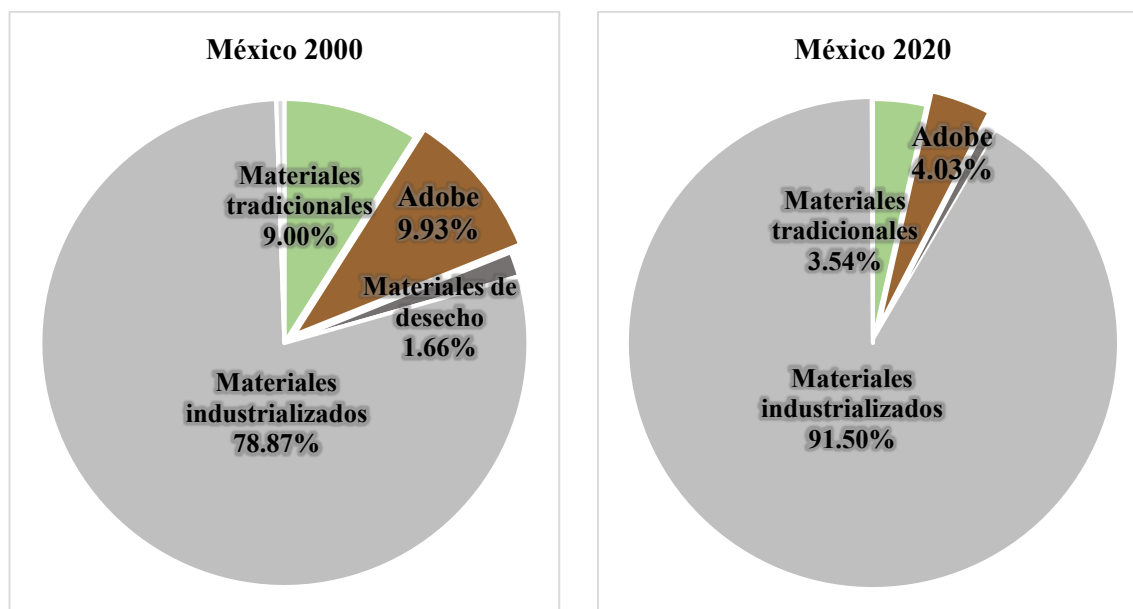


Figura 2.11. Comparativa de la vivienda mexicana según el material predominante en muros en los censos de 2000 y 2020. (a) XII Censo General de Población y Vivienda 2000; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2000) (INEGI, 2021).

Si analizamos los datos respecto a las entidades federativas y concretamente aquellas en las que la presente investigación ha sido desarrollada (Morelos, Michoacán de Ocampo, Oaxaca y Chiapas) encontramos un conjunto de situaciones dispares. En la Figura 2.12 puede observarse la disminución porcentual a través de los años, encontrando una clara tendencia descendiente que en vez de revertirse en los últimos años se ha continuado con una tendencia descendente, aunque cabe destacar que la curva se ha atenuado ligeramente.

Si nos centramos en el periodo comprendido durante la investigación (2018-2022) encontramos una serie de accidente que comportaron un cambio drástico del escenario, los sismos del año 2017. Los dos eventos de gran magnitud e intensidad supusieron para muchas localidades una pérdida considerable del patrimonio edificado, y las viviendas de adobe fueron una de las tipologías más afectadas, un hecho que puede ayudar a entender la acentuación de la tendencia decreciente que se aprecia en el gráfico.

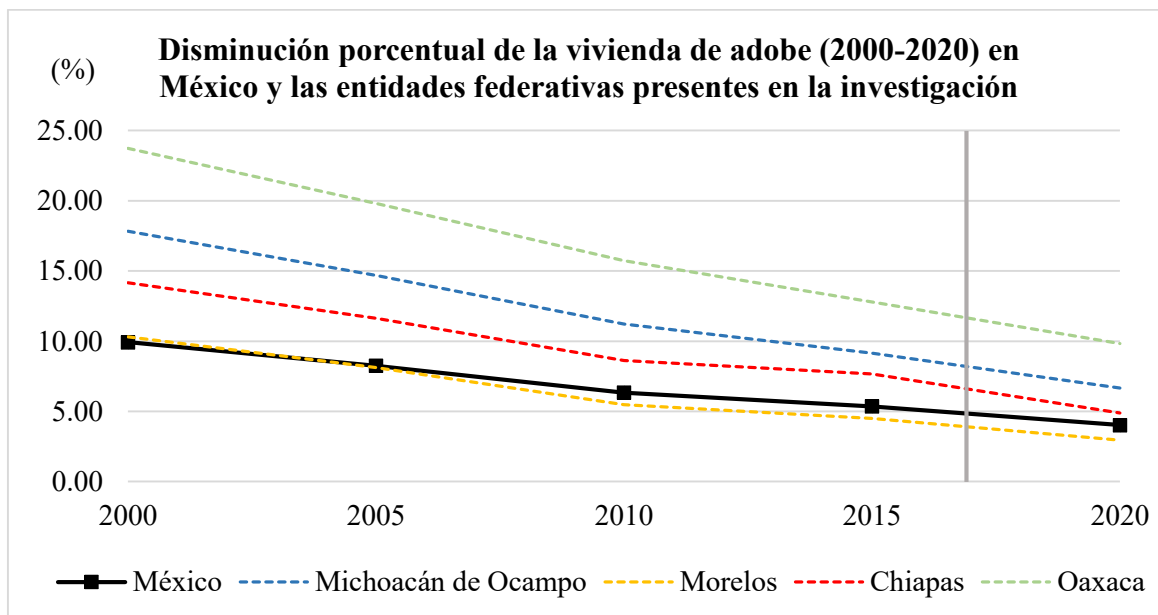


Figura 2.12. Gráfico de distribución porcentual de la vivienda de adobe en México y las entidades federativas estudiadas entre los años 2000 y 2020⁵⁹. Gráfico elaborado por A. Sánchez-Calvillo.
Fuente: (INEGI, 2000) (INEGI, 2015)

El estado de Morelos es el que presenta una situación más representativa respecto a los datos generales del país (Ver Figura 2.13), con una línea de tendencia muy parecida al promedio en el país y valores porcentuales por año mucho más cercanos en comparación con las otras tres entidades federativas, donde la proporción de arquitectura tradicional es mucho mayor. En la Figura 2.13 podemos observar los datos porcentuales respecto a los años 2015 y 2020 y como en únicamente cinco años el porcentaje representativo se ha reducido casi a la mitad.

⁵⁹ Los datos para el año 2005 fueron calculados mediante una interpolación lineal del resto de resultados, ya que en el *II Censo de Población y Vivienda 2005* la distribución porcentual por material en muros no se encuentra disponible.

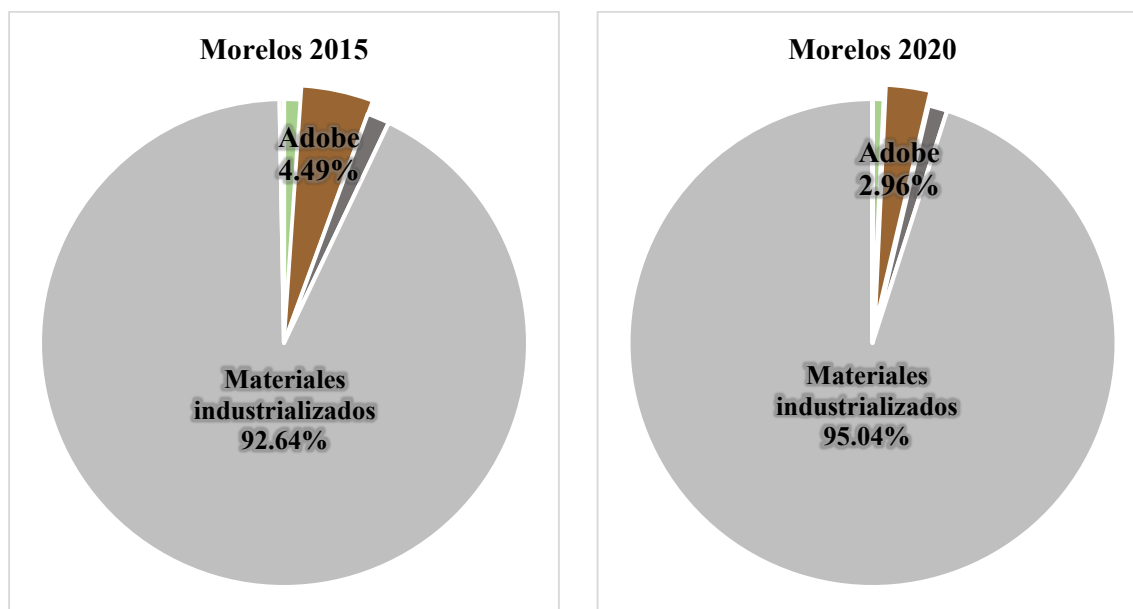


Figura 2.13. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Morelos (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).

Sin embargo, analizando a detalle el estado, la distribución de la vivienda de adobe es muy variable según las regiones y municipios, como puede observarse en la Figura 2.14. Existen regiones del estado, en los que la conservación de la arquitectura tradicional y sus materiales y sistemas constructivos ha sido mucho más notable, lo cual puede deberse a un cúmulo de razones geográficas y socioculturales. En la imagen, es fácilmente perceptible cómo los municipios de mayor densidad poblacional y con los núcleos urbanos más importantes, como la zona conurbada de Cuernavaca, presentan valores porcentuales inferiores al 5%; por otro lado, dónde se encuentra una mayor concentración de vivienda vernácula es en la región noreste del estado, en la falda del Volcán Popocatepetl, con menor población y mayor permanencia de comunidades rurales e indígenas.



EARTHEN ARCHITECTURE IN THE STATE OF MORELOS, MEXICO

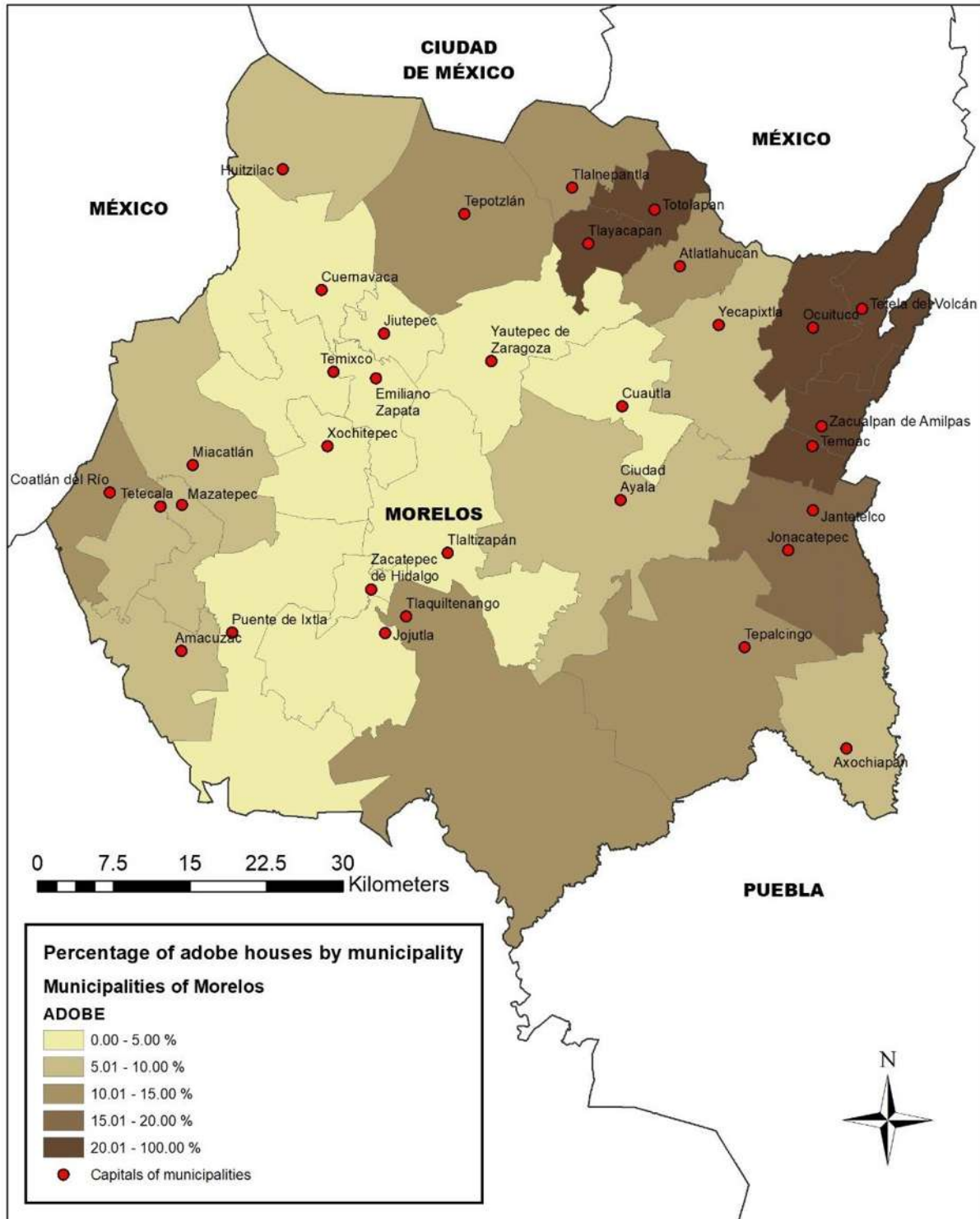


Figura 2.14. Porcentaje de vivienda de adobe respecto al total por municipios en el estado de Morelos. Mapa elaborado por A. Sánchez-Calvillo en ArcMap 10.3. Fuente: (INEGI, 2015).



Por otro lado, la distribución de la vivienda de adobe no tiene mayor utilidad si no es comparada con otros factores culturales, socio-económicos, demográficos o territoriales. En la Figura 2.15 encontramos una correlación entre la arquitectura de tierra, la población total, núcleos de población e ingresos económicos medios.

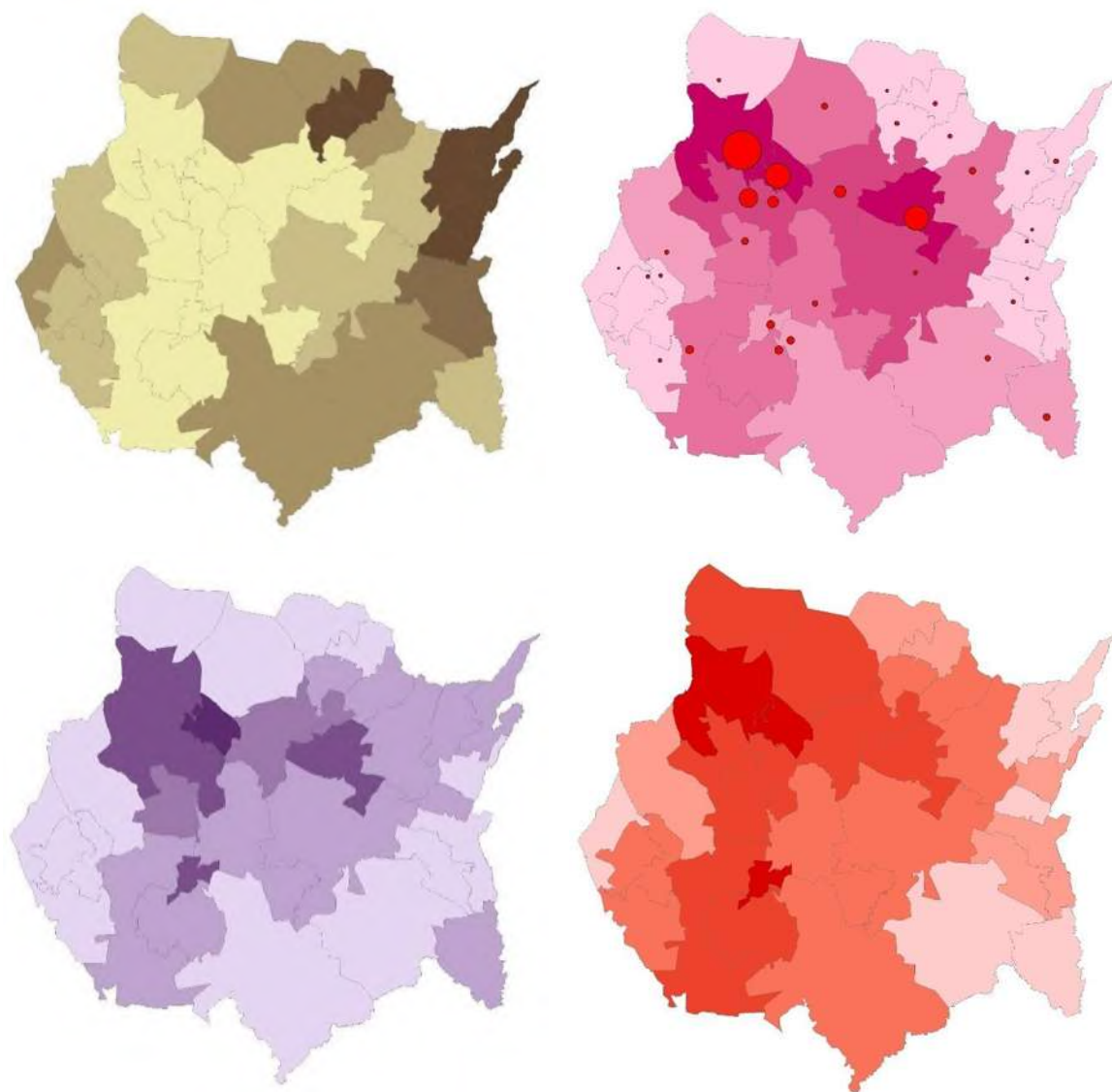


Figura 2.15. Comparación entre arquitectura de tierra y variables poblacionales y socio-económicas en el estado de Morelos, México. (a) Mapa coroplético de arquitectura en tierra por municipio; (b) Mapa coroplético de población y principales núcleos por municipio; (c) Mapa coroplético de densidad de población por municipio; (d) Mapa coroplético de ingresos medios por municipio. Mapas elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015).

Podemos ver que la relación entre bajos recursos y arquitectura de tierra es inversamente proporcional; al igual que la relación entre progreso y arquitectura de tierra u otras variantes



que fácilmente pueden establecerse y que han sido referidas innumerables veces en la literatura: “las comunidades herederas de esta cultura constructiva tratan a toda costa de deshacerse de ella (Guerrero L. , 2013)”. Un claro ejemplo del abandono de la arquitectura de tierra lo encontramos en el caso de estudio de JJ, que ya se presentó en el Capítulo I con los efectos del terremoto de Puebla de 2017. En este municipio, las viviendas tradicionales de adobe suponían un pequeño porcentaje del parque construido, y tras los eventos sísmicos desaparecieron prácticamente hasta la totalidad. Si analizamos las distintas variables (ver Figura 2.15) JJ se encuentra en una zona de densidad poblacional moderada e ingresos económicos superiores a la media del estado, lo cual se relaciona con la baja presencia de arquitectura de tierra antes citada.

En comparación, evaluando la presencia de la arquitectura vernácula en el estado de Michoacán, encontramos una permanencia mayor y más diversificada al anteriormente comentado estado de Morelos (ver Figura 2.16). Sin embargo, no deben obviarse los procesos de transformación que ha sufrido la vivienda tradicional y que responden a un proceso de modernización que dificulta la presencia y conservación de estos inmuebles (Martínez Aguilar & Bedolla Arroyo, 2021), que se ve reflejado en la disminución porcentual reportada en los últimos años.

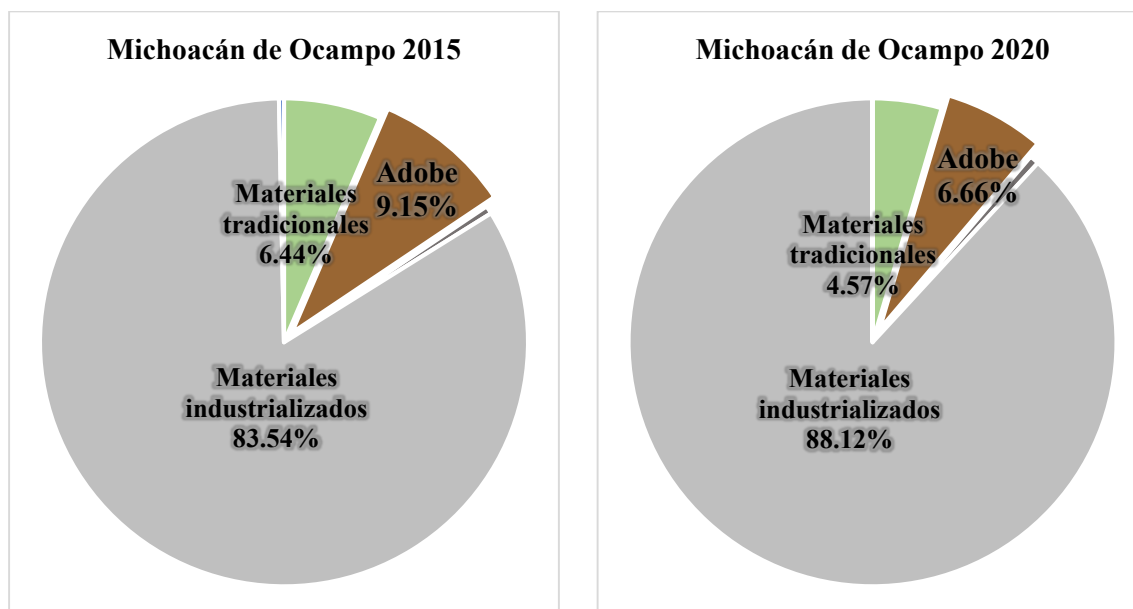


Figura 2.16. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Michoacán de Ocampo (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).



Una de las mayores riquezas arquitectónicas del estado corresponde a la variedad de sistemas constructivos vernáculos, con la concreción en tres tipologías características: la vivienda de adobe, el bajareque y las trojes purépechas⁶⁰ (Sánchez, 2021). En la Figura 2.17 podemos ver representado el porcentaje de viviendas de carácter tradicional en el estado de Michoacán, observando una distribución variada con varios núcleos representativos de la arquitectura vernácula. La zona conurbada de Morelia denota la mayor industrialización de la región, del mismo modo que la ciudad de Zamora; en cambio, en los municipios de Tierra Caliente, la meseta purépecha o la costa michoacana encontramos una mayor permanencia de las viviendas tradicionales.

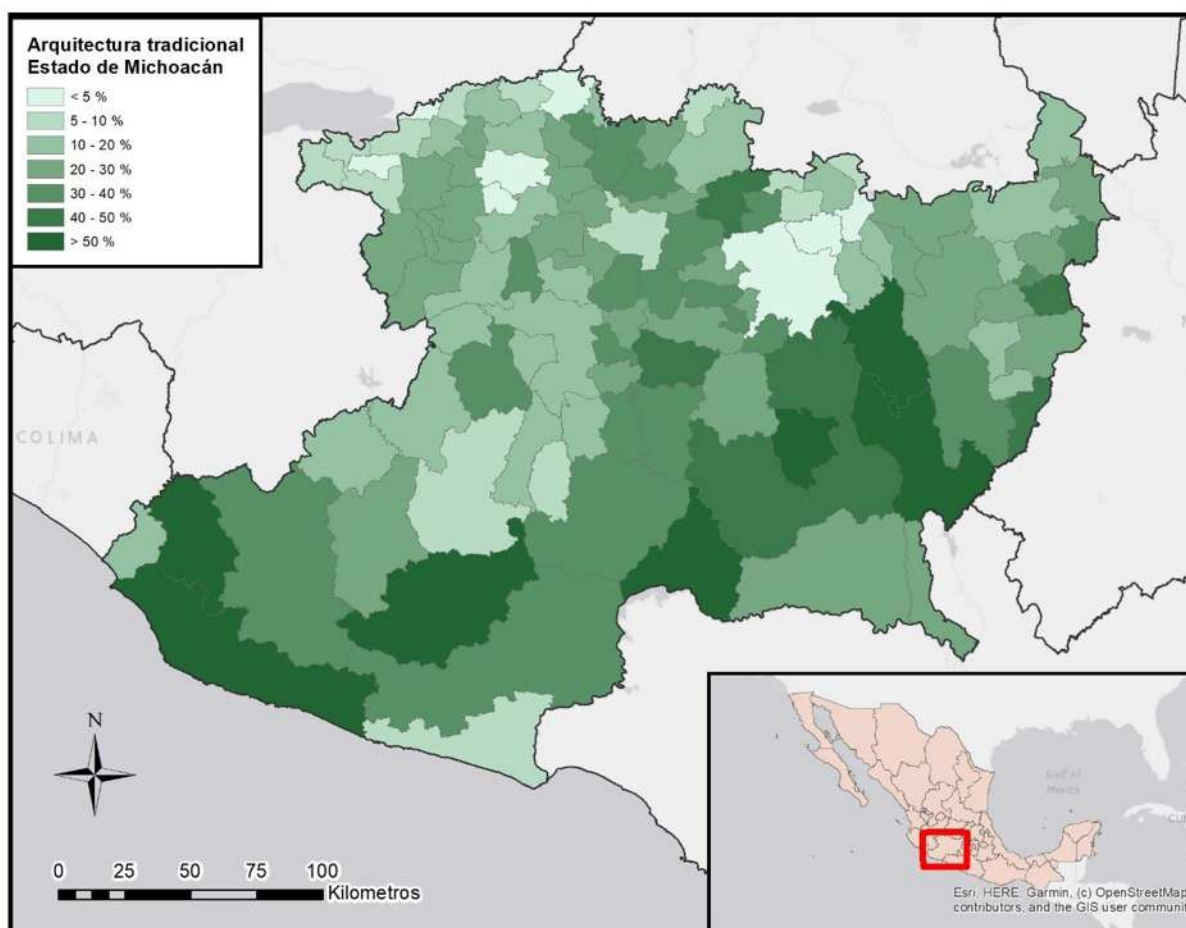


Figura 2.17. Porcentaje de arquitectura tradicional y su presencia por municipios en el estado de Michoacán. Mapa elaborado por el autor en ArcMap 10.3. Fuente: (INEGI, 2015).

⁶⁰ Tipología de vivienda tradicional de la Sierra Purépecha, está construida a base de madera en su totalidad, con vigas ensambladas únicamente mediante intersecciones sin otros medios de fijación.



El estado de Oaxaca, en el que también se desarrolló una parte de la investigación y el trabajo de campo, es el que en la actualidad presenta un mayor porcentaje de vivienda construida en adobe, cercano al 10% (ver Figura 2.18). Similar al estado de Michoacán encontramos un descenso de la arquitectura tradicional en comparación al promedio del país o al estado de Morelos, donde la pérdida ha sido más acelerada.

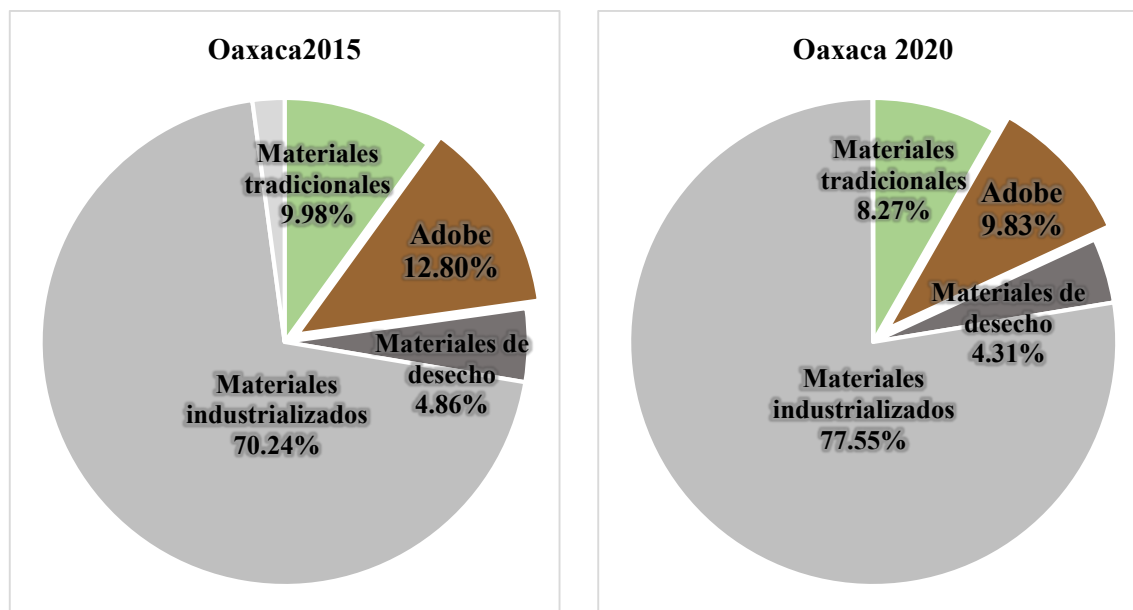


Figura 2.18. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Oaxaca (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).

Por último, Chiapas, donde también se realizaron levantamientos arquitectónicos y fotográficos, presenta porcentajes considerables de arquitectura vernácula, con menor presencia del adobe respecto a Oaxaca y Michoacán (ver Figura 2.19); pero una mayor cantidad de viviendas edificadas con materiales tradicionales y naturales, principalmente en virtud de la arquitectura de bajareque muy extendida en algunas regiones del estado.

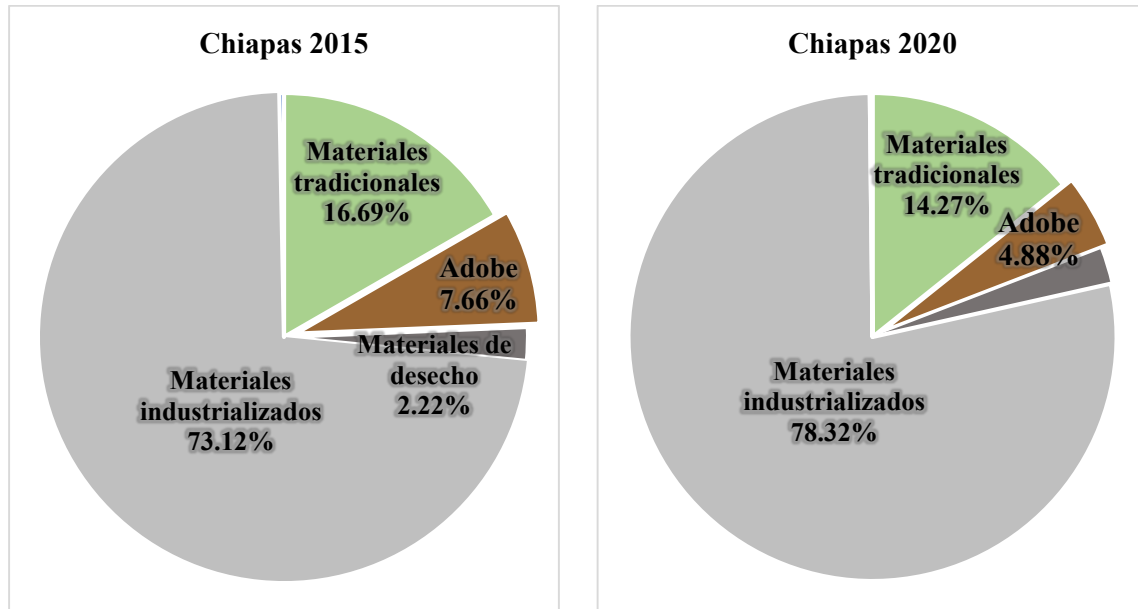


Figura 2.19. Distribución porcentual de la vivienda según material de los muros en el estado de Chiapas (a) Encuesta intercensal 2015; (b) Censo de Población y Vivienda 2020. Gráficos elaborados por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: (INEGI, 2015; INEGI, 2021).

Esta desaparición de la vivienda de adobe no únicamente puede ser comprobada con los datos estadísticos, sino que existen muchas herramientas de análisis que corroboran los números con el sentir de los usuarios. En este sentido cobran importancia tanto los artículos de divulgación como los proyectos y estrategias de catalogación de esta tipología constructiva, de los que ya se han expuesto varios ejemplos. No obstante, el mejor modo de comprobar la situación actual es el trabajo de campo y el contacto con las comunidades, procesos que se detallan a continuación en el capítulo.



2.2. EL TRABAJO DE CAMPO A PARTIR DE LA GESTIÓN DE PROYECTOS

El trabajo de campo es una de las herramientas metodológicas más importantes en la investigación y constituye un acercamiento muy valioso al objeto de estudio y su contexto inmediato. Siendo esta herramienta característica y fundamental de las ciencias sociales y humanas (Lamy, 2016), en los últimos años se ha extendido a múltiples disciplinas alejadas de esta clasificación. En el ámbito de la arquitectura, ésta resulta indispensable para el objetivo de lograr un conocimiento integral del objeto arquitectónico⁶¹, en el que se genera una visión holística del mismo tomando en cuenta todos los condicionantes externos.

Entre las ventajas que nos ofrece el trabajo de campo, se genera una aproximación tanto al objeto arquitectónico como al factor humano: “Hacer trabajo de campo conduce hacia el sujeto, a su contexto y a su cultura; el sujeto es el elemento central de esta práctica y se convierte en la ruta de acceso al conocimiento de la otredad” (Lamy, 2016). Esta visión antropológica cobra sentido al comprender que el elemento central de la vivienda son sus propios usuarios, por lo que el fenómeno de la arquitectura vernácula no puede desligarse de los modos de habitar y la conformación de las culturas.

Como varios autores han constatado, el hecho de visitar en primera persona un inmueble o espacio otorga una experiencia completa que no puede ser igualada de ninguna forma. Precisamente el levantamiento arquitectónico es la técnica por excelencia que garantiza este acercamiento integral al objeto, sin embargo, podemos encontrar muchos otros instrumentos que ejercen como un apoyo excelente en esta misión, y que ayudan a complementar la experiencia sensorial mediante el acopio de información cuantitativa y cualitativa. Algunos ejemplos son la fotografía, que permite obtener aspectos que pueden ser obviados por la prospección el levantamiento, incluso acceder a espacios restringidos a la visión humana; otra instancia sería la entrevista, que aporta la visión de otros actores y permite descontextualizar y eliminar todos los sesgos individuales del investigador.

⁶¹ Citando a Chico Ponce de León (2000): “Un nuevo nivel de conocimiento se logrará con la comprensión integral del objeto en su estado actual, desde el punto de vista arquitectónico [...] y culminará con el análisis arquitectónico integral, es decir, con el conocimiento de sus comportamientos de naturaleza estructural y constructiva, formal y expresiva, espacial y funcional, ambiental y contextual.”



Las comunidades rurales son las que conservan en mayor medida el patrimonio vernáculo, preservando las técnicas tradicionales mediante la tradición constructiva, muy ligada al fenómeno de las culturas sísmicas que se definió en el Capítulo I. Por estos motivos, el trabajo de campo fue fundamental para el desarrollo de la investigación, siendo una etapa extensa de la misma en la que se recabó una notable cantidad de datos cuantitativos y cualitativos. Para las campañas de campo, realizadas a partir algunos proyectos de investigación y cooperación al desarrollo que se detallan más adelante, se planeó el siguiente conjunto de actividades que permitiera obtener información cualitativa de las viviendas tradicionales, sus usuarios y el entorno inmediato:

- Identificación y selección de las unidades de estudio.
- Prospección de las viviendas mediante fichas de inspección.
- Levantamiento arquitectónico, incluyendo el levantamiento de materiales y sistemas constructivos, y el levantamiento de deterioros y alteraciones.
- Levantamiento fotográfico de las unidades y fotografía aérea con dron.
- Entrevistas orales con los usuarios de las viviendas.
- Registro audiovisual de las actividades y las entrevistas.

Adicionalmente se llevaron a cabo otras actividades e instrumentos para la investigación fuera de las comunidades, procesando la información obtenida en campo y generando algunos instrumentos complementarios, como las encuestas realizadas a los estudiantes. Estas actividades complementarias fueron:

- Digitalización de las unidades de estudio.
- Registro y catalogación de las viviendas seleccionadas.
- Procesado de las fichas de inspección y los datos obtenidos.
- Generación de contenido multimedia.
- Aplicación de encuestas.

A continuación, se presenta a detalle el desarrollo de este trabajo de campo y las herramientas de análisis empleadas, con una introducción en los casos de estudio seleccionados y los



motivos de identificación a partir de proyectos. Siendo el levantamiento arquitectónico la actividad por excelencia en las investigaciones que analizan un objeto o fenómeno arquitectónico; en los siguientes apartados se demostrará la riqueza que aporta un enfoque multidisciplinario con resultados significativos e innovadores.

2.2.1. Casos de estudio, elección y condicionantes

Una vez definida la unidad de análisis de la investigación, que es la vivienda de adobe, es necesario delimitar la muestra, que puede ser definida como un subgrupo de la población (Hernández Sampieri et al., 1991). A su vez, esta población objetivo responde a toda la vivienda construida total o parcialmente con mampostería de adobe en el país, que según los datos anteriormente citados supera los 1.4 millones de unidades censadas. Deber resaltarse que la muestra nunca puede ser totalmente representativa de la población, y que puede reflejar condiciones locales del sitio. En el presente caso se hizo uso de muestras no probabilísticas, en las que la elección de las unidades es efectuada por el investigador y los intereses particulares que pueda tener (Hernández Sampieri et al., 1991).

La selección de los casos de estudio fue multifactorial, y en gran medida condicionada por factores externos de gran relevancia como la pandemia de COVID-19 que dificultó y limitó la movilidad y las actividades de investigación presenciales. Finalmente, los resultados de la investigación se efectuaron a partir de cinco casos repartidos en cuatro estados del país, englobando poblaciones urbanas y rurales para lograr una mejor comprensión de las problemáticas.

La primera localidad que se visitó y donde se recolectaron datos y muestras físicas fue Jojutla de Juárez (JJ), en el estado de Morelos. En el primer capítulo del documento se expuso el punto de partida y los motivos de interés en la localidad como primera aproximación al fenómeno de la vulnerabilidad sísmica y las consecuencias directas de un evento de gran magnitud en una población. En este caso y por las condicionantes físicas del sismo y la destrucción que conllevó en la localidad, el trabajo de levantamiento fue descartado, efectuando únicamente actividades de prospección y registro además de la recolección de muestras materiales de bloques de adobe (ver Figura 2.20).



Figura 2.20. Trabajo de campo en Jojutla de Juárez, con el apoyo del Instituto Tecnológico de Zacatepec. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).

Respecto a la investigación de la caracterización material en laboratorio de los sistemas constructivos de tierra, la toma de muestras se realizó en varias campañas, algunas de ellas también asociadas a proyectos de investigación. Sin embargo, en el presente capítulo se hará un mayor énfasis en la caracterización tipológica, tecnológica y constructiva de las unidades de estudio, realizada a partir del trabajo de campo y el levantamiento arquitectónico de las viviendas.

Este trabajo de campo y las actividades derivadas del mismo pudieron realizarse en gran medida con la inclusión en proyectos de investigación y cooperación al desarrollo. En primer lugar, en el marco del curso Materiales de Construcción Tradicionales, Patrimoniales, Artísticos, Sostenibles, e Innovadores impartido a alumnos inscritos en el XXV Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico (Programa Delfín⁶²), y el XXX Verano Nicolaíta de la Investigación Científica⁶³ del año 2020, se diseñó el proyecto “Levantamiento y catalogación de vivienda vernácula” para generar estas actividades con los estudiantes en

⁶² El Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico es un programa de movilidad estudiantil por el cual estudiantes de licenciatura de todas las áreas del conocimiento a partir de cursar el cuarto semestre y cumplir ciertos requisitos de promedio mínimo pueden realizar estancias científicas con investigadores destacados de los programas de posgrado de las instituciones participantes. Puede revisarse el programa en: <https://www.programadelfin.org.mx/sitio/estudiantes-verano.php>

⁶³ El Verano Nicolaíta de la Investigación Científica es un programa académico destinado a los estudiantes de licenciatura para realizar estancias de investigación en la misma universidad y presentar los resultados en el Congreso del Verano Nicolaíta. Para mayor información al respecto consultar: <https://www.cic.umich.mx/veranonicolaita/>



localidades rurales de sus propios estados. Con este proyecto se recabaron datos en las localidades de San Pablo Etla (SPE), en Oaxaca; Copainalá (CO), en Chiapas; y una primera campaña en Ario de Rosales (AR), en Michoacán.

Por otro lado, en el mes de enero de 2021 se empezaron las actividades del proyecto “Durability of local materials and traditional techniques of the Mexican vernacular architecture in the State of Michoacan”, también nombrado como proyecto DBMC 2020. Este proyecto resultó ganador del concurso “1st International Contest for Cooperation and Development XV International Conference on Durability of Building Materials and Components - DBMC 2020”, logrando el primer premio y el consecuente financiamiento para llevarlo a cabo.

El principal objetivo del proyecto DBMC 2020 partió del análisis de la durabilidad de los materiales tradicionales de la arquitectura vernácula del estado de Michoacán, al lograr el premio de un congreso de materiales de construcción. Sin embargo, desde el primer momento se contempló un fuerte componente en la cooperación al desarrollo, la divulgación científica y el uso de los medios audiovisuales para estos cometidos. Por otro lado, uno de los planteamientos y objetivos del proyecto pasó por el estudio y catalogación de la vivienda vernácula en el estado de Michoacán, con base en investigaciones análogas sobre tipologías similares (Hervás Herrera & González Quiel, 2020; López Martínez et al., 2020).

Las tipologías que se decidieron incluir y estudiar con el proyecto fueron tres (ver Figura 2.21): la vivienda tradicional de adobe, las trojes purépechas y la vivienda de bajareque. La primera fue la de mayor interés para la investigación doctoral, al ser el principal fenómeno y objeto de estudio; con este segundo proyecto se continuó el trabajo de levantamiento de AR y se introdujo el caso de estudio de Santa Cruz de Morelos (SC), ambos en Michoacán.



Figura 2.21. Tipologías de vivienda estudiadas en el proyecto DBMC 2020: 1) Vivienda de adobe en San Nicolás Obispo; 2) Troje purépecha en Charapan; 3) Vivienda de bajareque en Santa Cruz de Morelos. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2020; J. D. Machorro-Santacruz, 2021; A. Sánchez-Calvillo, 2021)

Con los recursos y equipo adquiridos mediante los proyectos, posteriormente la accesibilidad a los inmuebles fue otros de los puntos críticos para la elección de los casos de estudio. Por ello, la facilidad para visitar algunas localidades y el contacto con pobladores locales tuvo gran ascendencia en la decisión. Los casos externos, en los estados de Oaxaca y Chiapas correspondieron a las necesidades derivadas de la dificultad de movilización durante la pandemia y la facilidad de acceso por parte de los estudiantes del verano. Por otro lado, en el estado de Michoacán, se decidió estudiar dos localidades, AR y SC, con diferencias marcadas en sus características urbanas y ambientales, pero en ambos casos presentando una fuerte tradición constructiva de adobe.

El caso de AR fue de gran interés para realizar un análisis de vulnerabilidad sísmica en centros históricos, debido a que varias de las metodologías existentes consideran el efecto de colindancia de los inmuebles y la traza urbana como parámetros importantes para el cálculo de la vulnerabilidad y los daños producidos por sismos (Formisano et al., 2015; Vicente et al. 2015). Además, gran parte de la vivienda de adobe en México está presente en los centros históricos, donde los sistemas constructivos de tierra fueron empleados en gran medida para el uso residencial.

En el caso de SC, gran parte del interés residió en el estudio de la vivienda rural aislada en un entorno climático más demandante, al encontrarse situada la localidad en la región de Tierra Caliente⁶⁴, donde las temperaturas alcanzan valores extremos y las precipitaciones son

⁶⁴ Tierra Caliente es una región geográfica y cultural de México que abarca parte de los estados de Michoacán de Ocampo, Guerrero y el Estado de México.



muy escasas. Además del factor climático, en SC encontramos una presencia y coexistencia del adobe con otros sistemas constructivos vernáculos, principalmente el bajareque u oate⁶⁵, dando lugar a una cultura constructiva única que se adapta a las duras condiciones del territorio habitado.

2.2.2. Prospección y caracterización constructiva mediante fichas de inspección

La inspección en campo es una de las más importantes actividades del estudio arquitectónico, así como un primer acercamiento a los casos de estudio seleccionados. La identificación e inspección de las unidades son herramientas de gran utilidad para los posteriores trabajos y proyectos de catalogación de la arquitectura vernácula, iniciativas que cada vez cuentan con un mayor apoyo y distribución de recursos. Además, el análisis de las técnicas constructivas y sus combinaciones en los edificios también es útil para la caracterización tipológica arquitectónica (López Martínez et al., 2020).

En esta fase de la investigación, en la que se puede acceder a localidades con presencia significativa de arquitectura de tierra, el trabajo de prospección fue apoyado y complementado con la aportación de fichas de inspección, diseñadas tanto para los cometidos ya citados de catalogación y caracterización, como para el estudio de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe.

Para este análisis de la vulnerabilidad y la gestión de riesgos, este conjunto de técnicas y actividades es igualmente fundamental, puesto que supone el inicio de los trabajos para garantizar la seguridad estructural con acciones posteriores (Ferreira et al., 2021). En el mismo sentido, el desarrollo de las visitas a campo y el uso de fichas fue esencial para posteriormente hacer un análisis con distintos métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica (Ortega J. et al., 2019), encontrando antecedentes y ejemplos de referencia tanto para la calibración como para la aplicación de los mismos (Ortega J. et al., 2020).

Este tipo de fichas son de gran utilidad para los trabajos de investigación, encontramos un ejemplo de gran valor en la tesis de Gómez-Patrocinio (2018) cuyo objeto de estudio es la arquitectura tradicional de tierra en España, generando tres tipos de documentos para los

⁶⁵ Nombre con el que se conoce a ciertas especies de bambú en México.



inmuebles visitados: fichas de caracterización constructiva, fichas de identificación de lesiones, y fichas de intervención. En este caso vemos como la información obtenida puede servir para varios propósitos, pasando desde la documentación y catalogación de este patrimonio a la salvaguarda del mismo a partir del análisis de los mecanismos de deterioro y alteración de los inmuebles.

Por otro lado, para el diseño de las fichas se contó con el antecedente directo de la tesina de Especialidad en Restauración de Sitios y Monumentos del autor, *Proyecto de Restauración del Conjunto Conventual de San Miguel Charo, Michoacán* (2017), en la que se empleaban dos modelos: fichas de trabajo para el levantamiento de materiales y sistemas constructivos, y fichas de trabajo para el levantamiento de deterioros y alteraciones. En este caso el objeto de estudio era un conjunto conventual, que se analizó por espacios y macroelementos⁶⁶, pero la aplicación de la prospección y la toma de datos mediante fichas es trasladable al nivel de la vivienda.

Junto con Javier Ortega Heras, partiendo de las experiencias previas en campo con el registro de viviendas vernáculas en Portugal, se diseñaron fichas de trabajo para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. La principal finalidad de estas fichas es el procesamiento de datos a partir de la medición y ponderación de parámetros constructivos de las viviendas de adobe (proceso detallado en el Capítulo III del presente documento). Muchos de estos parámetros están definidos en los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica SVIVA y SAVVAS (Ortega J. et al., 2019), por lo que en el proceso de diseño se tomaron en cuenta aspectos que son de obligado análisis.

Además, estas fichas se combinaron con el trabajo de levantamiento arquitectónico y digitalización de las unidades de estudio (ver Figura 2.22), lo que ayudó a recolectar la información referente a los parámetros geométricos como la máxima separación entre muros o el porcentaje en área de las aberturas. Sin embargo, la información obtenida permite

⁶⁶ El concepto de macroelementos, propuesto por Doglioni (1994) se define como aquellos cuerpos arquitectónicos de un monumento o gran edificación que presenta una respuesta estructural independiente frente a un esfuerzo sísmico. En el conjunto de Charo se presentó un análisis por macroelementos, razón por la cual fueron importantes las fichas de trabajo para caracterizar cada uno de los espacios conventuales y sus características materiales y estructurales (Sánchez C. & Martínez R., 2018).



establecer un análisis tipológico, constructivo y morfológico de los inmuebles además del ejercicio de catalogación y de la obtención de datos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Este análisis, para cada uno de los casos de estudio, se encuentra en el apartado 2.3. Caracterización tecnológica-constructiva de las unidades de estudio, para el que el trabajo de campo y la prospección fueron fundamentales.

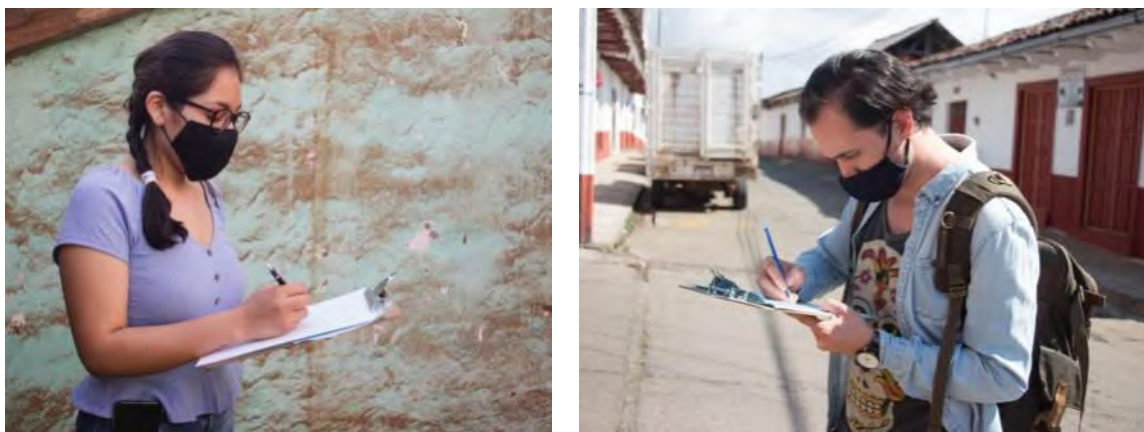


Figura 2.22. Llenado de las fichas de inspección durante el trabajo de campo. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Retomando el diseño de las fichas, se basan parcialmente en la propuesta de Sánchez Calvillo⁶⁷ (2017), e incluyen nueve partidas basadas en los elementos arquitectónicos de la vivienda: datos generales, sistema de cimentación, muros, sistema de diafragma horizontal (entrepisos o forjados), sistema de cubierta, vanos, otros elementos, instalaciones, y material adicional. Cada partida contiene un análisis cuantitativo de algunos elementos, por ejemplo, el número de ventanas o el grosor de los muros; y una evaluación cualitativa de algunos aspectos por parte del evaluador, como el estado de conservación de algún elemento particular.

Como parte de proyecto “Levantamiento y catalogación de vivienda vernácula” se realizaron sesiones de capacitación con los estudiantes para explicarles el funcionamiento de estas fichas, además de proporcionar un archivo con instrucciones para el llenado de las mismas (ver Figura 2.23). Adicionalmente, las fichas contemplan espacios para el dibujo de croquis

⁶⁷ Las fichas de trabajo para el levantamiento de materiales y sistemas constructivos incluyen las partidas de: cimentación, apoyos, pisos, cubiertas, vanos, ornamentaciones, instalaciones, elementos de comunicación vertical.



y detalles constructivos que posteriormente se complementan con la digitalización de las unidades de estudio y el procesamiento de los datos en los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica.

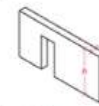
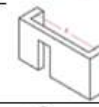
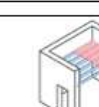
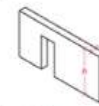
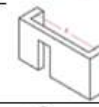
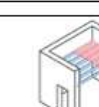
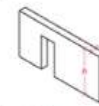
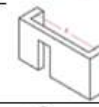
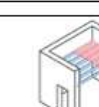
FICHA DE TRABAJO PARA LEVANTAMIENTO DE VIVIENDA VERNÁCULA																																									
Datos básicos y localización																																									
Código ficha			Autor																																						
Tipo inspección	Exterior	Interior	Fecha inspección																																						
Municipio			Estado																																						
Dirección	Calle, Nº ext, Nº int, Colonia, Localidad, Código Postal																																								
Nº ocupantes																																									
Propietario																																									
Macrolocalización		Microlocalización																																							
1) General																																									
Año de construcción	Si no se conoce, indicar una fecha aproximada (p. ej. S. XVIII)																																								
Número de niveles del edificio	1 nivel	2 niveles	>3 niveles																																						
Posición en mancha	Esquina	Medianera	Aislado																																						
Uso actual del edificio																																									
Espacios complementarios	P.ej. cocina o baños exteriores, graneros, almacenes, etc.																																								
Plano de planta																																									
Incluir medidas generales con posición de puertas y ventanas. Indicar alteraciones, modificaciones, añadidos, a los sistemas constructivos originales.																																									
<table border="1"> <tr> <td>Grosor</td> <td></td> <td>Indicar en un esquema simple de planta la distribución de los muros así como las grosores y distancias entre ellos.</td> </tr> <tr> <td>Distancia máxima entre muros</td> <td></td> <td>Luz máxima entre los apoyos de muros en planta, indicar en plano de planta en las dos direcciones.</td> </tr> <tr> <td>Conexión entre muros</td> <td></td> <td>Indicar cómo se resuelven las conexiones de muros en esquina, cómo es la trabazón entre ellos y con qué materiales se resuelve. Indicar también si hay grietas visibles en esta zona y apoyar con material gráfico.</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> Croquis con medidas. Incluir despiece de la mampostería y dimensiones de los bloques y espesor del mortero de unión. </td> <td>Fotografía/s</td> </tr> <tr> <td colspan="2">   </td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3"> Descripción general 4) Forjados/Entrepiños Nota: En caso de viviendas de dos o más niveles, en caso de viviendas de un solo nivel ignorar este apartado y pasar al de cubierta. </td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tipología</td> <td>Viguería</td> <td>Losa</td> <td>Otro (indicar)</td> </tr> <tr> <td>Material base</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Acabados</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Estado conservación</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Conexión con muros</td> <td></td> <td>Definir la conexión entre los muros y el sistema forjado. Indicar si el diafragma horizontal se resuelve por empotramiento en el muro, apoyo simple, anclaje, etc. Indicar también la calidad y el estado actual de la solución constructiva.</td> </tr> </table>				Grosor		Indicar en un esquema simple de planta la distribución de los muros así como las grosores y distancias entre ellos.	Distancia máxima entre muros		Luz máxima entre los apoyos de muros en planta, indicar en plano de planta en las dos direcciones.	Conexión entre muros		Indicar cómo se resuelven las conexiones de muros en esquina, cómo es la trabazón entre ellos y con qué materiales se resuelve. Indicar también si hay grietas visibles en esta zona y apoyar con material gráfico.	Croquis con medidas. Incluir despiece de la mampostería y dimensiones de los bloques y espesor del mortero de unión.		Fotografía/s	 			Descripción general 4) Forjados/Entrepiños Nota: En caso de viviendas de dos o más niveles, en caso de viviendas de un solo nivel ignorar este apartado y pasar al de cubierta.				Tipología	Viguería	Losa	Otro (indicar)	Material base				Acabados				Estado conservación				Conexión con muros		Definir la conexión entre los muros y el sistema forjado. Indicar si el diafragma horizontal se resuelve por empotramiento en el muro, apoyo simple, anclaje, etc. Indicar también la calidad y el estado actual de la solución constructiva.
Grosor		Indicar en un esquema simple de planta la distribución de los muros así como las grosores y distancias entre ellos.																																							
Distancia máxima entre muros		Luz máxima entre los apoyos de muros en planta, indicar en plano de planta en las dos direcciones.																																							
Conexión entre muros		Indicar cómo se resuelven las conexiones de muros en esquina, cómo es la trabazón entre ellos y con qué materiales se resuelve. Indicar también si hay grietas visibles en esta zona y apoyar con material gráfico.																																							
Croquis con medidas. Incluir despiece de la mampostería y dimensiones de los bloques y espesor del mortero de unión.		Fotografía/s																																							
 																																									
Descripción general 4) Forjados/Entrepiños Nota: En caso de viviendas de dos o más niveles, en caso de viviendas de un solo nivel ignorar este apartado y pasar al de cubierta.																																									
Tipología	Viguería	Losa	Otro (indicar)																																						
Material base																																									
Acabados																																									
Estado conservación																																									
Conexión con muros		Definir la conexión entre los muros y el sistema forjado. Indicar si el diafragma horizontal se resuelve por empotramiento en el muro, apoyo simple, anclaje, etc. Indicar también la calidad y el estado actual de la solución constructiva.																																							

Figura 2.23. Modelo de la ficha de inspección con instrucciones para los estudiantes.

El resultado de las campañas de campo y los dos proyectos involucrados en la inspección y catalogación de las viviendas de adobe dio como fruto 78 fichas de inspección completas con sus correspondientes levantamientos arquitectónicos. Pese al contexto de la pandemia y la comunicación virtual con las estudiantes del verano de investigación, proporcionaron un total de 30 fichas de inmuebles en los estados de Oaxaca y Chiapas (ver Figura 2.24). El resto de documentación se recabó en el estado de Michoacán donde se pudo tener una implicación más directa con los casos de estudio.



<table border="1"> <tr> <td>Descripción general</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3) Muros</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Materia Base</td> <td>adobe</td> </tr> <tr> <td>Acabados</td> <td>Si ~~aparece~~ adobe visible</td> </tr> <tr> <td>Estado conservación</td> <td>Buena</td> </tr> <tr> <td>Unidad</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Distancia máxima entre muros</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Conexión entre muros</td> <td> </td> </tr> </table>		Descripción general		3) Muros		Materia Base	adobe	Acabados	Si ~~aparece~~ adobe visible	Estado conservación	Buena	Unidad		Distancia máxima entre muros		Conexión entre muros	
Descripción general																	
3) Muros																	
Materia Base	adobe																
Acabados	Si ~~aparece~~ adobe visible																
Estado conservación	Buena																
Unidad																	
Distancia máxima entre muros																	
Conexión entre muros																	
El grosor del muro es de 20cm La altura del frente del edificio es de 2.60 m Distancia máxima: 5.32 m No hay grietas visibles en la unión de muros, los cuales están hechos con el mismo material de bloques de adobe																	

Conexión con muros Los muros y la cubierta se conectan de manera que esta queda sobrepuesta sobre los muros y en los espacios vacíos rellena con la misma mezcla que se utiliza para pegar los bloques de adobe y también se colocan pequeñas piedras	
Descripción general La cubierta está hecha con un sistema constructivo de tal forma que primero se colocan vigas de madera, luego campo y posteriormente se coloca la teja.	
6) Vano (puertas y ventanas)	
Nº Puertas	1 puerta
Dimensiones	1.50 x 30 m dintel: 13.5 cm
Material	La puerta es de madera un poco deteriorada, el dintel también es de madera
Nº Ventanas	2 ventanas
Dimensiones	Arcos-ventanas son de un largo de 47 cm con un alto de 24 cm, dintel de 9 cm
Material	El dintel de las ventanas es de madera y las ventanas solo son los vanos para tener los cubiertos

Figura 2.24. Ejemplo de llenado de ficha de inspección.

2.2.3. El levantamiento arquitectónico y fotográfico de las viviendas tradicionales

El levantamiento arquitectónico de las unidades de estudio consistió una de las principales actividades y de mayor importancia para el desarrollo de esta investigación. Sin el levantamiento y acopio de datos de estas edificaciones no hubiesen sido posible ni la caracterización tecnológico-constructiva de las viviendas de adobe ni el estudio de su vulnerabilidad sísmica.

Sin embargo, la metodología del levantamiento debe ser entendida como un proceso completo y un conjunto de operaciones, más que como la realización de una planimetría de un objeto (Sánchez Calvillo A. , 2017). Este proceso permite familiarizarse con el edificio y su contexto inmediato, aportando al investigador una visión completa, es, por tanto, nuestra fuente primaria de conocimiento. Además, si consideramos todo el legado cultural y la enorme información que aportan estos inmuebles como los procesos históricos de la técnica constructiva y su evolución la perspectiva a obtener será mucho más amplia:

Si consideramos que el objeto arquitectónico es una fuente de información sobre los hechos y sobre los procesos históricos que con él han estado asociados, ya sea que esos hechos y procesos se refieran a la existencia y desarrollo del propio objeto arquitectónico, o bien, que se asocien con otros acontecimientos de la vida social, entonces debemos reconocer la importancia de una correcta forma de registrar, “levantar” y describir la arquitectura. (Chico Ponce de León, 2000)



Sobre el trabajo llevado a cabo por el autor, los colaboradores de los proyectos y los estudiantes, se realizó una planeación y una capacitación para priorizar los aspectos de mayor importancia para la investigación. Inicialmente los trabajos se realizaron con equipos convencionales flexómetros, pero con la financiación del proyecto DBMC 2020 pudieron adquirirse distanciómetros digitales que agilizaron el proceso (ver Figura 2.25). Laura Jazmín Díaz, de la Universidad Autónoma de Chiapas, definía de esta forma el trabajo del levantamiento:

El levantamiento consistió en realizar mediciones para obtener alturas y espesores de muros, tipo de materiales que se emplearon en la construcción de estos, distancia máxima entre muros, dimensiones de puertas y ventanas, tipo y dimensiones de las cubiertas existentes, tipo de cimentación, así como el estado de conservación en la que se encuentra la vivienda y cada uno de sus componentes.



Figura 2.25. Proceso del levantamiento arquitectónico de viviendas de adobe en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (V. M. Pompa-Pureco, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).

Paralelamente al levantamiento arquitectónico de las unidades de estudio, se realizó un levantamiento fotográfico, que sirvió principalmente para complementar las fichas de inspección. El levantamiento fotográfico es otra de las técnicas de referencia en la investigación y la restauración patrimonial, con cada vez una mayor presencia en la formación básica de la arquitectura (Boned Purkiss et al., 2017). Encontramos antecedentes directos muy interesantes, como la tesis de licenciatura de Solís Sánchez (2018) que ofrece una memoria fotográfica de dos tenencias de Morelia, siendo un apoyo conceptual para el ejercicio de levantamiento que se realizó en la presente investigación.



En cuanto a las aplicaciones y finalidades de la fotografía para los proyectos tratados, podemos discernir distintos usos. En primer lugar, puede ayudar a captar aspectos más humanos o cualitativos de la arquitectura (ver Figura 2.26), ayudándonos a entender como las personas habitan los espacios a partir de sus actividades cotidianas, sus vínculos afectivos, relaciones, oficios, aficiones, etc. Citando a González Flores (2010): “si observamos la producción de imágenes fotográficas como conjunto, observaremos que una parte importante de ellas se desprende del entorno habitacional del hombre”, en este caso la intención es la contraria, captar el entorno humano dentro del conjunto habitacional.



Figura 2.26. La fotografía como reflejo: (a) Hombre fumando en la puerta de su vivienda en El Cairo, Valle del Cauca, Colombia; (b) Perro en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís Sánchez, 2021).

Además, nos ayudan a mejorar la percepción de los espacios a través de la fotografía de interiores (ver Figura 2.27), que permite captar perspectivas de las viviendas además de los modos de habitarla a partir de elementos como el mobiliario o el mantenimiento. También podemos discernir de una forma más clara la razón de ser de los sistemas constructivos y su disposición, aspectos muy importantes para el confort como la iluminación y la luz natural, las escalas cromáticas, las instalaciones, entre muchos otros.



Figura 2.27. La fotografía para el estudio espacial y compositivo de la vivienda: (a) Panorámica de vivienda de bajareque en El Cairo, Valle del Cauca, Colombia; (b) Interior de estancia en vivienda de adobe en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís Sánchez, 2021).

Otro de los principales usos que se dio a la técnica fue el de captar aquellos detalles relativos a la técnica constructiva y los materiales (ver Figura 2.28), de gran importancia para el trabajo de caracterización tipológica y material de las viviendas. Las fotografías tomadas para captar estos aspectos fueron de gran utilidad para procesar y completar las fichas de inspección en aquellos casos en los que la toma de datos resultó inconclusa.



Figura 2.28. La fotografía para el estudio de la técnica constructiva: (a) Muro combinado de tapia y adobe en Buga, Valle del Cauca, Colombia; (b) Sistema constructivo de bahareque en El Cairo, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

Por último, la fotografía (y también el video) fueron empleadas para el registro del trabajo de caracterización material en el laboratorio. Todos los ensayos realizados en los adobes



fueron documentados, del mismo modo que las muestras materiales antes y después de la realización de las pruebas; por ejemplo, la Figura 2.29 muestra el proceso del ensayo de flexión y el estado del espécimen previamente y posteriormente a recibir la carga. En este sentido, las fotografías son sustanciales para corroborar los resultados numéricos y estadísticos obtenidos y consecuentemente lograr publicarlos en medios indizados.



Figura 2.29. La fotografía para el registro y documentación de la experimentación en el laboratorio.
Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).

Viendo los distintos alcances y aplicaciones, el primer acercamiento al levantamiento fotográfico se dio en las fases inaugurales de la investigación, con las visitas técnicas a Jojutla de Juárez, donde se realizó un extenso reportaje fotográfico de los daños sufridos en la localidad tras el devastador sismo de 2018. Además, al realizarse una toma de muestras materiales se documentó el proceso de recolección de las mismas y ayudó a relacionar estas muestras con las viviendas de las que se obtuvieron y su localización georeferenciada.

Posteriormente, con el inicio del proyecto DBMC 2020 y el logro de un financiamiento externo para la adquisición de nuevo equipamiento se adquirió instrumental para el trabajo de campo. Para el proceso del levantamiento fotográfico se emplearon varios equipos: una cámara réflex y un dron DJI Mini 2 (ver Figura 2.30), además de las cámaras celulares que son una herramienta básica hoy en día. La cámara réflex fue empleada para retratar aspectos generales de las viviendas y detalles constructivos con mayor calidad, complementando con los celulares aquellos aspectos de menor importancia. El dron se utilizó para generar tomas aéreas de aquellas perspectivas difíciles de obtener, además de ayudar a tomar perspectivas generales de la configuración urbana de los casos estudio.

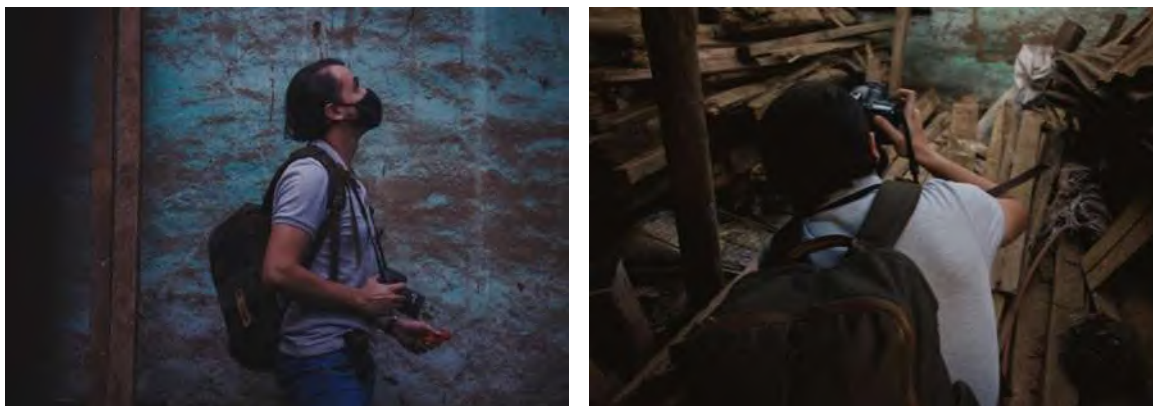


Figura 2.30. Proceso de levantamiento fotográfico en las viviendas de Ario de Rosales. Fotografías: (L. Arriaga-Vitela, 2021)

El uso del dron permitió obtener información a nivel urbano que hubiese sido muy difícil de obtener con los medios tradicionales y el acceso limitado a las viviendas. Por ejemplo, este instrumento fue de gran utilidad para el estudio de las cubiertas, siendo este un elemento a evaluar en los métodos de vulnerabilidad sísmica. La fotografía aérea permitió clasificar los sistemas, encontrando diferencias tipológicas y morfológicas, mostrando el nivel de deterioro y la alteración de los sistemas tradicionales por soluciones modernas.

Además, tras las experiencias derivadas de la investigación en campo, el desarrollo del proyecto DBMC 2020 y la producción del documental Xirangua; se pudo trabajar en actividades de formación y capacitación a estudiantes a partir de talleres participativos. En el marco del XXVIII Verano de Investigación Tecnológica y Científica del Pacífico y 10º Verano Nicolaíta de la Investigación Científica, se impartió el taller titulado “Como abordar la escritura de trabajos científicos de investigación empleando gestores de citas e incluyendo fotografía aérea” (ver Figura 2.31), con un carácter eminentemente práctico (Boned Purkiss et al., 2017).



Figura 2.31. Taller de uso de dron en las instalaciones de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2022).

2.2.4. Instrumentos de apoyo de la investigación

Además del trabajo de campo con un énfasis en las técnicas ya comentadas de prospección, levantamiento arquitectónico y levantamiento fotográfico, la investigación incorporó otras herramientas de apoyo, presentadas en el marco metodológico de la introducción como las herramientas de análisis. En este apartado se presentan tres instrumentos de apoyo que fueron de gran utilidad en el desarrollo de los distintos proyectos: las encuestas, la entrevista oral, y el uso de las redes sociales y medios audiovisuales.

Empezando con las encuestas, como parte del trabajo virtual de divulgación y difusión de la investigación que se realizó durante la pandemia, se decidió diseñar un modelo para el público estudiantil de estas actividades, con el objetivo de reforzar el estado del arte y tener una mayor cantidad de datos acerca la arquitectura de tierra y su fomento en las instituciones educativas, una de las problemáticas comentadas anteriormente.

Las encuestas se enfocaron en conocer el desarrollo y conocimiento sobre arquitectura de tierra en las instituciones educativas de México, en aquellas licenciaturas relacionadas con la



edificación y construcción. El cuestionario fue diseñado en Google Forms⁶⁸ y se efectuó siempre tras la presentación de una conferencia/ponencia con el tema central de la arquitectura de tierra y las técnicas de construcción tradicionales y modernas que emplean este material.

Se obtuvieron respuestas mediante la impartición de conferencias y talleres en los Veranos de Investigación Nicolaíta y los Veranos de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico celebrados en 2020, 2021 y 2022⁶⁹. Por otro lado, también se obtuvieron más contestaciones a partir de actividades de docencia en la Facultad de Arquitectura y la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, con alumnos de octavo y noveno semestre de la Licenciatura en Arquitectura; y tercer y noveno semestre de la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Los encuestados en las dinámicas de los veranos de investigación pertenecen a instituciones educativas superiores de México: Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Universidad de Colima, Universidad Autónoma de Chiapas, Universidad Veracruzana, Universidad Autónoma de Guerrero, Tecnológico de Estudios Superiores de Veracruz, Instituto Tecnológico de Matamoros, Instituto Politécnico Nacional, Instituto Tecnológico de Tepic, Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Instituto Tecnológico de Morelia, Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango (ver Figura 2.32); y universidades extranjeras, mayormente de Colombia : Colegio Mayor de Antioquia, Universidad Antonio Nariño, Universidad la Gran Colombia, y también la University of Nottingham de Inglaterra.

⁶⁸

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfhqKbdQQ0AUyu6pMLFT38wRIGV9ey2ND4btqC19TM5oY_E3Q/viewform?usp=sf_link

⁶⁹ Las conferencias magistrales fueron tituladas respectivamente: “Construcción con tierra. Perspectiva actual y problemáticas en los inmuebles históricos”, “Construcciones con tierra. Técnicas tradicionales y desarrollo tecnológico” y “Construcción con tierra. Sistemas constructivos”; esta última impartida conjuntamente con Belén González Sánchez.



Figura 2.32. Distribución de los encuestados nacionales respecto a su institución educativa. Fuente: Google MyMaps.

La amplia variedad en la procedencia de los estudiantes otorga un gran valor cualitativo a la encuesta, ya que permite obtener una panorámica de la capacitación y enseñanza de la arquitectura de tierra en las instituciones de educación superior, siendo este uno de los puntos que se han criticado más por parte de los expertos en el ámbito. Además, el análisis de las respuestas permitió reconocer tendencias, fortalezas y debilidades según la proveniencia e institución de los alumnos. Centrándonos en el modelo de cuestionario, éste consta de seis preguntas:

- 1) ¿De las técnicas presentadas cuáles conocías con anterioridad?
- 2) ¿Cuál/es te parecieron más interesantes y qué te llamó la atención?
- 3) ¿Qué ventajas de la construcción con tierra identificas?
- 4) ¿En tu ciudad/municipio/estado identificas este tipo de construcciones? ¿Cuál es su estado de conservación y alteración? (Indicar dónde viven)
- 5) ¿En tu institución/universidad existen iniciativas o investigaciones relacionadas con este tema?



- 6) ¿En qué línea de investigación sobre la construcción en tierra o te pareció más interesante o con más potencial?

La única pregunta que permitió el análisis cuantitativo fue la primera, con el objetivo de obtener los porcentajes de identificación de las técnicas tradicionales, especialmente el adobe al ser un elemento clave de la investigación. Los resultados mostraron que el adobe efectivamente es una técnica conocida por prácticamente la totalidad de encuestados, el 98.9 %; otras técnicas tradicionales como el bajareque o la tapia no son tan difundidas en las escuelas, siendo identificadas por el 35.3 y el 30.4 % respectivamente (ver Figura 2.33).

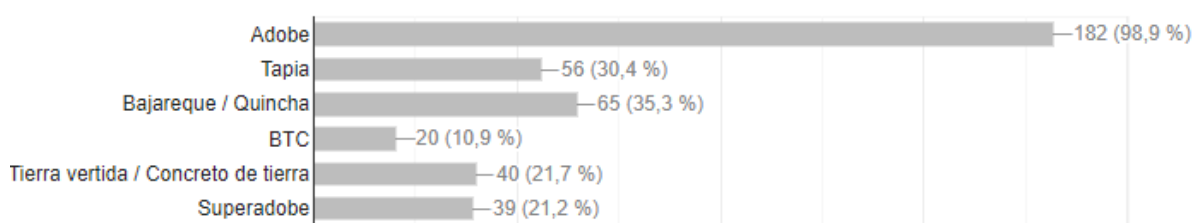


Figura 2.33. Resultados del cuestionario aplicado a alumnos de educación superior relacionados con el ámbito de la construcción.

En el caso del bajareque, la técnica fue mayormente identificada por los estudiantes colombianos, debido a la mayor proliferación en muchas regiones del país. En el caso de México, el sistema no es tan reconocido, y además es asociado a los bajos niveles socioeconómicos, como vemos en una de las respuestas obtenidas: “En la zona más marginal hay casas de bajareque”. La tapia también es mucho más común en Colombia que en México, donde únicamente se extendió en pocos estados de la república (Tepale Gamboa et al., 2020), por lo que del mismo modo fue más reconocida por los alumnos del país cafetero.

Sorprende la desinformación respecto al BTC siendo la técnica menos reconocida de las seis con un ínfimo 10.9%, pese a que es una de las que ha logrado un mejor desarrollo en la investigación y un mejor desempeño en los proyectos de vivienda social (Jerez Lazo et al., 2019). Esta podría ser una de las líneas de actuación en las escuelas de arquitectura e ingeniería, por la facilidad de equipos y la posibilidad de experimentar con distintos materiales para elaborar bloques compactados. En este sentido destacan los esfuerzos generados en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chipas, que han trabajado con esta técnica constructiva logrando algunos reconocimientos a partir de



proyectos académicos tan importantes como la medalla de plata en la Bienal de Arquitectura de Chiapas 2019⁷⁰ (ver Figura 2.34).



Figura 2.34. Vivienda sustentable BTC en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas. Fotografía cortesía de Bienal de Arquitectura de Chiapas.

Acerca de las técnicas que llamaron la atención, destacaron por encima de las demás la tapia y el BTC por sus cualidades trasladables a la edificación contemporánea y el alto valor estético de la primera; obteniendo respuestas como: “El BTC me parece un material ecológico además de muy versátil, pienso que la construcción con este material es muy buena alternativa”, “Para esta ponencia, se me hizo muy interesante la tapia, ya que se ve muy estético a comparación de otros materiales, además que es monolítica y funciona muy bien con respecto a las fuerzas mecánicas y a su durabilidad”. Por otro lado, aunque el adobe no captó el mismo nivel de atención, algunas respuestas de los alumnos reforzaron el interés latente en la arquitectura tradicional: “El adobe en general porque es algo con lo que estoy familiarizada y he visto desde siempre.”, “Me concentre mas en el adobe, ya que soy del norte y casi no se ve, me gusto mucho la forma en que se elabora y donde puede usarse”.

⁷⁰ Lista completa de ganadores y reporte en: https://www.archdaily.mx/mx/926902/ganadores-de-la-xi-bienal-de-arquitectura-de-chiapas-2019?ad_medium=gallery#



Respecto a la quinta pregunta, en referencia a las iniciativas de valorización y enseñanza de arquitectura de tierra en las universidades e instituciones educativas se denotó que un gran porcentaje de los alumnos desconocía estos sistemas, ofreciendo respuestas como: “No.”, “no”, “No sólo de bloks de concreto.”, “Desafortunadamente no”, “No tengo la menor idea”, “Muy pocas”, “Se tienen muchos profesores que son historiadores pero en lo personal nunca he tenido un profesor interesado en este tema o que lo investigue, solo nos hablan de las construcciones históricas y como se esta perdiendo este método constructivo pero no nos incitan a recuperar este sistema constructivo.”, “Es poco común que dentro del plan de estudios se hable de este tema y si se hace es muy superficialmente, aunque estaría bastante interesante tratar un poco más este tipo de sistemas pues así adquiriríamos un modo de volver y regenerar métodos en un tanto tradicionales y correspondientes a cada región”.

Por otro lado, encontramos respuestas más positivas que demuestran un mejor propósito para incorporar estos procesos a la formación académica, por ejemplo algunas respuestas fueron: “hace un par de semestres realizamos un proyecto basado en este tema y poco a poco se van dando nuevos proyecto”, “Sí, de construcción en tierra, haciendo énfasis en una perspectiva actual y problemáticas en inmuebles históricos”, “Si, se han realizado trabajos para tratar de fomentar y preservar estos sistemas constructivos”, “Sí, en la materia que llevamos en cuarto semestre llamada Fundamentos de arquitectura, en esta materia nuestra profesora nos llevo a un rancho ecológico llamada "La planta" aquí hicimos composta, y bloques de adobe. Y también en sexto semestre en una materia llamada Diseño eco-arquitectónico, aquí la maestra nos pidió que diseñáramos una vivienda donde empleáramos algún tipo de arquitectura vernácula”.

Para el resto de preguntas se obtuvo un resultado similar, evidenciando las carencias respecto al conocimiento de estos sistemas, pero recibiendo una retroalimentación positiva y un interés por parte de los estudiantes que más adelante se ha traducido en la propuesta y ejecución de tesis de licenciatura justificadas en estas temáticas. Además, la cuarta pregunta permitió mapear la procedencia de los alumnos y relacionar sus conocimientos previos sobre la arquitectura de tierra en función de su residencia y grado de urbanización de sus localidades.

Continuando con las herramientas de análisis y la adquisición de datos cualitativos a partir de terceros, la percepción de los usuarios remanentes de la arquitectura vernácula es de gran



interés para la investigación, motivo por el cual se decidió aplicar la técnica de la entrevista oral en las comunidades visitadas. Esta técnica, muy característica de las ciencias sociales, nos aporta información de carácter cualitativo, con un notable desarrollo en los últimos años en las investigaciones arquitectónicas, gracias a los enfoques interdisciplinarios. Podemos encontrar ejemplos de su aplicación en la arquitectura vernácula de Michoacán para recabar información de la tradición constructiva (Bedolla Arroyo E. , 2019), siendo acercamientos similares a los planteados en este trabajo.

El desarrollo y buen funcionamiento de una entrevista depende de muchos aspectos, para los que existen referencias y recomendaciones de todo tipo en obras científicas: “Cuando uno ya ha identificado a varias personas que podrían ayudarnos, es importante detectar si existe envidia o competencia entre ellos” o “A veces uno puede decidir trabajar más profundamente con personas mayores; por su experiencia, ellas son a menudo los informantes ideales” (Lamy, 2016). Gran parte de estas capacidades sólo pueden adquirirse mediante la práctica y la experiencia en el trabajo de campo, cuando la teoría pasa a perder su ascendencia en pos de la realidad.

En primera instancia se realizaron instintivamente entrevistas informales a los usuarios de las viviendas de adobe y bajareque donde se realizaron los levantamientos arquitectónicos. Sin un planeamiento la convivencia con las familias al recibirnos en sus inmuebles dio lugar a conversaciones de gran interés sobre su percepción, valoración y apropiación de la arquitectura vernácula. Partiendo de estas experiencias y pensando en el gran valor que supondría documentar estas interlocuciones se decidió destinar parte de los recursos del proyecto DBMC 2020 a la producción de contenido audiovisual relacionado.

Consecuentemente, como parte de la investigación y del proyecto documental *Xirangua* se llevaron a cabo entrevistas orales enfocadas con varios actores de la arquitectura vernácula de Michoacán, dando como resultado un factor humano que no puede lograrse con otras herramientas. Por ejemplo, la señora Evelia Gómez, de Charapan, nos muestra su apropiación y percepción de la vivienda de adobe, mostrando la apreciación que tiene gran parte de la población por sus raíces:

Esta casa la compramos hace 25 años aproximadamente, estaba muy destruida, es de adobe. Y pues la estamos todavía restaurando. Vivimos muy contentos, los beneficios de vivir en esta casa, pues son importantes porque son térmicas. Aquí no hace frío ni calor y se vive muy a



gusto. Cuenta con sus recámaras, su cocina, su patio, traspatio... son muy grandes, las casas de pueblo son muy grandes, ¿verdad? Y todo lo de antes lo queremos conservar (Sánchez, 2021).

El proceso de preparación, montaje y grabación de las entrevistas durante el proyecto DBMC 2020 y el rodaje de *Xirangua* aportó a todos los miembros del equipo una serie de nuevas competencias adquiridas inestimables. El acto de la entrevista (ver Figura 2.35) permitió ahondar en aspectos a los que no es posible llegar con otras técnicas convencionales, más aun tomando en cuenta que el principal foco del proyecto era la durabilidad de los materiales de construcción. Además, en el transcurso del proyecto se ganó una soltura y experiencia con este instrumento que puede ser de gran apoyo para futuros proyectos de investigación y cooperación al desarrollo.



Figura 2.35. Entrevista a dos hermanos propietarios de una troje en Charapan. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz y L. Arriaga-Vitela, 2021).

Finalmente, otras iniciativas recientes en el ámbito patrimonial pasan por el uso de las nuevas tecnologías y los medios audiovisuales para lograr mayor repercusión. Son varios los ejemplos de aplicación en este ámbito, por ejemplo, la 3D Past App⁷¹ (Correia et al., 2020), aplicación gratuita para dispositivos IOS y Android, permite obtener al usuario información

⁷¹ Descargable en: <https://esg.pt/3dpast/3dpast-app/>



sobre 8 sitios patrimoniales de la arquitectura vernácula europea. En este sentido, el desarrollo de estrategias e instrumentos digitales para la disseminación de la arquitectura vernácula al público general es cada vez mayor, tratando de lograr la mayor inclusión.

Otro ejemplo reciente es el proyecto Heritage Within, en el que las técnicas de caracterización no destructivas, fotogrametría y modelado 3D entre otros medios son empleados para el estudio del patrimonio, en este caso el Convento do Carmo, en Lisboa (Ortega J. , 2021). El proyecto pasa por aplicar las nuevas tecnologías, desarrollando nuevos modos de aprehensión del patrimonio haciendo a los visitantes de los monumentos partícipes del conocimiento, en el que los principales resultados de la investigación pasan por la generación de contenido audiovisual⁷²

Por otro lado, cada vez es más común que las instituciones, proyectos, e incluso los investigadores a nivel individual cuenten con redes sociales y hagan uso de ellas. Por ello, durante la realización del proyecto DBMC 2020 y más concretamente con la grabación, edición y difusión del documental *Xirangua* se realizaron propuestas buscando hacer un trabajo de divulgación científica y cultural a un público menos especializado. Para la difusión de *Xirangua*, desde las primeras fases de producción se crearon las redes sociales de proyecto, incluyendo cuentas en Facebook e Instagram y un canal en YouTube⁷³ donde se subieron videos de promoción, el tráiler oficial y posteriormente el documental completo para su libre distribución. Este trabajo en redes ha permitido encontrar nuevos aliados estratégicos para el proyecto, hacer promoción de las actividades y productos de la investigación, crear una red de contactos en ciertas líneas de interés como el patrimonio cultural o la producción audiovisual, entre otros alcances.

2.2.5. Xirangua, el uso de los medios audiovisuales para el acervo cultural de la arquitectura vernácula

Como parte del proyecto DBMC 2020 se produjo el documental *Xirangua* (ver Figura 2.36), estrenado en el Centro Cultural Clavijero de Morelia en el mes de febrero de 2022⁷⁴, y la

⁷² Recorrido virtual y presentación del proyecto: <https://www.youtube.com/watch?v=BJ7q-ksFkgU>

⁷³ <https://www.youtube.com/channel/UCncEYmqr2YACI25VparFAuA>

⁷⁴ Noticia y difusión del estreno: <https://cultura.michoacan.gob.mx/noticias/presentan-documental-xirangua-en-centro-cultural-clavijero/>



publicación del mismo en la plataforma Youtube⁷⁵. Este proyecto documental constituye un acercamiento a la arquitectura vernácula de Michoacán a partir de la imagen y las entrevistas con diversos actores: población local, usuarios de la vivienda y el patrimonio, artesanos, especialistas, estudiantes, etc. Hasta el momento continúa la difusión y proyección del proyecto a partir de distintas iniciativas y eventos que se detallarán a continuación.



Figura 2.36. Pósters promocionales de Xirangua, elaborados por J. D. Machorro-Santacruz.

La grabación del documental se efectuó entre los meses de mayo y agosto del año 2021, documentando varias regiones y comunidades de Michoacán (ver Figura 2.37); la edición y montaje del producto se terminó hasta el mes de noviembre del mismo año, así como la traducción de los subtítulos al idioma inglés, para una mejor difusión a nivel internacional y la posible proyección en festivales y eventos.

⁷⁵ Documental disponible en: <https://youtu.be/5T1tHXvgfjQ>



Figura 2.37. Grabación de entrevista a usuarios de viviendas tradicionales en la localidad de Ihuatzio. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz, 2021).

El proyecto logró varios apoyos estratégicos y patrocinios de varias instituciones educativas, culturales, científicas y privadas: la Universidad Politécnica de Cataluña, la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, la Universidad Internacional Jefferson, la Universidad Vasco de Quiroga; la Secretaría de Cultura del Estado de Michoacán, el ICOMOS México; la Red de Científicos Españoles en México; y las empresas privadas del sector de la construcción PEVSA e Integra. Todas estas instituciones han ayudado a difundir el proyecto y llegar tanto al público general como al sector más especializado.

En cuanto al desglose y contenido, el documental se estructura en tres capítulos: en el primero se presentan los materiales de la arquitectura tradicional de Michoacán, los suelos, la roca, la madera y la cal; en el segundo se introducen las tres principales tipologías vernáculas, la vivienda de adobe, el bajareque y las trojes de la meseta purépecha; en el tercero se trata el abandono del patrimonio monumental el rol de las ruinas arquitectónicas; por último se muestran las iniciativas de cambio y reflexiones para una mejor conservación y protección del patrimonio cultural vernáculo. Respecto a las reflexiones finales y las iniciativas existentes se quiso dar voz a los estudiantes que participaron en el proyecto, para comprender también cuál es la apropiación que ellos hacen del patrimonio al verse tan implicados y comprometidos con la causa.



Hasta el momento *Xirangua* ha sido proyectado en siete ocasiones en distintos eventos: el estreno del documental en el Centro Cultural Clavijero de Morelia (ver Figura 2.38), una proyección en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Vizcaya de las Américas, otra proyección en el Colegio de Arquitectos de Michoacán A. C., otra proyección con la Secretaría de Difusión Cultural de la UMSNH en el Teatro Rubén Romero de Morelia⁷⁶, otra proyección y ponencia en Barcelona en la Escuela Politécnica Superior de Arquitectura del Vallés⁷⁷, como parte de las actividades del Verano Delfín y el Verano Nicolaíta en la UMSNH, y un taller en el congreso Diseño Sustentable de la Facultad de Artes y Diseño de la UVAQ en Mérida, Yucatán. Además, siendo uno de los principales resultados del proyecto DBMC 2020 se espera realizar un evento de presentación en las actividades de la edición de 2023 en Beijing, China.



Figura 2.38. Estreno de *Xirangua* en el Centro Cultural Clavijero de Morelia.

Conjuntamente debe resaltarse todo el trabajo de difusión que se ha realizado mediante conferencias⁷⁸, entrevistas en radio, medios digitales⁷⁹, televisión, podcast, y otros medios. También se pudo lograr un importante reconocimiento por parte del SMRTV⁸⁰ por la participación en la convocatoria “Documentales producidos por michoacanas y michoacanos” logrando la proyección del documental en la televisión pública del estado de

⁷⁶ <https://difusioncultural.umich.mx/cartelera/teatros/xirangua/>

⁷⁷ <https://etsav.upc.edu/ca/noticies/0770>

⁷⁸ Participación mediante conferencia en el 30º Aniversario de la Licenciatura de Diseño Gráfico de la Universidad Vasco de Quiroga: <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/michoacan/educacion/la-creatividad-para-divulgar-investigaciones-sustentables-destaca-el-arquitecto-adria-sanchez/>

⁷⁹ <https://en15dias.com/entrevistas/xirangua-las-raices-de-la-arquitectura-vernacula-en-michoacan/>

⁸⁰ Sistema Michoacano de Radio y Televisión.



Michoacán⁸¹, siendo este uno de los principales objetivos que se marcó en el proyecto. Finalmente, ha sido incluida en la selección oficial del festival CINETEKTON de Puebla (ver Figura 2.39), México, en la categoría de largometrajes documentales, siendo este uno de los eventos más importantes en Latinoamérica con la temática de cine de arquitectura.



Figura 2.39. Pósteres promocionales del festival CINETEKTON 2022 de Puebla.

Todas estas actividades han funcionado como un método alternativo para la divulgación de la investigación realizada en la tesis doctoral, modificando la presentación del mensaje y obviando el contenido más especializado, pero desde otra perspectiva logrando captar un público mayor y más variado. Estas experiencias han sido completamente satisfactorias, sentando un precedente a nivel local y demostrando que la divulgación científica puede ser más accesible y adaptarse a los nuevos canales de comunicación.

⁸¹ <https://sistemamichoacano.tv/xirangua/>



2.3. CARACTERIZACIÓN TIPOLOGICA-CONSTRUCTIVA DE LAS UNIDADES DE ESTUDIO

La caracterización de las unidades de estudio y los rasgos tipológicos y constructivos de la arquitectura de las distintas localidades es uno de los principales aportes generados con la tesis doctoral. El aprovechamiento de los proyectos de investigación y cooperación al desarrollo fue capital para llevar a cabo los levantamientos y actividades derivadas del trabajo de campo, que permitieron obtener una gran cantidad de datos cuantitativos y cualitativos y generar un catálogo de las viviendas muy valioso.

El primer caso de estudio elegido fue el de Jojutla en el estado de Morelos, por los motivos indicados anteriormente en el capítulo y su posicionamiento estratégico de cara a estudiar el fenómeno de la vulnerabilidad sísmica. Los casos de Oaxaca y Chiapas fueron trabajados por alumnas del Verano de la Investigación 2020, ejerciendo un desempeño magnífico pese a las dificultades de la pandemia por COVID-19. Por último, los otros dos casos de estudio en Michoacán fueron elegidos por sus condiciones geográficas y culturales y la disponibilidad para llegar a ambas localizaciones con un equipo de trabajo reducido.

Respecto a este trabajo de caracterización tipológica y catalogación del patrimonio vernáculo son muchas las referencias de investigación que se tomaron para el proyecto DBMC 2020, con una gran fundamentación en la labor desarrollada por los académicos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Valencia; destacando el proyecto RISK-Terra⁸² (Mileto C. et al., 2020) y todo el trabajo realizado en la península ibérica (López Martínez et al., 2020) (Gómez-Patrocinio et al, 2019), así como en actividades de cooperación con países en desarrollo como Burkina Faso (Lidón de Miguel et al., 2022). La labor de Mariana Correia también debe ser destacada, siendo una referente a nivel internacional por sus numerosas obras de divulgación científica sobre la arquitectura vernácula y los sistemas constructivos a base de materiales locales.

⁸² El proyecto RISK-Terra pretende abarcar de una forma científica el estudio de las amenazas naturales (inundaciones, deslizamientos, terremotos, vientos, incremento de temperaturas, etc.), sociales (abandono, descrédito social, presión demográfica, desarrollo turístico, etc.), y antrópicas (descuidos y negligencias, falta de protección y mantenimiento, etc.), además de los mecanismos de deterioro (erosión, pérdida de materiales y partes, derrumbe, etc.) y las dinámicas de transformación (sustitución, empleo de técnicas y materiales incompatibles, etc.), a los que está sometida la arquitectura de tierra en este momento en la Península Ibérica. <https://riskterra.blogs.upv.es/>



En México la labor de divulgación y revalorización de la arquitectura de tierra por parte de Luis Fernando Guerrero Baca es encomiable, con una producción literaria muy extensa que ha sentado un precedente , además de sentar las bases para el estudio tipológico de las construcciones vernáculas (Guerrero Baca L. F., 2021); con aplicaciones directas muy recientes como el estudio de localidad de Calimaya de Díaz González en el Estado de México (Romero Olguín & Guerrero Baca, 2020).

Siguiendo estos referentes y los antecedentes citados, los cinco casos de estudio fueron analizados desde la tipología arquitectónica, el uso y disposición de los materiales y sistemas constructivos, los deterioros y alteraciones presentados por los inmuebles, los modos de habitar de los usuarios, la configuración urbana, entre otros muchos aspectos. De igual manera, todos los rasgos locales fueron extrapolados y correlacionados con las dimensiones territoriales, incluyendo las condiciones geográficas, climáticas y socio-culturales; y de este modo lograr un entendimiento holístico del desarrollo y evolución de la arquitectura vernácula en cada caso específico.

2.3.1. Jojutla de Juárez, Morelos: la vulnerabilidad sísmica en su máximo exponente

Jojutla de Juárez (JJ) fue la localidad más afectada del estado de Morelos, presentando graves daños estructurales y la pérdida de gran parte del patrimonio construido. Los edificios más vulnerables al sismo fueron las viviendas de adobe del centro histórico, en muchos casos llegando al colapso o presentado daños irreparables (ver Figura 2.40). Como se comentó con anterioridad, la población fue visitada en 2018 debido a los intereses de investigación en referencia a la vulnerabilidad sísmica, siendo una referencia idónea para este propósito.



Figura 2.40. Daños en los inmuebles del centro de Jojutla. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E.G. Navarro-Mendoza, 2018).

La ciudad constituye la cabecera del municipio de Jojutla, en el estado de Morelos, y presenta una población de 17777 habitantes (INEGI, 2021), siendo la segunda localidad más poblada entre todos los casos de estudio. En cuanto a las características arquitectónicas, JJ cuenta con una mayor urbanización y predominancia de edificios construidos con materiales industrializados, situación que se ha acrecentado tras el sismo. El centro histórico de la ciudad contaba con abundantes inmuebles de adobe, aunque a partir del 2017 la situación ha cambiado, del mismo modo como los principales templos y monumentos fueron muy afectados por el terremoto.

La localidad presenta un clima cálido subhúmedo acorde al mapa de climatología del INEGI⁸³, la clasificación climatológica responde a la modificación al sistema Köppen presentada por Enriqueta García⁸⁴ (1964), que es la usada con fines oficiales en México. Este clima implica temperaturas relativamente elevadas todo el año (ningún mes baja de 20 °C),

⁸³ <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>

⁸⁴ La clasificación climática de Köppen-Geiger ha sido el sistema más empleado a nivel global desde su creación en 1900 con posteriores modificaciones. En 1964 Enriqueta García presentó el trabajo Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, diseñado para una mejor adaptación a nivel nacional, siendo esta una obra de referencia.



una humedad relativa moderada y un régimen pluvial de verano (ver Tabla 2.1). Como se comentará más adelante estas características influyen en las situaciones provocadas por los agentes atmosféricos que no son correctamente gestionadas.

Tabla 2.1. Parámetros climáticos promedio mensuales de Jojutla de Juárez.

Mes	Ta	T _{min}	T _{max}	RH	SD	RR	RD	FF	DD
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(h)	(mm)	(d)	(m/s)	(deg)
Ene	20.1	13.1	27.3	54	5.9	10	1.0	0.5	92
Feb	21.7	14.7	28.9	50	6.7	6	1.0	0.5	92
Mar	23.4	16.5	30.9	47	6.9	7	1.7	0.5	92
Abr	25.3	18.4	31.9	46	7.2	20	3.4	0.5	11
May	25.4	19.3	31.8	54	6.7	73	11.4	0.5	11
Jun	24.1	18.6	29.3	66	6.3	188	19.4	0.5	11
Jul	23.4	18.7	28.7	68	5.9	181	18.2	0.5	7
Ago	23.5	18.6	28.9	69	6.5	218	19.2	0.5	11
Sep	23.0	18.1	27.8	74	5.8	218	21.3	0.5	7
Oct	22.5	17.3	28.4	69	6.4	82	10.8	0.5	11
Nov	21.4	14.7	27.8	62	6.5	17	3.3	0.5	11
Dic	20.7	14.1	27.8	56	5.6	8	0.6	0.5	92

Desde el Laboratorio de Materiales de la FIC-UMSNH se desplazó un equipo conformado por Elia Mercedes Alonso-Guzmán, Adrià Sánchez Calvillo, Elena Guadalupe Navarro Mendoza y Cipriano Bernabé Reyes con el apoyo logístico del Instituto Tecnológico de Zacatepec (ver Figura 2.41). Se efectuó una prospección y levantamiento fotográfico de los daños además de recabar muestras materiales de adobe para su análisis en el laboratorio.



Figura 2.41. Equipo de trabajo con los responsables del Instituto Tecnológico de Zacatepec.
Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).

En cuanto al trabajo de campo en JJ, por cuestiones lógicas no puedo realizarse un levantamiento arquitectónico de las viviendas, debido a la situación de emergencia y el estado



de colapso que presentaban la mayoría de unidades. Los resultados de la campaña de campo y el posterior análisis de los datos permitieron el estudio de la localidad desde dos frentes distintos: la vulnerabilidad sísmica presentada a partir los datos cuantitativos de los daños en las edificaciones y la prospección; y la exploración del manejo de los planes de gestión de riesgo y el cumplimiento de las normativas de construcción del municipio.

Según el reporte de las brigadas de emergencia, efectuado entre el 21 de septiembre y el 16 de octubre del año 2017, y que evaluó los daños de 3561 inmuebles; el 39.80% de las construcciones presentaron daños graves tras el sismo, incluido el riesgo de colapso; el 52.25% presentó un riesgo bajo asociado a daños leves no estructurales, mientras que el 7.95% restante presentó un nivel de riesgo incierto, siendo necesario un análisis más profundo. Estos datos pueden verse georreferenciados en la Figura 2.42 con la imagen satelital de Jojutla con un código basado en una semaforización; pudiendo observarse las zonas con mayor concentración de daños severos.

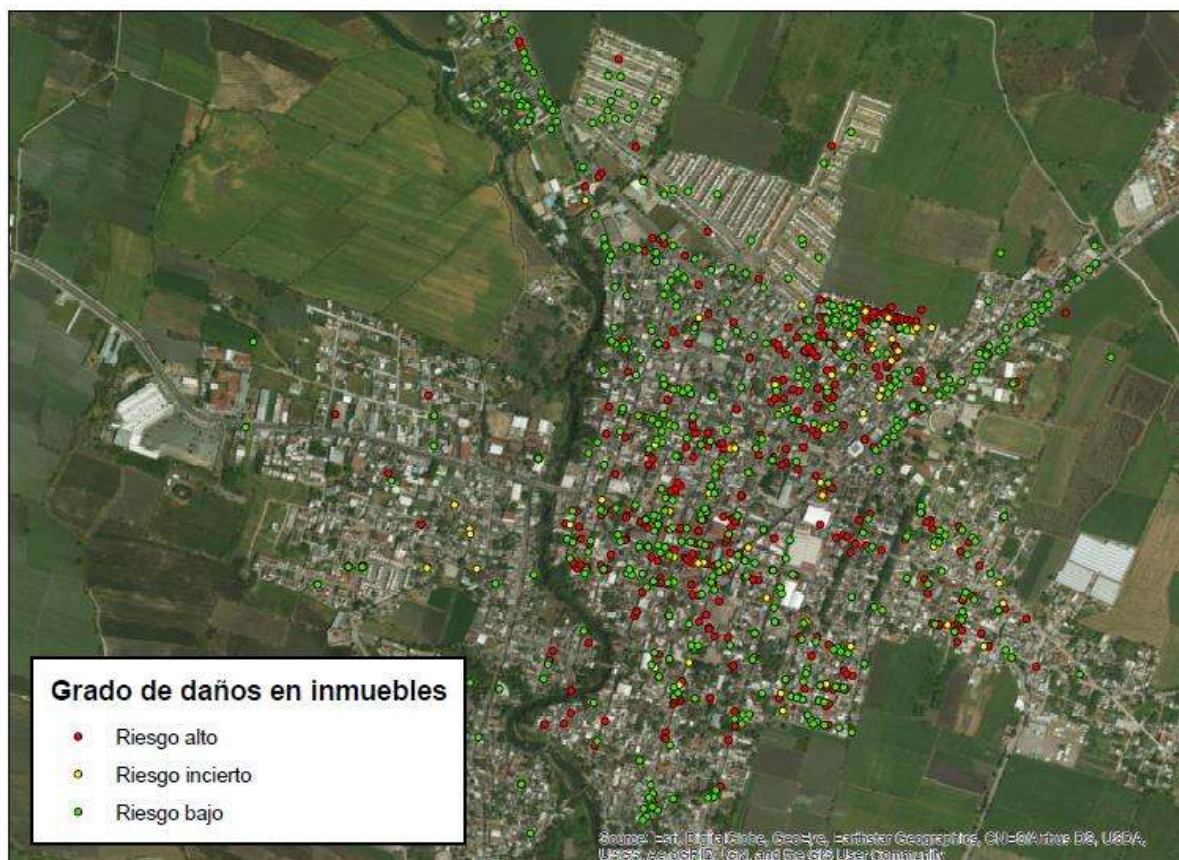


Figura 2.42. Reporte de daños del Sismo de Puebla de 2017. Zonificación de los inmuebles dañados en Jojutla de Juárez. Mapa elaborado por A. Sánchez-Calvillo. Fuente: Brigadas de emergencia.



El centro histórico de la población sufrió importantes pérdidas en sus inmuebles patrimoniales, como los templos e instituciones, además de las viviendas habitacionales. La mayoría de los edificios construidos con adobe pertenecían a la colonia Centro, resultando sus daños en la pérdida parcial y total del patrimonio edificado. La otra zona de la localidad que sufrió la mayor afectación fue la colonia Emiliano Zapata, de construcción mucho más reciente en las últimas décadas. Esta colonia sufrió importantes daños llegando al colapso de muchos de sus edificios, como muestra el informe geotécnico efectuado por la Universidad ITESO de Guadalajara⁸⁵. Los resultados del informe establecen tres causas principales del deficiente desempeño de los edificios construidos en la colonia: 1) Malas prácticas constructivas, 2) Resistencia inadecuada del sistema estructural, 3) Problemática con la cimentación soporte (del Campo Alatorre et al, 2018).

En cuanto a las deficiencias constructivas que contribuyeron al mal desempeño sísmico de las viviendas de adobe, pudieron identificarse: irregularidades en la morfología y la altura de los edificios, inexistencia de elementos de refuerzo horizontal, insuficiente grosor de los muros, falta de diafragma entre los sistemas de muro y cubierta, alteraciones mediante la apertura de nuevos vanos en las fachadas, mala compatibilidad entre sistemas constructivos, mantenimiento deficiente de las edificaciones antiguas, entre muchas otras.

Aterrizando en la revisión de la normativa aplicable al patrimonio arquitectónico, encontramos ejemplos de aplicación en otras investigaciones y casos de estudio en contextos patrimoniales, ayudando a comprender como las políticas públicas pueden incidir en la mitigación de riesgos (Paredes Avilés et al., Pérdida del patrimonio edificado de los Chimbos en la provincia de Bolívar, ciudad de Guaranda, Ecuador. Recomendaciones para su conservación, 2020). Otros países de Latinoamérica han identificado problemáticas respecto a la falta de regulación antisísmica de las construcciones de tierra (De Filippi et al., 2020), cuestión lógica al ser un territorio altamente afectado por estos eventos.

⁸⁵ El comité de colonos de la colonia Emiliano Zapata en Jojutla de Juárez, estado de Morelos, solicitó este informe técnico al Departamento de Hábitat y Desarrollo Urbano de la Universidad ITESO para obtener la mecánica de suelos de la colonia debido al desempeño durante el Sismo del 19 de septiembre de 2017. Se realizaron dos visitas a la localidad, la primera del 27 al 29 de septiembre de 2017 para tomar las primeras muestras y planificar el trabajo; y la segunda del 11 al 16 de diciembre de 2017 para realizar pruebas de penetración por cono dinámico y extracción de muestras inalteradas de suelo a través de tubo Shellby.



Precisamente una de las principales causas que acrecientan la vulnerabilidad sísmica es el desconocimiento o incumplimiento de las normativas existentes, derivando en el fenómeno de la autoconstrucción. Galán y Jiménez (2018) relacionan los patrones socioculturales de las localidades con las malas prácticas constructivas y su consecuente deficiente desempeño ante eventos telúricos, como los ocurridos en el año 2016 en Nicaragua. Respecto al caso de estudio, a partir de la inspección en campo y los reportes efectuados puede hallarse una extensión de este fenómeno que es común a la gran mayoría de los núcleos de población en México.

Respecto las normativas de construcción en JJ, la localidad cuenta con un reglamento de construcción que data del 2013. Tras los sismos, se incumplieron muchos de los artículos que contiene el documento, situación comprensible debido al contexto de emergencia, pero que en ningún caso benefició a la comunidad al vulnerar el principal precepto del reglamento:” Que la correcta ejecución material de las edificaciones e instalaciones es una obligación social, por lo que se requiere una aplicación técnica altamente calificada, en cuya elección se estima necesaria la intervención de los profesionales y cámaras relacionados con la construcción” (Consejería Jurídica del Poder Ejecutivo del Estado de Morelos, 2013).

A continuación, se exponen algunos de los artículos destacados del Reglamento de Construcción y su correspondencia con los eventos sísmicos acaecidos en septiembre de 2017 tratando de buscar la relación causa-efecto entre los antecedentes de la urbanización de Jojutla, sus construcciones históricas, la falta de regulación en las viviendas existentes y las consecuencias directas y materiales del Sismo de Puebla de 2017, así como la reconstrucción de la localidad.



Tabla 2.2. Revisión e interpretación del Reglamento de Construcción de Jojutla y relación con los daños observados tras el Sismo de Puebla de 2017.

TÍTULO TERCERO DIRECTORES RESPONSABLES DE OBRA Y CORRESPONSALES. CAPÍTULO I DIRECTOR RESPONSABLE

Artículo 40 ARTÍCULO 40.- OBRAS QUE NO REQUIEREN RESPONSIVA La licencia de construcción no requerirá de responsiva de Director Responsable de Obra cuando se trate de los siguientes casos:

- Reparación o modificación, cuando en la reparación se emplee el mismo tipo de construcción y siempre que el claro no sea mayor de 4.00 m. ni se afecten miembros estructurales.
- Construcción de bardas interiores o exteriores con altura máxima 2.50 m.
- Apertura de claros hasta 1.50 m. no afectando elementos estructurales y que no cambie el uso o destino del inmueble.
- Instalación de albañales en casas habitación.
- Edificación de un predio baldío de una vivienda de hasta 80 m2 construidos, la cual deberá contar con los servicios sanitarios indispensables, estar construida en un solo nivel y no tener claros mayores de 6.00 m.

Lectura Muchas de las viviendas en Jojutla fueron modificadas a lo largo de los años sin tener en cuenta los materiales y sistemas constructivos originales, contradiciendo el citado artículo. Existen muchos ejemplos de viviendas tradicionales de adobe que fueron modificadas y reparadas introduciendo materiales industrializados como el concreto y el cemento, además de la construcción de segundos niveles y estructuras de cubierta con técnicas no compatibles.



Figura 2.43. Vivienda severamente dañada tras el sismo con claras modificaciones al sistema constructivo original. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).



**TÍTULO CUARTO LICENCIAS Y AUTORIZACIONES. CAPÍTULO I LICENCIAS DE
CONSTRUCCIÓN**

Artículo 52 **ARTÍCULO 52.- OBRAS QUE NO REQUIEREN LICENCIA** I. Resanes y aplanados. II. Revestimientos y pintura. III. Colocación de madrinas en techos. IV. Impermeabilización. V. Obras urgentes para prevención de accidentes a reserva de dar aviso a la Dirección de Desarrollo Urbano, Vivienda y Obras Públicas en un plazo de 72 horas de inicio de obras. VI. Construcciones provisionales para uso de oficinas bodegas o vigilancia de predios durante la edificación de una obra.

Lectura Entre las obras que no necesitan licencia para efectuarse están las dirigidas a la prevención de accidentes. Tras el sismo fue necesaria la actuación de emergencia y consolidación de muchas estructuras en la localidad, con especial atención a los principales monumentos, como el ayuntamiento o los templos.



Figura 2.44. Obras de emergencia en el ayuntamiento de Jojutla. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).

Tampoco necesitan licencia las obras de resane y aplanados en cualquier tipo de estructuras, lo cual ha llevado a la problemática de la mala compatibilidad entre sistemas constructivos, como los muros de adobe con aplanados de cemento.



Figura 2.45. Separación de aplanado de cemento tras el Sismo de Puebla de 2017.
Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).

Artículo 53	ARTÍCULO 53.- CASOS EN QUE NO PROCEDE LICENCIA DE CONSTRUCCIÓN No se otorgará licencia de construcción a los lotes o fracciones de terrenos que hayan sido el resultado de una fusión o división o relotificación sin previa autorización de la Dirección Municipal de Fraccionamientos, Condominios, Conjuntos Urbanos y Usos y Destinos del Suelo y de la Dirección Estatal de Fraccionamientos, Condominios y Conjuntos Urbano y pago de derechos municipales.
Lectura	Esta es una de las situaciones más habituales en Jojutla, debido a la relotificación y división de los inmuebles originales debido al inevitable crecimiento de la comunidad y la necesidad de construir nuevos espacios. Sin embargo, el manejo del desarrollo urbano ha sido inexistente y caótico, como quedó reflejado en la inspección de los inmuebles, que por sus numerosas intervenciones y alteraciones a lo largo de los años incrementaron su vulnerabilidad al sismo.

TÍTULO SEXTO SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE LAS CONSTRUCCIONES
CAPÍTULO III CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

Artículo 157	ARTÍCULO 157.- ACCIONES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO En el diseño de toda estructura deberá tomarse en cuenta los efectos de las cargas muertas, de las cargas vivas, del sismo y del viento, cuando éste último sea significativo. Las intensidades de estas acciones que deben considerarse en el diseño y la forma en que deben calcularse sus efectos se especifican en los Capítulos IV, V, VI, VII de este TÍTULO. La manera en que deben combinarse sus efectos se establecen en los Artículos 160 y 165 de este Capítulo.



En el análisis se tendrá en cuenta la rigidez de todo elemento, estructural o no, que sea significativa. Con las salvedades que corresponden al método simplificado de análisis, se calcularán las fuerzas sísmicas, deformaciones y desplazamientos laterales de estructura, incluyendo sus giros por torsión y teniendo en cuenta los efectos de flexión de sus elementos y, cuando sean significativos, los de fuerza cortante, fuerza axial y torsión de los elementos, así como los de fuerzas gravitacionales actuando en la estructura deformada ante la acción tanto de dichas fuerzas como de las laterales.

No será necesario revisar la seguridad de estructuras construidas antes del presente siglo sino han sufrido daños o inclinaciones significativos siempre que no se hayan modificado sus muros y otros elementos estructurales ni se hayan incrementado significativamente las cargas originales.

Lectura	El análisis de las características y deficiencias constructivas que llevaron a aumentar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones se discutirán más adelante en el documento, con el análisis tipológico y constructivo de las viviendas. Sobre el artículo 157 es importante remarcar que las construcciones no contemporáneas no necesitan revisar su seguridad estructural a no ser que presenten daños significativos, aspecto que puede ser relativamente de comprobar por alguien que no sea especialista en la materia; además no se maneja ninguna ordenanza para las inspecciones de las mismas.

CAPÍTULO IX CONSTRUCCIONES DAÑADAS

Artículo 203	ARTÍCULO 203.- OBLIGACIÓN DE DENUNCIAR DAÑOS Todo propietario u ocupante de un inmueble tiene la obligación de denunciar ante las autoridades de la Dirección de Desarrollo Urbano, Vivienda y Obras Públicas los daños de que tenga conocimiento que se presenten en dicho inmueble, como los que pueden ser debidos a efectos por sismo, viento, explosión, incendio, hundimiento peso propio de la construcción y de las cargas adicionales, o a deterioro de los materiales e instalaciones.

Lectura	La situación acontecida tras el Sismo de Puebla de 2017 derivó en innumerables viviendas con daños de diferentes categorías, como puede observarse en el informe de las brigadas de emergencia. En el informe 3560 viviendas fueron evaluados y sus daños fueron reportados, por lo que en este caso la comunicación con La Dirección de Desarrollo Urbano, Vivienda y Obras Públicas se realizó a partir del dictamen de los especialistas estructurales debido al estado de urgencia.

TÍTULO SÉPTIMO CONSTRUCCIÓN. CAPÍTULO III MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

Artículo 221	ARTÍCULO 221.- MATERIALES La calidad de los materiales empleados en las obras deberá satisfacer las normas de calidad oficiales, las Normas Técnicas Complementarias respectivas y las especificaciones del proyecto. Para la verificación de la calidad de los materiales empleados se harán los muestreos y pruebas especificadas en las Normas Técnicas Complementarias respectivas.

Lectura	Otro de los problemas es la incapacidad para verificar la calidad de los materiales no normados, especialmente en las construcciones históricas, donde son más



comunes. En México no existen normativas o reglamentos de construcción en tierra, por lo que las viviendas que incorporan estos sistemas

TÍTULO DECIMO PRIMERO MEDIDAS DE SEGURIDAD. CAPÍTULO ÚNICO

Artículo 262 ARTÍCULO 262.- EDIFICACIONES PELIGROSAS Sí como resultado del Dictamen Técnico fuere necesario ejecutar alguno de los trabajos mencionados en este Reglamento, para los que se requiera efectuar la desocupación parcial o total de una edificación o yacimiento peligroso para sus ocupantes, de conformidad a lo dispuesto por el artículo 109, del Bando de Gobierno del Municipio de Jojutla, con relación al artículo 139 fracción I, V y IX de la Ley General de Protección Civil para el Estado de Morelos, la Dirección Municipal de Protección Civil en coordinación con la Dirección de Desarrollo Urbano, Vivienda y Obras Públicas, como medida de seguridad podrá ordenar la desocupación temporal o definitiva. En caso de peligro inminente, la desocupación deberá ejecutarse en forma inmediata, en términos de lo dispuesto por los ordenamientos legales referidos.

Lectura Como consecuencia directa de los daños recibidos por las construcciones en Jojutla y de acuerdo al artículo 262 del Reglamento de Construcciones, fue necesaria la evacuación de los ocupantes de un gran número de viviendas afectadas. Ni los planes de prevención ni las infraestructuras fueron suficientes para absorber las secuelas del desastre y muchas familias tuvieron que abandonar sus hogares y dormir en la calle durante las primeras semanas. Fue esencial la ayuda humanitaria recibida por la comunidad internacional y las organizaciones no gubernamentales.



Figura 2.46. Equipo de salvamento proporcionado por Japón. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).



**TÍTULO DÉCIMO SEGUNDO VISITAS DE INSPECCIÓN, SANCIONES Y RECURSOS.
CAPÍTULO II DEL PROCEDIMIENTO Y SANCIONES**

Artículo 277 ARTÍCULO 277.- CASOS QUE AMERITEN LA DEMOLICION La Dirección de Desarrollo Urbano, Vivienda y Obras Públicas, podrá demoler las obras en ejecución o terminadas, cuando ocurran algunas de las siguientes circunstancias: I. Cuando la obra se haya ejecutado en vía pública. II. Cuando la obra se haya ejecutado sin licencia. III. Cuando la obra con ejecución o terminada implique riesgo o situación de peligro en construcción y que ponga en riesgo la integridad física de la publicación.

Lectura Tras el sismo muchas de las construcciones fueron demolidas debido al estado de riesgo en que se encontraban. Muchas de las demoliciones no fueron ejecutadas por la Dirección de Desarrollo, Vivienda y Obras Públicas, sino que los mismos propietarios se hicieron cargo. Otra de las problemáticas que se comentaron en las entrevistas con el Mtro. Osvaldo de la Paz Soto Talavera y el Mtro. Carlos Bustos Mejía fue la demolición de viviendas con daños leves o medios y un estado de conservación óptimo, debido a qué se entregaron nuevos materiales y recursos para la reconstrucción de la localidad.



Figura 2.47. Demolición en predio. Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).

**TÍTULO DÉCIMO TERCERO EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS DE MATERIALES
PÉTREOS. CAPÍTULO I DISPOSICIONES GENERALES Y LICENCIA**

Artículo 292 ARTÍCULO 292.- REQUERIMIENTO DE LICENCIA Para explotar yacimientos de materiales pétreos en el Municipio de Jojutla, ya sea en terrenos de propiedad pública (ejidal o comunal) o privada, se requiere de licencia expedida por la Dirección de Desarrollo Urbano, Vivienda y Obras Públicas. Tratándose de terrenos



propiedad de la Federación, Estado o Municipio, se deberá obtener previamente un permiso administrativo temporal revocable.

Lectura Algunos de los yacimientos de materiales pétreos del municipio no contaban con las licencias requeridas y trabajaban de una forma clandestina. En estas instalaciones, el proceso de cocción de las piezas cerámicas se realizaba mediante la combustión de material de desecho altamente contaminante, como electrodomésticos, componentes electrónicos o neumáticos entre otros.



Figura 2.48. Horno tabiquero con material de desecho usado como combustible.
Fotografía: (A. Sánchez-Calvillo y E. G. Navarro-Mendoza, 2018).

Adicionalmente, otro de los factores que contribuyó a aumentar la vulnerabilidad de la localidad fue la ausencia de planes de prevención de riesgos, y también de estrategias de mitigación. El *Plan Municipal de Desarrollo del Ayuntamiento de Jojutla de Juárez*, publicado en mayo del 2016, apenas meses antes de los eventos sísmicos, no incluyó ningún tipo de planeamiento o gestión de posibles catástrofes naturales. El documento cuenta con 93 agendas de desarrollo, en diversos ámbitos como economía, ecología, cultura, educación, etc., sin embargo ninguno de estos programas referenció la gestión de riesgos naturales o el concepto de vulnerabilidad (Consejería Jurídica del Poder Ejecutivo del Estado de Morelos, May 2016), tan importante en las políticas modernas.

En cuanto a la gestión de riesgos naturales y la vulnerabilidad de Jojutla, no solamente quedó demostrada la falta de planes reguladores tras el sismo, sino que subsecuentemente se



produjeron otros eventos que acrecentaron la preocupación por la ausencia de estrategias de mitigación. En septiembre de 2018, justamente un año después del Terremoto de Puebla, la localidad experimentó los daños de otro desastre natural, en este caso importantes inundaciones en varias colonias. La colonia Emiliano Zapata, que fue llamada coloquialmente la zona cero del sismo de 2017, fue igualmente la más afectada por las inundaciones del posterior año, con picos en el nivel de agua de hasta 60 cm.

Las inundaciones de 2018 no correspondieron a un suceso aislado, sino que son una constante en la historia del municipio. Según estudios previos, la localidad es propensa a este tipo de eventos debido al desbordamiento del río Yautepec durante la estación de lluvias (Comisión Nacional del Agua, 2013). Un factor esencial son las características fisiográficas y paisajísticas de la cuenca, que aunado al régimen de lluvias que experimenta gran parte del país, causa inundaciones con asiduidad.

Respecto a las estaciones climatológicas inmersas en la zona, se observó que en las poblaciones de Yautepec, Tucumán y Jojutla se presentan frecuentemente inundaciones debido al desbordamiento del río Yautepec por tormentas intensas. En ello influyen las características fisiográficas de la cuenca, cuyo tiempo de concentración del cauce principal es de apenas 7 horas, y en la parte baja, a la altura de la localidad Yautepec confluyen dos cauces tributarios de respuesta rápida. (Comisión Nacional del Agua, 2013)

En la figura 2.49 puede observarse la precipitación mensual en Jojutla de Juárez durante cuarenta años, pudiendo advertirse los picos correspondientes a la estación anual de lluvias expresados en milímetros (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 2020).

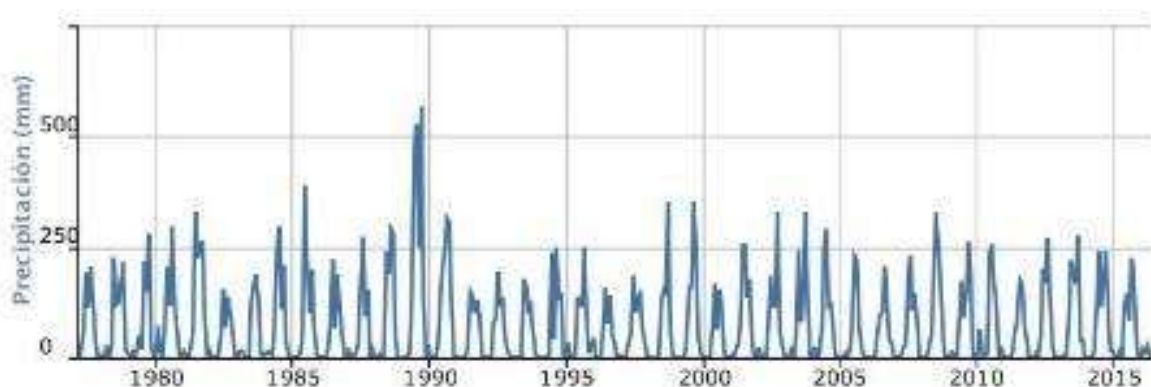


Figura 2.49. Precipitación mensual (mm), en Jojutla de Juárez 1977-2016. Fuente: Base de Datos Climatológica Nacional CLICOM.



Entrevistando al M. Ing. Osvaldo de la Paz Soto, uno de los coordinadores de las brigadas de emergencia en el estado de Morelos tras el Terremoto de Puebla de 2017, pueden determinarse varias razones para explicar la problemática de las inundaciones en Jojutla de Juárez y en las poblaciones cercanas como Zacatepec. En primer lugar, la deficiente gestión territorial y urbana de estas localidades, que experimentaron un crecimiento desordenado sin ningún tipo de planeación. En segundo lugar, la desviación forzada de los cursos de los ríos debido a proyectos de construcción, alterando el flujo natural del agua en la región. Por último, la incorrecta gestión de los residuos, que ha provocado la obstrucción y saturación de las instalaciones de evacuación y saneamiento de estas poblaciones.

Otro ejemplo de la deficiente gestión de riesgos en la localidad es la alta tasa de incendios incontrolados y provocados. Por un lado, existe una relación continua con los eventos sísmicos, ya que los incendios son catalogados como una de las consecuencias directas de los terremotos (CRATerre, 1989). En este caso el riesgo es generado por factores humanos y no por fenómenos naturales. La principal relación que se establece es entre la deficiente gestión de los residuos por parte de los organismos a cargo, con una cultura ambiental escasa de la población que prefiere quemar la basura antes que buscar alternativas de recuperación y reciclaje. Sin embargo, el resultado son los incendios incontrolados en la región, con una seria afectación al medio natural.

2.3.2. San Pablo Etla, Oaxaca: la vivienda rural y el abandono de estos espacios

San Pablo Etla es una comunidad rural que funge como cabecera del municipio homónimo, uno de los 570 que conforman el estado de Oaxaca. Con una población de 4703 habitantes (INEGI, 2021) esta localidad cuenta con la particularidad de que todavía se rige por usos y costumbres⁸⁶ como muchas otras comunidades del estado,

En cuanto a la clasificación climática, SPE presenta un clima templado semicálido subhúmedo acorde a la modificación del sistema Köppen por Enriqueta García (1964), con

⁸⁶ Oaxaca es uno de los estados de México con mayor diversidad étnica y población indígena, motivo por el cual sus municipios pueden seguir el régimen convencional de partidos políticos o bien ceñirse a su derecho a la libre determinación por el régimen de usos y costumbres y normas indígenas. En el siguiente catálogo pueden consultarse los municipios de Oaxaca que se rigen por estos sistemas: <https://www.ieepco.org.mx/sistemas-normativos/municipios-sujetos-al-regimen-de-sistemas-normativos-indigenas-2018>



temperaturas lógicamente templadas con muy poca variación durante todo el año, humedades relativas no demasiado elevadas y precipitaciones moderadas en un régimen de lluvias en la temporada de verano (ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Parámetros climáticos promedio mensuales de San Pablo Etla.

Mes	Ta	T_{amin}	T_{amax}	RH	SD	RR	RD	FF	DD
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(h)	(mm)	(d)	(m/s)	(deg)
Ene	18.5	10.4	27.2	50	7.5	1	0.2	2.0	12
Feb	20.3	11.9	29.2	46	8.1	2	0.7	2.3	12
Mar	21.9	13.6	30.8	46	8.1	20	2.3	2.3	12
Abr	23.6	15.2	31.7	46	7.8	43	4.2	2.3	0
May	23.5	16.8	30.9	53	7.0	103	8.4	2.0	0
Jun	22.1	16.2	27.7	64	5.7	234	17.1	1.7	0
Jul	21.5	16.0	27.3	64	5.6	170	13.7	1.8	0
Ago	21.5	15.8	27.6	64	6.0	158	13.6	1.7	0
Sep	21.2	15.6	26.5	69	5.3	256	16.5	1.6	0
Oct	20.7	14.4	27.6	63	6.5	71	7.2	1.9	0
Nov	19.4	11.7	26.9	57	7.3	19	1.1	1.9	0
Dic	18.6	10.3	27.4	53	6.8	0	0.8	1.8	12

El trabajo de campo en SPE fue desarrollado como parte del proyecto “Levantamiento y catalogación de vivienda vernácula” anteriormente descrito en el capítulo. Los estudiantes inscritos al verano de investigación pudieron efectuar levantamientos arquitectónicos mediante las fichas de trabajo diseñadas para la investigación; en el caso de SPE este trabajo fue desarrollado por Ivonne Velasco Hernández y Karla Luz Salvador Alcalá, alumnas de la Facultad de Arquitectura 5 de Mayo de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. En total se digitalizaron 20 unidades con sus respectivas fichas de inspección, repartidas en la localidad como puede observarse en la Figura 2.50.

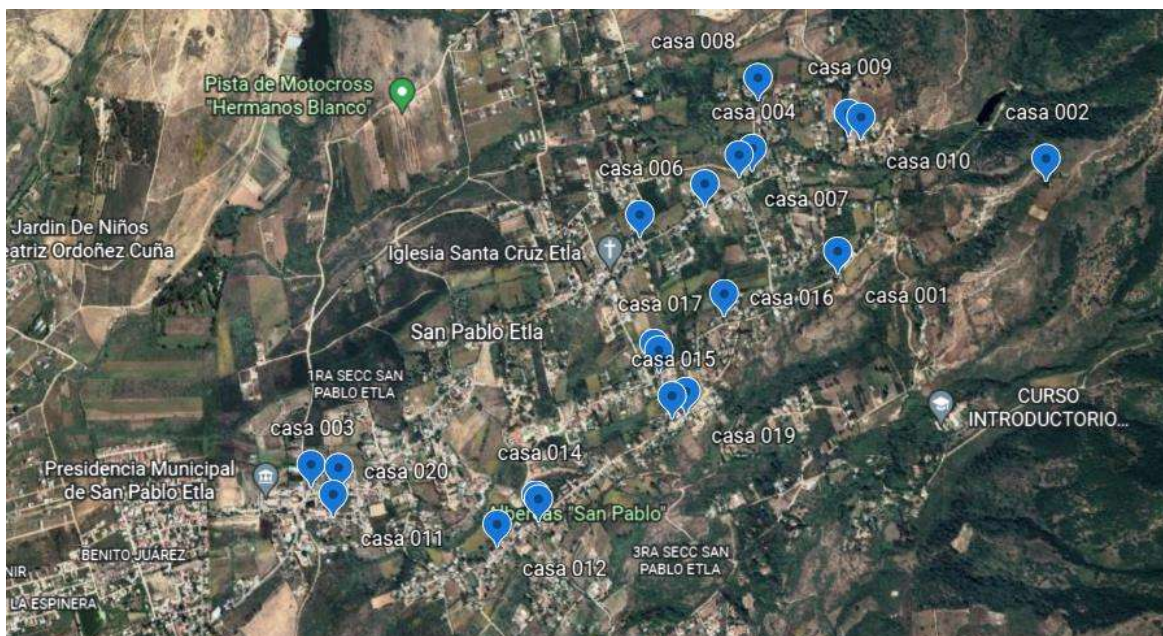


Figura 2.50. Localización de las viviendas muestreadas en San Pablo Etla, Oaxaca, México. Fuente: Google Earth.

La vivienda de adobe en SPE presenta características propias de la vivienda rural, encontrando principalmente edificios aislados de dimensiones reducidas y asociados a la producción y modos de vida locales. Respecto a otros casos de estudio SPE no muestra una transformación tan acelerada y agresiva de la vivienda vernácula, mostrando una permanencia y conservación de los sistemas constructivos (ver Figura 2.51). En el reporte entregado por las dos estudiantes comentan lo siguiente: “Con este trabajo de campo nos dimos cuenta de que en Oaxaca y principalmente en este municipio aún conserva los sistemas de construcción tradicionales y principalmente los bloques de adobe son obtenidos del mismo sitio, fue posible observar que todas las casas son de un solo nivel.”



Figura 2.51. Vivienda tradicional típica de San Pablo Etla, Oaxaca. Fotografía: (I. Velasco-Hernández y K. L. Salvador-Alcalá, 2020).

Respecto a las morfologías, los inmuebles presentan pocas irregularidades con plantas arquitectónicas cuadradas o rectangulares, en el segundo caso con relaciones cercanas al ratio 4:3. Los inmuebles son sencillos, de dimensiones modestas, distribuciones muy básicas en el interior y pocas aberturas, generalmente en el muro principal de fachada. No se encuentran demasiadas alteraciones constructivas, al contrario que en el resto de casos de estudio de la investigación, por ejemplo, mostrando una alta conservación de los sistemas tradicionales de cubierta. En cuanto a elementos adicionales, algunas viviendas presentan espacios porticados mediante columnillas de adobe o ladrillo cerámico (ver Figura 2.52a).

Los sistemas constructivos responden a las tipologías de la arquitectura vernácula, con combinaciones de materiales de la región. Las cimentaciones y sobrecimentaciones están compuestas por mampostería de piedra irregular y lajada asentada con mortero de barro o de arena (ver Figura 2.52b). Los muros lógicamente son de adobe, generalmente rejuntado con una capa de 3 a 4 cm de mortero de barro, con la particularidad de contar con bastantes líticos en la mezcla (ver Figura 2.52c). Las dimensiones promedio de estos adobes son de 45x30x9 cm, usando generalmente el lado corto para el grosor de las paredes, ya que debido al tamaño de las viviendas no es necesario contar con muros de tanta sección.



Figura 2.52. Elementos constructivos en las viviendas de adobe de San Pablo Etla, Oaxaca, México: (a) Columnas de ladrillo cerámico en pórtico; (b) Sistema de cimentación de mampostería irregular; (b) Mampostería de adobe rejuntada con mortero de barro. Fotografías: (I. Velasco-Hernández y K. L. Salvador-Alcalá, 2020).

Las cubiertas, generalmente a una sola agua por las dimensiones modestas de las viviendas, emplean sistemas de viguería de madera con entramados de carrizo, siendo un rasgo distintivo de la arquitectura regional ya identificado en territorio (Zafra Pinacho & Gastéllum Alvarado, 2015); o en su defecto tablones de madera (ver Figura 2.53). Sobre este sistema estructural descansan las tejas cerámicas, que en algunas ocasiones han sido sustituidas por láminas metálicas, siendo procesos muy comunes de la transformación de la vivienda de adobe en Oaxaca (Gómez Barranco et al., 2015), hecho que ha sido identificado en todos los casos de estudio de la investigación.

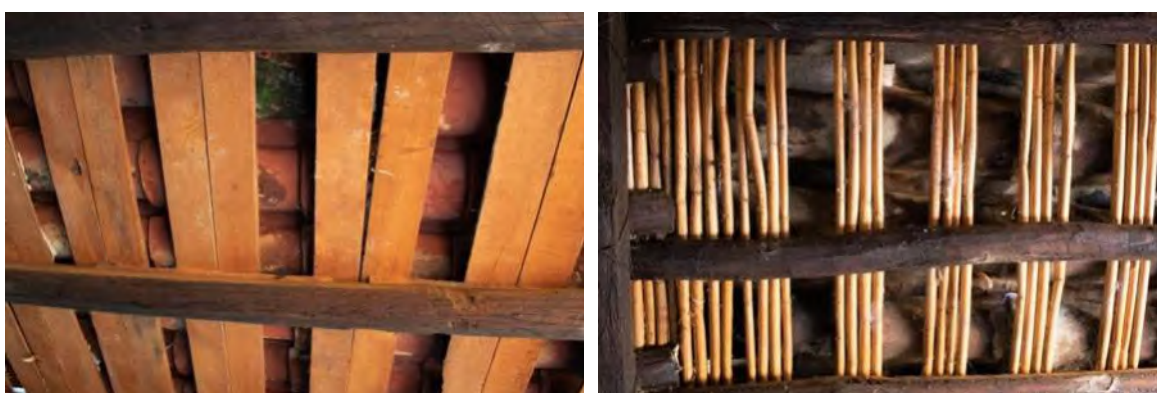


Figura 2.53. Entramados característicos de los sistemas de cubierta en San Pablo Etla, Oaxaca, México: (a) Entramado a base de tablones de madera; (b) Entramado a base de carrizos. Fotografías: (I. Velasco-Hernández y K. L. Salvador-Alcalá, 2020).

Otra característica común en las viviendas de la localidad es la ausencia de aplanados o revocos para revestir los muros de adobe, dejando el material a cara vista en la mayoría de casos, observándose una buena conservación de los sistemas (ver Figura 2.51 y Figura 2.52c).



Las razones de esta falta de protección de los muros no están claras, algunas construcciones presentan morteros de cal-arena como es común en estas tipologías, aunque suponen un porcentaje muy bajo de la muestra analizada. Sin embargo, el caso de SPE es especialmente interesante por la buena conservación general de las edificaciones y la preservación de los sistemas tradicionales, algo que podría tener una relación con la autogestión de la comunidad, siendo un aspecto a poder desarrollar en futuras investigaciones.

2.3.3. Copainalá, Chiapas: la alteración de la tradición constructiva de adobe con materiales industrializados

Copainalá es una población del noreste de Chiapas, que actúa como cabecera del municipio homónimo. Cuenta con 7125 habitantes (INEGI, 2021) lo que la sitúa a medio camino entre comunidades rurales como SC y ciudades como JJ o AR. La localidad cuenta con un clima cálido subhúmedo según la clasificación de Köppen modificada, al igual que JJ y SC. Sin embargo, CO presenta las temperaturas medias, mínimas y máximas más elevadas entre todos los casos de estudio (ver Tabla 2.4). Las precipitaciones y los vientos también muestran los valores más altos, lo cual es de gran importancia al ser los agentes atmosféricos y concretamente el agua las mayores causas de deterioro en la arquitectura de tierra. Las primeras presentan unos datos muy elevados respecto al resto de localidades, con un máximo de 464 mm de precipitación en el mes de agosto en únicamente 16 días en promedio (ver Figura 2.54).

Tabla 2.4. Parámetros climáticos promedio mensuales de Copainalá.

Mes	Ta	Ta _{min}	Ta _{max}	RH	SD	RR	RD	FF	DD
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(h)	(mm)	(d)	(m/s)	(deg)
Ene	22.6	17.7	28.7	64	6.1	43	1.2	3.6	0
Feb	24.4	18.9	31.2	59	6.7	10	1.0	3.6	0
Mar	26.0	20.4	32.8	54	7.1	14	0.8	3.8	0
Abr	27.8	21.6	34.2	52	7.6	14	1.1	3.4	0
May	28.0	22.9	34.0	58	7.1	206	6.2	2.7	0
Jun	26.5	21.8	30.6	69	6.9	369	13.7	1.6	0
Jul	26.6	22.1	31.4	69	6.8	306	13.1	1.7	0
Ago	26.5	22.3	31.2	70	7.3	464	15.2	1.7	0
Sep	26.0	21.6	30.0	73	6.3	451	16.2	1.6	0
Oct	25.3	21.4	29.8	71	6.8	243	7.8	2.4	0
Nov	24.1	19.3	28.9	67	6.8	78	2.4	2.9	0
Dic	23.3	18.5	29.2	65	5.9	53	1.9	3.0	0

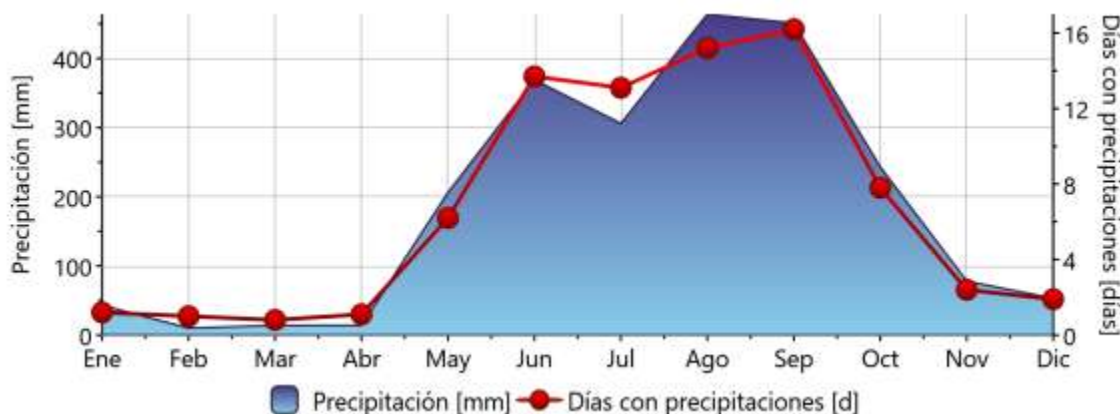


Figura 2.54. Precipitación mensual (mm) y promedio de días con precipitaciones en CO, Chiapas.
Fuente: Meteonorm v8.1.1

La toma de datos de las viviendas de CO fue gestionada a partir del proyecto “Levantamiento y catalogación de vivienda vernácula”, del mismo modo que el trabajo realizado en SPE y la primera campaña en AR. Los levantamientos arquitectónicos, fotográficos y fichas de registro fueron efectuados por la estudiante Laura Jazmín Díaz Juárez, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Chiapas. Sobre el proceso, ella misma comenta en su reporte de actividades del verano lo siguiente en referencia al proceso de selección e inspección de las viviendas:

Como parte de la presente investigación se realizó la visita a las viviendas seleccionadas que cumplieron con las características requeridas para la misma. Previo a comenzar con el levantamiento se llevó a cabo una reunión con cada uno de los propietarios de estas viviendas donde se les dio a conocer cuáles eran los objetivos y alcances de la investigación, así como también el solicitar su autorización y colaboración para llevar a cabo los levantamientos e inspecciones visuales de las viviendas.

Respecto al caso de estudio, CO destaca por una notoria alteración de sus viviendas tradicionales, con un marcado uso de sistemas y materiales contemporáneos como las cubiertas metálicas, divisiones interiores con ladrillo cerámico o bloque de concreto, aplanados interiores y exteriores a base de cemento, o la construcción de nuevos elementos y espacios en los inmuebles. Además, la imagen urbana exterior no es sólida, al contrario que muchos de los municipios de Michoacán, con las casas presentando todo tipo de acabados y colores en fachada (ver Figura 2.55).



Figura 2.55. Viviendas de adobe de Copainalá. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020).

La morfología de las viviendas es bastante regular, con una distribución típica rectangular de un ratio 6:4 en planta, establecidas en predios que comúnmente cuentan con un extenso patio trasero. Las viviendas analizadas por la Ing. Laura Jazmín quedan insertas en la traza urbana de CO, encontrándose en una posición medianera o en su defecto en la esquina de la vialidad. La localidad cuenta con un pasado prehispánico y una extensa historia colonial, por lo que algunas construcciones son de gran antigüedad; la autora de los levantamientos comenta: “Este tipo de viviendas son realmente interesantes, el saber que algunas de ellas llevan 80 años de vida útil, lo cual es realmente sorprendente”.

Retomando la influencia del clima en el desarrollo de la arquitectura local, las fuertes precipitaciones pueden ser uno de los motivos por el que los sistemas tradicionales de cubierta, a base de teja cerámica, han sido sustituidos por sistemas metálicos (ver Figura 2.56), ya que los últimos exigen un menor mantenimiento por parte de los usuarios. Por otro lado, esta solución genera muchos más problemas de confort térmico, al emplear materiales que se calientan con facilidad y no cuentan con la inercia térmica de las cubiertas tradicionales.



Figura 2.56. Sustitución de las cubiertas en Copainalá, Chiapas, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020).

El intenso régimen pluvial que experimenta la localidad también puede servir de explicación para otras soluciones constructivas: por ejemplo, a diferencia de SPE, donde se encontró la mayoría de muros descubiertos y los adobes expuestos a la intemperie, en CO prácticamente todas las viviendas mostraron aplanados con morteros de cal-arena o en su defecto realizados con cemento (ver Figura 2.57)

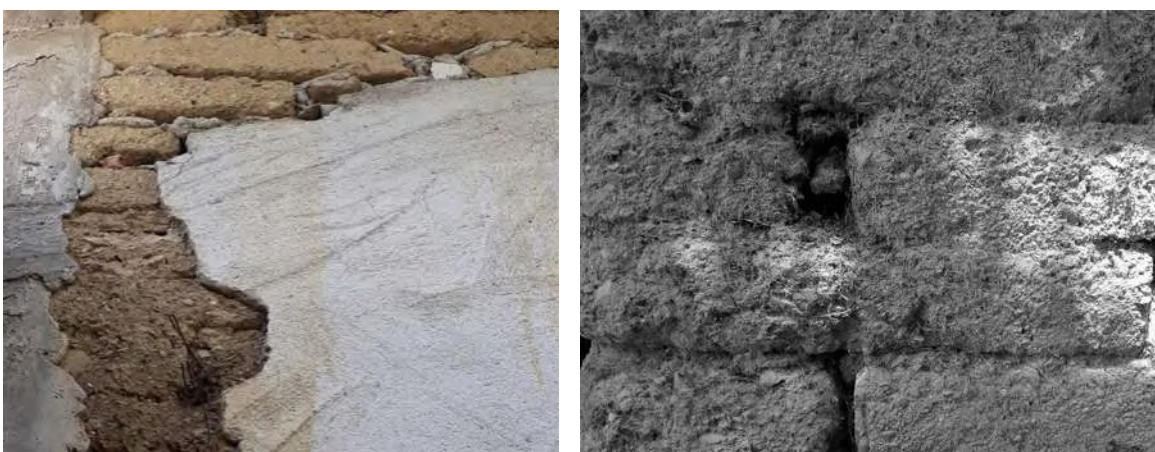


Figura 2.57. Soluciones constructivas en muros de adobe: (a) Revestimiento con mortero de cemento; (b) Acabado aparente de la mampostería. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020).

En cuanto a la composición de las viviendas esta es muy similar a la del resto de casos de estudio y a la tipología de la vivienda de adobe tan extendida en México. Las alteraciones constructivas que se han comentado se muestran mucho más presentes que en SPE, SC o AR, respectivamente, con la inclusión frecuente de elementos de hormigón armado para el refuerzo estructural o la creación de nuevas divisiones o elementos internos. El análisis de



CO resulta muy llamativo en contraposición a SPE, otro de los casos en los que trabajaron los estudiantes del verano de investigación que presentaron sus resultados y generaron una interesante discusión.

2.3.4. Ario de Rosales, Michoacán: la importancia del adobe en los centros históricos

La localidad de Ario de Rosales constituye la cabecera del municipio de Ario, en el estado de Michoacán, contando con el reconocimiento de ser la sede del primer Supremo Tribunal de Justicia que México tuvo como nación independiente⁸⁷. Por lo tanto, esta localidad cuenta con un pasado histórico relevante que se ve reflejado en la arquitectura y la configuración urbana de la ciudad (ver Figura 2.58), debido a la importante actividad que se desarrolló en la misma. La mayoría de construcciones del centro histórico de Ario de Rosales fueron edificadas con adobe, por lo que resultó un objeto de estudio muy adecuado para la investigación. Por otro lado, con una población de 18097 (INEGI, 2021) representa el caso de estudio más “urbano” de los cinco.



Figura 2.58. Toma aérea de Ario de Rosales. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).

⁸⁷ Desde el 7 de marzo al 5 de mayo de 1815 en Ario (posteriormente nombrada Ario de Rosales) fue la sede de los tres poderes de la nación según la Constitución de Apatzingán de 1814 y consecuentemente la primera capital del Gobierno Insurgente.



En cuanto a las condiciones del entorno, que pueden ayudar a comprender ciertas soluciones constructivas y materiales, AR presenta un clima templado semicálido húmedo (igual que SPE), con las temperaturas más frías entre todos los casos de estudio y una humedad relativa media sin grandes cambios a lo largo del año. Cuenta con una temporada seca y otra húmeda en la estación de verano, en la que se experimentan precipitaciones moderadas (más de 150 mm diarios) de junio a septiembre, con caudales mucho más reducidos que otros casos de estudio como CO (ver Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Parámetros climáticos promedio mensuales de Ario de Rosales.

Mes	Ta	Ta_{min}	Ta_{max}	RH	SD	RR	RD	FF	DD
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(h)	(mm)	(d)	(m/s)	(deg)
Ene	16.0	9.0	23.1	54	6.1	12	3.0	1.7	152
Feb	17.9	11.0	25.1	49	7.0	21	2.4	1.9	152
Mar	19.8	12.8	27.2	43	6.9	20	2.8	2.1	152
Abr	22.2	14.8	29.2	39	7.0	22	2.5	2.0	94
May	22.8	16.8	29.2	46	6.1	70	10.1	2.0	94
Jun	21.4	16.6	25.8	62	5.3	162	19.7	1.8	94
Jul	19.9	15.9	24.1	70	4.5	216	23.6	1.6	62
Ago	19.8	15.7	24.1	71	5.2	173	21.4	1.6	94
Sep	19.6	15.4	23.6	72	5.1	194	20.3	1.6	62
Oct	19.0	14.1	24.2	69	6.1	90	10.9	1.7	94
Nov	17.3	10.8	23.6	63	6.4	33	4.6	1.7	94
Dic	16.1	9.4	23.2	59	5.5	5	1.8	1.6	152

Los trabajos de levantamiento y prospección de las viviendas se efectuaron presencialmente (ver Figura 2.59), obteniendo la digitalización de viviendas con sus respectivas fichas técnicas. Los levantamientos fueron efectuados en dos campañas: la primera durante el mes de julio de 2020 como parte del proyecto de investigación “Levantamiento y catalogación de vivienda vernácula”, por un grupo de trabajo formado por Adrià Sánchez Calvillo, Miguel Ángel Pérez Coeto y Vania Melissa Pompa Pureco; mientras que la segunda campaña se realizó del 29 al 31 de enero de 2021 como parte del proyecto DBMC 2020, con un grupo de trabajo conformado por Adrià Sánchez Calvillo, Adrián Solís Sánchez, Miguel Ángel Pérez Coeto, Vania Melissa Pompa Pureco y Leonardo Arriaga Vitela.



Figura 2.59. Trabajo de campo y prospección de viviendas en Ario de Rosales, Michoacán, México.
Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

El trabajo de campo y el levantamiento de las viviendas de adobe permitió al grupo familiarizarse con la arquitectura local y los sistemas constructivos y soluciones comunes de estas edificaciones. La localidad presentó unas configuraciones y tipologías de inmuebles muy distintas a las de SPE o CO, con una mayor homogeneidad del centro histórico y unas dimensiones mayores de las viviendas, debido al carácter urbano de AR. Algunas unidades, como AR26 o AR27 mostraron características completamente distintas a las observadas anteriormente, con una distribución en torno a un patio central y una cantidad de habitaciones y espacios que evidenciaron el fuerte poder adquisitivo de las familias que las habitaron (ver Figura 2.60).



Figura 2.60. Viviendas señoriales AR26 y AR27 en Ario de Rosales, Michoacán, México.
Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Sin embargo, la vivienda “típica” de AR, aunque no sea un ejercicio simple el identificarla, presenta una tipología muy singular, con una planta arquitectónica en forma de “L”, en la que encontramos dos cuerpos diferenciados: uno primero ocupando toda la línea de fachada



y otro alargado con un conjunto de estancias alrededor de un patio interior y una superficie porticada. En la Figura 2.61 podemos ver este tipo de configuraciones y otras usuales sin patio interior, también muy comunes en el centro de AR; esta segunda tipología suele contener comercios, mientras que la primera conserva en la mayoría de casos el uso residencial.

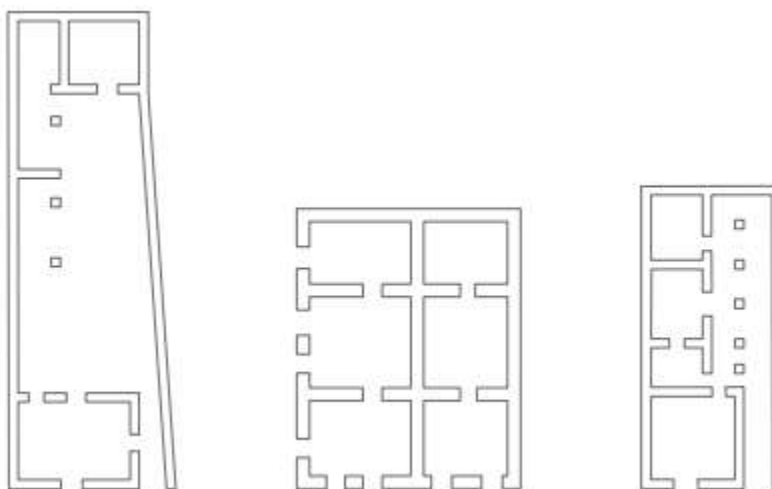


Figura 2.61. Configuraciones y plantas arquitectónicas de las viviendas de Ario de Rosales, Michoacán, México. Escala 1/500.

Por otro lado, una situación muy común de las viviendas históricas de adobe es la subdivisión del inmueble con el paso del tiempo, particularmente con el uso comercial de los espacios (ver Figura 2.62), que genera la partición y relotificación de las estructuras originales. Es muy común que los espacios de fachada de estas edificaciones, especialmente las configuraciones en esquina alberguen negocios, mientras que pasando este nivel superficial encontremos la verdadera arquitectura habitacional donde residen las familias que regentan estos locales.



Figura 2.62. Inmuebles de uso comercial en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

La alteración de las viviendas también es evidente si se recorre la localidad, sin embargo, muchos sistemas tradicionales, como las cubiertas madera y teja cerámica todavía son la solución más común en los inmuebles del centro (ver Figura 2.63a), mostrando una imagen homogénea en este sentido junto con otros aspectos como el esquema cromático de las fachadas tan característico en esta región de Michoacán (ver Figura 2.62). Una alteración que pudo identificarse de modo general en la ciudad fue la extensión de las cubiertas tradicionales mediante láminas plásticas, que generan una mayor superficie y consecuentemente más sombra en los espacios (ver Figura 2.63b).



Figura 2.63. Sistema tradicional de cubierta y modificación mediante láminas plásticas.
Fotografías: (A. Solís Sánchez, 2021; A. Sánchez-Calvillo, 2020).

Por otro lado, pese a la notable preservación de las viviendas en el centro histórico de AR, si nos alejamos del núcleo de la ciudad y accedemos al medio más rural, encontramos



numerosas viviendas abandonadas o en un estado de deterioro avanzado (ver Figura 2.64). En estos casos los inmuebles pasan a ser prescindibles al no formar parte de un entorno urbano uniforme y reconocido, y conjuntamente fenómenos como la migración producen el desamparo de estas estructuras hasta quedar en ocasiones en un estado de ruina.



Figura 2.64. Viviendas abandonadas a las afueras de Ario de Rosales, Michoacán, México.
Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).

2.3.5. Santa Cruz de Morelos, Michoacán. La adaptación bioclimática de la vivienda de adobe en Tierra Caliente

Santa Cruz de Morelos es una comunidad rural contenida en el municipio de Turicato en el estado de Michoacán, quedando enclavada en la región climática y cultural de Tierra Caliente. SC presenta una configuración urbana totalmente distinta a JJ o AR (ver Figura 2.65), con una población de únicamente 621 habitantes y una mayor dispersión de las viviendas en el territorio. El acceso a la población es complejo, al quedar alejada de los principales núcleos de población del estado, estando conectada con la cabecera municipal, Turicato, por una carretera no pavimentada a más de dos horas de trayecto.

La localidad presenta un clima cálido subhúmedo, con temperaturas elevadas todo el año que no bajan de los 24 °C promedio (ver Tabla 2.6), siendo un rasgo característico de la región de Tierra Caliente. El régimen pluvial, del mismo modo que todos los casos de estudio, es de verano con la característica de que las lluvias en esta región son en periodos escasos pero muy intensos, siendo pocos los días y horas con precipitación (Ayala Ortega, 2019). La humedad relativa presenta valores adecuados para el confort térmico, siendo SC una localidad menos seca que otras zonas de Tierra Caliente.



Tabla 2.6. Parámetros climáticos promedio mensuales de Santa Cruz de Morelos.

Mes	Ta	T _{min}	T _{max}	RH	SD	RR	RD	FF	DD
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(h)	(mm)	(d)	(m/s)	(deg)
Ene	24.1	17.6	30.8	56	6.6	5	0.9	1.9	162
Feb	24.5	17.9	31.3	53	7.3	10	0.9	2.1	162
Mar	25.3	18.7	32.2	49	7.5	13	0.9	2.2	162
Abr	26.4	19.4	32.8	46	7.6	8	0.6	2.3	112
May	27.1	21.4	30.6	52	6.9	34	3.9	2.4	112
Jun	26.2	21.2	33.0	69	6.2	185	14.8	2.0	112
Jul	25.7	21.7	30.1	73	6.0	160	16.8	1.6	75
Ago	25.6	21.4	30.0	75	6.5	209	17.5	1.6	112
Sep	25.1	20.7	29.1	78	5.8	265	20.1	1.5	75
Oct	25.3	20.6	30.5	74	6.6	98	11.0	1.6	112
Nov	24.9	19.0	30.7	66	7.0	18	2.6	1.6	112
Dic	24.3	18.3	31.0	59	6.2	4	0.5	1.6	162



Figura 2.65. Vista aérea de la configuración urbana de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México.
Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Respecto a la influencia del clima, resulta notorio el cambio del paisaje entre la estación seca y la húmeda (ver Figura 2.66), generando unos contrastes que hacen difícil creer que las imágenes correspondan a la misma localidad. Esta variación del clima tiene una influencia directa en la arquitectura de la región, ya que se hacen evidentes y necesarias ciertas



estrategias para ventilar los espacios en la estación seca, o proteger los espacios en la estación húmeda cuando son comunes lluvias torrenciales⁸⁸.



Figura 2.66. Paisaje de Santa Cruz de Morelos en estación seca y estación húmeda. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, A. Sánchez-Calvillo, 2021).

El trabajo de campo en SC se realizó los días 13 y 14 de marzo de 2021 en las actividades del proyecto DBMC 2020, con un grupo de trabajo conformado por Adrià Sánchez Calvillo, Jane Huéramo García, Adrián Solís Sánchez, Miguel Ángel Pérez-Coeto García y Vania Melissa Pompa Pureco. Además, se realizó una segunda campaña los días 20 y 21 de julio del mismo año con el objetivo de entrevistar a los usuarios de viviendas vernáculas y generar contenido audiovisual para el documental *Xirangua*; en esta segunda visita el grupo de trabajo estuvo compuesto por Adrià Sánchez Calvillo, José Daniel Machorro Santacruz y David Duque Sosa. En total se documentaron 22 viviendas de adobe, bajareque y tipologías mixtas en la localidad, destacando por la interesante combinación de sistemas a base de tierra como respuesta ante las altas temperaturas que experimenta la localidad (ver Figura 2.67).

⁸⁸ En la segunda visita a la localidad una lluvia torrencial provocó la crecida del río inundando la carretera, por lo que el equipo de trabajo tuvo que esperar durante un día para el regreso.



Figura 2.67. Tipologías constructivas en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Los inmuebles están edificados de forma aislada en los distintos predios de la localidad, con configuraciones en planta sencillas rectangulares y muy proporcionadas⁸⁹. Un rasgo característico es la presencia de la fachada porticada (usualmente la principal) para favorecer la ventilación natural, generalmente se desplanta un murete de aproximadamente un metro de altura con columnas de adobe o ladrillo cerámico (ver Figura 2.68).

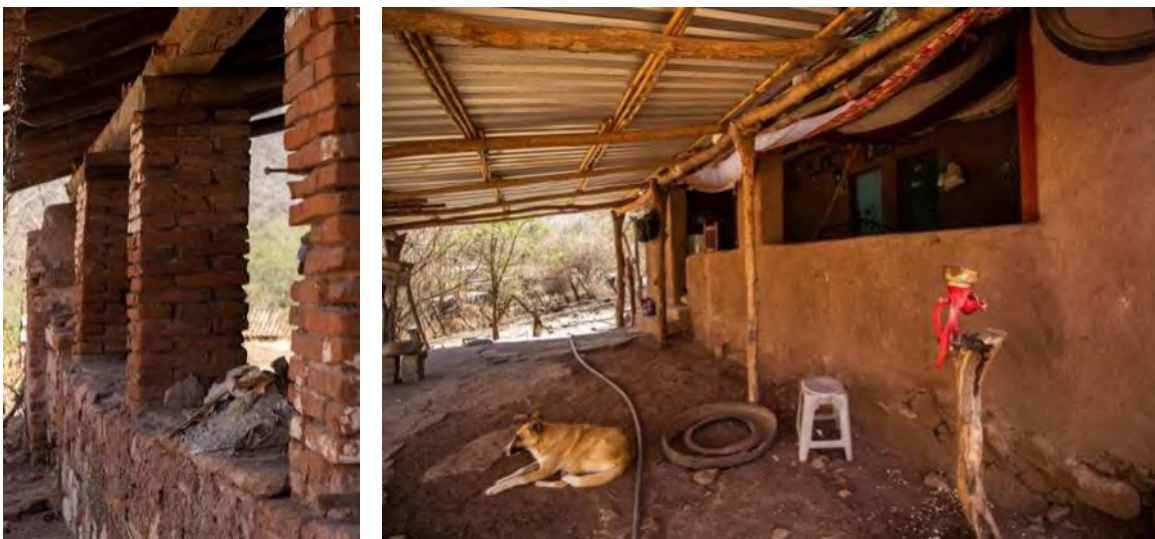


Figura 2.68. Fachadas porticadas en viviendas de adobe de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

⁸⁹ En el parámetro de vulnerabilidad sísmica del índice de masa, las viviendas de SC obtuvieron coeficientes muy favorables.



Respecto a los sistemas constructivo, muchas viviendas presentan sobrecimentaciones más bajas de lo normal o total ausencia de ellas (ver Figura 2.67), lo cual puede deberse a que las precipitaciones en Tierra Caliente son más escasas que en otras regiones o a la característica sequedad del clima. Estas cimentaciones cuando están bien efectuadas emplean rocas de la región desplantando los muros de adobe unos 50 cm por encima del terreno para evitar la ascensión de humedad por capilaridad.

Las paredes presentan espesores alrededor de los 30 cm, el largo del bloque de adobe, ya que al contrario de AR las dimensiones más reducidas de las viviendas no requieren tanta respuesta estructural de los muros. En algunas viviendas los grosores alcanzaron los 60 cm, correspondiendo a aquellos inmuebles más importantes y amplios, como algunas haciendas de ganado. Generalmente las estructuras una protección en forma de aplanados con morteros de cal-arena y en algunos casos de cemento, aunque en un menor grado que el caso de estudio de CO.

En cuanto a las cubiertas, tradicionalmente de teja cerámica, se observó una sustitución progresiva por los sistemas metálicos modernos, aunque también se encontraron ejemplos en los que se usó la hoja de palma en combinación con el otate, importando la primera de otros municipios cercanos a la costa (ver Figura 2.69). Otro aspecto muy interesante es que varias viviendas reutilizaron las tejas cerámicas de una hacienda en abandono, mostrando un ejemplo muy práctico de construcción sostenible.



Figura 2.69. Distintas tipologías de cubiertas en viviendas tradicionales de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

En SC se reportó una interesante convivencia entre distintas tipologías, incluyendo el uso combinado de muros de adobe y bajareque en la misma unidad residencial. Una solución



muy común es el uso del adobe para la estructura principal y los dormitorios, empleando el bajareque para alguna división interior o la construcción de espacios anexos de las viviendas, normalmente las cocinas, donde también se pueden encontrar los característicos hornos tradicionales de barro (ver Figura 2.70).



Figura 2.70. Cocinas tradicionales de otate en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México.
Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Respecto al bajareque, en la región de Tierra Caliente estas edificaciones son conocidas popularmente como viviendas o casas de otate, debido al empleo de este material como parte fundamental del sistema constructivo de bajareque. El otate, cuyo nombre científico es *Guadua longifolia*, es una especie de la guadua, una subfamilia del bambú. Este género de plantas, así como el uso de este material para la construcción, en Latinoamérica históricamente ha estado más extendido a otras regiones, dando lugar a diversas técnicas tradicionales y sostenibles como la quincha en Perú, el bahareque en Colombia⁹⁰, o el bajareque en Centroamérica y México.

Estas estructuras de bajareque u otate cuentan con un enjarrado de barro, aunque los usuarios comentaban que cada vez se demoran más en aplicar estos enjarres y es común encontrar muchas viviendas de la localidad con los muros descubiertos (ver Figura 2.69). Otro de los usos que se da al otate en la arquitectura de la región es el de las trojes para el almacenamiento del grano. Estas trojes no tienen nada que ver con las reconocidas edificaciones de madera

⁹⁰ En Colombia, el término bahareque comprende varias tipologías, con la peculiaridad que varias de ellas no contemplan el uso de tierra. Encontramos diversos sistemas como el bahareque embutido embutido (con rellenos y pañetes de barro), el bahareque sin relleno, bahareque en tabla, o sistemas modernos como el bahareque metálico y el bahareque encementado.



de la meseta purépecha (Bedolla Arroyo et al., 2011), pese a que su cometido es muy similar. Las trojes en Tierra Caliente consisten en estructuras levantadas del suelo mediante una plataforma de madera para evitar precisamente la ascensión de la humedad por capilaridad, elevando el nivel de la construcción entre 30 y 50 centímetros sobre el terreno. Además, cuentan con un sistema de techado cuya función es igualmente la de evitar que el grano se moje, en este caso por la filtración de las lluvias en la estación húmeda, ya sea mediante la misma cubierta de la construcción principal o con una estructura auxiliar (ver Figura 2.71).



Figura 2.71. Trojes de bajareque en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

El sistema constructivo es el mismo que se emplea para las estancias o las cocinas, mediante el entramado vegetal y un recubrimiento de tierra. Estos elementos también ayudan a conformar la arquitectura vernácula de la región por su valor artesanal, técnico y simbólico, además de la relación que expresan con los medios de producción locales.



CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La acelerada desaparición del patrimonio construido con tierra es una de las problemáticas culturales más preocupantes en México, y el estudio de las fuentes y los datos estadísticos señalan que es necesaria una rápida actuación por parte de todos los actores implicados. En este capítulo se buscó establecer un conjunto de estrategias para el análisis de las principales causas de este fenómeno, así como poder emplear un conjunto de herramientas e instrumentos que a partir del estudio tipológico y la caracterización ayuden a mantener la preservación de este patrimonio.

Primeramente, delimitando el marco de referencia actual con base en el desarrollo histórico y cultural de la arquitectura de tierra en México, sentando las bases de una propuesta metodológica para el estudio y caracterización de estas construcciones y una toma de datos que permita un ulterior análisis bajo criterios más específicos. El estudio tipológico a partir del trabajo de campo mediante la prospección, el levantamiento arquitectónico y fotográfico, entre otras técnicas; fueron fundamentales durante el desarrollo de la investigación, y un correcto planteamiento de las actividades facilitó enormemente las cosas.

La identificación y catalogación de esta arquitectura vernácula es uno de los métodos más indicados para recuperar y promover el conocimiento y las prácticas ancestrales de un sector de la población mexicana muy importante, en muchas ocasiones siendo los remanentes de la cultura local de muchas comunidades indígenas. Precisamente por sesgos culturales y locales, este tipo de construcciones han sido ignoradas por años (Guerrero Baca L. F., 2007) y son necesarias estas iniciativas para recuperar el interés de aquellos sectores que puedan tener una influencia directa en su recuperación.

Los cinco casos de estudio mostraron características propias que ayudaron a entender el fenómeno de la arquitectura vernácula y como esta se adapta a las condiciones locales. El trabajo de campo y la prospección también permitieron observar aquellas situaciones comunes, como la sustitución de sistemas tradicionales por sistemas modernos y soluciones constructivas idénticas pese a las diferencias geográficas y socio-culturales. Un aspecto muy llamativo del análisis es la notable preservación de la arquitectura vernácula de SPE. El hecho de que la comunidad y el municipio conserven el sistema indígena de usos y costumbres



podría tener una correlación directa con la permanencia de las tradiciones y la poca permeabilidad a los cambios impuestos por la estructura social.

Adicionalmente, todo el trabajo y la recolección de datos fueron esenciales para la escritura del tercer y cuarto capítulos de la tesis, en los que se genera una discusión de los resultados tras procesar la información de las fichas y las muestras materiales en el laboratorio. Este es un indicativo de la relevancia del planteamiento de las actividades, ya que el correcto desarrollo de la investigación permitió un análisis de los datos que arrojó resultados relevantes en campos muy distintos.

Por otro lado, el trabajo de campo permitió a todos los miembros del equipo familiarizarnos con esta arquitectura de tierra y entenderla sensorialmente, ya que el habitar estos espacios proporciona un conocimiento que no puede ser adquirido por otros medios. Este hecho fue clave para poder escribir el presente capítulo a partir de las experiencias vividas en los levantamientos de viviendas de los distintos casos de estudio además del resto de localidades que se visitaron por parte del proyecto DBMC 2020 y la grabación del documental *Xirangua*. Además, este acercamiento más humano al fenómeno de la arquitectura vernácula fue clave al poder convivir con los usuarios y comprender su percepción y apropiación de los inmuebles (ver Figura 2.72).



Figura 2.72. Experiencias en el trabajo de campo con los usuarios de las viviendas tradicionales.
Fotografías: (M. A. Pérez-Coeto, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).

Las encuestas realizadas a los estudiantes de licenciaturas relacionadas directamente o con afinidad al ámbito de la construcción evidencian por un lado la incultura y desconocimiento de las técnicas y materiales tradicionales, y por el otro la falta de iniciativas e interés en las



escuelas y facultades, que prácticamente no incluyen en los programas una formación específica en estos temas. Muchas de las respuestas obtenidas a la pregunta de si conocían estos sistemas fueron satisfactorias respecto al hecho de que con estas iniciativas se está generando una concienciación entre los más jóvenes e impactando positivamente. Algunas respuestas obtenidas fueron: “No lo sabía pero después de la exposición del maestro pues ya sé que sí”, “Antes de esta presentación desconocía, ahora sé que las hay.”, “Si, bueno apenas me acabo de dar cuenta”, “A demás de esta clase de optativa no!”.

Además de generar una gran satisfacción personal, estas respuestas nos demuestran que las actividades de formación suponen una de las herramientas más poderosas con las que contamos para garantizar la preservación y conservación de este patrimonio (ver Figura 2.73). En otro orden de cosas, las encuestas y entrevistas orales ayudaron a aplicar herramientas de análisis cualitativo en una investigación que en principio tenía un carácter cuantitativo y técnico muy marcado, al basarse en el estudio de los materiales. Mediante este acercamiento mixto se cree que la discusión de los resultados es mucho más fructífera, aportando distintos puntos de vista a una problemática (la desaparición de la vivienda de adobe y los materiales tradicionales) que todos los actores implicados quieren revertir.



Figura 2.73. Actividades de formación generadas en los proyectos con estudiantes de licenciatura: (a) Conferencia sobre construcción con tierra; (b) Taller Test Carazas en el laboratorio de mecánica de suelos. Fotografías: (M. A. Navarrete-Seras, A. Solís-Sánchez, 2021).

Finalmente, es necesario indicar que a partir de la gestión de los proyectos presentados y el trabajo de campo se ha podido generar una vinculación actualmente latente con otras instituciones, que ya ha dado sus frutos en otras actividades de cooperación al desarrollo. En



las conclusiones generales del documento se presentan estos alcances, así como las futuras líneas de actuación a tratar, pero nada de ello habría sido posible sin las primeras campañas que se realizaron en las fases más tempranas, donde reside el valor y la justificación de la investigación.

Precisamente una de las futuras líneas de investigación pasa por la catalogación de la arquitectura vernácula de Michoacán, tomando en cuenta todas las tipologías existentes además de la vivienda de adobe. Por ello, resta comentar la importancia que ha tenido el proyecto documental *Xirangua* en la divulgación de los resultados de la investigación y la concienciación con el patrimonio vernáculo de Michoacán. Este tipo de dinámicas pueden ser mucho más atractivas para el público general, por lo que la producción científica debería explorar los nuevos modos de difusión y adaptarse a los medios actuales.

**CAPÍTULO III. EVALUACIÓN
DE LA VULNERABILIDAD
SÍSMICA DE LA VIVIENDA
DE ADOBE MEXICANA.
ESTUDIO Y APLICACIÓN DE
DIFERENTES MÉTODOS**



SUBÍNDICE DEL CAPÍTULO





Earthquake engineering is about the protection of life, property and livelihoods from the destructive power of earthquakes, and it concerns every type of action that, as engineers, we take to achieve those aims, whether in the design of new buildings or civil engineering structures, or in the modification of existing ones, or in setting up the human systems needed to create a society safe from earthquakes.

Robin Spence

INTRODUCCIÓN

Cuando hablamos del factor de riesgo en función de la vulnerabilidad, hablamos de las potenciales pérdidas y de la destrucción que puede ocasionar un fenómeno concreto, que en el caso de esta investigación son los sismos. Estos eventos son destructivos para el patrimonio construido, razón por la cual la sociedad actual ha creado y desarrollado herramientas que permitan minimizar los eventuales efectos y daños, siendo un claro ejemplo de este supuesto los Métodos de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica (MEVS⁹¹).

Bajo esta tesitura de las potenciales pérdidas y la responsabilidad social⁹², Spence (2007), en la cita que da pie a este capítulo, proclama que el mayor propósito de la ingeniería sísmica es salvaguardar las vidas humanas y sus creaciones, siendo las viviendas las principales

⁹¹ El acrónimo empleado resulta de la libre traducción de los términos “Seismic Vulnerability Assessment (SVA)” Methods or Methodologies, ampliamente usados en la literatura específica. El empleo del término método y no metodología responde a la definición básica de los mismos, considerando el primero como aquella herramienta, procedimiento o técnica llevado a cabo para completar la investigación.

⁹² La responsabilidad social, RS y sus derivados, RSE, RSO o RSU “es la responsabilidad por los impactos sociales o ambientales de las decisiones o acciones de las organizaciones” **Fuente especificada no válida.** La construcción del término a partir de los años 60 ha dado lugar a múltiples teorías y concepciones, con el fin último del desarrollo sostenible.



materializaciones de la adaptación al medio habitado, en ocasiones hostil y resiliente al cambio.

En un país como México, del que es conocida su alta actividad telúrica y que en las últimas décadas ha sufrido eventos catastróficos para su patrimonio construido (ver Figura 3.1), la necesidad de contar con herramientas de análisis y mitigación del riesgo sísmico es fundamental. Partiendo de la regionalización sísmica del territorio,⁹³ es posible comprender el impacto y afectación que históricamente han sufrido los estados del centro y el sur-occidente del país tras los sismos de mayor intensidad.



Figura 3.1. Destrucción de la Iglesia de San Miguel Arcángel en Jojutla de Juárez, Michoacán, México. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).

Formisano et al. (2015) destacan la dificultad de evaluar la vulnerabilidad sísmica de las construcciones históricas, debido a la edificación de las mismas sin códigos o reglamentos anti-sísmicos lo cual es lógico por su antigüedad. Además, las particularidades y complejidad de estos inmuebles, aunado a su valor patrimonial, histórico y cultural configuran una empresa ambiciosa pero necesaria para la conservación del patrimonio, en la que deben

⁹³ Ver apartado 3.1.1. para la explicación detallada de la regionalización sísmica de México.



tomarse en cuenta múltiples aspectos además de los puramente estructurales⁹⁴ (Tassios, 2009).

Los datos contrastados de daños en este tipo de edificaciones a partir de eventos sísmicos significativos son abundantes, con una identificación muy clara de las afectaciones a monumentos históricos, y una desatención del llamado ‘patrimonio menor’ que conforma la vivienda vernácula y tradicional. Encontramos un claro ejemplo en el estado de Morelos, con las evaluaciones íntegras de los daños en los templos (Díaz Fuentes et al., 2019)⁹⁵, que concentran una gran cantidad de recursos y esfuerzos para su restauración, y también un mayor interés de la academia y los trabajos científicos.

Mientras que las viviendas de adobe experimentaron efectos muy dispares, como algunas investigaciones han podido reportar, desde el colapso mayoritario de las edificaciones (Sánchez Calvillo et al., 2021), a la excelente respuesta de los ejemplos menos alterados de la arquitectura de tierra (Guerrero Baca L. F., 2019). Esta polaridad precisamente hace pensar en la variabilidad del comportamiento de estas tipologías constructivas en función de sus características y las alteraciones en los materiales y sistemas empleados.

No obstante, pese a la conocida vulnerabilidad de estas edificaciones y su citado valor patrimonial y social, resulta sorprendente que el *Manual de diseño por sismo* de la Comisión Federal de Electricidad (CFE)⁹⁶ no cuente con ninguna referencia a los sistemas estructurales de mampostería de adobe, siendo estos soluciones constructivas con gran presencia en el país. Ante estas lagunas normativas, aunadas al fenómeno de la autoconstrucción, resulta

⁹⁴ Al evaluar o intervenir estructuralmente monumentos, Tassios (2009) indica tres factores clave: los valores monumentales, los valores sociales y los valores técnicos. Los dos primeros son inherentes a las obras patrimoniales y deben ser tomados en cuenta en medida del nivel de protección y los reglamentos aplicables en cada caso.

⁹⁵ El conjunto de construcciones de los Primeros monasterios del siglo XVI en las faldas del Popocatepetl está incluido en la lista de Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO desde el 1994. Su inclusión en esta lista propició el conjunto de esfuerzos para la evaluación, diagnosis e intervención de las edificaciones afectadas tras el terremoto de Puebla de 2017.

⁹⁶ El *Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo* (2008) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) constituye una de las principales referencias para el diseño anti-sísmico de edificaciones en México. No obstante, los espectros de diseño estructuras de edificios a modo general incluyen sistemas de mampostería confinada y mampostería sin confinar, obviando tipologías constructivas tradicionales y sus características singulares.



obligatorio un análisis pormenorizado de estas edificaciones, tanto en la caracterización material del sistema constructivo, como en el comportamiento sísmico del mismo.

Partiendo de las problemáticas expresadas, cuatro localidades (presentadas en el Capítulo II) fueron inspeccionadas y recorridas a partir del trabajo de campo de dos proyectos de investigación y cooperación al desarrollo⁹⁷, obteniendo los datos necesarios durante la prospección, para asignar clases de vulnerabilidad a los distintos parámetros contemplados por los MEVS. Respecto a estos métodos, fueron escogidos cinco distintos para su aplicación, justificando su selección en el apartado 3.2.3 del capítulo, resultado en las elecciones del método GNDT, el método propuesto por Antonio Formisano, el método propuesto por Romeu Vicente, SVIVA y SAVVAS.

El análisis de la vulnerabilidad sísmica de las cuatro localidades estudiadas (SPE: San Pablo Etla, en Oaxaca; CO: Copainalá, en Chiapas; AR: Ario de Rosales, en Michoacán; y SC: Santa Cruz de Morelos, en Michoacán⁹⁸) supone una de las primeras experimentaciones de aplicación de MEVS para una tipología constructiva tan singular como es la vivienda de adobe en México. Algunos trabajos, como el de Brando *et. al.* (2019) en la ciudad de Cusco, íntegramente edificada con sistemas constructivos a base de tierra, constituyen los antecedentes de investigación más completos y minuciosos para este capítulo. Podemos encontrar acercamientos previos en la aplicación de MEVS a viviendas de adobe (Sáez, 1999), sin embargo, las particularidades de estas tipologías constructivas no son contempladas en el análisis. Estas investigaciones concluyen que es necesario seguir calibrando y adaptando estos métodos, por ello, herramientas como SVIVA y SAVVAS, concebidas para la vivienda vernácula, constituyen un apoyo invaluable para el estudio y conservación de la arquitectura de tierra.

⁹⁷ Ver Capítulo 2.3. para mejor definición de los objetivos, actividades y alcances de los dos proyectos. Los datos se obtuvieron a partir del proyecto de investigación “Levantamiento y catalogación de vivienda vernácula” y el proyecto de cooperación al desarrollo “Durability of local materials and traditional techniques of the Mexican vernacular architecture in the State of Michoacan”.

⁹⁸ Las características arquitectónicas y formales de los cuatro casos de estudio son analizadas en el capítulo 2.3. Caracterización tecnológico-constructiva de las unidades de estudio, permitiendo correlacionar este análisis con la clasificación de los parámetros de vulnerabilidad sísmica.



El presente capítulo se estructura en una primera presentación y discusión de la vulnerabilidad y el riesgo sísmicos, aterrizándolos en el campo de la arquitectura de tierra a partir de la revisión y estado del arte de esta línea de investigación, que adolece de profundidad debido al escaso interés que ha recibido este sistema constructivo hasta hace relativamente poco, viendo hoy una mayor cantidad de esfuerzos y proyectos para regenerar y preservar estos sistemas constructivos.

Posteriormente, se introducen los métodos de evaluación y análisis de la vulnerabilidad sísmica (MEVS), con un énfasis en los casos de estudio en Latinoamérica y México, y cómo estos han sido aplicados y/o calibrados a nivel local y cuáles son los principales retos en las regiones de mayor actividad sísmica. Adicionalmente se presentan los cinco MEVS aplicados en esta investigación y la fundamentación de su elección para el estudio específico de la vivienda de adobe.

En el tercer subcapítulo se detallan y analizan los distintos parámetros de vulnerabilidad sísmica identificados a partir de los métodos empleados. En relación con el Capítulo II y la caracterización tecnológica-constructiva de las unidades de estudio, se comparan las clases atribuidas por los distintos MEVS y la influencia de los sistemas constructivos tradicionales y sus características propias en el fenómeno de la vulnerabilidad sísmica, y cómo esta tradición y cultura constructiva de la vivienda de adobe resulta un factor clave en la mitigación de riesgos.

Por último, se realizó un análisis de la vulnerabilidad sísmica en los cuatro casos de estudio de la investigación mediante los cinco distintos MEVS, generando índices de vulnerabilidad y daño para cada localidad. Estos análisis permiten obtener las curvas de fragilidad de cada localidad y la estimación de daños y pérdidas en función de intensidades sísmicas y aceleraciones del terreno, con el objetivo de generar una mejor comprensión de la respuesta sísmica de las viviendas de adobe en términos estadísticos. Su aplicación a gran escala permite entender su potencial para decidir estrategias de mitigación de riesgos y planes de prevención.



3.1. VULNERABILIDAD SÍSMICA Y RIESGOS

Cuando tratamos el concepto de la vulnerabilidad sísmica es muy importante entender que el término va de la mano del riesgo sísmico, siendo ambos factores de una misma operación matemática. Generalmente el riesgo (R) puede ser expresado como el producto de una ecuación multifactorial en la que aparecen otros términos: la vulnerabilidad (V), la peligrosidad o el peligro (H^{99}), y la exposición (E). Esta definición se puede expresar mediante la Ecuación X, en la que se observa la relación entre los distintos factores.

$$Riesgo = (Peligro \times Vulnerabilidad) \times Exposición \quad (Ec. 3.1)$$

La vulnerabilidad sísmica es la predisposición intrínseca de un elemento a sufrir daños por un evento determinado (Vicente et al., 2011), en este caso un terremoto. Y el riesgo, en consecuencia, constituye una función probabilística que los actores implicados siempre buscan reducir al mínimo posible: “La gestión del riesgo abarca el análisis y la evaluación para controlar, reducir y transferir estrategias para reacciones específicas” (Flores Salazar & Ferreira, 2019).

Otra definición del riesgo sísmico es el potencial recuento de daños que podrían darse en un área y un periodo de tiempo delimitados (Zuccaro et al., 2021), que se puede traducir al escenario que encontramos para un caso de estudio y una vez más su posible reducción con estrategias de mitigación de los daños.

A nivel teórico, varios autores apuntan que realmente el grado de vulnerabilidad ante los sucesos naturales es un fenómeno socialmente construido (Cottom, 2018), al ser fenómenos inherentes al territorio ocupado por nuestros asentamientos¹⁰⁰. Esta visión resulta muy interesante desde la perspectiva antropológica y cultural de los enclavamientos humanos y desde la perspectiva geográfica por la transformación del territorio; sin embargo, el fenómeno de la urbanización y el poblamiento es inevitable por lo que este enfoque carece de utilidad práctica cuando los esfuerzos de nuestra sociedad pasan por determinar y reducir los

⁹⁹ Traducción del inglés hazard o en su defecto seismic hazard.

¹⁰⁰ Como se apuntó anteriormente la vulnerabilidad es una predisposición intrínseca del elemento



potenciales daños provocados por los sismos. Además, los terremotos constituyen el desastre natural que provoca más pérdidas humanas (Kassem et al., 2020).

Por ello, también es especialmente significativo y relevante el acercamiento humano a estas problemáticas y las pérdidas que conllevan los eventos sísmicos. Partiendo de la visión de Spence (2007) de la salvaguarda de vidas humanas como principal dogma, es importante generar propuestas holísticas que involucren a las comunidades en riesgo, incluyendo actividades de diseminación y capacitación en la arquitectura de tierra, e incorporando elementos sismo-resistentes que aseguren la estabilidad y seguridad de las edificaciones (Blondet y otros, 2008). En el mismo sentido, cada vez se valora más la introducción de un proceso participativo, en el que las familias participen en la toma de decisiones a la vez que se genera una transferencia tecnológica de los saberes tradicionales (Olaya-García y otros, Soluciones de tierra en la Vivoteca: una plataforma de selección, divulgación y transferencia ecotecnológica, 2022).

3.1.1. Riesgo sísmico en México y su afectación al patrimonio cultural

México es uno de los países reconocidos internacionalmente por su peligrosidad sísmica al haber sufrido varios eventos destructivos que quedaron en el imaginario colectivo por su grave afectación social y económica¹⁰¹. El encuadre del país entre cinco distintas placas tectónicas: Norteamérica, Pacífico, Caribe, Rivera y Cocos, genera una alta actividad sísmica en varias regiones, que son propensas a sufrir movimientos telúricos y experimentar graves pérdidas.

La CFE, en su citado Manual de Construcción de Obras Civiles. Diseño por sismo, establece una zonificación o regionalización de la vulnerabilidad sísmica del país (ver Figura 3.2), que hasta hoy es utilizada en múltiples cometidos. Debido a la geografía y a la tectónica del territorio encontramos una intensa actividad sísmica en la costa pacífica del país y la península de Baja California con varios estados sufriendo frecuentemente eventos de magnitudes elevadas.

¹⁰¹ Revisar Capítulo I para ver la repercusión de eventos de gran magnitud como el terremoto de México de 1985 o los terremotos de septiembre de 2017.



Figura 3.2. Regionalización sísmica de la República Mexicana. Fuente: Atlas Nacional de Riesgos.

Verificando las condiciones a las que se encuentra expuesto el país, como es lógico las consecuencias de estos fenómenos naturales son devastadoras para los núcleos de población, dejando imágenes impactantes de la destrucción a su paso (ver Figura 3.3).



Figura 3.3. Ayuntamiento de Jojutla de Juárez, Morelos, México. Fotografía: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).



Todas estas experiencias de pérdida, como las mostradas en JJ o más recientemente en Michoacán, han generado un conjunto de normativas y reglamentos antisísmicos para la república, sin embargo, uno de los principales problemas es el siguiente:

Aunque cada municipio es responsable de emitir estos reglamentos, los municipios no cuentan con los propios, por lo que generalmente se utilizan los emitidos para la Ciudad de México o el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Sin embargo, la aplicación de dichas normas o manuales rara vez se establece como obligatoria, lo que crea un vacío legal en buena parte del país. (Pérez-Gavilán et al., 2018)

Este vacío fue reportado precisamente en la localidad de Jojutla de Juárez, a partir de la vulnerabilidad observada y la revisión de los reglamentos de construcción y planes de riesgo municipales. Pese a esta situación, pueden encontrarse algunas iniciativas para concienciar a la población general, por ejemplo, el CENAPRED¹⁰² publicó un manual titulado *Evaluación Simplificada de la Vulnerabilidad Sísmica de Viviendas*, orientado especialmente al público general y a las personas no expertas o no cualificadas. En este documento se tratan de una forma muy accesible aquellos aspectos geométricos, constructivos y estructurales de las viviendas que tienen un peso crítico en la vulnerabilidad sísmica para que puedan ser identificados con facilidad por los usuarios.

Por otro lado, centrando el efecto de los sismos en el patrimonio arquitectónico y cultural de México, los daños producidos por estos eventos son también notables, con el acento en que las pérdidas de ciertos monumentos toman un carácter más grave al ser símbolos de la sociedad. Varios eventos han destacado por ser especialmente destructivos con el patrimonio arquitectónico, como el Terremoto de Puebla de 1999 o el más reciente Terremoto de Puebla de 2017, que generó graves daños en un Patrimonio de la Humanidad como los conventos del Siglo XVI en el estado de Morelos (Díaz Fuentes et al., 2019).

Campos Goenaga (2018) ejemplifica claramente qué supone para una sociedad la pérdida y destrucción de estos monumentos: “Patrimonio cultural también son aquellas manifestaciones y elementos culturales que identifican a una sociedad y que genera una identidad compartida por todos sus miembros. Genera identidad y genera comunidad”. Sin embargo, este patrimonio cultural no siempre está relacionado con las construcciones

¹⁰² Centro Nacional de Prevención de Desastres de México.



monumentales, sino que las manifestaciones de las que nos habla Campos Goenaga están presentes en muchos otros modelos.

Precisamente las viviendas de tierra son una clase más de patrimonio cultural, aunque en muchos casos no sean reconocidas ni por las instituciones ni por la sociedad. Como se discutió en los Capítulos I y II, varios autores emplean el término patrimonio menor para referenciar y reivindicar estas construcciones, que en la mayoría de casos se encuentran desprotegidas. Por este mismo motivo la afectación sísmica es todavía más pronunciada ya que estas edificaciones se perciben como inseguras, poco resistentes y características de las clases socio-económicas más bajas (Sánchez Calvillo et al., 2021).

3.1.2. La vulnerabilidad sísmica de la arquitectura de tierra y la vivienda de adobe

Son muchas las investigaciones que han reportado y analizado los daños producidos por sismos históricos en conjuntos de vivienda y centros urbanos construidos con adobe, al ser este un sistema constructivo tan extendido a lo largo del planeta. La concepción más generalizada del adobe es que este es un material endeble y poco seguro y los eventos sísmicos contribuyen a incrementar este pensamiento en los usuarios y las comunidades afectadas (Blondet et al., 2011).

Un claro ejemplo de esta escasa consideración la encontramos en la EMS-98¹⁰³, que se basa en la clasificación de las tipologías constructivas de los edificios y la asignación de clases de vulnerabilidad [A-E] a cada una de ellas (Grünthal, 1998). Las construcciones de adobe constituyen la clase más vulnerable, A, sin tomar en cuenta que muchas de estas construcciones, independientemente de los sistemas constructivos o el material predominante, históricamente han presentado un excelente comportamiento en aquellas regiones de mayor exposición a eventos sísmicos (Correia et al., 2015).

Profundizando en este aspecto, esta clasificación general no toma en cuenta aspectos de la arquitectura vernácula que son herencia de las culturas sísmicas, un concepto ya distendido en el anterior capítulo del documento. Por otro lado, encontramos iniciativas como el

¹⁰³ La Escala Macrosísmica Europea, EMS-98 (del inglés European Macroseismic Scale) es la base para la evaluación de la intensidad sísmica en los países europeos y, además, en uso en la mayoría de los otros continentes.



proyecto Seismic-V, que han inquirido en la identificación de estas estrategias sismo-resistentes de la arquitectura vernácula y sus elementos de adaptación para reforzar las construcciones actuales (Correia et al., 2013).

Respecto al comportamiento estructural de las viviendas de adobe, el mecanismo de fallo más común producido por esfuerzos dinámicos laterales es el colapso fuera de plano¹⁰⁴ de los muros. Las principales causas de este fallo son la pobre conexión de los muros con los sistemas de cubierta y la insuficiente trabazón en los encuentros ortogonales entre los muros portantes¹⁰⁵ (Sumerente et al., 2020). Debido a los sistemas de diafragma horizontal y cubierta que presentan estas viviendas, que no rigidizan completamente la estructura, ante los esfuerzos sísmicos los muros tienden a actuar como elementos independientes (Ortega Heras, 2018). Los daños ocasionados en las edificaciones suelen reflejarse en agrietamientos verticales, llegando al colapso de secciones de muros o sistemas completos (ver Figura 3.4).



Figura 3.4. Daños producidos en viviendas de adobe tras el terremoto de Chiapas de 2017 (a) Grieta en muro de vivienda de San Andrés Hueyapan, Oaxaca; (b) Colapso de muro en Jiquipilas, Chiapas. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

¹⁰⁴ Traducción del inglés “out-of-plane failure mechanism” o “out-of-plane wall collapse” siendo los términos más comunes en la literatura.

¹⁰⁵ El término cadena de ángulo define los refuerzos que encontramos en las esquinas de los edificios históricos de mampostería.



Sin embargo, no debe obviarse que estas viviendas son realmente vulnerables a los terremotos debido a las bajas resistencias mecánicas que presentan los bloques de adobe ante los esfuerzos de tracción y su comportamiento y mecanismo de fractura frágil (Blondet et al., 2011). No obstante, el material solamente es un factor dentro de la vulnerabilidad, por lo que las edificaciones vernáculas cuentan con un conjunto de estrategias y soluciones constructivas para asegurar una mejor respuesta sísmica (Ortega et al., 2015).

En cuanto a antecedentes directos de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de tierra y trabajos análogos, encontramos la investigación de Sunkar y Aksoy (2015), que analizó los daños producidos por el terremoto de Elazığ de 2010 en Turquía en las viviendas tradicionales de la región¹⁰⁶, mayormente construidas con mamposterías de roca y adobe. Los autores también determinaron la resistencia mecánica de los bloques de adobe de las edificaciones afectadas¹⁰⁷, con la dificultad de trabajar con un material no solamente heterogéneo y complejo, sino alterado por los sismos. Precisamente este es otro de los principales obstáculos para el análisis de estas construcciones es la dificultad en evaluar los valores de resistencia mecánica, que pese a los más recientes esfuerzos derivados de la caracterización (Abhilash et al., 2022), no ofrecen un grado de precisión comparable al de los materiales industrializados (Tassios, 2009).

En Latinoamérica encontramos múltiples ejemplos de investigaciones que tratan la afectación sísmica en viviendas de tierra como el municipio de La Paz en Nicaragua (Galán Gaitán & Jiménez Miranda, 2018), o las consecuencias de los sismos de septiembre de 2017 en México (Peña & Chavez, 2021). Como antecedente directo y parte de la presente investigación, se realizó una prospección *in situ* en la localidad de Jojutla de Juárez (ver Figura 3.5), gravemente afectada por el terremoto de Puebla de 2017 en el que se reportó una considerable afectación en las viviendas del centro histórico de la localidad construidas con

¹⁰⁶ El sismo producido el 8 de marzo de 2010, de magnitud 6.1 M_w , intensidad VII en la MMI, y con epicentro en la provincia de Elazığ reportó grandes daños en la región, siendo un evento catastrófico para las localidades afectadas en las que las viviendas tradicionales sufrieron grandes daños y colapsos.

¹⁰⁷ Metodología también replicada en el artículo del autor “Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017” (Sánchez Calvillo et al., Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017, 2021).



adobe (Sánchez Calvillo et al., Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017, 2021). Del mismo modo que en las investigaciones de Sunkar y Aksoy se determinaron las composiciones y las resistencias mecánicas de los bloques de adobe mediante distintos ensayos (Sanchez-Calvillo et al., 2021).



Figura 3.5. Estructuras de adobe afectadas en Jojutla de Juárez. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).



3.2.MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

Los métodos para evaluación de vulnerabilidad sísmica cuentan con un largo recorrido en el estudio de estructuras históricas y construcciones patrimoniales. La importancia de estos métodos reside no únicamente en la predicción de daños y costes humanos y económicos de un evento sísmico, sino en la prevención y mitigación de riesgos (Calvi et al., 2006). En las últimas décadas se ha logrado un destacado avance en el ámbito de la ingeniería sísmica, con una formidable cantidad de iniciativas, proyectos de investigación, un crecimiento notable de la literatura y el conocimiento especializados y la creación de herramientas de evaluación muy útiles como los MEVS.

Gran parte del interés por comprender mejor la afectación sísmica en los núcleos urbanos se debe a las enormes pérdidas económicas y humanas que implica un evento de gran destrucción. Al centrarnos en asentamientos urbanos o ciudades la vulnerabilidad sísmica aumenta exponencialmente debido a los fenómenos de crecimiento de las ciudades (Formisano et al., 2021), por ello, las estrategias tanto de evaluación de riesgo sísmico como las acciones de mitigación han cobrado especial importancia en las últimas décadas.

Los costos de reconstrucción y reparación de las edificaciones suponen una cuota importante del producto nacional bruto de aquellos países propensos a sufrir terremotos devastadores (Calvi et al., 2006), por lo que cada vez es más necesario contar con instrumentos que permitan la planeación urbana y la gestión y mitigación de los riesgos naturales. Este es el motivo por el cual muchos de los métodos tratados en el capítulo cuentan con herramientas para la estimación de probabilidades de colapso y daños severos de las estructuras.

3.2.1. Historia y clases de métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica

En los últimos años se ha desarrollado una gran cantidad de métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica y estimar los daños colaterales de los terremotos. Vicente *et. al.* (2011) señalan que los primeros intentos por caracterizar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones iniciaron en la década de los 80's, tanto en las regiones con mayor sismicidad de Europa (Italia, Bulgaria, Rumanía, Grecia); mientras que Calvi et al. (2006) citan los esfuerzos iniciales con métodos empíricos en los 70's con las primeras matrices de



probabilidad de daño (Whitman et al., 1973). Sin embargo, siempre se suele señalar a la GNDT como la organización pionera en establecer un modelo claro y preciso para la aplicación en un entorno urbano.

La mayoría de autores coinciden en la clasificación de los MEVS en una clasificación general con tres grandes grupos: los métodos empíricos, los métodos analíticos y los métodos híbridos (Calvi et al., 2006); (Shabani et al., 2021). No obstante, Kassem *et. al.* (2020) hacen una revisión de las metodologías¹⁰⁸ existentes, con una división más simple entre métodos empíricos y métodos analíticos. Por otro lado, Flores Salazar (2019) presenta una clasificación de los métodos de estudio distinguiendo cuatro grandes grupos: métodos directos, métodos indirectos, métodos convencionales y métodos híbridos (ver Figura 3.6).

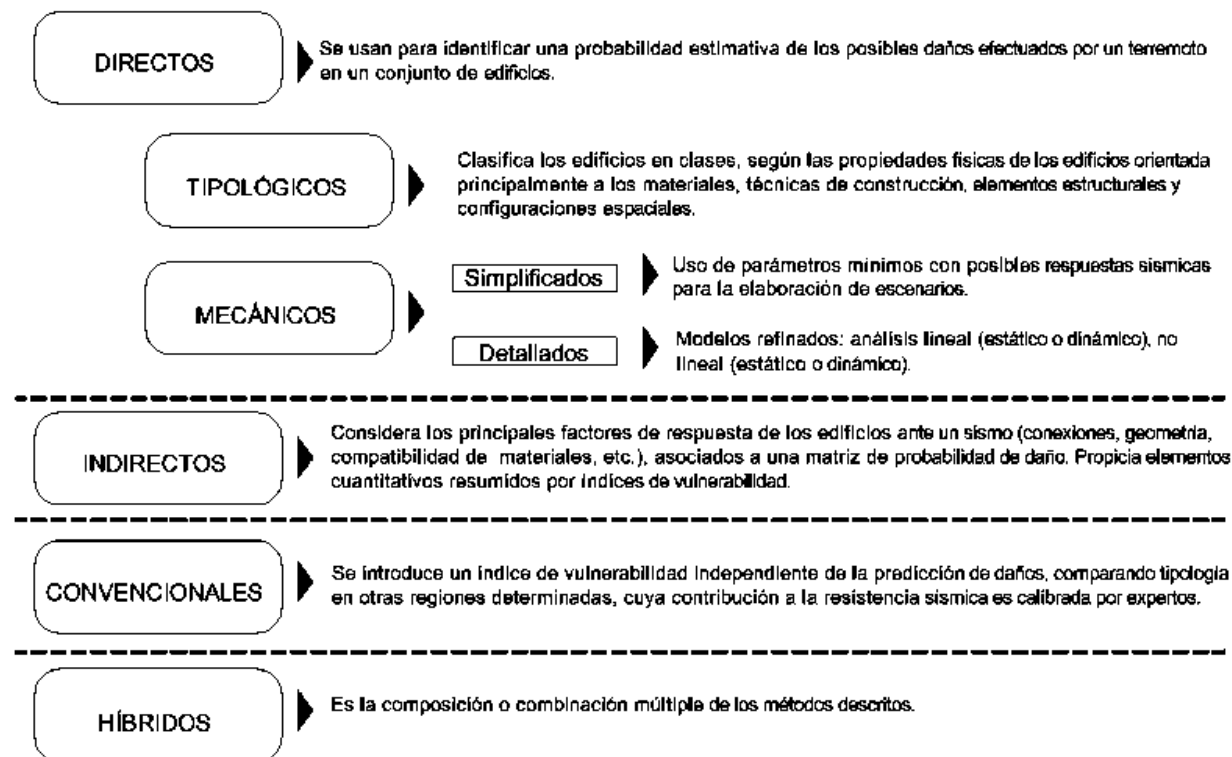


Figura 3.6. Resumen de métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica (Flores Salazar & Ferreira, 2019)

¹⁰⁸ Kassem et al. (2020) emplean el término de metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en el estado de arte presentado; sin embargo, al clasificar las MVS distinguen entre métodos empíricos y analíticos, usando los dos términos como sinónimos.



Con base en la primera clasificación, los métodos empíricos o indirectos están relacionados con los parámetros de respuesta de las edificaciones y están basados en la observación y la información cualitativa y cuantitativa obtenida tras eventos reales, sintetizando los resultados generalmente en un índice de vulnerabilidad. Los métodos analíticos, o también denominados teóricos, se basan en la simulación y el modelado de edificios o componentes para predecir el comportamiento y los daños en función de la aceleración sísmica. Por último, los métodos híbridos, como su nombre indica son una combinación de los otros dos.

También encontramos otra categoría, los métodos de inspección rápida, generalmente efectuados en campo y tras un evento catastrófico, son considerados mayormente inexactos e insuficientes (Kassem et al., 2020), debido a la subjetividad de la observación directa y a las limitaciones. Un ejemplo muy claro es el caso de Jojutla, en el que la información obtenida por los daños producidos en los inmuebles y los mecanismos de colapso de las estructuras fue enorme; pero el impedimento de acceso a algunas construcciones por cuestiones de seguridad o la imposibilidad de recabar ciertos datos por la destrucción dificultaron cualquier tipo de análisis cuantitativo.

Dentro de los métodos empíricos encontramos dos acercamientos principales: los basados en matrices de probabilidad de daño y los basados en índices de vulnerabilidad. Los métodos de índice de vulnerabilidad cuentan con un acercamiento mucho más preciso a la vivienda o unidad de estudio, permitiendo un mayor nivel de detalle individual y por este motivo son más usados. Sin embargo, los métodos empíricos en general también presentan desventajas, una de ellas es que únicamente pueden ser aplicados en aquellas regiones y casos de estudio de un marcado carácter sísmico, por lo que quedan restringidos en muchas ocasiones. Por otro lado, el nivel de precisión que implican no puede conseguirse con los métodos analíticos, que dependen en gran medida del modelo base.

Además del método específico de aplicación, es importante establecer la escala del caso de estudio, puesto que puede estudiarse desde un inmueble o monumento singular, hasta la gestión de riesgos a nivel regional o nacional. Por ejemplo, el método propuesto por Vicente (2008) considera índices de vulnerabilidad para inmuebles, para la fachada de los mismos como elemento particular, o para agregados estructurales. Una clasificación simplificada de la escala es la enunciada por Shabani et al. (2021): gran escala, a nivel de ciudades y



asentamientos; el nivel intermedio, que comprende pequeños conjuntos de inmuebles; y la escala a nivel de edificio singular. El nivel de gran escala comporta una inspección rigurosa de los inmuebles y una obtención de gran cantidad de información cuantitativa y cualitativa de cada construcción, por lo que se suelen realizar campañas de trabajo de campo para realizar estas labores.

Para los casos de estudio de la presente investigación se empleó un acercamiento de primer nivel a los casos de estudio, comportando la obtención de información detallada para cada vivienda y la identificación de las unidades más vulnerables. Los métodos de índice de vulnerabilidad suelen contar con este nivel de aproximación, siendo la toma de datos una actividad fundamental, motivo por el cual son necesarias las fichas técnicas o fichas de datos, como la diseñada para las campañas de campo de esta investigación¹⁰⁹.

Entrando en el terreno de los métodos híbridos, algunas de las más recientes investigaciones han aplicado las tecnologías GIS a los estudios de vulnerabilidad sísmica, resultando en trabajos interdisciplinarios encarecidamente innovadores. Los sistemas de información geográfica, abreviados como SIG o GIS por sus siglas en inglés, son “sistemas computacionales que permiten recolectar, almacenar, analizar y reproducir información georeferenciada” (Zhai et al., 2019). El uso de estos sistemas cada vez es más común en todo tipo de investigaciones y respecto a la línea de investigación que nos atañe podemos encontrar antecedentes sumamente interesantes (Misosevic Ilic et al., 2020; Rimal et al., 2017; F. Salazar & Ferreira, 2020; Zhai et al., 2019).

3.2.2. Aplicación y desarrollo de MEVS en América Latina y casos de estudio análogos

Siendo los primeros y principales métodos desarrollados en Italia y Europa, los estudios de vulnerabilidad desarrollados en Latinoamérica han sido aplicaciones o adaptaciones de los primeros. Como ejemplos de aplicación directa de MEVS para estas tipologías encontramos la tesis de Sáez (1999), con el análisis de viviendas de adobe en Chile mediante el método GNDT¹¹⁰, y la posterior calibración del mismo para las edificaciones locales (Gent et al.,

¹⁰⁹ Revisar Capítulo 2.2.2. Recolecta de datos, prospección y criterios de inspección de las viviendas.

¹¹⁰ Ver apartado 3.2.3. para la explicación y formulación del método GNDT.



2005). La citada calibración se realizó para los edificios de albañilería confinada, pero estas investigaciones resultan los primeros esfuerzos para adaptar los métodos a los sistemas constructivos y estructurales en Latinoamérica; igualmente, podemos encontrar en el trabajo de Sáez un interés por evaluar la vulnerabilidad sísmica de la arquitectura de tierra que no ha sido retomado hasta muchos años más tarde.

Respecto al estudio de la vulnerabilidad sísmica de la arquitectura de tierra, a nivel latinoamericano, Yamín et al. (2007) realizaron estudios de vulnerabilidad sísmica en Colombia bajo proyectos de la Universidad de los Andes, principalmente enfocados a las viviendas de adobe y tapia pisada, dos de las tipologías más comunes de construcción en tierra en el continente. Establecieron un conjunto de factores influyentes de la vulnerabilidad sísmica, incluyendo los siguientes elementos:

Los principales factores que contribuyen a aumentar la vulnerabilidad sísmica de viviendas en adobe y tapia pisada son: irregularidades en planta y en altura, distribución inadecuada de los muros en planta, pérdida de la verticalidad –o plomo– de los muros, problemas de humedad, filtraciones, conexión inadecuada entre muros, pérdida de recubrimiento de muros, uso de materiales no compatibles, entrepisos pesados y ausencia de diafragmas, apoyo y anclaje inadecuado de elementos de entepiso y cubiertas sobre muros, entrepisos muy flexibles, luces muy largas y estructuración de cubierta deficiente (Yamín Lacouture et al., 2007).

Por un lado, en este estudio resulta evidente la coincidencia de los factores con muchos parámetros de vulnerabilidad presentes en los MEVS; aunque por otro lado encontramos por primera vez la exposición de gran parte de las problemáticas actuales en la conservación de la arquitectura vernácula, hechos ampliamente discutidos en los dos primeros capítulos de este documento¹¹¹. Sin embargo, estos factores se listaron como determinantes de la vulnerabilidad sísmica sin llegar a aplicar un método concreto de análisis. La validez de estos estudios reside en su posible aplicación en campo para la evaluación y el dictamen estructural de construcciones en tierra, de un rigor mucho más especializado que el de las edificaciones modernas debido a las situaciones mencionadas.

También en la ciudad de Bucaramanga, en Colombia, se aplicó el modelo GNDT para el estudio de la vulnerabilidad de viviendas de tapia pisada y adobe (Maldonado Rondón & Chio Cho, 2009). Esta investigación es relevante porque define las clases de vulnerabilidad

¹¹¹ Ver apartados 1.2.3. El abandono de las culturas constructivas: tradición y modernidad, y 2.1.2. La desaparición de la arquitectura de tierra en México.



de los parámetros en función de las tipologías arquitectónicas de tierra, creando sus propias directrices para estos sistemas.

Además de aplicar y adaptar métodos provenientes de Europa, en los últimos años se han logrado importantes desarrollos con la creación de modelos propios. El método simplificado para evaluar el riesgo sísmico de estructuras patrimoniales de Díaz Fuentes (2017), fue aplicado en iglesias de mampostería de piedra y de adobe. Éste cuantifica trece parámetros de las edificaciones asignando un peso específico a cada uno. En este caso los parámetros tomados en cuenta son: 1) Posición del edificio y cimentaciones, 2) Configuración planimétrica, 3) Configuración en elevación, 4) Distancia entre muros, 5) Elementos no estructurales, 6) Tipo y organización del sistema resistente, 7) Calidad del sistema resistente, 8) Estructuras horizontales, 9) Cubierta, 10) Estado de conservación, 11) Alteraciones en el entorno, 12) Alteraciones en el sistema constructivo, 13) Vulnerabilidad al fuego.

En el método desarrollado por Brando et. al. (2019) y aplicado en el centro histórico de la ciudad de Cusco, Perú, para la evaluación de su vulnerabilidad sísmica, se tomaron en cuenta los siguientes datos: tipo de edificación, estructura de la planta arquitectónica, relación de esbeltez, posición en la vialidad, topografía, número de niveles, altura, grosor de la fachada, materiales de la estructura principal, materiales de la cimentación, materiales de la fachada, materiales de la estructura de cubierta, materiales en sistema de piso, estado actual de la estructura principal, estado actual de la cimentación, estado actual de la fachada, estado actual de la cubierta, estado actual de piso y forjados, y uso principal del inmueble. Este método, muy completo y basado en modelos italianos, permitió estimar las curvas de fragilidad e índices de vulnerabilidad sísmica, siendo una de las investigaciones más extensas y completas para una ciudad colonial latinoamericana con mayoría de edificaciones de tierra. Además, el estudio es totalmente pertinente para las construcciones de adobe, puesto que la mayoría de los edificios en Cusco cuentan con este sistema constructivo como solución a la vivienda.

A nivel nacional también es posible encontrar investigaciones relevantes de la vulnerabilidad sísmica, como la de Preciado et al. (2020) para la ciudad de Tlajomulco, mediante una adaptación y simplificación del método GNDT a nueve parámetros para el análisis sísmico



de las viviendas, con especial énfasis en las tipologías autoconstruidas y de adobe para trazar las posibles estrategias de refuerzo y mitigación.

En el estado de Chiapas, al sur del país, siendo una de las zonas más sísmicas encontramos varias referencias de interés, debido a que se ha estudiado la vulnerabilidad de las principales ciudades: Tuxtla Gutiérrez y Tapachula mediante el método de índice de vulnerabilidad y las escala macrosísmica europea. Los trabajos de Aguilar Carboney et. al. (2008), Ruiz Sibaja et al. (2016), Vidal et al. (2016), y González Herrera et al. (2020) constituyen una de las puntas de lanza más potentes a nivel nacional en el ámbito de la ingeniería sísmica.

Salazar y Ferreira (2020) evaluaron la vulnerabilidad sísmica del barrio de la Merced en el centro histórico de la Ciudad de México, adaptando el método propuesto por Vicente y generando curvas de vulnerabilidad y fragilidad y la estimación de las pérdidas materiales, humanas y económicas, siendo un antecedente muy importante para la presente investigación. Además, el estudio de la arquitectura del centro histórico es extraordinario, con una muestra de 166 edificios históricos y una clasificación en hasta 36 tipologías de inmuebles en función de los materiales, sistemas constructivos y configuración.

Sin embargo, pese a que ha habido algunos trabajos en México que han efectuado análisis de vulnerabilidad sísmica, incorporando métodos aceptados y validados, e incluso incorporando el uso de GIS; existe un hueco de conocimiento respecto a la arquitectura vernácula y las tipologías constructivas a base de tierra, habiendo muy pocas investigaciones que hayan estudiado el efecto de los sismos en este tipo de construcciones.

3.2.3. Elección de los MEVS para su aplicación a los casos de estudio

La elección de los MEVS es un aspecto crítico en el que deben tomarse en cuenta todos los factores tanto conceptuales como prácticos para su aplicación en campo. Los cinco MEVS elegidos para evaluar los casos de estudio fueron: el modelo GNDT, el método propuesto por Antonio Formisano, el método propuesto por Romeu Vicente, el método SVIVA y el método SAVVAS. El acercamiento de la GNDT permitió el análisis mediante uno de los métodos de referencia a nivel global y que más veces ha sido aplicado y adaptado a todo tipo de construcciones, generando un marco básico para la comparación con el resto de MEVS, puesto que varios de ellos son adaptaciones de este primer modelo.



Respecto al método propuesto por Formisano, que parte del modelo GNDT agregando cinco parámetros nuevos, la elección partió de la posibilidad de pormenorizar en aspectos de escala urbana y evaluar el peso de los conjuntos de agregados en la unidad singular. El rol de la vivienda de adobe en las trazas y centros urbanos de México ha sido fundamental, por lo que estudiar la influencia del colectivo y la homogeneidad o heterogeneidad de los inmuebles respecto a la vulnerabilidad resultó muy atractivo.

El método de Vicente, que también parte del método italiano original, resulta de gran interés porque es una de las propuestas híbridas más completas que combinan el modelo GNDT con el método macrosísmico basado en la EMS-98. Con esta combinación es posible por medio de la inspección de las viviendas estimar en grado de daño medio, las curvas de vulnerabilidad y fragilidad y la estimación de daños de los inmuebles, logrando un análisis mucho más completo de los casos de estudio.

Tanto SVIVA como SAVVAS resultaron totalmente pertinentes debido a haber sido generados para el estudio de la arquitectura vernácula, por lo que constituían desde el inicio unas de las pocas herramientas idóneas para analizar las viviendas de adobe de la investigación, además de agilizar el procesamiento de los datos al emplear los mismos diez parámetros de vulnerabilidad. La diferencia entre los dos MEVS radica en que SVIVA parte de una concepción más tradicional, en la que se siguen los procedimientos clásicos de los métodos de índice de vulnerabilidad para calcular los daños generados en función de la intensidad; mientras que SAVVAS pretende estimar la capacidad sísmica de los edificios en función de factores de carga expresados en función de la aceleración asociados con los estados límite de las construcciones (Ortega J. et al., 2019).

Uno de los principales condicionantes para los métodos de vulnerabilidad es la escala de aplicación, existen grandes diferencias entre los acercamientos de primer nivel a los inmuebles particulares y las herramientas que se emplean para evaluar el riesgo incluso a nivel nacional. En los últimos años muchos trabajos de investigación han buscado una implementación de métodos con un grado de análisis más completo mediante el estudio de “agregados”¹¹² urbanos (Cocco et al., 2019); esta es una opción muy conveniente para la

¹¹² Traducción del inglés *aggregate*, el término para hacer referencia a un conjunto de edificios dentro de la traza urbana, siendo las tipologías representativas de los centros históricos.



arquitectura vernácula, ya que permite la inspección individual de las viviendas además de considerar los aspectos contextuales y la influencia del resto de edificios.

Por el tipo de investigación que se quiso desarrollar, con una base sólida en el análisis de la arquitectura tradicional de tierra y sus características, los métodos aplicados fueron seleccionados para lograr un acercamiento de primer nivel en campañas de trabajo de campo. A continuación, se definen los cinco MEVS empleados y sus características, justificando su uso y exponiendo en términos generales sus parámetros de vulnerabilidad y procedimiento de cálculo.

Método GNDT

El método fue desarrollado por el Grupo Nacional de Defensa contra Terremotos de Italia¹¹³, siendo desarrollado a partir de las investigaciones de Benedetti y Petrini (1984) y Benedetti, Benzoni y Parisi (1988) formulando el primer acercamiento de un MEVS basado en índices de vulnerabilidad (I_v). Desde la publicación en 1993 de las guías metodológicas por parte de la GNDT, el modelo ha sido adaptado en numerosas ocasiones, principalmente en Italia y países centroeuropeos, pero también en otros continentes debido a su reproductibilidad; en Latinoamérica encontramos por ejemplo la calibración citada anteriormente a las edificaciones chilenas (Gent et al., 2005)¹¹⁴.

El método se basa en la obtención y procesamiento de gran cantidad de datos recopilados en campo para evaluar parámetros constructivos de los edificios y obtener un I_v . Pese a que este método suele clasificarse como empírico e indirecto (Calvi et al., 2006) (Kassem et al., 2020), Ortega Heras (2018) considera que puede definirse como híbrido al estar basado en una gran cantidad de datos post-sismo y la evaluación y revisión por parte de expertos para identificar los parámetros de mayor vulnerabilidad.

El acercamiento GNDT nivel II fue el primero en establecer un I_v a partir de la catalogación y ponderación de ciertos parámetros constructivos y estructurales que cuentan con una gran

¹¹³ GNDT son las siglas en italiano de Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, siendo esta una institución dentro del Departamento de Protección Civil pionera en el estudio de la vulnerabilidad sísmica y la gestión de riesgos naturales a nivel internacional.

¹¹⁴ Gent *et. al.* modifican los pesos de los parámetros de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado para su adaptación a las construcciones chilenas de albañilería confinada, siendo las tipologías constructivas predominantes en el país.



influencia en la respuesta sísmica de los edificios. Los once parámetros originales son: P1. Organización de las estructuras verticales, P2. Naturaleza de las estructuras verticales, P3. Calidad del sistema estructural, P4. Localización del inmuebles y tipo de cimentación, P5. Sistema de diafragma horizontal, P6. Regularidad en planta, P7. Regularidad en altura, P8. Distribución de los elementos estructurales, P9. Sistema de cubierta, P10. Elementos no estructurales, P11. Estado de conservación. Cada uno de estos parámetros es evaluado asignando una clase de vulnerabilidad creciente (A, B, C o D) y cuenta con un peso (w) asignado en función de la relevancia estructural (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método GNDT.

Parámetros		Clase vulnerabilidad				Peso (w)
		A	B	C	D	
P1	Organización de las estructuras verticales	0	5	20	45	1
P2	Naturaleza de las estructuras verticales	0	5	25	45	0.25
P3	Calidad del sistema estructural	0	5	25	45	1.5
P4	Localización del inmueble y tipo de cimentación	0	5	25	45	0.75
P5	Sistema de diafragma horizontal	0	5	15	45	1
P6	Regularidad en planta	0	5	25	45	0.5
P7	Regularidad en altura	0	5	25	45	1
P8	Distribución de los elementos estructurales	0	5	25	45	0.25
P9	Sistema de cubierta	0	15	25	45	1
P10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
P11	Estado de conservación	0	5	25	45	1

A partir de la asignación de clases de vulnerabilidad y su ponderación se obtiene el índice de vulnerabilidad (I_v) contenido en un rango de valores [0-382.5], que generalmente se normaliza [0-100] para mayor simplicidad en el manejo de los resultados (ver Expresiones 3.2-3.4).

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{11} C_{vi} * p_i \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$0 \leq I_v^* \leq 382.5 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$0 \leq I_v \leq 100 \quad (\text{Ec. 3.4})$$



Donde:

I_v^* = Índice de vulnerabilidad [0-382.5];

I_v = Índice de vulnerabilidad normalizado [0-100];

C_{vi} = Valor de la clase de vulnerabilidad del parámetro i ;

p_i = Peso asignado a la clase de vulnerabilidad del parámetro i .

Finalmente, los datos derivados de eventos sísmicos se usaron para calibrar las funciones de vulnerabilidad y relacionar el valor del IV con un factor de daño (d) en las edificaciones en función de la PGA¹¹⁵. El método GNDT permite un nivel de detalle notorio para evaluar la vulnerabilidad sísmica de un edificio singular o un conjunto urbano ante un sismo de características delimitadas. Esto lo diferencia de la escala macrosísmica, que agrupa las tipologías en grupos amplios y no permite identificar y clasificar en detalle las viviendas.

Método de Antonio Formisano

El método propuesto por Antonio Formisano parte del método GNDT y los once principales parámetros (reduciendo éstos a diez), con la introducción de cinco parámetros adicionales destinados a considerar la ubicación de los inmuebles en las vialidades y trazas urbanas además de la posible interacción con los edificios adyacentes (Formisano et al., Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of masonry building aggregates, 2015). Para estos nuevos parámetros, se introducen valores negativos, que consecuentemente pueden reducir el índice de vulnerabilidad y por lo tanto tener una implicación positiva en el comportamiento estructural de los edificios.

En la Tabla 3.2 observamos la formulación del método de Formisano (2011); los cinco nuevos parámetros integrados (P11-P15) aparecen resaltados, con una descripción e interpretación de los mismos en el subcapítulo 3.3. También debe resaltarse la eliminación del parámetro P3. Calidad del sistema estructural respecto al método GNDT, así como la calibración y variación de la influencia (w) de varios de los parámetros originales.

¹¹⁵ *Peak Ground Acceleration*, la máxima aceleración registrada para un terremoto, en español comúnmente referida como aceleración sísmica.



Tabla 3.2. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método propuesto por Antonio Formisano.

Parámetros		Clase vulnerabilidad				Peso (w)
		A	B	C	D	
P1	Organización de las estructuras verticales	0	5	20	45	1
P2	Naturaleza de las estructuras verticales	0	5	25	45	0.25
P3	Localización del inmueble y tipo de cimentación	0	5	25	45	0.75
P4	Distribución de los elementos estructurales	0	5	25	45	1.5
P5	Regularidad en planta	0	5	25	45	0.5
P6	Regularidad en altura	0	5	25	45	0.8
P7	Sistema de diafragma horizontal	0	5	15	45	0.8
P8	Sistema de cubierta	0	15	25	45	1
P9	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
P10	Estado de conservación	0	5	25	45	1
P11	Presencia de edificios adyacentes con diferente altura	-20	0	15	45	1
P12	Posición e interacción del edificio con otros inmuebles	-45	-25	-15	0	1.5
P13	Número de estructuras horizontales interpuestas	0	15	25	45	0.5
P14	Efecto de la heterogeneidad estructural y/o tipológica entre edificios adyacentes	-15	-10	0	45	1.2
P15	Diferencia en porcentaje de aberturas con edificios adyacentes	-20	0	25	45	1

Estos cinco factores son desarrollados y fundamentados a partir de investigaciones previas, como el reconocido modelo macrosísmico de Giovinazzi y Lagormasino (2006), en el que se plantean distintos índices de ductilidad de los edificios según su regularidad en elevación. Además, encontramos algunos conceptos similares en la propuesta metodológica de Vicente, que considera la interacción de los inmuebles dentro del contexto urbano. A partir del trabajo desarrollado mediante la calibración numérica de modelos y análisis paramétrico para asignar valores y pesos a las clases de vulnerabilidad, se añaden los siguientes parámetros al sistema original de la GNDT: P11. Presencia de edificios adyacentes con diferente altura, P12. Posición e interacción del edificio con otros inmuebles; P13. Número de estructuras horizontales interpuestas, P14. Efecto de la heterogeneidad estructural y/o tipológica entre edificios adyacentes, P15. Diferencia en porcentaje de aberturas con edificios adyacentes.

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{15} S_i * W_i \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

I_v^* = Índice de vulnerabilidad [0-587.25];

S_i = Valor de la clase de vulnerabilidad del parámetro i ;

W_i = Peso asignado a la clase de vulnerabilidad del parámetro i .

Para una mayor facilidad, al igual que en el resto de MEVS, el índice de vulnerabilidad (I_v^*) obtenido, delimitado en un rango [0-587.25] se normaliza al índice V. A diferencia de otros métodos, en este caso el rango es mucho más reducido [0-1], facilitando el posterior cálculo de los grados de daño al incluir el valor directamente en la fórmula. El índice V puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$V_I = \left[\frac{I_v - (\sum_{i=1}^{15} S_{min} \times W_i)}{[\sum_{i=1}^{15} [(S_{max} \times W_i) - (S_{min} \times W_i)]]} \right] \quad (\text{Ec. 3.6})$$

El valor de la propuesta de Formisano reside precisamente en analizar las construcciones como parte de un conjunto y no únicamente como objetos singulares, siendo de especial importancia para el estudio de centros históricos y la condición de edificios agregados o agregados urbanos. La elección de este método reside en poder establecer comparaciones entre los distintos casos de estudio de la investigación, que parten de contextos urbanos y sociales muy distintos, con la finalidad de establecer comparaciones tipológicas entre las viviendas de adobe de las diferentes localidades estudiadas en la presente investigación.

La aplicación del MEVS en el centro histórico de Poggio Pienze, Italia, comparando los resultados con los daños reales sufridos tras el terremoto de l'Aquila de 2009, demostró como el factor de los agregados o conjuntos de edificios es determinante para la mitigación de la vulnerabilidad sísmica (Formisano et al., 2015), siendo muchos de estos parámetros generalmente obviados por otros MEVS. Posteriormente, el método también ha sido calibrado y aplicado en la municipalidad de San Potito Sannitico en Caserta, Italia (Formisano et al., 2017); en este caso se estableció una comparación entre el método extendido con los cinco parámetros que contemplan el agregado urbano y una versión simplificada con diez parámetros originales para analizar la influencia de la interacción entre edificios en la vulnerabilidad real.

Con el interés de poder analizar el caso de estudio de AR, en el que la mayoría de inmuebles forman parte del centro histórico de la localidad, enteramente construido en adobe (ver Figura 3.7); además del caso de estudio de CO, en que la traza urbana es regular y bien definida, por lo que las viviendas estudiadas se encuentran insertas en manzanas y vialidades delimitadas. Por el contrario, los otros dos casos, SPE y SC, por ser poblaciones rurales cuentan con



viviendas aisladas que forman sus propios predios, por lo que el método de Formisano no puede aplicarse en estas otras localidades.



Figura 3.7: Centro urbano de Ario de Rosales. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021)

En el caso de AR podemos encontrar ciertamente ejemplos de edificios en agregado, además de una valoración positiva de los cuatro aspectos identificados por Formisano *et. al.* (2021): tipología constructiva, calidad de los materiales, sistemas constructivos y estado de conservación. Cuando estos aspectos no son homogéneos en la traza urbana, las ventajas estructurales que podría suponer el trabajo conjunto de las unidades deja de ser efectivo.

Método de Romeu Vicente

Romeu Vicente presenta esta propuesta metodológica como una herramienta híbrida entre la herramienta indirecta GNDT y el método macrosísmico de Lagomarsino y Giovinazzi, con el objetivo de expresar y transformar la vulnerabilidad a partir de la definición de un grado de daño μ_D y la estimación de las pérdidas. El método fue propuesto en la tesis doctoral del autor¹¹⁶, y validado en varios casos de aplicación como Coimbra o Faro, en Portugal.

¹¹⁶ *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra* integra tanto la metodología completa de estudio y análisis de vulnerabilidad sísmica para centros históricos, aplicada al caso de



En esta propuesta, el autor agrupa los parámetros de vulnerabilidad en cuatro categorías (ver Tabla 3.3): sistema estructural del edificio, irregularidades e interacción, diafragmas horizontales y cubiertas, y estado de conservación y otros elementos. Respecto al modelo de la GNDT son tres los parámetros introducidos: P5. Número de niveles, P7. Posición e interacción del inmueble, P10. Aberturas en fachada y alineamiento (resaltados en Tabla 3.3). La inclusión responde a la necesidad de considerar la interacción entre conjuntos de edificios (agregados estructurales) y otros factores no considerados en el modelo original que influyen en el comportamiento sísmico de las construcciones.

Tabla 3.3. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método propuesto por Romeu Vicente.

Parámetros		Clase vulnerabilidad				Peso (w)
		A	B	C	D	
1. Sistema estructural del edificio						
P1	Tipo y organización del sistema estructural	0	5	20	50	0.75
P2	Calidad del sistema estructural	0	5	20	50	1
P3	Resistencia convencional	0	5	20	50	1.5
P4	Distancia máxima entre muros	0	5	20	50	0.5
P5	Número de niveles	0	5	20	50	1.5
P6	Localización y condiciones del terreno	0	5	20	50	0.75
2. Irregularidades e interacción						
P7	Posición e interacción del inmueble	0	5	20	50	1.5
P8	Configuración en planta	0	5	20	50	0.75
P19	Regularidad en altura	0	5	20	50	0.75
P10	Aberturas en fachada y alineamiento	0	5	20	50	0.5
3. Elementos horizontales y cubierta						
P11	Diafragma horizontal	0	5	20	50	1
P12	Sistema de cubierta	0	5	20	50	1
4. Estado de conservación y otros elementos						
P13	Fragilidad y estado de conservación	0	5	20	50	1
P14	Elementos no estructurales	0	5	20	50	0.5

Otra de las características propias del método es la normalización de los valores asignados a cada clase de vulnerabilidad respecto a los parámetros de vulnerabilidad sísmica, siendo esta una diferenciación respecto a los métodos anteriores para una simplificación tanto del cálculo como de la evaluación e inspección en campo, ya que el evaluador contempla del mismo modo todos los parámetros eliminando un posible sesgo.

Coimbra; como propuestas de regeneración y rehabilitación urbana, además de la caracterización y estudio de la arquitectura y sistemas constructivos de la región y de los materiales empleados.



A partir de la evaluación y toma de datos en campo, el índice de vulnerabilidad (I_v) se calcula mediante la suma ponderada de los catorce parámetros de vulnerabilidad, dando un resultado contenido en un rango de valores general [0-650] y normalizado en valores [0-100] (ver Expresiones 3.8-3.10) para mayor facilidad de aplicación y posterior análisis.

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} * p_i \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$0 \leq I_v^* \leq 650 \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$0 \leq I_v \leq 100 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

I_v^* = Índice de vulnerabilidad [0-650];

I_v = Índice de vulnerabilidad normalizado [0-100];

C_{vi} = Valor de la clase de vulnerabilidad del parámetro i ;

p_i = Peso asignado a la clase de vulnerabilidad del parámetro i .

A partir del I_v , este puede ser transformado en el factor de vulnerabilidad V del método macrosísmico y generar el cálculo del factor de daño en función de la intensidad sísmica¹¹⁷. De esta forma, la personalización que permite el modelo GNDT a los casos de estudio se combina con los grados de daño físico del método macrosísmico, asignando un valor μ_D a cada vivienda.

Método SVIVA

El método SVIVA¹¹⁸ (Seismic Vulnerability Index for Vernacular Architecture) parte de los índices de vulnerabilidad convencionales propuestos por Benedetti y Petrini (1984), adaptados por Vicente (2008) para combinarlos con el método macrosísmico propuesto por Lagomarsino y Giovinazzi (2006); con la adaptación de estos métodos a la arquitectura vernácula y sus características propias.

Cabe destacar que este método fue ideado principalmente para el estudio de la arquitectura vernácula portuguesa, que engloba principalmente edificaciones de piedra, ladrillo, adobe y tapial, compartiendo muchas características con las construcciones tradicionales a lo largo

¹¹⁷ El proceso se detalla en el apartado 3.4.

¹¹⁸ Traducido como Índice de Vulnerabilidad Sísmica para Arquitectura Vernácula.



del planeta, incluyendo el continente americano a través de la importación de las técnicas constructivas europeas.

Encontramos una primera aplicación directa del método en la localidad de Faial, en Azores, Portugal para la calibración del sistema con datos post-sismo (Ortega J. et al., 2019); y posteriormente en el caso de estudio de Vila Real de Santo Antonio, en el sur de Portugal (Ortega J. et al., 2020). SVIVA cuenta únicamente con 10 parámetros de vulnerabilidad: P1. Esbeltez de los muros, P2. Máxima separación entre muros, P3. Tipo de material, P4. Conexión entre muros, P5. Sistema de diafragma horizontal, P6. Sistema de cubierta, P7. Aberturas en los muros, P8. Número de niveles, P9. Daño estructural previo, P10. Índice de masa (ver Tabla 3.4); siendo algunos de estos relativamente novedosos para los MEVS de índice de vulnerabilidad.

Tabla 3.4. Formulación de los parámetros y clases de vulnerabilidad del método SVIVA.

	Parámetros	Clase vulnerabilidad (C_{vi})				Peso (p_i) (w)
		A	B	C	D	
P1	Esbeltez de los muros	0	5	20	50	1
P2	Máxima separación entre muros	0	5	20	50	0.5
P3	Tipo de material	0	5	20	50	1.5
P4	Conexión entre muros	0	5	20	50	0.75
P5	Sistema de diafragma horizontal	0	5	20	50	1.5
P6	Sistema de cubierta	0	5	20	50	0.5
P7	Aberturas en los muros	0	5	20	50	1.5
P8	Número de niveles	0	5	20	50	1.5
P9	Daño estructural previo	0	5	20	50	0.75
P10	Índice de masa	0	5	20	50	0.5

Se retoma de Vicente la normalización de los valores (coeficientes de calificación, C_{vi}) asignados a las clases de vulnerabilidad (0, 5, 20 y 50). Por otro lado, los parámetros son asociados a un peso (p_i) que va desde 0.5 a 1.5, siendo los más influyentes en la vulnerabilidad de las viviendas el tipo de material, diafragma horizontal, aberturas en los muros y el número de niveles.

El índice de vulnerabilidad, calculado con la Expresión 3.11, queda comprendido en un rango [0-500] que para mayor funcionalidad y manejo se normaliza a un valor de I_v [0-100]. Como una adaptación del método de Vicente, SVIVA también combina el índice de vulnerabilidad



con el método macrosísmico, permitiendo obtener la estimación de daños y pérdidas y consecuentemente curvas de vulnerabilidad y fragilidad.

$$I_V = \sum_{i=1}^{10} C_{vi} * p_i \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Método SAVVAS

El método SAVVAS, denominado a partir de las siglas Seismic Assessment of the Vulnerability of Vernacular Architecture Structures¹¹⁹, fue desarrollado por Ortega Heras paralelamente a SVIVA con el objetivo de estimar la máxima capacidad resistente de las construcciones vernáculas en términos cuantitativos (Ortega J. et al., 2019). La principal diferencia es que SAVVAS se basa en la obtención de los estados límite de carga (LS), expresados en función de la aceleración (g), de las viviendas, en vez de los tradicionales índices de vulnerabilidad que presentaban los anteriores MEVS desarrollados en el capítulo. Partiendo del mismo acercamiento a las viviendas que SVIVA, el método usa los mismos diez parámetros de vulnerabilidad, y a partir de éstos se calculan tres estados límite: LS1, LS2 y LS3, que se relacionan con los niveles de daño definidos en la EMS-98 y su afectación en su estabilidad y comportamiento estructural.

Ortega asocia los estados límite a determinadas situaciones: LS1 (Estado Límite de Desalojo Inmediato) coincide con la formación de las primeras grietas del edificio y un comportamiento elástico de las estructuras, vinculado a la formación de daños $\mu_D = 2$ en la EMS-98; LS2 (Estado Límite de Limitación por Daños) corresponde a un escenario con daños estructurales leves en el que el edificio todavía retiene su estabilidad estructural, situación esperada para un grado de daño $\mu_D = 3$ en la EMS-98; por último, LS3 (Estado Límite de Seguridad Vital) supone un escenario cercano al colapso del edificio, en el que se ha perdido gran parte de la respuesta dinámica y estructural de la construcción debido a los graves daños presentados, correspondiendo a un grado de daño $\mu_D = 4$ en la EMS-98 (Ortega J. et al., 2019).

En cuanto al funcionamiento del método, a los diez parámetros no se les asigna una clase de vulnerabilidad [A-D] como en los otros MEVS, sino un valor numérico [1-4]; excepto para

¹¹⁹ Evaluación Sísmica de la Vulnerabilidad de Estructuras de Arquitectura Vernácula.



P1, P2, P7, P8 y P10, en los que se emplean los coeficientes calculados en cada caso. Una vez asignados los valores, los tres estados límite se calculan en función de las siguientes expresiones:

$$LS1_i = e^{(1.97-0.06\lambda-0.1s-0.68\ln(P3)-0.14P4-0.28P5-0.39LN(P6)-3.43P7b-0.82\ln(N)-2.27LN(p9)+0.63P5P7b)} - c \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$LS2_i = 0.16 \times LS1(g) + 0.78 \times LS3(g) \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$LS3_i = e^{(2.16-0.04\lambda-0.05s-0.24P3-0.16P4-0.28P5-0.08P6+0.3P7a-2.79P7b-0.37N-0.15P9+0.74y_i+0.44P5P7b)} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Donde:

LS1_i = Estado límite de desalojo inmediato, asociado a un $\mu_D = 2$;

LS2_i = Estado límite de limitación por daños vital, asociado a un $\mu_D = 3$;

LS3_i = Estado límite de seguridad vital, asociado a un $\mu_D = 4$;

P_x = Clase de vulnerabilidad [1-4] del parámetro correspondiente;

λ = Coeficiente de esbeltez de los muros resultante de la división de la altura (h) entre el espesor (t), en referencia al parámetro P1;

s = Máxima separación entre muros medida en metros, en referencia al parámetro P2;

N = Número de niveles, en referencia al parámetro P8;

y_i = Coeficiente de índice de masa de la construcción, en referencia al parámetro P10.

En SAVVAS el valor de referencia pasa a ser la PGA en vez de la intensidad sísmica, lo cual nos aporta herramientas de cálculo más indicadas para la gestión de riesgos, ya que los coeficientes de aceleración sísmica del terreno pueden ser obtenidos con facilidad de los códigos sísmicos de cada país. Este acercamiento a la vulnerabilidad sísmica puede ejercer un gran servicio en combinación con varias plataformas actuales que emplean el uso de los SIG, al poder ser de gran utilidad en la gestión de riesgos a nivel municipal o estatal. Por ejemplo, la plataforma IRMA (Italian Risk Map) ordena el nivel de riesgo mediante la asignación de una PGA por cada municipio existente en el país (Zuccaro et al., 2021). En el caso de México mediante el sistema PRODISIS¹²⁰ es posible acceder a las aceleraciones máximas respecto al espectro de diseño en roca del terreno, siendo herramientas muy útiles para la planificación.

¹²⁰ PRODISIS (PROgrama de DIseño SÍsmico) es una herramienta creada por la Comisión Federal de Electricidad. El programa permite calcular espectros de referencia en roca a partir de un periodo de retorno determinado, así como obtener acelerogramas sintéticos para el diseño sísmico.





3.3. ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA

Los MEVS funcionan a partir de la asignación de clases de vulnerabilidad a una serie de parámetros constructivos, tipológicos y estructurales de las viviendas y casos de estudio analizados. Estos parámetros son fruto de la discusión teórica y la adaptación a cada método de índice de vulnerabilidad, por lo que podemos encontrar definiciones muy distintas y una cantidad de parámetros extensa.

Kassem et al. (2020) establecen una clasificación de los parámetros de vulnerabilidad estructural de los edificios en seis grupos: conexión entre viga-columna, cimentación y condiciones externas, diafragma, interacción suelo-estructura, nivel de ductilidad, e irregularidad en masa. Por otro lado, Vicente (2008), en su propuesta metodológica separa los parámetros en cuatro grupos: 1. Sistema estructural del edificio, 2. Irregularidades e interacción, 3. Sistemas de diafragma y cubierta, 4. Estado de conservación y otros elementos.

Generalmente, los MEVS suelen considerar entre 10 y 15 parámetros de vulnerabilidad sísmica partiendo del modelo inicial propuesto por la GNDT¹²¹. No obstante, el número puede aumentar considerablemente: un aporte muy interesante, aunque algo extremo es el MEVS presentado por Onescu et al. (2021) para la evaluación de edificios con interés cultural en Rumanía. Este método considera hasta 42 parámetros con la inclusión de cuestiones arquitectónicas, artísticas, históricas y culturales conjuntamente las estructurales que consideran el resto de métodos. Además, se consideran cinco parámetros más para el cálculo del factor de la atenuación, que incluyen cuestiones como el grado de turismo en la localidad, si el inmueble pertenece a un Sitio de Patrimonio Mundial de la UNESCO o su grado de reconocimiento y protección, entre otros¹²².

Contando con un total de 77 unidades de estudio de viviendas de adobe, se realizó un análisis de 18 parámetros de vulnerabilidad, resultado de la combinación de los cinco métodos

¹²¹ Cabe aclarar que la GNDT considera distintos parámetros a evaluar en los edificios de mamposterías y los construidos con concreto armado.

¹²² Los parámetros de atenuación incluyen la antigüedad del área urbana, población total, grado de turismo, grado de reconocimiento internacional y estado de conservación general del sitio.



aplicados en la presente investigación¹²³. Varios de los métodos incluyen parámetros iguales o muy parecidos entre ellos, por lo que se decidió generar una comparación de las mismos y hacer una evaluación respecto a la asignación de clases y el peso asignado por cada uno (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Relación y peso de parámetros de vulnerabilidad sísmica y presencia en los distintos MEVS aplicados.

Parámetro	GNDT	Formisano	Vicente	Ortega ¹²⁴
1. Relación de esbeltez				X
2. Separación máxima de elementos portantes	X	X	X	X
3. Calidad del sist. resistente	X	X	X	X
4. Resistencia convencional del sist. estructural	X	X	X	
5. Organización y conexión del sist. estructural	X	X	X	X
6. Cimentación y terreno	X	X	X	
7. Sistema de diafragma horizontal	X	X	X	X
8. Sistema de cubierta	X	X	X	X
9. Relación de huecos				X
10. Desalineamiento de aberturas			X	
11. Número de niveles del edificio			X	X
12. Estado de conservación	X	X	X	X
13. Índice de masa				X
14. Irregularidad en planta	X	X	X	
15. Irregularidad en altura	X	X	X	
16. Presencia de elementos no estructurales	X	X	X	
17. Localización e interacción otros inmuebles		X	X	
18. Altura de edificios adyacentes		X		
19. Heterogeneidad estructural y tipológica		X		
20. Diferencia % aberturas edificios adyacentes		X		
21. N° estructuras horizontales interpuertas		X		

Peso (w) asignado por los MEVS



Podemos comprobar como ciertos parámetros, por ejemplo, el estado de conservación y los sistemas de diafragma horizontal y cubierta, son comunes a los cinco MEVS; mientras que

¹²³ Los métodos de Formisano y Vicente parten directamente de la GNDT, por lo tanto, los once parámetros iniciales son idénticos, añadiendo cinco y tres nuevos parámetros respectivamente (Formisano también excluye el parámetro de resistencia convencional, resultando en un total de quince). Por otro lado, los métodos SVIVA y SAVVAS se basan en 10 parámetros característicos de la arquitectura vernácula presentes en contextos muy diferentes, retomando varios de los conceptos presentes en las herramientas clásicas e incluyendo algunas características novedosas que aplican a los casos de estudio para los que se diseñaron.

¹²⁴ Incluye ambos MEVS, SVIVA y SAVVAS.



otros como el desalineamiento de las aberturas o el índice de masa únicamente son evaluados por un solo método. Igualmente, los cinco últimos parámetros (17-21) son exclusivos del método propuesto por Formisano¹²⁵, que como se comentó anteriormente busca incorporar el factor urbano en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica.

En el siguiente apartado, se detallan los parámetros analizados (sumando un total de 21) en los casos de estudio seleccionados de la investigación, mediante de la aplicación de los cinco MEVS definidos en el capítulo. Por ello, cada uno de estos parámetros es definido y se establecen comparativas para aquellos que son evaluados bajo distintos criterios en función de los MEVS. Adicionalmente, se complementa la exposición de cada uno de ellos con su presencia y relevancia en los casos de estudio y los sistemas constructivos y configuraciones que encontramos en las viviendas de adobe.

3.3.1. Relación de esbeltez

La relación de esbeltez (λ) de los muros es un parámetro de tipo geométrico, siendo la relación directa entre la altura (h) y el grosor (t) de los muros de adobe (ver Ecuación 3.15). La medición del coeficiente λ como es lógico se realiza para aquellos muros que tienen una capacidad portante o estructural, dejando fuera todos aquellos elementos con función divisoria. Un valor alto de este parámetro implica una mayor vulnerabilidad, además, cobra una importancia todavía mayor en la vivienda de adobe por varias razones: en primer lugar, por los valores de resistencia mecánica de este material, relativamente bajos en comparación a otros sistemas de muros; en segundo lugar por el efecto que causa en el fallo fuera de plano¹²⁶ que pueden experimentar los muros (Ortega Heras, 2018).

$$\lambda = \frac{h}{t} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

¹²⁵ Algunos aspectos del parámetro 17, los referentes a la localización del inmueble en el agregado son considerados también en el método de Vicente bajo diferente consideración.

¹²⁶ El fallo fuera de plano (del inglés *out-of-plane response or failure*) consiste en un tipo de fallo ocasionado por movimientos sísmicos que genera que elementos constructivos colapsen por sollicitaciones fuera del plano de los muros, siendo este el mecanismo de respuesta más crítico y reportado para las estructuras edificadas con mamposterías históricas **Fuente especificada no válida..**



Ortega (2018) reporta que las construcciones vernáculas por sus condiciones materiales generalmente presentan valores de esbeltez cercanos o menores a 9 y que muy raramente sobrepasan el ratio de 12. Tradicionalmente, las construcciones de adobe cuentan con muros de espesor considerable, conformando sistemas robustos para soportar las cargas propias del edificio y las solicitaciones dinámicas a las que eventualmente puede verse expuesto. Las edificaciones que han conservado estos parámetros constructivos han reportado una mejor respuesta ante sismos históricos causantes de una elevada destrucción (Guerrero Baca L. F., 2019).

El factor se ha demostrado totalmente crítico en la vulnerabilidad de las viviendas de adobe: en la investigación de Tarque et al. (2009) se comparó el comportamiento de las edificaciones de Cuzco, con una relación de esbeltez cercana a 6; respecto a las tipologías de la zona costera, con valores de λ cercanos a 9, comprobando a partir de la vulnerabilidad observada que las segundas fueron mucho más susceptibles a sufrir daño debido a los esfuerzos perpendiculares al muro.

Respecto a la influencia de la esbeltez en el desempeño sísmico de las estructuras, los métodos SVIVA y SAVVAS, concebidos para el análisis de la vivienda vernácula, toman en cuenta la tradición constructiva de estos sistemas. Ambos trabajand asignando clases de vulnerabilidad más restrictivas a las planteadas por Vicente en su propuesta metodológica, ya que el grosor de los muros constituye una variable del parámetro referente a la separación máxima entre paredes¹²⁷. Esta dinámica se ve reflejada en la Figura 3.8, donde encontramos representada la distribución del parámetro de vulnerabilidad para ambas metodologías, encontrando una asignación de clases mucho más restrictiva en SVIVA/SAVVAS.

¹²⁷ Vicente introduce el concepto de esbeltez como restricción al parámetro original de separación máxima de muros, contemplando ambos factores como criterios de cuantificación y asignación de la clase de vulnerabilidad. Sin embargo, estos criterios de evaluación para las viviendas son mucho más permisivos que los propuestos en SVIVA y SAVVAS.

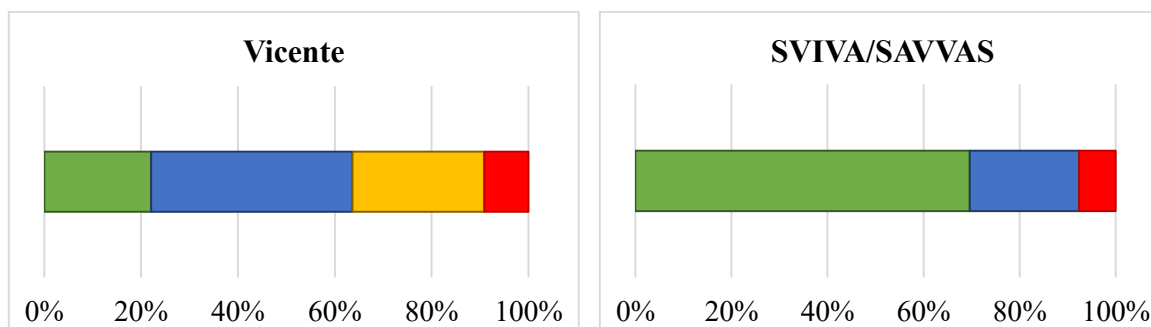


Figura 3.8: Distribución del parámetro Relación de esbeltez.

Aterrizando en la investigación doctoral, en las localidades estudiadas los grosores de los muros estaban alrededor de los 30 cm para las viviendas de dimensiones modestas, valores habituales para este tipo de construcciones que se corresponden otros ejemplos reportados en viviendas rurales de adobe a lo largo del país (Guerrero Baca L. F., 2019), varias de estas relaciones pueden visualizarse en la Figura 3.9. Estas edificaciones suelen contar con área construida reducida y una distribución interna muy sencilla, de forma que las alturas de los muros también tienden a ser reducidas, raramente sobrepasando los tres metros.



Figura 3.9. Relación de esbeltez en los casos de estudio: (a) Medición del grosor de muro en SPE; (b) Visualización de la esbeltez en muros de vivienda en SC. Fotografías: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).

Para el caso de los inmuebles del centro histórico de AR, con un área construida mucho mayor, o las construcciones que fungieron como haciendas en SC, encontramos espesores de muro mayores, de 60 o 90 cm aproximadamente, debido a la mayor carga estructural que debían soportar estas edificaciones y generando consecuentemente espacios interiores de mayor altura. Por el contrario, los inmuebles de CO presentaron coeficientes λ mucho mayores que comprenden una peor respuesta sísmica; las razones de esta mayor esbeltez de



los muros puede deberse a la alteración de las viviendas y la relotificación de los predios por el crecimiento poblacional, buscando generar nuevos espacios de habitación en dimensiones más reducidas a las habituales.

La Figura 3.10 muestra esta variabilidad entre los casos de estudio mediante la asignación de clases de vulnerabilidad para el mismo parámetro según los lineamientos de las MEVS SVIVA y SAVVAS. La distribución por casos de estudio es significativa, con resultados muy favorables para AR, intermedios para SPE y SC, y deficientes para CO; respecto a los valores de λ estos fueron de: SPE = 7.79, CO = 10.85, AR = 5.43, y SC = 8.68, respectivamente.

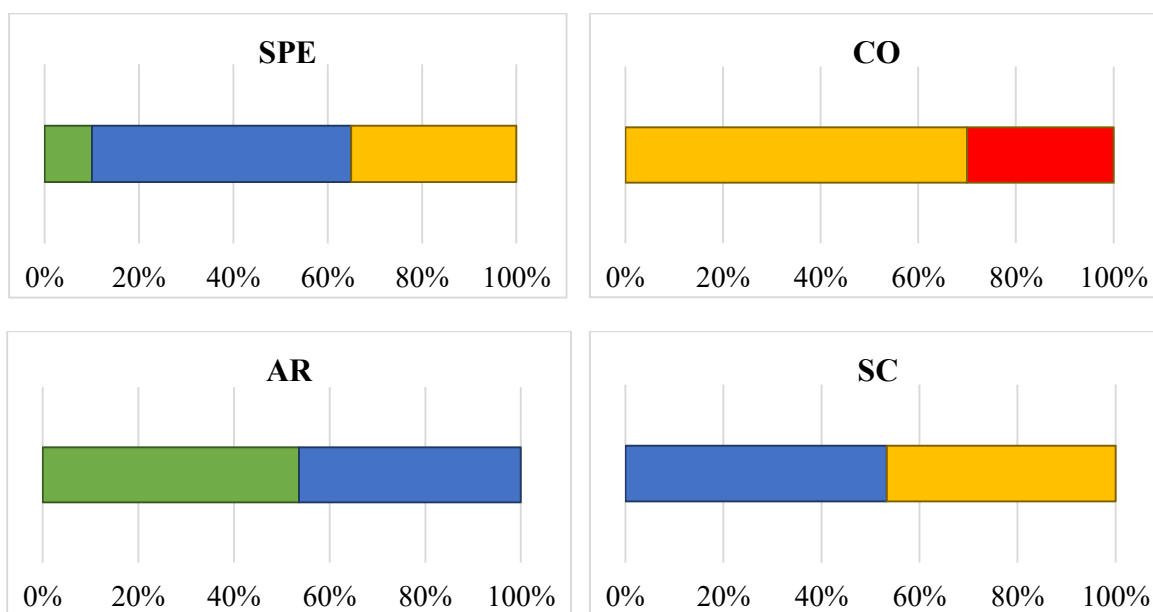


Figura 3.10. Variabilidad del parámetro Esbeltez de los muros en las viviendas de los diferentes casos de estudio con la aplicación de SVIVA y SAVVAS.

Por otro lado, sí se encontró una mayor variación de la altura de los inmuebles, encontrando relaciones muy interesantes que explican los fenómenos ya comentados de la transformación o transfiguración de la arquitectura vernácula¹²⁸. AR reportó mayores alturas, lo cual es lógico debido a las superiores dimensiones de las viviendas de su centro histórico y su carácter más majestuoso; por otro lado, SPE y SC, localidades insertas en el medio rural mostraron valores mucho más bajos, consecuentes con edificaciones de menor área; el caso

¹²⁸ Revisar apartado 1.2.3. El abandono de las culturas constructivas: tradición y modernidad del Capítulo I. Los cambios de la relación de esbeltez de los muros de adobe respecto a los valores tradicionales corresponden al afán por imitar la construcción de otros sistemas modernos como el bloque de cemento o el tabique cerámico.



más llamativo fue CO, presentando tanto alturas como ratios de λ elevados, que no se corresponden a la realidad de la arquitectura tradicional, corroborando la ya comentada transformación de la vivienda rural en esta localidad.

3.3.2. Separación máxima entre elementos portantes

Este parámetro también de carácter geométrico indica la máxima distancia en metros entre apoyos estructurales para cada uno de los ejes principales de la vivienda. La denominada separación máxima entre elementos portantes¹²⁹ (s) es otro de los aspectos cruciales en producir fallos fuera de plano en estructuras históricas, con una mayor probabilidad de colapso en aquellas estructuras que presentan grandes luces entre sus principales soportes. En este caso sólo se cuentan los elementos portantes de la vivienda, es decir, que no se contemplan las particiones interiores que no tengan un carácter estructural. A mayores longitudes de este parámetro mayor vulnerabilidad presentarán los inmuebles, consecuencia lógica por la que las viviendas de adobe suelen contar con geometrías sencillas y luces mínimas entre muros estructurales (ver Figura 3.11).



Figura 3.11. Ejemplos de distribuciones espaciales y separación entre muros portantes: (a) Vivienda en SC; (b) Vivienda en AR. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

¹²⁹ Traducción libre del término *maximum wall span* empleado por Ortega (2018). Vicente (2011) se decanta por la opción *maximum distance between walls*, sin embargo, ésta puede dar lugar a interpretaciones erróneas debido a que no todos los muros de una vivienda tienen un carácter de soporte estructural.



Sin embargo, pese a que el parámetro parte del mismo concepto la forma de medirlo varía según los criterios y guías de cada MEVS. Por un lado, Vicente considera tanto la relación de esbeltez de los muros como la máxima distancia entre ellos en función del espesor para el cálculo del parámetro (ver Ecuación 3.16). El ratio entre estas dos variables determina la clase de vulnerabilidad de la vivienda, tomando siempre para el cálculo la opción más desfavorable¹³⁰ según los lineamientos presentados en el anexo Propuesta de índices de vulnerabilidad¹³¹.

$$\left(\frac{L}{s}\right)_{max} \quad \left(\frac{h_0}{s}\right)_{max} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Donde:

L = Máxima distancia entre paredes estructurales transversales;

s = Espesor de la pared resistente;

h₀ = Distancia entre pavimentos o pavimento y cubierta eficientemente unidos por la pared resistente.

Por otro lado, SVIVA/SAVVAS presentan una definición del parámetro más simplificada: “However, since the wall thickness is already taking into account in the previous parameter, it was decided to consider simply the variation of the maximum wall span (s), measured in meters¹³²” [Sin embargo, como el espesor de los muros fue tomado en cuenta en el anterior parámetro, se decidió simplemente considerar la variación de la separación máxima entre los muros (s), medida en metros] (Ortega Heras, 2018, pág. 61). La Figura 3.12 muestra la distribución del parámetro según la medición con el método de Vicente y SVIVA/SAVVAS, exponiendo en este caso valores ligeramente más restrictivos para los segundos, condición lógica al ser concebidos para el análisis de la arquitectura vernácula.

¹³⁰ Si la variable de esbeltez comporta una clase de vulnerabilidad C y la separación máxima entre paredes una clase de vulnerabilidad B, la asignación de clase responderá a la más restrictiva, en este caso la primera.

³¹ Anexo C – Proposta de índices de vulnerabilidade, en Vicente (2008) *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra*.

¹³² Sin embargo, como el espesor de los muros fue tomado en cuenta en el anterior parámetro, se decidió simplemente considerar la variación de la separación máxima entre los muros (s), medida en metros.

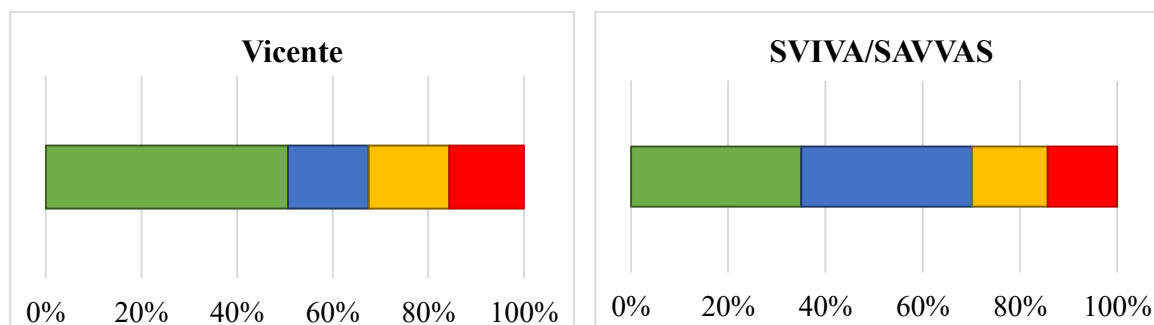


Figura 3.12. Distribución del parámetro Separación máxima entre elementos portantes.

Comparando los casos de estudio de la investigación (ver Figura 3.13), SC exhibió las clases de vulnerabilidad más favorables, con más de la mitad de viviendas presentando distribuciones espaciales que no superan los cinco metros de separación entre muros; un hecho llamativo al disponer de grandes superficies en los predios debido al carácter rural y aislado de esta localidad.

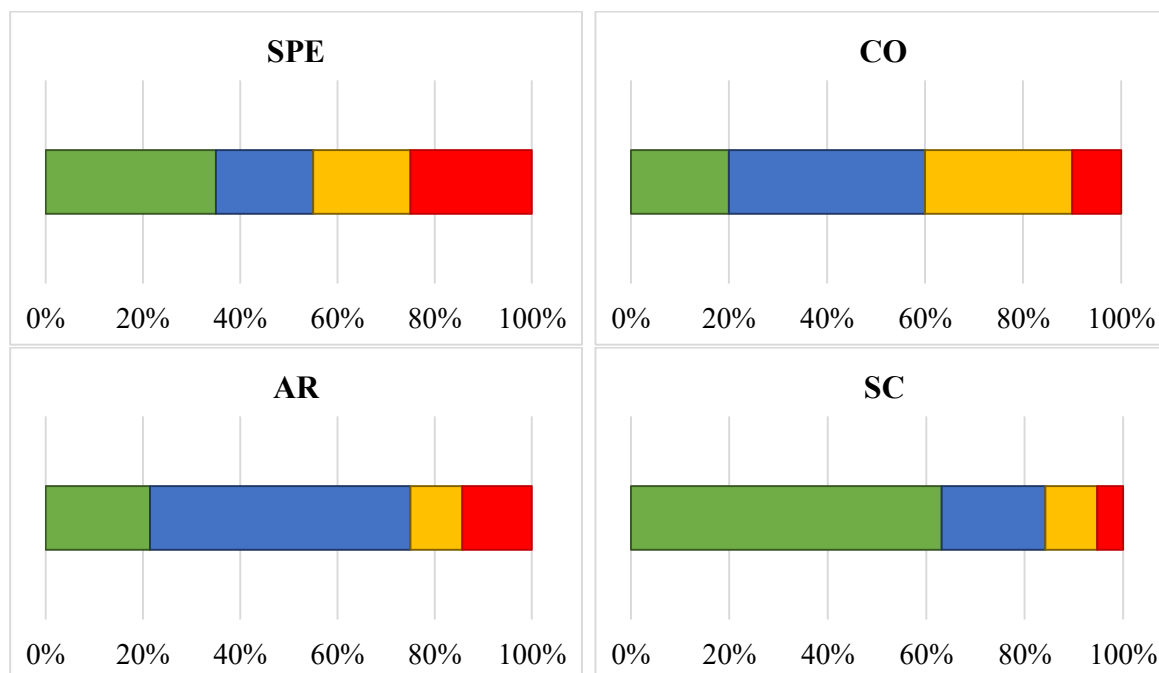


Figura 3.13. Variabilidad del parámetro Separación máxima entre elementos portantes en las viviendas de los diferentes casos de estudio con la aplicación de SVIVA y SAVVAS.

AR también presentó reportó valores favorables, a causa de una mayor compartimentación de las viviendas del centro histórico, ya que las viviendas al presentar mayores dimensiones necesitan divisiones interiores mediante la presencia de muros y apoyos intermedios que reduzcan las distancias y ayuden a salvar grandes claros. Por el contrario, SPE y CO



mostraron los peores resultados en este parámetro, evidenciando en algunos casos un diseño que no corresponde a las tipologías tradicionales de regiones que usualmente han evidenciado una cultura sísmica en las regiones del suroeste de México.

Este parámetro arroja información muy valiosa respecto a la configuración arquitectónica y la morfología de las viviendas, aspectos estudiados con anterioridad y de los que se cuenta con una gran base de datos a partir de la literatura existente sobre la arquitectura de tierra en México (Guerrero Baca L. F., 2007). Para estos casos, los estudios tipológicos de la arquitectura vernácula son muy valiosos de cara a conjeturar la respuesta sísmica de un caso de estudio, y pueden ser un gran apoyo para la aplicación de métodos tipológicos (Flores Salazar & Ferreira, 2019).

3.3.3. Calidad del sistema resistente

La calidad del material es un factor esencial en la arquitectura, hecho por el que los constructores siempre han buscado aquellos materiales con las mejores propiedades físico-químicas y mecánicas. Este parámetro asigna una clase de vulnerabilidad según el material predominante en los muros de las viviendas, en función de una clasificación definida para cada MEVS. Como es lógico los materiales que presentan unas mejores capacidades mecánicas (resistencias y módulo) cuentan con una mejor asignación de clase, siendo uno de los parámetros en los que los inmuebles contruidos con adobe suelen presentar resultados más desfavorables.

Ciertamente un bloque de adobe no puede alcanzar las capacidades mecánicas de un ladrillo cerámico, un bloque de cemento, o ciertos tipos de rocas empleados en la arquitectura vernácula. La consideración del adobe o la tapia en los lineamientos de los MEVS suele corresponder a las clases D o C, pese a que muchas investigaciones han reportado un notable comportamiento sismorresistente de estos sistemas constructivos (Guerrero Baca L. F., 2019; Jorquera, 2014)¹³³. Generalmente los sistemas estructurales de tierra son asociados a las

¹³³ La mayoría de estas investigaciones destaca que, pese a las bajas capacidades mecánicas de los bloques, otros aspectos como la geometría, simpleza en la construcción, o la flexibilidad de los sistemas constructivos combinados contribuyen a disminuir la vulnerabilidad de estas estructuras. También se apunta al hecho de que los sistemas de mampostería responden de un modo solidario a las sollicitaciones dinámicas, por lo que la resistencia del bloque no constituye la capacidad última del conjunto.



clases de vulnerabilidad más desfavorables, por debajo de las otras técnicas de mampostería o los sistemas industrializados.

Pese a la baja consideración de la tierra (Guerrero Baca L. F., 2007), algunas investigaciones han reportado que la composición y tipología de los bloques de adobe, principalmente la diferencia entre los suelos empleados para la manufactura, resultó en una respuesta distinta ante eventos sísmicos (Sunkar & Aksoy, 2015); además un buen diseño y optimización de las materias primas permiten alcanzar resistencias mecánicas elevadas (Guillén Guillén et al., 2021), cercanas o superiores a otros materiales convencionalmente considerados superiores. Por otro lado, factores independientes como la configuración y morfología de las viviendas son las que terminan jugando un papel más importante a la hora de resistir los esfuerzos generados por un sismo.

Ortega (2018) partió de estudios de las propiedades mecánicas de investigaciones previas, tomando en cuenta resistencia a compresión, resistencia a tensión y módulo de elasticidad; asignando valores indicativos a los distintos sistemas constructivos característicos de la vivienda vernácula de Portugal. Por otro lado, Vicente (2008) define las cuatro clases de vulnerabilidad según el tipo de material predominante, la calidad del aparejo de la mampostería y del mortero de unión, entre otras propiedades, incluyendo algunas modificaciones según el año de construcción del edificio¹³⁴ y la intervención y refuerzo antisísmico de los muros.

En la Figura 3.14 podemos ver la asignación de las clases de vulnerabilidad según los métodos de Vicente y SVIVA/SAVVAS, llamando la atención que para los segundos el sistema constructivo a base de adobe siempre comporta una clase de tipo D, la más desfavorable. Para la asignación de clases según el método de Vicente se siguió la propuesta de índices de vulnerabilidad (Vicente R. d., 2008) tomando en cuenta el tipo de sistema constructivo, considerando B o C para la mampostería de adobe según la calidad y manufactura de los bloques y los morteros de unión.

¹³⁴ Conseguir el dato exacto de la fecha de construcción de las viviendas de adobe analizadas fue prácticamente imposible. Por este motivo se decidió aplicar una modificación a la clase de vulnerabilidad en función de la conservación y deterioros presentados en los muros.

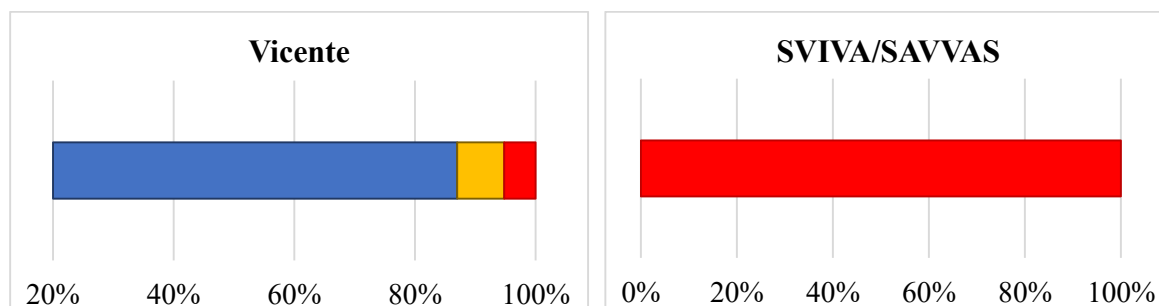


Figura 3.14. Distribución del parámetro Calidad del sistema resistente.

Precisamente este es uno de los parámetros que podrían modificarse respecto a SVIVA y SAVVAS para un análisis más completo de la arquitectura de tierra, debido a que la misma clase engloba a los sistemas en función de los valores tipo de resistencia mecánica, asignando una clase D a técnicas como el adobe o la tapia que se encuentran en este rango. Las investigaciones que han realizado caracterización físico-mecánica en estos componentes constructivos han demostrado que el rango de valores de resistencia a compresión, tensión o el módulo de elasticidad es muy amplio (Abhilash et al., 2022), en función de variables muy diversas. Por estos motivos sería de gran utilidad adaptar la clasificación o bien relacionar este parámetro con otros, como el de resistencia convencional del sistema estructural.

Otro aspecto a destacar es que los MEVS por su carácter simplificado suelen obviar la combinación de materiales existente en la arquitectura vernácula, donde encontramos tipologías y combinaciones que son difíciles de catalogar. En el caso de las construcciones de adobe, además de los muros edificados con este sistema de mampostería encontramos elementos que incorporan otros materiales, por ejemplo, las cimentaciones y sobrecimentaciones de roca que tienen un papel crítico tanto en evitar la ascensión capilar de la humedad como en la transmisión de las cargas de los muros.

3.3.4. Resistencia convencional del sistema estructural

El parámetro de resistencia convencional del sistema estructural trata de cuantificar la resistencia al corte total de la unidad de estudio ante las acciones horizontales que causan los sismos. Independientemente de la componente vertical que comporta un movimiento telúrico, las cargas más críticas que debe soportar un edificio son las horizontales, por lo que estimar la resistencia de la estructura a estos esfuerzos es de gran importancia.



Los primeros antecedentes para estimar la resistencia al corte última de un elemento pasan por el conjunto de ecuaciones planteadas por Turnšek y Čačovič (1971), siendo este el valor a comparar con la acción sísmica definida como una fuerza. Sin embargo, la resistencia del sistema incluye otros factores como el área resistente del muro en la dirección más desfavorable, la resistencia al corte de los materiales de los elementos estructurales y la carga permanente soportada por los mismos. Finalmente, la resistencia convencional del sistema estructural de los muros puede ser expresada mediante el coeficiente C_{conv} que puede ser calculado con la expresión:

$$C_{conv} = \frac{a_0 \times \tau_k}{q \times N} \sqrt{1 + \frac{q \times N}{1.5 \times a_0 \times \tau_k \times (1 + \gamma)}} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde:

C_{conv} = Resistencia convencional

a_0 = Área mínima de muros en la sección principal entre el área total cubierta en m^2 ;

τ_k = Valor de resistencia al corte en kPa;

q = Peso medio por nivel construido;

N = Número de niveles de la vivienda;

γ = Área mínima de muros en la sección principal entre el área máxima de muros en la sección secundaria.

C_{conv} permite estimar la resistencia última al corte en la dirección más desfavorable al empuje sísmico. Para el factor τ_k se tomó un valor estándar de 20 kPa¹³⁵, a partir de la revisión de la literatura (Abhilash et al., 2022). Debido a que la inmensa mayoría de viviendas analizadas contaban con un solo nivel construido el factor N no tuvo prácticamente influencia. El área mínima de muros se calculó mediante el área resistente de los muros (aspecto fundamental del parámetro Índice de masa de la construcción), tomando el menor valor entre la dirección X e Y. Asimismo, para el cálculo de q , que representa la carga de cada nivel de la vivienda, se usó la siguiente expresión:

$$q = \frac{(A_x + A_y) \times h \times p_m}{A_t} + p_s \quad (\text{Ec. 3.18})$$

¹³⁵ En el caso de las mamposterías de piedra históricas, comunes los análisis con MEVS, el valor simplificado para el cálculo es de 60 kPa.



Donde:

A_x = Área total de los muros resistentes en la dirección X en m^2 ;

A_y = Área total de los muros resistentes en la dirección Y en m^2 ;

h = Altura entre niveles en m;

p_m = Peso específico de la mampostería en kN/m^3 ;

p_s = Peso del pavimento por unidad de área en kN/m^2 ;

A_t = Área total cubierta por nivel en m^2 .

Para el p_m del adobe se tomó el valor de referencia 17 kN/m^3 (Vicente R. d., 2008), que coincidió con los valores de densidad de los adobes caracterizados físico-mecánicamente en el Capítulo IV y en investigaciones previas (Sanchez-Calvillo et al., 2021). El peso de los entrepisos y los sistemas de cubierta fue valorado respecto a los componentes de los sistemas y los pesos específicos de los mismos, simplificando en dos valores de carga según la tipología de cubierta existente¹³⁶, conservando el sistema tradicional con teja cerámica o sustituyendo este por lámina metálica, más ligera. Finalmente, el valor de la resistencia convencional se normaliza con un factor de corrección obteniendo el factor α (ver Ecuación X).

$$\alpha = C_{conv}/0.4 \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Con el factor α , cada vivienda puede ser evaluada asignando una clase de vulnerabilidad; en los casos de estudio de la investigación la resistencia convencional presentó valores bastante regulares, con una mayoría clara de la clase B (ver Figura 3.15) y algunas construcciones que presentaron una resistencia al corte ligeramente por debajo o por encima con una σ calculada de 0.09 y un C_v de 13.60%.

¹³⁶ Se estimó un valor de 1.40 kN/m^2 para las viviendas con sistema de cubierta tradicional, incluyendo el peso de la vigería de madera y la teja de cerámica; y un valor de 0.80 kN/m^2 para las viviendas que presentaron la sustitución del sistema tradicional por lámina metálica.

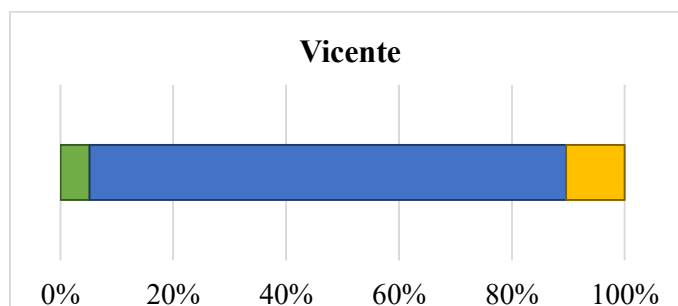


Figura 3.15. Distribución del parámetro Resistencia convencional del sistema estructural.

Se puede observar que en la clasificación cuantitativa de este parámetro intervienen varios factores tanto intrínsecos a la resistencia mecánica del material (la resistencia al corte, las densidades de los materiales estructurales), como los derivados de la geometría, morfología y distribución de los muros resistentes en la vivienda. El cálculo de la resistencia convencional resulta más complejo cuando se evalúan edificios de varios niveles que incorporan distintos sistemas constructivos, siendo una característica común en varias tipologías de la arquitectura vernácula.

3.3.5. Organización y conexión del sistema estructural

Este parámetro es analizado por todos los MEVS aplicados en la investigación, introducido en el primer modelo de la GNDT al ser un factor constructivo de gran importancia en las estructuras de mampostería, principalmente en aquellas que emplean sistemas tradicionales. Respecto a la organización del sistema estructural, se evalúa principalmente la conexión y la existencia de refuerzos entre los muros ortogonales del edificio, junto con el estado actual y la calidad de la unión entre las mismas paredes resistentes.

El parámetro está especialmente pensado y diseñado para las edificaciones vernáculas o históricas de mamposterías de roca, que presentan elementos de mayor calidad y resistencia en los encuentros de los muros. En el caso de las viviendas de adobe no es común encontrar estrategias o sistemas específicos de refuerzo en los encuentros de los muros, más allá de la eficiente traba entre los bloques (ver Figura 3.16a), que es un aspecto básico en la construcción de estas viviendas y no suele presentar grandes variaciones. En algunos casos se emplean estrategias como refuerzos horizontales o verticales de madera (ver Figura 3.16b)



o el uso de bloques de mayor calidad resistencia mecánica para reforzar las esquinas, con la técnica conocida como cadena de ángulo.



Figura 3.16: Organización y conexión del sistema estructural: (a) Cuatrapeo de mampostería de adobe en San Pablo Etla, Oaxaca, México; (b) Refuerzo de madera en esquina de una vivienda en Buga, Valle del Cauca, Colombia. Fotografías: (K. L. Salvador-Alcalá y Y. Velasco-Hernández, 2020; A. Sánchez-Calvillo, 2021).

La Figura 3.17 muestra la distribución de las clases de vulnerabilidad de la organización del sistema estructural acorde al método de Vicente y a SVIVA/SAVVAS, reflejando un mayor nivel de especificación para los segundos. Debido a la regularidad de los bloques de adobe y la trabazón asegurada entre los muros, las clases asignadas fueron favorables, mejores en el caso de los segundos MEVS que definen una clase A para las viviendas construidas con sistemas de tierra que no presenten juntas verticales continuas en las esquinas.

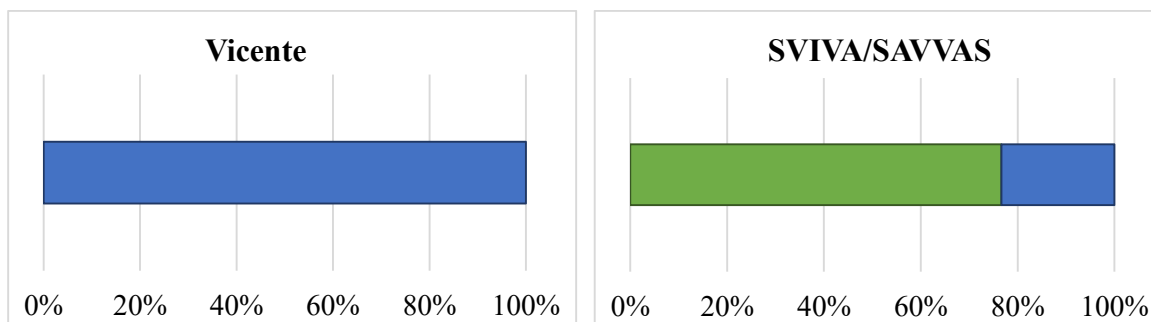


Figura 3.17. Distribución del parámetro Organización y conexión del sistema estructural.



3.3.6. Sistema de cimentación y características del terreno

Este parámetro introducido en el método de Vicente (2008) toma en consideración varios aspectos tanto externos como internos a las viviendas: desde las características topográficas y la inclinación del terreno, a la tipología y estado de conservación del sistema de cimentación existente. La finalidad es englobar en un solo parámetro la interacción entre el edificio y el terreno y poder asignar una clase en función de la inspección y la evaluación de las viviendas.

Vicente establece tres factores básicos para la asignación de clases: la tipología de cimentación, la pendiente (p) del terreno medida en %, y la diferencia de cota (Δh) de la cimentación expresada en metros. Para el primer factor se generaron guías para su clasificación a partir de la prospección en campo¹³⁷ (Vicente R. d., 2008), mientras que los otros dos pueden ser cuantificados a partir de la medición en campo.

Respecto a las cimentaciones, en las viviendas de adobe éste es un elemento todavía más crítico, ya que cuenta con dos funciones: en primer lugar, transmitir las cargas verticales de la estructura al terreno, como en cualquier edificación; y en segundo lugar cortar la ascensión por capilaridad de la humedad al ser los sistemas constructivos de tierra muy vulnerables al contacto con agua. Por ello, tradicionalmente las viviendas cuentan con una cimentación y sobrecimentación de roca (generalmente de 40 a 60 cm sobre el nivel del terreno) que desplanta los muros de adobe y los separa del suelo (ver Figura 3.18a). No obstante, es común encontrar deficiencias constructivas y problemas de humedad en algunas construcciones que no dejan suficiente sobrecimentación generando un deterioro de los muros en su parte más baja (ver Figura 3.18b).

¹³⁷ Las cimentaciones a base de piedra constituyen siempre el caso más favorable. De todas las viviendas evaluadas en la investigación no se encontró ninguna que no presentara este sistema. En algunos casos sí se penalizó la clase de vulnerabilidad por deterioros graves que presentaban las viviendas por la ascensión de la humedad.



Figura 3.18. Sistemas de cimentación en viviendas de adobe: (a) Cimentación y sobrecimentación tradicional con piedra volcánica en Tzintzuntzan, Michoacán, México; (b) Pérdida y disgregación por humedad de capilaridad en vivienda de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez Calvillo, 2020; 2021).

En cuanto a la diferencia de cota en las cimentaciones y la inclinación del terreno la relación es directamente proporcional, siendo factores muy importantes para asegurar o agravar la estabilidad estructural de las construcciones. La arquitectura vernácula por sus principios de adaptación y simplicidad siempre trata de buscar la facilidad de implementación, por lo que generalmente encontraremos terrenos llanos, ya sea por el contexto geográfico o por la acción del hombre. Las viviendas de casos de estudio de la investigación en general fueron edificadas en terrenos planos, con inclinaciones negligibles. Sin embargo, el ser humano también destaca por establecer asentamientos en los entornos más agrestes e inesperados de habitar; en la Figura 3.19 encontramos algunos ejemplos de viviendas desplantadas en vialidades con pendientes ligeras y pronunciadas, siendo algunas de las excepciones a la regla general.



Figura 3.19. Diferencia de cota e inclinación del terreno en viviendas de adobe: (a) Vivienda con cimentación tradicional de roca e inclinación ligera del terreno en SPE, Oaxaca; (b) vivienda en vialidad con pendiente pronunciada en CO, Chiapas. Fotografías: (K. L. Salvador-Alcalá y Y. Velasco-Hernández, 2020; L. J. Díaz-Juárez, 2020).

La Figura 3.20 muestra la asignación de clases de vulnerabilidad en las viviendas de adobe objeto de estudio, con más de un 80% de viviendas con clase A, debido a que estas cuentan con cimentaciones de roca y se desplantaron sobre terrenos llanos sin grandes inclinaciones. En el caso de CO algunas de las vialidades presentaban pendientes pronunciadas (ver Figura 3.18b), por lo que esta localidad obtuvo los peores resultados en este parámetro.

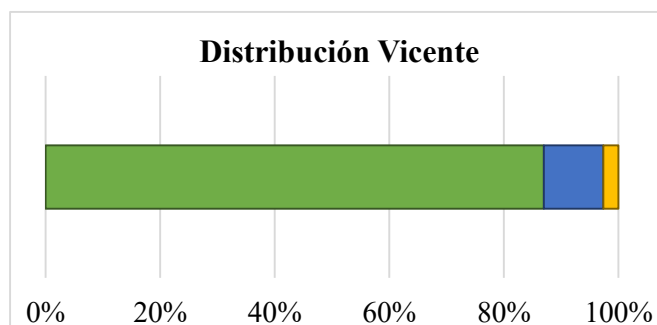


Figura 3.20. Distribución del parámetro Sistema de cimentación y características del terreno.



3.3.7. Sistema de diafragma horizontal

Este parámetro considera los elementos horizontales de unión en las viviendas, comúnmente conocidos como entrepisos o forjados, así como la unión de estos sistemas con los muros edificados. Es un parámetro cualitativo que dependerá del criterio del evaluador del inmueble, sin embargo, las guías metodológicas de los distintos MEVS permiten la caracterización y asignación de clases en función de la inspección de las viviendas y los sistemas constructivos presentes.

Vlachakis et al. (2019) reportan la rigidez de los sistemas de diafragma horizontales y su conexión con las estructuras verticales de muros como uno de los factores más trascendentales en la ocurrencia de mecanismos de fallo fuera de plano en mamposterías históricas. Estos sistemas transmiten las cargas horizontales y verticales a los muros, por lo que es muy importante que tengan una buena conexión con los muros del edificio; además, en el caso de sismo pueden generar un esfuerzo cortante que ponga el riesgo la estabilidad estructural.

Como se comentó, en las viviendas tradicionales de adobe, la solución más común para pavimentos o entrepisos es la viguería de madera. El sistema suele apoyarse sobre los mismos muros sin elementos adicionales para asegurar el anclaje, especialmente en la vivienda rural que presenta una mayor simpleza (ver Figura 3.21a); al contar mayoritariamente con un solo nivel, las vigas suelen extenderse sobre los muros para formar los aleros de las cubiertas sin una sujeción. En los edificios de mayor tamaño, o insertos en la traza urbana de núcleos de población, el sistema cuenta con algún tipo de fijación o encaste en los muros, asegurando una mejor conexión y rigidez, además de presentar vigas de coronamiento en el perímetro (ver Figura 3.21b).



Figura 3.21. Sistemas de diafragma en viviendas de adobe: (a) Sistema con vigería simple de madera apoyada sobre los muros en vivienda de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México; (b) Sistema de vigería encastada en los muros y tablones de madera en vivienda de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Para la asignación de clases, Vicente (2008) clasifica los pavimentos en tres tipologías: rígidos, semi-rígidos y deformables. En las viviendas de adobe rurales la mayoría de ejemplos corresponden a la última clase, con vigerías de madera ligeras que no aportan demasiada rigidez al conjunto. Ortega (2018), por otro lado, considera tres aspectos como fundamentales para definir la clase de vulnerabilidad de la estructura: la conexión entre viga y muro, la conexión del sistema de diagrama y el grado de flexibilidad de la solución constructiva. Por lo tanto, los MEVS consideran que la falta de ligazón y rigidez de estos sistemas aumenta la vulnerabilidad de las viviendas, motivo por el cual las clases de vulnerabilidad asignadas a los casos de estudio de las viviendas de adobe son generalmente bajas (ver Figura 3.22). El método de Vicente fue más restrictivo para la asignación de clases, incluyendo restricciones en función del estado de mantenimiento de los sistemas.

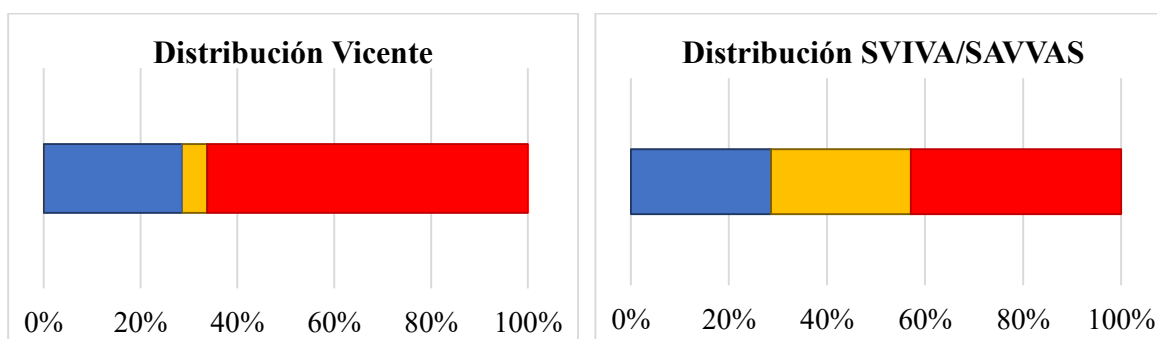


Figura 3.22. Distribución del parámetro Sistema de diafragma horizontal.



La mayoría de viviendas con clase B las encontramos en AR, debido a que los inmuebles presentan mayores dimensiones y consecuentemente una mejor tecnología constructiva y conexión entre los sistemas estructurales. Por otro lado, las unidades de SPE y SC, en entornos rurales, exhibieron en su mayoría sistemas flexibles de gran simpleza con una conexión deficiente con los muros. El rol de los diafragmas es crítico, ya que una conexión deficiente entre estos sistemas constructivos y los muros puede generar inestabilidad en la estructura y provocar el ya mencionado fallo fuera de plano.

3.3.8. Sistema de cubierta

Este parámetro considera el sistema de cubierta y su tipología (ver Figura 2.23), atendiendo a si ejerce o no un empuje lateral sobre los muros, y tomando en cuenta otros factores como la inclinación y el peso. Este impulso es especialmente decisivo en el caso de una afectación sísmica, ya que se incrementan las solicitaciones en los muros de fachada provocando un fallo fuera de plano y el consecuente colapso de la estructura.



Figura 3.23. Toma aérea de dron del centro de Ario de Rosales. Pueden observarse los sistemas originales de cubierta y la incipiente sustitución en algunas áreas. Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021)



No todas las cubiertas generan los mismos empujes en la estructura, dependiendo de la geometría, elementos de refuerzo existentes o los materiales utilizados. Vicente clasifica los tipos de cubiertas en impulsivas, poco impulsivas y no impulsivas; siendo estos los factores a evaluar para la asignación de clases¹³⁸. En cambio, SVIVA y SAVVAS ponderan cuantitativamente los factores de peso e inclinación y hacen una división de tipologías simple entre las que ejercen empuje lateral y las que no.

Es especialmente importante debido a que los sistemas tradicionales suelen ser sustituidos por sistemas modernos. En el caso de CO, y en menor medida en SPE y SC, un importante porcentaje de las viviendas habían sustituido sus cubiertas de teja cerámica por lámina metálica (ver Figura 3.24a), debido al fácil acceso e instalación. Por el contrario, en AR pudo comprobarse como muchos de los inmuebles también habían modificado los sistemas originales, pero en este caso la solución consistía en una extensión mediante material plástico (ver Figura 3.24b), siendo una situación muy común en todo el centro histórico. Sin embargo, esta alteración no sustituyó la teja, sino que aumentó la superficie de los aleros.



Figura 3.24. Alteraciones de las cubiertas tradicionales en los casos de estudio: (a) Sustitución por cubierta metálica en vivienda en San Pablo Etla, Oaxaca, México; (b) Extensión del alero mediante cubierta semiplástica en vivienda de Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020; A. Sánchez-Calvillo, 2020).

En cuanto a la clasificación de las viviendas y la asignación de las clases de vulnerabilidad según los distintos MEVS, la Figura 3.25 muestra la distribución del total de unidades analizadas, mostrando un comportamiento similar en los dos métodos con una mayoría de

¹³⁸ Para estos lineamientos se contempla una penalización de la clase de vulnerabilidad por el estado de conservación de los sistemas, siendo un factor crítico en el patrimonio vernáculo y las comunidades rurales.



clase A y B. La mayoría de las cubiertas observadas presentaron sistemas ligeros con poca inclinación, ejerciendo un empuje mínimo sobre los muros.

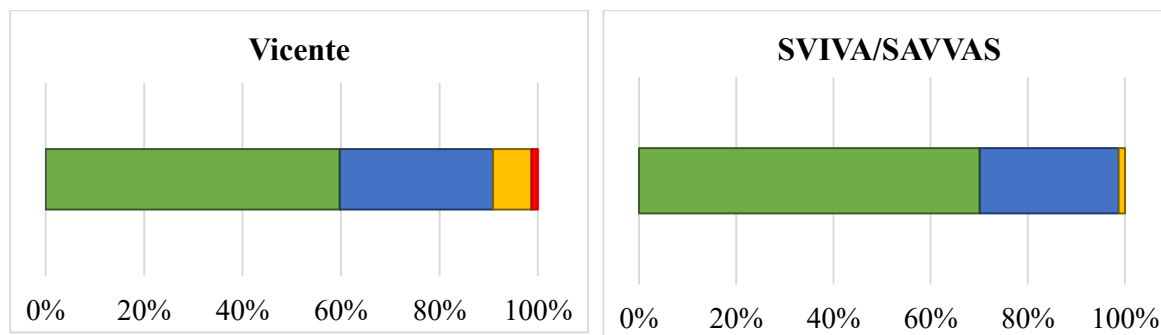


Figura 3.25. Distribución del parámetro Sistema de cubierta.

SPE presentó una mayor vulnerabilidad debido a que gran parte de sus viviendas cuentan con sistemas de cubierta a una sola agua, lo que genera un mayor empuje en una de las dos direcciones principales. Por el contrario, los casos de CO, AR y SC en su gran mayoría cuentan con cubiertas a dos aguas de inclinación ligera o media, por lo cual los resultados fueron más favorables.

3.3.9. Relación de huecos/vanos

Este parámetro expresa la relación en porcentaje entre los huecos de las viviendas y la superficie total de los muros. A menor superficie resistente peor será la respuesta sísmica del inmueble, especialmente si los muros con más cantidad de aberturas coinciden con la dirección principal del terremoto. Queda representado por un valor entre 0 y 1, que representa el porcentaje de vacíos arquitectónicos (puertas y ventanas) respecto al área total respectiva de los muros principales del inmueble en cada una de las direcciones principales.

Las viviendas de adobe destacan por tener pocas aberturas de tamaño reducido (ver Figura 3.26), ya que además de las causas estructurales, la disposición de las ventanas responde también a los modos de vida de muchas comunidades en México: “Debido a que los habitantes desarrollan una parte importante de sus labores cotidianas al aire libre, los espacios destinados al descanso, actividades sociales, preparación y consumo de alimentos normalmente no poseen ventanas, y cuando éstas se han incorporado, tienen dimensiones pequeñas” (Guerrero Baca L. F., 2019). No obstante, también es frecuente encontrar



inmuebles donde se han efectuado nuevas aberturas, en muchas ocasiones por imitación de los sistemas modernos o por los cambios de uso

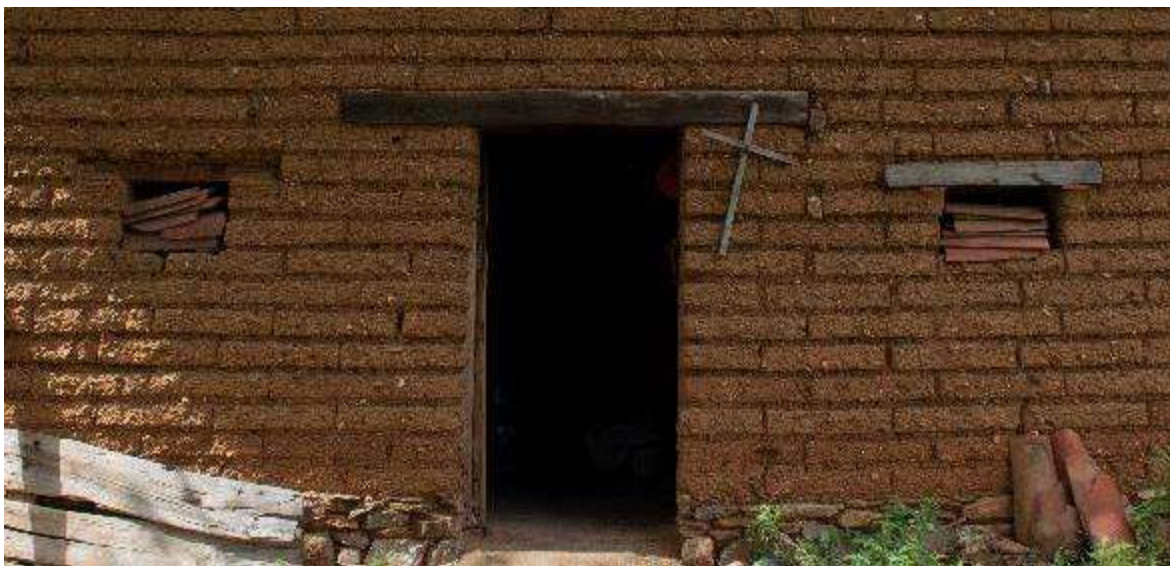


Figura 3.26. Vanos en fachada de vivienda en San Pablo Etla, Oaxaca, México. Fotografía: (K. L. Salvador-Alcalá y I. Velasco-Hernández, 2020)

En los levantamientos realizados se pudo observar que los coeficientes obtenidos fueron relativamente bajos, correspondiendo clases de vulnerabilidad de tipo A y B (ver Figura 3.27), presentando SPE los valores más bajos. Para muchas de las viviendas únicamente se encontraron vanos en la fachada principal, con muy pocos muros presentando coeficientes elevados, y en los escasos ejemplos por la apertura de vanos por motivos comerciales¹³⁹.

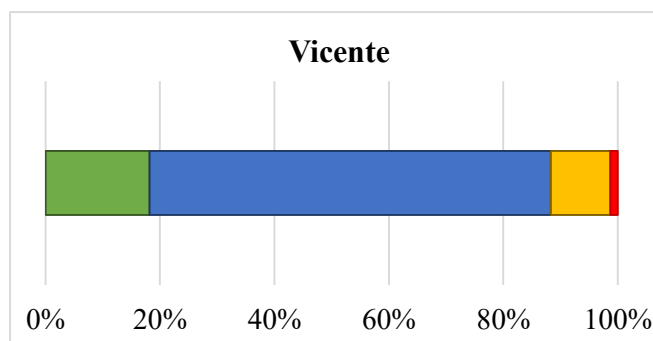


Figura 3.27. Distribución del parámetro Relación de huecos.

¹³⁹ AR8, AR28 y AR29 contienen aberturas de grandes dimensiones para permitir la entrada de vehículos de carga y descarga.



3.3.10. Desalineación de las aberturas

La desalineación de las aberturas es un parámetro introducido por Vicente (2008) con el objetivo de identificar y la regularidad y posicionamiento de las aberturas (puertas y ventanas) en los muros de las viviendas. Una deficiente distribución de los vanos puede tener influencia en la respuesta sísmica del edificio y el fallo fuera de plano de los muros.

Este parámetro cobra mayor importancia en los inmuebles de dos o más niveles, en los que la disposición de las aberturas juega un papel más importante. Sin embargo, también para las viviendas de una sola planta puede generarse un comportamiento deficiente a los esfuerzos sísmicos, principalmente cuando se insertan vanos de grandes dimensiones (ver Figura 3.28) que comprometen la seguridad estructural.



Figura 3.28. Ejemplos de desalineación de aberturas en los casos de estudio: (a) Apertura de puerta secundaria en vivienda de Copainalá, Chiapas, México; (b) Muro con vanos excesivos en vivienda de Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).

Como se ha comentado con anterioridad, la gran mayoría de las viviendas evaluadas en la investigación cuentan con un único nivel construido, siendo la representación típica de la casa de adobe. Por el mismo motivo la clase de vulnerabilidad predominante en este parámetro fue A (ver Figura 3.29), no obstante, la apertura de vanos sin el mejor criterio correspondió a una penalización en la asignación de clase.

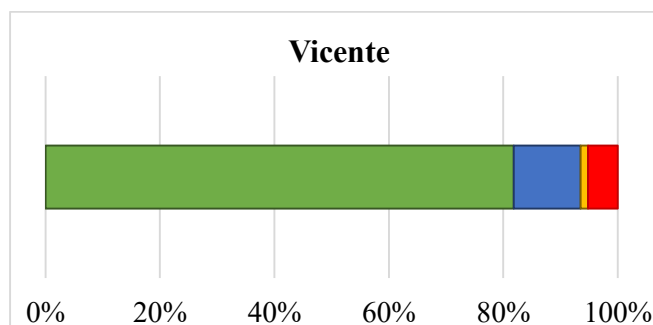


Figura 3.29. Distribución del parámetro Desalineamiento de las aberturas.

3.3.11. Número de niveles del inmueble

El número de niveles construidos en un inmueble aumenta en correlación directa su vulnerabilidad, al incrementar su centro de gravedad y ser más susceptibles a las acciones laterales (Ortega Heras, 2018), y también al multiplicar aquellos aspectos o deficiencias constructivas que pueda presentar la estructura. El parámetro cuantifica el número de niveles del inmueble (N), asignando una clase de vulnerabilidad en función del mismo, sin tomar en cuenta la altura total o la esbeltez del edificio, que son consideradas por otros parámetros.

Las viviendas de adobe objeto de estudio, más aún en el caso de las comunidades rurales, suelen contar con un solo nivel construido y alturas que no superan los cuatro metros (ver Figura Xa). Pese a ser infrecuente, podemos encontrar casos de viviendas rurales con varios niveles: Ríos Ramírez y Porcayo Victoriano (2019) reportan edificaciones residenciales con alturas de nueve metros en Hueyapan, estado de Morelos, México. En cuanto a los centros urbanos, es más común encontrar conjuntos de viviendas de mayor altura (ver Figura 3.30b); por ejemplo, los inmuebles históricos alrededor de la plaza central de AR contaban en su mayoría con dos niveles construidos¹⁴⁰.

¹⁴⁰ No fue posible realizar el acceso y el consecuente levantamiento arquitectónico y análisis mediante los distintos MEVS ya que estas edificaciones contaban con régimen de uso gubernamental y/o administrativo.



Figura 3.30. Ejemplos de distribución de niveles en viviendas de adobe: (a) Edificio de dos plantas en el centro de Cartago, Valle del Cauca, Colombia; (b) Vivienda aislada de un nivel en San Pablo Etla, Oaxaca, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021; K. L. Salvador-Alcalá y I. Velasco-Hernández, 2020).

Debido a las características de los casos de estudio no existió apenas variabilidad en la asignación de clases de vulnerabilidad (ver Figura 3.31), con una mayoría de asignación de clase A, excepto para el inmueble AR15 que cuenta con dos niveles construidos lo que corresponde a una clase B para el método de Vicente y una clase C para SVIVA y SAVVAS¹⁴¹.

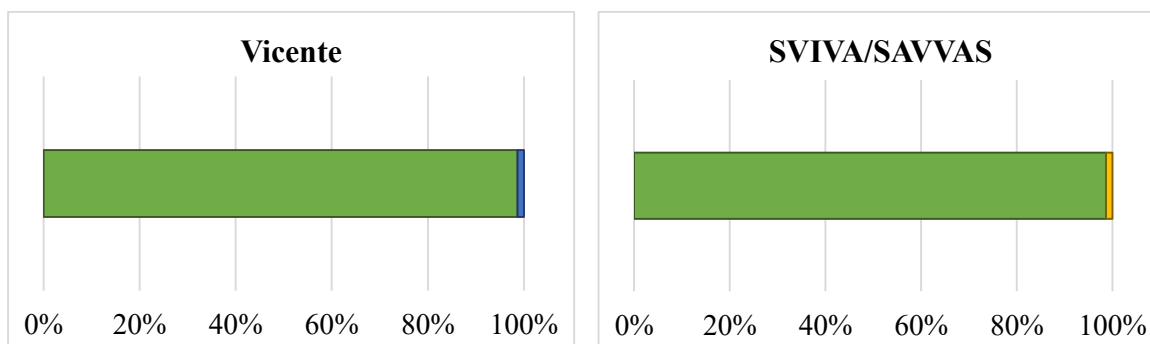


Figura 3.31. Distribución del parámetro Número de niveles.

3.3.12. Daño estructural previo y estado de conservación

Cualquier daño estructural previo en una edificación, independientemente de su severidad, tendrá un impacto directo en la respuesta sísmica del conjunto en mayor o menor grado. Además del daño estructural directo, que puede ser cuantificado y evaluado en función del

¹⁴¹ SVIVA y SAVVAS no consideran la clase B para este parámetro debido a la gran diferencia que supone para la respuesta estructural de un edificio de un solo nivel a otro de dos niveles.



grosor de las grietas, otro aspecto esencial de las construcciones vernáculas es su estado de conservación y grado de mantenimiento, considerando que muchos de los inmuebles son antiguos y sus materiales y sistemas constructivos necesitan ser monitoreados para evitar la aparición de deterioros.

El estado de conservación de las estructuras tiene una relación directa con el grado y la calidad del mantenimiento por parte de los usuarios, siendo este un aspecto fundamental en las edificaciones de tierra (Guerrero Baca L. F., 2007). Lamentablemente, la proporción de patrimonio de tierra en riesgo o estado de abandono en México es muy elevada, debido a condicionantes económicas y socioculturales descritas en el Capítulo I y II del documento, generando escenarios tan representativos como los que vemos en la Figura 3.32.

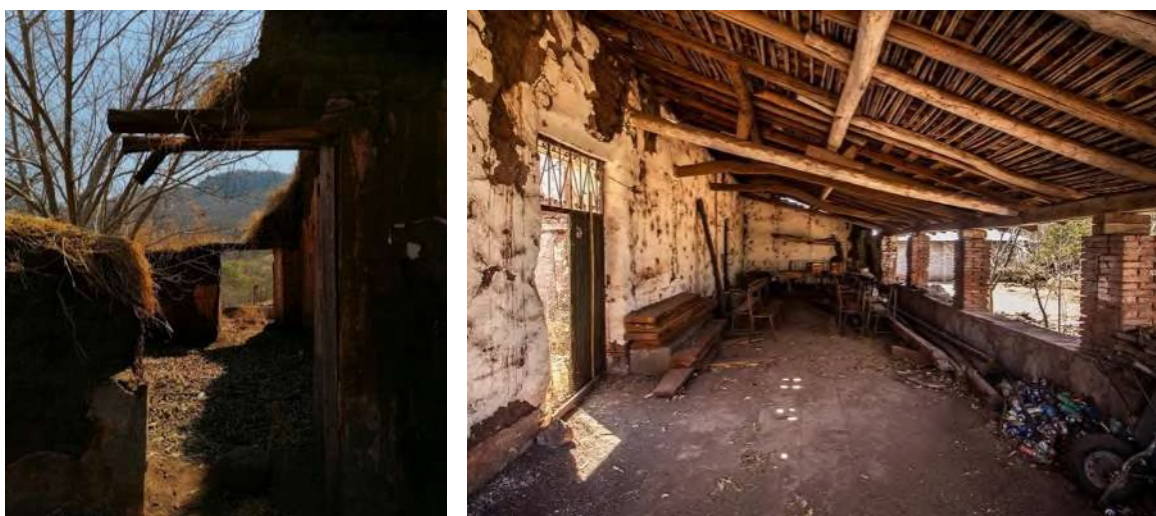


Figura 3.32. Vivienda SC01 en grave estado de deterioro en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

La asignación de clases de vulnerabilidad de este parámetro está bastante unificada: Ortega (2018) propone una clasificación, basada en los estudios de Masciotta et al. (2016), a partir de las fisuras y grietas presentes en el edificio y la deformación de otros elementos estructurales como la viguería. Vicente (2008) hace una clasificación muy parecida introduciendo además varios criterios de carácter cualitativo que pueden ser identificados mediante una inspección visual y prospección de los inmuebles.

Para la presente investigación se decidió seguir un criterio similar, aunque se dio una mayor importancia a la evaluación cualitativa de la inspección de los evaluadores. Debido a la



imposibilidad de medir la dimensión de las grietas¹⁴², se optó por asignar una clase de vulnerabilidad en función del estado de conservación general del inmueble y la presencia de deterioros o daños estructurales en sus sistemas constructivos. La configuración de las fichas de inspección de las viviendas¹⁴³ permitió tomar nota de todos los elementos y componentes de las edificaciones a detalle.

Otro aspecto crítico de las viviendas de adobe fue la presencia de humedades profundas, debido a que pueden comprometer y debilitar en gran medida la capacidad resistente de los muros (Beckett et al., 2020); o en el caso de las filtraciones en sistemas de cubierta pueden afectar a la vigería provocando el ulterior colapso de estos sistemas, una situación muy común en estas edificaciones que vemos ejemplificada en la Figura 3.33.



Figura 3.33. Vivienda en grave estado de deterioro en Ario de Rosales, Michoacán, México.
Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).

¹⁴² Principalmente por dos motivos: en primer lugar, los muros suelen contar con un recubrimiento o aplanado que esconde las posibles grietas; en segundo lugar, la imposibilidad de efectuar un análisis exhaustivo de muchas de las viviendas estudiadas.

¹⁴³ Revisar el apartado 2.2.2. Recolección de datos, prospección y criterios de inspección de las viviendas del Capítulo II para ver el modelo de ficha técnica y todas las partidas que toma en consideración.



La herramienta del levantamiento fotográfico también fue de especial utilidad, al permitir identificar algunos deterioros y lesiones que no fueron aperecidos durante la prospección en campo, como por ejemplo el estado de las cubiertas a partir de la fotografía con dron. En este caso la experiencia previa en proyectos de restauración patrimonial e investigación en arquitectura vernácula de los integrantes del equipo fue de gran utilidad (Sánchez-Calvillo et al., 2022). El buen criterio de los evaluadores, liderados por especialistas en restauración de monumentos permitió evaluar versadamente los daños presentes y el estado de conservación.

Respecto a los casos de estudio se observaron todo tipo de situaciones en referencia a la conservación y preservación de la arquitectura vernácula. Debido a la gran importancia que tiene el mantenimiento, cuando las viviendas son abandonadas o quedan únicamente habitadas por personas mayores, el deterioro se acelera en pocos años. En general el estado de conservación presentado por el conjunto de viviendas fue bueno, como se observa en la Figura 3.34, con algunas excepciones marcadas en las que los inmuebles de AR, SC y SPE presentaron un estado de deterioro avanzado, como el mostrado en la Figuras 3.32 y 3.33.

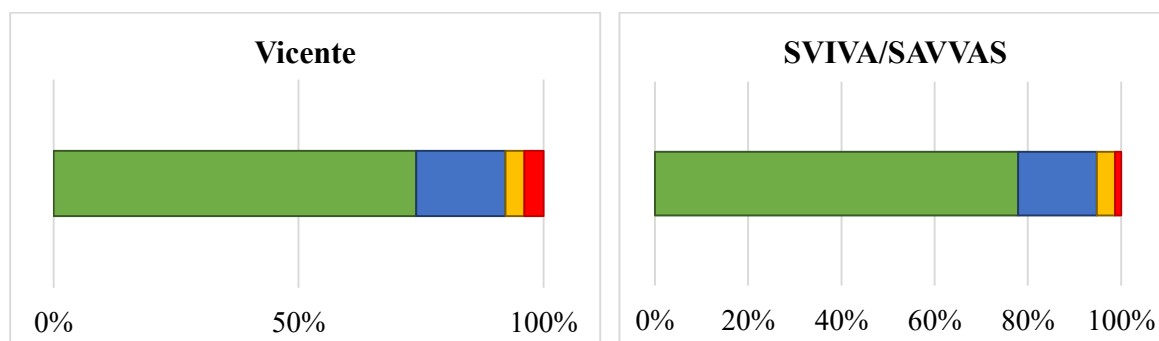


Figura 3.34: Distribución del parámetro Daño estructural previo y estado de conservación.

3.3.13. Índice de masa de la construcción

El índice de masa de una construcción se expresa mediante un coeficiente que relaciona la regularidad del edificio en planta, así como su simetría respecto a los dos ejes ortogonales principales. Ortega (2018) define este parámetro a partir de la regularidad en planta presente en otros MEVS, proponiendo un procedimiento de cálculo basado en la densidad de muros que podemos ver en las siguientes expresiones:

$$y_x = A_{wx}/A_w \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$y_y = A_{wy}/A_w \quad (\text{Ec. 3.20})$$



Donde:

y_x = Índice en masa en la dirección X;

y_y = Índice en masa en la dirección Y;

A_{wx} = Área resistente de los muros estructurales en la dirección X;

A_{wy} = Área resistente de los muros estructurales en la dirección Y;

A_w = Área resistente total de los muros de la vivienda¹⁴⁴.

El método del cálculo de la densidad de muros, empleado comúnmente en la revisión estructural de monumentos históricos (Sánchez C. & Martínez R., 2018), está ligado directamente a este parámetro, siguiendo un procedimiento de cálculo muy similar para obtener los valores cuantitativos. El coeficiente se calculará midiendo la superficie de los muros en las dos direcciones principales y haciendo un sumatorio total.

Para este parámetro, las disposiciones en planta más cercanas a la cuadratura serán las más valoradas, ya que la estructura responderá de forma solidaria a las solicitaciones sísmicas, con una distribución de las cargas balanceada. Sin embargo, a medida que la vivienda se aleje de esta geometría “ideal”, el coeficiente tomará un valor más restrictivo para el cálculo de la vulnerabilidad. En los métodos SVIVA y SAVVAS se propone una distribución de clases a partir de los valores calculados, dicha clasificación fue empleada para los casos de estudio de las viviendas de adobe; observando la distribución del parámetro en la Figura 3.35, encontramos una asignación de clases de vulnerabilidad desfavorables, con la presencia de C y D y mayoría de esta última.

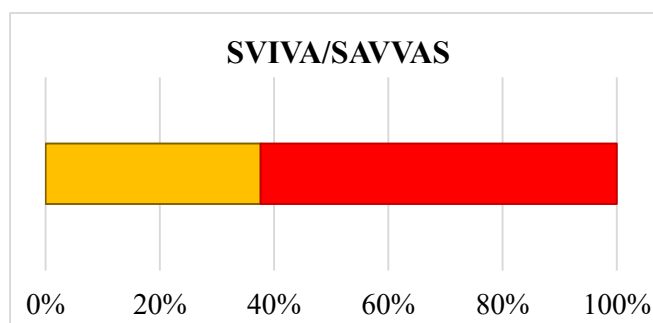


Figura 3.35. Distribución del parámetro Índice de masa.

¹⁴⁴ En el caso de construcciones de varios niveles el cálculo será el mismo contemplando la sumatoria del área resistente de los muros en todos los niveles.



Las viviendas de adobe de los casos de estudio reportaron geometrías simples y proporciones regulares entre las dos direcciones principales, además de no contar con extensiones o cuerpos salientes excepto en contadas ocasiones. Sin embargo, los resultados de la asignación de clases mostraron una clara vulnerabilidad de los inmuebles en este sentido, aspecto que resulta llamativo al comparar con los resultados del parámetro de irregularidad en planta, en el que muchas viviendas presentaron clases de vulnerabilidad A y B derivadas de sus geometrías simples y regulares. En futuros desarrollos de la investigación se plantea una revisión del parámetro y un ajuste las clases.

3.3.14. Irregularidad en planta

La disposición y morfología en planta de cualquier construcción es un factor básico en el desempeño estructural de la misma, puesto que una configuración regular asegura una respuesta solidaria del conjunto. A diferencia del método del índice de masa planteado en SVIVA y SAVVAS, el parámetro de irregularidad en planta fijado por la GNDT y delimitado minuciosamente por Vicente (2008), cuenta con la ventaja de considerar excentricidades en masa de los inmuebles como aquellos cuerpos separados de la estructura primaria que siguen contando con un papel clave en la resistencia del conjunto¹⁴⁵.

Vicente asigna valores a partir del cálculo de los coeficientes β_1 y β_2 , definidos por la geometría en planta de los sistemas resistentes del edificio. Mediante el coeficiente β_2 podemos estimar la influencia de los cuerpos salientes respecto a la construcción base, lo cual es de gran importancia en muchos de los casos de estudio, debido a la evolución y crecimiento de las viviendas a lo largo de las décadas y fenómenos como la relotificación de los que se habló en los anteriores capítulos. Las siguientes expresiones definen el proceso de cálculo de los coeficientes:

$$\beta_1 = a/L \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$\beta_2 = b/L \quad (\text{Ec. 3.22})$$

¹⁴⁵ No se toman en cuenta los añadidos constructivos que no generan una verdadera influencia en el comportamiento estructural de la edificación; como por ejemplo la construcción de unos baños anexos al conjunto, siendo esta una situación muy habitual en la autoconstrucción y vivienda rural.



Donde:

a = Menor dimensión del edificio;

L = Mayor dimensión del edificio;

b = Mayor dimensión del cuerpo saliente.

En los casos de estudio seleccionados se reportaron configuraciones muy distintas: mientras que las viviendas de SPE y SC presentan en su mayoría morfologías cuadradas o rectangulares, en el centro de AR encontramos tipologías en L, U o edificadas en torno a un patio central (ver Figura 3.36), siendo aspectos característicos en la arquitectura tradicional de localidades con pasado colonial.



Figura 3.36. Vivienda en forma de U o U invertida en AR. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).

La distribución de las clases de vulnerabilidad para la irregularidad en planta es mucho más variable en comparación con otros parámetros (ver Figura 3.37); lo cual no es necesariamente negativo ya que expresa la riqueza de la arquitectura vernácula en cuanto a sus configuraciones y morfologías de las viviendas. Además, otros condicionantes más cercanos en el tiempo, como el crecimiento poblacional o la introducción de sistemas constructivos industrializados han generado cambios significativos en la distribución y morfología de las viviendas.

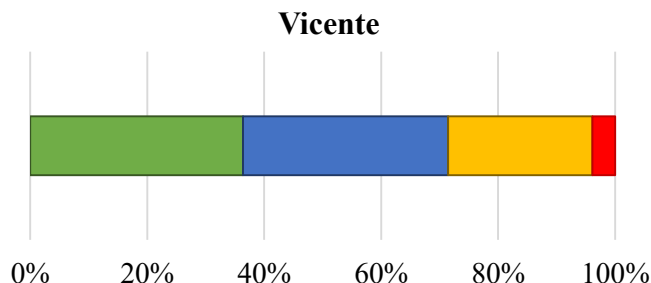


Figura 3.37. Distribución del parámetro Irregularidad en planta en los métodos GNDT, Formisano y Vicente.

El factor de la alteración constructiva se encuentra presente en los cuatro casos de estudio, dando lugar a clases más desfavorables debido a espacios y estructuras añadidas al edificio original, la subdivisión del cuerpo principal en nuevas unidades, o la presencia de espacios de trabajo y cocinas; encontrando muchos de estos patrones en CO y SC. En cambio, las viviendas de AR, por su inserción en un contexto urbano más delimitado no presentan habitualmente estas modificaciones.

3.3.15. Irregularidad en altura

Este parámetro evalúa la variación en masa de las viviendas en función de su distribución en altura, con una valoración positiva de las construcciones que presentan mayor regularidad. El concepto de la variación de masa en función de los niveles del edificio no tiene mayor relevancia en los casos de estudio de viviendas de adobe, debido a que éstas cuentan con morfologías muy regulares y un solo nivel construido; sin embargo, encontramos una gran cantidad de ejemplos con estructuras porticadas y galerías en fachada.

La variación de rigidez en altura considera tanto la distribución de masa y área en función de la altura del edificio, como la inclusión de torres o elementos similares, o la presencia de galerías y pórticos. En el método de Vicente se especifican los rangos y criterios cuantitativos de evaluación de este parámetro, incluyendo correcciones y agravamientos de clase por sus características constructivas o alteraciones que modifiquen su resistencia estructural. Una de estas agravaciones de clase corresponde a la apertura de grandes vanos que comprometan la rigidez del edificio (ver Figura 3.38).



Figura 3.38. Irregularidad en altura de la vivienda AR29 por cambio de uso a estacionamiento.
Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).

La Figura 3.39 muestra la distribución del parámetro irregularidad en altura. Las localidades de SPE y CO presentaron una mayoría de viviendas con clase de vulnerabilidad A, debido a que las viviendas presentaban una regularidad constante y contaban con un solo nivel construido; en cambio en AR y especialmente en SC por sus condiciones climáticas, muchas viviendas presentaron clase de vulnerabilidad B en consecuencia de sus fachadas porticadas.

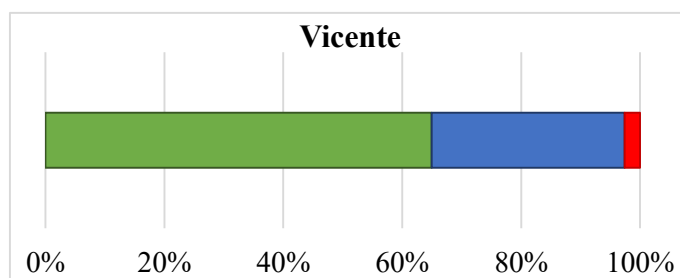


Figura 3.39. Distribución del parámetro Irregularidad en altura en los métodos GNDT, Formisano y Vicente¹⁴⁶.

¹⁴⁶ Los casos de estudio AR28 y AR29 presentaron grandes aberturas en fachada realizadas como intervenciones modernas, ya que ambos inmuebles funcionan como estacionamientos (ver Figura 3.39), con una asignación de clase D según los criterios de evaluación de Vicente.



3.3.16. Posición e interacción del edificio con otros inmuebles

La posición de un edificio dentro de un agregado urbano (grupo de edificios) es un aspecto crítico en la respuesta estructural del mismo, ya que su comportamiento no puede evaluarse de forma singular (ver Figura 3.40). Los primeros métodos de índice de vulnerabilidad no consideraban este aspecto, al analizar los inmuebles como objetos aislados; no obstante, en trabajos más recientes se ha tomado en cuenta cualidades como la posición en interacción, introducidos como parámetro de vulnerabilidad tanto en el método de Vicente (2008) como en el de Formisano (2015). Ambos MEVS permitieron evaluar el parámetro para los casos de estudio de viviendas de adobe, dando lugar a resultados bastante variables según los criterios de medición.



Figura 3.40. Conjunto de agregados urbanos en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021)

Formisano (2015) formula una mayor vulnerabilidad de las edificaciones ubicadas en las esquinas de vialidades, hecho que coincide con el comportamiento reportado en eventos sísmicos alrededor del mundo. Las viviendas con esta configuración sufren daños estructurales severos debido al colapso de sus dos fachadas y la estructura de cubierta (Blondet y otros, 2008), hecho observado en edificaciones tradicionales de adobe tras eventos catastróficos.



En el método de Formisano únicamente se evaluaron aquellos edificios insertos en centros urbanos, excluyendo aquellas edificaciones aisladas, motivo por el cual se procesaron las viviendas de AR y CO, al ser los otros casos de estudio poblaciones de carácter más rural. Para el parámetro P12: posición e interacción del edificio con otros inmuebles, las cuatro clases de vulnerabilidad responden a diferentes disposiciones de las viviendas en la traza urbana. La clase más favorable (A) es la que corresponde a edificios con colindancia en tres de sus direcciones (excluyendo la fachada que siempre da a la vialidad), la segunda clase (B) concierne a los edificios con colindancia en dos direcciones, comúnmente referidos entre medianeras; la tercera (C) a las edificaciones en esquina, y la cuarta (D) a los edificios con una sola colindancia situados en los extremos de las vialidades.

Observando la Figura 3.41, encontramos una predominancia de edificios con asignación de clase B, debido a que las viviendas de adobe en la gran mayoría de casos aun formando parte de ameznamientos cuentan con un patio trasero, por lo que cuentan con edificios adyacentes en dos direcciones. Por otro lado, muchas de las viviendas registradas se encontraban en esquinas ya que suelen tener el uso de local o negocio y permitieron la facilidad de inspección durante la campaña de campo.

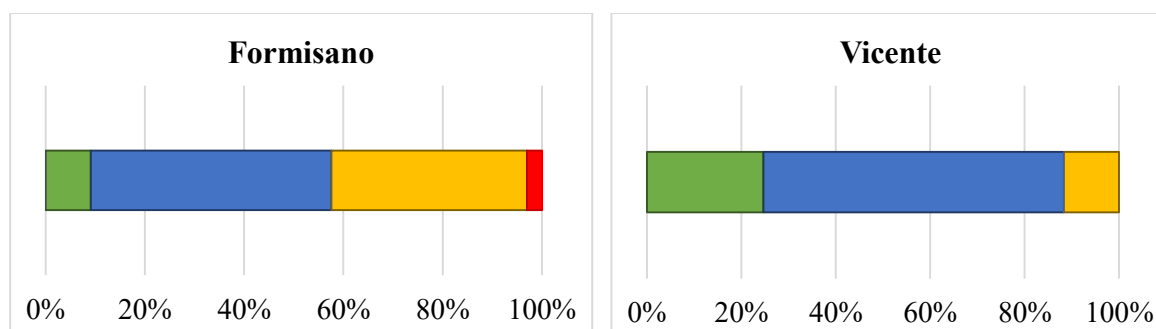


Figura 3.41. Distribución del parámetro Posición e interacción del edificio con otros inmuebles¹⁴⁷.

El método de Vicente, en cambio, permite analizar cualquier tipo de vivienda ya se encuentre aislada o en contacto con otros inmuebles, de un modo mucho más esquemático respecto a sus características. Como puede observarse, la distribución de clases es muy distinta a la figura anterior, con una generalidad de la clase B, que corresponde a las viviendas aisladas;

¹⁴⁷ A la vivienda AR12 se le asignó la clase de vulnerabilidad D por encontrarse en una esquina de la vialidad, pero debido a alteraciones constructivas del inmueble encontrarse desligada y sin contacto con otras estructuras en dos de sus superficies medianeras.



mientras que la clase A a las que están en medianera y la clase C a aquellas situadas en las esquinas de los amezanamientos. Otro punto de interés es que Vicente considera un factor de agravamiento de la clase de vulnerabilidad por el desnivel entre pavimentos o forjados de los inmuebles colindantes¹⁴⁸, muy similar al parámetro presentado por Formisano en su método, P13. Número de estructuras horizontales interdispuestas.

3.3.17. Presencia de elementos no-estructurales

Se consideran elementos no estructurales aquellos que no forman parte del sistema portante del edificio pero que pueden agravar el nivel de daño; su inclusión en el índice de vulnerabilidad radica en que con su colapso pueden afectar a la estabilidad del inmueble o provocar daños a sus usuarios. Vicente (2008) cita como ejemplos de elementos no estructurales las cornisas, barandas, frontones, mansardas, chimeneas, etc.

La distribución del parámetro en la Figura 3.42 denota la simpleza de las construcciones de adobe, tipologías que suelen carecer de añadidos estéticos y ornamentales, buscando ante todo la funcionalidad y el confort. La gran mayoría de viviendas analizadas no cuentan con ninguno de estos elementos, a excepción de algunos escasos ejemplo en AR que por acciones de alteración constructiva han añadido algunos elementos de esta clase a la tipología original (ver Figura 3.43).

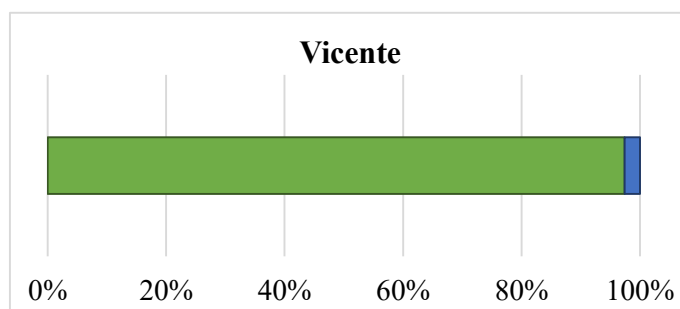


Figura 3.42. Distribución del parámetro Presencia de elementos no estructurales.

¹⁴⁸ En el caso de presentarse irregularidades por el efecto sísmico de los pavimentos rígidos o semi-rígidos de edificios adyacentes (efecto pounding), se penalizará la clase de vulnerabilidad del inmueble en un nivel.



Figura 3.43. Alteración de los sistemas tradicionales y las fachadas mediante cornisas y ménsulas en aberturas de viviendas de AR. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

La influencia de este factor es relativa, contando con poco peso en la mayoría de los MEVS. Flores y Ferreira (2019) consideran que estos elementos de carácter no estructural pueden llegar a poner en peligro la estabilidad de la edificación, por lo que es importante su consideración y registro durante la inspección de inmuebles, siendo elementos fáciles de obviar incluso por los profesionales más experimentados.

3.3.18. Presencia de edificios adyacentes con diferente altura

Formisano contempla este parámetro como uno de los cinco nuevos integrados en su modificación del sistema GNDT para su aplicación en conjuntos de inmuebles y centros históricos. Debido a los esfuerzos horizontales que sufre una construcción al recibir una señal sísmica, la interacción con las edificaciones colindantes influye directamente en su vulnerabilidad. Vicente (2008) introduce una corrección a su parámetro de vulnerabilidad P9. Irregularidad en altura, modificando la clase asignada en función de la diferencia de altura del edificio con los adyacentes del agregado urbano. Sin embargo, este constituye un primer planteamiento hasta que el método propuesto por Formisano termina de definir este concepto y lo establece como parámetro básico.



En la Figura 3.44 puede observarse la asignación de clases propuesta por Formisano et al. (2011), siendo el caso más favorable el de un conjunto de inmuebles con alturas regulares, circunstancia predominante para los núcleos urbanos con mayoría de viviendas de adobe. Por el contrario, la peor situación corresponde al caso de un inmueble situado entre dos construcciones de menor altura, ya que los últimos niveles del mismo son libres de deformarse lateralmente.

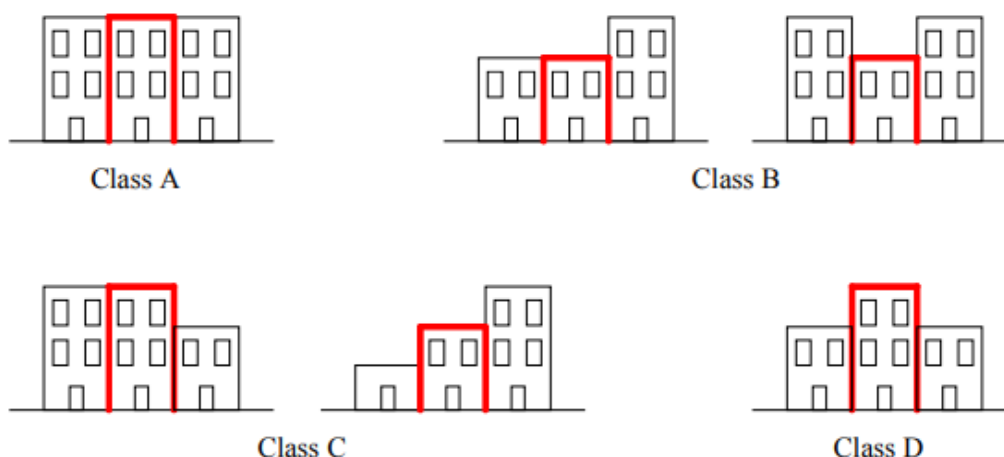


Figura 3.44. Asignación de clases de vulnerabilidad según la interacción en altura entre edificios (Formisano A. et al., 2011).

En la Figura 3.45 encontramos la distribución del parámetro P11, exhibiendo un predominio de la clase de vulnerabilidad A, seguido de algunos inmuebles con asignación de clase B. Una característica común en los centros urbanos de localidades rurales es la homogeneidad en altura, encontrando construcciones de uno o dos niveles con pocas alteraciones de este factor morfológico.

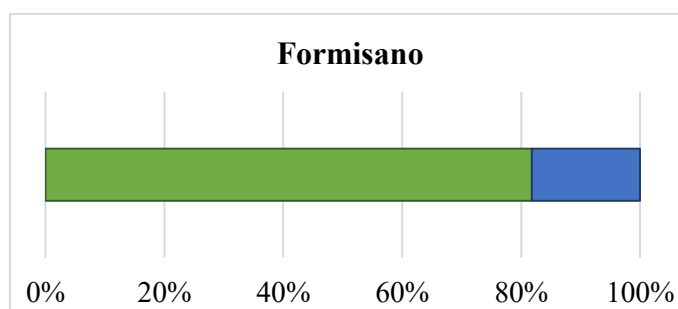


Figura 3.45. Distribución del parámetro Presencia de edificios adyacentes con diferente altura.



De igual forma, los reglamentos para la construcción en centros históricos, que normalmente conjuntan viviendas de mampostería de roca y adobe, limitan el aspecto de la altura de las edificaciones para no romper con la imagen y traza urbana de la localidad. Algunas viviendas sí mostraron una clase de vulnerabilidad B, debido a la alteración constructiva en las localidades estudiadas (ver Figura 3.46). Una situación frecuente es la de viviendas de adobe que han quedado embebidas entre construcciones contemporáneas, generalmente edificadas mediante estructuras de concreto o albañilería confinada. Estas últimas generalmente cuentan con dos o más niveles, al contrario de las viviendas tradicionales que se construyeron en un solo nivel.



Figura 3.46. Viviendas de adobe situadas junto a edificaciones de mayor altura: (a) Vivienda entre dos edificaciones más altas en Copainalá, Chiapas, México; (b) Vivienda junto a construcción de concreto armado de mayor altura en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021)

3.3.19. Efecto de la heterogeneidad estructural y/o tipológica entre edificios adyacentes

Este parámetro considera los sistemas constructivos de los edificios adyacentes a la unidad de estudio y evalúa la heterogeneidad del agregado urbano. La clase de vulnerabilidad es asignada en función de si los inmuebles colindantes ostentan una mejor, peor capacidad mecánica, o por el contrario presentan la misma tipología y materiales. Tomando en cuenta las directrices de Formisano et al. (2011), las viviendas adyacentes a estructuras de concreto armado o materiales industrializados serán las que presenten la mejor respuesta sísmica. No obstante, este es un escenario muy frecuente, ya que debido a la transformación urbana es muy común encontrar viviendas de adobe enclavadas entre edificios de concreto, que presentan un mayor confinamiento y rigidez estructural.



En los casos de estudio de CO y AR, especialmente el primero, encontramos una considerable cantidad de viviendas de adobe posicionadas entre construcciones de concreto armado u otros sistemas industrializados (ver Figura 3.47), con capacidades mecánicas muy superiores a los bloques de tierra cruda. El avance de las técnicas modernas es notable y cada vez es más difícil encontrar agregados donde la tierra sea el material predominante en muros. Incluso es posible encontrar una heterogeneidad estructural en las mismas unidades de estudio (ver Figura 3.48), en las que distintos materiales y sistemas constructivos son combinados, en muchas ocasiones sin el mejor criterio.

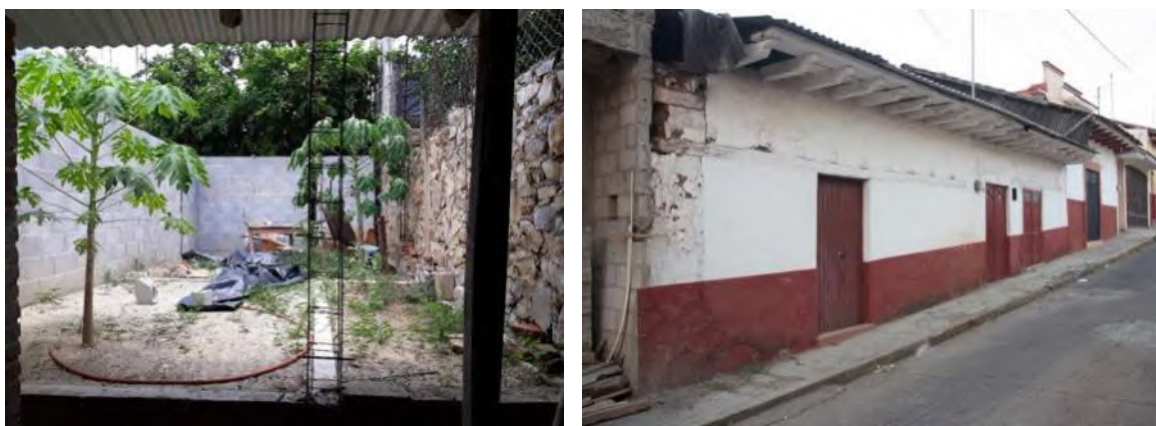


Figura 3.47. Heterogeneidad estructural entre construcciones: (a) Vista desde una vivienda de adobe en Copainalá, Chiapas, México; (b) Vivienda de adobe en Ario de Rosales, Michoacán, México.

Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021)



Figura 3.48. Heterogeneidad estructural en las mismas viviendas: (a) Columna de tabique recocido con mortero de unión a base de tierra; (b) Combinación entre sistemas de muros: adobe, madera y bloque de cemento. Fotografías: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020).



La Figura 3.49 muestra la distribución de las clases de vulnerabilidad para el conjunto evaluado. El centro de AR presentó gran cantidad de viviendas evaluadas con clase de vulnerabilidad C, debido a que la construcción con adobe es descrita como de menor capacidad estructural que otros sistemas más modernos, y la homogeneidad de la localidad está más preservada. Por el contrario, en CO muchas de las edificaciones quedaron rodeadas por viviendas de concreto, lo cual asegura una mejor estabilidad en caso de sismo.

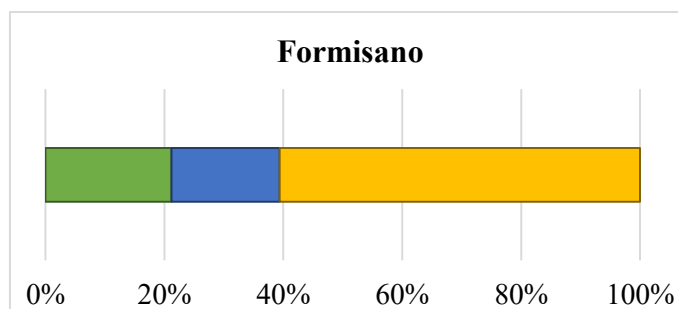


Figura 3.49. Distribución del parámetro Efecto de la heterogeneidad estructural entre edificios adyacentes.

3.3.20. Diferencia en porcentaje de aberturas con edificios adyacentes

En los procesos comentados en anteriores capítulos acerca de la transformación, transfiguración y sustitución de la arquitectura vernácula, se trató el tema de las alteraciones e intervenciones constructivas de las viviendas tradicionales. Una de las soluciones más comunes en los centros urbanos es la apertura de nuevos vanos en las viviendas, especialmente en las fachadas; una de las principales causas es la relotificación de los predios, que al dividirse sufren la necesidad de incorporar nuevos accesos; otra causa que también fue frecuente encontrar en los estudios de campo es el uso comercial de gran parte de los inmuebles situados en centros históricos.

Respecto al parámetro y su identificación en las viviendas de adobe se presentan varias situaciones posibles: el caso más favorable contempla que los edificios adyacentes tienen distribuciones y porcentajes de aberturas iguales o similares a la unidad de estudio (ver Figura 3.50a), siendo una situación común en centros históricos para evitar romper la imagen urbana. Otro caso muy común es la apertura de nuevos vanos en las edificaciones antiguas (ver Figura 3.50b), que además se suelen efectuar siguiendo los modelos de vivienda contemporáneos en los que las aberturas tienen mayores dimensiones.



Figura 3.50. (a) Agregado de viviendas de bahareque con porcentaje de aberturas similar; (b). Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021, A. Solís-Sánchez, 2020).

La Figura 3.51 muestra las posibles condiciones de los agregados urbanos y la propuesta de asignación de clases de Formisano et al. (2015). Encontramos cuatro posibles escenarios: en el primero se mantiene una homogeneidad tipológica, en el segundo las viviendas adyacentes presentan un menor porcentaje de aberturas, en el tercero el porcentaje es todavía más reducido, mientras que en el cuarto escenario, el más desfavorable, las viviendas adyacentes presentan un porcentaje de aberturas mucho más elevado respecto a la vivienda analizada.

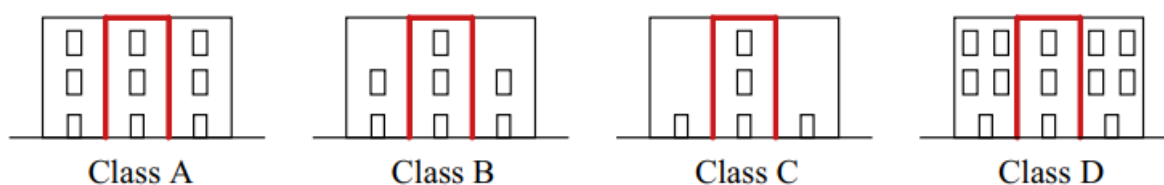


Figura 3.51. Clases de vulnerabilidad según la diferencia en porcentaje de aberturas en fachadas de edificios adyacentes (Formisano A. et al., 2011).

Aplicando las directrices propuestas por Formisano, la Figura 3.52 muestra la distribución de las clases de vulnerabilidad para el parámetro P5. Las localidades estudiadas, CO y AR, presentaron una mayoría clara de clase de vulnerabilidad A, debido a que las construcciones mantuvieron cierto orden en la distribución y el porcentaje de las aberturas. En el caso de estudio de AR se reportaron algunas viviendas con clase C, principalmente por la abertura de nuevos vanos para fines comerciales generando un mayor porcentaje de huecos en las fachadas.

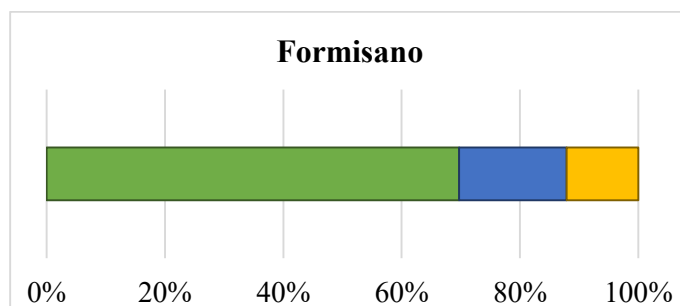


Figura 3.52. Distribución del parámetro Diferencia en porcentaje de aberturas en edificios adyacentes.

3.3.21. Número de estructuras horizontales interpuestas

El concepto de estructuras horizontales interdispuestas hace referencia a los conjuntos de agregados en los que los distintos edificios presentan diferentes configuraciones en altura provocando que los forjados o entrepisos queden situados a distinto nivel (ver Figura 3.53). Las acciones y esfuerzos dinámicos producidos por los sismos pueden desplazamientos en las estructuras horizontales rígidas que pueden llegar a dañar y comprometer la estabilidad estructural de los muros colindantes y los elementos comunes de los edificios mediante el efecto conocido como *hammering* (Chieffo N. et al., 2022).

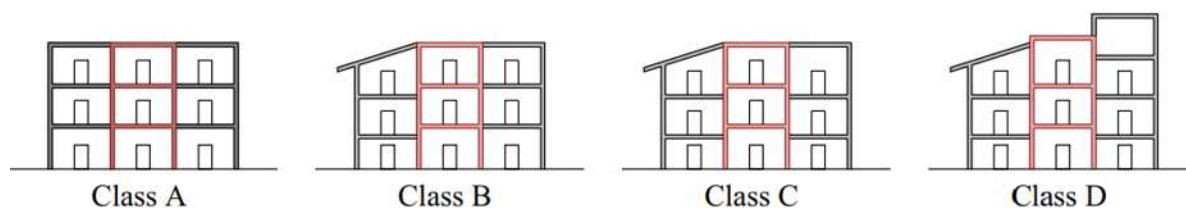


Figura 3.53. Clases de vulnerabilidad según el número de estructuras horizontales interdispuestas (Formisano A. et al., 2011).

Los autores asignan el menor peso a este parámetro para la propuesta metodológica, aclarando que en la calibración numérica previa a partir de los análisis *pushover* no generó aumentos significativos en los índices de vulnerabilidad para las dos direcciones posibles (Formisano A. et al., 2015). Sin embargo, también dejan claro que existe un efecto directamente proporcional entre la presencia de las estructuras interpuestas y el aumento de la vulnerabilidad en las viviendas.



Los autores presentan varias situaciones posibles para la asignación de una clase: la ausencia total de estructuras interpuestas, la presencia de estructuras interpuestas en una de las colindancias, y la presencia en ambas colindancias del edificio. La Figura 3.54 muestra la distribución del parámetro, con una clara mayoría de la clase de vulnerabilidad A, la más favorable, debido a que las localidades estudiadas presentaron una configuración en altura muy similar en todas sus viviendas.

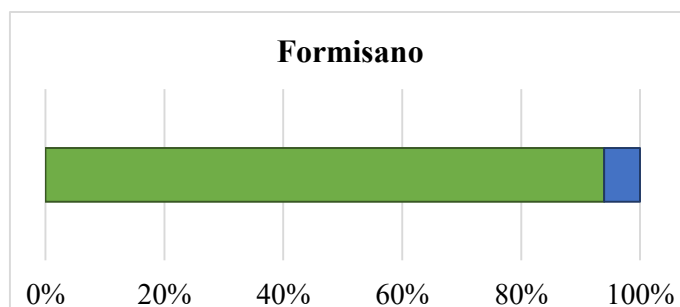


Figura 3.54. Distribución del parámetro Número de estructuras horizontales interpuestas.

Únicamente dos unidades, CO10 y AR28, reportaron estructuras horizontales interdispuestas, ambas debido a que fueron construidas viviendas con sistemas modernos a su alrededor (ver Figura 3.55). En el caso de AR28, esta fue una de las grandes casas originales del centro de la localidad, presentando unas grandes dimensiones y alturas, que las construcciones contemporáneas no suelen asumir.



Figura 3.55. Viviendas de adobe con estructuras horizontales interdispuestas en el agregado urbano: (a) Vivienda CO10 en Copainalá, Chiapas, México; (b) Vivienda AR28 en Ario de Rosales, Michoacán, México. Fotografías: (L. J. Díaz-Juárez, 2020; A. Solís-Sánchez, 2021).



Sin embargo, los resultados de este parámetro fueron muy positivos, resultando en una disminución del índice de vulnerabilidad (ver siguiente apartado del capítulo) debido al peso negativo que Formisano et al. asignan a los cinco nuevos parámetros propuestos. Del estudio tipológico y el levantamiento de las viviendas pudo comprobarse que, pese a la sustitución y construcción de nuevos inmuebles con sistemas industrializados, las nuevas edificaciones respetaron las proporciones originales de los agregados, lo que se ve reflejado en cuestiones de imagen urbana como el aspecto y la pintura en las fachadas o la homogeneidad en la altura de los edificios.



3.4. APLICACIÓN DE MEVS EN CASOS DE ESTUDIO DE VIVIENDAS DE ADOBE EN LA REGIÓN CENTRO Y SUR-OCCIDENTE DE MÉXICO

En el presente apartado se presentan y discuten los resultados de los MEVS aplicados al conjunto de viviendas analizadas en esta investigación para las localidades de San Pablo Etla, Copainalá, Ario de Rosales y Santa Cruz de Morelos. Todas ellas, precisadas en el Capítulo II, cuentan con tipologías vernáculas de tierra, además de encontrarse situadas en las zonas C y D dentro de la regionalización sísmica mexicana, siendo propensas a los terremotos.

Para los cinco MEVS aplicados fue necesario un aproximamiento de primer nivel a las localidades, a partir de las campañas de campo y la recolecta de los datos cuantitativos y cualitativos mediante las fichas de inspección diseñadas (Sánchez-Calvillo, Alonso-Guzmán, Ortega-Heras, & Solís-Sánchez, 2022). El proceso de inspección y documentación de las viviendas, junto con los correspondientes levantamientos arquitectónicos y fotográficos fue descrito en el Capítulo II, junto con las características y diferencias presentadas por los distintos casos de estudio.

Para los MEVS GNDT, Vicente, SVIVA y SAVVAS se evidencia la distribución de los parámetros, los histogramas y distribuciones del I_v , las curvas de vulnerabilidad, curvas de fragilidad, gráficos de probabilidad de colapso e inmuebles inservibles y gráficos de estimación de damnificados y personas sin hogar. El método propuesto por Formisano arrojó valores negativos del I_v para el caso de estudio de AR, así como valores muy bajos en CO. Por esta razón se decidió descartar un estudio pormenorizado con este método y realizar un análisis extensivo de los daños y las curvas de fragilidad obtenidas por las otros MEVS.

Uno de los principales alcances de la investigación es que además de la aplicación de los distintos métodos y la información obtenida mediante el análisis y evaluación de la vulnerabilidad sísmica; la comparativa entre los distintos casos de estudio arroja información muy valiosa sobre la influencia de las características tipológicas, morfológicas, estructurales y urbanas de las viviendas analizadas, permitiendo encontrar las características de la vivienda de adobe que la hace más o menos vulnerable ante los sismos. Además, la investigación permitirá discernir si la aplicabilidad de los distintos métodos es acertada para la arquitectura tradicional de adobe mexicana, del mismo modo que han sido probados y corroborados para otros casos de estudio.



3.4.1. Resultados obtenidos con el método GNDT

El método GNDT también conocido como el “método original de índice de vulnerabilidad” cuenta con una gran importancia en el ámbito de la ingeniería sísmica debido a ser uno de los principales precursores para el análisis de la vulnerabilidad. Además los métodos estadísticos basados en la observación e inspección son los más empleados a nivel global por su facilidad de aplicación (Faccioli et al., 1999). A partir de los datos obtenidos de las 78 viviendas de SPE, CO, AR y SC, fue necesario un procesamiento de la información¹⁴⁹ para la asignación de las clases de vulnerabilidad.

En la Figura 3.56 se observa la distribución de las clases de vulnerabilidad para los once parámetros del método GNDT. El resultado de la evaluación fue una mayoría de clases A y B, con parámetros presentando resultados altamente positivos, por ejemplo P4. Posición del edificio y cimentación y P10. Presencia de elementos no-estructurales. Por el contrario, el parámetro más desfavorable fue P5. Tipología del diafragma, debido a la flexibilidad y falta de trabazón de los sistemas horizontales, presentando un alto porcentaje de clase de vulnerabilidad D.

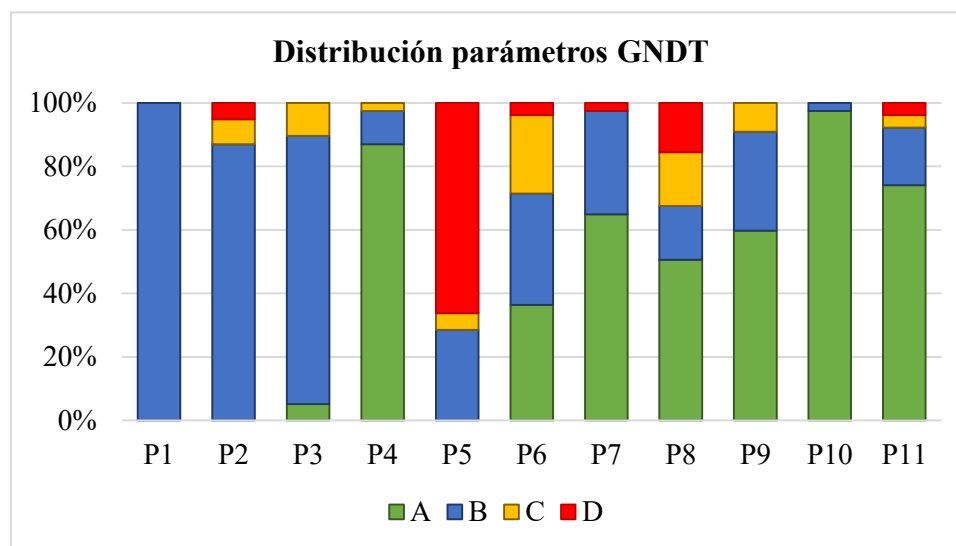


Figura 3.56. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros del método GNDT.

¹⁴⁹ Los parámetros de vulnerabilidad fueron evaluados bajo las directrices de evaluación presentadas en la tesis doctoral de Vicente (2008) para un mayor rigor y análisis cuantitativo de los datos.



Mediante el uso de la Ecuación X y el peso asignado a cada parámetro se encontró del valor medio del I_v normalizado, de 15.97 puntos, con una desviación estándar (σ^{150}) de 7.10 puntos y un coeficiente de variación (C_v^{151}) del 20.99%. El caso de estudio con mayor índice calculado fue un triple empate entre AR17, AR18 y AR19 con 3.40 puntos, inmuebles con configuraciones similares y muy favorables desde el punto de vista estructural (plantas simples, regularidad, sistemas de diafragma semi-conectados y buen estado de conservación). Por el contrario, la vivienda AR14 alcanzó 34.88 puntos debido a su deficiente preservación y el deterioro de sus sistemas constructivos. En la Figura 3.57 se presenta el histograma del I_v , observándose una tendencia modal de [15-20] y valores generales por debajo de 40 y únicamente cuatro viviendas sobrepasan el límite de 30¹⁵².

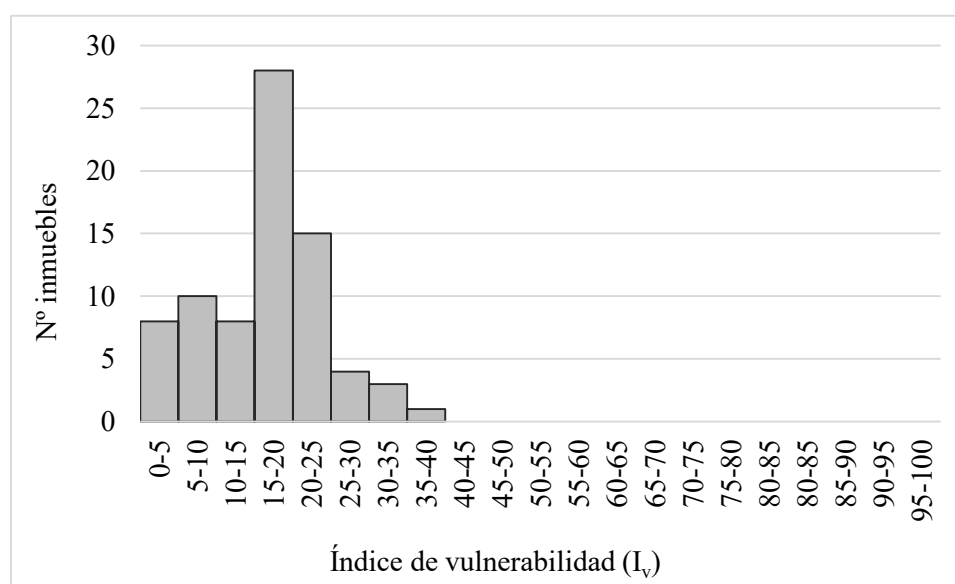


Figura 3.57. Histograma de distribución del índice de vulnerabilidad (I_v) con la aplicación del método GNDT.

¹⁵⁰ La desviación estándar o desviación típica es un valor estadístico que permite expresar la variación o desviación de un conjunto de datos, en este caso el índice de vulnerabilidad sísmica para el conjunto de viviendas de adobe analizadas. Un mayor valor del σ indica que la muestra es heterogénea con un rango de valores extenso.

¹⁵¹ El coeficiente de variación es otra medida estadística, frecuentemente expresada mediante un porcentaje, que relaciona la media aritmética de un conjunto de datos respecto a la desviación de los mismos. Un mayor valor de C_v indica una mayor heterogeneidad de la muestra con mayor variabilidad de los datos respecto a la media.

¹⁵² Un I_v por debajo de 30 puede ser considerado como una baja vulnerabilidad del inmueble en términos relativos (Ortega Heras, 2018).



Respecto a los resultados y distribución de los caos de estudio, en la Figura 3.58 podemos observar la distribución normal ajustada de todos los casos de estudio y sus curvas generadas, que son muy distintas: SPE y CO obtuvieron I_v muy similares, de 19.63 y 19.17 respectivamente; sin embargo, el caso de CO muestra una menor variación y por lo tanto un rango de valores más limitados, lo que se traduce en una mayor homogeneidad de las viviendas. Por otro lado, las viviendas de SPE presentaron mayor variedad en sus morfologías y estado de conservación, con tipologías distintas que generaron un intervalo más amplio de I_v . La misma situación se dio en AR, que pese a presentar la menor vulnerabilidad entre todos los casos de estudio, generó una distribución normal más parecida a SPE o SC.

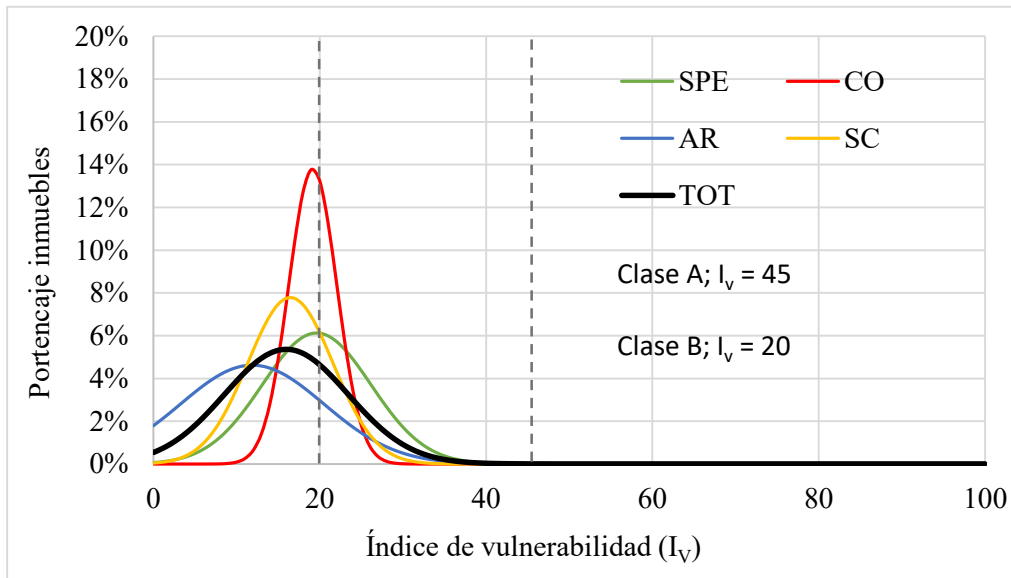


Figura 3.58. Distribución normal ajustada del I_v de los casos de estudio según el método GNDT.

El siguiente paso de GNDT pasa por usar los datos del I_v normalizado calculado [0-100] para estimar el escenario de daños y las funciones de vulnerabilidad de los casos de estudio. El grado de daño (d) queda inserto en una escala [0-1], donde el valor máximo implica el colapso de las estructuras y este puede ser comparado con la aceleración sísmica en función de la gravedad (PGA). Para obtener esta correlación daño-aceleración sísmica se emplearon las siguientes expresiones:

$$Y_i = \alpha i * \exp[-\beta i(I_v + 25)] \quad (\text{Ec. 3.23})$$

$$Y_C = [\alpha c + \beta c(I_v + 25)^\gamma]^{-1} \quad (\text{Ec. 3.24})$$



Donde:

Y_i = PGA (Aceleración máxima del suelo) en escenario sin daños en las estructuras;

Y_c = PGA (Peak Ground Acceleration) en escenario de colapso de las estructuras;

I_v = Índice de vulnerabilidad calculado con método GNDT;

Para el resto de coeficientes se tomaron los valores recopilados por Kassem et al. (2020): $\alpha_i = 0.155$, $\beta_i = 0.0207$, $\alpha_c = 0.625$, $\beta_c = 0.00029$, y $\gamma = 2.145$; éstos fueron determinados para estructuras de mampostería y concreto reforzado a partir del estudio de vulnerabilidad sísmica y escenarios de daño en la localidad de Catania, Italia, a partir de las investigaciones de Faccioli et al (1999). Aplicando las ecuaciones a los valores de I_v medios obtenidos para los casos de estudio de viviendas de adobe de la presente investigación, en la Figura 3.59 se muestran los factores de daño (d) en función de la aceleración sísmica (PGA) representados por rectas de vulnerabilidad que muestran cinco diversos escenarios en función de la desviación estándar. El factor de daño d , comprendido entre 0 y 1 expresa el ratio entre el costo de reparación y el de reemplazo del inmueble (Calvi et al., 2006).

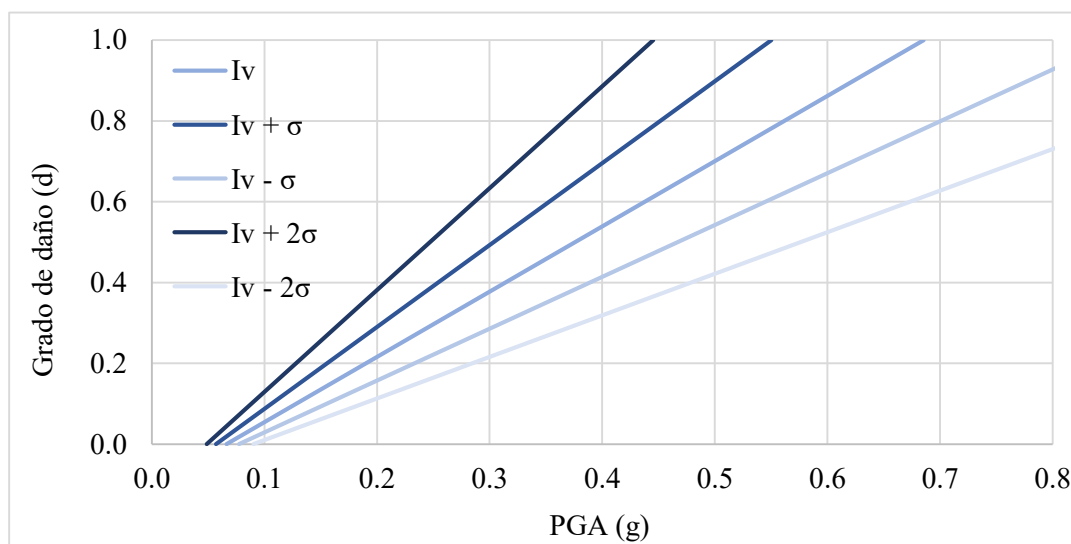


Figura 3.59. Predicción del grado de daño en función de la aceleración sísmica.

La predicción de los daños también fue calculada para los cuatro casos de estudio, observando en la Figura 3.60 los resultados de cada localidad. SPE y CO presentaron rectas prácticamente idénticas, seguidas por SC y finalmente AR que exhibió el mejor



comportamiento, reflejando una mayor sismo-resistencia derivada de unas prácticas y características constructivas acertadas.

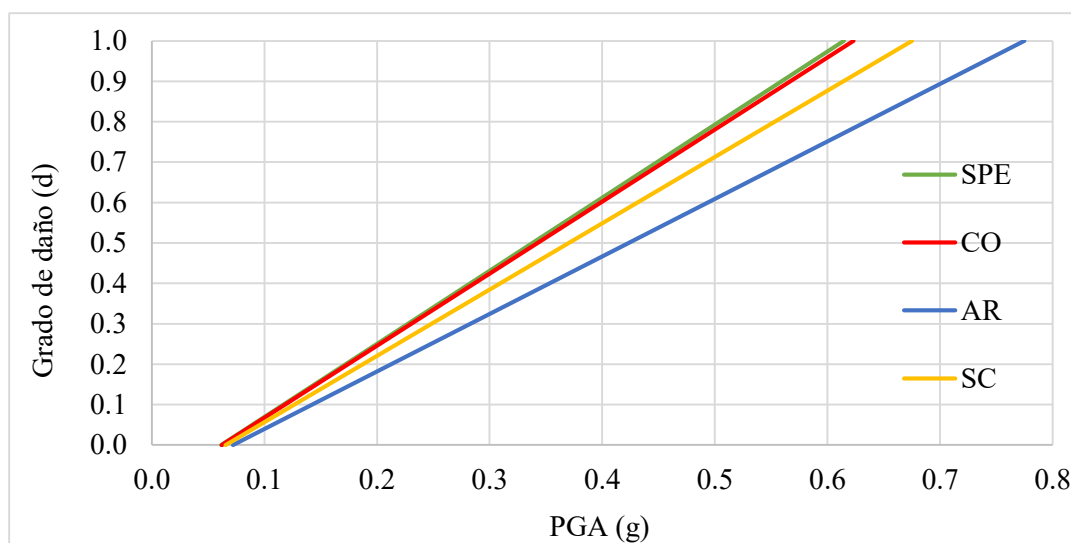


Figura 3.60. Grado de daño (d) en función de la aceleración sísmica (g) con los I_v obtenidos de los distintos casos de estudio.

Las viviendas de AR s reflejadas en los parámetros de vulnerabilidad y su asignación de clases; el siguiente caso de estudio más favorable fue SC, seguido de CO y SPE respectivamente, estos dos últimos presentando unas rectas prácticamente idénticas. La ventaja de calcular la probabilidad de daño en función de la PGA, es que los segundos valores pueden ser comparados para los indicados en cada localidad respecto a la regionalización sísmica de México (Ver Figura 3.61) y los procedimientos de cálculo de la demanda sísmica y aceleración máxima en el terreno que encontramos en el *Manual de Diseño de Obras Civiles*. El resto de MEVS utilizados, a excepción de SAVVAS, generan sus resultados de vulnerabilidad y estimación de daños en función de la intensidad sísmica, siendo esta una escala cualitativa.



Figura 3.61. Aceleraciones máximas del terreno para la República Mexicana. Fuente: (Comisión Federal de Electricidad , 2008).

Siguiendo con el aproximamiento a la vulnerabilidad desde la PGA, podemos comparar las rectas generadas para los casos de estudio con los espectros de diseño de aceleración en roca obtenidos mediante el programa PRODISIS (ver Figura 3.62).

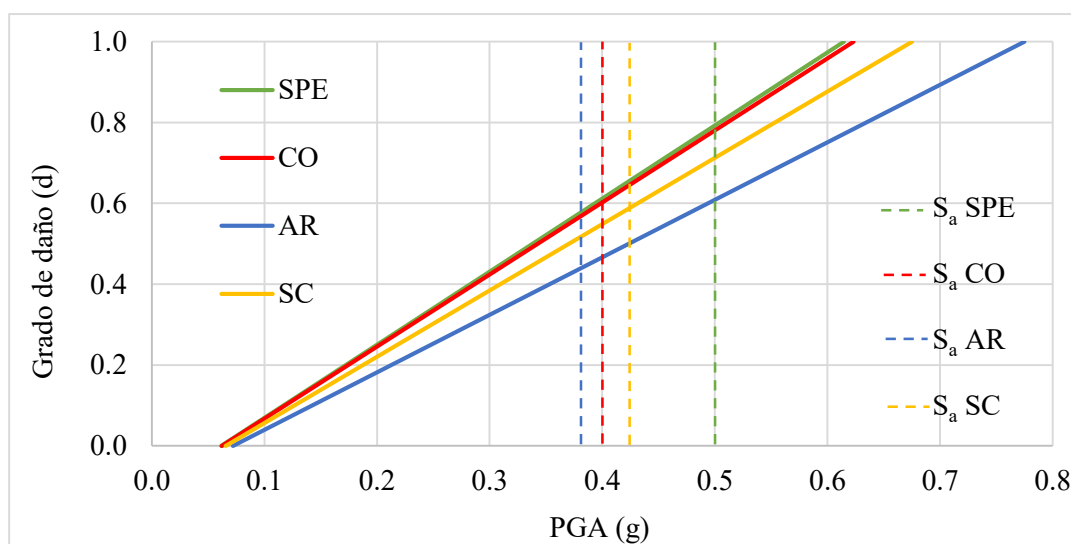


Figura 3.62: Correlación del grado de daño (d) en función de la aceleración sísmica (g) de los distintos casos de estudio y la aceleración de diseño sísmico generada en PRODISIS.



SPE sería la localidad que mostraría una mayor vulnerabilidad, al presentar un grado medio de daño de 0.8 según su coeficiente de diseño. CO y SC obtendrían valores de daños cercanos a 0.6, mientras que AR obtendría la mejor respuesta con valores ligeramente superiores a 0.4.

3.4.1. Resultados obtenidos con el método propuesto por A. Formisano

Como se comentó con anterioridad, los resultados obtenidos mediante el MEVS propuesto por Formisano et al. arrojaron valores de I_v muy bajos llegando incluso a un promedio negativo para el caso de estudio de AR ($I_v = -4.30$). Por ello no se contempló generar curvas de vulnerabilidad y fragilidad para este método ya que quedó demostrado que no es idóneo para los casos de estudio de la investigación. No obstante, el análisis de los cinco parámetros incluidos en la propuesta resulta de gran interés para observar la influencia de las cuestiones urbanas en la vulnerabilidad total.

La Figura 3.63 presenta la distribución de clases de vulnerabilidad para los cinco parámetros incluidos en el método para el análisis de los agregados urbanos (P11-P15). En el gráfico se ve reflejado el buen desempeño de las viviendas de adobe estudiadas; los conjuntos de agregados presentaron una clara regularidad en alturas, orden y distribución de los vanos, cierta homogeneidad de los sistemas constructivos, etc.; siendo todos estos aspectos valorados positivamente en el MEVS de Formisano.

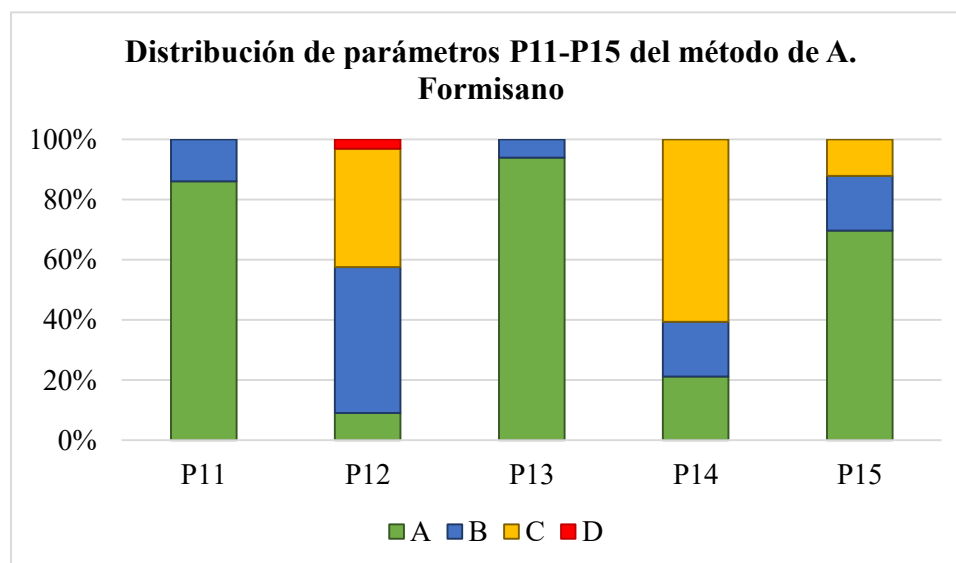


Figura 3.63. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros P11-P15 adicionados del método de Formisano.



Los parámetros P11, P13 y P15 tuvieron una asignación de clases favorable, que derivó en una reducción del I_v ; los tres reflejaron aspectos de homogeneidad constructiva y estructural en los conjuntos de agregados urbanos. Por el contrario, P12 y P14, asociados a la posición del edificio¹⁵³ y la heterogeneidad estructural entre inmuebles presentaron clases más perjudiciales, que no aumentaron el I_v pero tampoco comportaron una reducción considerable.

La inclusión de estos parámetros adicionales provoca en una disminución drástica del índice de vulnerabilidad, llegando a un valor negativo del promedio de las viviendas ($I_v = -0.92$), hecho que nos indica la no adecuación del método para los casos de estudio seleccionados en esta investigación. Sin embargo, en localidades como AR y CO, donde las viviendas forman entramados urbanos (ver Figura 3.64), la consideración de los agregados en la respuesta estructural del edificio es un aspecto que debe seguir tomándose en cuenta para la evaluación de la vulnerabilidad.



Figura 3.64. Conjuntos de agregados y traza urbana de Ario de Rosales, Michoacán, México.
Fotografía de dron: (A. Solís-Sánchez, 2021).

¹⁵³ Gran parte de las viviendas evaluadas se encontraban en una posición de esquina en las vialidades, motivo por el que la clase de vulnerabilidad C fue una de las más asignadas para este parámetro.



La reducción de los I_v y el grado de daño ha sido reportada en otras investigaciones: en el análisis de agregados urbanos en la región de Caserta, en Italia, los edificios entre medianeras presentaron una disminución del μ_D del 5.85%, mientras que las viviendas en esquina experimentaron un 18.30% (Formisano et al., 2017). Por otro lado, en el estudio de las unidades estructurales del centro histórico de Mirandola, en Modena, Italia, se reportó una disminución del índice de vulnerabilidad normalizado por debajo del promedio calculado para las viviendas aisladas (Chieffo N. y otros, 2021).

Pese a que los resultados obtenidos con la aplicación del MEVS no alentaron a un análisis más profundo, la importancia de la configuración urbana de los conjuntos de agregados y sus relaciones deben ser estudiados con mayor detalle debido a la respuesta sísmica solidaria que ofrecen. Por ejemplo, una de las iniciativas podrías ser la asignación de un mayor peso en los futuros MEVS que se desarrollen, o bien contemplando distintas formas de evaluación para edificios aislados y los que forman conjuntos.

3.4.2. Resultados obtenidos con el método propuesto por R. Vicente

Para el método propuesto por Vicente se partió del modelo GNDT añadiendo tres nuevos parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad: P5. Número de niveles; P7. Posición e interacción del inmueble; P10. Aberturas en fachada y alineamiento. En la Figura 3.65 se observa la distribución de clases de vulnerabilidad de los catorce distintos parámetros y la asignación de valores. Respecto a la nueva distribución podemos observar un impacto positivo, debido a que las clases asignadas a P5, P7 y P10 son de tipo A y B en su gran mayoría, reduciendo la vulnerabilidad como vemos reflejado en el siguiente paso que es el cálculo del I_v .

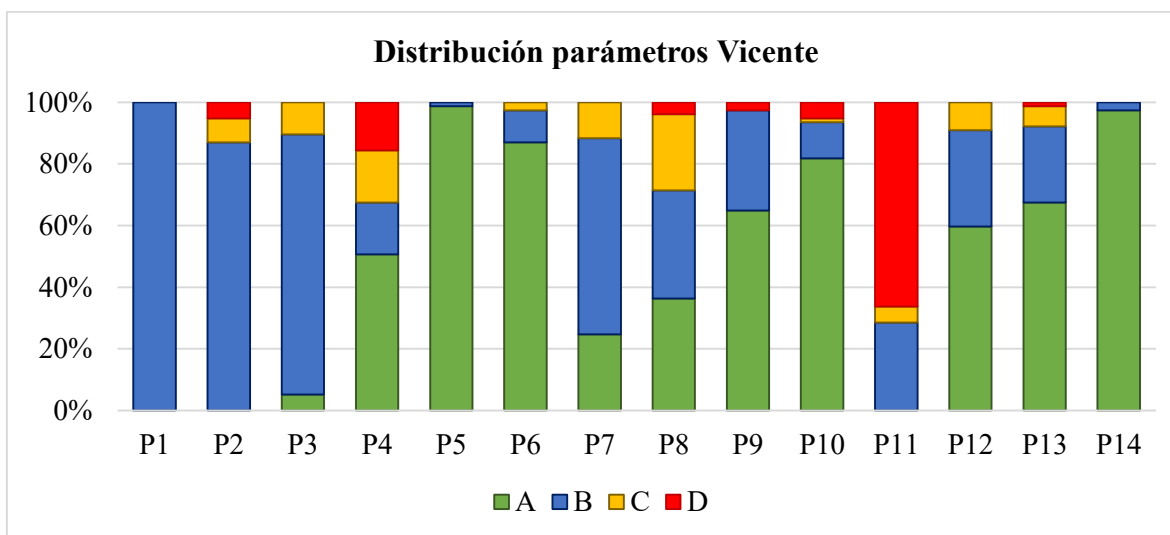


Figura 3.65. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros del método propuesta por Romeu Vicente.

El método de cálculo del I_v es el mismo que para otros MEVS basados en índices, con una suma ponderada de los parámetros, que en este caso son catorce en vez de once, obteniendo un valor en el rango [0-650] que posteriormente se normaliza en valores [0-100] para mayor facilidad (ver expresiones 3.8-3.10). A partir de la evaluación de las 78 viviendas y la asignación de clases para P1-P14 se calculó un I_v promedio de 13.76, con una σ de 4.44 y un C_v del 32.27%.

Entre todos los inmuebles SPE09 exhibió el I_v más bajo, con un total de 5.00 puntos debido al buen desempeño mostrado en todos los parámetros. En cuanto a los casos más desfavorables, la vivienda SC01 presentó un I_v de 22.69 puntos seguida de AR29 con 22.50 puntos. La primera presentaba un estado de deterioro muy avanzado por la falta de mantenimiento (ver Figura 3.32), con varios espacios inoperativos; por otro lado, la segunda contaba con alteraciones constructivas con una seria afectación estructural, como la apertura de grandes vanos en el muro de fachada (ver Figura 3.38). En la Figura 3.66 encontramos el histograma del total de resultados de I_v para las viviendas de adobe evaluadas. En comparación con el modelo GNDT, se observan valores medios más bajos, con un promedio de 13.76 contra 15.97 puntos y un rango modal de 10-15 contra 15-20.

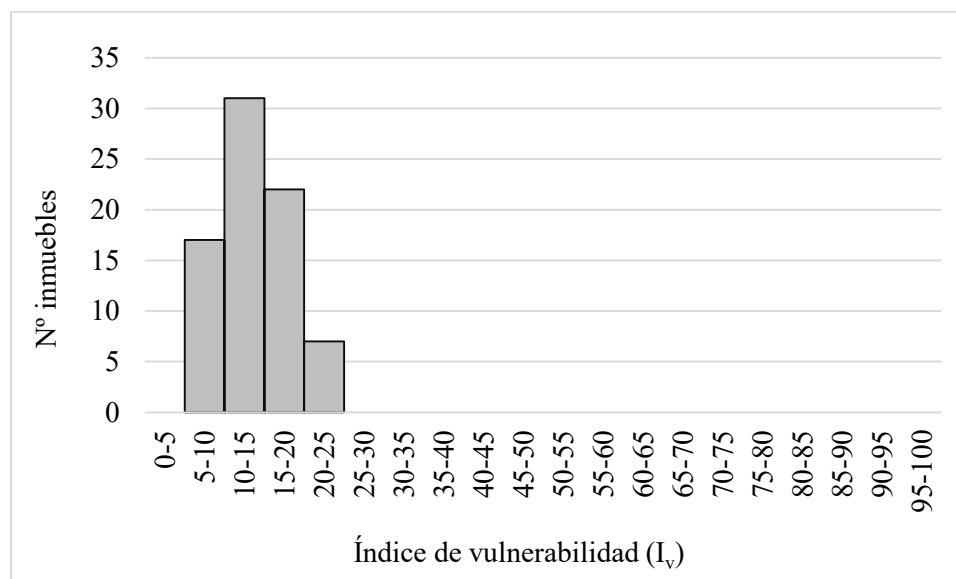


Figura 3.66. Histograma de distribución del índice de vulnerabilidad (I_v) con la aplicación del método de Vicente.

En la Figura 3.67 encontramos la distribución normal de los casos de estudio y el promedio de las viviendas, reflejando unos valores de I_v considerablemente por debajo de los esperados para estas tipologías. SPE y AR exponen una distribución más dilatada, que refleja la mayor diversidad en las viviendas de estas localidades.

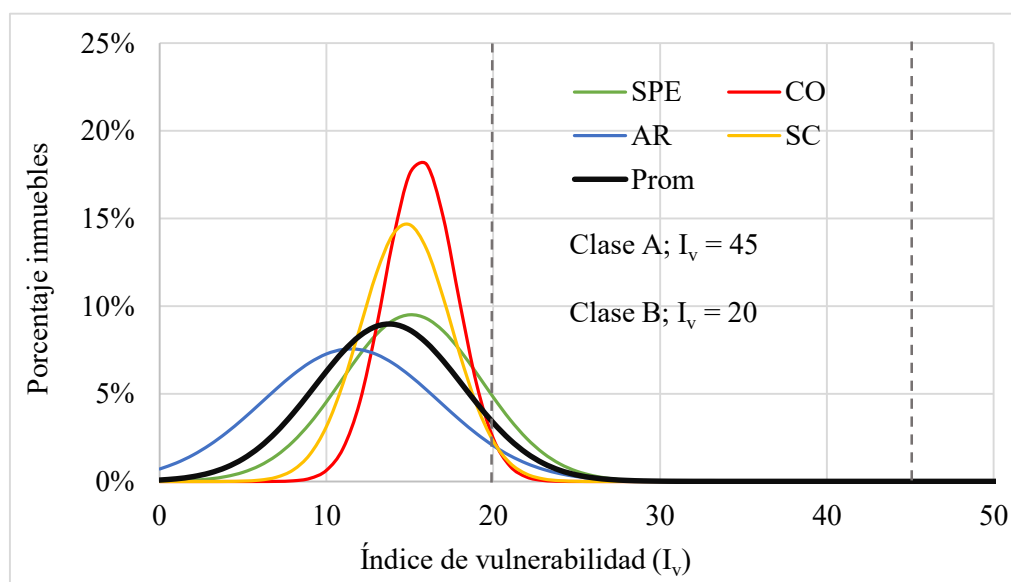


Figura 3.67. Distribución normal ajustada del I_v de los casos de estudio según el método de Vicente.



Cabe destacar que para la EMS-98 el sistema constructivo de mampostería de adobe cuenta con una clasificación de A o B, siendo las clases de vulnerabilidad más altas del método macrosísmico, y a partir de las ecuaciones de correlación estas clases comportan unos I_v de 45 y 20 respectivamente (Vicente et al., 2011). Una vez obtenida la vulnerabilidad de los casos de estudio, el siguiente paso es la obtención del grado de daño medio (μ_D). Para ello, los valores I_v normalizados fueron convertidos al factor de vulnerabilidad V empleado en la escala macrosísmica de Giovinazzi y Lagomarsino (2006) a partir de la ecuación de correlación propuesta por Bernardini et. al. (2007):

$$V = 0.56 + 0.0064 \times I_v \quad (\text{Ec. 3.25})$$

Donde:

I_v = índice de vulnerabilidad normalizado calculado con el método propuesto por Vicente [0-100];

V = Factor de vulnerabilidad.

Con el factor V es posible obtener μ_D y generar las curvas de vulnerabilidad en función de la intensidad sísmica y la ductilidad de los sistemas estructurales. Existen dos ecuaciones de correlación entre el método GNDT y el macrosísmico (Kassem et al., 2020), que varios autores han empleado para combinar ambos. Vicente usa nuevamente la ecuación propuesta por Bernardini et. al. (2007):

$$\mu_D = 2.5 + 3 \tanh\left(\frac{I + 6.5V - 12.7}{Q}\right) \times f(V, I) \quad 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad (\text{Ec. 3.26})$$

Donde:

μ_D = Grado de daño esperado en la estructura [0-5];

I = Intensidad macrosísmica definida por la EMS-98 [1-12];

Q = Grado de ductilidad de la estructura [1-4].

Para el valor de Q se consideró un factor de ductilidad de 3, siendo estos los valores tomados en los casos de estudio de Coimbra y Seixal (Vicente et al., 2011) (Ferreira y otros, 2013); debido a que las curvas generadas se ajustaron mejor al comportamiento predicho con modelos de regresión y análisis paramétrico. Estos valores pueden diferir ligeramente de los adoptados en otras investigaciones, como se discute más adelante en el capítulo.



Con la obtención de la vulnerabilidad de las viviendas a partir de los índices, es posible estimar el daño que sufrirían las unidades en función de la intensidad sísmica, generando las denominadas curvas de vulnerabilidad. En la Figura 3.68 encontramos las curvas para el valor promedio de I_v así como los escenarios factibles en función de la σ^{154} . La distribución es bastante lineal, presentando daños leves hasta una intensidad de VIII, daños moderados para una intensidad de IX, y daños graves en un escenario de un sismo de intensidad X.

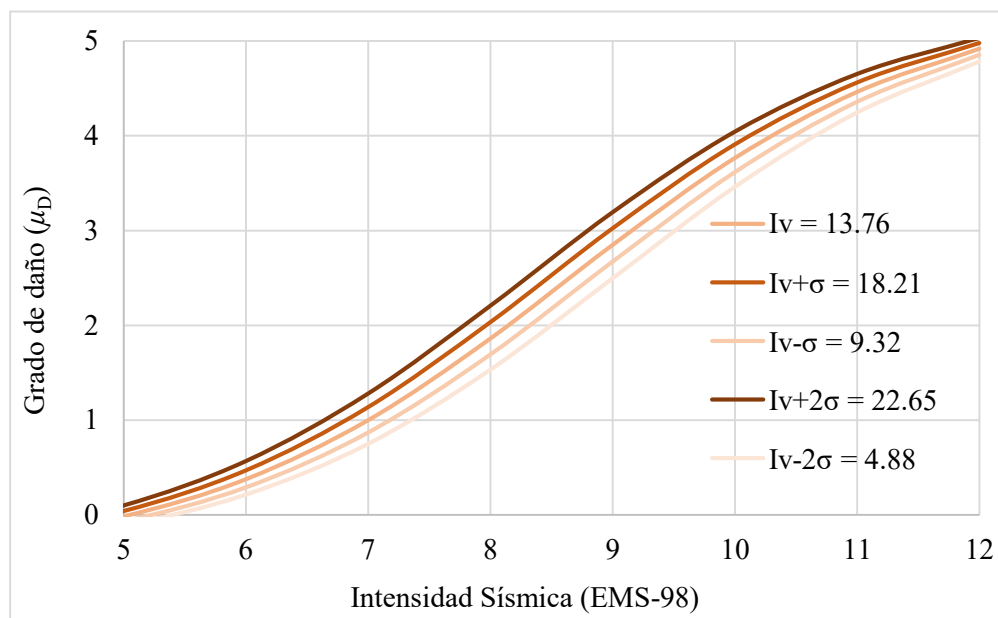


Figura 3.68. Curvas de vulnerabilidad generadas con el método de R. Vicente.

En la Figura 3.69 podemos observar las curvas de vulnerabilidad generadas para cada caso de estudio. Las localidades de SPE, CO y SC presentan curvas prácticamente idénticas, mientras que AR muestra una menor vulnerabilidad al exhibir un grado de daño inferior al de los otros casos, aunque las diferencias son escasas.

¹⁵⁴ Para las curvas de vulnerabilidad la mayoría de autores suelen emplear este método, en el que se plantean cinco curvas de probabilidad: I_v , $I_v + \sigma$, $I_v - \sigma$, $I_v + 2\sigma$, $I_v - 2\sigma$. Cabe destacar que la regla 68-95-99.7 nos indica que el 95.45% de los valores quedan incluidos dentro de dos bandas respecto a la media de la desviación típica, por lo que con estas curvas se obtiene una fiabilidad muy alta de los posibles escenarios sísmicos.

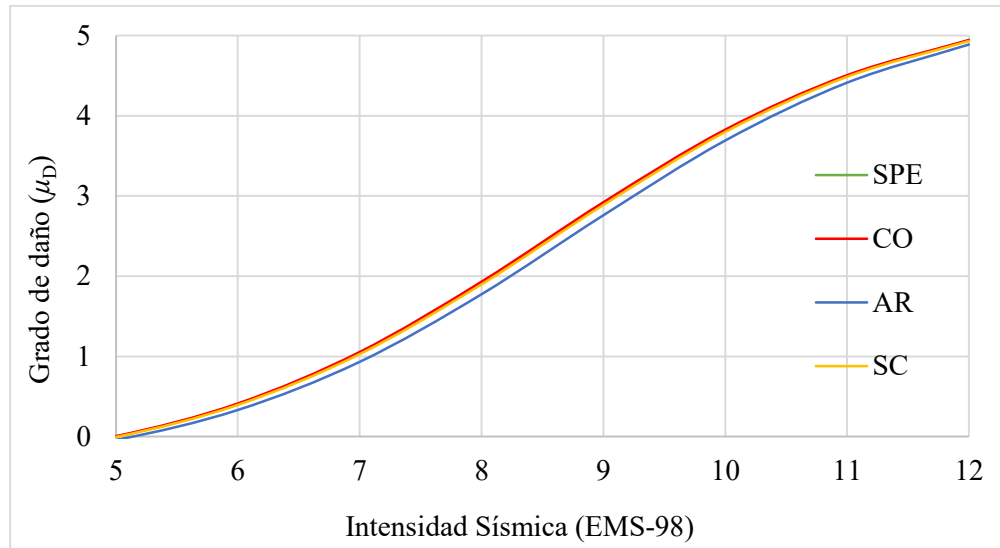


Figura 3.69. Comparativa de las curvas de vulnerabilidad de los casos de estudio con el método de R. Vicente.

El siguiente paso en el análisis de la vulnerabilidad es definir los escenarios de estimación de daños, para cada uno de los grados μ_D y su probabilidad en función de la intensidad sísmica. La probabilidad de cada grado de daño puede ser calculada con distintos métodos, siendo los más comunes las distribuciones binomiales por función de masa de probabilidad (PMF) del método macrosísmico (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006), y las funciones de distribución beta, por las que se decanta Vicente (2011) en su análisis de Coimbra. Para la presente investigación se optó por la distribución PMF ya que implicó una simplicidad del cálculo, empleando la siguiente expresión (Ortega Heras, 2018):

$$PMF: p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \times \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \times \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k} \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (\text{Ec. 3.27})$$

Donde:

PMF = Función de masa de probabilidad [probability mass function].

p = Probabilidad de tener un $\mu_D = k$ [0-1];

k = Grado de daño [1-5];

μ_D = Valor del daño obtenido para una determinada intensidad sísmica.

Las curvas de fragilidad expresan la probabilidad de rebasar un determinado grado de daño durante un sismo, acorde a la intensidad del mismo. Por ello la probabilidad siempre aumenta a medida que lo hace la intensidad. Las curvas pueden ser calculadas para cualquier valor



determinado de I_V , pudiendo mostrar el desempeño de una localidad, conjunto de inmuebles o edificio singular. En la Figura 3.70 se exhibe la estimación de daños para el conjunto de viviendas de adobe, observando que para una intensidad VIII al menos un 60% de las construcciones sufrirían daños leves.

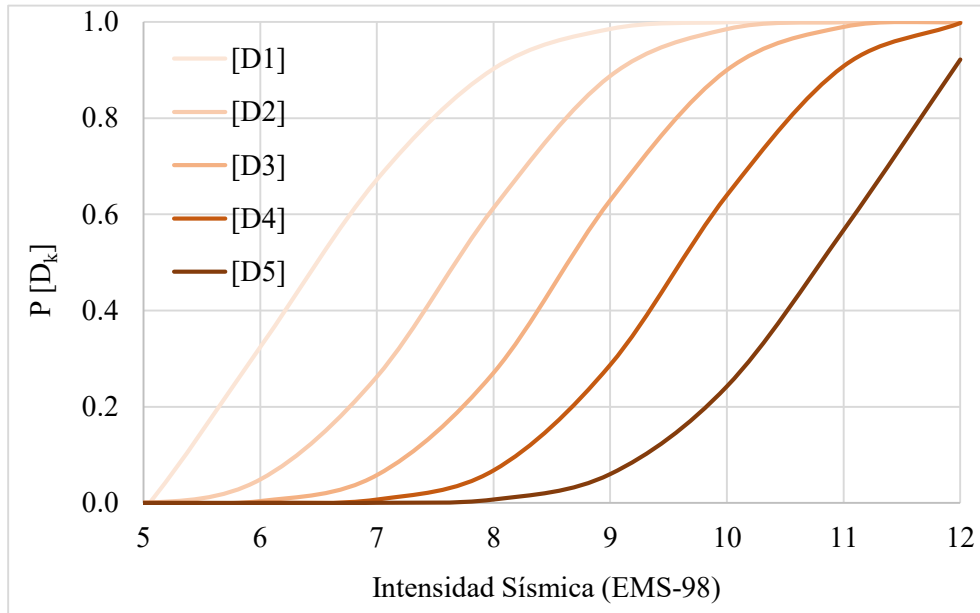


Figura 3.70. Curvas de fragilidad obtenidas por el método de R. Vicente.

Tras la estimación de los daños físicos en los inmuebles como funciones continuas de probabilidad se procede a hacer la estimación de las pérdidas sufridas. Las pérdidas materiales y los posibles daños y afectaciones en los inmuebles son unos de los resultados más esperados en los MEVS, de cara a planificar una mejor gestión de los riesgos en las localidades o casos de estudio seleccionados. Para el cálculo del porcentaje de viviendas colapsadas o en estado inservible tras un sismo de determinada intensidad se emplean las siguientes expresiones basadas en los datos procesados por Bramerini et al. (1995):

$$P_{Colapso} = P(D_5) \quad (\text{Ec. 3.28})$$

$$P_{Inutilizable} = P(D_3) \times W_{ub,3} + P(D_4) \times W_{ub,4} \quad (\text{Ec. 3.29})$$



Donde:

P_{Colapso} = Probabilidad de colapso de los inmuebles en función de la intensidad sísmica;

$P_{\text{Inutilizable}}$ = Probabilidad de que las viviendas queden en un estado inutilizable en función de la intensidad sísmica;

$P(D_X)$ = Probabilidad de un grado de daño X en función de la intensidad sísmica;

$W_{ub,X}$ = Coeficientes de la probabilidad de daño X.

Tomando los valores de los pesos de los coeficientes $W_{ub,3} = 0.4$ y $W_{ub,4} = 0.6$ de la aplicación en Coimbra (Vicente et al., 2011), retomados en muchas otras investigaciones, es posible calcular las curvas de probabilidad de colapso y viviendas inutilizables en función de la intensidad sísmica (ver Figura 3.71). A partir de una intensidad X encontramos una probabilidad de colapso significativas, creciendo exponencialmente para eventos tan dañinos.

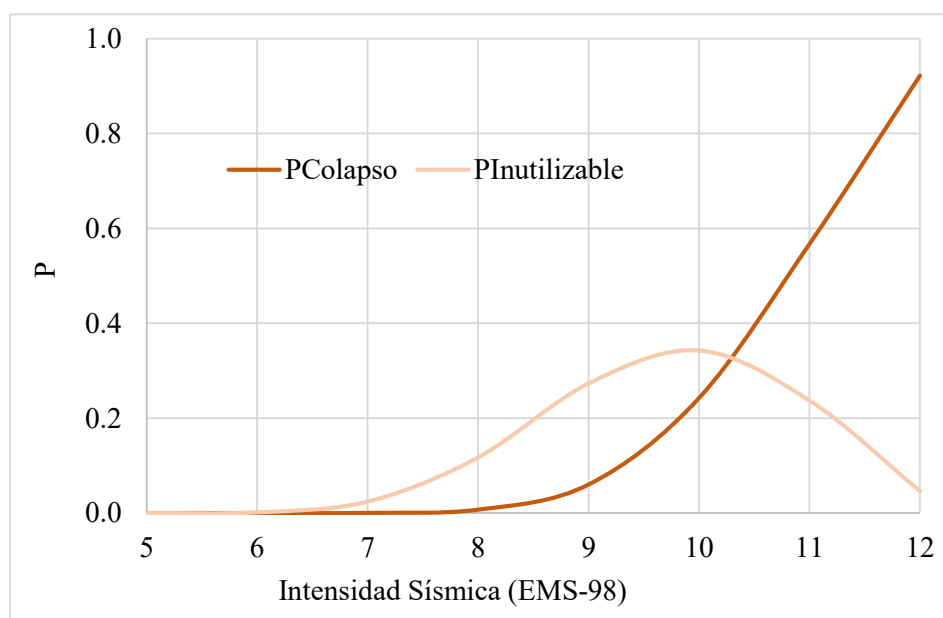


Figura 3.71. Probabilidades de colapso y viviendas inutilizables obtenidas por el método de R. Vicente.

El concepto de damnificados o personas damnificadas contempla las posibles muertes o personas heridas graves a consecuencia de los sismos, siendo esta la secuela más catastrófica que causan estos fenómenos. Los sismos de gran magnitud o intensidad causan una gran cantidad de daños humanos que son los más importantes y los que desde la ingeniería sísmica deben reducirse al máximo (Spence, 2007). También retomando la propuesta de Brametini



et al. (1995) es posible calcular la probabilidad de damnificados y personas sin hogar con las siguientes expresiones:

$$P_{\text{Damnificados}} = 0.3 \times P(D_5) \quad (\text{Ec. 3.30})$$

$$P_{\text{Sin hogar}} = P(D_3) \times W_{ub,3} + P(D_4) \times W_{ub,4} + P(D_5) \times 0.7 \quad (\text{Ec. 3.31})$$

Donde:

$P_{\text{Damnificados}}$ = Probabilidad de personas damnificadas en función de la intensidad sísmica;

$P_{\text{Sin hogar}}$ = Probabilidad de personas sin hogar en función de la intensidad sísmica;

Para los coeficientes $W_{ub,3}$ y $W_{ub,4}$ se toman los mismos valores que para las probabilidades de colapso y viviendas inutilizables, siendo 0.4 y 0.6 respectivamente. La Figura 3.72 muestra las curvas de probabilidad de personas damnificadas y que resultarían sin hogar en función de la intensidad sísmica. A partir de una intensidad elevada (≥ 8) el porcentaje de población con problemas de habitación sería realmente preocupante, aspecto que se reportó en la localidad de Jojutla tras el terremoto de Puebla de 2017 (Sánchez Calvillo, Alonso Guzmán, & López Núñez, 2021).

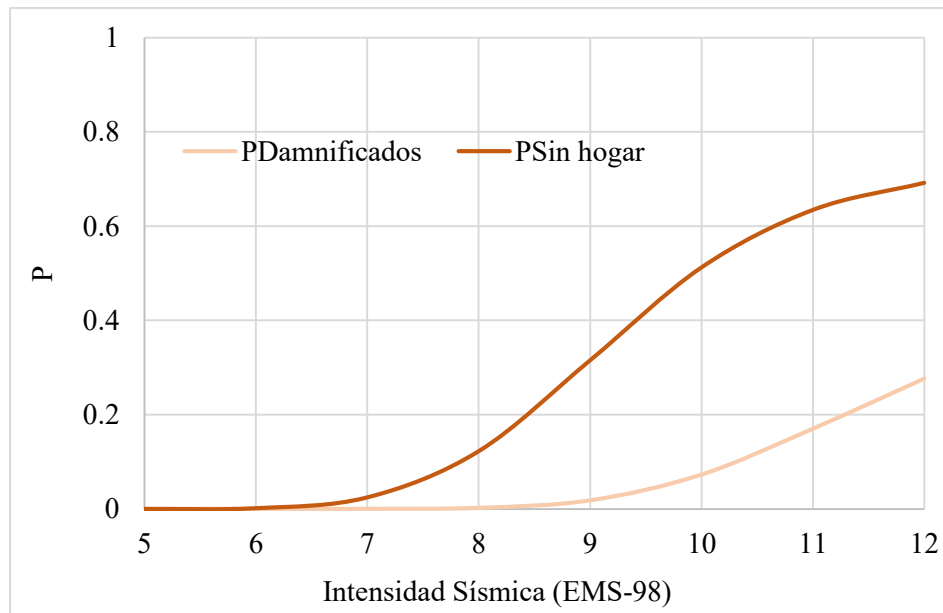


Figura 3.72. Probabilidades de personas damnificadas y sin hogar obtenidas por el método de R. Vicente.



3.4.3. Resultados obtenidos con el método SVIVA

El método SVIVA fue aplicado a las mismas unidades de estudio considerando los diez parámetros propuestos por Ortega en un aproximamiento específico a la arquitectura vernácula. La Figura 3.73 muestra la distribución de clases de vulnerabilidad de los diez parámetros: destacan los P3 y P10 por sus altas clases de vulnerabilidad: la primera asociada al material, que es constante en todas las unidades de estudio, y la segunda a la morfología y distribución en planta de los elementos resistentes. Por otro lado, P4, P6, P8 y P9 presentan una distribución de clases mucho más favorable, debida a las características exclusivas morfológicas y tipológicas de estas construcciones, y a su general buen estado de conservación¹⁵⁵.

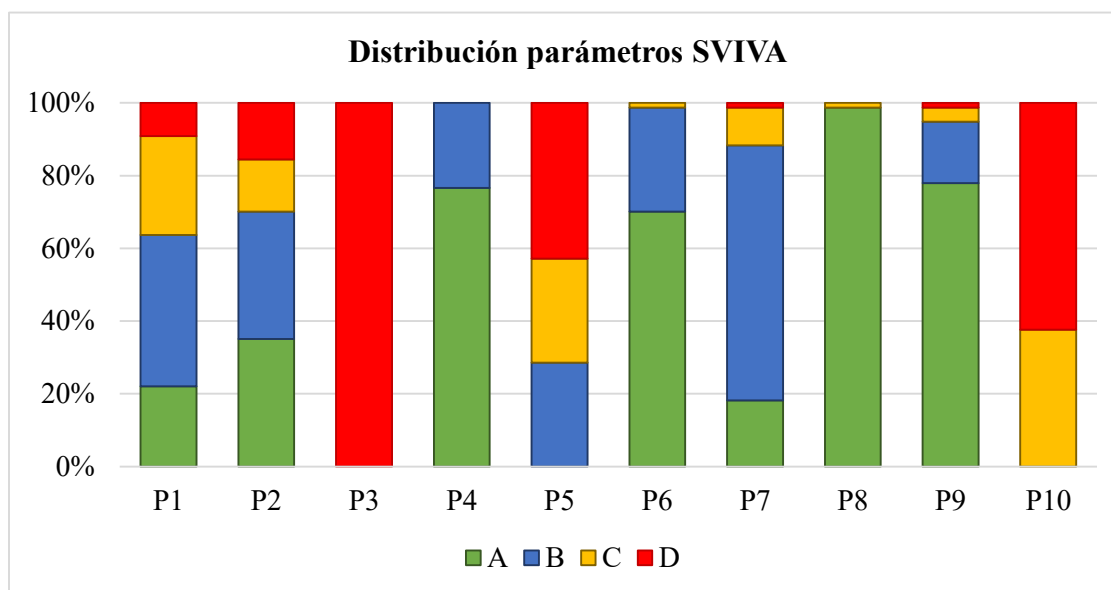


Figura 3.73. Distribución por clases de vulnerabilidad de los parámetros del método SVIVA

En la Figura 3.74, podemos observar el histograma de distribución del I_v normalizado para SVIVA, con una moda en el rango de valores 35-40; únicamente tres unidades superan el valor de 45 y en ningún caso encontramos viviendas con un índice inferior a 20. En

¹⁵⁵ P9. Daño estructural previo es un parámetro de carácter cualitativo que depende en gran medida del criterio de la persona que realiza la inspección. Si bien las cuatro localidades estudiadas presentaron en general un estado de conservación óptimo y escasos daños estructurales, para otros casos de estudio este parámetro puede arrojar valores mucho más desfavorables.



comparación a GNDT y Vicente los índices presentan valores más altos, lo cual puede ser debido a la calibración más restrictiva que presenta SVIVA para la arquitectura vernácula y sus características propias.

Respecto a los valores máximos y mínimos, el peor I_V corresponde a la vivienda SC01 con 49.00 puntos, coincidiendo con el método de Vicente en ser la edificación más vulnerable; por el contrario, AR19, AR17 y AR23 presentaron I_V de 20.00, 20.50 y 20.50 puntos respectivamente. Estos inmuebles presentaron geometrías regulares y un excelente estado de conservación, llamando la atención que los tres cuentan con un uso comercial, propiciando un buen mantenimiento de los sistemas constructivos tradicionales.

El conjunto de datos analizados da como resultado un promedio del I_V de 33.76, con una σ de 7.10 puntos y un C_V del 20.99%¹⁵⁶. El mayor I_V registrado correspondió al edificio SC01, con un valor normalizado de 49.00; mientras que el menor valor de I_V fue el del caso SPE09 de 25.50. Estos valores indican una variación reducida del I_V , consecuencia de la semejanza entre las unidades estudiadas, al comprender únicamente una sola tipología constructiva (la vivienda de adobe) con alteraciones acotadas.

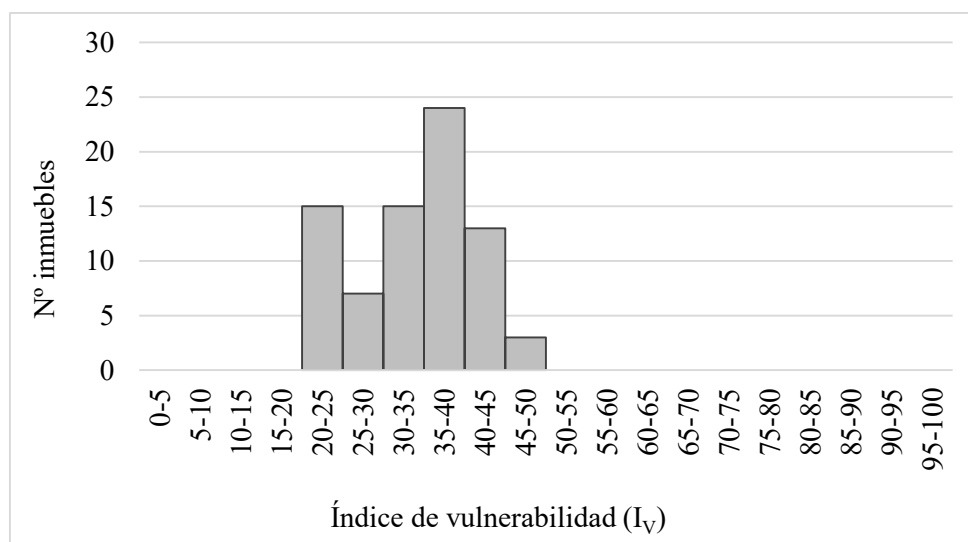


Figura 3.74. Histograma de distribución del índice de vulnerabilidad (I_V) con la aplicación del método SVIVA.

¹⁵⁶ El $C_V = 20.99\%$ del I_V calculado con SVIVA presenta el valor más bajo en comparación con los otros métodos: $C_{V\text{ GNDT}} = 46.59\%$; $C_{V\text{ Vicente}} = 32.27\%$. Un coeficiente de variación bajo, menor al 30%, expresa una muestra homogénea.



La Figura 3.75 muestra la distribución normal ajustada del para el promedio del conjunto de unidades, así como los distintos cuatro casos de estudio, permitiendo correlacionar los conjuntos de viviendas de cada localidad y la variación de las tipologías constructivas y su afectación en la vulnerabilidad sísmica. Igual que en el resto de métodos, AR presenta los mejores resultados, con un valor medio $I_v = 27.43$, seguido de SC con $I_v = 36.66$, CO con 37.05 , y SPE con 37.96 ; mostrando una mayor variabilidad respecto al resto de casos de estudio. Las curvas de distribución quedan muy centradas respecto al rango $I_v = [20-45]$, que Vicente (2011) relaciona con las clases de vulnerabilidad A y B del EMS-98 que son las asociadas a las edificaciones de mampostería de adobe¹⁵⁷.

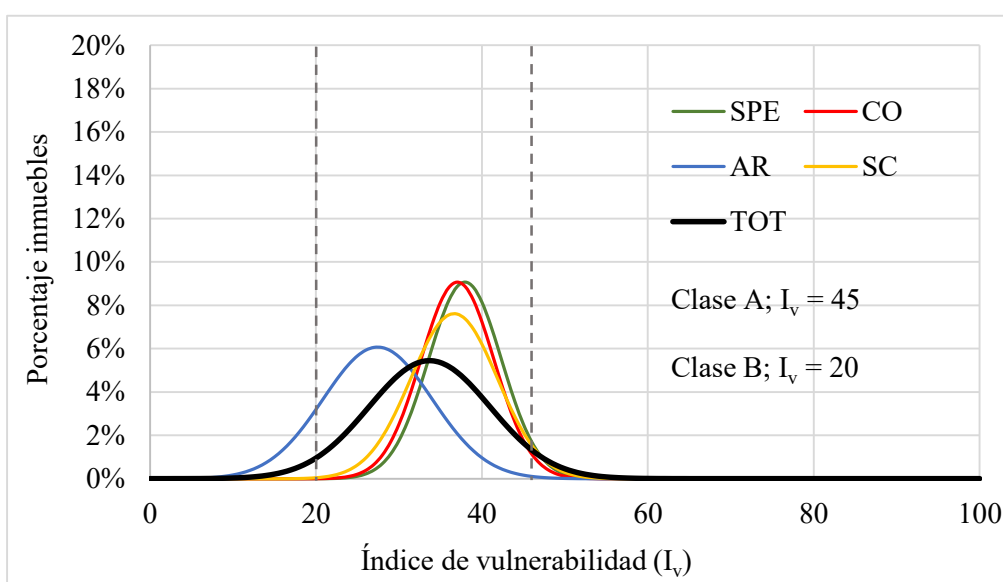


Figura 3.75. Distribución normal ajustada del I_v de los casos de estudio según el método SVIVA.

Una vez obtenidos los valores de I_v , para estimar el grado de daño medio (μ_D) se empleó la misma ecuación que en el método de Vicente, propuesta por Bernardini (2007) (ver Ecuación X). Sin embargo, para la conversión entre índice y factor de vulnerabilidad se utilizó la expresión ajustada por Ortega (2018):

$$V = 0.46 + 0.012 \times I_v \quad (\text{Ec. 3.32})$$

¹⁵⁷ Ver la Tabla de Vulnerabilidad de la EMS-98 (Grünthal, 1998). El adobe o ladrillos de tierra crudo están considerados como estructuras de mampostería con clases de vulnerabilidad asociadas en el rango más bajo.



Donde:

I_v = índice de vulnerabilidad normalizado calculado con SVIVA [0-100];

V = Factor de vulnerabilidad.

Para el cálculo del μ_D se tomó un grado de ductilidad (Q) de 2 para las viviendas de adobe, siguiendo las consideraciones de Ortega (2018) basadas a la vez en las recomendaciones de otros autores para edificios de mampostería histórica. Además, el valor de Q influye en la pendiente de las curvas de vulnerabilidad, mostrando la mejor adecuación a estas estructuras en trabajos previos que han aplicado SVIVA (Ortega J. et al., 2019).

A partir de aquí, se graficaron las curvas de intensidad-daño en función de la intensidad macrosísmica¹⁵⁸ (Ver Figura 3.76). Las curvas de vulnerabilidad sísmica representan cinco posibles escenarios en función del I_v promedio y desviación estándar: I_v , $I_v + \sigma$, $I_v - \sigma$, $I_v + 2\sigma$, $I_v - 2\sigma$. Puede observarse como a partir de una intensidad VIII el grado de daño presentado empieza a tener una consideración estructural muy importante, bastante alejado de la predicción de daños realizada con el método de Vicente.

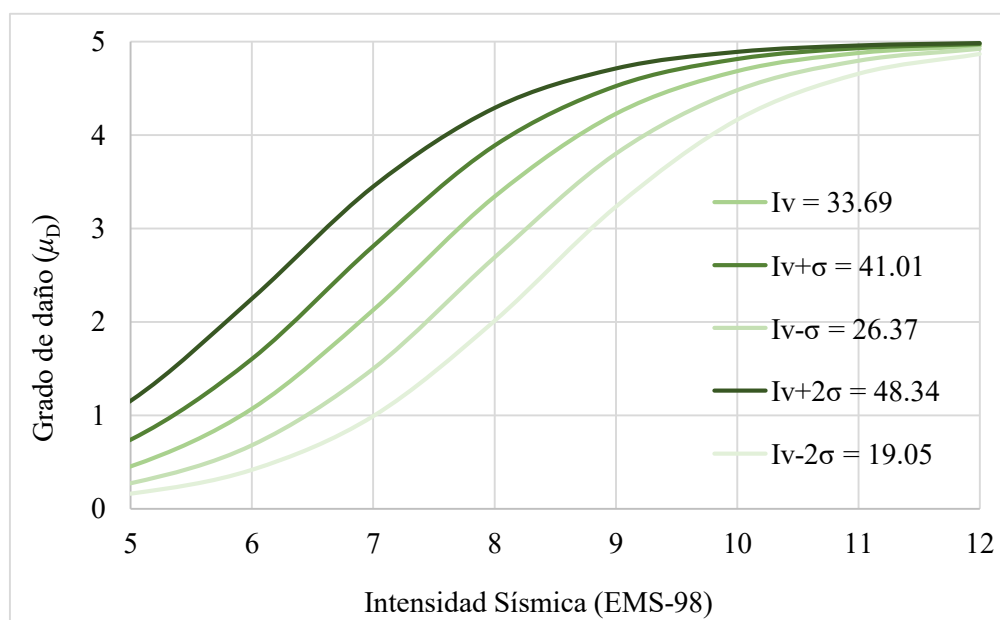


Figura 3.76. Curvas de vulnerabilidad generadas con SVIVA.

¹⁵⁸ Las gráficas se generaron a partir de $I = 5$ para mostrar la información más relevante.



Comparando las curvas de vulnerabilidad de los cuatro casos de estudio (ver Figura 3.77), AR muestra un comportamiento mucho más favorable y sismorresistente, mientras que el resto de localidades presentan una distribución muy similar. El mejor comportamiento de AR es una constante para todos los métodos y resultados generados, sin embargo, encontramos una acentuación de esta situación con SVIVA, bajando el grado de daño en altas intensidades casi en un punto.

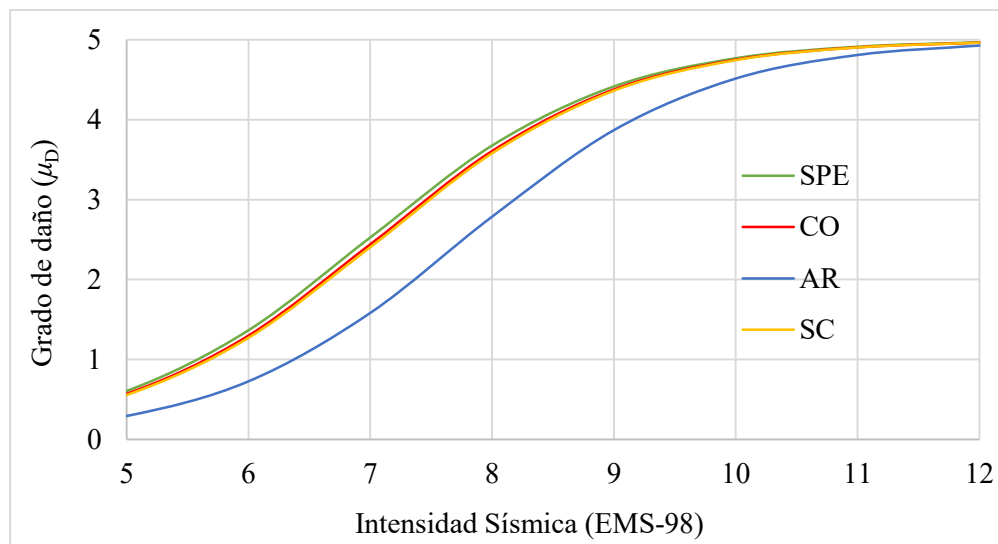


Figura 3.77. Comparativa entre las curvas de vulnerabilidad de los cuatro casos de estudio generadas con SVIVA.

Las curvas de vulnerabilidad presentan la ventaja de que pueden ser calibradas y comparadas con efectos reales de sismos históricos en el país, permitiendo correlacionar daños documentados en inmuebles con los reportes de daños y las bases de datos existentes. Los métodos empíricos necesitan de un ejercicio de calibración que en este caso puede efectuarse con los reportes de daños para discernir la adaptación de éstos a la realidad de la arquitectura vernácula, observando que SVIVA presenta un comportamiento menos favorable de las viviendas y por lo tanto más restrictivo y cercano a la seguridad.

En la Figura 3.78 se presentan las curvas de fragilidad generadas con el método SVIVA. De igual forma que con el resto de resultados, éstas se intuyen más restrictivas que las generadas con el método de Vicente. Tomando en cuenta la misma intensidad sísmica, por ejemplo 8, en SVIVA encontramos un escenario con aproximadamente un 80% de daños moderados, más de un 40% de daños graves y más de un 10% de las viviendas colapsando. La misma



situación según el método de Vicente reportaría respectivamente un 27% de daños moderados, 6% de daños graves y aproximadamente un 1% de edificios colapsados, siendo este un panorama mucho más favorable de los posibles efectos del sismo.

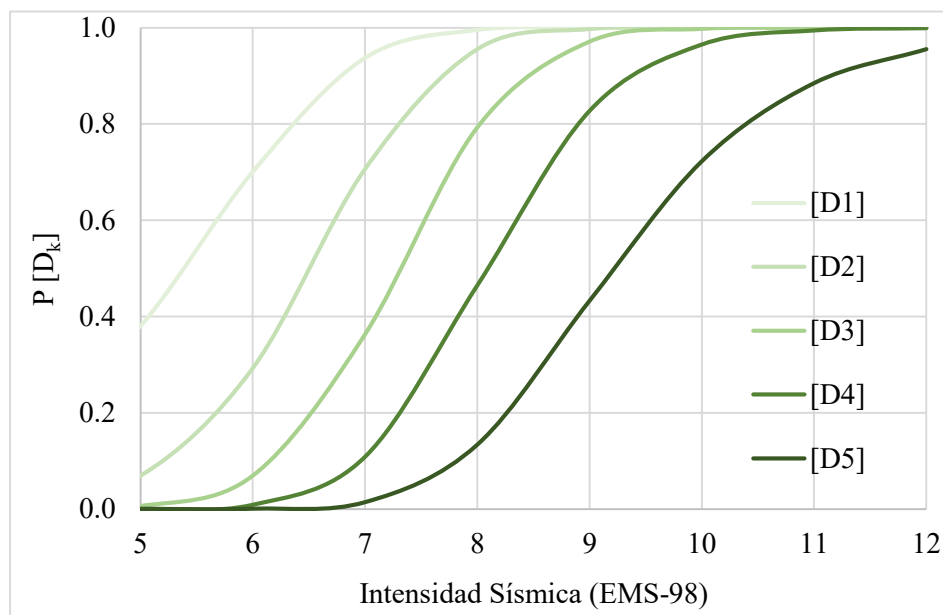


Figura 3.78. Curvas de fragilidad generadas con SVIVA.

Respecto a la fragilidad de las viviendas de adobe, si tomamos en cuenta los eventos de septiembre de 2017, los estados de Oaxaca y Chiapas reportaron intensidades de VII, VIII y IX, por lo que este tipo de escenarios lamentablemente son frecuentes en el país y los datos procesados tras los sismos de gran impacto muestran una respuesta de las edificaciones más cercana a las curvas generadas con SVIVA que las del método de Vicente (Galán Gaitán & Jiménez Miranda, 2018).

En la Figura 3.79 se muestra la estimación de pérdidas materiales de las construcciones en función de la intensidad sísmica, calculada a partir del grado de daño esperado. Se observa una curva mucho más pronunciada para el colapso de las estructuras que la generada con el MEVS de Vicente. A partir de una intensidad sísmica de 9 la probabilidad de colapso de las edificaciones sería muy significativa, con más de un 40% de las viviendas de adobe destruidas, situación que recuerda a la sufrida en Jojutla, donde el 39.80% de estas construcciones presentaron daños graves después del terremoto de Puebla de 2017 (Sánchez Calvillo, Alonso Guzmán, & López Núñez, 2021).

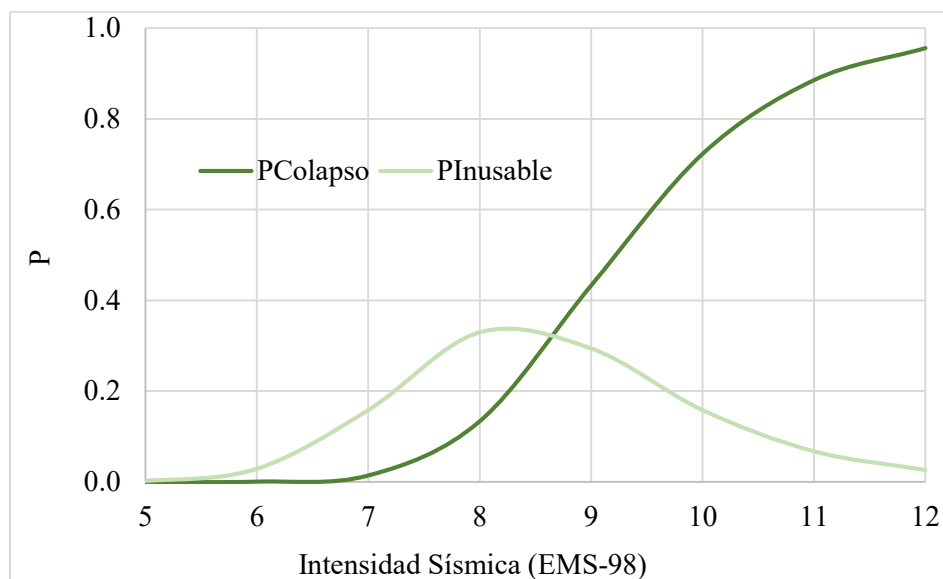


Figura 3.79. Probabilidad de colapso e inmuebles inservibles en función de la intensidad sísmica.

El último paso en la estimación de pérdidas es la generación de las curvas de probabilidad de damnificados (fallecidos y heridos en estado grave) y personas sin hogar, mediante las mismas ecuaciones usadas para el MEVS de Vicente a partir de la propuesta de Bramerini et al. (1995). La Figura 3.80 expone la estimación de las pérdidas humanas en función de la intensidad sísmica; los porcentajes de personas sin hogar a partir de una intensidad de 8 (escenario recurrente en muchas regiones de México) son preocupantes, evidenciando la importancia de una planificación de riesgos efectiva en el país.

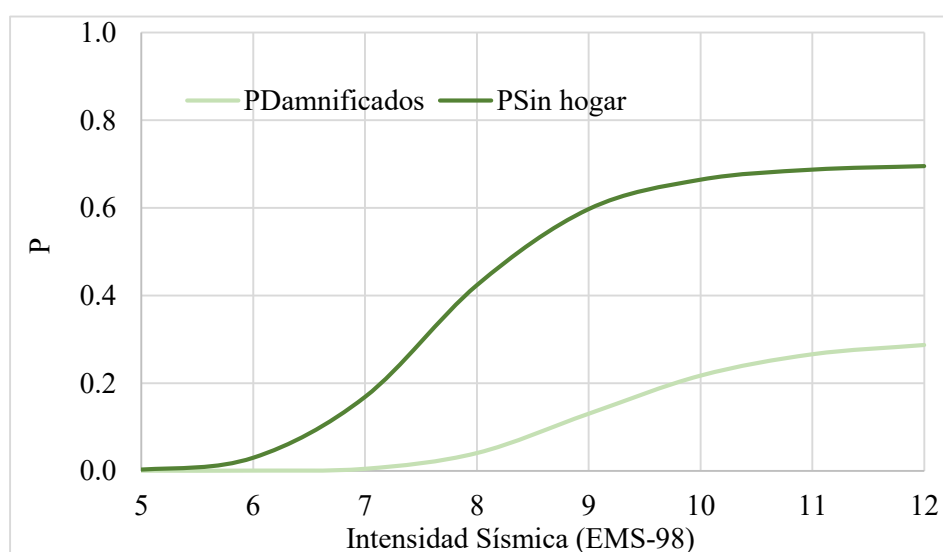


Figura 3.80. Estimación de damnificados y personas sin hogar en función de la intensidad sísmica.



3.4.4. Resultados obtenidos con el método SAVVAS

El método SAVVAS evalúa los mismos diez parámetros de vulnerabilidad que SVIVA bajo los mismos criterios., por lo que la distribución y asignación de las clases de vulnerabilidad es la misma que se representó en la Figura 3.73. La diferencia con el resto de MEVS radica en que, en vez de calcular un I_v , se busca obtener los tres estados límite de las edificaciones (LS1, LS2 y LS3) para cada una de las direcciones (tomando el valor más desfavorable). Estos factores de carga son expresados en función de una aceleración (g) que corresponde a límites de daño estructural sufridos por las edificaciones (Ortega J. et al., 2019).

Como resultado del proceso metodológico de SAVVAS, a partir de la asignación de las clases de vulnerabilidad y el cálculo de los valores numéricos de los parámetros, se obtuvieron los tres estados límite de las viviendas analizadas: respectivamente $LS1 = 0.250$ g, $LS2 = 0.378$ g, y $LS3 = 0.436$ g; presentando una σ de 0.169g, 0.151g y 0.165g; y un C_v de 67.75, 40.10 y 37.74 % respectivamente. La amplia respuesta de las edificaciones puede verse reflejada en la Figura 3.81, que muestra el histograma de distribución de los estados límite obtenidos, con algunas viviendas llegando a un valor de 0.8g para su LS3.

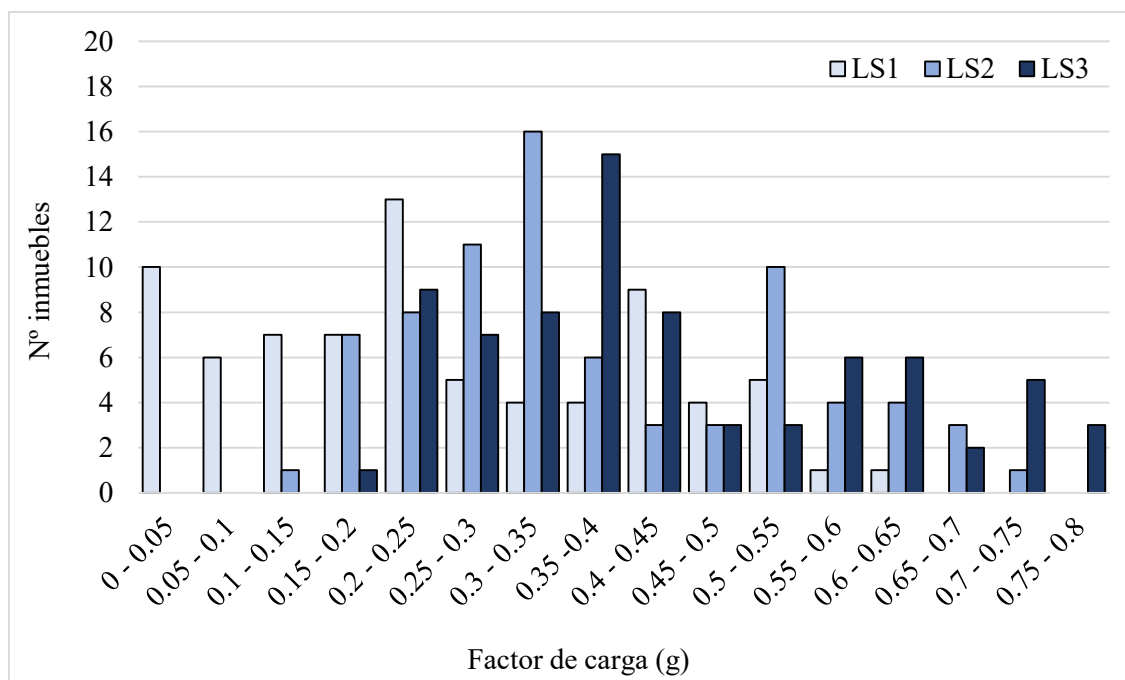


Figura 3.81. Histograma de distribución de los factores de carga por estado límite con la aplicación del método SAVVAS.



En contraposición a los altos valores del factor de carga, de una forma muy similar al histograma presentado por Ortega (2018) en su aplicación del método en la localidad de Vila Real de San Antonio, en Portugal; una gran cantidad de viviendas muestran un LS1 muy bajo, lo cual puede ser explicado por el grave estado de deterioro y daños previos que mostraron varias unidades.

Los valores de LS3 (escenario $\mu_D = 4$), para los que se prevé un daño estructural muy grave poco antes del colapso de las estructuras (escenario $\mu_D = 5$), pueden ser comparados con los coeficientes de aceleración sísmica reportados o indicados para las localidades estudiadas. En el caso de México, encontramos diversas metodologías de cálculo según la regionalización de las localidades y las normativas aplicables, además, según el tipo de estructura los coeficientes pueden variar¹⁵⁹. El método de obtención de las aceleraciones sería el siguiente: “En 2008, se comentó que el espectro de diseño sísmico estaría en función de la aceleración máxima en roca (a_r^0) obtenida a partir del Programa de Diseño Sísmico (PRODISIS), del periodo dominante del sitio, de la velocidad de efectiva del depósito y del tipo de estructura” (Cortés Morales et al., 2018).

Obviamente para la arquitectura vernácula e histórica los factores de diseño sísmico no fueron considerados, ni existieron reglamentos para su edificación. Sin embargo, estas construcciones están asociadas a las culturas sísmicas, anteriormente debatidas en el documento, por lo que de alguna manera sí siguieron un diseño sismorresistente en la mayoría de casos.

Siguiendo el proceso comentado por Cortés Morales et al. (2018), las aceleraciones límite calculadas para los cuatro casos de estudio pueden ser comparadas con las aceleraciones de los espectros de diseño en roca obtenidas en PRODISIS para cada una de las localidades (ver Tabla 3.6). Los valores en rojo corresponden al daño esperado asociado a ese estado límite, mientras que aquellos en verde representan un escenario esperado (según el valor de aceleración de diseño sísmico para la República Mexicana) en el que no se llega a presentar la afectación supuesta para ese estado límite. El caso de estudio de SPE es el que exhibe

¹⁵⁹ Se consideran tres grupos de estructuras: A+, A y B; siendo las primeras las más críticas en las que su falla sería inadmisibles (Cortés Morales et al., 2018). Las viviendas tradicionales no cuentan con una protección especial (exceptuando construcciones patrimoniales) por lo que serían consideradas en el grupo B.



valores más desfavorables al encontrarse en la región más sísmica y a la vez obtener las aceleraciones más bajas. Por el contrario, AR demuestra una vulnerabilidad muy baja, demostrando una resiliencia notable de sus construcciones.

Tabla 3.6. Correlación entre aceleraciones de estados límite y espectros de diseño en roca.

Localidad	LS1 (g)	LS2 (g)	LS3 (g)	Sa (g)
SPE	0.191	0.340	0.399	0.506
CO	0.253	0.366	0.421	0.405
AR	0.590	0.763	0.865	0.380
SC	0.309	0.402	0.456	0.428

La Tabla 3.6 nos permite estimar la vulnerabilidad de las viviendas de adobe estudiadas respecto al medio geográfico y los riesgos sísmicos en la región. LS3 es el estado límite más crítico, asociado a daños severos en las estructuras, por lo que los casos de estudio que presentan un valor superior a los espectros de diseño en roca serán los que presenten una mayor vulnerabilidad sísmica, siendo el único ejemplo de esta situación la localidad de SPE. Como conclusión, esta puede ser una herramienta de gestión del riesgo y políticas públicas, que debería derivar en el refuerzo sísmico de las viviendas y el mantenimiento de las construcciones existentes.

Siguiendo con la metodología, para obtener las curvas de vulnerabilidad, que expresan el grado de daño esperado en función de la aceleración sísmica. Los estados límite, como se comentó anteriormente corresponden a un μ_D determinado: $[(LS1 \rightarrow \mu_D = 2), (LS2 \rightarrow \mu_D = 3), (LS3 \rightarrow \mu_D = 4)]$; partiendo del principio que el $\mu_D = 1$ implica una $PGA = 0$, el único valor restante para calcular la curvas es la aceleración que correspondería a un $\mu_D = 5$. Este valor puede ser obtenido con la siguiente expresión, que implica un estado límite último asociado al colapso de las estructuras:

$$PGA(\mu_D = 5) = 1.25 \times LS3 \quad (\text{Ec. 3.33})$$

La Figura 3.82 muestra las curvas de vulnerabilidad de las viviendas, observándose un crecimiento exponencial muy diferente a las curvas generadas mediante el método de Vicente o SVIVA (ver Figuras 3.68 y 3.76). Cabe destacar que SAVVAS no detecta los grados de daño 0 ó 1 a partir de los estados límite, debido a que estos no presentan un carácter estructural. El factor de carga que define LS1 delimita el punto en el que la construcción alcanza el grado de daño 2 y empieza a mostrar daños estructurales leves.

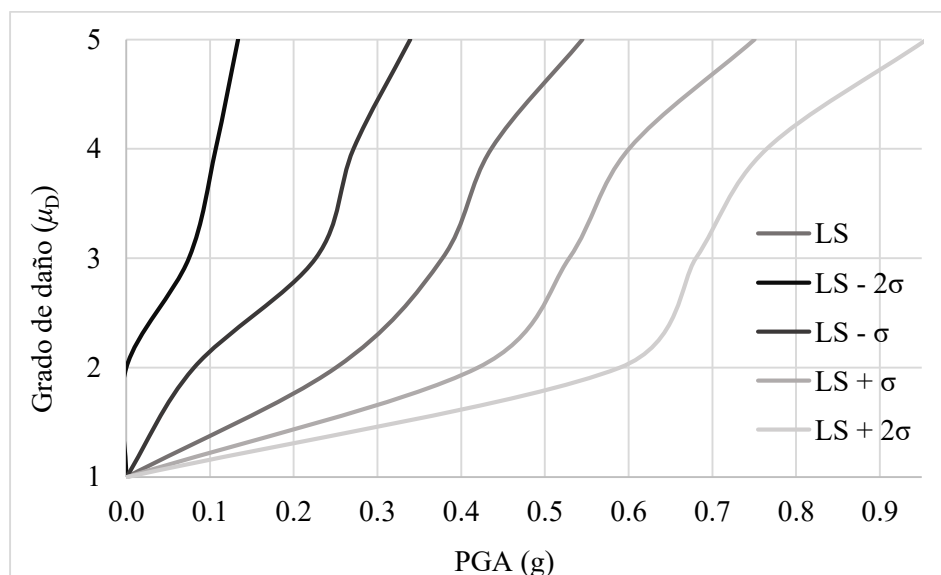


Figura 3.82. Curvas de vulnerabilidad generadas con SAVVAS.

Centrándonos en la comparación entre los cuatro casos de estudio, la situación reflejada en la Tabla 3.6, también queda representada en la Figura 3.83, en la que se muestran las curvas de vulnerabilidad de cada localidad y su contraste con el valor de referencia del LS general. SPE, CO y SC exhiben curvas parecidas, presentando daños graves a partir de aceleraciones cercanas a 0.3 g; mientras que AR llegaría a valores de 0.7 g para producirse el mismo grado de deterioro en sus viviendas.

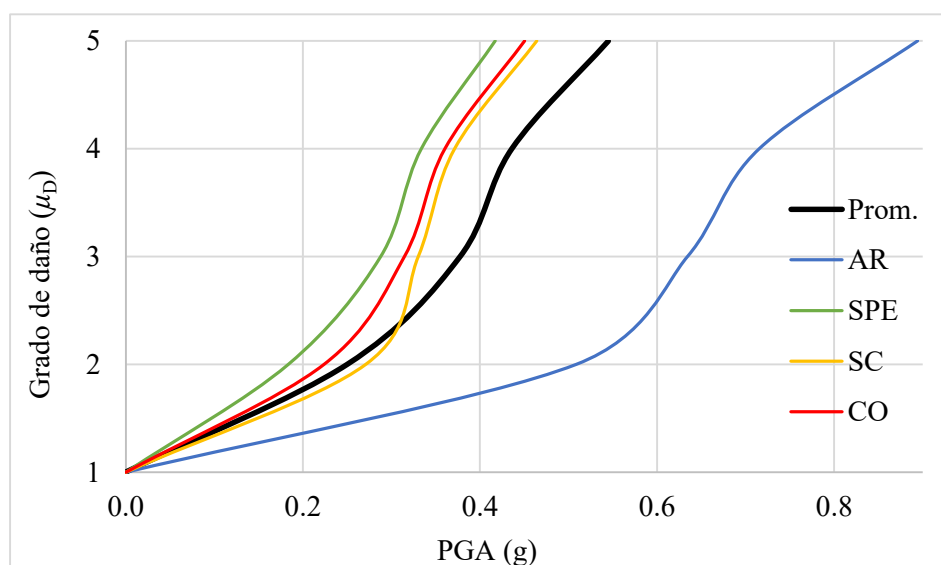


Figura 3.83. Comparativa entre las curvas de vulnerabilidad de los cuatro casos de estudio generadas con SAVVAS.



Las curvas de fragilidad pueden ser calculadas del mismo modo que las curvas de vulnerabilidad, en función de la PGA en vez de la intensidad sísmica definida por la EMS-98, éstas pueden verse representadas en la Figura 3.84. Como se citó anteriormente, SAVVAS no toma en cuenta el grado de daño $\mu_D = 1$, ya que no representa afectación estructural para las viviendas, por lo que únicamente se representan cuatro curvas en el gráfico. En el gráfico puede observarse que para un daño $\mu_D = 3$ (afectación media), aproximadamente el 40% de las viviendas experimentarían esta situación a partir de una PGA de 0.3 g; por otro lado, con esta misma aceleración sísmica el porcentaje de viviendas colapsadas todavía sería muy reducido.

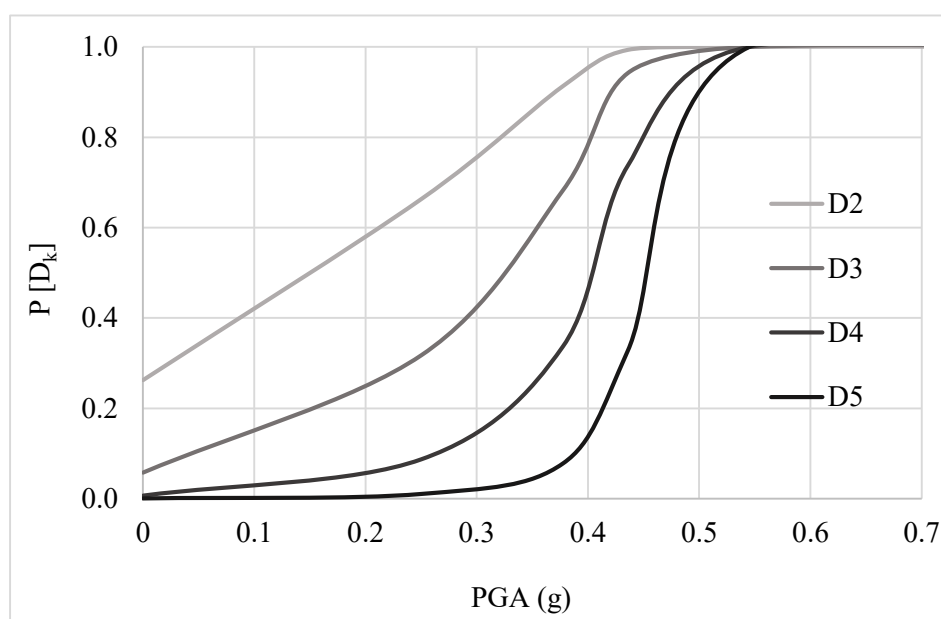


Figura 3.84. Curvas de fragilidad generadas con SAVVAS.

En cuanto a la evaluación de daños y pérdidas humanas, el funcionamiento de SAVVAS es el mismo, generando curvas en función de la PGA. Para el cálculo de las pérdidas materiales, las expresiones de la probabilidad son las mismas que se emplearon para el método de Vicente y SVIVA (ver Ecuaciones 3.28 y 3.29). La Figura 3.85 muestra la probabilidad de colapso y la probabilidad de las viviendas de quedar en un estado inutilizable. En comparación con las curvas de probabilidad generadas con SVIVA o el método de Vicente, la respuesta predicha para las viviendas sigue un comportamiento mucho más exponencial, hecho que parece reflejar mejor la realidad de los eventos sísmicos.

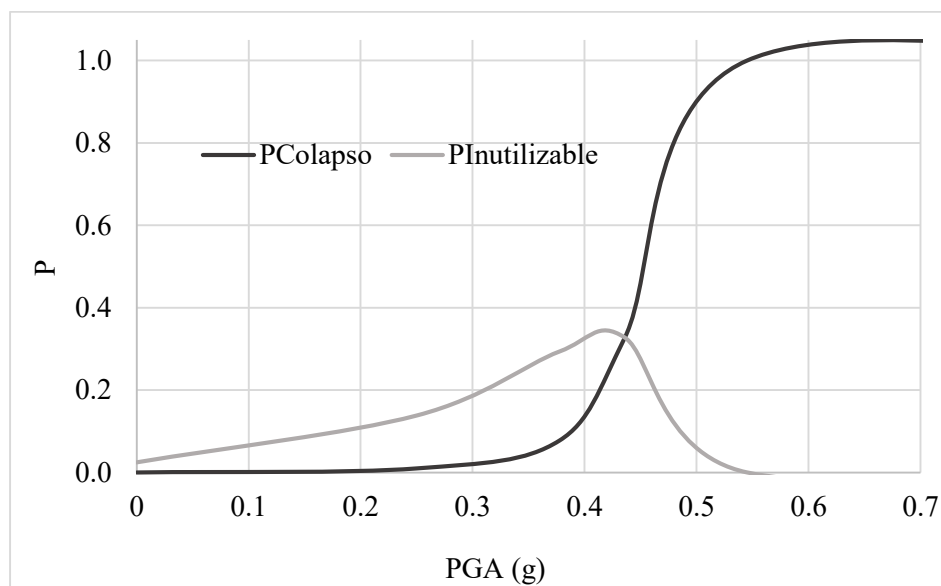


Figura 3.85. Probabilidades de colapso y viviendas inutilizables obtenidas con SAVVAS.

Por último, en la Figura 3.86 encontramos representadas las curvas de probabilidad de personas damnificadas y que quedarían sin hogar en función de la PGA. Podemos observar ciertos puntos de inflexión en ambas curvas, en los que la pendiente crece de forma pronunciada en oposición a los otros MEVS, que exhiben un crecimiento más lineal. Estos cambios en la pendiente aparecen en torno a las aceleraciones de 0.3 y 0.4 g, siendo valores cercanos a los espectros de diseño en roca de las localidades estudiadas (ver Tabla 3.6).

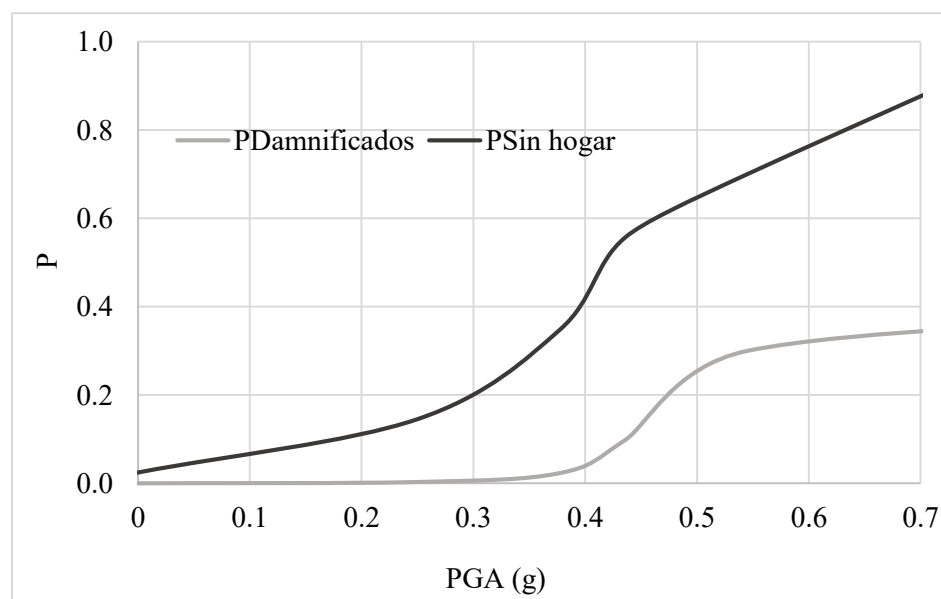


Figura 3.86. Probabilidades de personas damnificadas y sin hogar obtenidas con SAVVAS.



CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La vivienda de adobe es un fenómeno popular, y de forma popular también se han extendido una serie de mitos acerca de su constitución, funcionamiento y supuesta deficiente respuesta sísmica. Uno de los objetivos de la presente investigación es aplicar herramientas e instrumentos testados para comprobar cuál es la realidad respecto a la mencionada hipótesis.

Una primera conclusión general sobre la aplicación de métodos basados en índices de vulnerabilidad es que éstos constituyen herramientas rápidas para predecir el riesgo sísmico y daños esperados entre otros resultados. Sin embargo, la mayor ventaja que presentan es que a partir del estudio e inspección de conjuntos de inmuebles podemos colaborar en la reducción del riesgo y plantear estrategias de mitigación que puedan servir de ayuda para las localidades estudiadas, permitiéndonos llegar a un nivel de aproximamiento y particularidad que por ejemplo los métodos analíticos no nos ofrecen. Por el contrario, también debe resaltarse que estas mismas herramientas requieren una cantidad de tiempo y esfuerzos que no siempre son factibles, por lo que su escala de aplicación es limitada.

El estudio comparado de los MEVS permite determinar aspectos de la construcción tradicional de adobe que contribuyen a reducir la vulnerabilidad de las viviendas. Muchos de estos aspectos, trasladables a los parámetros incluidos en los métodos, posibilitan la identificación de estrategias y sistemas sismo-resistentes fruto de tecnologías y saberes ancestrales. Sin embargo, el fenómeno de la transformación de la vivienda vernácula y la configuración urbana de las localidades tradicionalmente construidas con adobe también es un aspecto crítico; parámetros como la heterogeneidad estructural y topológica de los edificios, el número de estructuras horizontales interdispuestas o la presencia de edificios con diferente altura se encuentran muy presentes en los fenómenos de abandono de la arquitectura de tierra y las situaciones actuales de los centros urbanos históricos.

Más allá de los valores de I_v medios para cada método, una de las principales aportaciones de este análisis es la identificación de casos de estudio que presentaron un mejor comportamiento general y aquellos que obtuvieron los índices más bajos, así como la comparación entre las distintas localidades en función de sus características. Podemos encontrar la correlación logística de los I_v de AR y SC obtenidos con los métodos de Vicente



y SVIVA¹⁶⁰ (ver Figura 3.87), siendo esta una de las posibles extensiones de la investigación a futuro.

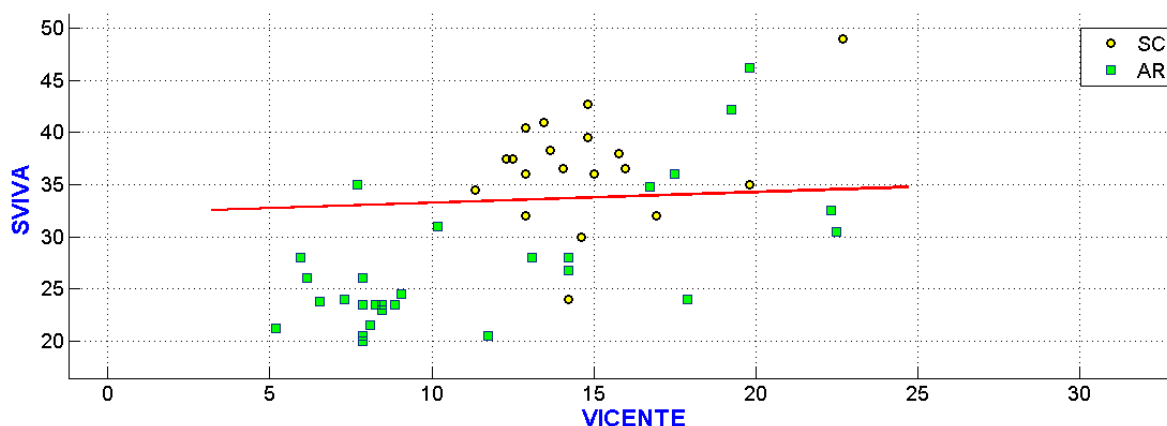


Figura 3.87. Gráfica de correlación logística entre el método de Vicente y SVIVA para los casos de estudio de Ario de Rosales y Santa Cruz de Morelos.

La gráfica nos demuestra que todavía es necesario un ejercicio de calibración extenso para adaptar estos métodos a las viviendas de adobe, ya que la correlación no es muy alta y varias de las unidades de estudio presentan valores de I_v muy distintos en función del método empleado. Sin embargo, este trabajo de calibración puede ser aplicado con facilidad debido a la gran cantidad de datos post-sismo y observación de daños a los que tenemos acceso en México, pudiendo ser esta una de las futuras líneas de actuación de cara a incrementar los esfuerzos para reducir el riesgo sísmico de la arquitectura vernácula.

Los mejores resultados en la aplicación de todos los métodos fueron obtenidos para las viviendas de AR, como puede observarse en el apartado 3.4. del presente capítulo. No obstante, pueden identificarse viviendas con condiciones muy favorables y bajos I_v en todas las localidades muestreadas como el caso de SPE09 (ver Figura 3.88), la cual presenta una edificación más cercana en el tiempo, pero ha mantenido los materiales y sistemas constructivos tradicionales, ejemplificando el creciente interés por retomar estas técnicas en busca de la sostenibilidad.

¹⁶⁰ En este caso la correlación es de gran interés debido a que los parámetros de los dos MEVS difieren en un alto grado.



Figura 3.88. Vivienda SPE09 con elementos de refuerzo. Fotografía: (I. Velasco-Hernández, K. L. Salvador-Alcalá, 2020).

Por el contrario, algunas viviendas presentaron valores de I_v más bajos reiteradamente en todos los MEVS, señalando aspectos constructivos y arquitectónicos críticos principalmente por su pobre estado de conservación y escaso mantenimiento. Varias viviendas en SPE, AR y SC mostraron un avanzado estado de deterioro debido a su reciente abandono. La Figura 3.89 muestra la situación de la vivienda AR14, que en el momento de la inspección únicamente estaba habitada por una persona de edad avanzada pese a contar con una superficie construida de más de 300 m².



Figura 3.89. Estado de conservación de la vivienda AR14. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).

La aplicación de MEVS en casos de estudio suele implicar una estimación de los daños económicos y los costos de reconstrucción y reparación de los inmuebles afectados. También es posible deducir las personas damnificadas de los casos de estudio a partir del número total de personas que habitan la localidad según las encuestas censales o el registro y catalogación de las viviendas. Las experiencias recientes con eventos sísmicos catastróficos en México nos han mostrado que los daños no se limitan a la destrucción física de las estructuras, sino que los efectos psicológicos en la población toman un papel principal en las etapas inmediatas (Sánchez Calvillo, Alonso Guzmán, & López Núñez, 2021). Conjuntamente, las regiones afectadas experimentan un decrecimiento económico importante (Spence, 2009), factor que incrementa la vulnerabilidad ya que resulta difícil atraer recursos fuera de la ayuda humanitaria.

La correlación más empleada para la estimación de daños parte del modelo propuesto por Dolce et al. (2006) a partir del procesamiento de datos post-terremoto usando el modelo GNDT para varios eventos críticos en Italia. Los autores establecen expresiones para el cálculo de la probabilidad del costo de reparación en función de la intensidad o la aceleración sísmica. Ortega et al. (2020) generan una discusión muy interesante para la localidad de la Vila Real de San Antonio en Portugal; al comparar los costos estimados en un escenario



simple, respecto a un segundo escenario ideal en el que se habrían aplicado estrategias de refuerzo anti-sísmico en los inmuebles, demostrando que una correcta gestión de riesgos es una inversión a futuro.

Sin embargo, para los casos de estudio de la investigación no se optó generar una estimación de los costos económicos y de reparación, debido a que los modelos fueron calibrados en Europa, donde la situación socio-económica es muy distinta. Por otro lado, al tratar la arquitectura vernácula es todavía más difícil hacer una aproximación, debido a que los objetivos de la investigación pasan por conservar estos sistemas constructivos, cuando una de las principales complicaciones es la pérdida del conocimiento tradicional y la dificultad de seguir edificando con los materiales locales debido a la ausencia de una mano de obra especializada.

Analizando en particular los distintos MEVS y resultados obtenidos mediante su aplicación, en primer lugar, el método propuesto por Formisano no resultó idóneo para la evaluación de las viviendas de CO y AR, al arrojar I_v negativos para varias de las unidades estudiadas. Por otro lado, el método SAVVAS demostró ser una de las herramientas más interesantes para el estudio de la vulnerabilidad sísmica de este tipo de construcciones. El hecho de eliminar el paso del cálculo de un I_v permitió que la correlación entre la demanda sísmica y la estimación de daños sea directa (Ortega J. et al., 2019), lo cual es una gran ventaja para la planeación de riesgos. Igualmente, los resultados arrojados por SVIVA y SAVVAS presentaron una mejor adecuación a las tipologías de adobe, basándonos en varios puntos que se discutirán a continuación.

En la Figura 3.90 encontramos representado el rango de valores de I_v que corresponden a las tipologías de mampostería de adobe de la EMS-98 (clases A y B) obtenidos a partir de la ecuación de correlación propuesta por Vicente (ver Expresión X), delimitando el intervalo entre $I_v = 20$ e $I_v = 45$. En el mismo gráfico se muestran las distribuciones normales de los tres métodos basados en índices de vulnerabilidad aplicados a los casos de estudio, observando que los resultado obtenidos con el método SVIVA están más cerca de los resultados esperados para viviendas de adobe.

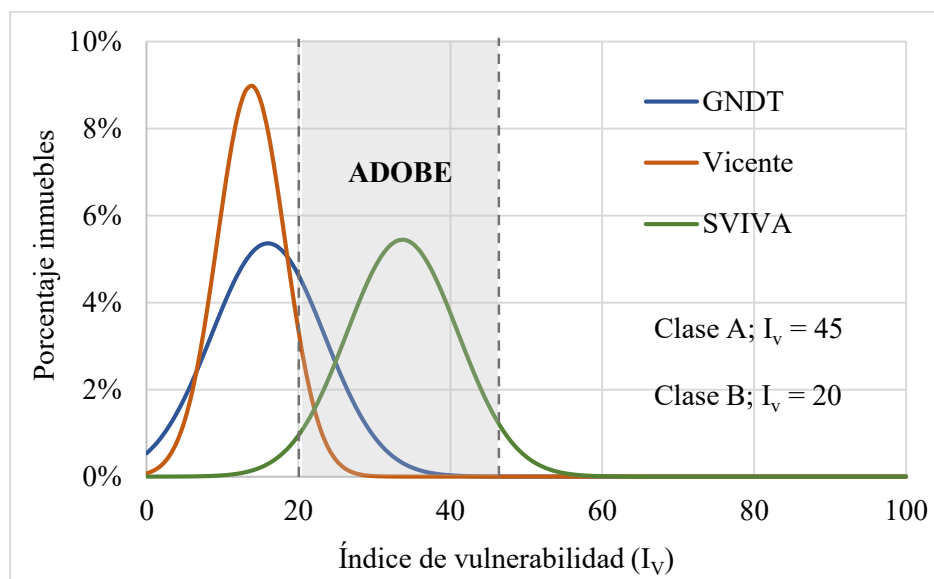


Figura 3.90. Correlación de la distribución normal de los métodos de índice de vulnerabilidad y su adecuación a las clases definidas por la EMS-98 para las tipologías de vivienda de adobe.

Siguiendo con la discusión de la Figura X, Como se comentó anteriormente el método de Vicente ofrece una distribución más ajustada, con un rango de valores más limitado, lo cual puede ser inconveniente al no lograr captar la gran variedad de aspectos que ofrece la arquitectura vernácula. En cambio, GNDT y SVIVA presentan distribuciones normales más amplias y prácticamente idénticas entre sí, con la diferencia que la segunda ofrece valores de I_v más elevados.

De una forma muy similar a la mostrada en la Figura 3.90, también es posible aplicar las ecuaciones de correlación citadas por Vicente *et. al.* (2011) y Ortega (2018) (ver Expresiones X y X) para obtener los I_v esperados para las edificaciones de adobe según la EMS-98 y el Método Macrosísmico de Giovinazzy y Lagomarsino (2006). En la Tabla 3.7 encontramos los valores de I_v calculados para la tipología M2, correspondiente a las construcciones de adobe, para los MEVS aplicados a los casos de estudio. Los valores de V pueden ser transformados a I_v a partir de las ecuaciones de correlación para calcular el grado de daño en función de la intensidad sísmica (revisar subcapítulo 3.4.).



Tabla 3.7. Correlación entre índices de vulnerabilidad (V) del EMS-98 e (I_v) de los MEVS de Vicente y Ortega para construcciones de adobe¹⁶¹.

M2 Adobe (Earth bricks)	Factor de vulnerabilidad				
Valor teórico V	V^-	V^-	V	V^+	V^{++}
EMS98 (Giovinazzi & Lagomarsino)	0.620	0.687	0.840	0.980	1.020
Valor teórico I_v	I_v^-	I_v^-	I_v	I_v^+	I_v^{++}
Correlación Vicente	9.38	19.84	43.75	65.63	71.86
Correlación Ortega	13.33	18.92	31.67	43.33	46.67
Valor obtenido I_v	I_v^-	I_v^-	I_v	I_v^+	I_v^{++}
Método Vicente	4.88	9.32	13.76	18.21	22.65
Método SVIVA	19.05	26.37	33.69	41.01	48.34

Puede observarse como el promedio de I_v obtenido en SVIVA para los casos de estudio de viviendas de adobe fue de 33.69, muy cercano al valor que arroja la ecuación de correlación de Ortega para condiciones estándar de edificaciones de adobe, $I_v = 31.67$; además, el resto de escenarios en función de la σ también encajan muy bien, al contrario que los valores obtenidos usando el método de Vicente. Este puede ser otro indicador preciso de la adecuación de los métodos SVIVA y SAVVAS a los casos de estudio que presentan un patrimonio construido en tierra.

En cuanto a los retos que se encontraron durante la investigación, en primer lugar está la omisión o desatención de la arquitectura de tierra por parte de todas las herramientas metodológicas y normativas existentes. Revisando la EMS-98, las referencias al adobe son desfavorables, asignando las clases de vulnerabilidad más altas a estos inmuebles, sin embargo, se reconoce que una sub-clasificación de ciertas tipologías, como las edificaciones de adobe y madera, sería necesaria para complementar y mejorar la tabla de vulnerabilidad (Grünthal, 1998).

Asimismo, muchos de los estudios efectuados en centros históricos, edificados en mayor medida con mamposterías históricas, no toman en cuenta el uso de sistemas a base de tierra, pese a que estos configuran gran parte de los sistemas de muros portantes de los inmuebles. Por lo tanto, es necesario hacer adaptaciones y calibraciones de estas herramientas para lograr una mejor adecuación a las viviendas tradicionales de adobe, que constituyen una de las

¹⁶¹ Para el cálculo de las curvas de vulnerabilidad a partir de la tabla de índices de vulnerabilidad generada para distintas tipologías de edificios, Lagomarsino y Giovinazzi tomaron un coeficiente de ductilidad $Q = 2.3$.



tipologías constructivas más populares y significativas en todo el mundo. SVIVA y SAVVAS constituyen una nota muy positiva en este aspecto, al ser concebidas para el análisis de la arquitectura vernácula, que engloba muchos más sistemas además de la tierra pero ya demuestra una mayor atención a las técnicas tradicionales.

Otro de los principales problemas encontrados durante la aplicación de los MEVS fue la valoración y asignación del coeficiente de ductilidad Q para este tipo de construcciones. De la revisión bibliográfica de la literatura no se obtuvo un valor claro de referencia, con distintas asignaciones por parte de los autores; de hecho, el *Manual de Diseño por Sismo* de México no contempla el sistema constructivo de adobe en su clasificación. Este es un factor crítico, ya que el optar por un valor u otro modifica sustancialmente las curvas de vulnerabilidad y consecuentemente las de fragilidad, por lo que debe tomarse en cuenta. Esta discusión debería ser uno de los puntos a explorar en futuras investigaciones, logrando un mayor consenso mediante la comparación de resultados.

Proseguir con la investigación de estos sistemas constructivos tradicionales es primordial de cara a resolver varios de las problemáticas enunciadas en la introducción y planteamiento del capítulo, como son las carencias relativas a la reglamentación y normatividad de las viviendas de adobe. Por otro lado, la integración de las herramientas SIG en futuras investigaciones y desarrollos debe ser uno de los pilares a seguir, ayudando a crear escenarios aproximados para la toma de decisiones a nivel urbano. Sin embargo, es más difícil aplicar estas implementaciones en los casos de estudio rurales más aislados en los que la información estadística y geográfica no es tan confiable.

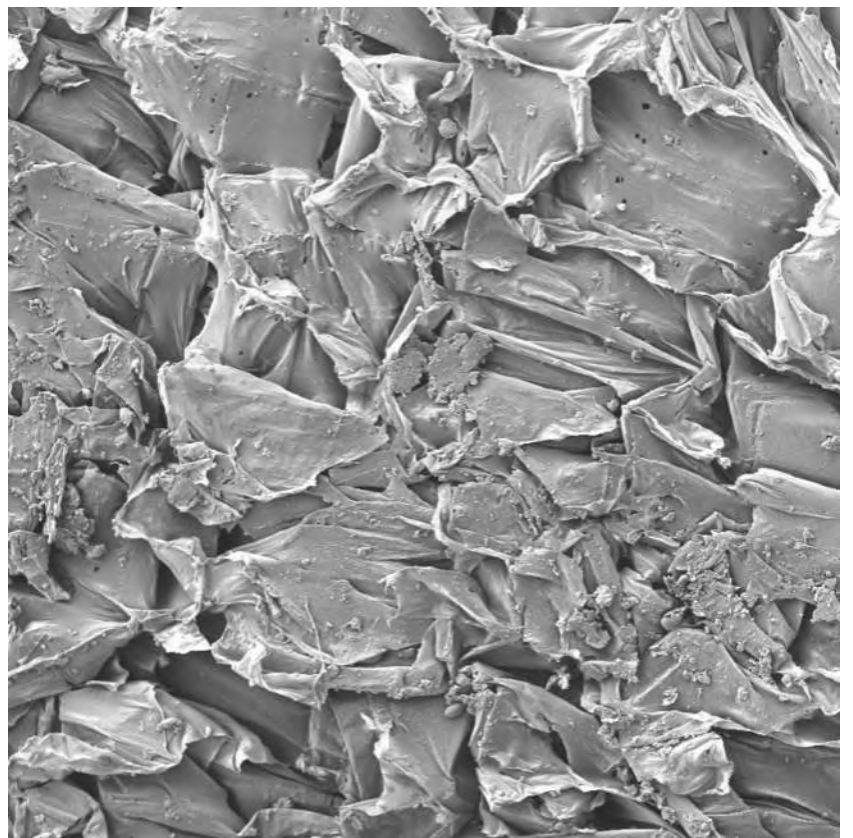
Por último, en futuras adecuaciones o creación de nuevos modelos, la revisión de los parámetros es de especial importancia, debido a las ya citadas características específicas de la vivienda de adobe. La disponibilidad de SVIVA y SAVVAS para el análisis de la arquitectura vernácula supone un gran adelanto, ya que permite una aproximación más adecuada a las unidades de estudio. Sin embargo, es necesario hacer algunas adaptaciones a los MEVS para lograr una mejor adecuación a las tipologías de tierra que quieren estudiarse con más detalle, una propuesta que no es nueva (Sáez, 1999), pero para la que actualmente contamos con mejores herramientas y un conocimiento mucho más distendido de las problemáticas.



Una de las posibles revisiones de los parámetros pasaría por el estado de conservación y alteración de las construcciones vernáculas. Éste es uno de los condicionantes más importantes de la vulnerabilidad sísmica, siendo un hecho ampliamente documentado en la literatura y corroborado con la observación directa o los métodos de vulnerabilidad observada. En Jojutla de Juárez pudo comprobarse como la modificación de las viviendas mediante sistemas no compatibles, la compartimentación de los espacios o la falta de mantenimiento contribuyeron negativamente al incremento de la vulnerabilidad, dando lugar a elevados grados de daño y el colapso de gran parte del patrimonio edificado.

Otro de los parámetros a ser considerados es el de la calidad y resistencia del sistema estructural, que los diferentes MEVS tratan de forma distinta. Los sistemas constructivos de tierra suelen ser asignados con las clases de vulnerabilidad más bajas, pese a que con el cálculo de la resistencia convencional la mayoría de viviendas presentaron una clase B debido a la gran sección constructiva de los muros de adobe. Adicionalmente, el trabajo de caracterización realizado en el Capítulo IV, ha permitido obtener las propiedades físico-mecánicas de los bloques, lo que podría ayudar a complementar la toma de decisiones.

CAPÍTULO IV. EN BUSCA DE UNA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE TIERRA







INTRODUCCIÓN

Como se comentó en los capítulos anteriores, la arquitectura de tierra ha sido estigmatizada en las últimas décadas, recuperando su prestigio hasta hace relativamente poco gracias al trabajo de iniciativas y grupos especializados que han buscado revertir esta situación y presentar todo tipo de dinámicas que ayuden a la revitalización de esta cultura. Esta situación puede verse reflejada en la producción científica referente a la caracterización de materiales de construcción: son pocos los medios que incluyen estos sistemas pese a que cada vez encontramos más trabajos que versan sobre los materiales tradicionales.

La necesidad de un enfoque más tecnificado se hace patente con la ausencia de trabajos especializados en la caracterización material, reglamentos constructivos que regulen la edificación con adobe o normas técnicas complementarias que consideren otros aspectos relativos o secundarios. Se tiende a evitar la especialización para las normativas (Cid, Mazarrón, & Cañas, 2011), motivo por el cual suelen contener especificaciones a nivel general, contemplando en este caso los materiales y sistemas constructivos industrializados que son los que se emplean en la gran mayoría de las edificaciones. En México, esta no es una situación específica del adobe o el bajareque, sino que todos aquellos materiales locales,



tradicionales y sostenibles de la arquitectura vernácula (ver Figura 4.1) cuentan con pocos antecedentes de investigación además de estar estigmatizados por gran parte de la población.



Figura 4.1. Materiales tradicionales de la arquitectura vernácula de Michoacán: roca, madera y tierra. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2019; A. Sánchez-Calvillo, 2020).

La presencia de estas guías, manuales y las escasas normativas existentes a nivel internacional constituye un apoyo metodológico muy valioso a la hora de caracterizar materiales de tierra; sin embargo, lo más común es encontrar malas prácticas e intervenciones en los inmuebles tradicionales evidenciando el desconocimiento y la aplicación de materiales y soluciones sin ningún tipo de compatibilidad (ver Figura 4.2). El fenómeno de la autoconstrucción, tan extendido por todo el país e irónicamente la base de la arquitectura vernácula, ha contribuido a agravar la situación, debido a que los modos y sistemas de construcción tradicional han sido olvidados por la mayoría.



Figura 4.2. Construcciones de adobe con intervenciones no compatibles: (a) Vivienda en Tzintzuntzan, Michoacán, México; (b) Muro perimetral en Quiroga, Michoacán, México. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).



A nivel nacional llama la atención la falta de un mayor desarrollo de la investigación en la arquitectura de tierra, pese a contar con un patrimonio construido en adobe que supera ampliamente el millón de viviendas¹⁶². Por ello, el trabajo desarrollado en los últimos años por algunos académicos e investigadores es encomiable, así como todas las iniciativas de formación e incidencia de organizaciones como Cooperación Comunitaria¹⁶³. Llama la atención que, pese a que las posibilidades de estos materiales en el sector de la edificación son infinitas, haya tan pocas iniciativas y esfuerzos dirigidos a la preservación, restauración y desarrollo de estas técnicas constructivas.

La tierra cuenta con un enorme potencial y su incorporación en los nuevos procesos de construcción debe ser una competencia básica en la formación de los próximos profesionales del sector. Por ello, en este último capítulo de la tesis doctoral el objetivo principal es conformar una metodología de análisis para sistemas constructivos de tierra, principalmente adobes, que pueda ser aplicada de forma continuada para servir como una directriz en un nivel general, considerando la escasa producción científica especializada en México.

La metodología queda desglosada en tres grandes grupos de propiedades que se quieren conocer: en primer lugar la caracterización físico-química de los suelos y adobes, que toma en cuenta aspectos como la densidad, color, potencial de hidrógeno, composición del material a partir de la distribución granulométrica y la clasificación con límites, mineralogía; en segundo lugar la caracterización mecánica, que permite predecir el comportamiento estructural de los bloques; y finalmente la caracterización de la durabilidad y la resistencia al agua, que es el principal agente de deterioro de estas construcciones.

Varios de los ensayos planteados constituyen instrumentos de análisis muy adecuados para estos sistemas pese a los pocos antecedentes de aplicación. Los ensayos no destructivos (NDT) que comprenden una amplia gama de técnicas que nos permiten obtener información muy variada sobre el material y su constitución sin comprometer su estabilidad; además de su posible manejo *in situ* que puede ser muy adecuada para construcciones patrimoniales o

¹⁶² 1400633 viviendas de adobe de acuerdo al Censo de Población y Vivienda de 2020 del INEGI (INEGI, 2021)

¹⁶³ Organización sin fines de lucro que cuenta con una gran experiencia en proyectos de reconstrucción de vivienda y autogestión de las comunidades, incluyendo el trabajo con construcciones de adobe y bajareque. Revisar: <https://cooperacioncomunitaria.org/>



dañadas por fenómenos naturales. Por otro lado, la caracterización mineralógica y elemental ha sido muy poco explorada a nivel nacional excepto en aquellos estudios de arquitectura de tierra desde la disciplina arqueológica, por lo que la aplicación de estas técnicas en la investigación supone un precedente muy valioso.

A partir de la correlación de los resultados obtenidos se busca obtener una mejor comprensión de estos materiales, con el objetivo último de poder replicar los alcances obtenidos en otros casos de estudio, siendo este el principal aporte de la investigación. Como objetivo secundario, se trató de aplicar la metodología en material proveniente de Jojutla de Juárez (JJ), una de las localidades del país más afectadas por el sismo de Puebla de 2017, que generó una destrucción general de las viviendas de adobe. De este modo, se buscará conocer la influencia y afectación de los eventos sísmicos en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, siendo un aspecto innovador con muy pocas referencias hasta el momento (Sunkar & Aksoy, 2015).

En este último capítulo del documento se buscará responder a este vacío de conocimiento de la tierra a partir de la generación de conocimiento científico. Primeramente, se efectuará una revisión del estado del arte de la caracterización de materiales y sistemas constructivos a base de tierra, tanto a nivel global como explorando los casos nacionales, que desafortunadamente no son abundantes. De este modo puede justificarse la relevancia de la presente investigación, que puede servir como referencia para futuros trabajo que versen en torno a los sistemas constructivos de tierra, especialmente el adobe. También se presentará el proceso de recolección de las muestras físicas a partir de distintos proyectos de investigación llevados a cabo por el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

En segundo lugar, se justificarán las herramientas de análisis y la propuesta metodológica con una fundamentación en la previa revisión del estado del arte global. Los métodos de ensayo, que contarán con una revisión de su aplicación en materiales de tierra para posteriormente hacer una comparación de los resultados con casos análogos. En esta sección del capítulo se presentan 16 métodos de ensayo y sus respectivos equipos, materiales, normativas y experiencia de los procedimientos en el laboratorio (ver Figura 4.3).



Figura 4.3. Proceso de caracterización de los adobes en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”. Fotografías: (D. Preciado-Villicaña, 2019; A. Sánchez-Calvillo, 2020).

Finalmente, se generará una discusión de los resultados obtenidos a partir de la caracterización mediante la metodología planteada y los grupos de ensayos, buscando correlacionar los valores obtenidos entre ellos y con las principales publicaciones de referencia a nivel internacional. A partir de esta discusión y comparación de los casos de estudio pudo validarse el trabajo realizado y generar las conclusiones generales para dar cierre al capítulo.



4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN Y LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE TIERRA

Pese a las problemáticas presentadas a lo largo de todo el documento, acerca olvido, desconocimiento y abandono de la arquitectura de tierra, también es importante recalcar que en los últimos años estas técnicas constructivas han experimentado una revisión y revalorización que puede considerarse un logro colectivo. Haciendo una revisión de la literatura, algunos autores han recopilado importante información y resultados acerca de estas técnicas, que fungen como referencias para todos los que hoy en día estudiamos la arquitectura de tierra y sus diversos sistemas constructivos.

Por ello, en esta sección del capítulo se hará una breve revisión del estado del arte y las investigaciones más punteras encontradas en referencia a la caracterización material de la arquitectura de tierra, con un énfasis en el sistema constructivo del adobe, objeto principal de estudio del documento. Por otro lado, se detallarán los antecedentes de la investigación y los proyectos que llevaron a conformar el presente documento y la delimitación de la metodología de caracterización presentada.

4.1.1. Perspectiva global del estado del arte en la caracterización de materiales y sistemas constructivos de tierra

Muchos autores se han centrado en el estudio de la arquitectura de tierra como patrimonio cultural, con trabajos interesantes cuya última finalidad es la protección, preservación y conservación. Una de las principales estrategias consiste en la identificación, documentación y catalogación de estos inmuebles y monumentos, pudiendo encontrar una infinidad de ejemplos alrededor del mundo (Hanzalová & Pavelka, 2013; Matoušková et al., 2021; Mousourakis et al., 2020; Schauppenlehner et al., 2021). En México destaca este acercamiento por encima de los demás, con un trabajo muy completo de reconocimiento de los sistemas constructivos y exposición de la situación actual de los mismos, destacando la extensa bibliografía de Luis Fernando Guerrero Baca, uno de los pioneros a nivel nacional.

Sin embargo, el enfoque del análisis que más nos interesa para este capítulo es la caracterización material, con la fundamentación del desconocimiento técnico de estos sistemas y la escasez de documentos y regulaciones que promuevan la construcción con



tierra. En este sentido, hasta hace relativamente poco los conocimientos de técnicas como el adobe, el bajareque o la tapia eran fundamentalmente empíricos, transmitidos de generación en generación; sin embargo, los estudios de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas eran escasos o inexistentes.

Como se comentó anteriormente una de las principales causalidades de la limitada caracterización de la tierra es la carencia de lineamientos, guías metodológicas o normas técnicas que sean de ayuda para todo aquel que quiera construir con este material, con muy pocos países o regiones que cuenten con normativas específicas (Cid, Mazarrón, & Cañas, 2011). Sí encontramos una mayor cuantía de documentos de tipo recomendación como las iniciativas y publicaciones de PROTERRA (Martins Neves, Borges Faria, Rotondaro, Cevallos Salas, & Hoffmann, 2009) o las del Getty Conservation Institute, como parte del comité Earthen Architecture Initiative, en el que se detallan y listan las diferentes pruebas y procedimientos a aplicar en materiales de tierra (The Getty Conservation Institute, 2011).

Con un enfoque principal en la caracterización de materiales, el planteamiento principal de este capítulo, en los recientes años el crecimiento de las publicaciones ha sido exponencial; sin embargo, no deja de ser una competencia especializada, y el conocimiento es mucho más limitado que el de otros materiales de construcción. Destacan los trabajos publicados en Portugal en los últimos años (Costa et al., 2019; Parracha J. L. et al., 2019; Silva et al., 2020; Silveira, et al., 2012), que han logrado perfeccionar la metodología de análisis hasta lograr un nivel de especialización y confiabilidad de los resultados muy altos. Destacan las últimas publicaciones de João Luís Parracha y sus colaboradores, con casos de estudio significativos y que presentan similitudes con los presentados en este documento.

Los múltiples estudios se centran tanto en las edificaciones de adobe como las de tapia y los morteros a base de tierra. La caracterización de los adobes de construcciones vernáculas en Leiria incluye varios ensayos no destructivos y de resistencia mecánica, además de resistencia a la humedad y la abrasión, sentando un precedente muy completo; sin embargo, no se emplean técnicas de composición mineralógica que sí fueron aplicados en los estudios de los morteros de tierra del castillo de Paderne (Parracha et al., 2019). No obstante, el aporte más interesante consiste en que este trabajo de caracterización material se complementa con otras publicaciones centradas en la caracterización de la tipología arquitectónica vernácula



para poder establecer estrategias de conservación de este patrimonio (Parracha J. L. et al., 2021), de forma muy similar a la planteada en el Capítulo II del documento.

Pero sin duda alguna, uno de los trabajos más importantes publicado en los últimos años es el libro *Testing and Characterization of Earth-Based Building Materials and Elements*¹⁶⁴, compilando un extenso estado del arte de la caracterización de estos materiales. El libro cuenta con varios capítulos que desarrollan aspectos concretos de la caracterización como las propiedades mecánicas, la durabilidad, respuesta sísmica, análisis del ciclo de vida, etc. y supone uno de los acercamientos más completos a la arquitectura de tierra que podemos encontrar.

Un aspecto muy interesante es que la misma caracterización material cuenta con distintos enfoques y objetivos: por un lado, en el ámbito patrimonial encontramos trabajos focalizados en el análisis de estructuras históricas y arqueológicas como los adobes (Pérez, Bucio, Bokhimi, Lima, & Soto, 2016; Sanchez-Calvillo, et al., 2021; Varum, Costa, Fonseca, & Furtado, 2015), tapias (Infante Gomes et al., 2022), o morteros de tierra (Carreira et al., 2021). Por otro lado, encontramos investigaciones centradas en la potenciación y desarrollo tecnológico de las técnicas tradicionales para una mejora en las propiedades que permita el uso continuado de estos materiales (Araya-Letelier et al., 2020; Araya-Letelier et al., 2021; Ben Mansour, Jelidi, Soukaina Cherif, & Ben Jabrallah, 2016). Esta es una de las líneas más interesantes, pese a que se aleja del ámbito patrimonial, pero constituye la mejor estrategia para el uso continuado de la tierra como material de construcción.

En este sentido, también pueden encontrarse artículos tipo *review* acerca de temas específicos relacionados con el material, como las propiedades higrotérmicas (Giada et al., 2019), la caracterización con ensayos no destructivos (Barnaure et al., 2021), las propiedades mecánicas (Sánchez et al., 2022), la selección de suelos (Jiménez Delgado & Cañas Guerrero, 2007), el uso de fibras naturales (Ramakrishnan et al., 2021), o bien la revisión de las normativas y regulaciones existentes a nivel internacional (Cid, Mazarrón, & Cañas, 2011; Schroeder, 2012). Estos trabajos constituyen una gran herramienta al recopilar y compendiar gran parte del conocimiento actual sobre estos sistemas en torno a cuestiones tanto generales

¹⁶⁴ Ensayos y caracterización de materiales y elementos de construcción a base de tierra (traducción libre del autor).



como de mayor especialización. Además, los valores reportados en estas investigaciones y los métodos de ensayo permiten poner en contexto los resultados obtenidos a partir de la experimentación.

Respecto a las propiedades mecánicas es dónde encontramos la mayoría de referencias y estudios, debido a que son los parámetros más estudiados y los que rigen la mayoría de normas de construcción. Varios autores señalan que los métodos de ensayo de resistencia mecánica de otros materiales de construcción comunes no pueden ser aplicados del mismo modo estandarizado, debido a que los procedimientos de análisis no siempre son factibles o adecuados para estos materiales (Aubert et al., 2013). En este supuesto puede llegar a entenderse la falta de regulación para estos sistemas constructivos, que desde la academia se ha venido reclamando en las últimas décadas (Fabbri et al., 2021).

Como respuesta, Silveira et al. (2012) investigan el comportamiento mecánico de edificaciones antiguas de adobe; por otro lado, Miccoli et al. (2014), establecen una interesante comparativa entre distintos sistemas constructivos como la tapia, el adobe y el cob¹⁶⁵. Araya-Letelier et al. (2020) caracterizan la influencia en la resistencia a partir de la adición de fibras provenientes de la gestión de residuos. Sánchez et al. (2022) hacen una interesante revisión de los trabajos existentes para la mejora de los procesos de rehabilitación e intervención.

En cuanto a la caracterización mineralógica, los trabajos que emplean este tipo de técnicas son todavía menos frecuentes, con la mayoría de ejemplos en los estudios que contemplan patrimonio arqueológico de tierra (Adorni et al., 2013; Daneels et al., 2020; Mateu Sagues & Daneels, 2021; Pérez Castellanos, 2021). En el artículo de Sánchez et al. (2022) en el que se examina la metodología de caracterización de algunas de las investigaciones más relevantes en los últimos quince años, únicamente el 12% de las mismas emplean esta herramienta de análisis.

Respecto a la estabilización y adiciones la literatura también es extensa y variada: varios autores han explorado el uso de las fibras desde su origen y composición (Laborel-Préneron

¹⁶⁵ El cob es una técnica de construcción con tierra con la singularidad de que los componentes constructivos no necesariamente conforman bloques, sino que suelen moldearse a mano configurando elementos monolíticos.



et al., 2016), su efecto en las propiedades mecánicas de los bloques (Yetgin, Çavdar, & Çavdar, 2008), o la determinación de la proporción óptima para lograr las mejores características en la edificación (Catalan, Hegyi, Dico, & Calin, 2016). También el uso de estabilizantes convencionales o novedosos es una de las líneas de investigación más comunes, con múltiples trabajos que exploran el uso de cal (Navarro Mendoza et al., 2019; Navarro Mendoza et al., 2022; Taallah & Guettala, 2016), cemento (Nagaraj et al., 2014), fibras (Araya-Letelier et al., 2021) (Sharma, Vinayak, & Marwaha, 2015), u otros estabilizantes volumétricos (Sánchez et al., 2022).

Si nos centramos en la producción científica en México, el acercamiento ha sido más orientado a la investigación de la arquitectura de tierra desde la perspectiva de la tecnología constructiva y la importancia cultural de estas edificaciones tradicionales (Guerrero Baca, 2007; Guerrero Baca L. F., 2011; Guerrero L. , 2013). Como se comentó con anterioridad, pese a la riqueza y variedad de construcciones del país y sus diversas regiones, los artículos y trabajos de investigación que hagan referencia a la caracterización de estos materiales son muy escasos. En esta línea, a partir del proyecto DBMC 2020 (ver antecedentes en capítulo II del documento) se pudieron realizar estos trabajos en el estado de Michoacán, permitiendo identificar las principales tipologías de arquitectura vernácula y el uso de la tierra como material de construcción (Sánchez-Calvillo et al., 2021); observando la importante presencia de la vivienda de adobe en varias de las regiones y ecosistemas del territorio.

En cuanto a los trabajos a nivel nacional que han realizado caracterización de adobes, la mayoría se ha centrado en las capacidades mecánicas de estos materiales (Arroyo Matus, Sánchez Tizapa, & Catalán Quiroz, 2013; Catalán Quiroz et al., 2019; Ruiz Sibaja & Vidal Sánchez, 2015), obviando el uso de técnicas no destructivas o la identificación de los componentes minerales de las arcillas y los ensayos de caracterización química del material. Sin embargo, debe destacarse la excelente producción científica en torno al patrimonio arqueológico de tierra mesoamericano, destacando la extensa producción de Annick Daneels y la publicación de la serie *Arquitectura mesoamericana de tierra*. Encontramos algunos trabajos muy completos que emplean técnicas químicas y de microcaracterización en adobes históricos en los trabajos de Nora Pérez (2015), que presentan una de las caracterizaciones más completas de este material a nivel nacional.



Por supuesto también están los antecedentes de la propia investigación, que ayudaron a establecer una metodología de caracterización de adobes históricos. Por ello, encontramos como referencias la tesis de licenciatura de Preciado Villicaña (2020) y de Ruiz Mendoza (2022) Además de las publicaciones que anteceden a la tesis doctoral acerca de la misma metodología (Sanchez-Calvillo, et al., 2021), o de grupos de ensayos y pruebas específicas como la colorimetría (Sánchez-Calvillo et al., 2020), módulo de elasticidad (Ruiz-Mendoza et al., 2020), ensayo point load (Sanchez et al., 2021) o la prueba de absorción capilar (Ruiz-Mendoza et al., 2022).

Sin embargo, para realizar todo este trabajo fue necesaria la identificación de casos de estudio y la obtención de muestras físicas para la caracterización en el laboratorio. Por ello, en el siguiente apartado se especifican todos los condicionantes y el proceso de trabajo en campo previo a la experimentación; para estos procedimientos también fue importante la revisión del estado de arte, pudiendo identificar casos análogos en los que se recolectaron adobes históricos y/o patrimoniales.

4.1.2. Casos de estudio, toma de las muestras y preparación de los materiales

Una de los pasos primordiales para poder efectuar el trabajo de caracterización en el laboratorio fue la previa obtención de las muestras, sin las que se podría efectuar la experimentación. Para lograr recolectar el material se recurrió al trabajo de campo y a la vinculación con los proyectos previamente presentados¹⁶⁶, buscando recolectar muestras representativas y variadas. de la construcción con adobe en México.

En total, para la investigación se emplearon muestras de adobes y suelos naturales de cuatro localidades distintas: Jojutla de Juárez (JS y JO), en el estado de Morelos; y la Huacana (H), Santa Cruz de Morelos (SC), y Taretan (TA), del estado de Michoacán. En la Tabla 4.1 aparecen referenciadas las nomenclaturas, procedencia y tipología de las muestras recolectadas; también se aprecia el código cromático de cada caso de estudio, con el que se representan los resultados en las gráficas. Como se mostrará para cada uno de los casos de estudio, no siempre fue posible obtener bloques enteros de material, debido a la destrucción

¹⁶⁶ Revisar el Capítulo II para ver los alcances de los proyectos de investigación y cooperación al desarrollo.



y deterioro de los inmuebles; por ello, en algunos casos los especímenes correspondieron a bloques completos de adobe mientras que en otras ocasiones pudieron recolectarse fragmentos o núcleos en forma de cilindros.

Tabla 4.1. Casos de estudio de la investigación.

Código	Localidad	Estado	Tipo de muestra
JO	Jojutla de Juárez	Morelos	Adobes y fragmentos de adobe
JS	Jojutla de Juárez	Morelos	Suelos inalterados
H	La Huacana	Michoacán de Ocampo	Adobes y núcleos de muros
SC	Santa Cruz de Morelos	Michoacán de Ocampo	Adobes y núcleos de muros
TA	Taretan	Michoacán de Ocampo	Fragmentos de adobe

En un orden cronológico, la recolección de las muestras materiales en JJ se realizó entre los días 16 y 18 de julio del año 2018, aproximadamente 10 meses después de la ocurrencia del terremoto de Puebla de 2017, que provocó considerables daños en la localidad. Tanto la decisión de las unidades de análisis como el muestreo quedaron supeditadas a las condiciones de emergencia y reconstrucción de la zona, por lo que el criterio fue recolectar el máximo material disponible al que se tuvo acceso (ver Figura 4.4). Gran parte de las edificaciones de la localidad se encontraban en un estado de colapso y/o ruina por lo que se priorizó recabar las muestras antes de que las viviendas fueran derruidas.



Figura 4.4. Recolección de muestras de adobe en Jojutla de Juárez. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza y A. Sánchez-Calvillo, 2018).



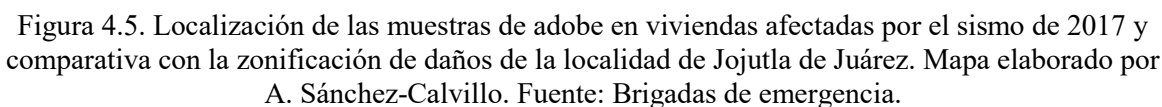
El resultado de la campaña de campo fue la colecta de 13 muestras de material: 11 correspondientes a adobes de viviendas dañadas (varias de estas colapsadas y derruidas), una a una muestra de suelo de la localidad procedente de una excavación en la colonia Emiliano Zapata y otra muestra de suelo de la zona de extracción y manufactura de adobes y tabiques cerámicos de la región¹⁶⁷. Las muestras de adobe fueron designadas con la nomenclatura JO, mientras que los suelos fueron denominados JS. El inventario de las muestras y la información detallada son mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Inventario, clasificación, fecha de recolección y localización de las muestras de Jojutla de Juárez.

Muestra	Tipo	Fecha recolección	Localización
JO1	Adobe	18/07/2018	c/ Francisco J. Mina
JO2	Adobe	18/07/2018	c/ Zayas Enríquez
JO3	Adobe	18/07/2018	c/ Zayas Enríquez
JO4	Adobe	18/07/2018	c/ Carlos Cuaglia
JO5	Adobe	18/07/2018	c/ Zayas Enríquez
JO6	Adobe	18/07/2018	c/ M. Cepeda Medrano
JO7	Adobe	18/07/2018	c/ J. H. Preciado
JO8	Adobe	18/07/2018	c/ Francisco G. Bocanegra
JO9	Adobe	18/07/2018	c/ 21 de marzo
JO10	Adobe	17/07/2018	c/ Zayas Enríquez
JO11	Adobe	17/07/2018	c/ Ricardo Sánchez
JS1	Suelo	17/07/2018	c/ 10 de abril
JS2	Suelo	17/07/2018	Carretera Jojutla-Chinameca

Respecto a las muestras de adobe (nomenclatura JO), todas fueron recolectadas en la colonia centro, uno de los epicentros de mayor daño presentados en la localidad. Las muestras fueron etiquetadas, catalogadas y georreferenciadas; para posteriormente ser introducidos estos datos en SIG. En la Figura 4.5 puede observarse la localización de las muestras de adobes de viviendas de Jojutla respecto a la zonificación de daños y vulnerabilidad efectuada por las brigadas de emergencia. Puede apreciarse como la cantidad de viviendas con daños severos y riesgo alto está concentrada en algunas zonas amanzanadas, coincidiendo éstas con la toma de datos efectuada.

¹⁶⁷ La información sobre la localización de la zona de producción de materiales de construcción locales fue proporcionada por el Mtro. Osvaldo de la Paz Soto Talavera y el Mtro. Carlos Bustos Mejía.



322



La toma de muestras de los adobes de Tierra Caliente en Michoacán se realizó en dos campañas en dos localidades: Santa Cruz de Morelos (SC), en el municipio de Turicato; y La Huacana (H), cabecera del municipio homónimo. En ambos casos el proceso de colecta de las muestras fue mucho más favorable que en JJ, pudiendo obtener bloques completos en un estado óptimo además de la extracción de núcleos cilíndricos de las estructuras existentes (ASTM International, 2013). Los especímenes de SC se sacaron de una hacienda con una antigüedad aproximada de 200 años según los pobladores de la comunidad (ver Figura 4.7).



Figura 4.7. Hacienda en Santa Cruz de Morelos. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Por otro lado, para la localidad de H las muestras fueron extraídas de otra hacienda ubicada en la ranchería el Cuatro muy cercana a la cabecera del municipio, de la que el dueño autorizó la extracción y dató su antigüedad en aproximadamente 200 años (ver Figura 4.8).



Figura 4.8. Hacienda de la ranchería el Cuatro, en La Huacana. Fotografías: (F. Tobón, 2016).



Por último, como parte del proyecto DBMC 2020 se realizaron varias campañas de trabajo de campo en distintas localidades del estado de Michoacán, enfocadas a la catalogación e inspección de viviendas de adobe y construcciones monumentales edificadas a base de tierra. En el caso de la arquitectura doméstica, se documentaron las localidades de AR y SC, y respecto a la arquitectura monumental, algunos de los casos de estudio fueron el Templo Inconcluso de Taretan (TA), la hacienda de San Joaquín Jaripeo en el municipio de Zinapécuaro, la hacienda de Huaniqueo de Morales, o los restos de la capilla de la hacienda de San Andrés Coapa en Acuitzio (ver Figura 4.9).



Figura 4.9. Casos de estudio de arquitectura monumental del proyecto DBMC 2020: a) Hacienda de San Joaquín Jaripeo; b) Capilla de San Andrés Coapa; c) Templo Inconcluso de Taretan.
Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2021).

Todas estas edificaciones fueron levantadas con sistemas de muros a base de adobe, presentando sistemas y combinaciones con otros materiales muy interesantes desde la perspectiva arquitectónica. En el caso de San Joaquín Jaripeo además del material de los muros, las fachadas presentan revestimientos a base de tierra muy característicos, con los que se conformaron entramados de formas geométricas con una función estética además de la protección a agentes atmosféricos.

Taretán y San Andrés Coapa presentaron características constructivas, tecnológicas y formales muy similares, con sus fachadas y elementos de refuerzo contruidos con roca de la región y el resto de la estructura edificada completamente en adobe, contando el primer monumento con mayores dimensiones y un pequeño transepto que conforma una planta en forma de cruz. Pese al abandono de ambos templos, con una exposición directa a las inclemencias atmosféricas, estos todavía se encuentran en pie resistiendo el paso de los años, demostrando la durabilidad de los sistemas constructivos de tierra.



Sin embargo, la única edificación que permitió una recolección de material fue TA, e igualmente la disponibilidad no fue óptima. Pudieron rescatarse fragmentos de adobe bastante expuestos a la intemperie. Pese a que no pudo acopiarse una gran cantidad de material, éste pudo ser transportado al laboratorio de materiales para efectuar todos los ensayos posibles.

Las muestras necesitaron de una preparación antes de ser sometidas al proceso de caracterización a fin de realizar tanto los ensayos no destructivos como los de resistencia mecánica. Por ello, fue necesario labrar y cortar cubos y vigas lo más regulares posible; los primeros con dimensiones de 8x8x8 cm y los segundos de 4x4x16 cm. Para ello se empleó el equipo de la cortadora con un disco para corte de concreto marcando las dimensiones deseadas en los adobes (ver Figura 4.10). Para los cilindros, previamente extraídos in situ, el proceso fue el descrito por Ruiz Mendoza (2022): “Para el caso de los cilindros [...] sólo fue necesario hacer los cortes en las caras inferior y superior para obtener una relación 1:2”.



Figura 4.10. Labrado y preparación de las muestras de la Huacana y Santa Cruz de Morelos.
Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).

Con el material de H y SC fue posible efectuar este trabajo, al contar con bloques de adobe de grandes dimensiones que permitían su manipulación; sin embargo, el material de JO se encontraba en un estado muy malogrado e incompleto, y el tratamiento de las muestras podía implicar un mayor daño, por lo que se planteó una estrategia diferente. En este caso se realizó



un trabajo manual en la sección de mecánica de suelos del Laboratorio de Materiales para lograr cubos lo más regulares posibles sin tomar en cuenta la dimensión (ver Figura 4.11).



Figura 4.11. Labrado y preparación de las muestras de Jojutla de Juárez. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

También con este método se labraron los cilindros de $\varnothing 3.5 \times h 8.75$ cm para efectuar la prueba triaxial no consolidada no drenada. Todos los especímenes fueron etiquetados y numerados para llevar un control de la experimentación. Por otro lado, fue necesario triturar muestras representativas de cada caso para los ensayos mineralógicos, el material se molió con un mortero de ágata hasta pasar en su totalidad la malla ASTM n°200 (ver Figura 4.12).



Figura 4.12. Proceso de trituración de las muestras en polvo. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).



4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ADOBES

Uno de los principales objetivos de la investigación, y el que da sentido al presente capítulo, fue poder idear, aplicar y corroborar una metodología de caracterización de los adobes totalmente trasladable a otros casos de estudio y sistemas constructivos a base de tierra cruda. Pese a las referencias existentes previamente discutidas, supuso un reto considerable debido a la inexperiencia general para ensayar estos materiales y a la falta de normativas y regulaciones para los mismos ensayos.

Por otro lado, la caracterización del material nos permite entender la tradición constructiva de una localidad o región, comprendiendo porque se utilizan estos sistemas y cuáles son sus propiedades. De igual forma, es posible apreciar la riqueza y las variantes de la arquitectura de tierra y cómo partiendo de recursos muy variados pueden desarrollarse componentes constructivos funcionales que ofrecen una gran respuesta a las necesidades habitacionales del ser humano.

En un inicio, para llevar a cabo la experimentación se encontraron varios apoyos en los proyectos de investigación de la universidad y los proyectos internacionales de cooperación al desarrollo. En este sentido, uno de los principales respaldos de la investigación fue el Programa de Investigación CIC¹⁶⁸ 2021-2022 con el proyecto “Módulos de Poisson y elasticidad, estáticos y dinámicos, para materiales de tierra cruda”. Este proyecto permitió financiar parte de los equipos, transporte de las muestras, materiales, viáticos, y actividades académicas y productos de divulgación científica como la inscripción en congresos o costos de publicación.

Otro de los apoyos fue el proyecto de cooperación al desarrollo DBMC 2020, que permitió consolidar la vinculación con la UPC y el laboratorio de materiales de la EPSEB¹⁶⁹ y financiar el traslado de las muestras para efectuar análisis complementarios. Además, los resultados del proyecto y los productos que se generaron permitieron hacer una excelente difusión de la investigación.

¹⁶⁸ Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.

¹⁶⁹ Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona. El laboratorio de materiales cuenta con una labor de investigación que ha permitido establecer una vinculación entre las dos universidades: https://labmaterials.epseb.upc.edu/es/nosotros_cast



Por otro lado, sin la colaboración de los tesisistas de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH no habría sido posible el desarrollo y conclusión de la investigación. Desde las primeras fases de la investigación se planeó incorporar el trabajo interdisciplinar en varios niveles de la educación universitaria para lograr diversos productos académicos y científicos que integraran este proyecto general sobre la arquitectura de tierra. Los principales productos de esta planeación fueron las tesis de licenciatura de David Preciado Villicaña y Melissa Ruiz Mendoza tituladas respectivamente: “Caracterización y propiedades índice en adobes de Jojutla de Juárez, Morelos, México”, presentada en 2020; y “Caracterización físico-mecánica de adobes de la Huacana y Turicato, región Tierra Caliente, Michoacán, México”, presentada en 2022.

Por ello, tras contar con estos proyectos y estas iniciativas, el segundo paso fue la recolección y el acopio de los especímenes de estudio, adobes y suelos, proceso detallado en la sección 4.1.2. Casos de estudio, toma de las muestras y preparación de los materiales. Respecto a la decisión de tomar muestras de suelos inalterados, otras investigaciones referentes al patrimonio histórico, cultural y arqueológico han empleado la misma estrategia para la toma de decisiones.

Encontramos varios ejemplos de trabajos en los que el objeto de estudio fueron adobes, pero también recolectaron suelos locales y/o de los lugares de extracción, producción y manufactura de los bloques. Fratini et al. (2011), en las poblaciones de Sambiasi y Nicastro siguieron indicaciones de los artesanos para la obtención de suelos adecuados para la fabricación de los adobes. También, Mellaikhafi et al. (2021) decidieron estudiar el patrimonio vernáculo de la región sureste de Marruecos únicamente a partir de muestras de suelos inalterados, extrapolando los resultados a los sistemas constructivos a base de tierra y sus propiedades. En relación al patrimonio arqueológico, Nora Pérez (2016), tomó además de adobes completos de la Pirámide de Cholula, cinco muestras de suelos correspondientes a etapas prehispánicas de la ciudad.

Fue necesario un ejercicio de planificación para decidir que propiedades y parámetros del material se buscaban obtener y cuáles eran los medios para alcanzarlos; en este sentido, se trató de conformar una metodología de análisis lo más completa posible que permitiera lograr la mejor información de los adobes y poder ser replicada a futuro. Una vez definidos los



objetivos, se contemplaron los posibles ensayos para lograrlos y se estableció la metodología de caracterización. Cabe destacar que para la planeación de la metodología se empleó una visión interdisciplinar de la arquitectura de tierra, sin centrarse únicamente en el ámbito de la edificación, sino que se tomaron los enfoques de múltiples disciplinas como la geología, la ingeniería civil y la arquitectura.

Para ello, fue muy importante la revisión de la literatura y la identificación de casos de estudio análogos. Por ejemplo, algunos trabajos con adobes como el de Parracha et al. (2019) planteaban un conjunto de pruebas muy completo, incluyendo ensayos térmicos y de resistencia a la abrasión, que requieren un equipo de mayor especialización. Por otro lado, casi no se encontraron investigaciones que emplearan SEM y EDS, cuando estas técnicas permiten corroborar la información mineralógica y efectuar mapeos estratégicos de los elementos, siendo herramientas muy poco explotados en este ámbito.

Una vez definidos los instrumentos de análisis de la metodología, ésta pudo implementarse a partir de un ejercicio logístico. Todas las pruebas para la caracterización física, la mecánica, la no destructiva y el comportamiento al agua de los materiales, fueron realizadas en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, con el apoyo del personal contratado y los estudiantes tesistas. En cambio, las pruebas para efectuar la caracterización química de las muestras se efectuaron en instituciones externas que cuentan con los equipos necesarios: por un lado, el Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH; el laboratorio LANCIC¹⁷⁰ de la UNAM; y el laboratorio de materiales de la EPSEB-UPC. Por estos motivos el trabajo de vinculación realizado con otros grupos de investigación fue de gran utilidad, dando como fruto una diversificación de los métodos de ensayo, una mayor y mejor cantidad de resultados y un escenario más amplio para la difusión de los mismos.

En la Figura 4.13. se muestra la metodología de caracterización planteada, con una marcada división en tres grupos: la caracterización físico-química, la caracterización mecánica¹⁷¹, y la caracterización de la durabilidad y el comportamiento ante el agua. Un aspecto digno de

¹⁷⁰ <http://labunam.unam.mx/micrositios/LANCIC/>

¹⁷¹ Se planteó el ensayo de frecuencia fundamental longitudinal, pero los resultados no fueron concluyentes al arrojar valores irregulares.



recaltar es una segunda clasificación que puede hacerse entre los ensayos no destructivos y los destructivos, ya que los primeros son especialmente relevantes para el estudio de materiales patrimoniales, pese a que el bagaje existente respecto a las construcciones con tierra es muy escaso.

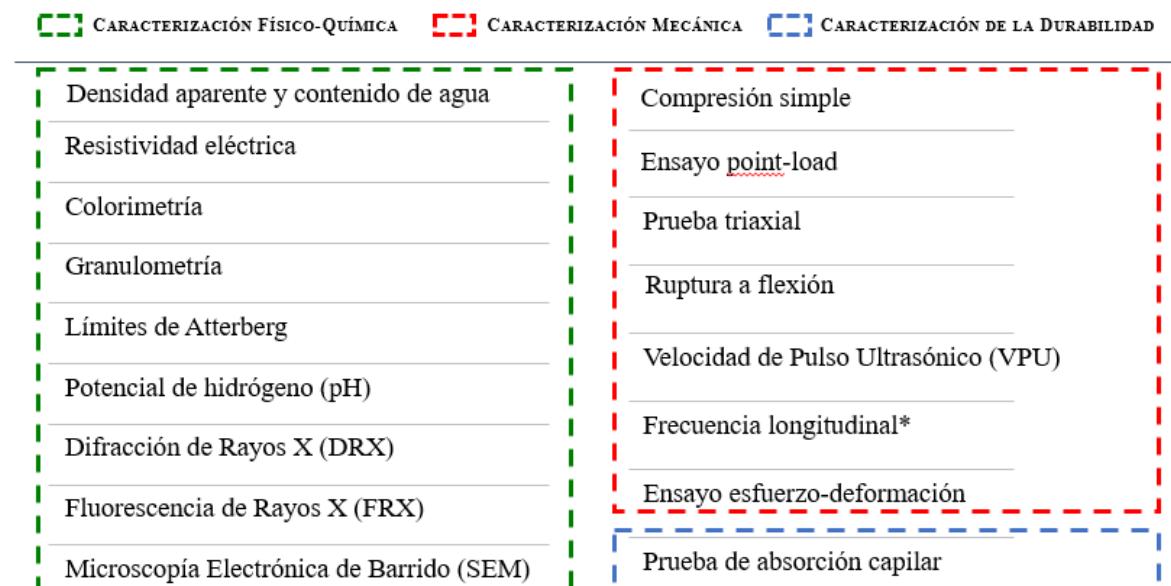


Figura 4.13. Metodología de caracterización de materiales de tierra diseñada para la investigación y grupos de ensayos.

A continuación, se detallan los materiales y procesos de ensayo de cada una de las técnicas empleadas en la caracterización de los adobes, incluyendo los antecedentes de investigación más importantes para cada una de éstas. El orden de presentación de las pruebas será el mismo que para exposición de los resultados y su discusión acorde a los tres grupos de caracterización delimitados para la campaña experimental.

4.2.1. Densidad aparente y humedad relativa

Entre las propiedades físicas de los materiales de construcción, algunas de las más importantes son la densidad y el contenido de humedad. Por un lado, la densidad expone el grado de compactación de la técnica constructiva (adobe, tapia pisada, BTC, etc.) y tiene una influencia directa en las capacidades mecánicas del sistema. De igual manera, el contenido de agua en sistemas constructivos de tierra es especialmente relevante, ya que afecta la durabilidad de las estructuras si estas quedan expuestas al agente atmosférico (Beckett,



Jaquin, & Morel, 2020). La investigación de Rojat et al. (2020) con construcciones vernáculas de tapia en la región francesa de Auvernia-Ródano-Alpes, comparó muestras procedentes de edificios en abandono o desuso con viviendas habitadas, presentando los datos de la densidad aparente y la humedad; los inmuebles en uso mostraron valores de humedad mucho más bajos, al estar protegidos del acceso del agua por capilaridad y filtración mediante acciones de mantenimiento.

Estos parámetros fueron calculados para todos los casos de estudio de la investigación. Cabe destacar que, por un lado, los adobes de H y SC fueron extraídos de las haciendas históricas y transportados al laboratorio donde permanecieron durante varios años en unas condiciones controladas de temperatura y humedad para la ciudad de Morelia. Por otro lado, el material de JS, JO y TA fue transportado al laboratorio en las condiciones en las que se encontró en campo, condición que luego se vio reflejada en las lecturas.

La medición de la humedad se efectuó mediante dos procedimientos distintos: en primer lugar, de forma directa con el equipo Contractor's Moisture Meter BD-2100 de la marca Delmhorst (ver Figura 4.14). El proceso de toma de datos es muy sencillo al permitir colocar las puntas del medidor en casi cualquier superficie. Para las muestras de adobe se procedió a tomar múltiples lecturas en todas las caras del material para lograr un valor representativo.



Figura 4.14. Equipo de medición de la humedad y procedimiento de ensayo. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).



El segundo procedimiento consistió en calcular la humedad con el método empleado en la mecánica de suelos, en la que el contenido de agua se expresa como un porcentaje del peso seco y húmedo de la muestra. Por lo tanto, todas las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en el horno hasta mantener un peso seco constante, indicando de este modo que ya habían perdido toda agua remanente. La humedad (w) se definió mediante la siguiente expresión:

$$w = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

w = Contenido de agua o humedad, porcentaje;

M_h = Masa húmeda del material, en kg;

M_s = Masa seca del material, en kg.

La densidad aparente también fue calculada a partir del peso seco y las dimensiones de los especímenes expresadas en volumen, estableciendo un promedio para cada caso de estudio a partir de la lectura de varios especímenes. En los casos de JO y TA no fue posible el cálculo de la densidad, en el primero porque se trataba de un suelo y en el segundo porque el material estaba demasiado disgregado.

4.2.2. Resistividad eléctrica

El ensayo de resistividad eléctrica generalmente es uno de los principales métodos de ensayo del concreto, ya que permite estimar sus características de porosidad, estado interno y saturación (Barnaure et al., 2021). Cuanto más bajo es el valor de resistividad eléctrica (ρ) de un material, significa que éste es un mejor conductor del flujo eléctrico. Para los materiales de construcción este ensayo es de gran utilidad, ya que puede ayudar a evaluar la estructura interna de un componente y su posible deterioro mediante la comparación con otros valores de referencia.

Sin embargo, casi no existen antecedentes de este ensayo para el estudio de sistemas constructivos de tierra, siendo uno de los pocos ejemplos el estudio de Barnaure et al. (2021), en el que se analizaron elementos de tierra cruda con métodos no destructivos usando el protocolo Wenner para calcular la resistividad. Los resultados de la experimentación, sobre mezclas que contenían paja y otras que no, demostraron que las fibras vegetales tienen un



impacto directo en el aumento de los valores de resistividad eléctrica. Otros antecedentes son la propia investigación y las tesis de Preciado Villicaña (2020) y Ruiz Mendoza (2022), que constituyen uno de los primeros aportes al cálculo de la resistividad eléctrica de adobes o materiales de tierra en Latinoamérica.

Para la realización del ensayo se siguió la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2019. Industria de la Construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y Métodos de ensayo; y el apoyo de la norma internacional ASTM G57-06(2012). Ésta está diseñada para la caracterización del concreto, sin embargo, como ya se ha expuesto en este capítulo no existen otras regulaciones o lineamientos específicos para en análisis de sistemas constructivos de tierra. El equipo empleado fue Soil Resistance Meter, Modelo 400 de la marca Nilsson Electrical Laboratory Inc. (ver Figura 4.15a).

Para la prueba se requiere que los especímenes se encuentren en estado saturado, por ello, los especímenes cúbicos de 8x8x8 cm de H y SC fueron ensayados justo después de efectuar la prueba de sortividad o absorción capilar (ver Figura 4.15b). Sin embargo, para las muestras de JO esto fue más complicado, ya que debido a su grado de deterioro no se les realizó el ensayo de absorción capilar; en este caso el material se humedeció con trapos húmedos, tomando las precauciones pertinentes como explica Preciado Villicaña (2020): “se trata de muestras patrimoniales las cuales había que evitar alteraciones en su composición, entonces al terminar el análisis se eliminaba la humedad con un trapo seco y los cubos de adobe se dejaron secar al aire libre”.



Figura 4.15. Ensayo de resistividad eléctrica. (a) Equipo de medición; (b) Procedimiento de ensayo en muestra de adobe de Tierra Caliente. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021).



Una vez obtenidos del valores de resistencia eléctrica mediante la prueba, la resistividad puede ser calculada con la siguiente expresión (ONNCCE, 2019):

$$\rho = R_e \frac{A}{L} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

ρ = resistividad eléctrica ($\Omega \cdot \text{m}$)

R_e = resistencia eléctrica (Ω)

A = área superficial del espécimen

L = espesor

4.2.3. Colorimetría

El color es uno de los factores más representativos e importantes en la arquitectura de tierra por varias razones, siendo el componente visual uno de los más fáciles de identificar en las soluciones constructivas con base en este material. Pese a las recomendaciones de proteger los muros de adobe de la intemperie con revocos o aplanados, la imagen de estas estructuras desnudas ya forma parte del imaginario común de muchas regiones en México. Por ejemplo, la localidad de Ihuatzio, en Michoacán, destaca por sus característicos adobes de color blanquecino, mientras que en Taretan son rojizos, tonalidades singulares que aportan las arcillas de estos dos municipios (ver Figura 4.16).

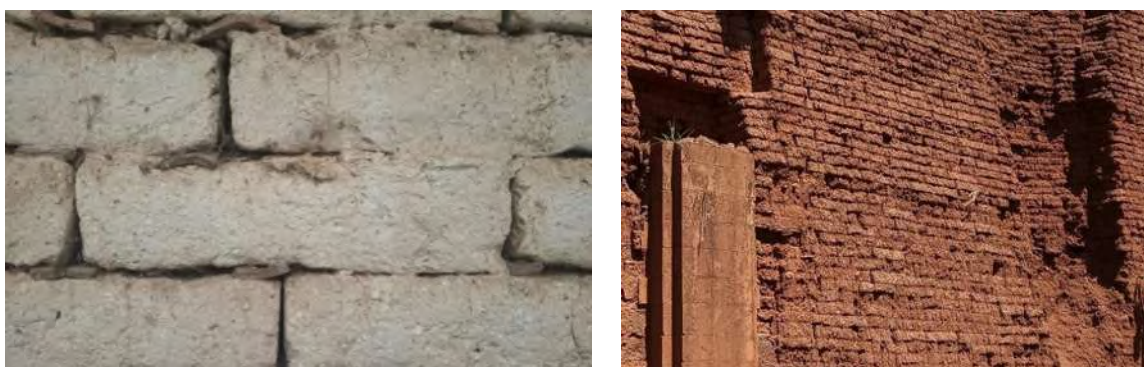


Figura 4.16. Tonalidades de adobes (a) Sección de muro en Ihuatzio, Michoacán; (b) Muro del Templo Inconcluso de Taretan, Michoacán. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2021).

A un nivel muy general, tomando el uso de la tierra como material básico, el color permite estimar el tipo de suelos con los que se trabaja: “los colores claros y brillantes son característicos de suelos inorgánicos; los colores café oscuro, verde oliva o negro, son



característicos de suelos orgánicos” (Martins Neves, Borges Faria, Rotondaro, Cevallos Salas, & Hoffmann, 2009). Además el color de los adobes puede relacionarse con el contenido de óxidos e hidróxidos de hierro presentes, que además afectan directamente a la resistencia mecánica de los bloques (Costa et al., 2019).

Para estudiar y analizar el color se emplean sistemas numéricos que permitan cuantificarlo (Berns, 2019), siendo estos sistemas conocidos como colorimetría. Respecto al análisis de materiales y caracterización no destructiva podemos encontrar muchos interesantes trabajos de investigación que utilizaron la medición espectrofotométrica como herramienta metodológica en el estudio y caracterización no destructiva del patrimonio cultural (Bernárdez-Vilaboa, 2020; Johnston-Feller, 2001).

Centrándonos en la arquitectura de tierra, en los sitios arqueológicos la información referente al color es extremadamente útil, debido a que permite estimar el nivel de preservación y conservación de las estructuras (Mao et al., 2018), así como planificar las estrategias de protección de los sitios patrimoniales de tierra; por otro lado los trabajos aplicados a los suelos y la identificación de minerales y contenidos de arcilla son referencias de gran valor (Viscarra Rossel et al., 2006; Viscarra Rossel et al., 2009). En el campo de la restauración patrimonial, el color es también un aspecto fundamental, debido a que las intervenciones deben respetar las cualidades estéticas originales de los elementos. Los resultados de las pruebas colorimétricas permiten comprender cómo y en qué grado los agregados naturales y artificiales pueden provocar un cambio de color en los materiales constructivos a base de tierra como la mampostería o los morteros (Martínez, et al., 2018).

La ventaja del estudio colorimétrico es que se trata de una prueba no destructiva (Martínez, et al., 2018), que además puede ser aplicada *in situ*, lo cual representa una ventaja para el trabajo de campo y las muestras patrimoniales y monumentales. Este método, además también puede ser comparado y puesto en valor junto con otros ensayos de laboratorio, permitiendo estudios complementarios que pueden arrojar valiosos datos principalmente en lo referente a la estabilización de arcillas mediante aditivos, encontrando antecedentes en la propia investigación con los adobes y suelos de JO y JS (Sánchez-Calvillo et al., 2020).



Para realizar las pruebas de colorimetría se siguió el sistema estandarizado en 1931 por la CIE¹⁷² (Berns, 2019), ampliamente reconocido para las mediciones del color en términos de reflectancia¹⁷³. Este sistema se basa en tres parámetros: la luminosidad L^* (rango blanco-negro); y las coordenadas cromáticas a^* (eje rojo-verde) y b^* (eje amarillo-azul) (Berns, 2019; Johnston-Feller, 2001). Según los estudios de Viscarra Rossel et al. (2006), los sistemas o modelos de este tipo, basados en la representación con ejes cartesianos son más útiles para análisis numérico o predictivo, pudiendo ser de gran utilidad en esta clase de investigaciones y facilitando el estudio comparativo de las distintas muestras.

El equipo de medición utilizado para el análisis colorimétrico fue CRLM-200 (ver Figura 4.17a), éste permite tomar una medida a través del espectrofotómetro emitiendo una luz en la superficie de los especímenes leyendo la respuesta a partir de la luminosidad y los parámetros a^* y b^* . Previamente a la medición el equipo fue calibrado a partir de una referencia totalmente blanca. Para las muestras de adobes, que contaban con geometrías más o menos regulares, se tomaron varias lecturas para cada una de sus caras (ver Figura 4.17b); respecto a los suelos se tomaron lecturas en zonas claras, medias y oscuras de los mismos, para obtener resultados representativos.



Figura 4.17. Equipo y proceso de medición del color (a) Colorímetro CLRM-200; (b) Lecturas con el equipo colorimétrico en adobes de Tierra Caliente. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2018; M. Ruiz-Mendoza, 2020).

¹⁷² Acrónimo de Commission Internationale de l'Eclairage, traducido como Comisión Internacional de la Iluminación.

¹⁷³ Capacidad de un cuerpo para reflejar la luz.



4.2.4. Granulometría

El análisis granulométrico permite obtener la proporción de finos (limos y arcillas)¹⁷⁴ y la distribución del material en función del tamaño de partícula que contiene una muestra. Esta prueba es fundamental para la caracterización de la arquitectura de tierra, ya que nos permite aproximar la cantidad de material arcilloso de los elementos constructivos analizados y comparar con los estándares a nivel indicativo (Martins Neves, Borges Faria, Rotondaro, Cevallos Salas, & Hoffmann, 2009; Neves & Faria, 2011).

El ensayo de granulometría se efectuó en referencia a la norma NMX-C-496-ONNCCE-2014 Industria de la Construcción - Geotecnia - Materiales para Terracerías - Determinación de la Composición Granular, que a su vez se basa en la norma internacional ASTM C136-06 (2015), con el material en estado seco. Se empleó un juego de mallas de los tamaños N° 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200¹⁷⁵ (ver Figura 4.18).



Figura 4.18. Instrumental de tamices ASTM y procedimiento de cribado. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019; M. Ruiz-Mendoza, 2020).

¹⁷⁴ En la mecánica de suelos se hace distinción entre suelos finos, que comprenden los limos y las arcillas, pasando la malla 200; y suelos gruesos que comprenden las arenas y las gravas.

¹⁷⁵ Se emplearon tamices regulados por la norma ASTM, siendo el N° 200 el que marca la clasificación entre suelos gruesos y finos.



Previamente a la realización de la prueba el material fue saturado para separar las fibras vegetales, en este caso paja; en el caso de JS y SC la cantidad de material orgánico fue ínfima, mientras que JO, H y TA sí presentaron porcentajes significativos. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en horno, que en este caso no superó los 50-60 °C, ya que temperaturas superiores podrían alterar las propiedades de los minerales de arcilla (Sanchez-Calvillo, et al., 2021). Este procedimiento duró de una a tres semanas en función de las distintas muestras, en el caso de los suelos se requirió algo más de tiempo (Preciado Villicaña, 2020); una vez el material presentó un peso constante se dejó enfriar a temperatura ambiente por 24 horas.

Tras el secado de las muestras, se realizó el ensayo para los cinco casos de estudio: JS, JO, H, SC y TA. En este caso también se analizaron los suelos de Jojutla y el escaso material de TA. En la Figura 4.19, puede observarse la granulometría obtenido para muestras de JO, con el material clasificado y separado en función de la retención en cada uno de los tamices ASTM.

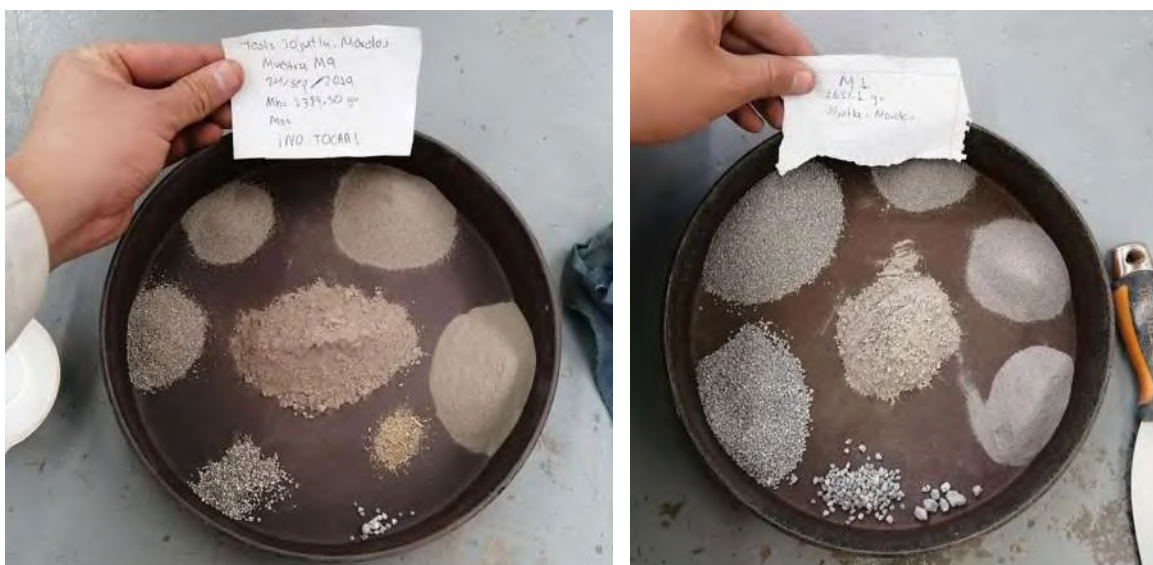


Figura 4.19. Material separado y clasificado tras el proceso de cribado de las muestras de Jojutla de Juárez. Fotografías: (D. Preciado-Villicaña, 2019).

4.2.5. Límites de Atterberg

El ensayo de los límites de consistencia, también reconocido como los límites de Atterberg o límites de plasticidad es uno de los más comunes en mecánica de suelos, ya que permite determinar la plasticidad de los suelos finos además de clasificar el material con el sistema



Sistema Unificado de Clasificación de Suelos¹⁷⁶ (SUCS) a partir de los resultados obtenidos con la prueba. La revisión de Sánchez et al. (2022) concluyó que muy pocos estudios de caracterización de adobes consideran la realización de la prueba de límites de Atterberg, siendo mucho menos común que la clasificación granulométrica (un 36% frente a un 72% de los trabajos). Sin embargo, la información que se obtiene es sumamente interesante, ya que en la arquitectura de tierra las propiedades plásticas de las arcillas son fundamentales en todas las distintas técnicas constructivas.

La prueba de los límites se realizó en la sección de mecánica de suelos del Laboratorio de Materiales, según lo establecido en la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción-Geotecnia-Límites de Consistencia de Suelos-Método de Ensayo. El ensayo se realiza con la proporción del material que pasa la malla normada ASTM n°40, con equivalencia a un tamaño de partícula de 0.425 mm. Para la investigación se trabajó con el material de JS, JO, H, SC y TA, siendo uno de los pocos ensayos que permitió la experimentación en todos los casos de estudio.

El ensayo de límites de Atterberg consta de varios procesos: en primer lugar se determina el límite líquido (LL), que marca el punto entre el estado líquido y el plástico de un suelo, empleando el equipo de la copa de Casagrande (ver Figura 4.21a), repitiendo el procedimiento hasta obtener un mínimo de cuatro determinaciones del ensayo en un rango de 10 a 35 golpes¹⁷⁷. Posteriormente, el límite plástico (LP), que marca el paso de un estado plástico a uno semisólido, se determina formando cilindros de 3 mm de grosor sobre una placa de vidrio con una consistencia deseada que permita romper el elemento en tres secciones sin flexionarse (ver Figura 4.21b).

¹⁷⁶ Originalmente Unified Soil Classification System (USCS), es el sistema más empleado en la ingeniería, la geología y especialmente la geotecnia para clasificar los suelos

¹⁷⁷ Revisar los trabajos de Preciado Villicaña (2020) y Ruiz Mendoza (2022) para una explicación más detallada del procedimiento de ensayo.



Figura 4.21. Procedimiento del ensayo de los límites de consistencia: (a) Determinación del límite líquido mediante la copa de Casagrande; (b) Formación de los cilindros para el cálculo del límite plástico. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).

Con el material sobrante de la prueba de LL se realizan la contracción lineal (CL) y contracción volumétrica (CV), llenando respectivos moldes prismáticos rectangulares y cilíndricos hasta quedar enrasados. Finalmente, el material resultante de los ensayos de LL, LP, CL y CV (ver Figura 4.22) se pesa para obtener la masa húmeda, y posteriormente se lleva a un secado en horno a temperatura máxima de 50 °C hasta tomar la lectura final de la masa seca.



Figura 4.22. Material resultante del límite líquido, límite plástico, contracción lineal y contracción volumétrica. Muestras de Taretan y Santa Cruz de Morelos. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).



4.2.6. Medición del potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno, comúnmente expresado como pH, es una medida que indica el grado de acidez o alcalinidad de un material, en una escala de valores del 0 al 14. En las arcillas este valor oscila entre 6.0 y 8.0 (Uviña Contreras & Guerrero Baca, 2007), aunque puede estar sujeto a varios condicionantes y ser modificado de muchas formas. Es por lo tanto de especial importancia controlar los valores de esta medida en los sistemas constructivos de tierra: Minke (2008) indica que un potencial entre 4.5 y 6.5 puede ser favorable para el crecimiento de hongos; por otro lado, si no existe un buen mantenimiento y protección de las estructuras, con unas condiciones desfavorables de humedad los propios microorganismos pueden provocar cambios en el pH (Castro Barrera, Benavides, Baglioni, & Giorgi, 2013).

Sin embargo, el pH natural de un suelo o material arcilloso puede verse modificado considerablemente mediante la estabilización o adición de otros componentes. Históricamente, la estabilización con cal aérea ha sido una de las mejores soluciones para modificar el pH de los suelos (Carreira et al., 2021), por los procesos que se generan al combinar ambos materiales, como la modificación de la plasticidad y el aumento de las capacidades cementantes de la mezcla (Guerrero, 2013).

Con algunos procedimientos, como la prueba Eades & Grimm, normada y regulada por ASTM International, contamos con criterios técnicos para estabilizar suelos con cal para aplicaciones mayormente en el campo de la edificación y obra civil. En este procedimiento el valor de referencia es 12.4, con el cual se considera que la estabilización del suelo es óptima¹⁷⁸ (ASTM International, 2019). En el laboratorio ya se tenían estudios previos con la prueba estabilizando arcillas de la zona lacustre de Zirahuén, en Michoacán (Navarro Mendoza et al., 2019); o suelos de la región de Morelia con cal de construcción y cal química de alta pureza (Navarro Mendoza et al., 2022), u otras adiciones distintas (Alonso-Guzman, Martinez-Molina, Sanchez-Calvillo, Chavez-Garcia, & Ruvalcaba-Sil, 2022).

¹⁷⁸ La norma ASTM D6276-19, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization (Norma del método de ensayo para el uso del Ph como estimación de la proporción suelo-cal para estabilización de suelos) puntualiza que no todos los suelos son aptos para la estabilización con cal, ya que algunos elementos y componentes pueden afectar durante las reacciones suelo-cal y provocar resultados erróneos.



El procedimiento para la medición del pH se efectuó con dos métodos distintos, que son empleados indistintamente en la actualidad en función de los equipos disponibles. Se decidió realizar dos lecturas complementarias para cada muestra, una con un medidor de pH digital y otra con tiras reactivas. El medidor de pH digital o peachímetro es un equipo Waterproof Tester Combo pH & EC de la marca Hanna Instruments (ver Figura 4.23), mientras que las tiras reactivas utilizadas fueron el modelo CVQ2051 de la marca CIVEQ (ver Figura 4.24).

En ambos casos se tomó como referencia a norma ASTM D6276-19, pesando el material de las muestras de tierra y mezclando en un recipiente con la misma cantidad de agua natural, en una solución de 50 + 50 g (Ruiz Mendoza, 2022). Tras dejar reposar unos minutos y mezclar los componentes se procede a tomar las lecturas con cualquiera de los equipos, haciendo un promedio de tres lecturas para cada una de las muestras. En el caso del medidor digital, éste nos aporta un valor exacto con dos decimales (ver Figura 4.23).



Figura 4.23. Equipo y proceso de lectura del potencial de hidrógeno con medidor de pH digital.
Fotografías: (D. Preciado-Villicaña, 2019).

En el caso de las tiras, estas se introducen en el recipiente durante cinco segundos y al retirar empiezan a reaccionar y cambiar de color; con la ayuda de las instrucciones y los esquemas cromáticos estandarizados, puede asignarse un valor numérico entero a cada una de las muestras analizadas¹⁷⁹ (ver Figura 4.24). Las tiras permitieron corroborar los resultados

¹⁷⁹ El color tiene un componente subjetivo, por lo que el procedimiento puede dar lugar a dudas entre dos valores, en ese caso se optó por hacer un promedio. No obstante, durante la medición del pH se contó con la valoración de tres personas.



previos, aportando valores menos exactos, pero con la ventaja de ser instrumental mucho más económico, lo cual puede ser de gran utilidad en muchos casos.



Figura 4.24. Equipo y proceso de medición del potencial de hidrógeno con tiras reactivas.
Fotografías: (D Preciado-Villicaña, 2019).

4.2.7. Fluorescencia de Rayos X

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica de espectroscopía atómica de rayos X para el análisis elemental, siendo uno de los métodos más empleados en el estudio de materiales u objetos inorgánicos. Esta técnica proporciona información relevante de la composición elemental química, con la excepción de los primeros elementos de la tabla periódica (H y He) y resultados no tan fiables para la detección de elementos ligeros¹⁸⁰. El ensayo puede ser considerado no-destructivo en función de la alteración a la que se someta el objeto de estudio, habiendo cierta controversia al respecto, debido a que para el análisis en laboratorio es necesario la extracción de pequeñas muestras, que en el ámbito patrimonial, arqueológico y artístico pueden llegar a comprometer el espécimen de estudio (Mantler & Schreiner, 2000).

Por otro lado, una de las grandes ventajas que presenta el ensayo a partir del desarrollo tecnológico es la portabilidad del equipo y la posibilidad de efectuar mediciones in situ, directamente sobre la superficie de objetos y materiales, siendo de gran utilidad para el estudio del patrimonio arquitectónico (Casanova-González et al., 2020) y arqueológico (Ruvalcaba-Sil et al., 2021).

¹⁸⁰ Generalmente se considera que los resultados más adecuados de la FRX empiezan a partir de los elementos con número atómico superior al aluminio, $N > 13$ (Mantler & Schreiner, 2000).



El uso de FRX no ha sido tan extendido como el DRX para el estudio de adobes históricos, debido a que los investigadores suelen priorizar conocer las fases mineralógicas a tener una idea de la composición elemental de las piezas. Sin embargo, efectuar estudios conjuntos de DRX y FRX también es una solución muy común, debido a que son dos técnicas complementarias que pueden ser aplicadas directamente sobre micromuestras en polvo.

Para el estudio de los adobes históricos, los análisis fueron efectuados en dos campañas experimentales: la primera en el laboratorio LANCIC mediante el equipo espectrómetro portátil SANDRA de creación propia¹⁸¹ (Ruvalcaba Sil, Ramírez Miranda, Aguilar Melo, & Picazo, 2010). Las mediciones se tomaron a 45° durante 180 segundos con 35 kV y 0.2 Ma, permitiendo obtener la composición elemental de los especímenes. En esta primera campaña se trabajó con las muestras de JS y JO, debido a que fueron las primeras en recolectarse y a las características específicas que presentaban por el caso de estudio singular en el que los bloques de adobe fueron dañados por el sismo de 2017.

En segundo lugar, se realizaron análisis complementarios de FRX en el Departamento de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Navarra, como parte de la vinculación de la investigación con el proyecto DBMC 2020. Para obtener los resultados, se trituraron las muestras a tamaño polvo, y se confeccionaron pastillas con bromuro de potasio (KBr) con un equipo Nicolet-FTIR Avatar 360. Posteriormente se utilizó el software OMNIC E.S.P. La resolución fue de 2 cm⁻¹ y los espectros fueron el resultado de promediar 100 escaneos. Todas las mediciones se realizaron a temperatura de 20±1° y a 40% de Hr. Estos análisis proporcionaron la composición de los adobes en forma de óxidos (ver Tabla X).

4.2.8. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una de las principales técnicas de análisis químico en el estudio del patrimonio y los bienes culturales (Navarro Gascón, 2008). Para el estudio de la arquitectura de tierra, el DRX supone una ventaja al poder identificar con facilidad los

¹⁸¹ El equipo portátil SANDRA (Sistema de Analisis No Destructivo por RAYos X) fue desarrollado en el Instituto de Física de la UNAM, con el objetivo de generar una herramienta de análisis del patrimonio cultural para su conservación y restauración (Ruvalcaba Sil et al., 2010). El equipo cuenta con un importante bagaje en el estudio de materiales y elementos patrimoniales tanto en casos de estudio de bienes muebles y artísticos (Pérez y otros, 2021), como materiales de construcción tradicionales y patrimoniales (Sanchez-Calvillo et al., 2021).



minerales que constituyen las arcillas además de otros compuestos estabilizantes como la calcita, que corresponde a una de las soluciones más comunes en la arquitectura vernácula de tierra (Parracha J. L. et al., 2019). Además, puede ser empleado para el análisis de los suelos existentes en una región, a fin de conocer las propiedades de los mismos y su conveniencia para el uso en componentes a base de tierra. Por ejemplo, el estudio de El Hammouti et al. (2022) identificó y analizó distintos suelos arcillosos cercanos a los principales núcleos de población al este de Marruecos.

Otros antecedentes de interés en el estudio del patrimonio cultural los encontramos en el análisis de los morteros y revocos de las fortificaciones de Panamá Viejo, uno de los lugares declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Estos morteros a base de cal presentaron material arcilloso que pudo ser identificado mediante el ensayo DRX en polvo detectando brushita que es un proceso de la reacción entre soluciones fosfáticas y calcita y minerales de arcilla (Ciantelli et al., 2022).

En una primera campaña experimental, las muestras de JO y JS fueron analizadas en el laboratorio LANCIC de la UNAM. El equipo empleado fue el difractómetro Thermo Scientific™ ARL™ Equinox 100 junto a un microfoco de 50W Cu X-ray con un detector CPS (*Curved position sensitive*) que permitió medir todos los picos de difracción simultáneamente (rango 0–100° 2 θ).

La segunda campaña experimental se realizó en colaboración con la EPSEB-UPC a partir del proyecto DBMC 2020 y la vinculación existente. El equipo empleado fue el difractómetro Bruker D-8 advance junto a un microfoco de 50W CuK α 1-ray con un detector CPS (*Curved position sensitive*) que permitió medir todos los picos de difracción simultáneamente (rango 0–90° 2 θ).

4.2.9. Microscopía Electrónica de Barrido

La Microscopía Electrónica de Barrido¹⁸² (MEB) es un conjunto de técnicas de microanálisis a partir de un microscopio electrónico de alta resolución (por encima de 100000 aumentos) (José-Yacamán & Ascencio, 2000), proporcionando información acerca de la morfología de

¹⁸² También referida en la literatura como Scanning Electron Microscope o SEM.



las muestras y su composición elemental, la identificación de minerales, marcas de manufactura, entre otros. Esta técnica es destructiva y exige una rigurosa preparación de las muestras, siendo un aspecto esencial para obtener buenos resultados (José-Yacamán & Ascencio, 2000), por lo que las muestras deben ser representativas o bien servirnos respecto a los objetivos de la investigación.

Su uso en combinación con la Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS) ha sido bastante empleado en estudios muy completos del patrimonio cultural (Ion et al., 2020), también encontramos antecedentes de su uso en los adobes del sitio arqueológico Nisa Partica en Turkmenistán (Adorni et al., 2013), y por supuesto la propia investigación con los adobes de JO (Sanchez-Calvillo, et al., 2021). Es especialmente apropiada para las arcillas, debido a las minúsculas dimensiones de estas y su composición mineral. Además, el SEM-EDS permite una mejor detección de los elementos ligeros que el XRF, pudiendo ser técnicas complementarias en un mismo estudio.

Respecto a la aplicación de esta técnica en los materiales de la investigación, una primera campaña fue realizada en los laboratorios LANCIC-UNAM, con el material de JS y JO. Los análisis EDS fueron realizados con un equipo SEM Hitachi 3030+ de bajo vacío usando un láser de electrones de 18 kV. Las muestras no fueron recubiertas con ninguna película metálica. En una segunda campaña, en el Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH, se llevó material orgánico de los casos de estudio para hacer un análisis de las fibras contenidas en los bloques de adobe.

Las esquirlas de las piezas de adobes se observaron con SEM, en el caso del LANCIC IFUNAM es un equipo de bajo vacío, y las muestras no se metalizaron, tampoco estuvieron sometidas a secado. En una segunda campaña se priorizó la observación de las fibras vegetales y el SEM de alto vacío, las muestras fueron desecadas, metalizadas y observadas en el Instituto de Investigación en Metalurgia y Metales de la UMSNH. El equipo del IIMM-UMSNH es un JEOL JSM 7600F con un analizador Bruker X Flash 6130, las muestras fueron metalizadas con Cu.



4.2.10. Compresión simple uniaxial

El ensayo de esfuerzo a compresión simple es el más común en la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales de construcción, ya que la mayoría de estructuras trabajan soportando este tipo de tensiones. En la revisión de las propiedades mecánicas de los adobes presentada por Sánchez et al. (2022), el ensayo de compresión es con mucha diferencia el más empleado, realizándose en un 92% de las investigaciones.

Para realizar los ensayos de esfuerzo a compresión simple de los cubos y fragmentos de adobe, las muestras fueron tratadas y preparadas. En el caso de las muestras de JO, debido al estado de las construcciones, severamente dañadas por el sismo, varias de las muestras fueron descartadas para el análisis por las irregularidades presentadas, al no cumplir los requerimientos mínimos de dimensión. De las once muestras patrimoniales únicamente seis pudieron ser sometidas al ensayo. El tratamiento de las seis muestras consistió primero en el tallado y labrado de cubos o piezas rectangulares de dimensiones mínimas 5 x 5 cm (ver sección de la preparación de las muestras); en segundo lugar, el nivelado y cabeceado de las piezas mediante azufre en estado líquido hasta dejar enfriar y obtener una superficie uniforme (ver Figura 4.25).



Figura 4.25. Cabeceado de las muestras de Jojutla de Juárez. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

En los casos de H y SC, como ya se comentó anteriormente las muestras presentaban un estado de conservación notable, pudiendo ser modeladas mediante de máquina cortadora, además de contar con los núcleos obtenidos con la maquina extractora. Para el ensayo se



probaron cinco cubos de dimensiones 8x8x8 cm; del mismo modo que las muestras de JO, estas fueron niveladas y cabeceadas con azufre (ver Figura 4.26)



Figura 4.26. Proceso de cabeceado de los cilindros de la Huacana y Santa Cruz de Morelos.
Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2020).

Tras la preparación de las muestras, el ensayo fue realizado siguiendo la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, que pese a ser diseñada para la caracterización de concretos es el modelo más lógico a seguir para un adobe. En cuanto al equipo, se utilizó la Máquina Universal de Pruebas FORNEY, de capacidad 120000 kg con aproximación a la centésima de kilogramo (Ruiz Mendoza, 2022). Durante la prueba se aplicó la carga a una velocidad constante de 0.20 ton/min $\pm$ 0.05 hasta la falla del espécimen (ver Figura 4.27).

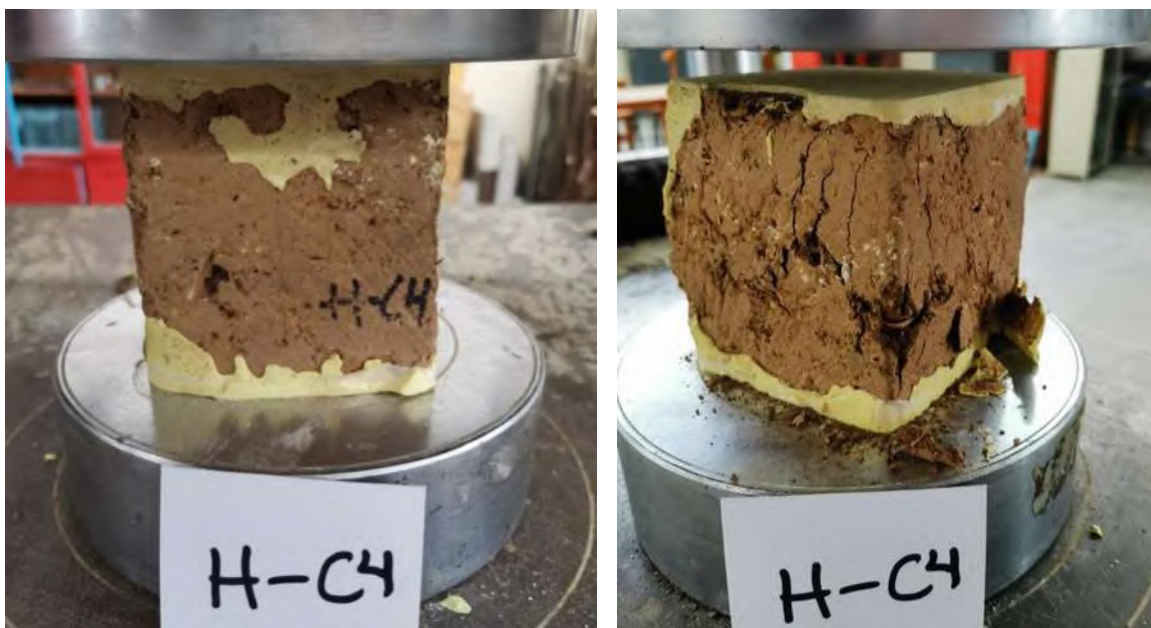


Figura 4.27. Ensayo de compresión simple uniaxial y rotura del espécimen de adobe. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021)

La Máquina Universal nos indica la carga de falla de ruptura (W), para obtener la resistencia a compresión de las muestras se usó la siguiente expresión:

$$\sigma_{CSU} = \frac{W}{A} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Dónde:

σ_{CSU} = resistencia máxima a la compresión (kg/cm^2);

W = carga máxima aplicada a la muestra (kg);

A = área de contacto de la muestra (cm^2).

4.2.11. Ensayo de carga puntual point load

El ensayo point load (PLT¹⁸³), también denominado ensayo o prueba de carga puntual, permite determinar la resistencia mecánica de muestras no labradas de mampostería, siendo una prueba diseñada principalmente para la caracterización de rocas. La norma ASTM D5731 proporciona el modo de empleo de este equipo para determinar la resistencia mecánica en fragmentos de rocas con un tamaño aproximado de 4 pulgadas de diámetro. Para la investigación, se quiso comprobar la funcionalidad de esta herramienta para los fragmentos

¹⁸³ Acrónimo de point load test.



recolectados de bloques de adobe, los cuales no han sido estudiados a profundidad con este ensayo.

Las primeras investigaciones que emplearon este ensayo buscaron correlacionar la resistencia a compresión uniaxial con el índice a carga puntual (I_s), (Broch & Franklin, 1972) sentando las bases para poder aplicar la prueba en toda clase de fragmentos de rocas. Existen antecedentes de investigación con muestras patrimoniales o bien con aplicación en trabajos de restauración, tanto en bloques de mampostería, (Navarrete Seras et al., 2017) como en ciertas rocas cuyas propiedades no permiten el labrado y tienen otro tipo de aplicaciones. (Navarrete Seras M. A. et al., 2011).

Sin embargo, las investigaciones que realizan esta prueba en adobes son muy escasas, encontrando los primeros antecedentes en los mismos trabajos que se realizaron en el laboratorio de materiales de la UMSNH (Sanchez et al., 2021). Precisamente la relevancia de analizar elementos constructivos de tierra con este método de análisis pasa por la ampliación de los conocimientos en este ámbito y lograr una mejor caracterización de los materiales tradicionales y locales.

El principal detonante para aplicar este ensayo fue el hecho de encontrar muestras patrimoniales en JO, que a diferencia de los casos de estudio de H o SC restaban en un estado deficiente debido a la afectación de los sismos en las viviendas de adobe (ver Figura 4.28). El objetivo de la realización del ensayo fue poder correlacionar los valores obtenidos con PLT con los de las pruebas a compresión simple, para comprobar si ambos procedimientos pueden ser complementarios.





Figura 4.28. Fragmentos y esquirlas de bloques de adobe de Jojutla de Juárez. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019).

Para la investigación, los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Materiales mediante el equipo portátil Digital rock strength index apparatus 100 kN cap de Controls Group. El equipo cuenta con la ventaja de poder aplicarse tanto en laboratorio como en campo, ya que es portátil; por lo que las muestras no requieren preparación más allá de la previa medición de sus dimensiones, por lo que es perfectamente aplicable en muestras irregulares como las de JO.

Cada una de las muestras fue sometida al ensayo PLT aplicando una carga progresiva hasta el fallo y rotura del fragmento (ver Figura 4.28). El equipo portátil permitió tomar el valor de la carga de ruptura en kN para a continuación, mediante un sistema de ecuaciones, lograr el valor último de resistencia a compresión uniaxial de cada uno de los especímenes. La metodología seguida se basó en la norma internacional (ASTM International, 2016) y la experiencia del grupo con otros trabajos de investigación realizados en fragmentos de roca (Navarrete Seras et al., 2014). El valor final, el índice de carga puntual (σ_{PL}), se calculó con el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\sigma_{PL} = (C) I_{s(50)} = 24 I_{s(50)} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$I_s = \frac{P \times 1000}{D_e^2} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$F_1 = \sqrt{\left(\frac{D_e}{50}\right)} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$F_2 = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$D_e = \frac{4A}{\pi} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

$$A = W \times D \quad (\text{Ec. 4.10})$$



$$W = \frac{W_1 + W_2}{2} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Donde:

σ_{PL} = Resistencia calculada a la carga puntual, transformada a Kg/cm² para comparar los resultados;

$I_{s(50)}$ = Índice de resistencia corregido, en MPa;

I_s = Índice de carga puntual, en MPa;

F_1 = Factor de corrección para los fragmentos con un espesor estandarizado cercano a los 50 mm, adimensional;

F_2 = Factor de corrección para los fragmentos con un espesor alejado del estándar de 50 mm, adimensional;

P = Carga máxima aplicada, en kN;

D_e = Diámetro de núcleo equivalente, en mm;

A = Área superficial de la muestra a analizar, en mm;

W = Ancho de la muestra a analizar, en mm. Debido a la irregularidad de las muestras se calcula con un promedio de las dos principales direcciones W_1 y W_2 ;

D = Espesor de la muestra a analizar, en mm.

No se realizó ninguna operación adicional en el tratamiento de los fragmentos, sino que se emplearon en el ensayo tal como se encontraron en su forma y dimensiones. Una vez seleccionados estos fragmentos se procedió a medir sus dimensiones y calcular su área. Para cada una de las muestras se comprobó que la tercera dimensión, la longitud (L) fuera mayor a 0.5 veces el espesor (D); esta recomendación fue aplicada a todos los especímenes.

El valor del índice de resistencia (I_s) es un valor sin corregir que varía según el espesor de las piezas ensayadas, por este motivo debe ser corregido cuando los fragmentos no sean cercanos al valor indicado de espesor de los fragmentos que es de 50 mm (ASTM International, 2016). Para lograr el valor de índice de resistencia corregido ($I_{s(50)}$) se multiplicará en primer índice por un factor de corrección el factor de corrección indicado, F_1 o F_2 .

Finalmente, el valor σ_{PL} es el propósito principal que busca encontrar en ensayo de carga puntual y el que se busca comparar con los demás valores de resistencia a compresión que proporcionan las pruebas mecánicas. También resulta de utilidad observar el modo de ruptura



de los fragmentos, pudiendo encontrar relaciones entre la composición de los adobes, morfología, tamaño y ubicación de las fibras y los agregados, etc. (Ver Fig. 4.29).



Figura 4.29. Modo de falla de los especímenes durante el ensayo point load. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).

4.2.12. Ensayo triaxial no consolidado no drenado

La prueba triaxial permite medir la resistencia cortante de una masa o bloque de suelo y su capacidad de carga. Existen tres tipos de pruebas triaxiales estandarizadas: consolidada drenada, consolidada no drenada, y no consolidada no drenada. Para la presente investigación se empleó la última, también conocida como prueba rápida que es la indicada para material arcilloso. A partir de los datos obtenidos es posible calcular parámetros como la cohesión y el ángulo de resistencia al corte o ángulo de fricción, que permiten estimar el comportamiento del material y su estabilidad a los esfuerzos.

En investigaciones previas del laboratorio este ensayo fue aplicado para estimar el comportamiento mecánico de suelos de la región (Sánchez Calvillo, et al., 2018) y para comprobar las modificaciones provocadas por distintos estabilizadores volumétricos en suelos arcillosos con alto comportamiento plástico (Sánchez et al., 2022), mientras que la tesis de Ruiz-Mendoza es una de las primeras aplicaciones en adobes históricos (Ruiz Mendoza, 2022).

Esta prueba se realizó bajo lo establecido por la norma NMX-C-432-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción – Geotecnia – Cimentaciones – Ensayo de Compresión Triaxial



– Método de Prueba, que actualmente cuenta con un anteproyecto de norma del año 2020 pendiente de aprobación. Para el ensayo se utilizaron cilindros de 3.5 cm de diámetro y 8 cm de longitud aproximadamente que tuvieron que ser labrados específicamente para este cometido. El equipo empleado consistió en una cámara triaxial con un manómetro y válvulas acopladas para medir la presión del agua (ver Figura 4.30), además de la prensa de carga o máquina universal.



Figura 4.30. Cámara triaxial y manómetro y válvulas para la presión de confinamiento. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).

Tras montar los cilindros de adobe en el equipo totalmente sellados para evitar el contacto con el agua, la cámara triaxial se coloca en la prensa y mediante una manguera (ver Figura 4.30) se llena con agua regulando en todo momento la presión de confinamiento y se aplica la carga. La prueba se realiza a una velocidad de 1 mm/min tomando lectura de la carga a cada 0.05 mm hasta la falla del espécimen, repitiendo el proceso con tres confinamientos (σ) distintos: 0.3, 0.6 y 0.9 kg/cm² para ambos casos de estudio, ensayando un total de ocho cilindros.



4.2.13. Esfuerzo de ruptura a flexión

El módulo de ruptura o esfuerzo a flexión en la caracterización de materiales generalmente hace referencia a un ensayo de flexión de tres puntos. Este ensayo es de gran utilidad para conocer la capacidad portante de una estructura de adobe, con varias normativas recomendando valores mínimos para la construcción con estos sistemas que van desde los 0.8 kg/cm² en Perú hasta los 3.5 kg/cm² para el reglamento de construcción con tierra del estado de Nuevo México (RLD, 2015).

Una de las ventajas que presenta el ensayo de ruptura a flexión es la fácil disponibilidad de realizar esta prueba en cualquier laboratorio de materiales medianamente equipado (Abhilash, et al., 2022). Después del ensayo de compresión uniaxial es el más frecuente de encontrar en los estudios de caracterización de adobes (Sánchez et al., 2022); por el mismo motivo encontramos gran cantidad de investigaciones que reportan valores entre las dos pruebas y las correlacionan.

El estado del material de JO no permitió efectuar el ensayo de flexión directa, ya que fue requerido modelar vigas de 4x4x16 cm; en cambio, esto no supuso un problema para los adobes de H y SC, que pudieron ser cortados a las medidas indicadas como se reportó anteriormente en la sección 4.2.2 del documento, en el apartado referente a la preparación de las muestras.

El ensayo se efectuó rigiéndose por la norma europea BS EN 12372:2006 Natural stone test methods - Determination of flexural strength under concentrated load, que fue actualizada en 2022 después de haber efectuado las pruebas con los adobes. Sin embargo, los cambios tras la última actualización son mínimos, y de modo similar a la mayoría de ensayos de la investigación no es posible encontrar lineamientos o regulaciones para sistemas constructivos de tierra, por lo que se emplearon las normativas pertinentes a concretos o rocas naturales.

Tras determinar las dimensiones de las vigas, éstas se marcaron y se colocaron en el mismo equipo utilizado para el ensayo de compresión, la Máquina Universal de Pruebas FORNEY, con tres rodillos: los inferiores a 2.5 cm de los extremos y el superior en el eje central de la muestra (ver Figura 4.31a). La carga se aplicó a una velocidad constante de 0.20 ton/min $\pm$ 0.05 (Ruiz Mendoza, 2022), hasta la falla del espécimen (ver Figura 4.31b).

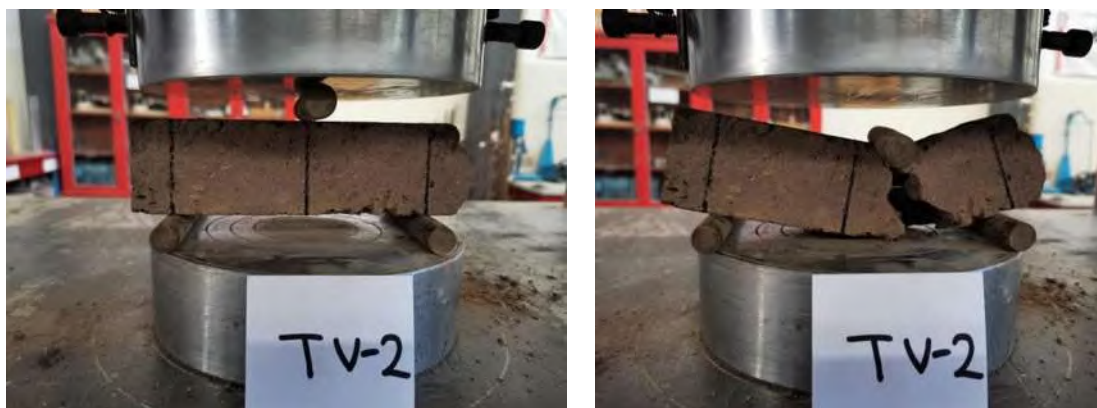


Figura 4.31. Ensayo de ruptura a flexión. (a) Viga de adobe antes de aplicar la carga; (b) Modo de falla y ruptura de la viga de adobe. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021).

4.2.14. Velocidad de Pulso Ultrasónico

En los últimos años las pruebas no destructivas en objetos patrimoniales han tenido un gran auge, debido a que es necesario preservarlos para poder seguir estudiando y disfrutando de los mismos. El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es una de las herramientas de análisis más útiles, ya que permite conocer de manera indirecta la porosidad del material y detectar inhomogeneidades internas, además de facilitar el cálculo del módulo de elasticidad dinámico (E_d).

Las normas nacionales e internacionales están probadas para la medición de este ensayo principalmente en el concreto (ASTM International, 2016; ONNCCE, 2020), siendo pocas las referencias a los materiales tradicionales y las estructuras a base de tierra; sin embargo, podemos encontrar algunas investigaciones recientes en este ámbito que están aportando nuevos datos de referencia, destacando varios trabajos realizados en construcciones vernáculas de Portugal. Por ejemplo, Parracha et al. (2019) ensayaron la VPU en tierra compactada o tapia y adobes con resultados más altos en los primeros pese a que la densidad de los dos sistemas constructivos fue prácticamente idéntica.

Los estudios de Aguilar et al. (2015) también constituyen una de las referencias más interesantes al caracterizar con VPU adobes patrimoniales del sitio arqueológico Huaca de la Luna en Perú, calculando también el E_d y obteniendo tomografías ultrasónicas de las muestras, siendo uno de los pocos ejemplos estas técnicas de análisis en arquitectura de tierra en Latinoamérica. Recientemente, Barnaure et al. (2022) encontraron una relación directa entre el contenido de fibras vegetales y el E_d , mostrando que el uso de las técnicas no



destructivas para la caracterización de materiales tradicionales puede desarrollarse más en los próximos años.

Para realizar el ensayo de VPU se empleó el equipo V-Meter MK IV de James Instruments (ver Figura 4.32), trabajando con las muestras de JO, H y SC. Para calcular el dato de la velocidad previamente se midieron las dimensiones de los especímenes y su masa, acorde con la norma NMX-C-275-ONNCCE-2020 Industria de la construcción – Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson – Método de ensayo. En los casos de H y SC los cilindros de 10 cm de diámetro extraídos fueron ensayados directamente, mientras que las muestras de JO exigieron una preparación y labrado para contar con geometrías aceptables.



Figura 4.32. Equipo y procedimiento de ensayo de la velocidad de pulso ultrasónico. Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2019; M. Ruiz-Mendoza, 2021).

A partir de los resultados de VPU es posible calcular el E_d . El módulo de elasticidad es uno de los valores más importantes en el diseño de estructuras, puesto que influye de manera determinante en las deflexiones, las distorsiones de entrepiso y en rigidez de una estructura. Es un punto muy importante en el análisis y diseño de estructuras y está asociado con las deformaciones que causan las cargas aplicadas a la estructura.

Para el cálculo del módulo elástico se supuso un mismo coeficiente de Poisson (ν) para todas las muestras, además del dato de la densidad aparente de los adobes. El coeficiente de Poisson permite medir la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal



mediante la aplicación de una carga (Aragón Torre, 2015). Para los suelos o los adobes el valor de ν no está delimitado y varias investigaciones proponen distintos coeficientes a partir de la experimentación con valores desde 0.15 a 0.50 (Ruiz Mendoza, 2022). El valor del coeficiente es muy difícil de determinar para este tipo de materiales, por ejemplo, la investigación Laborel-Préneron et al. (2021) con compuestos de tierra y bioagregados no consideró el cálculo del módulo de elasticidad pese a contar con los datos de VPU. Otras investigaciones, como la ya mencionada de los adobes patrimoniales de la zona arqueológica Huaca de la Luna en Perú, pudieron estimar el coeficiente ν mediante la obtención de la velocidad de pulso longitudinal y transversal, V_p y V_s ¹⁸⁴, y la ecuación de correlación entre las dos (Aguilar, et al., 2015).

Para la presente investigación, dado que el valor es muy variado y con el equipo disponible no podían obtenerse las velocidades longitudinales y transversales, se optó por escoger un valor que nos diera como resultado un E_d al E_s obtenido y que fuera consecuente con las referencias bibliográficas, determinando un $\nu = 0.46$. Se complementó este ensayo con la experimentación de Ruiz Mendoza (2022) del (E_s) mediante la aplicación de una carga uniaxial¹⁸⁵.

4.2.15. Esfuerzo-deformación unitaria y módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad estático, comúnmente referenciado como módulo de Young, es la relación entre esfuerzo y deformación del material en un ensayo de carga axial en compresión (ONNCCE, 2013). Para encontrar este parámetro se realizó la prueba de esfuerzo-deformación siguiendo la norma NMX-C-128-ONNCCE-2013 Industria de la Construcción – Concreto Sometido a Compresión – Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson.

Para el procedimiento se emplearon los cilindros extraídos de los casos de estudio de Tierra Caliente, ya que las muestras de JO no permitieron de ningún modo la realización del ensayo. Los cilindros fueron cabeceados con azufre para la prueba (revisar sección 4.1.2 del capítulo

¹⁸⁴ También se conocen como ondas P y ondas S. Las primeras son las que atraviesan el material en dirección longitudinal, mientras que las segundas desplazan las partículas en dirección perpendicular o transversal.

¹⁸⁵ Este ensayo se describe en el apartado 4.3.3. Pruebas de resistencia mecánica.



correspondiente a la preparación de las muestras) tomando previamente las dimensiones de los especímenes. El equipo utilizado para la prueba consistió en una prensa hidráulica de la marca ELVEC, modelo E659-2 serie 100813, con capacidad 120,000 kg y aproximación a la centésima de kilogramo; un deformímetro con dos anillos y dos extensómetros y un micrómetro digital para el deformímetro (Ruiz Mendoza, 2022) (ver Figura 4.33).



Figura 4.33. Preparación del equipo y las muestras para el ensayo de determinación del módulo de elasticidad estático. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2020).

Tras colocar los cilindros en la prensa se aplicó la carga de forma progresiva, tomando lecturas cada 0.1 mm de deformación hasta llegar al punto de máximo esfuerzo y falla del espécimen (ver Figura 4.34). Se observó que la rotura típica de los adobes fue a partir de una grieta diagonal, que es uno de los modos de falla característicos a compresión, más todavía en los sistemas constructivos de tierra que no cuentan con armaduras internas.



Figura 4.34. Falla de los especímenes de adobe tras el ensayo de esfuerzo-deformación. Fotografías: M. Ruiz-Mendoza, 2020).

4.2.16. Prueba de absorción capilar

Existe una gran cantidad de ensayos que permiten estimar la resistencia al agua de los materiales de construcción; éstos son de gran utilidad para determinar la durabilidad de los componentes o sistemas constructivos. Uno de los más populares por su facilidad de aplicación y optimización de los equipos de medición es la prueba de absorción capilar.; en la literatura, este ensayo puede ser denominado de muchas formas, como prueba de sortividad, prueba de absorción capilar, ratio inicial de absorción o ratio inicial de succión (Beckett, Jaquin, & Morel, 2020).

Sin embargo, los estudios que aplican este tipo de ensayos para caracterizar arquitectura de tierra histórica o patrimonial no son tan comunes, ya que si las muestras se saturan el material puede llegar a deteriorarse y disgregarse (Parracha J. L. et al., 2019). No obstante, cabe destacar que la mayoría de construcciones vernáculas e históricas usualmente terminan fallando por cuestiones de durabilidad y no de resistencia mecánica (Beckett, Jaquin, & Morel, 2020); por lo que este tipo de ensayos son de gran importancia para la caracterización material de estos sistemas.

Respecto a la arquitectura de tierra, el estudio de Parracha et al. (2019) presentó valores de absorción capilar tanto para sistemas de tapia pisada como de adobe de viviendas vernáculas en Portugal. Las construcciones de tapia mostraron coeficientes considerablemente más altos, aunque por otro lado obtuvieron ratios altos de secado, lo cual indica un buen funcionamiento



del sistema constructivo. También los trabajos de caracterización de construcciones vernáculas de Silva et al. (2020) aplicaron este ensayo obteniendo valores muy positivos de absorción para adobes históricos.

En el laboratorio de materiales el ensayo se aplicó a los adobes siguiendo el procedimiento de la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015. Determinación de la absorción capilar en concreto – Método de ensayo, adaptando ciertos aspectos de la misma al estar diseñada para la caracterización de concretos. Se emplearon los especímenes cúbicos de 8x8x8 cm tras un secado de ocho días en el horno a 50 °C, una vez secos se tomaron las dimensiones y pesos y se sellaron las muestras en todas sus caras menos la inferior (ver Figura 4.35). El ensayo consistió en tomar lecturas del peso húmedo de los especímenes en los intervalos de tiempo marcados por la norma o hasta que el peso se mantenga constante (ONNCCE, 2015).



Figura 4.35. Procedimiento del ensayo de sortividad o absorción capilar. Fotografías: (M. Ruiz-Mendoza, 2021).



4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el último subcapítulo del documento se presentan los resultados del trabajo de caracterización de adobes históricos en el laboratorio de materiales, haciendo una discusión de los mismos y comparando los distintos parámetros obtenidos entre ellos y con otras investigaciones relevantes. Los resultados de los ensayos se presentarán siguiendo el orden de tres grupos de propiedades del material: las características físico-químicas, las capacidades mecánicas, y las propiedades de durabilidad y resistencia al agua.

4.3.1. Caracterización físico-química del material

La literatura suele englobar en la caracterización física del material los ensayos que estiman propiedades como la densidad, distribución granulométrica, límites de consistencia, contenido de humedad y composición mineralógica. Éstas fueron caracterizadas en la presente investigación, además de incluirse otras menos comunes como el potencial de hidrógeno o la resistividad eléctrica.

En primer lugar, la Tabla 4.3 muestra los parámetros de densidad aparente (ρ_{ap}) y humedad (ω) calculados tras el proceso de secado del material. Los adobes de JO exhiben una densidad bastante baja en comparación a la literatura, que para estos sistemas suele presentar valores en torno a 1500-1900 kg/m³ (Sánchez et al., 2022); y algo más altos, 1700-1900 kg/m³, para la técnica de tapia pisada (Rojat et al., 2020). Por el contrario, H y SC presentan valores tipo que encajan con los trabajos citados.

Tabla 4.3. Densidad aparente y humedad de los casos de estudio de la investigación.

Muestra	ρ_{ap} (kg/m ³)	ω (%)
JO	1282.64	3.37
JS	-	21.19
H	1724.16	6.37
SC	1609.09	2.69
TA	-	16.31

Observando los resultados de densidad, los valores considerablemente menores de JO pueden deberse principalmente al deterioro de los adobes y su exposición a los agentes atmosféricos



después de la afectación sísmica y la destrucción del conjunto de viviendas. El estado de conservación ha sido reportado como uno de los factores que pueden reducir la densidad de una muestra (Parracha J. L. et al., 2019). Por otro lado, H presentó mayor densidad que SC, conteniendo también mayor cantidad de material fino, que podría explicar la mayor compactación de los adobes.

Respecto a la humedad, el material de JS, al consistir en suelos inalterados de la región de Jojutla presentó los mayores valores; seguido de TA, también comprensible debido a que el Templo Inconcluso ha permanecido por más de un siglo completamente expuesto a la intemperie, logrando resultados parecidos a los edificios de tierra abandonados de Rojat et al. (2020). El resto de muestras presenta valores más lógicos para un adobe, llamando la atención la mayor capacidad de absorción de H respecto a SC, debido a que ambas muestras estuvieron durante años en las mismas condiciones ambientales.

En segundo lugar, en la Tabla 4.4 se presentan las dimensiones promedio de los especímenes ensayados (longitud y área) además de los valores de densidad aparente resistencia (R_e) y resistividad eléctrica (ρ) de los distintos casos de estudio. Puede observarse una enorme diferencia entre los casos de H y SC, con los adobes de JO, que presentan valores muchísimo más altos de resistividad y mayor variación de los mismos, probablemente por su estado de alteración y deterioro. Los valores de H y SC se corresponden más con la resistividad reportada para los suelos: Sanz et al. (2010) dan valores indicativos para las arcillas plásticas [50-100], los limos [20-100] o las arenas arcillosas [50-500]; elementos que suelen constituir los adobes.

Tabla 4.4. Resultados de resistencia y resistividad eléctrica de los adobes ensayados.

Muestra	ρ_{ap} (kg/m ³)	Ω (%)	L (cm)	A (cm ²)	R_e (Ω)	ρ ($\Omega \cdot m$)	CV (%)
JO	1282.64	3.37	7.04	54.57	25230.77	1637.14 $\pm$ 777.76	47.51
H	1724.16	6.37	8.39	72.19	266.25	22.94 $\pm$ 1.24	5.41
SC	1609.09	2.69	8.40	69.47	295.00	24.44 $\pm$ 3.38	13.83

El CV de la resistividad eléctrica de las muestras de JO ofrece un valor muy elevado, de 47.51%, que puede relacionarse con la disparidad de los materiales obtenidos en la localidad y el distinto grado de deterioro que presentaban por la afectación sísmica. Por otro lado, las



muestras de H y SC presentaron un CV bastante más bajo que el antecedente de Barnaure et al. (2021), indicando que estos casos de estudio lograron valores confiables.

Otro aspecto clave, el factor de la humedad, considerado en toda la literatura como fundamental en la afectación de la resistividad (Markiewicz & Klajn, 2004), no pareció tener un efecto directo en los resultados obtenidos, considerando que las muestras de JO estaban más secas que las de SC. En este mismo sentido, debe tomarse en cuenta que los bloques de adobe pasan por un proceso de secado tras manufacturarse a partir de un estado plástico de la mezcla, por lo que estos elementos durante su vida útil presentan índices de humedad relativamente bajos para asegurar su mejor trabajabilidad.

Siguiendo con el ensayo de colorimetría, éste se efectuó sin complicaciones para las muestras de JS, JO, H, SC y TA, siendo uno de los métodos menos invasivos y fáciles de aplicar de toda la experimentación. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5, donde se exponen los resultados numéricos y la conversión de los valores a la representación gráfica mediante un generador de color¹⁸⁶. El parámetro a^* representa el eje rojo-verde de la escala cromática, b^* el eje amarillo-azul y L^* la luminosidad de oscuro a claro.

Tabla 4.5. Valores de colorimetría de las muestras y representación respecto al sistema CIE.

Caso estudio	a^*	b^*	L^*	Color
JO	4.92	11.45	42.15	
JS	3.94	5.76	30.30	
H	11.41	22.71	50.77	
SC	7.01	11.10	43.04	
TA	12.45	16.30	30.27	

Adicionalmente, en la Figura 4.36 pueden apreciarse las diferencias cromáticas presentadas en la Tabla 4.5 con ejemplos de fotografías de los casos de estudio para observar las tonalidades de los adobes y los suelos analizados.

¹⁸⁶ Generado con Free Color Converter de Nix Color Sensor: <https://www.nixsensor.com/free-color-converter/>

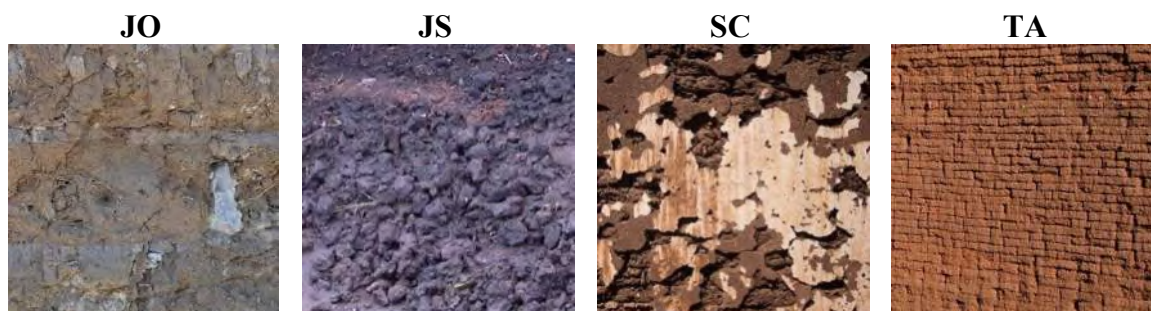


Figura 4.36. Tonalidades de materiales en distintos casos de estudio. Fotografías: (E. G. Navarro-Mendoza, 2018; C. Bernabé-Reyes, 2018; A. Sánchez-Calvillo, 2021; A. Solís-Sánchez, 2021).

Por último, el gráfico de coordenadas de la Figura 4.37 presenta los dos ejes correspondientes a los parámetros a^* y b^* , permitiendo identificar las variaciones de color entre las distintas muestras de suelos y adobes. Respecto a los cambios entre JS y JO, la muestra identificada como M7 es más cercana al color de los suelos naturales, mientras que el resto permanece más alejado en un rango más cercano a los tonos verdes y azules.

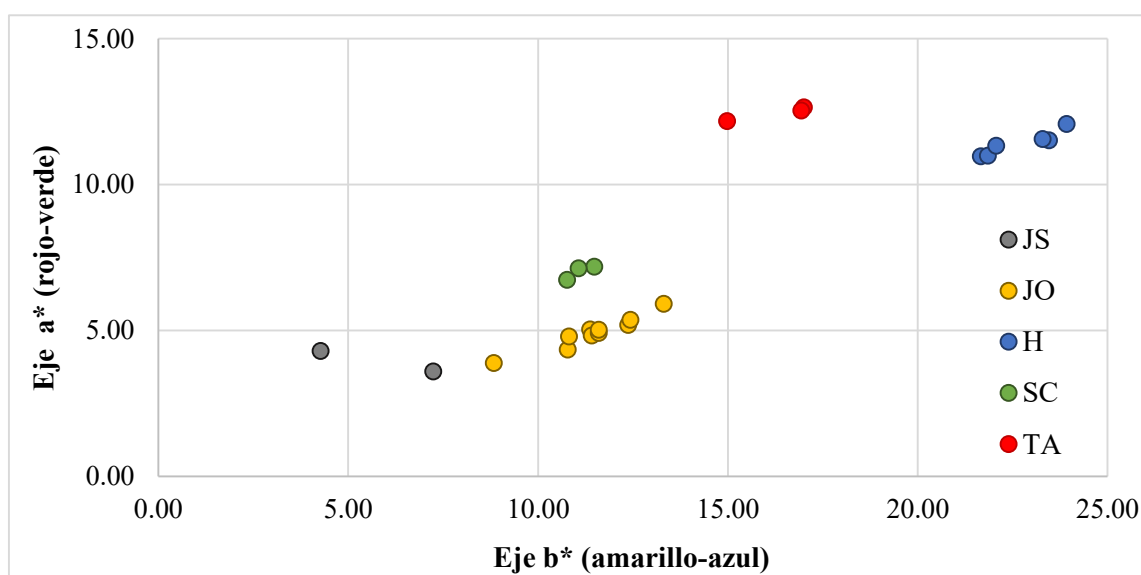


Figura 4.37. Valores colorimétricos a^* y b^* de los casos de estudio.

Observando los resultados puede apreciarse una clara separación entre los casos de estudio, con una mayor coincidencia entre los adobes de JO y SC, con tonalidades grisáceas. Otro aspecto relevante es el distanciamiento entre JS y JO, tendiendo los últimos a tonos más rojizos; esta situación muestra la alteración de los suelos naturales en el proceso de



manufactura de los adobes, que modifica tanto las proporciones de la granulometría como la adición de estabilizantes que repercuten en la escala cromática.

Los resultados de la clasificación granulométrica se muestran en la Figura 4.38. A primera vista puede apreciarse una clara diferencia entre el material de H y TA, con una gran cantidad de finos, superando el 90% en algunas muestras; y por otro lado los casos de JO y SC muestran distribuciones más típicas en comparación a casos de estudio análogos de adobes patrimoniales o históricos (Costa et al., 2019; Jiménez Delgado & Cañas Guerrero, 2007; Parracha J. L. et al., 2019; Vicente & Torrealva, 2018).

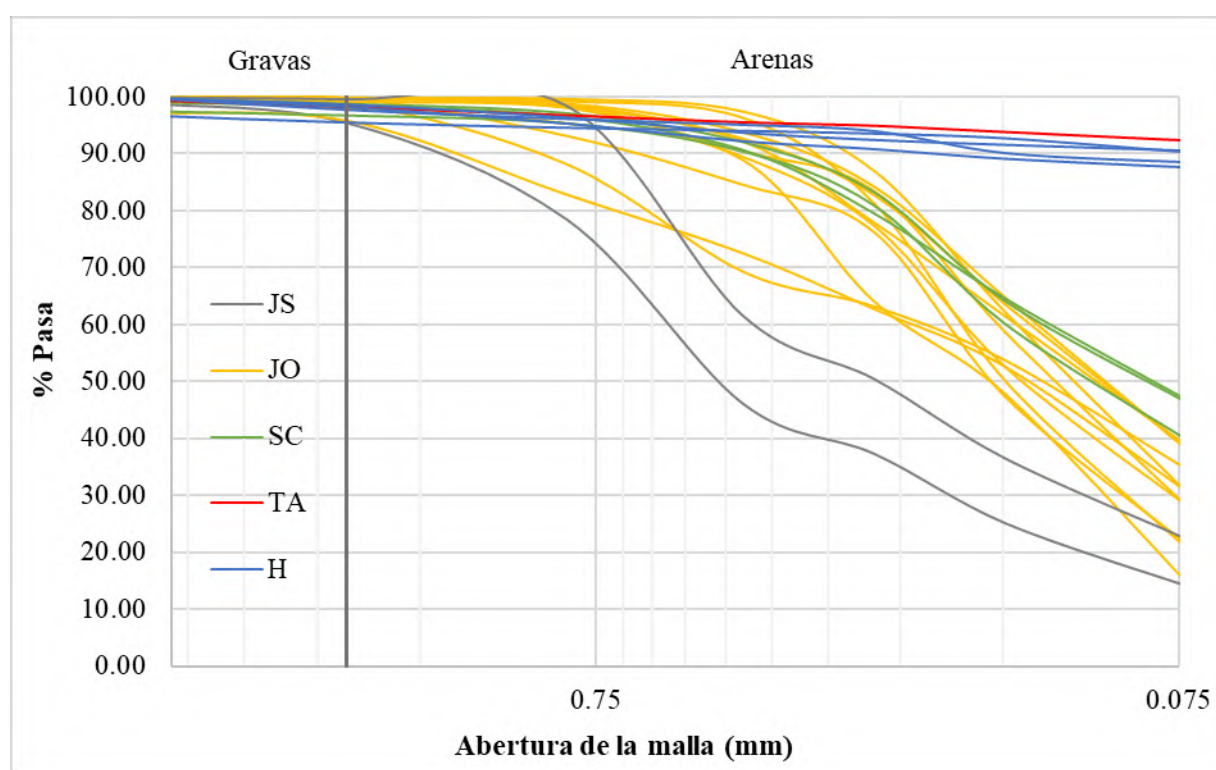


Figura 4.38. Curvas granulométricas de adobes y suelos naturales¹⁸⁷.

Con la realización de la prueba y la previa separación del material orgánico puede establecerse una distribución de los componentes de los adobes. En la Tabla 4.6 encontramos los porcentajes de cada elemento constituyente en peso medidos para los distintos casos de

¹⁸⁷ La recta vertical señala el límite entre material grueso (gravas y arenas) y los suelos de grado fino (limos y arenas). Este límite considera suelos finos todas aquellas partículas de diámetro menor a 0.075 mm.



estudio. Puede observarse que tres casos: JS, SC y TA no presentan fibras vegetales, siendo el primero un suelo natural y los otros dos adobes. Otro aspecto sorprendente en la gran cantidad de material fino que contienen H y TA, muy alejados de la mayoría de estudios de caracterización de materiales de tierra cruda.

Tabla 4.6. Composición de los adobes y porcentaje de fibras vegetales.

Muestra	Gravas	Arenas	Finos	Fibras
JS	2.45	79.06	18.49 ± 5.96	0.00
JO	0.91	68.46	30.03 ± 7.90	0.60 ± 0.60
H	2.49	7.98	89.2 ± 1.46	0.32 ± 0.07
SC ¹⁸⁸	2.08	53.25	44.67 ± 3.88	0.00
TA ¹⁸⁹	1.72	5.42	92.38	0.48

Existen muchos valores de referencia en la literatura sobre la composición básica o tradicional de un adobe u otras técnicas constructivas en tierra (Martins Neves et al., 2009), indicando la proporción mínima de material arcilloso o fino para su manufactura. Sin embargo, con el ensayo granulométrico podemos comprobar como no existe una dosificación estándar, y que factores como la clase de arcillas presentes en el suelo, las adiciones o los estabilizantes cuentan con mucha influencia. Una interesante conclusión es que en la mayoría de parámetros mecánicos H y SC presentan valores muy similares a lo largo de la investigación, pese a que las curvas granulométricas generadas son completamente opuestas, lo que demuestra la gran adaptación de la arquitectura vernácula a los recursos disponibles, en este caso los suelos.

Respecto al uso de las fibras vegetales se pudo comprobar sorprendentemente que muchas de las muestras no presentaron cantidades medibles, siendo la estabilización con materiales como la paja o el huinumo¹⁹⁰ una práctica muy común en la manufactura de adobes en México. En el caso de SC, por ser una localidad con un clima muy seco y cálido, la ausencia

¹⁸⁸ Los adobes de SC contenían cantidades ínfimas de fibras vegetales, consecuentemente no pudieron ser separadas y su peso se consideró ínfimo.

¹⁸⁹ La dificultad de extracción de muestras en el Templo Inconcluso de Taretan únicamente permitió generar un análisis granulométrico del material disponible, por lo que los valores de referencia son absolutos.

¹⁹⁰ El huinumo es el término huichol empleado para designar las agujas de pino que se utilizan para la fabricación de los adobes.



de fibras vegetales podría ser entendida por el supuesto de que la arquitectura vernácula se adapta al medio y los recursos disponibles. Sin embargo, para el caso de JO sí presenta una situación muy particular, ya que los adobes presentan el mayor porcentaje de fibras y a la vez el mayor CV, debido a que algunos bloques no contenían esta adición mientras que otros presentaban cantidades muy elevadas (ver Figura 4.39).



Figura 4.39. Adobes de Jojutla de Juárez con proporciones muy distintas de fibras vegetales.
Fotografías: (A. Sánchez-Calvillo, 2018).

Una de las lecturas de esta situación en JJ podría traducirse en un evidenciable síntoma de la pérdida de la tradición constructiva en la localidad, al obviarse completamente la adición de fibras a la mezcla en muchos de los bloques analizados. En este caso, la ausencia de fibras vegetales puede generar problemas de fisuración en las piezas y una consecuente disminución de la capacidad mecánica. Precisamente esta es una de las problemáticas que se analizaron en los primeros capítulos del documento, la desaparición de la arquitectura de tierra y las técnicas tradicionales empieza cuando se olvidan los procesos y modos de hacer de estos sistemas constructivos.

Otra correlación de la granulometría fina es la que puede efectuarse con la humedad relativa de las muestras, comparando las proporciones de material fino o arcilloso por los porcentajes de ω . En este caso encontramos una situación interesante con los adobes de H, que mostraron un contenido de agua considerablemente mayor a SC, pese a que estuvieron resguardadas en el laboratorio de materiales las mismas condiciones ambientales durante varios años; precisamente H presenta un contenido de material fino muy superior, que podría explicar la absorción de agua por parte de las arcillas.



Como resultado del ensayo de los límites de Atterberg, mediante los valores de referencia del LL e IP, las muestras pueden emplazarse en la carta de plasticidad de Casagrande y lograr determinar su clasificación en el SUCS. En la Figura 4.40 se observa la localización de todos los casos de estudio. Excepto los suelos recolectados en Jojutla de Juárez (JS), todas las muestras de adobes mostraron una disminución de la plasticidad, con los adobes de H y TA quedando ubicados cerca del límite entre alta y baja plasticidad; además, también se observa que los especímenes se emplazan alrededor de la línea diagonal A, que separa los limos de las arcillas.

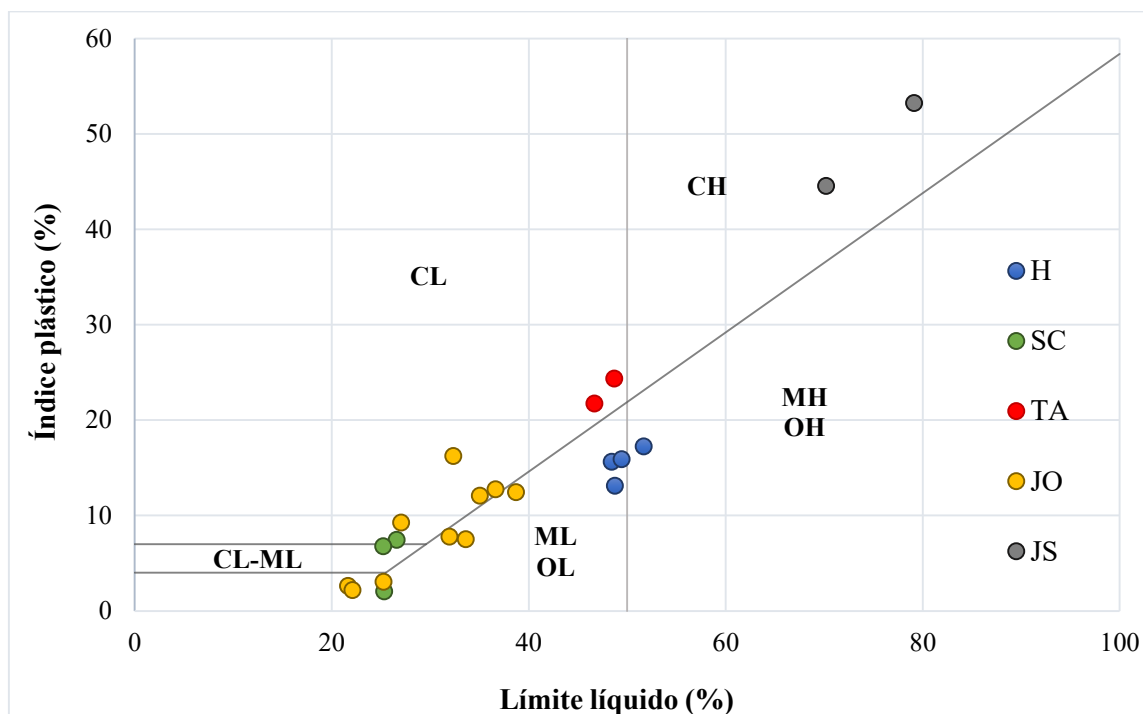


Figura 4.40. Carta de plasticidad y localización de las muestras.

Además, los límites nos permiten confirmar la presencia de estabilizantes en el proceso de manufactura de los adobes, con la clara disminución de la plasticidad. Otro parámetros del material, como el cambio de color pueden deberse principalmente a la adición de otros elementos en la mezcla y producción de los bloques (Sánchez-Calvillo et al., 2020), principalmente la cal. En este sentido los resultados de la colorimetría coinciden con los de la carta de plasticidad, al detectar un cambio pronunciado entre las muestras de JS y JO.

Sin embargo, cabe destacar que los límites se efectúan con el material que pasa la malla ASTM n°40, por lo que son la representación de la porción fina de las muestras. Para realizar



la clasificación SUCS es necesario tomar en cuenta tanto los límites como el ensayo granulométrico, permitiendo determinar el grupo al que pertenecen los especímenes. Los resultados de los límites quedan expuestos en la Tabla 4.7 junto con todos los parámetros y la clasificación SUCS detallada de cada caso de estudio. El índice plástico (IP) se calcula como resultado de restar el LP al LL, siendo un procedimiento muy sencillo, y un parámetro básico para poder clasificar el material.

Tabla 4.7. Resumen de las propiedades índice y clasificación SUCS de los distintos casos de estudio.

M.	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)	Clasificación SUCS	
H	49.58	34.10	15.48	6.38	31.97	ML	Limo de baja plasticidad
SC	25.73	20.28	5.45	4.29	19.43	SM-SC	Arena limosa o arcillosa
TA	47.67	24.60	23.07	10.47	18.92	CL	Arcilla de baja plasticidad
JO	30.44	21.83	8.61	5.08	22.44	SC	Arena arcillosa
JS	74.67	25.77	48.90	19.08	9.78	SC	Arena arcillosa

Continuando con las propiedades químicas de las muestras, la Tabla 4.8 muestra los valores de pH de los cinco casos de estudio a partir de las lecturas del medidor digital y la corroboración mediante las tiras reactivas. También muestra el porcentaje promedio de material orgánico contenido en los adobes y suelos, que puede ser uno de los factores de alteración del pH natural; en este caso se observa que tanto JS como SC no presentaban fibras vegetales en una cantidad representativa.

Tabla 4.8. Resultados de potencial de hidrógeno y contenido de materia orgánica en los adobes y suelos naturales ensayados.

Muestra	pH	% orgánico (en peso)
JS	7.2	0.00
JO	7.6	0.60
H	5.5	0.32
SC	6.0	0.00
TA	5.0	0.48

Revisando la información de la Tabla 4.8, en comparación, la tesis doctoral de Pérez Castellanos (2016) presenta valores de pH de 6 para adobes patrimoniales de la Pirámide de Cholula, más cercanos a los encontrados en los casos de estudio de H, SC y TA. Una posible explicación de estos valores más bajos podría ser la de la antigüedad de estas construcciones, ya que tras la estabilización de suelos y su consecuente incremento del pH con los años tiende



a volver a su valor natural. En cambio, la mayoría de las viviendas del centro histórico de Jojutla contaban con una edificación e intervención mucho más reciente, por lo que no dio tiempo a una reducción tan drástica. Además, se pudo comprobar que los valores de pH de los suelos de la región (JS) eran considerablemente elevados en comparación al resto de casos de estudio, por lo que al usar este material para la fabricación de los adobes es lógico que los valores de pH de JO también sean altos.

Continuando la caracterización química, los resultados de FRX realizados en el laboratorio LANCIC-UNAM en la primera campaña de la investigación constituyen el promedio de cinco mediciones. En las Figuras 4.41 y 4.42 podemos visualizar los gráficos de intensidad elemental para los adobes (JO) y las muestras de suelo natural (JS) del caso de estudio de Jojutla. El eje vertical refiere la intensidad mientras que en el horizontal encontramos los elementos presentes.

Jojutla se encuentra en una región de producción agrícola, principalmente de caña de azúcar, arroz, maíz y sorgo; por lo que la FRX podría detectar algunos elementos residuales empleados en los cultivos, así como la presencia de residuos agroindustriales en la manufactura de los adobes, siendo una solución común en la arquitectura tradicional y en la autoconstrucción de estas localidades.

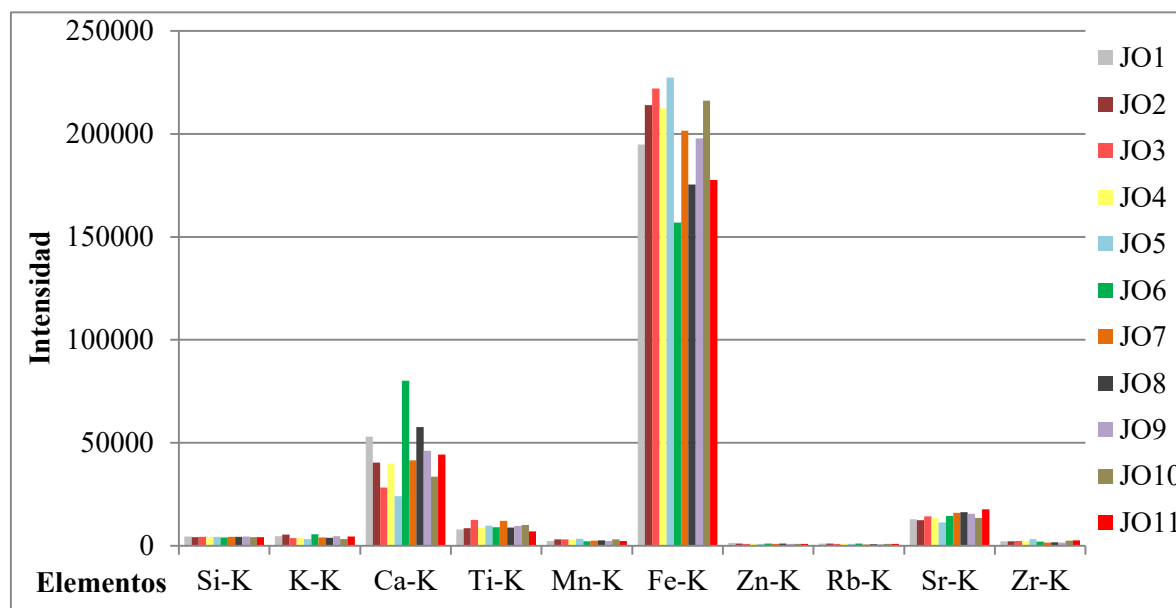


Figura 4.41. Resultados XRF de JO, elementos de mayor concentración.

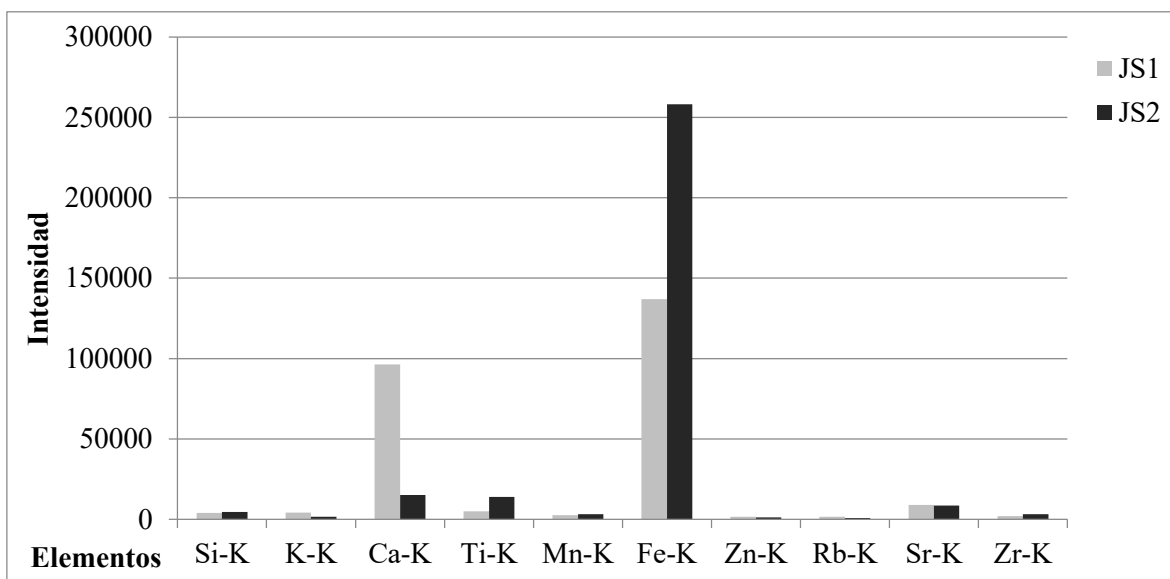


Figura 4.42. Resultados XRF de JS, elementos de mayor concentración.

Por otro lado, en la segunda campaña realizada gracias al proyecto DBMC 2020, se pudo realizar la medición de los casos de estudio JO, H, SC y TA, pudiendo complementar los resultados de la primera fase. En la Tabla 4.9 se muestran los elementos identificados en forma de óxidos; la ventaja de la FRX es que nos ayudan a plantear el resto de pruebas químicas, ya que todos aquellos óxidos que encontremos luego podrán ser identificados en forma de minerales.

Tabla 4.9. Resultados FRX de las muestras de adobe. Cortesía A. Navarro-Ezquerria.

(%)	H	JO	TA	SC
CaO	1.320	0.868	0.514	3.460
MgO	1.260	1.087	1.062	2.605
Fe ₂ O ₃	17.720	17.521	20.160	19.952
Al ₂ O ₃	28.067	23.876	29.081	14.610
SiO ₂	33.571	40.188	30.186	48.630
K ₂ O	0.720	0.622	0.261	2.937
Na ₂ O	0.120	0.140	-	0.361
P ₂ O ₅	0.326	0.140	0.160	0.190
TiO ₂	1.800	2.551	2.403	1.483
MnO	0.309	0.228	0.152	0.276
LOI 1050°C ¹⁹¹	14.435	12.589	15.859	5.145

¹⁹¹ LOI (Lost Of Ignition) representa el porcentaje de material que se perdió por la ignición, en este caso a 1050 °C, durante el proceso del ensayo.



SC fue la muestra que reportó una menor pérdida por calcinación, siendo a su vez el caso de estudio que presentó una menor cantidad de fibras vegetales en su constitución, lo cual podría influir en este aspecto. Por último, la Figura 4.43 se representa gráficamente la comparativa del FRX de todos los casos de estudio, mostrando la intensidad de los compuestos en forma de óxido identificados con la prueba.

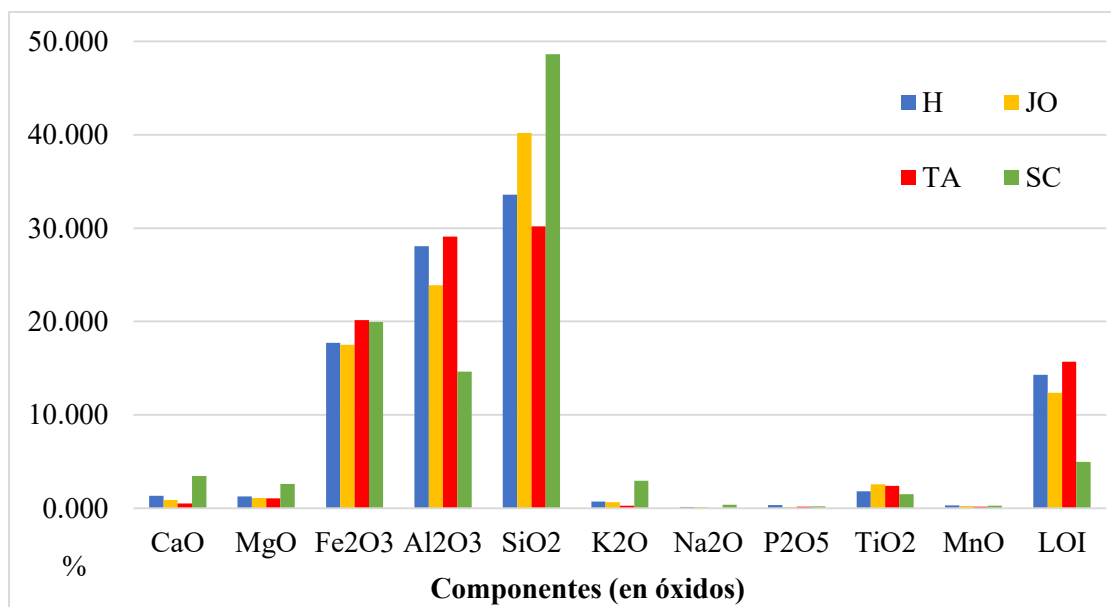


Figura 4.43. Resultados FRX de los casos de estudio de adobes patrimoniales.

La difracción informa sobre la asociación de los componentes químicos, es decir sobre los minerales presentes en las muestras estudiadas. A continuación, se desglosan los resultados por caso de estudio, aunque el estudio debe ser comparativo para poder obtener conclusiones relevantes sobre la composición y propiedades químicas de los suelos y adobes. Los minerales encontrados coinciden con los resultados de FRX que identifican bien en forma de óxidos o en forma elemental la composición, y también coinciden con lo encontrado en SEM con EDS, por lo que la caracterización presenta confiabilidad.

En la Tabla 4.10 se muestra la cristalografía DRX de las muestras JS, ambos suelos de la región de Jojutla que sin embargo presentaron características muy diferentes. Por un lado, JS1 presenta un porcentaje significativo de calcita, al haber sido extraída de una excavación en el centro de la localidad donde se buscó mejorar el comportamiento plástico del suelo mediante la adición de cal; por otro lado, JS2 corresponde a uno de los principales bancos de



arcilla alrededor de la ciudad, por lo que el material fue sustraído sin haber sido tratado previamente y consecuentemente no contiene calcita al no haber sido estabilizado.

Tabla 4.10. Cristalografía DRX de suelos de Jojutla (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

Muestra	Mineral (%)					
	Albita	Anortita	Calcita	Ilita	Pargasita	Cuarzo
JS1	6.90	14.50	25.40	47.40	-	5.80
JS2	8.50	49.50	-	27.70	10.80	3.50

Las arcillas de la región, y por lo tanto con las que se fabricaron los adobes de JJ son mayormente ilitas, siendo bastante aptas para la edificación al presentar un comportamiento no expansivo. En comparación, la Tabla 4.11 revela la cristalografía y composición mineral de las muestras JO, correspondientes a los adobes afectados por el sismo. Podemos encontrar una contribución significativa de calcita en la mayoría de las muestras, en porcentajes del 1 al 10%; únicamente JO8 y JO10 no mostraron presencia alguna. Los resultados son lógicos, debido a que la estabilización con cal es la solución más común para las construcciones de tierra en México (Guerrero, 2013; Navarro Mendoza et al., 2019). En general se observan mezclas de arcillas como la caolinita y la ilita, pero también la presencia de líticos identificados a partir del cuarzo, ya que los adobes casi siempre incorporan una proporción de material granular como estabilizantes volumétricos.

Tabla 4.11. Cristalografía DRX de adobes de Jojutla (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

Mineral (%)	JO1	JO2	JO3	JO4	JO5	JO6	JO7	JO8	JO9	J10	J11
Albita	38.00	32.80	-	-	33.30	9.90	2.20	72.80	-	-	-
Anortita	-	-	53.00	44.00	16.90	48.10	77.10	-	68.60	53.20	79.60
Calcita	10.80	8.00	1.20	5.20	1.00	16.10	3.20	-	7.90	-	2.60
Cordierita	-	-	-	-	1.60	-	4.20	-	1.00	-	2.00
Hematita	-	-	1.60	-	-	-	-	-	-	-	-
Illita	-	-	-	16.10	-	25.80	-	-	-	5.60	-
Caolinita	29.60	28.10	-	28.70	46.00	-	10.50	-	-	36.70	-
Magnetita	1.00	2.10	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
Moscovita	13.40	17.20	-	-	-	-	-	-	9.80	-	-
Nacrita	-	5.10	40.70	-	-	-	-	17.30	-	-	-
Pargasita	-	-	-	-	-	-	-	0.20	-	-	13.40
Pirofilita	-	-	-	-	-	-	-	5.60	-	-	-
Cuarzo	7.10	4.00	2.50	6.00	1.20	-	2.80	4.10	8.20	4.50	2.40



A modo general, con la segunda campaña de experimentación, pudo efectuarse la DRX de todos los casos de estudio, obteniendo la composición que se observa en la Tabla 4.12 y los difractogramas correspondientes a las Figuras 4.44-4.47, donde pueden apreciarse los picos asociados a cada uno de los minerales identificados.

Tabla 4.12. Cristalografía DRX de los adobes de los casos de estudio. Cortesía A. Navarro-Ezquerria.

Mineral (%)	H	SC	TA	JO
Caolinita	4.90	-	42.00	8.00
Cuarzo	16.60	45.40	5.50	21.50
Aluminosilicato	22.20	-	-	27.70
Albita	-	14.00	-	-
Hematita	-	5.00	21.30	-
Anortita	18.20	-	-	9.00
Halloysita	8.60	1.30	31.10	-
Ortoclasa	-	10.10	-	-
Lizardita	6.50	-	-	3.10
Rostita	7.30	-	-	6.00
Olivino	9.10	-	-	5.40
Maghemita	6.80	-	-	4.40
Carbono	-	-	-	14.80
Vermiculita	-	0.20	-	-
Laumontita	-	10.90	-	-
Sanidina	-	9.90	-	-
Hydrobiotita	-	3.30	-	-

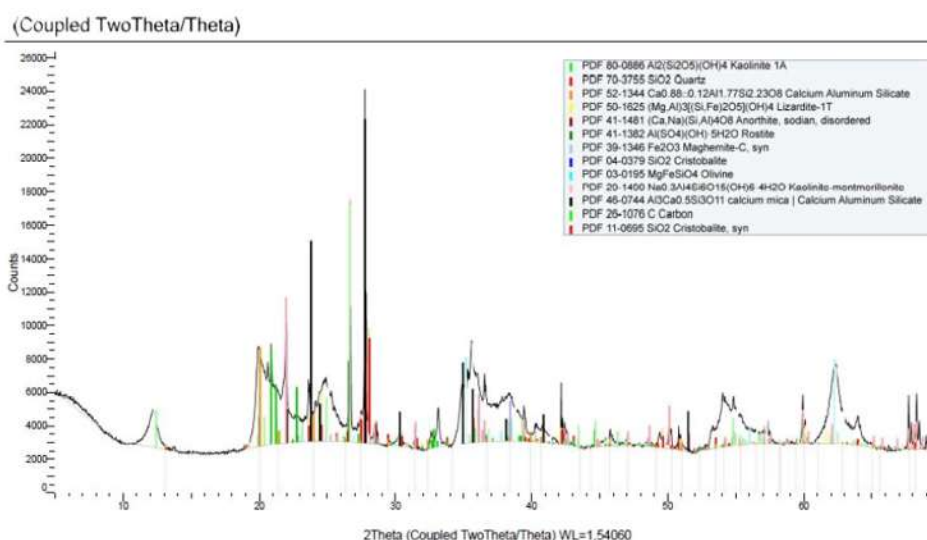


Figura 4.44. Difractograma de adobe de Jojutla de Juárez. Cortesía A. Navarro-Ezquerria.

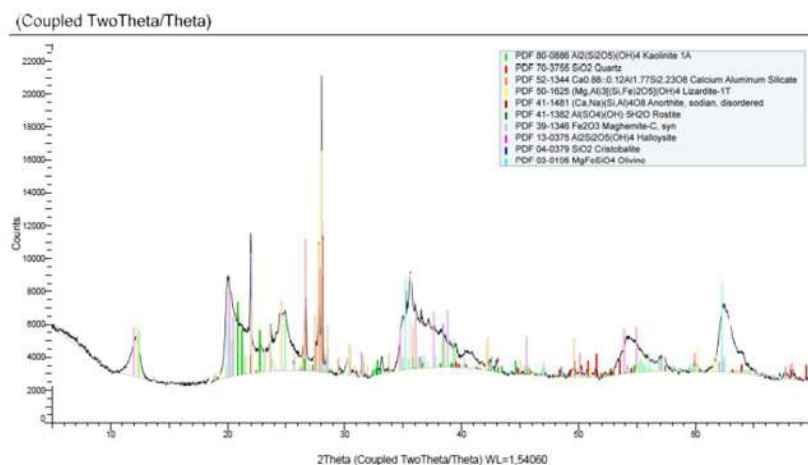


Figura 4.45. Difractograma de adobe de la Huacana. Cortesía A. Navarro-Ezquerria, UPC.

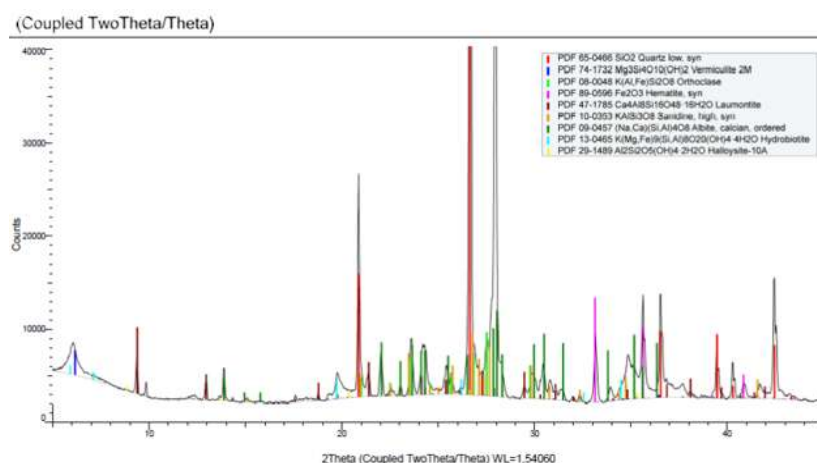


Figura 4.46. Difractograma de adobe Santa Cruz de Morelos. Cortesía A. Navarro-Ezquerria, UPC.

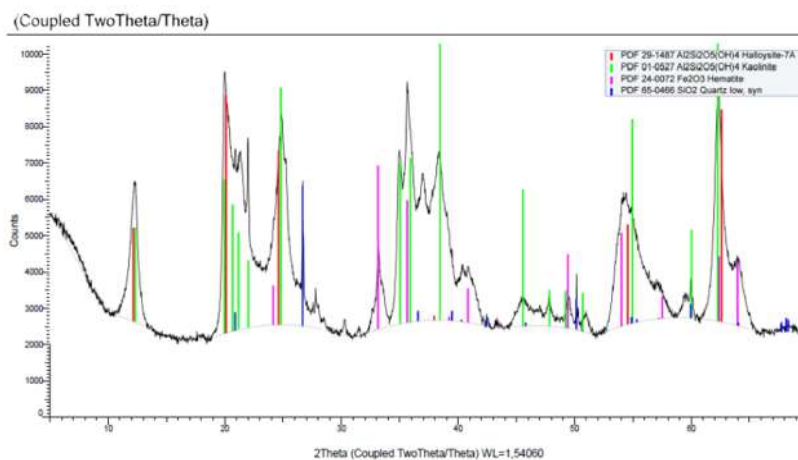


Figura 4.47. Difractograma de adobe de Taretan. Cortesía A. Navarro-Ezquerria, UPC.



Por último, con la técnica de SEM y los microanálisis EDS, se obtuvieron microfotografías del material de los adobes y de las fibras contenidas, así como los mapeos y análisis puntuales de los distintos especímenes. En la primera campaña realizada en el laboratorio LANCIC del Instituto de Física de la UNAM, se analizaron los adobes de JO con un microscopio de bajo vacío sin metalizar las muestras. La Figura 4.48 presenta una microfotografía representativa de un adobe de JO, obtenida a 500X, en la que se aprecia el contenido de líticos. La Figura 4.49 muestra el análisis puntual de la composición elemental del mismo espécimen, observando los picos de cada uno de los elementos encontrados. Finalmente, la Figura 4.50 contiene un mapeo estratégico o elemental representativo para la misma muestra de JO, que en combinación con la FRX nos permite conocer mejor la composición elemental de ese adobe.

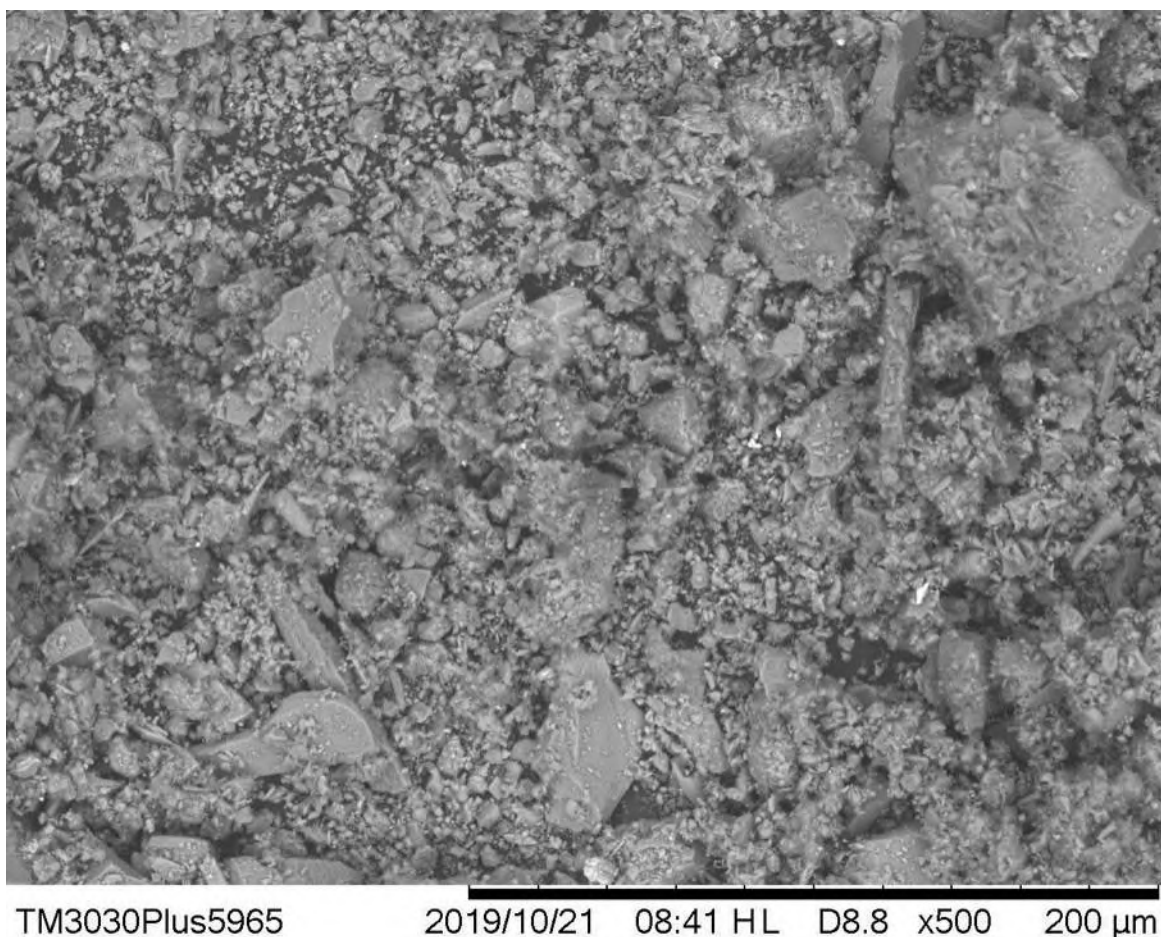


Figura 4.48. Imagen SEM de la muestra JO8, microscopio de bajo vacío, muestra sin metalizar.
Cortesía E. M. Alonso-Guzmán, FIC-UMSNH y LANCIC-IFUNAM.

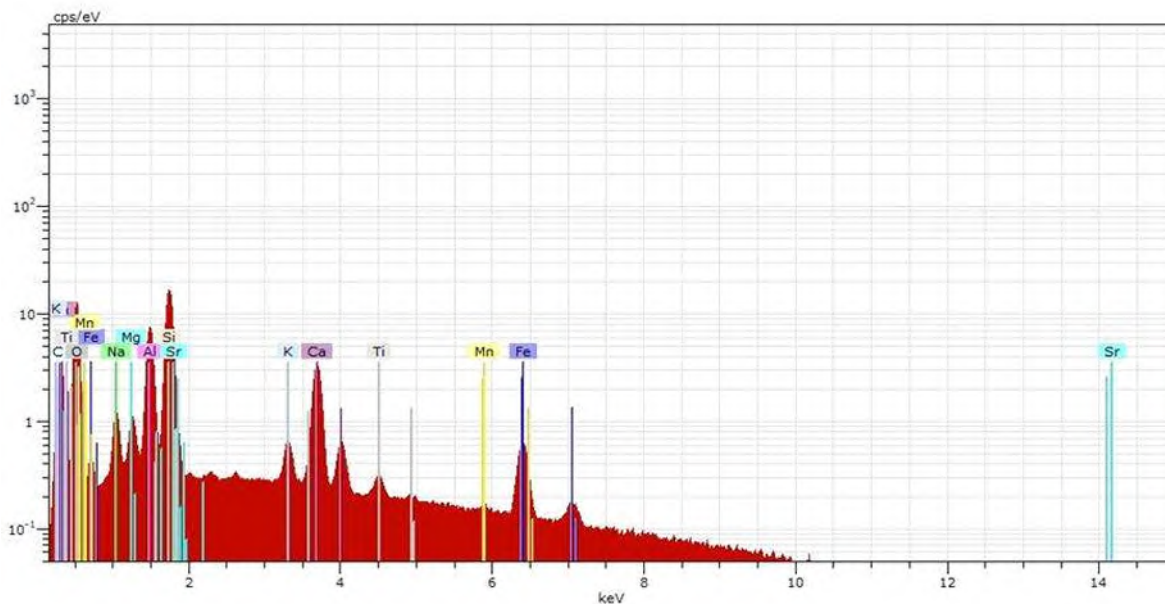


Figura 4.49. Análisis puntual de la composición elemental de la muestra JO8 a 500 magnificaciones, sin recubrimiento. Cortesía E. M. Alonso-Guzmán, FIC-UMSNH y LANCIC-IFUNAM.

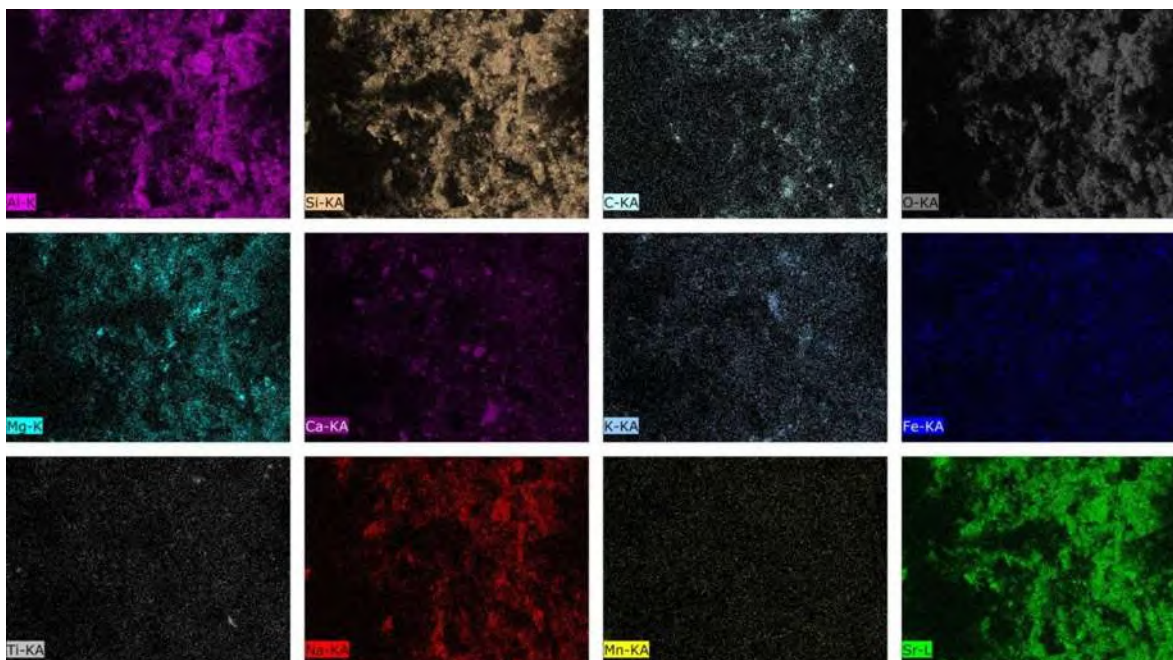


Figura 4.50. Mapeo elemental de la muestra JO8 500 magnificaciones, sin recubrimiento. Cortesía E. M. Alonso, FIC-UMSNH y LANCIC-IFUNAM.



Mediante la combinación de SEM, DRX y FRX se pudo detectar que una gran parte de los adobes contenían proporciones significativas de cal, uno de los estabilizantes más empleados en la construcción con tierra (Villaseñor Alonso & Barba Pingarrón, 2012), de probada eficacia para mejorar las cualidades de las arcillas (Navarro Mendoza et al., 2019). Además, esta identificación puede ser correlacionada con la disminución de la plasticidad mediante los límites de Atterberg y la variación de color entre JS y JO detectada con la colorimetría.

En la segunda campaña en el Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH se pudieron obtener microfotografías de las fibras contenidas en los adobes de JO, H, SC y TA, que pueden observarse en la Figura 4.51.

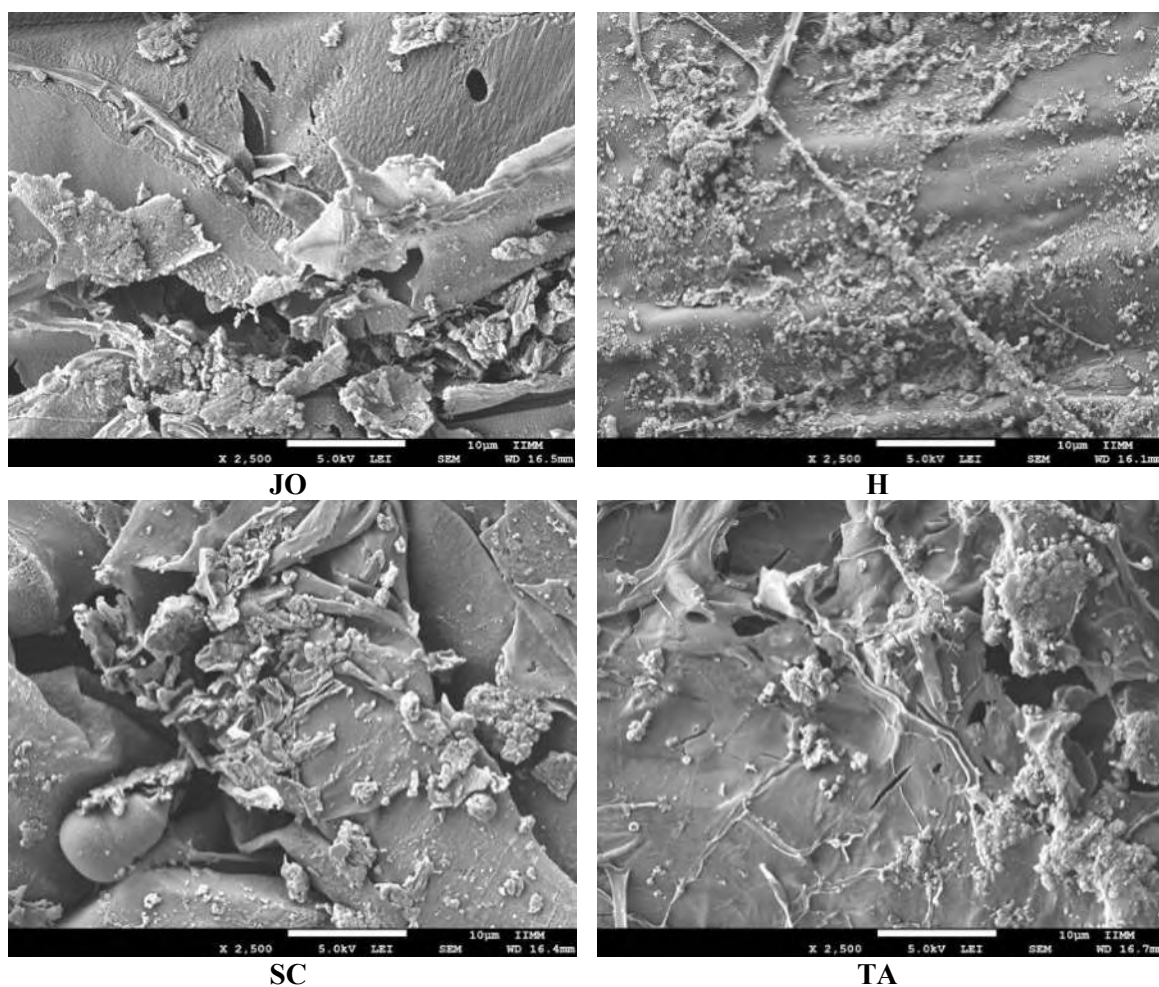


Figura 4.51. Microfotografías de las fibras contenidas en los adobes de Jojutla de Juárez, la Huacana, Santa Cruz de Morelos y Taretan. Cortesía E. M. Alonso-Guzmán y FIC-IIMM-UMSNH.



4.3.2. Caracterización mecánica

Continuando con los resultados de la caracterización mecánica, la Tabla 4.13 presenta los resultados de resistencia a compresión de los adobes y su CV en comparación a la densidad de los bloques, mostrando una correlación directa entre los dos que ha sido reportada en muchas investigaciones (Sánchez et al., 2022). Los resultados de JO arrojaron mucha más variabilidad, lo cual puede ser debido a las solicitaciones sísmicas que sufrieron las edificaciones, hecho que también puede explicar los valores más bajos de resistencia mecánica en comparación al resto de casos de estudio.

Tabla 4.13. Resultados y parámetros estadísticos de la resistencia mecánica a compresión uniaxial de los adobes ensayados.

Muestra	ρ_{ap} (kg/m ³)	σ_{csu} (kg/cm ²)	CV (%)
JO	1282.64	7.26 ± 3.28	45.10
H	1724.16	10.48 ± 3.36	32.07
SC	1609.09	9.71 ± 1.69	17.44

Si comparamos la resistencia de los adobes analizados con otras investigaciones a nivel nacional vemos que se ajustan bastante, con la excepción de JO que puede quedar por debajo de otros casos de estudio análogos por el estado de deterioro comentado anteriormente. En el estado de Morelos Guerrero Baca (2019) reporta resistencias de 16 kg/cm², Ruiz Sibaja y Vidal Sánchez (2015) alcanzaron 25 kg/cm² para bloques artesanales de Chiapa de Corzo, Arroyo Matus et al. (2013) ensayaron adobes del estado de Guerrero obteniendo un promedio de 11 kg/cm² y Ordaz Zapata (2019) llegó a los 17 Kg/cm² con piezas fabricadas tradicionalmente en el estado de Coahuila. No obstante, cabe destacar que los valores definidos para adobes son muy variados en la bibliografía, mientras que Meli (2005) reporta un rango [5.1-15.7 kg/cm²], Cruz Farrera (2018) presenta valores superiores a los 30 kg, muy lejanos del promedio para estos sistemas constructivos.

Respecto a la densidad, este parámetro es directamente proporcional a la resistencia a compresión del material, ya que define el grado de compactación. Sin embargo, Sánchez et al. (2022) reportan que la compactación expresada en función de la densidad aparente del material influye directamente en la resistencia mecánica a compresión hasta cierto punto, llegando a un punto en el que la pendiente de esta relación lineal tiende a un valor muy bajo.



No obstante, los resultados de compresión simple confirman esta relación al mostrar JO resultados mucho menores para ambos parámetros.

Tras el proceso de cálculo del ensayo point load, la Tabla 4.14 muestra todos los parámetros de medición de las muestras de adobe de los tres casos de estudio analizados: JO, H y SC, así como el valor σ_{PL} que es el que indica la resistencia mecánica de los fragmentos ensayados. La prueba fue efectuada en primer lugar para ser correlacionada con la compresión simple y evaluar su conveniencia en los estudios en campo. En la tabla, puede observarse una clara descompensación de los adobes de JO con los de Tierra Caliente, presentando los últimos valores que cuaduplican a los primeros, ejerciendo una diferencia insalvable que no se corresponde con las pruebas de compresión simple uniaxial, en los que la variación era mucho menor entre casos de estudio.

Tabla 4.14. Parámetros de cálculo del ensayo point load y resultados de los adobes analizados.

Muestra	D (mm)	W (mm)	A (mm ²)	De (mm)	P (kN)	Is (MPa)	F ₁	F ₂	Is(50) (MPa)	σ_{PL} (kg/cm ²)
JO	45.70	60.23	2870.10	58.85	0.068	0.022	1.07	1.08	0.023	5.58
H	47.21	39.26	1853.09	48.36	0.239	0.105	0.98	0.98	0.103	25.14
SC	47.64	40.24	1941.64	49.17	0.198	0.086	0.99	0.99	0.084	20.50

Como se comentó, el interés del ensayo PLT pasaba por la comparación de los resultados con los de la compresión simple, para comprobar si éste puede ser una alternativa apta para realizar análisis de resistencia mecánica en campo entre otros alcances. La Tabla 4.15 presenta la correlación de resultados de las dos pruebas en comparación con la densidad de las muestras y los CV de cada una.

Tabla 4.15. Correlación de la resistencia a compresión uniaxial y el esfuerzo point load.

Muestra	ρ_{ap} (kg/m ³)	σ_{CSU} (kg/cm ²)	CV (%)	σ_{PL} (kg/cm ²)	CV (%)	σ_{CS}/σ_{PL}
JO	1282.64	7.26 ± 3.28	45.10	5.58 ± 5.82	104.30	1.39
H	1724.16	10.48 ± 3.36	32.07	25.14 ± 11.72	46.62	0.42
SC	1609.09	9.71 ± 1.69	17.44	20.50 ± 9.61	46.87	0.47

Los resultados, expresados a partir del ratio σ_{CS}/σ_{PL} no permitieron arrojar una conclusión clara, al presentar coeficientes muy distintos entre JO por un lado y H y SC por el otro. Los adobes de Tierra Caliente comparten propiedades similares, con valores de PLT muy altos; no obstante, no ayudan a validar la correlación entre compresión y PLT. Además, el CV del



PLT de todas las muestras arrojó valores considerablemente más altos que en resto de ensayos de resistencia mecánica efectuados, lo cual indica la mayor variabilidad de resultados obtenidos con los fragmentos.

Una de las posibles causas de los resultados no concluyentes es explicable por el cálculo del índice de carga puntual (I_s), que fue diseñado para las rocas de tipo arenisca (ASTM International, 2008), e implica factores de corrección específicos para estos materiales. En este supuesto es necesario profundizar en la investigación con estructuras de tierra para lograr valores más exactos en el futuro, por lo que este tipo de trabajos pueden ayudar a mejorar las técnicas de análisis para estos materiales (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

En las primeras fases de la investigación, con las muestras de JO, la comparación entre los valores de compresión simple y los de PLT para los adobes examinados arrojó una relación cercana al ratio 1.39:1 mostrando una reciprocidad lineal (Sanchez-Calvillo, et al., 2021), como puede observarse en la Figura 4.52. Se observa una clara dispersión de los valores, pero una inclinación a mayores resistencias obtenidas por compresión simple; esto puede apreciarse en la tendencia a quedar estos valores por debajo de la línea de pendiente.

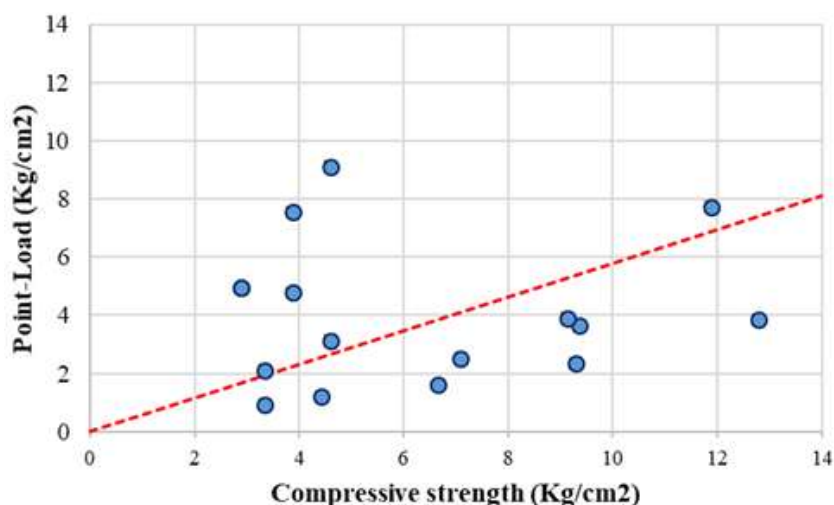


Figura 4.52. Correlación entre la Resistencia a compresión simple uniaxial y la Resistencia obtenida por el ensayo de Point-Load. (Sanchez-Calvillo, et al., 2021)

Por otro lado, en la Figura 4.53 puede apreciarse la ecuación de correlación entre los dos ensayos, así como el coeficiente de determinación R^2 , que tiene un valor de 0.8723 que es



bastante aceptable para este tipo de análisis tan novedosos entre las dos pruebas¹⁹². También puede observarse que todas las muestras de JO quedan dentro de los límites de confianza del 95%, indicando que la correlación con la resistencia mecánica es confiable.

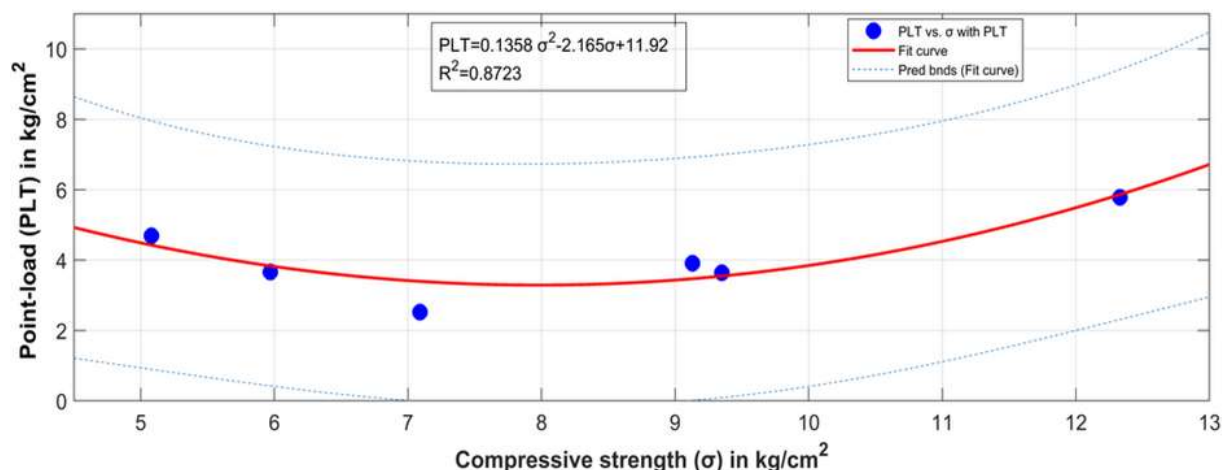


Figura 4.53. Ecuación de correlación y su variabilidad. Imagen elaborada mediante MATLAB R2017b por M. A. Navarrete-Seras (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

En conclusión, el PLT puede ser una herramienta de análisis muy favorable para la medición de la resistencia mecánica de aquellas construcciones y monumentos que por causa de desastres naturales no permiten aplicar los métodos convencionales de muestreo y experimentación. La ventaja de poder realizar el test *in situ* lo hace conveniente para casos de estudio en los que las muestras están alteradas o gravemente dañadas, como es el caso de las afectaciones por sismos. Sin embargo, debe continuarse el trabajo de análisis iniciado en la investigación para poder estandarizar su uso y lograr valores de resistencia mecánica confiables.

Siguiendo con los datos de la prueba triaxial se generó el gráfico de la Figura 4.54, que muestra las curvas esfuerzo-deformación unitaria de los especímenes de adobe. El comportamiento de H y SC fue similar, alcanzando el primero valores de resistencia mecánica ligeramente superiores, de forma parecida a los ensayos de resistencia a compresión simple.

¹⁹² El coeficiente de determinación R^2 indica que tan bien puede un modelo predecir los datos. Este valor siempre queda fijado entre 0 y 1 y cuanto más alto es significa que el modelo es más acertado (Garza-Ulloa, 2018).

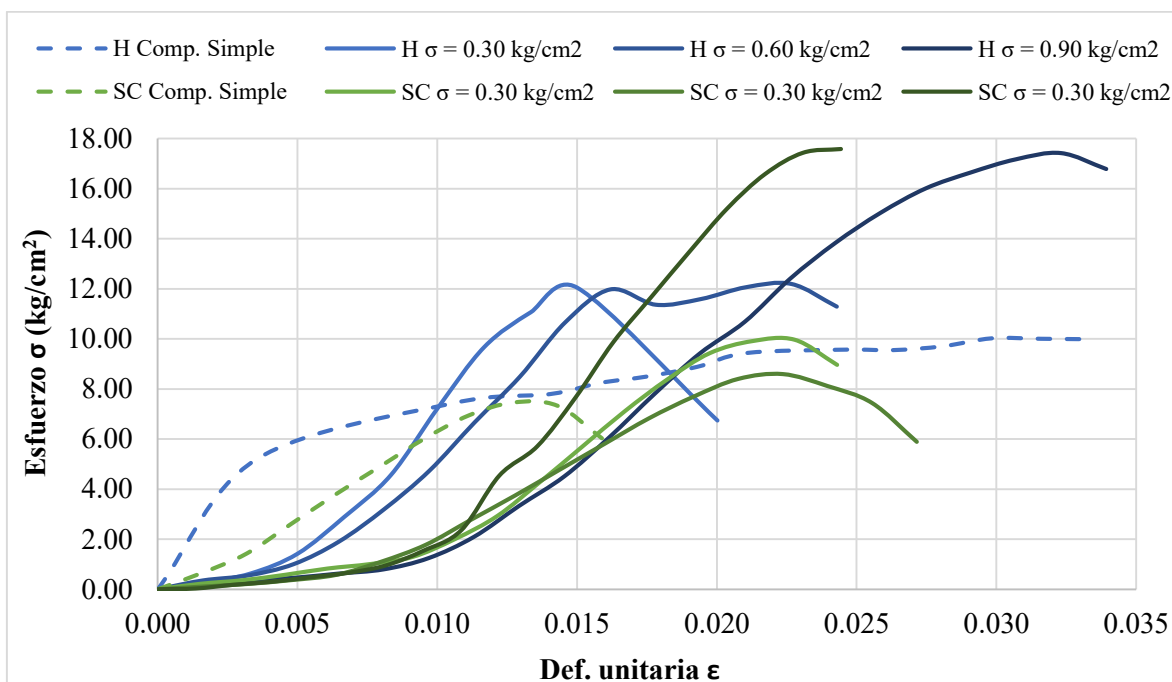


Figura 4.54. Gráfica esfuerzo-deformación de los adobes de Tierra Caliente resultante del ensayo triaxial no consolidado no drenado con distintos grados de confinamiento.

En investigaciones previas, la correlación esfuerzo-deformación fue muy útil para observar el tipo de falla de las muestras y la influencia de los aditivos y estabilizantes en el comportamiento expansivo de los suelos (Sánchez et al., 2022); en este caso permitió comparar los valores de esfuerzo con los obtenidos con el resto de pruebas de resistencia mecánica. En la Tabla 4.16 podemos encontrar los resultados del ensayo, así como los valores de cohesión (C), ángulo de fricción interna (ϕ) y esfuerzo cortante de fallo (τ_f) que fueron obtenidos a partir del cálculo de las envolventes de falla de cada uno de los casos de estudio.

Tabla 4.16. Resumen de resultados del ensayo triaxial no consolidado no drenado y las envolventes de falla generadas para los adobes de Tierra Caliente.

Muestra	Confinamiento (kg/cm ²)	σ_{Max} (kg/cm ²)	ρ_{ap} (kg/m ³)	ω (%)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
H	0.30	12.04	1724.16	6.77	1.53	54
	0.60	12.19				
	0.90	17.42				
SC	0.30	9.96	1609.09	2.69	0.83	60
	0.60	8.60				
	0.90	17.58				



El esfuerzo cortante no suele ser calculado como uno de los parámetros de resistencia mecánica de los adobes, sin embargo, éste es uno de los valores más importantes a la hora de predecir el fallo de suelos y rocas en la geotecnia. El valor de τ_f puede ser interesante ya que los bloques de adobe trabajan en conjunto al ser sistemas de mamposterías, quedando confinados por el mismo muro y el mortero de unión que suele estar compuesto por la misma tierra. Mediante los resultados de la cohesión y el ángulo de fricción se encontraron las dos siguientes expresiones de cálculo para H y SC respectivamente, donde el esfuerzo normal (σ') es una variable inherente al edificio y su peso propio.

$$\tau_f H = \sigma' \times \tan(54) + 1.53 \quad (\text{Ec. 4.12})$$

$$\tau_f SC = \sigma' \times \tan(60) + 0.83 \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Continuando con las capacidades mecánicas, la Tabla 4.17 muestra las dimensiones de las vigas labradas de los adobes de Tierra Caliente, así como la carga soportada antes de la rotura y el valor calculado de resistencia a la flexión (σ_F). Del mismo modo que en los ensayos de compresión, las muestras de H presentaron un ligeramente mejor comportamiento mecánico, por otro lado, la variación en los dos casos de estudio es considerablemente alta. Los valores más altos de H pueden relacionarse con muchos factores como la distribución granulométrica, la presencia de fibras vegetales o la posible estabilización del material. Por ejemplo, el estudio de Vega et al. (2011) de adobes tradicionales del norte de España caracterizó dos clases distintas de bloques con distintos porcentajes de paja sobre el volumen, encontrando variaciones significativas en la resistencia al esfuerzo de flexión, con valores más altos obtenidos para las mezclas con más cantidad de material vegetal.

Tabla 4.17. Cálculo del esfuerzo de ruptura a flexión de adobes patrimoniales de Tierra Caliente.

Muestra	L (cm)	b (cm)	h (cm)	F (kg)	σ_F (kg/cm ²)	CV (%)
H	12.00	4.33	4.42	21.74 ± 11.51	4.65 ± 2.48	53.33
SC	12.33	4.48	4.47	18.88 ± 9.22	3.85 ± 1.69	43.89

Revisando la literatura existente y los casos de estudio análogos, los valores obtenidos para los adobes de Tierra Caliente ofrecen resultados muy positivos. Por un lado, la revisión de Abhilash et al. (2022), consistente en ocho investigaciones de seis países ofrece un rango de valores entre 1.0 y 9.5 kg/cm², con la mayor variabilidad para los adobes de Chipre (Illampas et al., 2014), mientras que los antecedentes en México están más acotados [2.0-4.30 kg/cm²]



(Meli, 2005). Por ejemplo, la investigación de Adorni et al. (2013) con adobes arqueológicos obtuvo unos valores entre 1.30 y 4.90 kg/cm², más bajos en promedio que los ensayados en Tierra Caliente, pero por otro lado mucho más afectados por el paso del tiempo.

Haciendo una correlación entre los datos obtenidos con el ensayo de compresión simple, la Tabla 4.18 nos muestra el coeficiente de correspondencia entre los dos ensayos, dando un resultado semejante entre los dos casos de estudio, con una mínima diferencia del 12%. El material de H, más denso, presentó una mayor resistencia a compresión y a flexión, lo cual coincide con los principios lógicos de la construcción con tierra.

Tabla 4.18. Correlación de la resistencia a compresión uniaxial y el esfuerzo de ruptura a flexión de adobes patrimoniales de Tierra Caliente.

Muestra	ρ_{ap} (kg/m ³)	σ_{CSU} (kg/cm ²)	σ_F (kg/cm ²)	σ_{CSU}/σ_F
H	1724.16	10.48 ± 3.36	4.65 ± 2.48	2.25
SC	1609.09	9.71 ± 1.69	3.85 ± 1.69	2.52

La revisión de investigaciones de Alejandra Sánchez et al. (2022), muestra relaciones similares para análisis de adobes, con valores de resistencia a la flexión en un rango aproximado del 20-50% de la resistencia a compresión respecto a la revisión de trabajos efectuada. Además, se toman en consideración algunas de las normas de construcción, generalmente de mamposterías que aportan una expresión de cálculo que resulta ser muy conservativa respecto a la experimentación con los adobes, por lo que podemos corroborar como la relación obtenida en la investigación (del orden de la mitad) es completamente aceptable.

A continuación, en la Tabla 4.19 aparecen los valores de densidad aparente¹⁹³, VPU y módulo de elasticidad de los tres casos de estudio. Los valores de VPU en adobes de México, Portugal y Perú obtenidos de diversas investigaciones varían entre los 600 y 950 m/s (Aguilar et al., 2015; Silva et al., 2022). Los valores de H y SC fueron de 1075 y 1075 m/s respectivamente, por lo se le pueden considerar como adobes con una VPU alta. En cambio, JO presentó una VPU más baja y con un CV elevado, probablemente debido al daño estructural interno que sufrieron los bloques tras el impacto sísmico.

¹⁹³ La densidad aparente o densidad volumétrica es una propiedad que define la relación entre la masa de las muestras y su volumen, en este caso medido de forma directa.



Tabla 4.19. Densidad, velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad dinámico de los adobes ensayados.

Muestra	Densidad (kg/m ³)	VPU (m/s)	E _d (kg/cm ²)	CV(%)
JO	1282.64	682.18 ± 329.61	1483.48 ± 933.66	62.94
H	1724.16	1075.00 ± 122.09	4488.14 ± 1407.25	31.35
SC	1609.09	1094.67 ± 162.37	4299.83 ± 1025.50	23.85

En el caso de JO podemos comparar la disminución de la VPU con el aumento de la resistividad, mostrando una correlación lógica entre los dos parámetros que puede explicarse a partir de los deterioros sufridos por las estructuras de adobe durante los eventos sísmicos de 2017. Esta correlación resulta muy interesante, ya que es inversamente proporcional y también se puede trasladar al módulo de elasticidad o las resistencias mecánicas.

Otro de los principales aspectos que se observan de la experimentación es la relación directamente proporcional entre la densidad y el VPU y E_d; los estudios de Silva et al. (2015) corroboraron esta dependencia entre los dos primeros, mientras que Barnaure et al. (2022) obtuvieron densidades y módulos elásticos más bajos en las muestras que contenían mayor proporción de fibras vegetales. Como ya se comentó anteriormente, la baja densidad de las muestras de JO puede deberse al deterioro provocado por la afectación sísmica y la mayor cantidad de paja de varias de las muestras, que se detectó con la granulometría y composición de los adobes.

Por último, la Figura 4.55 muestra las curvas esfuerzo deformación generadas para cada cilindro de los adobes de H y SC, observando que SC logró los mayores valores de esfuerzo a la compresión llegando a los 15 kg/cm² para uno de los especímenes. No obstante, una de las muestras de SC presentó mucha menos resistencia, Ruiz Mendoza (2022) comenta al respecto: “el espécimen T-CII tuvo una deformación rápida y un menor esfuerzo a comparación de los otros. Este espécimen presentaba 2 fracturas horizontales antes de su ensaye, las cuales no atravesaban en su totalidad la sección transversal del espécimen, pudiendo ser esta la causa de dicha falla”.

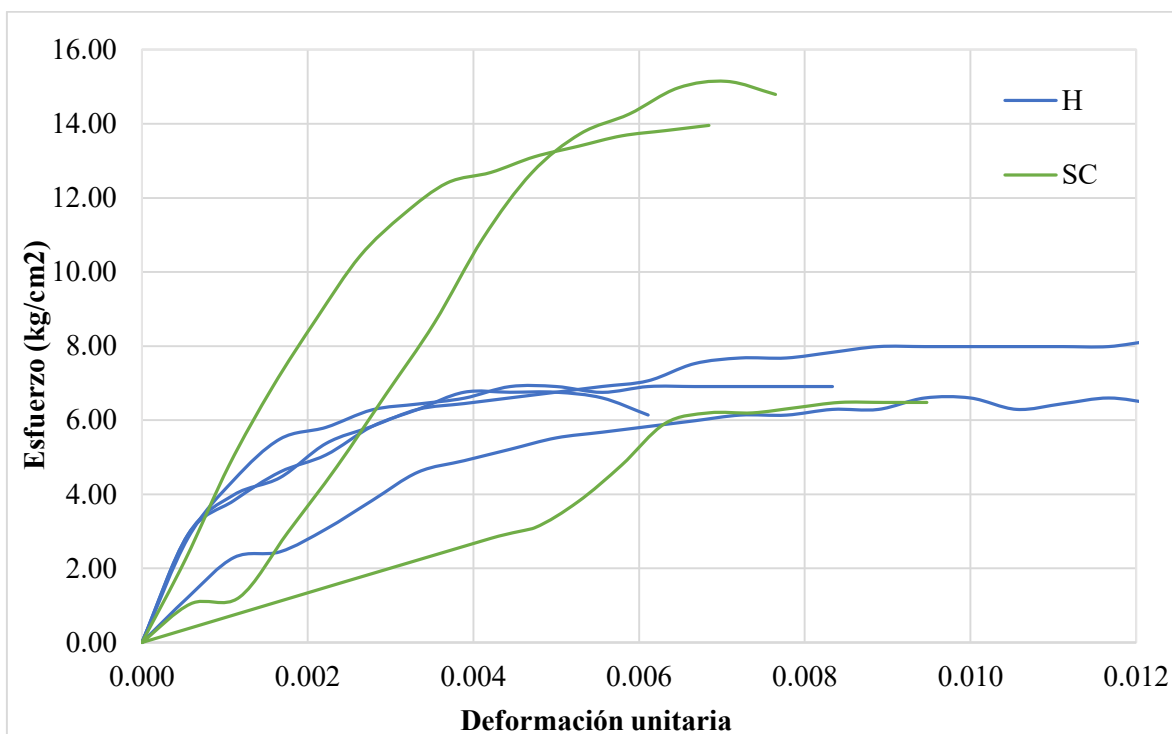


Figura 4.55. Gráfico de esfuerzo-deformación unitaria de adobes de Tierra Caliente.

A partir de los resultados del ensayo y las lecturas de los esfuerzos a compresión y las deformaciones pudo calcularse el módulo de elasticidad estático (E_s) de los adobes, que además puede ser comparado con el módulo de elasticidad dinámico obtenido con el ensayo de VPU (ver Tabla 4.20). Las muestras de H presentan un mayor E_s con menor variabilidad, pese a que resistieron una menor carga en promedio que los adobes de SC. Resulta interesante que en este caso H presentara las menores resistencias, en comparación a los ensayos de compresión simple, flexión directa y prueba triaxial donde mostró valores ligeramente superiores a H.

Tabla 4.20. Resultados del esfuerzo máximo a compresión y módulo de elasticidad estático de los adobes de Tierra Caliente.

Muestra	Densidad (kg/m^3)	σ_{Max} (kg/cm^2)	E_s (kg/cm^2)	CV (%)
H	1724.16	7.21 ± 0.93	4112.22 ± 1461.00	35.53
SC	1609.09	11.86 ± 4.70	3781.46 ± 1975.72	50.93

Adicionalmente, los dos módulos de deformación, E_d y E_s pueden ser comparados a partir de los resultados obtenidos en los dos ensayos efectuados (ver Tabla 4.21). Los coeficientes obtenidos son 1.09 para H y 1.14 para SC, presentando valores cercanos y que coinciden con



la literatura existente; Aragón Torre (2015) expone que varios autores han efectuado propuestas de relación lineal a partir de la experimentación, mayormente para la caracterización del concreto. La relación encontrada para los adobes resulta muy similar a la ecuación presentada por Lu et al. (2013): $E_d = 1.15E_s$.

Tabla 4.21. Relación entre módulos de deformación de adobes de Tierra Caliente.

Muestra	E_d (kg/cm ²)	E_s (kg/cm ²)	E_d/E_s
H	4488.14 ± 1407.25	4112.22 ± 1461.00	1.09
SC	4299.83 ± 1025.50	3781.46 ± 1975.72	1.14

4.3.3. Caracterización de la durabilidad frente al agua

El último de los parámetros que nos interesa conocer de los adobes es su comportamiento frente al agua y durabilidad. La Figura 4.56 muestra las curvas de absorción capilar de los adobes de H y SC, señalando la mayor capacidad de ganar humedad de los primeros, que puede relacionarse con la mayor proporción de material fino y arcillas del caso de estudio.

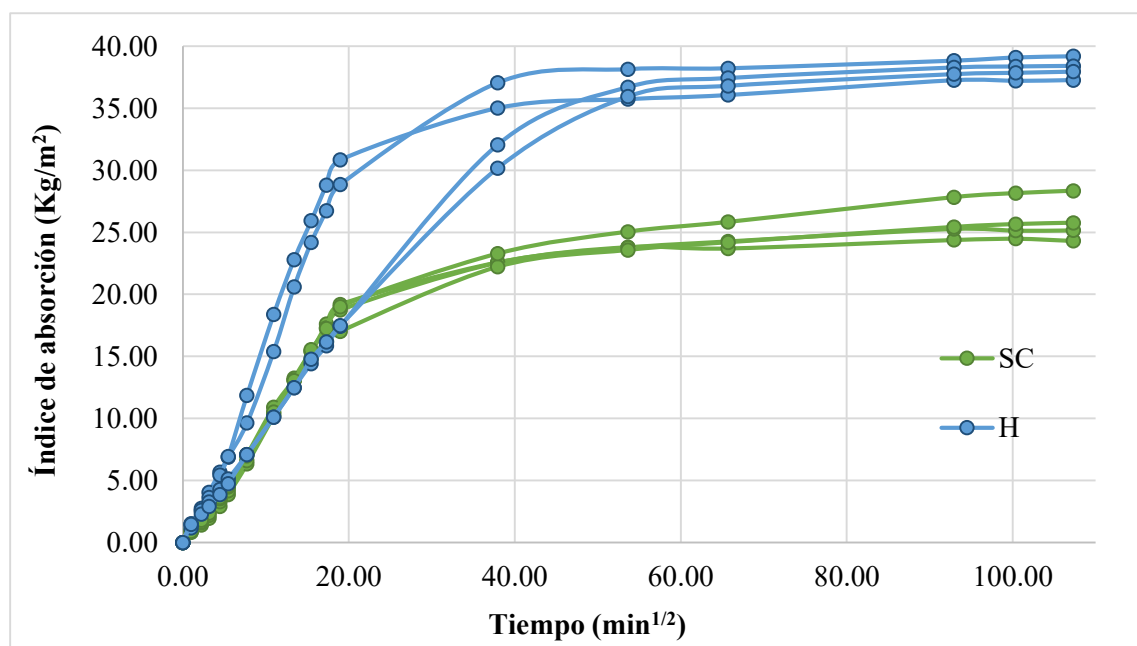


Figura 4.56. Curvas de absorción capilar de los adobes de Tierra Caliente.

Puede observarse un claro punto de inflexión en todas las curvas de absorción, lo que nos indica que a partir de ese momento los cubos ya han alcanzado su nivel de saturación y la tasa de absorción inicial pasa a ser una tasa de absorción secundaria, mucho más lenta y en



la que intervienen los procesos de evaporación del agua ganada. Un hecho que llama la atención es que dos especímenes de H muestran un comportamiento claramente diferenciado de los otros dos, que Ruiz-Mendoza (2022) relacionó con el contenido de fibras vegetales.

La tabla 4.22 arroja los valores del coeficiente de absorción capilar (C_{ABS}) que es el parámetro de mayor interés para comprobar el comportamiento de los adobes ante el agua, junto con el CV, la tasa o pendiente de absorción inicial ($T_{ABS.I}$) y la tasa o pendiente de absorción secundaria ($T_{ABS.S}$). Las muestras de SC presentaron un menor C_{ABS} , $T_{ABS.I}$ y $T_{ABS.S}$, lo que indica que los adobes de esta localidad responden mejor a los problemas de humedad por capilaridad y al contacto con el agua en general. Por otro lado, el CV de H fue más alto, lo que Ruiz Mendoza (2022) identifica con la existencia de dos tipos de adobe que presentan valores de absorción distintos; también pudo correlacionarse una menor absorción de aquellos especímenes que contenían mayor proporción de paja.

Tabla 4.22. Coeficiente de absorción capilar de los adobes de Tierra Caliente.

Muestra	Densidad	C_{ABS} ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)	CV (%)	$T_{ABS.I}$	$T_{ABS.S}$
H	1724.16	1.20 ± 0.25	20.81	1.0263	0.0453
SC	1609.09	0.88 ± 0.04	4.55	1.2906	0.0562



CONCLUSIONES

Así como en los demás capítulos se han propuesto distintos alcances y estrategias para lograr la conservación y adecuación de este sistema constructivo, en el presente la caracterización en el laboratorio es el medio para lograrlo. Los actuales desafíos de la arquitectura de tierra en México son muchos, principalmente porque estos sistemas resultan inexorablemente asociados al fenómeno del autoconstrucción, conllevando un conjunto de situaciones y una falta de regulación que generan un desconocimiento que dificulta las intervenciones en estos inmuebles.

Uno de los principales objetivos del capítulo pasaba por efectuar ensayos y métodos de caracterización en los adobes debido a los escasos estudios especializados que se han realizado en el país. Para poder tener instrumentos reales en la toma de decisiones y garantizar la preservación y conservación de la arquitectura de tierra es necesario un mayor rigor científico y entendimiento de estos sistemas. Por ello, la propuesta metodológica que se presenta, y que permite conocer las propiedades físico-químicas, mecánicas y de resistencia al agua de estos materiales supone un avance en esta línea de investigación, que como se ha expuesto durante todo el documento todavía cuenta con un largo recorrido.

Por otro lado, uno de los objetivos secundarios era realizar esta caracterización en materiales de tierra afectados por eventos sísmicos u otros desastres naturales, tomando en cuenta toda la situación referente a la vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe que se describió en los anteriores capítulos. Varios de los métodos de ensayo demostraron la idoneidad de su aplicación mediante la discusión de los resultados y la comparación con otras investigaciones; además de la posibilidad de aplicar técnicas de caracterización *in situ*, puede ser de gran utilidad para estos casos en los que la estabilidad estructural queda comprometida y es necesario obtener información lo más pronto posible.

En la Tabla 4.23 puede observarse el resumen de todo el proceso de experimentación con los adobes en el laboratorio de materiales, presentando los valores promedio de los bloques de JO, H y SC. A primera vista resalta la diferencia de resultados entre JO y las muestras de Tierra Caliente, obteniendo las dos últimas valores similares en la mayoría de ensayos. Esto confirma la hipótesis planteada de que la afectación sísmica compromete las propiedades



mecánicas de los bloques, pero también las físicas como se demuestra con el incremento de la resistividad eléctrica y la pérdida de la densidad aparente.

Tabla 4.23. Resumen de propiedades de los adobes a partir de la caracterización.

Muestra	JO	H	SC
Densidad aparente (kg/m ³)	1282.64	1724.16	1609.09
Humedad relativa (%)	3.37	6.37	2.69
Resistividad eléctrica (Ω·m)	1637.14 ± 777.76	22.94 ± 1.24	24.44 ± 3.38
Porcentaje de material fino	30.03 ± 7.90	89.2 ± 1.46	44.67 ± 3.88
Porcentaje de fibras vegetales (%)	0.60 ± 0.60	0.32 ± 0.07	0.00 ± 0.00
Clasificación SUCS	SC	ML	SC-SC
Potencial de hidrógeno	7.6	5.5	6.0
Resistencia a compresión (kg/cm ²)	7.26 ± 3.28	10.48 ± 3.36	9.71 ± 1.69
Resistencia point-load (kg/cm ²)	5.58 ± 5.82	25.14 ± 11.72	20.50 ± 9.61
Tensión máxima al corte (kg/cm ²)	-	$\sigma' \times \tan(54) + 1.53$	$\sigma' \times \tan(60) + 0.83$
Resistencia a flexión (kg/cm ²)	-	4.65 ± 2.48	3.85 ± 1.69
Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm ²)	1483.48 ± 933.66	4488.14 ± 1407.25	4299.83 ± 1025.50
Módulo de elasticidad estático (kg/cm ²)	-	4112.22 ± 1461.00	3781.46 ± 1975.72
Coefficiente de absorción capilar (Kg/m ² ·min ^{1/2})	-	1.20 ± 0.25	0.88 ± 0.04

Uno de los aspectos más positivos de la investigación fue poder apreciar a partir de la caracterización la diversidad y riqueza de la arquitectura vernácula de tierra, al encontrar diferencias notables en la granulometría de los especímenes. Pese a las composiciones totalmente distintas de H, con un porcentaje altísimo de finos y fibras vegetales; y las de SC, más similares a las encontradas en otros trabajos de referencia, pero sin adiciones de fibras, el comportamiento mecánico de los dos casos de estudio fue muy parecido. Esto demuestra la adaptación de la arquitectura vernácula al medio geográfico (ver Figura 4.57), permitiendo lograr soluciones constructivas simples, eficientes y durables a partir de los recursos disponibles.

Otro de los aspectos a resaltar de la experimentación es el buen desempeño de muchos de los ensayos realizados para los adobes de H y SC, que permitieron una mayor facilidad de aplicación de las pruebas en el laboratorio. Algunos de los ensayos realizados cuentan con muy pocos antecedentes de aplicación nivel global, como la resistividad eléctrica, la medición del potencial de hidrógeno, la obtención de la tensión tangencial para adobes o la prueba point-load, por lo que sientan un precedente muy valioso.



Figura 4.57. Construcción de adobe en Santa Cruz de Morelos, Michoacán, México y la adaptación a un entorno extremadamente cálido y seco. Fotografía: (A. Solís-Sánchez, 2021).

De los resultados generales se observa un menor desempeño de JO para la mayoría de parámetros analizados. Una de las razones sería la influencia de los eventos dinámicos previos en el comportamiento posterior del material, es decir los sismos provocaron deterioro. Un aspecto muy interesante es que para algunos especímenes este grado de deterioro era evidente, pero otras piezas no presentaban daños visibles; empero, los ensayos no destructivos como la VPU o la resistividad eléctrica arrojaron valores que demostraban el deterioro interno y discontinuidad de los adobes.

En el ámbito de los ensayos no destructivos, estas pruebas resultan muy interesantes por su repetibilidad y su carácter no invasivas, arrojando información que determine si realizar o no ensayos destructivos. Además, la posibilidad de realizarse en campo puede ayudar a detectar irregularidades en el material que no pueden ser aparentes en primera instancia, lo que puede ayudar a gestionar políticas públicas que orienten la toma de decisiones en casos específicos como sismos u otros desastres naturales.

Los ensayos de VPU cuentan con un historial de aplicación reciente, por lo que todavía es necesaria una mayor exploración y este puede ser un nicho de oportunidad para entender mejor las propiedades de materiales como los adobes. En este sentido, la aplicación de ultrasonidos puede ayudar a encontrar valores más fiables del coeficiente de Poisson, que no



cuenta con una definición clara en la literatura. Otro posible alcance sería el uso de las tomografías ultrasónicas para determinar el estado de conservación de elementos históricos o de gran valor patrimonial, aunque las muestras deberían ser representativas del conjunto y tratadas para poder ser sumergidas en agua.

Otro de los métodos de ensayo que pueden incorporarse gradualmente en la caracterización de materiales de tierra es la prueba de carga puntual, que permite el análisis de fragmentos incompletos como los hallados en JJ. Esta es una gran ventaja para las investigaciones en las que no se puede tener acceso al sistema constructivo original, o bien éste ha sido alterado por causas externas. Sin embargo, se recomienda establecer estudios comparativos con otras pruebas de resistencia mecánica siempre que sea posible para lograr correlacionar los valores y tener una visión más completa del comportamiento de la mampostería, ya que por el momento los resultados logrados no han sido concluyentes y debe explorarse una posible ecuación de correlación como por ejemplo las que estipulan las normas entre resistencia a compresión y flexión o tensión.

Precisamente este es uno de los puntos a desarrollar y posible línea de investigación a cubrir en la arquitectura de tierra: el análisis y caracterización mediante técnicas *in situ*. Son pocos los antecedentes, más relacionados con el estudio de sitios arqueológicos (Adorni et al., 2013); sin embargo, las mismas herramientas pueden ser empleadas para el estudio del patrimonio cultural o casos parecidos al de JJ, en los que las construcciones se encuentran en estado crítico debido a fenómenos naturales o antrópicos.

Respecto a futuras líneas de investigación y desarrollo, la metodología de caracterización presentada podría ampliarse con la inclusión de pruebas térmicas. En el capítulo III del documento se pudo documentar y catalogar la arquitectura tradicional de tierra de localidades con climas y condiciones geográficas muy distintos, que demuestran la interesante adaptación de estos sistemas y el buen desempeño en el confort térmico de las viviendas. También suele destacarse el excelente comportamiento acústico del adobe y la tapia, por lo que seguir expandiendo los métodos de ensayo y ampliar la discusión es uno de los propósitos más razonables.

Otro de los aspectos a reforzar es el análisis de las fibras vegetales y otros aditivos contenidos en los adobes, que generalmente son ignorados o únicamente se estudian desde su aporte a



las capacidades mecánicas de los bloques, cuando su afectación en la absorción de agua y durabilidad de los sistemas es igual de importante. En este sentido apenas existen trabajos sobre la caracterización química de estos estabilizantes, por lo que debería ser uno de los parámetros a seguir investigando en los próximos años.

Por último, estas investigaciones pueden ser un apoyo válido para la creación de normas, lineamientos o manuales de construcción con tierra en México, donde todavía existen grandes limitaciones y la población local no cuenta con estos instrumentos. Este desconocimiento de nuestros propios materiales tradicionales tiene como efecto la dificultad para reglar y normalizar las edificaciones de tierra. Con un mayor esfuerzo y gestión de recursos en investigaciones de caracterización de materiales tradicionales podrá plantearse la creación de estos primeros códigos a nivel nacional.





Quienes lo hicieron no lo hicieron pensando en nosotros y, sin embargo, nos permite aprender, disfrutar, reproducir... todas las técnicas y materiales que ellos usaron. Tenemos el deber moral, ético, social, económico incluso, de preservar este patrimonio vernáculo.

Elia Alonso

CONCLUSIONES GENERALES

Con el desarrollo del documento y sus cuatro capítulos se han mostrado los resultados de la investigación, su interpretación y la contribución de esta interesante discusión al conocimiento científico de la arquitectura de tierra. Además de los objetivos específicos, la investigación tenía un cometido general mucho más franco y sencillo, que es contribuir a aumentar los conocimientos sobre la arquitectura de tierra. El enfoque no debe entenderse como un descubrimiento o una invención, sino como una recuperación de la sapiencia tradicional y todos aquellos aspectos que pueden ser rescatados y aplicados en el estado actual del patrimonio y la edificación.

Cada una de las actividades, técnicas, métodos de análisis y disciplinas empleadas en la investigación contó con una razón de ser y su uso comparado es el que aporta mayor riqueza a la discusión. Pese a que el nexo de unión y las problemáticas eran y son comunes en nuestra sociedad moderna, el enfoque y la forma de responder a las preguntas de investigación tomó cuatro caminos distintos, asociados a cada uno de los capítulos de la tesis.



El análisis efectuado desde el territorio permitió entender las dinámicas de transformación del paisaje mediante la acción arquitectónica y la adaptación al entorno inmediato del ser humano. De este modo se pudieron comprender igualmente las situaciones y condicionantes que han llevado a la situación actual del abandono y desaparición de la construcción con tierra en México. En este mismo sentido fueron de gran importancia los testimonios obtenidos a partir de la entrevista oral y la realización de contenido audiovisual, al tomar en cuenta las opiniones más importantes de todas que lamentablemente suelen despreciarse o ignorarse (ver Figura C.1).



Figura C.1. Entrevista a pobladores de Ihuatzio, Michoacán, México (Sánchez, 2021).

Con la metodología de caracterización tecnológica y constructiva pudo lograrse este entendimiento de los modos de construir tradicionales, pudiendo diferenciar la técnica constructiva y sus variantes en los distintos casos de estudio, poniendo en valor las distintas soluciones tan ingeniosas según el entorno natural tan variable. Las encuestas a los estudiantes pudieron corroborar las problemáticas analizadas sobre el desconocimiento de la arquitectura de tierra en sectores académicos tan vinculados a la construcción y edificación, mostrando que el recorrido necesario para revertir esta situación aún es largo pero la mayoría de intenciones son buenas.



Adicionalmente, los procesos de levantamiento arquitectónico, entrevistas orales y ejecución de contenido audiovisual ayudaron a completar una perspectiva holística de las problemáticas existentes que es muy difícil de explicar para cualquiera ajeno al proyecto. El contacto y convivencia con los usuarios de las viviendas fue una de las partes más positivas de toda la investigación (ver Figura C.2), aportando además un conocimiento local que debe ser documentado antes de que desaparezca.



Figura C.2. en Charapan, Michoacán, México. Fotografía: (J. D. Machorro-Santacruz, 2021).

Siguiendo con la aplicación de los distintos MEVS, dejando de lado los valores cuantitativos como los índices de vulnerabilidad o aceleraciones sísmicas, el valor del trabajo realizado reside en contar con estas herramientas de análisis y poder mitigar los riesgos de estas comunidades a partir de la toma de decisiones. No obstante, los eventos sísmicos que sufre México con periodicidad dejan clara la urgencia de seguir destinando esfuerzos y proyectos de intervención en esta línea del conocimiento.

Por último, los resultados de la caracterización en el laboratorio fueron sumamente significativos, ya que permitieron responder a las preguntas de investigación pertinentes y cumplir los objetivos marcados. La metodología otorgó resultados satisfactorios debido a la alta correlación obtenida en muchos de los ensayos, además de la aplicación de pruebas que no son comunes en estos materiales pero que lograron una correcta aplicación. Por otro lado,



la comparación entre las muestras de Jojutla y el resto de casos de estudio permitió entrever el efecto de los sismos en las propiedades físico-mecánicas de los adobes, encontrando ciertos patrones entre los ensayos no destructivos y los de resistencia mecánica.

Dejando de lado los resultados obtenidos y la validez o refutación de los mismos, toda la labor desarrollada no debe quedar en un simple esfuerzo individual, sino que a partir del tan importante trabajo de difusión y divulgación se busca causar interés en los futuros estudiantes, investigadores y profesionales del sector de la construcción. En este aspecto, se ha realizado un gran esfuerzo por concienciar y compartir los resultados de la investigación, buscando nuevos modos de difusión además de los tradicionales.

Las publicaciones son el medio más común para lograr este cometido, y a lo largo del proceso doctoral se consiguió documentar la investigación en varios artículos, tanto en español como en inglés buscando llegar a distintos públicos. En este mismo sentido, la participación en ciertos eventos especializados como los congresos SIACOT 2019 y 2022 permitió difundir los avances dentro del sector más afín. No obstante, también se participó en otro tipo de actividades más cercanas a la divulgación científica y con un público más joven, gracias a la labor del Laboratorio de Materiales y a la vinculación con otras instituciones como el Instituto Tecnológico de Zacatepec o la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona.

No puede dejar de mencionarse el documental *Xirangua* por su forma de trasladar las problemáticas de la arquitectura vernácula a plataformas de libre acceso al público general, aportando nuevas formas de hacer divulgación científica que no habían sido exploradas por el grupo de trabajo. Debe destacarse que los comentarios recibidos por el público han sido muy positivos, especialmente en los residentes de Michoacán quienes en muchas ocasiones se han sentido identificados con las situaciones expuestas y nos han expresado su emoción y felicitación por el proyecto. Adicionalmente, *Xirangua* ha funcionado como una plataforma de contacto, logrando la invitación a presentar, proyectar el documental y participar en mesas de debate en varias instituciones, logrando visibilizar y revalorizar el patrimonio de Michoacán.

Por otro lado, la vinculación con otras instituciones al nivel nacional e internacional ha sido totalmente satisfactoria, propiciando la participación en congresos, jornadas académicas,



proyectos de investigación de incidencia, proyectos de cooperación al desarrollo y firma de convenios marco entre otras actividades. Además, las estancias de investigación realizadas permitieron estrechar lazos con las instituciones de contraparte y colaborar en la difusión de la investigación, al contemplar objetivos secundarios como la participación en congresos, conferencias y actividades de divulgación.

Finalmente, uno de los alcances más importantes que el proyecto ha podido generar precisamente a partir de la vinculación fue el proyecto de cooperación al desarrollo “Diagnosi de construccions tradicionals i proposta d’intervenció sobre revestiments de terra amb gel d’origen vegetal (GOV)¹⁹⁴”, en colaboración con la EPSEB-UPC y el Grupo de Vivienda Ecotecnológica Básica de la UNAM; con el objetivo de realizar tanto actividades académicas dentro del marco del veranos de la investigación como la intervención directa en viviendas de adobe de Santa Ana Chapitiro, en Michoacán.

La cooperación al desarrollo pasaba por la ejecución de revestimientos de tierra mejorados con geles de origen vegetal (almidón de arroz y mucílago de nopal) en viviendas de la comunidad para mejorar su respuesta a los agentes atmosféricos y mejorar el confort térmico de las edificaciones. Adicionalmente, con la ayuda de los usuarios poder lograr una transferencia de conocimiento debido a la disponibilidad del nopal en la región y a ser una técnica tradicional que conocen con una mejora de las propiedades.

Además, este proyecto permitió “mancharnos las manos” en el sentido literal al trabajar directamente los revestimientos de tierra con medios manuales (ver Figura C.3), obteniendo una nueva perspectiva más real de la construcción con tierra. Por otro lado, supuso una gran satisfacción poder aterrizar gran parte del trabajo de vinculación, cooperación y caracterización en el laboratorio en acciones tan directas y con un impacto tan inmediato.

¹⁹⁴ Diagnosi de construccions tradicionals y propuesta de intervención sobre revestimientos de tierra con geles de origen vegetal (GOV).

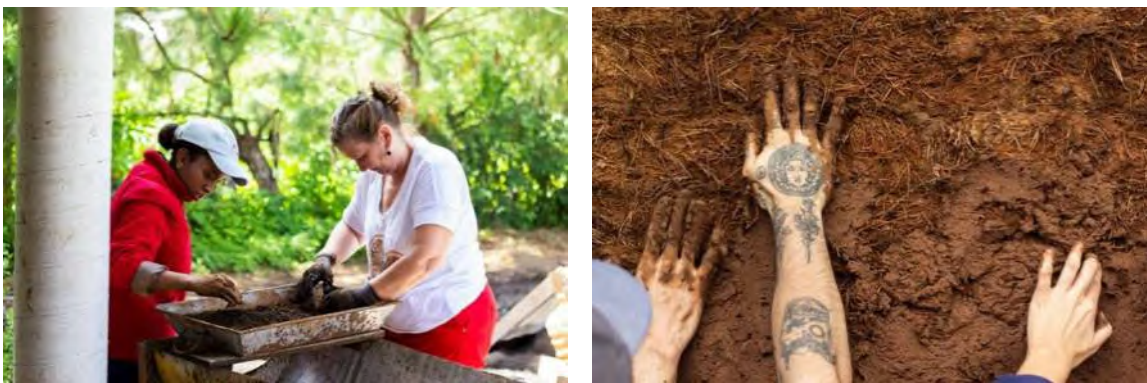


Figura C.3. Diseño y aplicación de revestimientos de tierra mejorada con geles de origen vegetal en la comunidad de Santa Ana Chapitiro, Michoacán, México. Fotografías: (A. Solís-Sánchez, 2022).

En conclusión, se espera que el presente documento pueda contribuir favorablemente al conocimiento y a la conservación y preservación de la arquitectura de tierra. Varios de los resultados y las estrategias presentadas pueden servir como guía metodológica o tener un uso correlacional en futuras investigaciones que exploren aspectos análogos o similares. Por otro lado, este es un punto de partida del que se espera reconocer y apostar por futuras líneas de investigación

En muchos de los aspectos analizados en el documento, como la evaluación de la vulnerabilidad sísmica o la caracterización y normatividad en el laboratorio se identificaron carencias y nichos de oportunidad en los que es necesario retomar el trabajo para lograr mejores y más completos resultados. Este es irónicamente el mismo desarrollo que se espera de la arquitectura de tierra, que parece recobrar su presencia progresivamente y de la que se confía que será uno de los pilares de nuestras próximas formas de habitar el territorio.



BIBLIOGRAFÍA

- Abhilash, H. N., Hamard, E., Beckett, C. T., Morel, J.-C., Varum, H., Silveira, D., . . . Illampas, R. (2022). Chapter 4. Mechanical Behaviour of Earth Building Materials. In A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, & B. V. Venkatarama Reddy (Eds.), *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials* (pp. 127-180). Springer. doi:DOI: 10.1007/978-3-030-83297-1_4
- Abhilash, H. N., Hamard, E., Beckett, C. T., Morel, J.-C., Varum, H., Silveira, D., . . . Illampas, R. (2022). Chapter 4. Mechanical Behaviour of Earth Building Materials. In A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, & B. V. Venkatarama Reddy (Eds.), *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials* (pp. 127-180). Springer. doi:DOI: 10.1007/978-3-030-83297-1_4
- Adorni, E., Coisson, E., & Ferretti, D. (2013). In situ characterization of archaeological adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 40, 1-9. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.004
- Aguilar Carbone, J., González Herrera, R., Ruiz Sibaja, A., & Cruz Díaz, R. (2008). Análisis de vulnerabilidad de las construcciones del centro histórico de Tapachula y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. Veracruz, México.
- Aguilar, R., Saucedo, C., Montesinos, M., Ramírez, E., Morales, R., & Uceda, S. (2015). Caracterización mecánica de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido. *Tierra, sociedad, comunidad: 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 28-39). Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Aguilar, R., Saucedo, C., Montesinos, M., Ramírez, E., Morales, R., & Uceda, S. (9-13 noviembre 2015). Caracterización mecánica de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido. *Tierra, sociedad, comunidad: 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (págs. 28-39). Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Sanchez-Calvillo, A., Chavez-Garcia, H. L., & Ruvalcaba-Sil, J. L. (2022). Propiedades mecánicas estáticas y dinámicas de arcillas estabilizadas. *20° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra: revive la tierra* (págs. 133-142). Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador.
- Alsadik, B. (2020). Crowdsourced Drone Imagery – A Powerful Source for the 3D Documentation of Cultural Heritage at Risk. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1853851



- Altschuler, B. (2013). Territorio y desarrollo: aportes de la geografía y otras disciplinas para repensarlos. *Theomai*(27-28), 64-79. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12429901005>
- Aragón Torre, G. (2015). *Determinación del módulo de deformación dinámico de un mortero de revestimiento a partir de muestras obtenidas en laboratorio e in situ (Tesis Doctoral en Ingeniería Civil e Industrial)*. Burgos: Universidad de Burgos, Escuela Técnica Superior.
- Araya-Letelier, G., Antico, F. C., Burbano-García, C., Concha-Riedel, J., Norambuena-Contreras, J., Concha, J., & Saavedra Flores, E. I. (2021). Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers. *Construction and Building Materials*, 276(122127). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>
- Araya-Letelier, G., Gonzalez-Calderon, H., Kunze, S., Burbano-Garcia, C., Reidel, U., Sandoval, C., & Bas, F. (2020). Waste-based natural fiber reinforcement of adobe mixtures: Physical, mechanical, damage and durability performance assessment. *Journal of Cleaner Production*, 273(122806). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122806>
- Arroyo Matus, R., Sánchez Tizapa, S., & Catalán Quiroz, P. (Septiembre-diciembre de 2013). Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México. *Ingeniería*, 17(3), 167-177.
- Arroyo Matus, R., Sánchez Tizapa, S., & Catalán Quiroz, P. (2013, Septiembre-diciembre). Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México. *Ingeniería*, 17(3), 167-177.
- ASTM International. (2008). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*. USA: ASTM.
- ASTM International. (2012). *ASTM G57-06(2012) Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. West Conshohocken, PA. doi:10.1520/G0057-06R12
- ASTM International. (2013). *ASTM C42/C42M-13, Standard Test Method For Obtaining And Testing Drilled Cores And Sawed Beams Of Concrete*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2015). *ASTM C106-36, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA. doi:10.1520/C0136-06
- ASTM International. (2016). *ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2016). *ASTM D5731-16, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*. West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D5731-16



- ASTM International. (2019). *ASTM D6276-19, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization*. West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D6276-19
- Aubert, J. E., Fabbri, A., Morel, J. C., & Maillard, P. (2013). An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa! *Construction and Building Materials*, 47, 366–369. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068
- Ayala Ortega, L. A. (2019). *Arquitectura doméstica tradicional de Tierra Caliente, Michoacán. Caracuaro, un caso de estudio (Tesis de Maestría en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y Monumentos)*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Ayala-Ortega, L. A., & Azevedo-Salomao, E. M. (2019). Vivienda tradicional de Tierra Caliente: un estudio de caso regional michoacano. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 14(26), 97-114. doi:https://doi.org/10.36677/legado.v14i26.14461
- Azevedo Salomao, E. M. (2008). Reflexiones en torno a la habitabilidad del espacio. En B. Paredes Guerrero, *Memoria IV: anuario de investigación sobre conservación, historia y crítica del patrimonio arquitectónico y urbano: lecturas y estrategias de la conservación del patrimonio tangible e intangible* (Vol. IV, págs. 18-21). Mérida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Azevedo Salomao, E. M. (2011). Habitar y habitabilidad. En G. Salazar González, E. M. Azevedo Salomao, C. R. Ettinger Mc Enulty, B. Paredes Guerrero, & L. A. Torres Garibay, *Lecturas del Espacio Habitable* (págs. 57-78). San Luis Potosí, S.L.P., México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Barnaure, M., Bonnet, S., & Poullain, P. (2021). Earth buildings with local materials: Assessing the variability of properties measured using non-destructive methods. *Construction and Building Materials*, 281(122613). doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122613
- Beckett, C. S., Jaquin, P. A., & Morel, J.-C. (2020). Weathering the storm: A framework to assess the resistance of earthen structures to water damage. *Construction and Building Materials*, 242(118098). doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118098
- Beckett, C. S., Jaquin, P. A., & Morel, J.-C. (2020). Weathering the storm: A framework to assess the resistance of earthen structures to water damage. *Construction and Building Materials*, 242(118098). doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118098
- Bedolla Arroyo, E. (2019). *La tradición constructiva, su transformación y permanencia en la memoria colectiva. Región purépecha, Michoacán (Tesis de Doctorado en Arquitectura)*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Arquitectura.
- Bedolla Arroyo, J. A., Alonso Guzmán, E. M., Martínez Molina, W., López Tinajero, J., & Lara Gómez, C. (2011). La troje michoacana, una herencia constructiva purhépecha.



- II Congreso Iberoamericano y X Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio".* La Plata, Argentina: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT).
- Ben Mansour, M., Jelidi, A., Soukaina Cherif, A., & Ben Jabrallah, S. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104(1), 44-51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- Ben Mansour, M., Jelidi, A., Soukaina Cherif, A., & Ben Jabrallah, S. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104(1), 44-51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- Benedetti, D., & Petrini, V. (1984). On seismic vulnerability of masonry buildings: Proposal of an evaluation procedure. *L'Industria Delle Costruzioni*, 18(1), 66-78.
- Benedetti, D., Benzoni, G., & Parisi, M. A. (1988). Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 183-201.
- Bernárdez-Vilaboa, R. (2020). The Implication of Vision and Colour in Cultural Heritage. *Heritage*, 3, 1063-1068. doi:[doi:10.3390/heritage3040058](https://doi.org/10.3390/heritage3040058)
- Berns, R. S. (2019). *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, Fourth Edition*. John Wiley & Sons Inc. doi:[doi:10.1002/9781119367314](https://doi.org/10.1002/9781119367314)
- Blondet, M. (2011). Mitigation of Seismic Risk on Earthen Buildings. En H. Gökçekus, U. Türker, & J. W. LaMoreaux, *Survival and Sustainability. Environmental Concerns in the 21st Century* (págs. 391-400). Berlín: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-540-95991-5>
- Blondet, M., Vargas, J., & Tarque, N. (2008). Behaviour of earthen structures during the Pisco earthquake of August 15, 2007. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Blondet, M., Vargas, J., & Tarque, N. (2008). Low-cost reinforcement of earthen houses in seismic areas. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Blondet, M., Vargas, J., Patron, P., Stanojevich, M., & Rubiños, A. (2008). A human development approach for the construction of safe and healthy adobe houses in seismic areas. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., & Iwaki, C. (2011, Julio-Septiembre). Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523), 41-50. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/ic>



- Bocanegra-Torres, J. I., Muñiz-Jauregui, J. A., Núñez-Guzmán, E. A., Sánchez-Calvillo, A., Navarro-Mendoza, E. G., Lara-Gómez, C., . . . Gómez-Romero, L. (2018). Obtención de la Resistencia al Corte de Suelos de Angangueo, Michoacán Mediante la Prueba Triaxial No Consolidada No Drenada (U.U). En E. A. Aguilar, E. Bedolla, & C. A. León (Ed.), *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*. 15, págs. 716-723. Morelia, México: Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH.
- Bohigas, O. (1963). *Barcelona, entre el Pla Cerdà i el barraquisme*. Barcelona: Edicions 62.
- Boned Purkiss, J., López Rivera, J., Ventura Blanch, F., & Yeregui Tejedor, J. (2017). Fundamentos de Fotografía y Arquitectura. *I Congreso Internacional sobre Fotografía: Nuevas propuestas en Investigación y Docencia de la Fotografía* (pp. 652-661). Valencia: Universitat Politècnica de Valencia. doi:<http://dx.doi.org/10.4995/CIFo17.2017.7128>
- Bonfil Batalla, G. (2004). Pensar nuestra cultura. En D. G. Indígenas, *Antología sobre cultura popular e indígena. Lecturas del Seminario Diálogos en la Acción Primera Etapa* (págs. 117-134). México: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. Dirección General de Culturas Populares e Indígenas.
- Bramerini, F., Di Pasquale, G., Orsini, A., Pugliese, A., Romeo, R., & Sabetta, F. (1995). *Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari. Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale*. Roma: SSN.
- Brando , G., Cocco, G., Mazzanti, C., Peruch, M., Spacone, E., Alfaro, C., . . . Tarque, N. (2019). Structural Survey and Empirical Seismic Vulnerability Assessment of Dwellings in the Historical Centre of Cusco, Peru. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1685022
- Briseño Guerrero, J., & De Gortari Krauss, L. (1987). *De la cama a la calle: sismos y organización popular* (Primera edición: 1987 ed., Vol. Cuadernos de la Casa Chata 156). Tlalpan, México D.F.: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.
- British Standards Institution. (2022). *BS EN 12372:2022 Natural stone test methods. Determination of flexural strength under concentrated load*. British Standards Institution.
- Broch, E., & Franklin, J. A. (November de 1972). The point-load strenght test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(Issue 6), 669-676. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0148906272900307>
- Bühler, D. (1990). *La documentación de arquitectura histórica*. Puebla: Universidad de las Américas.



- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., & Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43(3), 75-104.
- Calvo, H. Z., & Gómez Barranco, H. (Edits.). (2015). *La vivienda y el hábitat sustentable del sur-sureste de México*. Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca.
- Campos Goenaga, M. I. (23 de Septiembre de 2018). 365 días después ¿Qué hemos hecho? ¿Dónde estamos? ¿Cuánto falta? *El Tlacuache. Órgano de difusión de la comunidad del INAH Morelos*(848), 31-34.
- Campos Goenaga, M. I. (17 de Septiembre de 2018). Las dimensiones del sismo, un año después. *El Tlacuache. Órgano de difusión de la comunidad del INAH Morelos*(847), 31-34.
- Capitel, A. (1988). *Metamorfosis de monumentos y teorías de la restauración*. Madrid: Alianza Forma.
- Carreira, I., Cardoso, I. P., & Faria, P. (2021). Earth mortars stabilization: A review. *Conservar Património*, 37, 35-43. doi:<https://doi.org/10.14568/cp2019043>
- Casanova-González, E., Miaynez-Rojas, M. Á., Mitrani, A., Rangel-Chávez, I., García-Bucio, M. A., Ruvalcaba-Sil, J. L., & Muñoz-Alcócer, K. (2020). An imaging and spectroscopic methodology for in situ analysis of ceiling and wall decorations in Colonial missions in Northern Mexico from XVII to XVIII centuries. *Heritage Science*, 8(91). doi:<https://doi.org/10.1186/s40494-020-00434-8>
- Castro Barrera, M. d., Benavides, Y. J., Baglioni, P., & Giorgi, R. (2013). Nanotectonología aplicada a la consolidación de pinturas murales. Nanopartículas de hidróxido de calcio, Ca(OH)₂. In L. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La cal. Historia, propiedades y usos* (pp. 233-156). Coyoacán, México: Universidad Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Catalán Quiroz, P., Moreno-Martínez, J. I., Galván, A., & Arroyo Matus, R. (2019). Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos de laboratorio. *Acta Universitaria*, 29. doi:<http://doi.org/10.15174/au.2019.1861>
- Catalan, G., Hegyi, A., Dico, C., & Calin, M. (2016). Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks. *Procedia Technology*, 259-265. doi:doi:10.1016/j.protcy.2016.01.077
- Catalan, G., Hegyi, A., Dico, C., & Calin, M. (2016). Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks. *Procedia Technology*, 259-265. doi:doi:10.1016/j.protcy.2016.01.077
- CENAPRED. (s.f.). *Evaluación Simplificada de la Vulnerabilidad Sísmica de Viviendas*.



- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. (2020). *Base de Datos Climatológica Nacional CLICOM*. Recuperado el 1 de April de 2020, de <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Chanfón Olmos, C. (1983). *Fundamentos Teóricos de la Restauración*. Ciudad de México: Facultad de Arquitectura UNAM, División de Estudios de Posgrado.
- Chardon, A. C. (2008). Amenaza, vulnerabilidad y sociedades urbanas una visión desde la dimensión institucional. *Gestión y ambiente*, 11(2), 123-135.
- Chardon, A. C. (Noviembre de 2010). Reasentar un hábitat vulnerable. Teoría versus praxis. *Revista Invi*, 25(70), 17-75.
- Chico Ponce de León, P. A. (2000). *Transformaciones y evolución de la arquitectura religiosa de Yucatán durante los siglos XVII y XVIII. (La metodología de investigación histórica de la arquitectura y el urbanismo en un caso de estudio) (Tesis de doctorado)*. Programa de maestría y doctorado en arquitectura. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chieffo, N., Formisano, A., Landolfo, R., & Milani, G. (2022). A vulnerability index based-approach for the historical centre of the city of Latronico (Potenza, Southern Italy). *Engineering Failure Analysis*, 136(106207). doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106207>
- Chieffo, N., Formisano, A., Mochi, G., & Mosoarca, M. (2021). Seismic Vulnerability Assessment and Simplified Empirical Formulation for Predicting the Vibration Periods of Structural Units in Aggrregate Configuration. *Geosciences*, 11(287). doi:<https://doi.org/10.3390/geosciences11070287>
- Ciantelli, C., Sardella, A., Arroyo Duarte, S., Pecchioni, E., & Bonazza, A. (2022). The Monumental UNESCO Site of Panamá Viejo: Investigation of the Masonry Mortars. *Heritage*, 5(2), 646-663. doi:<https://doi.org/10.3390/heritage5020036>
- Cid, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63(523), 159-169.
- Cid, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63(523), 159-169.
- Cocco, G., D'Aloisio, A., Spacone, E., & Brando, G. (2019). Seismic Vulnerability of Buildings in Historic Centers: From the "Urban" to the "Aggregate" Scale. *Frontiers in Built Environment*, 5(78). doi:doi: 10.3389/fbuil.2019.00078
- Comisión Federal de Electricidad . (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo*. México: Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas.



- Comisión Nacional del Agua. (2013). *Estudio de inundaciones fluviales y mapas de peligro para el Atlas Nacional de Riesgo de Inundaciones. Organismo de Cuenca I Balsas*. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Consejería Jurídica del Poder Ejecutivo del Estado de Morelos. (2013). *Reglamento de Construcción para el Municipio de Jojutla, Morelos*. Consejería Jurídica del Poder Ejecutivo del Estado de Morelos, Dirección General de Legislación. Subdirección de Informática Jurídica. Jojutla de Juárez, México: H. Ayuntamiento Constitucional de Jojutla, Morelos.
- Consejería Jurídica del Poder Ejecutivo del Estado de Morelos. (May 2016). *Plan Municipal de Desarrollo 2016-2018, del Ayuntamiento de Jojutla, Morelos*. Dirección General de Legislación, Subdirección de Jurisprudencia. Jojutla de Juárez, México: Ayuntamiento Constitucional de Jojutla, Morelos.
- Cooper, J. F. (1824). *El último mohicano*. Estados Unidos: H.C. Carey & I. Lea.
- Cornerstones Community Partnerships. (2006). *Adobe conservation: a preservation handbook*. Santa Fe, New Mexico: Sunstone Press.
- Correia, M. (2007). Teoría de la conservación y su aplicación al patrimonio en tierra. *Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 2(20), 202-219.
- Correia, M. R., Lourenço, P. B., & Varum, H. (Edits.). (2015). *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture* (1st Edition ed.). London: CRC Press.
- Correia, M. R., Lourenço, P. B., & Varum, H. (Eds.). (2015). *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture* (1st Edition ed.). London: CRC Press.
- Correia, M., & Duarte Carlos, G. (2021). Introduction: earthen architecture, an endangered vernacular heritage. *Built Heritage*, 5(22). doi:<https://doi.org/10.1186/s43238-021-00046-6>
- Correia, M., Carlos, G., Rocha, S., Lourenço, P. B., Vasconcelos, G., & Varum, H. (2013). Seismic-V: Vernacular seismic culture in Portugal. In M. Correia, G. Carlos, & S. Rocha (Eds.), *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development* (pp. 663-668). London: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/b15685>
- Correia, M., Duarte Carlos, G., Dipasquale, L., Mecca, S., Vicente, J., & Correia, T. (2020). Communication and dissemination of vernacular heritage. In L. Dipasquale, S. Mecca, & M. Correia (Eds.), *From Vernacular to World Heritage* (pp. 74-80). Firenze University Press.
- Correia, M., Merten, J., Vegas, F., Mileto, C., & Cristini, V. (2011). Earthen architecture in Southwestern Europe: Portugal, Spain and Southern France. In M. Correia, L. Dipasquale, & S. Mecca (Eds.), *Terra Europae. Earthen Architecture in the European Union* (pp. 71-76). Pisa, Italy: Edizioni ETS.



- Cortés Morales, A., Chávez Alegría, O., Rivas Nieto, C. A., & León Castillo, A. d. (2018). Evolución de la obtención del coeficiente sísmico en México. *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2018* (pp. 1076-1081). Celaya, Guanajuato, México: Academia Journals.
- Costa, C., Arduin, D., Rocha, F., & Velosa, A. (2019). Adobe Blocks in the Center of Portugal: Main Characteristics. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1627442
- Cottom, B. (2018). Introducción. En S. d. Cultura, *Sismos y patrimonio cultural. Testimonios, enseñanza y desafíos, 2017 y 2018* (págs. 15-26). Ciudad de México: Secretaría de Cultura. Dirección General de Publicaciones.
- CRATerre. (1989). *Traité de construction en terre*. Marseille, France: Parrenthèses.
- Cruz Farrera, F. J. (2018). *Propuesta de uso de tecnologías sismorresistente de adobe para una vivienda progresiva en Cuauhtémoc, municipio de Villaflores, Chiapas (Tesis que para optar por el Título de Arquitecto)*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México: Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Arquitectura.
- Cuéllar López, A. M. (2013). *Tecnología de morteros constructivos de tierra. Una tradición en la Vertiente del Lerma Medio en el Epiclásico (Tesis de Maestría en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y Monumentos)*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Arquitectura. División de Estudios de Posgrado.
- Daneels, A. (2015). Los sistemas constructivos de tierra en el México prehispánico. *Tierra, sociedad, comunidad: 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (págs. 204-216). Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca/Red Iberoamericana PROTERRA.
- Daneels, A. (Ed.). (2021). *Arquitectura de tierra mesoamericana, volumen I*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Daneels, A. (Ed.). (2021). *Arquitectura mesoamericana de tierra. Volumen II (Vol. II)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Daneels, A. (2022). Introducción. La arquitectura de tierra en Mesoamérica: una línea de investigación. En A. Daneels (Ed.), *Arquitectura mesoamericana de tierra, volumen II* (págs. 11-26). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Daneels, A., Romo de Vivar, A., Chávez, L., Reyes, M., Tapia, E., León, M., . . . Otero, F. J. (2020). Bitumen-stabilized earthen architecture: The case of the archaeological site of La Joya, on the Mexican Gulf Coast. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 34(A). doi:https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102619



- De Filippi, F., Pennacchio, R., Restuccia, L., & Torres, S. (2020). TOWARDS A SUSTAINABLE AND CONTEXT-BASED APPROACH TO ANTI-SEISMIC RETROFITTING TECHNIQUES FOR VERNACULAR ADOBE BUILDINGS IN COLOMBIA. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIV-M-1-2020, 1089–1096. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-1089-2020>
- del Campo Alatorre, R. M., Ochoa González, G. H., & Álvarez Partida, F. (2018). *Estudio Geotécnico de la Colonia Emiliano Zapata, Jojutla, Morelos, tras los daños de los Sismos del 19 de septiembre de 2017*. ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara, Departamento de Hábitat y Desarrollo Urbano.
- del Campo Alatorre, R. M., Ochoa González, G. H., & Álvarez Partida, F. (Abril 2018). *Estudio Geotécnico de la Colonia Emiliano Zapata, Jojutla, Morelos, tras los daños de los Sismos del 19 de septiembre de 2017*. ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara, Departamento de Hábitat y Desarrollo Urbano.
- Díaz Fuentes, D. A. (Enero-junio de 2017). Un método simplificado para evaluar el riesgo sísmico y priorizar la atención de los bienes culturales inmuebles: el caso de Chile. *Intervención: Revista de Restauración, Conservación y Museología*, 8(15), 46-62.
- Díaz Fuentes, D., Baquedano Julià, P. A., D'Amato, M., & Laterza, M. (2019). Preliminary Seismic Damage Assessment of Mexican Churches after. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1628323
- Díaz Fuentes, D., Baquedano Julià, P. A., D'Amato, M., & Laterza, M. (2019). Preliminary Seismic Damage Assessment of Mexican Churches after. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1628323
- Díaz Ruíz, G. V., Guerrero Baca, L. F., & González Calderón, A. J. (2017). La vivienda de bajareque en Xochimilco, México: patrimonio inmaterial. In C. Neves, Z. Salcedo Gutierrez, & O. Borges Faria (Ed.), *17º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 249-256). La Paz: FAADU-UMSA / PROTERRA.
- Dipasquale, L., Mecca, S., & Correia, M. (Eds.). (2020). *From Vernacular to World Heritage*. Firenze: Firenze University Press.
- Doglioni, F., Moretti, A., & Petrini, V. (1994). *Le chiese e il terremoto : dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*. Trieste: LINT.
- Dolce, M., Kappos, A., Masi, A., Penelis, G., & Vona, M. (2006). Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Engineering Structures*, 28(3), 357-371. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.08.009>



- Duarte Carlos, G., Correia, M., Dipasquale, L., & Mecca, S. (2020). Discovering vernacular heritage and its tangible dimensions. En L. Dipasquale, S. Mecca, & M. Correia (Edits.), *From Vernacular to World Heritage*. Firenze: Firenze University Press.
- Durán Núñez, V. M., & Brea García, E. J. (2009). *Arquitectura popular dominicana*. Santo Domingo, República Dominicana: Banco Popular.
- El Hammouti, A., Charai, M., Mezrhav, A., Nasri, H., & Karkri, M. (2022). Effect of the nature of clayey soils (Eastern Morocco) on the thermophysical properties of bricks. *Materials today: Proceedings*, 60(1), 321-327. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.233
- Ettinger McEnulty, C. R. (2008). Tradición y modernidad. Dos caras de la misma moneda. En B. Paredes Guerrero (Ed.), *Memoria IV: Anuario de Investigación sobre Conservación, Historia y Crítica del Patrimonio Arquitectónico y Urbano. Lecturas y estrategias de la conservación del patrimonio tangible e intangible*. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Ettinger, C. R. (2010). *La transformación de la vivienda vernácula en Michoacán. Materialidad, espacio y representación*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- European Committee for Standardization. (2015). *EN 771-6:2011+A1. Specification for masonry units - Part 6: Natural stone masonry units*.
- F. Salazar, L. G., & Ferreira, T. M. (2020). Seismic Vulnerability Assessment of Historic Constructions in the Downtown of Mexico City. *Sustainability*, 12(3). doi:doi:10.3390/su12031276
- Fabbri, A., Morel, J. C., Aubert, J.-E., Bui, Q.-B., Gallipoli, D., Ventura, A., . . . Abhilash, H. N. (2021). An overview of the remaining challenges of the RILEM TC 274-TCE, testing and characterisation of earth-based building materials and elements. *RILEM Technical Letters*, 6, 150-157. doi:https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.149
- Faccioli, E., Pessina, V., Calvi, G. M., & Borzi, B. (1999). A study on damage scenarios for residential buildings in Catania city. *Journal of Seismology*, 3(3), 327-343. doi:10.1023/A:1009856129016
- Ferreira, T. M., & Eudave, R. (2022). Assessing and Managing Risk in Historic Urban Areas: Current Trends and Future Research Directions. *Frontiers in Earth Science*, 10(847959). doi:doi: 10.3389/feart.2022.847959
- Ferreira, T. M., Mendes, N., Silva, R., & Lourenço, P. B. (2021). Nondestructive testing, assessment and strengthening for reducing the seismic vulnerability of masonry structures. In R. Rupakhety, & D. Gautam (Eds.), *Masonry Construction in Active Seismic Regions* (pp. 123-146). Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821087-1.00008-9



- Ferreira, T. M., Vicente, R., Mendes da Silva, J., Varum, H., & Costa, A. (2013). Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: Case study of the old city centre in Seixal, Portugal. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(5), 1753-1773. doi:DOI: 10.1007/s10518-013-9447-2
- Ferrigni, F. (2015). Vernacular architecture: A paradigm of the local seismic culture. En M. Correia, P. B. Lourenço, & H. Varum (Edits.), *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture* (págs. 3-10). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Flores Calvario, A., & Rodríguez Licea, M. (2020). El sistema constructivo de pajarete en la vivienda tradicional del estado de Colima, México. *Intervención*, 11(21), 212-235. doi:DOI: 10.30763/Intervencion.228.v1n21.07.2020
- Flores Salazar, L. G., & Ferreira, T. M. (2019). Vulnerabilidad sísmica para la rehabilitación del patrimonio cultural. Un acercamiento teórico-institucional. *Gremium*, 6(12), 116-137.
- Formisano, A., Chieffo, N., & Mosoarca, M. (2017). Seismic Vulnerability and Damage Speedy Estimation of an Urban Sector within the Municipality of San Potito Sannitico (Caserta, Italy). *The Open Civil Engineering Journal*, 11, 1106-1121. doi:DOI:10.2174/1874149501711011106
- Formisano, A., Chieffo, N., Clementi, F., & Mosoarca, M. (2021). Influence of Local Site Effects on the Typological Fragility Curves for Class-Oriented Masonry Buildings in Aggregate Condition. *The Open Civil Engineering Journal*, 15, 149-164. doi:DOI:10.2174/1874149502115010149
- Formisano, A., Florio, G., Landolfo, R., & Mazzolani, F. M. (2011). Numerical Calibration of a Simplified Procedure for the Seismic Behaviour Assessment of Masonry Building Aggregates. In V. Topping, & Y. Tsompanakis (Ed.), *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Stirlingshire (UK): Civil-Comp Press. doi:http://dx.doi.org/10.4203/ccp.96.172
- Formisano, A., Florio, G., Landolfo, R., & Mazzolani, F. M. (2015). Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of masonry building aggregates. *Advances in Engineering Software*, 80, 116-138. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.013
- Formisano, A., Florio, G., Landolfo, R., & Mazzolani, F. M. (2015). Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of masonry building aggregates. *Advances in Engineering Software*, 80, 116-138. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.013
- Fratini, F., Pecchioni, E., Rovero, L., & Toniatti, U. (2011). The earth in the architecture of the historical centre of Lamezia Terme (Italy): Characterization for restoration. *Applied Clay Science*, 53(3), 509-516. doi:https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.11.007



- Fundación para la Restauración y Conservación del Patrimonio Cultural Colombiano. (1991). *Rescate del patrimonio arquitectónico de Colombia*. Santafé de Bogotá: Fundación para la Restauración y Conservación del Patrimonio Cultural Colombiano.
- Galán Gaitán, M., & Jiménez Miranda, K. P. (2018). Patrones socioculturales en las prácticas constructivas habitacionales y su influencia en la vulnerabilidad sísmica: caso de estudio de la localidad Puerto Momotombo, municipio de La Paz Centro, departamento de León, Nicaragua, 2017. *Vivienda y Comunidades Sustentables*(3), 47-62. doi:<https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i3.35>
- Galeana-Cruz, S. (2021). Habitabilidad, entorno y vivienda reconstruida: Jojutla, Morelos, México. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 16(29), 36-47. doi:<https://doi.org/10.36677/legado.v16i29.15189>
- García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México, D. F.: Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Acosta, V., & Suárez, G. (1996). *Los sismos de la historia de México*. FCE/UNAM/CIESAS.
- Geertz, C. (1983). *Conocimiento local. Ensayos sobre la interpretación de las culturas*. Barcelona: Ediciones Paidós Ibérica.
- Gent, K. A., Astroza, M. A., & Giuliano, G. M. (2005). Calibración del índice de vulnerabilidad del G.N.D.T. a las edificaciones chilenas: estructuras de albañilería confinada. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*. Concepción, Chile.
- Giada, G., Caponetto, R., & Nocera, F. (2019). Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability*, 11(5342). doi:[doi:10.3390/su11195342](https://doi.org/10.3390/su11195342)
- Giménez, G. (Junio de 1999). Territorio, cultura e identidad: la región sociocultural. *Estudios sobre las culturas contemporáneas*, 5(2), 25-57.
- Giménez, G. (Julio-diciembre de 2001). Cultura, territorio y migraciones. Aproximaciones teóricas. *Alteridades*, 11(22), 5-14.
- GNDT. (1993). *Rischio sismico di edifici pubblici*. Roma: C.N.R - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.
- Gómez Barranco, H., Santos López, T., & López Calvo, H. Z. (2015). Factores sociales detonantes en la transformación de la vivienda a base de muros de tierra. In F. J. Romero Pérez (Ed.), *Vivienda y habitat sustentable. Un acercamiento a la práctica* (pp. 91-100). México: Universidad Autónoma de Guerrero.



- Gómez Barranco, H., Santos López, T., & López Calvo, H. Z. (2015). Factores sociales detonantes en la transformación de la vivienda a base de muros de tierra. In F. J. Romero Pérez (Ed.), *Vivienda y habitat sustentable. Un acercamiento a la práctica* (pp. 91-100). México: Universidad Autónoma de Guerrero.
- Gómez Patrocinio, F. J. (2018). *Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención (Tesis de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje)*. Valencia, España: Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universitat Politècnica de Valencia.
- Gómez-Patrocinio, F. J., López-Manzanares, F. V., Mileto, C., & García-Soriano, L. (2019). Techniques and Characteristics of Traditional. *International Journal of Architectural Heritage*, 14, 694-710.
- Gómez-Patrocinio, F. J., López-Manzanares, F. V., Mileto, C., & García-Soriano, L. (2019). Techniques and Characteristics of Traditional Earthen Masonry Walls: The Case of Spain. *International Journal of Architectural Heritage*, 14, 694-710.
- González Flores, L. (2010). Técnica e imagen: la fotografía de arquitectura como concepto. *ArtCultura*, 12(21), 91-109.
- González Herrera, R., Mora Chaparro, J. C., Aguirre González, J., Aguilar Carboney, J. A., Paz Tenorio, J. A., & Moreno Ceballo, R. (2020). Efecto de sitio en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, un determinante en los daños históricos de las edificaciones. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 102, 42-64. doi:DOI: 10.18867/RIS.102.511
- Grünthal, G. (Ed.). (1998). *European Macroseismic Scale 1998 EMS-98*. Luxembourg: Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.
- Guerrero Baca, L. F. (Diciembre de 2007). Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva. *Apuntes*, 20(2), 182-201.
- Guerrero Baca, L. F. (2007). La pérdida de la arquitectura de adobe en México. *ICOMOS World Report 2006-2007 on Monuments and Sites in Danger*, 112-114. (E. Reinhold-Verlag, Ed.) Altenburg, Alemania.
- Guerrero Baca, L. F. (Junio de 2011). Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia. *Bitácora arquitectura*(22), 6-13. doi:http://dx.doi.org/10.22201/fa.14058901p.2011.22.25519
- Guerrero Baca, L. F. (2017). Pasado y porvenir de la construcción con bajareque. *Gremium*, 4(8), 69-80.
- Guerrero Baca, L. F. (January - July de 2019). Comportamiento sísmico de viviendas tradicionales de adobe, situadas en las faldas del volcán Popocatepetl, México. *Gremium*, 6(11), 105-118.



- Guerrero Baca, L. F. (January - July de 2019). Comportamiento sísmico de viviendas tradicionales de adobe, situadas en las faldas del volcán Popocatepetl, México. *Gremium*, 6(11), 105-118.
- Guerrero Baca, L. F. (2020). El uso de tierra modelada en la intervención de componentes constructivos de adobe. *Intervención*, 11(22), 133-160. doi:DOI: 10.30763//Intervencion.236.v2n22.15.2020
- Guerrero Baca, L. F. (2020). Vernacular achitecture in the World Heritage List. En L. Dipasquale, S. Mecca, & M. Correia (Edits.), *From Vernacular to World Heritage* (págs. 18-23). Firenze: Firenze University Press.
- Guerrero Baca, L. F. (2021). *Investigación tipológica para el diseño arquitectónico*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Guerrero Baca, L. F., & Soria López, F. J. (2018). Traditional architecture and sustainable conservation. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 8(2), 194-206. doi:DOI 10.1108/JCHMSD-06-2017-0036
- Guerrero Baca, L. F., Meraz Quintana, L., & Soria López, F. J. (2014). Cualidades sismorresistentes de la vivienda de adobe en las faldas del volcán Popocatepetl. In L. F. Guerrero Baca, *Reutilización del patrimonio edificado en adobe* (pp. 194-215). México D.F.: Casa Abierta al Tiempo: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Guerrero, L. (2013). La cal y los sistemas constructivos. In L. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La cal: historia, propiedades y usos* (pp. 49-72). Distrito Federal: UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas; ANFACAL.
- Guerrero, L. (2013). Vivienda vernácula en Tlaxcala, México. En G. M. Viñuales (Ed.), *Arquitectura vernácula iberoamericana* (págs. 16-31). Sevilla: Red AVI. Arquitectura vernácula iberoamericana.
- Guerrero, L. F., & Vargas, J. (2015). Local seismic culture in Latin America. En M. Correia, P. B. Lourenço, & H. Varum (Edits.), *Seismic Retrofitting. Learning from Vernacular Architecture* (págs. 61-66). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Guillén Guillén, C. A., Muciño Vélez, A., Guerrero Baca, L. F., & Cruz Farrera, F. J. (2021). Optimización del proceso de elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del Suelo. *Nova Scientia*, 27(13), 1-28. doi:https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2891
- Halvorson, S. J., & Parker Hamilton, J. (2007). Vulnerability and the Erosion of Seismic Culture in Mountainous Central Asia. *Mountain Research and Development*, 27(4), 322-330. doi:doi:10.1659/mrd.0900
- Hanzalová, K., & Pavelka, K. (2013). Documentation and virtual reconstruction of historical objects in Peru damaged by an earthquake and climatic events. *Advances in Geosciences*, 35, 67-71. doi:doi:10.5194/adgeo-35-67-2013



- Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9(3), 185-189. doi:10.1016/0950-0618(95)00035-E
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (1991). *Metodología de la investigación*. Naucalpan de Juárez: McGraw - Hill Interamericana de México.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (1991). *Metodología de la investigación*. Naucalpan de Juárez: McGraw - Hill Interamericana de México.
- Hervás Herrera, M. A., & González Quiel, J. (2020). STUDY AND CATALOGUING OF INDIGENOUS VERNACULAR ARCHITECTURE IN WESTERN PANAMA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-1-2020, 41-48. doi:https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-41-2020
- Hewitt, K. (1996). Daños ocultos y riesgos encubiertos: haciendo visible el espacio social de los desastres. En E. Mansilla, *Desastres : Modelo para armar : "Colección de piezas de un rompecabezas social"* (págs. 23-45). Lima, Perú: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- ICOMOS. (1999). *Carta del Patrimonio Vernáculo Construido (1999)*. México: ICOMOS.
- Illampas, R., Ioannou, I., & Charmpis, D. C. (2014). Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. *Construction and Building Materials*, 53, 83-90. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.103
- INEGI. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI.
- INEGI. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI.
- INEGI. (2005). *Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. INEGI. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI.
- INEGI. (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.



- Infante Gomes, R., Santos Silva, A., Gomes, L., & Faria, P. (2022). Fernandina Wall of Lisbon: Mineralogical and Chemical Characterization of Rammed Earth and Masonry Mortars. *Minerals*, 12(241). doi:<https://doi.org/10.3390/min12020241>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI.
- Ion, R. M., Iancu, L., David, M. E., Grigorescu, R. M., Trica, B., Somoghi, R., . . . Tincu, S. (2020). Multi-Analytical Characterization of Corvins' Castle—Deserted Tower. Construction Materials and Conservation Tests. *Heritage*, 3, 941-964. doi:[doi:10.3390/heritage3030051](https://doi.org/10.3390/heritage3030051)
- Jaszczak, A., Kristianova, K., Vazonienė, G., & Zukovskis, J. (2018). Phenomenon of abandoned villages and its impact on transformation of rural landscapes. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*, 40, 467-480. doi:<http://doi.org/10.15544/mts.2018.43>
- Jerez Lazo, P., Fernández, A., & Lamas, M. (2019). Evaluación de viviendas construidas con BTC luego de 15 años de uso en Monteros, Argentina. In C. Neves, Z. Salcedo, & O. B. Faria (Ed.), *19º Seminário Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 251-262). San Salvador, El Salvador: FUNDASAL / PROTERRA.
- Jigyasu, R., & Arora, V. (2019). *Disaster Risk Management of Cultural Heritage in Urban Areas. A Training Guide*. Kyoto, Japan: Research Center for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage, Ritsumeikan University.
- Jiménez Delgado, M. C., & Cañas Guerrero, I. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21(2), 237-251. doi:[doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006)
- Johnston-Feller, R. (2001). *Color Science in the Examination of Museum Objects. Non-destructive Procedures*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- Jorquera, N. (2014). Culturas constructivas que conforman el patrimonio chileno construido en tierra. *Revista AUS*, 16, 30-35.
- Jorquera, N. (2014). Culturas sísmicas: Estrategias vernaculares de sismorresistencia del patrimonio arquitectónico chileno. *Arquitecturas del Sur*, XXXII(46), 18-29.
- Jorquera, N., Vargas, J., Lobos Martínez, M. d., & Cortez, D. (2017). Revealing Earthquake-Resistant Geometrical Features in Heritage Masonry Architecture in Santiago, Chile.



- International Journal of Architectural Heritage*, 11(4), 519-538.
doi:10.1080/15583058.2016.1266414
- José-Yacamán, M., & Ascencio, J. A. (2000). Electron microscopy and its application to the study of archaeological materials and art preservation. En E. Ciliberto, & G. Spoto (Edits.), *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology* (págs. 405-437). John Wiley and Sons, Inc.
- Kassem, M. M., Mohamed Nazri, F., & Noorozinejad Farsangi, E. (2020). The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 849-864. doi:https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.001
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719-734. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119
- Laborel-Préneron, A., Faria, P., Aubert, J.-E., & Magniont, C. (2021). Assessment of Durability of Bio-based Earth Composites. *Recent Progress in Materials*, 3(2). doi:doi:10.21926/rpm.2102016
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 415-443. doi:DOI 10.1007/s10518-006-9024-z
- Lamy, B. (Ed.). (2016). *Trabajo de campo. Diferentes senderos desde los estudios sociales*. Universidad de Guanajuato/Editorial Itaca.
- Leff, E. (1977). *Ciencia, Técnica y Sociedad*. México: EDICOL S.A.
- Lidón de Miguel, M., Joffroy, T., Mileto, C., & Vegas, F. (2022). Burkina Faso through Its Traditional Architecture: A Century of Research on Built Vernacular Heritage. *Heritage*, 5(3), 2370-2393. doi:https://doi.org/10.3390/heritage5030123
- López Martínez, F. J., La Spina, V., & Fernández del Toro, J. (2020). RESIDENTIAL EARTHEN ARCHITECTURE IN MULA (SPAIN): STUDY AND CATALOGUING OF ITS CONSTRUCTION TECHNIQUE. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIV-M-1-2020*, 985-992. doi:https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-985-2020
- López Núñez, M. (2020). El espacio como documento en la reconstrucción histórica de las haciendas de la región de Valladolid. La construcción de límites en el territorio. En C. R. Ettinger, E. Mercado López, & J. M. Torres Vega (Edits.), *Historias de la arquitectura en Michoacán. Una mirada desde las fuentes* (págs. 81-88). Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.



- López Núñez, M. d. (2009). *Los espacios para la producción y la estructuración del territorio en la región de Valladolid. (Tesis de Doctorado en Geografía) Una interpretación de la concepción del espacio en el Michoacán virreinal*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. División de Estudios de Posgrado Geografía.
- López Núñez, M., & Pedraza Marrón, H. A. (2012). Territorio como patrimonio: el espacio periurbano de la ciudad de Morelia y el agotamiento de los recursos. *Asuntos*, 22, 267-284.
- Lourenço, P. B., Barontini, A., Oliveira, D. B., & Ortega, J. (2022). Rethinking preventive conservation: Recent examples. In R. Lancellotta, C. Viggiani, A. Flora, F. de Silva, & L. Mele (Eds.), *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III*. London: Taylor & Francis. doi:DOI 10.1201/9781003308867-4
- Lu, X., Sun, Q., Feng, W., & Tian, J. (2013). Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*, 47, 231-239. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043
- Maldonado Rondón, E., & Chio Cho, G. (2009). Estimación de las funciones de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de tierra. *Ingeniería & Desarrollo*, 25, 180-199.
- Maletta, H. (2009). *Epistemología aplicada: Metodología y técnica de la producción científica*. Lima: Consorcio de Investigación Económica y Social, Centro Peruano de Estudios Sociales, Universidad del Pacífico, Centro de Investigación.
- Mantler, M., & Schreiner, M. (2000). X-Ray Fluorescence Spectrometry in Art and Archaeology. *X-Ray Spectrometry*, 3-17.
- Mao, W., Sun, M., Guo, Q., Huang, J., & Bai, Y. (2018). Research on in-situ color detection and data analysis on earthen sites. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2018.1476605
- Markiewicz, H., & Klajn, A. (2004). *Puesta a tierra y Compatibilidad Electromagnética (EMC). Sistemas de puesta a tierra - Aspectos básicos de su construcción*. Wroclaw University of Technology.
- Martínez Aguilar, J. M., & Bedolla Arroyo, E. (2021). Transformación de la vivienda tradicional de Michoacán. Problemáticas y acciones de conservación. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 16(30), 4-13.
- Martínez, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez, H. L., Lara, C., Bedolla, A., . . . Ruvalcaba, J. L. (Mayo-agosto de 2018). Colorimetry of clays modified with mineral and organic additives. *Revista ALCONPAT*, 8(2), 163-177.



- Martínez, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez, H. L., Lara, C., Bedolla, A., . . . Ruvalcaba, J. L. (2018, Mayo-agosto). Colorimetry of clays modified with mineral and organic additives. *Revista ALCONPAT*, 8(2), 163-177.
- Martins Neves, C. M., Borges Faria, O., Rotondaro, R., Cevallos Salas, P., & Hoffmann, M. V. (2009). *Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra - prácticas de campo*. PROTERRA.
- Martins Neves, C. M., Borges Faria, O., Rotondaro, R., Cevallos Salas, P., & Hoffmann, M. V. (2009). *Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra - prácticas de campo*. PROTERRA.
- Masciotta, M. G., Ramos, L. F., Lourenço, P. B., & Campos Matos, J. (2016). Development of Key Performance Indicators for the Structural Assessment of Heritage Buildings. *8th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Bilbao, Spain.
- Mateu Sagués, M. (2019). El bajareque en techos de la Joya, México, y Sant Jaume, España. En C. Neves, Z. Salcedo Gutierrez, & O. Borges Faria (Ed.), *19º Seminario iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. VII Volver a la Tierra* (págs. 227-237). San Salvador, El Salvador: FUNDASAL/PROTERRA.
- Mateu Sagues, M., & Daneels, A. (2021). La micromorfología aplicada al estudio del patrimonio construido con tierra. *Revista Gremium*, 7(E2), 10-23.
- Matoušková, E., Pavelka, K., Smolík, T., & Pavelka, Jr., K. (2021). Earthen Jewish Architecture of Southern Morocco: Documentation of Unfired Brick Synagogues and Mellahs in the Drâa-Tafilalet Region. *Applied Sciences*, 11(1712). doi:<https://doi.org/10.3390/app11041712>
- Mauricio, A. C., Grieseler, R., Heller, A. R., Kelley, A. R., Rumiche, F., Sandweiss, D. H., & Viveen, W. (2021). The earliest adobe monumental architecture in the Americas. *PNAS*, 118(48). doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.2102941118>
- Meli Piralla, R. (2018). La ingeniería civil ante los efectos de los sismos de 2017 en los edificios patrimoniales (el equilibrio entre la autenticidad y la seguridad). En *Sismos y patrimonio cultural. Testimonios, enseñanza y desafíos, 2017 y 2018* (págs. 62-81). Ciudad de México: Secretaría de Cultura. Dirección General de Publicaciones.
- Meli, R. (2005). Experiencias en México sobre reducción de vulnerabilidad sísmica de construcciones de adobe. *SismoAdobe2005: International seminar on architecture, construction and conservation of earthen buildings in seismic areas*. Lima, Perú.
- Mellaikhafi, A., Tilioua, A., Souli, H., Garoum, M., Ahmed, M., & Hamdi, A. (2021). Characterization of different earthen construction materials in oasis of south eastern Morocco (Errachidia Province). *Case Studies in Construction Materials*, 14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00496>



- Miccoli, L., Müller, U., & Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61, 327-339. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>
- Mileto, C., & Vegas, F. (2008). *Homo Faber. Arquitectura preindustrial del Rincón de Ademuz*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Mileto, C., Vegas López-Manzanares, F., Cristini, V., & García Soriano, L. (2021). Earthen architecture in the Iberian Peninsula: a portrait of vulnerability, sustainability and conservation. *Built Heritage*, 5(24). doi:<https://doi.org/10.1186/s43238-021-00043-9>
- Mileto, C., Vegas López-Manzanares, F., García Sáez, M. S., Gómez Patrocinio, F. J., & García Hermida, A. (2018). *Red Nacional de Maestros de la Construcción Tradicional: Maestros de la tierra*. INTBAU.
- Mileto, C., Vegas, F., Cristini, V., & García-Soriano, L. (2020). THE RESEARCH PROJECT "EARTHEN ARCHITECTURE IN THE IBERIAN PENINSULA: STUDY OF NATURAL, SOCIAL AND ANTHROPIC RISKS AND STRATEGIES TO IMPROVE RESILIENCE (RISK-TERRA)". OBJECTIVES AND FIRST METHODOLOGY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-1-2020, 871-876. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-871-2020>
- Ministerio de Cultura República de Colombia. (2011). *Programa Nacional Escuelas Taller Colombia herramientas de paz*. Bogotá: Ministerio de Cultura de Colombia, Dirección de Patrimonio.
- Minke, G. (2006). *Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture* (1st Edition ed.). Basel · Berlin · Boston: Birkhäuser – Publishers for Architecture. Obtenido de https://archive.org/details/Gernot_Minke-Building_With_Earth/page/n7
- Minke, G. (2008). *Manual de construcción con tierra - la tierra como material de construcción y sus aplicaciones en la arquitectura actual* (Tercera ed. ed.). Montevideo: Editorial Fin de siglo.
- Misosevic Ilic, J., Bento, R., & Cattari, S. (2020). 3D GIS representation for supporting seismic mitigation policies at urban scale: The case study of Lisbon. *Journal of Cultural Heritage*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.04.001>
- Moriset, S., Rakotomamonjy, B., & Gandreau, D. (2021). Can earthen architectural heritage save us? *Built Heritage*, 5(19). doi:<https://doi.org/10.1186/s43238-021-00041-x>
- Moriset, S., Rakotomamonjy, B., & Gandreau, D. (2021). Can earthen architectural heritage save us? *Built Heritage*, 5(19). doi:<https://doi.org/10.1186/s43238-021-00041-x>



- Mousourakis, A., Arakadaki, M., Kotsoupoulos, S., Sinamidis, I., Mikrou, T., Frangedaki, E., & Lagaros, N. D. (2020). Earthen Architecture in Greece: Traditional Techniques and Revaluation. *Heritage*, 3, 1237-1268. doi:doi:10.3390/heritage3040068
- Muntañola Thornberg, J. (2002). *Arquitectura, modernidad y conocimiento*. Barcelona: Edicions UPC.
- Muñoz Viñas, S. (2004). *Teoría contemporánea de la restauración*. Madrid: Síntesis.
- Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G., & Jagadish, K. S. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 54-61. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.03.001
- Navarrete Seras, M. A., Chávez García, H. L., Martínez Molina, W., Alonso Guzmán, E. M., & Arreola Sánchez, M. (2017). Bank Material Study for the Restoration of Historical Monuments in Michoacán, México. *Materials Science Forum*, 902, 47-51. doi:doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.902.47
- Navarrete Seras, M. A., Martínez Molina, W., Alonso Guzmán, E. M., Chávez García, H. L., Velasco Ávalos, F., Lara Gómez, C., & Bedolla Arroyo, J. A. (2011). Relación Entre la Resistencia Mecánica de Agregados Pétreos Gruesos, Obtenida Mediante el Ensayo Point Load y la Microestructura. En E. A. Aguilar, E. Bedolla, & C. A. León (Ed.), *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*. 8, págs. 135-141. Morelia, México: Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH.
- Navarrete Seras, M., Martínez Molina, W., Alonso Guzmán, E. M., Arteaga Arcos, J., Chávez García, H. L., Lara Gómez, C., . . . Díaz González, N. (2014). Mathematical models applied to the physical/mechanical characterization of stone materials bank Huiramba, México. En K. Esquivel Escalante, E. Elizalde Peña, & J. A. Rodríguez Morales (Ed.), *X Congreso Internacional de Ingeniería. Engineering and its applications Vol. 1* (págs. 252-256). Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Navarrete Seras, M., Martínez Molina, W., Alonso Guzmán, E., Lara Gómez, C., Arteaga Arcos, J., Bedolla Arroyo, J. A., & Delgado Hernández, D. J. (2013). Rocas ígneas extrusivas e intrusivas para mampostería, método de carga puntual. *XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT* (págs. 493-502). Cartagena de Indias, Colombia: Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción - ALCONPAT.
- Navarro Gascón, J. V. (2008). Aplicaciones de la difracción de rayos X al estudio de los Bienes Culturales. En I. d. Español, & C. y. Ministerio de Educación (Ed.), *La ciencia y el arte: ciencias experimentales y conservación del Patrimonio Histórico* (Vol. 1, págs. 134-139). España: Ministerio de Cultura, Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales, Subdirección General del Instituto del Patrimonio Histórico Español.



- Navarro Mendoza, E. G., Sánchez Calvillo, A., & Alonso Guzmán, E. M. (2019). Estabilización de suelos arcillosos con cal para firmes y blocks. In C. Neves, Z. Salcedo Gutiérrez, & O. Borges Faria (Ed.), *19º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 284-291). San Salvador, El Salvador: FUNDASAL / PROTERRA.
- Navarro Mendoza, E., Alonso Guzmán, E. M., Ayala Ortega, L. A., & Sánchez Calvillo, A. (2022). Cal química para la estabilización de suelos arcillosos. In A. Ferreiro, Z. Salcedo Gutierrez, & C. Neves (Ed.), *SIACOT 2022 Revive la Tierra. 20º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 127-132). Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador.
- Neves, C., & Faria, O. B. (Edits.). (2011). *Técnicas de construcción con tierra*. Bauru, São Paulo: FEB-UNESP/PROTERRA.
- Niglio, O. (2015). *El valor del patrimonio cultural entre extremo Oriente y extremo Occidente* (Primera edición ed., Vol. Esempi di Valore 4). Roma: ARACNE Editrice.
- Olaya-García, B., Navia Espinoza, S., de Lara Martínez, F., & Yáñez Cerda, F. (2022). Soluciones de tierra en la Vivoteca: una plataforma de selección, divulgación y transferencia ecotecnológica. In A. Ferreiro, Z. Salcedo Gutierrez, & C. Neves (Ed.), *20º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra: revive la tierra* (pp. 761-772). Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador.
- Olaya-García, B., Navia Espinoza, S., de Lara Martínez, F., & Yáñez Cerda, F. (2022). Soluciones de tierra en la Vivoteca: una plataforma de selección, divulgación y transferencia ecotecnológica. En A. Ferreiro, Z. Salcedo Gutierrez, & C. Neves (Ed.), *20º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra: revive la tierra* (págs. 761-772). Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador.
- Onescu, E., Onescu, I., & Mosoarca, M. (2021). Seismic vulnerability assesment methodology for historical buildings with cultural value. En P. Roca, L. Pelà, & C. Molins (Ed.), *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions - SAHC 2021* (págs. 3534-3545). Barcelona, Spain: International Centre for Numerical Methods in Engineering.
- ONNCCE. (2002). *NMX-C-432-ONNCCE-2002 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-GEOTECNIA-CIMENTACIONES-ENSAYE DE COMPRESION TRIAXIAL-METODO DE PRUEBA*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2013). *NMX-C-128-ONNCCE-2013 Industria de la Construcción – Concreto Sometido a Compresión – Determinación del Modulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.



- ONNCCE. (2014). *NMX-C-083-ONNCCE-2014 Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2014). *NMX-C-496-ONNCCE-2014 Industria de la Construcción - Geotecnia - Materiales para Terracerías - Determinación de la Composición Granular*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2015). *NMX-C-508-ONNCCE Industria de la construcción - Bloques de tierra comprimida estabilizados*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2018). *NMX-C-493-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción - Geotecnia - Límites de Consistencia de Suelos - Método de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019. Industria de la Construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y Métodos de ensayo*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2020). *NMX-C-275-ONNCCE-2020. Industria de la construcción – Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson – Método de ensayo (Cancela a la NMX-C-128-ONNCCE-2013)*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Ordaz Zapata, F. A. (2019). *Estudio de las características mecánicas y térmicas del adobe, para su revalorización en la construcción de vivienda, en la ciudad de Torreón Coahuila, México (Tesis para obtener el grado de Arquitecto)*. Torreón, Coahuila, México: Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Arquitectura, Unidad Torreón.
- Ortega Heras, J. (2018). *Reduction of the seismic vulnerability of vernacular architecture with traditional strengthening solutions (Tese de Doutoramento Engenharia Civil)*. Braga, Portugal: Universidade do Minho. Escola de Engenharia.
- Ortega, J. (2021). Heritage Within European Research Project. New techniques for the inspection, reconstruction and presentation of the non-visible parts of the built cultural heritage. En *Heritage Within - European Research Project* (págs. 7-14). Braga: Universidade do Minho. Escola de Engenharia.
- Ortega, J., Saloustros, S., & Roca, P. (2021). Seismic Vulnerability Assessment Method for Vernacular Architecture Considering Uncertainty. En P. Roca, L. Pelà, & C. Molins (Ed.), *12th International Conference on Structural Analysis of Historical*



- Constructions - SAHC 2021* (págs. 3522-3533). Barcelona, Spain: International Centre for Numerical Methods in Engineering.
- Ortega, J., Vaconcelos, G., Rodrigues, H., Correia, M., & Lourenço, P. B. (2017). Traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture and local seismic cultures: A literature review. *Journal of Cultural Heritage*, 27, 181-196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.015>
- Ortega, J., Vasconcelos, G., & Correia, M. R. (2015). Seismic-resistant building practices resulting from Local Seismic Culture. In M. R. Correia, P. B. Lourenço, & H. Varum (Eds.), *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture* (pp. 17-22). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Ortega, J., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., & Correia, M. (2020). Seismic Vulnerability and Loss Assessment of Vila Real de Santo António, Portugal: Application of a Novel Method. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(10), 1585-1607. doi:DOI: 10.1080/15583058.2019.1709915
- Ortega, J., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., Correia, M., & Da Silva Miranda, T. F. (2019). Development of a Numerical Tool for the Seismic Vulnerability Assessment of Vernacular Architecture. *Journal of Earthquake Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1657987>
- Ortega, J., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., Correia, M., Ferreira, T. M., & Vicente, R. (2019). Use of post-earthquake damage data to calibrate, validate and compare two seismic vulnerability assessment methods for vernacular architecture. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 39(101242). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101242>
- Paredes Avilés, F. L., Flor Granda, M. V., & de la Cruz Arce, G. M. (2020). Pérdida del patrimonio edificado de los Chimbos en la provincia de Bolívar, ciudad de Guaranda, Ecuador. Recomendaciones para su conservación. *Vivienda y Comunidades Sustentables*(7), 31-46. doi:<https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i7.124>
- Paredes Avilés, F. L., Flor Granda, M. V., & de la Cruz Arce, G. M. (2020). Pérdida del patrimonio edificado de los Chimbos en la provincia de Bolívar, ciudad de Guaranda, Ecuador. Recomendaciones para su conservación. *Vivienda y Comunidades Sustentables*(7), 31-46. doi:<https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i7.124>
- Parracha, J. L., Lima, J., Freire, M. T., Ferreira, M., & Faria, P. (2019). Vernacular Earthen Buildings from Leiria, Portugal - Material Characterization. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1668986
- Parracha, J. L., Lima, J., Freire, M. T., Ferreira, M., & Faria, P. (2021). Vernacular earthen buildings from Leiria, Portugal – Architectural survey towards their conservation and retrofitting. *Journal of Building Engineering*, 35(102115). doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102115>



- Parracha, J. L., Santos Silva, A., Cotrim, M., & Faria, P. (2019). Mineralogical and microstructural characterisation of rammed earth and earthen mortars from 12th century Paderne Castle. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 226-239. doi:https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.021
- Peña, F., & Chavez, M. M. (2021). Inadequate Cases of Intervention in Architectural Heritage Buildings in Mexico After the September 2017 Earthquakes. En P. Roca, L. Pelà, & C. Molins (Ed.), *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions - SAHC 2021* (págs. 2938-2945). Barcelona, Spain: International Centre for Numerical Methods in Engineering.
- Pérez Castellanos, N. A. (2021). Los adobes de la Gran Pirámide de Cholula: una mirada desde la ciencia e ingeniería de materiales. In A. Daneels (Ed.), *Arquitectura mesoamericana de tierra. Volumen II* (Primera edición ed., pp. 143-168). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Pérez, N. A., Bucio, L., Bokhimi, X., Lima, E., & Soto, E. (2016). Quantification of amorphous phases in the silt fraction of Mexican pre-Hispanic adobe earth bricks. *Journal of Applied Crystallography*, 49, 561-568. doi:https://doi.org/10.1107/S1600576716002806
- Pérez, N. A., Bucio, L., Bokhimi, X., Lima, E., & Soto, E. (2016). Quantification of amorphous phases in the silt fraction of Mexican pre-Hispanic adobe earth bricks. *Journal of Applied Crystallography*, 49, 561-568. doi:https://doi.org/10.1107/S1600576716002806
- Pérez, N. A., Bucio, L., Lima, E., Soto, E., & Cedillo, C. (2015). Identification of allophane and other semi-crystalline and amorphous phases on pre-Hispanic Mexican adobe earth bricks from Cholula, Mexico. *Microchemical Journal*, 126, 349-358. doi:10.1016/j.microc.2015.12.033
- Pérez-Campos, X., & Espíndola Castro, V. H. (2018). La realidad geológica, una amenaza al patrimonio cultural de México (los sismos de 2017). En *Sismos y patrimonio cultural. Testimonios, enseñanza y desafíos, 2017 y 2018* (págs. 49-61). Ciudad de México: Secretaría de Cultura. Dirección General de Publicaciones.
- Pérez-Gavilán, J. J., Aguirre, J., & Ramírez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *Salud Pública Mex*, 60(1), S41-S51. doi:https://doi.org/10.21149/9300
- Piattoni, Q., Quaglarini, E., & Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials*(25), 2067-2075.
- Pinheiro Pereira de Almeida, J. A. (2012). *Mechanical characterization of traditional adobe masonry elements. (Master's thesis in Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions)*. Minho: University of Minho.



- Portales Pons, A. (2013). *Analizando la construcción* (Primera edición: octubre 2013 ed.). (I. D. Politècnica, Ed.) Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya / Iniciativa Digital Politècnica: Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.3/36589>
- Preciado Villicaña, D. (2020). *Caracterización y propiedades índice en adobes de Jojutla de Juárez, Morelos, México (Tesis de Licenciatura)*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Preciado, A., Ramirez-Gaytan, A., Santos, J. C., & Rodríguez, O. (2020). Seismic vulnerability assessment and reduction at a territorial scale on masonry and adobe housing by rapid vulnerability indicators: The case of Tlajomulco, Mexico. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101425>
- Prieto Hernández, D. (2018). Sismos y patrimonio cultural. Destrucción y restauración. En *Sismos y patrimonio cultural. Testimonios, enseñanza y desafíos, 2017 y 2018* (págs. 109-123). Ciudad de México: Secretaría de Cultura. Dirección General de Publicaciones.
- Punzo Díaz, J. L., Rangel Estrada, D., Ibarra Ávila, E., & Zarco Navarro, J. (2015). Primeros datos sobre el uso de adobe y cal en época prehispánica en la región michoacana del río Balsas medio, México. *Tierra, sociedad, comunidad: 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 270-283). Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca/Red Iberoamericana PROTERRA.
- Ramakrishnan, S., Loganayagan, S., Kowshika, G., Ramprakash, C., & Aruneshwaran, M. (2021). Adobe blocks reinforced with natural fibres: A review. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.377>
- Ramírez Velázquez, B. R., & López Levi, L. (2015). *Espacio, paisaje, región, territorio y lugar: la diversidad en el pensamiento contemporáneo* (Vols. Geografía para el siglo XXI, Serie Textos Universitarios). México: UNAM, Instituto de Geografía: UAM, Xochimilco.
- Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., & Graf, P. (2020). Meteonorm Version 8. EUPVSEC 2020.
- Rimal, B., Zhang, L., Fu, D., Kunwar, R., & Zhai, Y. (2017). Monitoring Urban Growth and the Nepal Earthquake 2015 for Sustainability of Kathmandu Valley, Nepal. *Land*, 6(42). doi:[doi:10.3390/land6020042](https://doi.org/10.3390/land6020042)
- Ríos Ramírez, G., & Porcayo Victoriano, C. (2019). Vivienda vernácula: la transformación a través de sistemas constructivos y tipología, Hueyapan, México. En C. Neves, Z. Salcedo Gutierrez, & O. Borges Faria (Ed.), *19° Seminario iberoamericano de arquitectura y construcción con tierra : conservación sostenible del paisaje, tierra y agua* (págs. 516-521). San Salvador, El Salvador: FUNDASAL/PROTERRA.



- RLD. (2015). *New Mexico earthen building materials code* New Mexico Administrative. New Mexico, USA: New Mexico Administrative Code, Construction Industries Division of the Regulation and Licensing Department.
- Rodríguez Licea, M. (2017). La pérdida y deterioro de la arquitectura tradicional a base de tierra en Colima, México. En C. Neves , Z. Salcedo Gutierrez, & O. Borges Faria (Ed.), *17º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (págs. 228-237). La Paz: FADUU-UMSA / PROTERRA.
- Rojat, F., Hamard, E., Fabbri, A., Carnus, B., & McGregor, F. (2020). Towards an easy decision tool to assess soil suitability for earth building. *Construction and Building Materials*, 257(119544). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119544>
- Romero Olguín, D. S., & Guerrero Baca, L. F. (2020). ADOBE VERNACULAR HOUSING TYPOLOGICAL ANALYSIS IN CALIMAYA DE DÍAZ GONZÁLEZ, STATE OF MEXICO. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-1-2020, 1005-1010. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-1005-2020>
- Rudofsky, B. (1964). *Architecture Without Architects. A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*. New York: The Museum of Modern Art.
- Rudofsky, B. (9-11-1964 to 7-2-1965). Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture. *Exhibition Catalogue*. Museum of Modern Art (MoMA), New York. Obtenido de <https://www.moma.org/calendar/exhibitions/3459>
- Ruiz Mendoza, M. (2022). *Caracterización físico-mecánica de adobes de la Huacana y Turicato, región Tierra Caliente, Michoacán, México (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil)*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Ruiz Rivera, N., & Galicia, L. (2016). La escala geográfica como concepto integrador en la comprensión de problemas socio-ambientales. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 89, 137-153. doi:[dx.doi.org/10.14350/rig.47515](https://doi.org/10.14350/rig.47515)
- Ruiz Sibaja, A., Vidal Sánchez, F., & Aranda Caballero, C. (2016). Estudio de la vulnerabilidad sísmica del centro histórico de Tapachula, Chiapas, con el método del índice de vulnerabilidad. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 15(1), 5-24.
- Ruiz Sibaja, J. A., & Vidal Sánchez, F. (Febrero de 2015). Caracterización mecánica de piezas de adobe frabricado en la región de Tuxtla Gutiérrez. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, IV(7), 131-154.
- Ruiz Torres, R. P., Castañeda Nolasco , G., & Trujillo Samayoa, R. (2018). Normatividad: Medición de propiedades térmicas de materiales para la construcción. En F. Córdova Canela, G. Castañeda Nolasco, & V. L. Díaz Núñez, *Experiencias de vivienda y*



- comunidades dignas, sustentables y resilientes* (págs. 153-172). Tuxtla Gutiérrez: Universidad de Guadalajara / Universidad Autónoma de Chiapas / Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables / Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Ruiz-Mendoza, M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Alonso-Guzman, E. M., Bernabe-Reyes, C., Lara-Gomez, C., . . . Espino-Gonzalez, C. U. (2022). Capillarity in adobes from la Huacana and Turicato in the Tierra Caliente zone in Michoacan, Mexico. *XXX International Materials Research Congress - IMRC 2022*.
- Ruiz-Mendoza, M., Sánchez-Calvillo, A., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H. L., Alonso-Guzmán, E. M., Navarrete-Seras, M. A., . . . Ramírez-Carranza, V. A. (2020). Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico y cálculo del módulo de elasticidad en adobes de Tierra Caliente. *15º Congreso Nacional de Ciencia. Tecnología e Innovación y Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán*. Morelia, Michoacán.
- Ruvalcaba Sil, J. L., Ramírez Miranda, D., Aguilar Melo, V., & Picazo, F. (September-October de 2010). SANDRA: a portable XRF system for the study of Mexican cultural heritage. *X-Ray Spectrom*, 39, 338-345.
- Ruvalcaba Sil, J. L., Ramírez Miranda, D., Aguilar Melo, V., & Picazo, F. (2010, September-October). SANDRA: a portable XRF system for the study of Mexican cultural heritage. *X-Ray Spectrom*, 39, 338-345.
- Ruvalcaba-Sil, J. L., Barba, L., Casanova-González, E., Mitrani, A., Muñoz, M., Rangel-Chavez, I., . . . Cañetas, J. (2021). Analytical Approach for the Study of Teotihuacan Mural Paintings from the Techinantitla Complex. *Minerals*, 11(508). doi:<https://doi.org/10.3390/min11050508>
- Sáez, S. (1999). *Vulnerabilidad Sísmica de Viviendas de Adobe (Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil)*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Civil.
- Salazar González, G. (2011). Las lecturas del espacio habitable. En G. Salazar González, E. M. Azevedo Salomao, C. R. Ettinger Mc Enulty, B. Paredes Guerrero, & L. A. Torres Garibay, *Lecturas del Espacio Habitable* (págs. 7-18). San Luis Potosí, S.L.P., México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- San Juan Victoria, C., Maldonado, C., Huerta, M. T., Dolores Morales, M., Barjau, L., Blanco, J. J., . . . Escobar, S. (1987). *Historias para temblar: 19 de septiembre de 1985* (1ª Edición ed., Vol. Colección Divulgación. Serie: Testimonios). México D.F., México D.F.: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Sánchez C., A., & Martínez R., G. (2018). Seismic analysis by macroelements of the monastery ensemble of San Miguel Charo, Michoacán. En A. Macchia, N. Masini, M. F. La Russa, & F. Prestileo (Ed.), *VI International Conference YOCOCU*.



- Dialogues in Cultural Heritage* (págs. 697-700). Matera, Italy: YOCOCU / CNR-IBAM (Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali).
- Sánchez Calvillo, A. (2017). Las problemáticas actuales en los centros históricos. Gentrificación y viralización. *Esempi di Architettura*.
- Sánchez Calvillo, A. (2017). *Proyecto de Restauración del Conjunto Conventual de San Miguel Charo, Michoacán (Tesis de Especialidad en Restauración de Monumentos y Sitios)*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Arquitectura, División de Estudios de Posgrado.
- Sánchez Calvillo, A. (2017). *Proyecto de Restauración del Conjunto Conventual de San Miguel Charo, Michoacán (Tesis de Especialidad en Restauración de Monumentos y Sitios)*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Arquitectura.
- Sánchez Calvillo, A., Alonso Guzmán, E. M., & López Núñez, M. (2021). Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 10, 9-29. doi:Doi: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.162>
- Sánchez Calvillo, A., Alonso Guzmán, E. M., & López Núñez, M. (2021). Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 10, 9-29. doi:Doi: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.162>
- Sánchez Calvillo, A., Ruiz Ruiz, R., Bocanegra Torres, J. I., García Díaz, P., Núñez Guzmán, E. A., Zalapa Damián, A., . . . Bedolla Arroyo, J. A. (2018). Comportamiento Mecánico de Suelos Lacustres del Estado de Michoacán, Caso Pátzcuaro-Zirahuén. En E. A. Aguilar, E. Bedolla, & C. A. León (Ed.), *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*. 15, págs. 708-715. Morelia, México: Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Sánchez Calvillo, A., Ruiz Ruiz, R., Bocanegra Torres, J. I., García Díaz, P., Núñez Guzmán, E. A., Zalapa Damián, A., . . . Bedolla Arroyo, J. A. (2018). Comportamiento Mecánico de Suelos Lacustres del Estado de Michoacán, Caso Pátzcuaro-Zirahuén. In E. A. Aguilar, E. Bedolla, & C. A. León (Ed.), *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*. 15, pp. 708-715. Morelia, México: Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Sánchez, A. (Productor), Sánchez, A., Machorro, J. D. (Escritores), & Sánchez, A. (Dirección). (2021). *Xirangua* [Película]. México. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=5T1tHXvgfjQ&t=2s>
- Sanchez, A., Alonso, E., & Bedolla, J. A. (2021). Point-load test assessment as study of the seismic vulnerability of the adobe buildings in Jojutla de Juarez, Mexico, after the 2017 earthquakes. In P. Roca, L. Pelà, & C. Molins (Ed.), *12th International*



- Conference on Structural Analysis of Historical Constructions* (pp. 769-780). Barcelona, Spain: International Centre for Numerical Methods in Engineering.
- Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Chávez, H., Navarrete, M., Arreola, M., . . . Miranda, O. (2022). Modificaciones de la envolvente de falla en suelos arcillosos con distintos estabilizadores volumétricos. *Revista ALCONPAT*, 12(2), 227-247. doi:DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.595>
- Sánchez, A., Varum, H., Martins, T., & Fernández, J. (2022). Mechanical properties of adobe masonry for the rehabilitation of buildings. *Construction and Building Materials*, 333(127330). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127330>
- Sanchez-Calvillo, A., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Navarrete-Seras, M. A., Ruvalcaba-Sil, J. L., Navarro-Ezquerria, A., & Mitrani, A. (2021). Characterization of adobe blocks: Point-load assessment as a complementary study of damaged buildings and samples. *Heritage*, 4(2), 864-888. doi:<https://doi.org/10.3390/heritage4020047>
- Sanchez-Calvillo, A., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Navarrete-Seras, M. A., Ruvalcaba-Sil, J. L., Navarro-Ezquerria, A., & Mitrani, A. (2021). Characterization of adobe blocks: Point-load assessment as a complementary study of damaged buildings and samples. *Heritage*, 4(2), 864-888. doi:<https://doi.org/10.3390/heritage4020047>
- Sánchez-Calvillo, A., Alonso-Guzmán, E. M., Ortega-Heras, J., & Solís-Sánchez, A. (2022). Identificación, documentación y catalogación de viviendas de tierra en Michoacán para su estudio y caracterización. In A. Ferreiro, Z. Salcedo Gutierrez, & C. Neves (Ed.), *20° SIACOT: Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 478-488). Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador.
- Sánchez-Calvillo, A., Alonso-Guzmán, E. M., Ortega-Heras, J., & Solís-Sánchez, A. (2022). Identificación, documentación y catalogación de viviendas de tierra en Michoacán para su estudio y caracterización. In A. Ferreiro, Z. Salcedo Gutierrez, & C. Neves (Ed.), *20° SIACOT: Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 478-488). Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador.
- Sánchez-Calvillo, A., Alonso-Guzmán, E. M., Ruvalcaba-Sil, J. L., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H. L., Bedolla-Arroyo, J. A., . . . Velázquez-Pérez, J. A. (2020). Colorimetry of Clays as a Tool to Identify Soil Materials for Earthen Buildings Restoration. *Key Engineering Materials*, 862, 56-60. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.862.56>
- Sanchez-Calvillo, A., Preciado-Villicaña, D., Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Chavez-Garcia, H. L., Ruiz-Mendoza, M., & Martinez-Molina, W. (2020). Analysis and characterisation of adobe blocks in Jojutla de Juarez, Mexico. Seismic vulnerability and loss of the earthen architecture after the 2017 Puebla Earthquake. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-1-2020, 1133-1140. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-1133-2020>



- Sánchez-Calvillo, A., Solís-Sánchez, A., & Pérez-Coeto, M. Á. (2021). El proyecto DBMC 2020 y sus principales experiencias y contribuciones a la vivienda vernácula del estado de Michoacán. *XI Congreso Internacional de la Red de Vivienda y Hábitat Sustentable de México*. Tuxtla Gutiérrez, México.
- Santos, M. (1996). *Metamorfosis del espacio habitado*. Barcelona: Oikos-Tau S.L.
- Santos, M. (2000). *La naturaleza del espacio. Técnica y tiempo. Razón y emoción*. Barcelona: Ariel.
- Sanz A., J. H., Duque C., E., & Gómez Estrada, S. (2010). La resistividad del suelo en función de la frecuencia. *Scientia Et Technica*, XVI(44), 1-6.
- Schauppenlehner, T., Eder, R., Ressar, K., Feiglstorfer, H., Meingast, R., & Ottner, F. (2021). A Citizen Science Approach to Build a Knowledge Base and Cadastre on Earth Buildings in the Weinviertel Region, Austria. *Heritage*, 4, 125-139. doi:<https://doi.org/10.3390/heritage4010007>
- Schroeder, H. (2012). Modern earth building codes, standards and normative development. En M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Edits.), *Modern Earth Buildings. Materials, Engineering, Constructions and Applications* (Woodhead Publishing Series in Energy ed., págs. 72-109). Sawston, United Kingdom: Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857096166.1.72>
- Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente. (2015). *Programa de Rehabilitación de Vivienda Tradicional en la Ruta Don Vasco. Fase I*. Morelia, Michoacán: Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo.
- Servicio Sismológico Nacional. (2017). *Reporte especial. Sismo de Tehuantepec (2017-09-07 23:49 Mw 8.2)*. UNAM, Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Servicio Sismológico Nacional. (2017). *Reporte especial. Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)*. UNAM, Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Shabani, A., Kioumarsi, M., & Zucconi, M. (2021). State of the art of simplified analytical methods for seismic vulnerability assessment of unreinforced masonry buildings. *Engineering Structures*, 239(112280). doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112280>
- Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015). Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. *International Journal of Sustainable Built Environment*(4), 348-358.
- Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015). Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. *International Journal of Sustainable Built Environment*(4), 348-358.



- Shmite, S. M., & Nin, M. C. (2006). Geografía cultural. Un recorrido teórico a través del diálogo de autores contemporáneos. *Huellas*(11), 168-194. doi:<http://dx.doi.org/10.19137/huellas>
- Silva, A., Oliveira, I., Mirão, J., & Faria, P. (2020). Vernacular Caramel's Adobe Masonry Dwellings - Material Characterisation. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:<https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1751343>
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., & Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*(28), 36-44.
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., & Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*(28), 36-44.
- Solís Sánchez, A. (2018). *Patrimonio edificado en las tenencias de San Nicolás Obispo y Tacicuaró en Morelia. Memoria fotográfica (Tesis de Licenciatura en Arquitectura)*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Spence, R. (2007). Saving lives in earthquakes: successes and failures in seismic protection since 1960. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5, 139-251. doi:DOI 10.1007/s10518-006-9028-8
- Spence, R. (2009). Earthquake Risk Mitigation - The Global Challenge. En A. Tugrul Tankut (Ed.), *Earthquakes and Tsunamis. Civil Engineering Disaster Mitigation Activities Implementing Millenium Development Goals* (Vols. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, págs. 35-52). Middle East Technical University, Ankara, Turkey: Springer. doi:10.1007/978-90-481-2399-5
- Sumerente, G., Lovon, H., Tarque, N., & Chácara, C. (2020). Assessment of Combined In-Plane and Out-of-Plane Fragility Functions for Adobe Masonry Buildings in the Peruvian Andes. *Frontiers in Built Environment*, 6(52). doi:10.3389/fbuil.2020.00052
- Sunkar, M., & Aksoy, H. S. (May de 2015). Adobe Buildings Damaged during Kovancılar (Elazığ) Earthquake on March 8, 2010 and their Earthquake Resistances. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4), 943-951. doi:10.1007/s12205-012-0400-8
- Taallah, B., & Guettala, A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104(1), 52-62. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>
- Tarque, N., Crowley, H., Varum, H., & Pinho, R. (2009). Structural properties of adobe dwellings in Cusco (Peru) for seismic risk assessment. *Mediterra*, 4.



- Tassios, T. P. (2009). Seismic Protection of Monuments. En A. Tugrul Tankut (Ed.), *Earthquakes and Tsunamis. Civil Engineering Disaster Mitigation Activities Implementing Millennium Development Goals* (Vols. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Volume 11). Middle East Technical University, Ankara, Turkey: Springer. doi:10.1007/978-90-481-2399-5
- Tepale Gamboa, B. A., Torres Garibay, L. A., & Ochoa Acosta, J. A. (2020). Aproximación histórica a los orígenes de la construcción con tapia en México durante el siglo XVI. *Gremium*, 7(NE2), 24-37. Retrieved from <https://editorialrestauro.com.mx/gremium/>
- The Getty Conservation Institute. (2011). *Material analysis - in situ and laboratory material characterization*. The Earthen Architecture Initiative. J. Paul Getty Trust.
- Thoreau, H. D. (1854). *Walden o la vida en los bosques*. Grupo Editorial Tomo.
- Torraca, G. (2009). *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- Torres Uicab, C. S. (2018). *Apropiación socio-física en la vivienda rural como manifestación del habitar humano, Quintana Roo, México (Tesis de doctorado)*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- UNESCO. (1972). *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural*. París: UNESCO.
- Uviña Contreras, F., & Guerrero Baca, L. (2007). El uso de la cal en la conservación de estructuras de tierra. *Proceedings of the Fourth International Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest*. El Rito, NM.
- Valenzuela, C. O. (2006). Contribuciones al análisis del concepto de escala como instrumento clave en el contexto multiparadigmático de la Geografía contemporánea. *Investigaciones geográficas, Boletín* 59, 123-134.
- Varum, H., Costa, A., Fonseca, J., & Furtado, A. (2015). Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction. *Procedia Engineering*(114), 714-721. doi:doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.015
- Varum, H., Costa, A., Fonseca, J., & Furtado, A. (2015). Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction. *Procedia Engineering*(114), 714-721. doi:doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.015
- Vega, P., Juan, A., Guerra, M. I., Morán, J. M., Aguado, P. J., & Llamas, B. (2011). Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3020-3023. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.02.003>
- Vegas, F., Mileto, C., Diodato, M., & Songel González, J. (2020). Understanding the dimension of historical evolution. In L. Dipasquale, S. Mecca, & M. Correia (Eds.),



- From Vernacular to World Heritage* (pp. 44-51). Firenze, Italy: Firenze University Press.
- Vicente, E., & Torrealva, D. (2018). Mechanical properties of historical adobe in Perú. En T. Joffroy, H. Guillaud, & C. Sadozaï (Ed.), *Terra Lyon 2016: Articles sélectionnés pour publication en ligne / articles selected for on-line publication / artículos seleccionados para publicación en línea* (págs. 1-11). Villefontaine: CRAterre.
- Vicente, R. d. (2008). *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra (Tese da Engenharia Civil)*. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- Vicente, R., Ferreira, T. M., & Maio, R. (2015). Seismic Risk Mitigation of Old Urban Centres: Characterization and Seismic Vulnerability Assesment of the Ribeirinha Neighborhood of Faro, portugal. *Territorium*(22), 283-290. doi:DOI: http://dx.doi.org/10.14195/1647-7723_22_22
- Vicente, R., Ferreira, T., & Maio, R. (2014). Seismic Risk at the Urban Scale: Assessment, Mapping and Planning. *Procedia Economics and Finance*, 18, 71-80. doi:doi: 10.1016/S2212-5671(14)00915-0
- Vicente, R., Parodi, S., Lagomarsino, S., Varum, H., & Mendes Silva, J. (2011). Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal. *Bull Earthquake Eng*, 9, 1067–1096. doi:DOI 10.1007/s10518-010-9233-3
- Vidal, F., Ruiz Sibaja, J. A., & Rodríguez Troyano, E. (2018). Assessing seismic vulnerability of buildings at urban scale: case study of the historic city centre of Tuxtla Gutierrez, Mexico. *12th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction*. Yokohama, Japan.
- Villalobos, R. (2017). Construcción con tierra, evolución e identidad situada. *17º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con tierra "Tierra-identidades"* (págs. 595-603). La Paz, Bolivia: PROTERRA / FAADU UMSA.
- Viscarra Rossel, R. A., Cattle, S. R., Ortega, A., & Fouad, Y. (2009). In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 150(3-4), 253-266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025>
- Viscarra Rossel, R. A., Minasny, B., Roudier, P., & McBratney, A. B. (2006). Colour space models for soil science. *Geoderma*, 133(3-4), 320-337. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.017>
- Whitman, R. V., Reed, J. W., & Hong, S. T. (1973). Earthquake Damage Probability Matrices. *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, 2, pp. 2531-2540. Rome, Italy.



- Yamín Lacouture, L. E., Phillips Bernal, C., Reyes Ortiz, J. C., & Ruiz Valencia, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 20(2), 286-303.
- Yetgin, Ş., Çavdar, Ö., & Çavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*(22), 222-227.
- Yetgin, Ş., Çavdar, Ö., & Çavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*(22), 222-227.
- Zafra Pinacho, D., & Gastéllum Alvarado, J. M. (2015). Catálogo de la vivienda vernácula del estado de Oaxaca. Caso: distrito de Tlacolula. *Estudios sobre conservación, restauración y museología*, 2, 167-181.
- Zamudio Pérez, A. (Enero 2018). *Mecanismos de deterioro de la ignimbrita. Zona de Monumentos Históricos de Morelia (Tesis para obtener el grado de Maestro en Arquitectura, investigación y Restauración de Sitios y Monumentos)*. Morelia, Michoacán: División de Estudios de Posgrado, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Zevi, B. (1951). *Saber ver la arquitectura*. Buenos Aires: Poseidon.
- Zhai, Y., Chen, S., & Ouyang, Q. (2019). GIS-Based Seismic Hazard Prediction System for Urban Earthquake Disaster Prevention Planning. *Sustainability*, 11. doi:doi:10.3390/su11092620
- Zuccaro, G., Perelli, F. L., De Gregorio, D., & Cacade, F. (2021). Empirical vulnerability curves for Italian masonry buildings: evolution of vulnerability model from the DPM to curves as a function of acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 3077-3097. doi:https://doi.org/10.1007/s10518-020-00954-5