



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio

ANÁLISIS ESPACIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE PELIGROS EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE OAXACA

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACION DEL
TERRITORIO**

Presenta
ING. MALENY MÁRQUEZ LÓPEZ

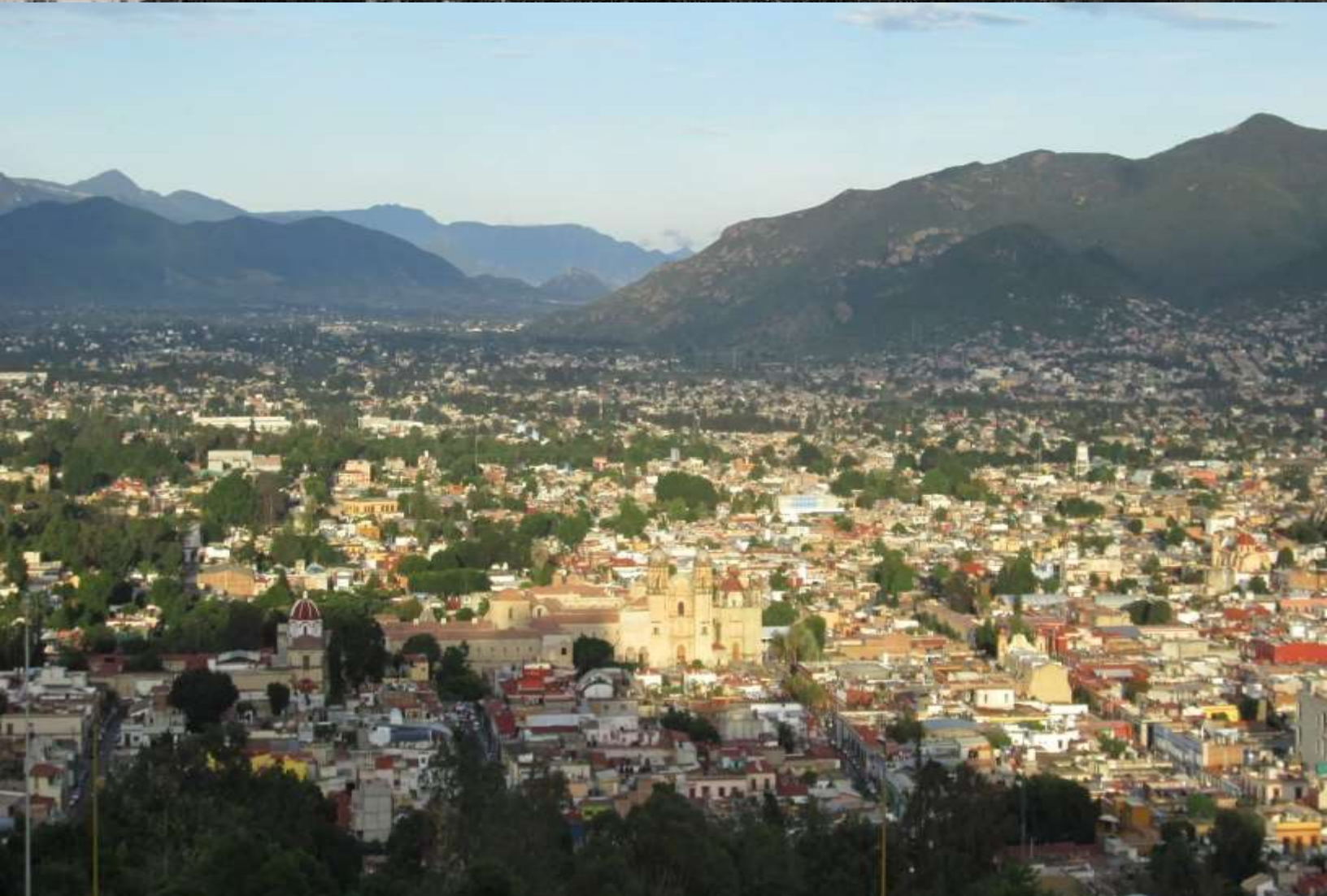
Directora de tesis
Dra. Erna Martha López Granados

Co-Director
Dr. Ángel G. Figueroa Soto



Morelia, Michoacán

Agosto 2022





*Sucedan cosas malas en el mundo, como guerra, desastres naturales, enfermedades...
Pero de esas situaciones siempre surgen historias de personas ordinarias que hacen cosas extraordinarias.*

Daryn Kagan

DEDICATORIA



A Dios, por ser mí guía y fuerza espiritual en cada momento.



A la memoria póstuma de mi padre Pánfilo Antonio Gustavo Márquez Cordero, quién incondicionalmente confió y me apoyo al inicio de esta y de muchas otras aventuras.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrados y la realización del presente trabajo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), particularmente al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) donde tuve la oportunidad de continuar con mis estudios de formación académica.

A mi tutora Dra. Erna López Granados, por sus enseñanzas, su paciencia y apoyo durante la realización de mis estudios y en la realización del presente trabajo.

A mi co-asesor Dr. Ángel Figueroa Soto, por sus enseñanzas, su apoyo y ayuda, brindada para la realización del presente trabajo. Agradezco sus atenciones, su confianza y paciencia para resolver mis dudas e inquietudes durante mi estancia en el instituto y en el desarrollo de trabajo de campo.

A la Dra. Ruth Alfaro Cuevas, por todo su apoyo en la realización del proceso para presentar este trabajo.

A mis sinodales por el tiempo dedicado para la revisión de esta tesis, sus comentarios y sugerencias.

A los catedráticos del INICIT, por su comprensión, enseñanzas y apoyo que me brindaron durante la estancia en el Instituto.

A mi familia que constantemente me hace valorar su compañía y apoyo. A mi mamá y mi hermana que se tomaron su tiempo para acompañarme en la mayor parte de los recorridos en la zona de estudio. Doy gracias a Dios por ponerlas en mi camino.

A mis amigos, a los presidentes municipales de Soledad Etna, Nazareno, Etna, San Agustín de las Juntas, San Bartolo Coyotepec, Santa María Coyotepec, Cuilapam de Guerrero, y a las personas que me confiaron un espacio en sus oficinas y/u hogares para la instalación del equipo sísmico durante los meses de noviembre 2020 a enero del 2021.

A cada una de esas personas que me acompañaron durante los recorridos a campo, con la finalidad de conocer la cobertura vegetal a lo largo de la zona de estudio.

RESUMEN

La Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO) es el área metropolitana conformada por su municipio homónimo Oaxaca de Juárez y 23 municipios más del estado de Oaxaca. El proceso de desconcentración demográfica ha ocasionado un crecimiento de la zona urbana de forma fragmentada, sin estructura, ni cohesión física y social que desencadena la creación de nuevos asentamientos con falta de infraestructura adecuada y en zonas susceptibles a peligros naturales. La encuesta intercensal del 2015 reportó una población de la zona metropolitana de 671 447 (2015) que para 2020 incremento a 773 415 habitantes. La zona metropolitana se conforma por 24 municipios, de los cuales solo 11 de ellos cuentan con atlas de riesgos previos al 2015, por lo que es necesario: analizar, generar y actualizar los mapas de peligro que contemplen la mayor cantidad de estos municipios. Por su ubicación geográfica, el estado de Oaxaca, así como es vulnerable a fenómenos de origen geológico e hidrometeorológico, por lo que, en este trabajo, se presenta el mapa de la distribución de los efectos de sitio generados a partir del análisis de microtemores empleando la técnica de cocientes espectrales H/V. El mapa de susceptibilidad a inundaciones fue realizado mediante la evaluación multicriterio construida a partir de criterios ponderados mediante el proceso jerárquico analítico. En ambos casos fue necesaria la recopilación de información geológica, geomorfológica, pendientes, edafológica, distancia a ríos y la actualización del mapa de cobertura y uso de suelo mediante la interpretación visual de imágenes satelitales Sentinel, con la finalidad, de tener una perspectiva general de la zona de estudio y su inferencia en cada uno de estos fenómenos. Los resultados obtenidos, proporcionan información complementaria a los estudios realizados previamente en la zona y constituyen un apoyo en la toma de decisiones para la prevención, mitigación y atención de emergencias que puedan afectar a la población futura.

Palabras clave: Oaxaca, microtemores, cocientes espectrales, evaluación multicriterio, susceptibilidad.

ABSTRACT

The Metropolitan Zone of Oaxaca (ZMO) is the metropolitan area made up of its homonymous municipality, Oaxaca de Juárez, and 23 more municipalities in the state of Oaxaca. The process of demographic deconcentration has caused a growth of the urban area in a fragmented way, without structure, or physical and social cohesion that triggers the creation of new settlements with a lack of adequate infrastructure and in areas susceptible to natural hazards. The 2015 intercensal survey reported a population of the metropolitan area of 671,447 (2015) which by 2020 increased to 773,415 inhabitants. The metropolitan area is made up of 24 municipalities, of which only 11 of them have atlases of risks prior to 2015, so it is necessary: to analyze, generate and update hazard maps that include the largest number of these municipalities. Due to its geographical location, the state of Oaxaca, as well as being vulnerable to phenomena of geological and hydrometeorological origin, is why, in this work, the map of the distribution of the site effects generated from the analysis of microtremors using the H/V spectral ratio technique. The flood susceptibility map was made through the multicriteria evaluation built from weighted criteria through the analytical hierarchical process. In both cases, it was necessary to collect geological, geomorphological, slope, edaphological information, distance to rivers, and update the map of coverage and land use through the visual interpretation of Sentinel satellite images, in order to have a general perspective of the study area and its inference in each of these phenomena. The results obtained provide complementary information to the studies previously carried out in the area and constitute support in decision-making for the prevention, mitigation and care of emergencies that may affect the future population.

Keywords: Oaxaca, microtremors, spectral ratios, multicriteria evaluation, susceptibility

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Conceptos básicos de la gestión integral del riesgo. FUENTE: INDECI, Perú.
- Figura 2 Mapa de riesgo por incendios forestales para la población de Yucatán Fuente: Zepeda, 2003 en CENAPRED, 2021.
- Figura 3 Clasificación de peligros naturales (EM-DAT).
- Figura 4 a) Número de desastres por subgrupo de desastres por año (2000-2019) y b) Número de desastres por subgrupo (2000-2019) Tomado de EM-DAT/CRED (2020).
- Figura 5 Principales países con el número más alto de desastres por subgrupo (2000-2019), Tomado de EM-DAT/CRED (2020).
- Figura 6 Tipos de desastres por eventualidad en el año. Elaboración propia a partir de los datos de EM-DAT/CRED (2020).
- Figura 7 Infografía de los aspectos más relevantes de Sentinel-2, obtenida de Copernicus Europe's eyes on Earth.
- Figura 8 El carenado Vega que sostiene el satélite Sentinel-2A en el pórtico de lanzamiento en el puerto espacial europeo en Kourou, Guayana Francesa. (Tomado de la Agencia Espacial Europea).
- Figura 9 Constelación de satélites Sentinel 2A y 2B. (Tomado de la Agencia Espacial Europea).
- Figura 10 Bandas espectrales MSI versus su relación espacial. Tomado de Gatti (2018).
1. Ánimas Trujano, 2. Magdalena Apasco, 3. Nazareno Etlá, 4. Oaxaca de Juárez, 5. San Agustín de las Juntas, 6. San Agustín Yatareni, 7. San Andrés Huayapam, 8. San Antonio de la Cal, 9. San Bartolo Coyotepec, 10. San Jacinto Amilpas, 11. San Lorenzo Cacaotepec, 12. San Pablo Etlá, 13. San Sebastián Tutla, 14. Santa Cruz Amilpas, 15. Santa Cruz Xoxocotlán, 16. Santa Lucía del Camino, 17. Santa María Atzompa, 18. Santa María Coyotepec, 19. Santa María del Tule, 20. Santo Domingo Tomaltepec, 21. Soledad Etlá, 22. Tlaxiáctac de Cabrera, 23. Villa de Etlá and 24. Villa de Zaachila. Fuente: Elaborado a partir de datos obtenidos del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).
- Figura 11 Mapa geológico-estructural. Fuente: Elaborado a partir de datos obtenidos del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).
- Figura 12 Terrenos tectonoestratigráficos de México de acuerdo a Sedlock et. al. (1993). T. terreno tarahumara; M. Mixteco, Z: Zapoteco; CU Cuicateco; TMVB Cinturón volcánico Trasmexicano.
- Figura 13 Terrenos cristalinos de Oaxaca (Ortega-Gutierrez, 1988). De oeste a este, el sur de México comprende los terrenos: Guerrero (náhuatl), Xolapa (Chatino), Mixteca, Oaxaca (Zapoteco), Juárez (Cuicateco) y Maya (los nombres entre paréntesis son los utilizados por Sedlock et al., 1993).
- Figura 14 Contacto de bajo ángulo entre los terrenos de Oaxaca y Juárez deducido de datos magnetotelúricos (Arzate-Flores, 2016).
- Figura 15 Fallas circundantes en la zona de estudio. Fuente: Elaborado a partir de la cartografía del Servicio Geológico Mexicano (2007).
- Figura 16 Sismotectónica de la República Mexicana (sgm.gob.mx). Mapa de las placas tectónicas que interactúan en México. Las flechas rojas representan la dirección de movimiento de cada placa con respecto a la placa de Norteamérica, y el número cerca de la flecha representa su velocidad en cm/año. Los colores de las fronteras entre placas corresponden al tipo de frontera (divergente, convergente o transcurrente) de acuerdo a los modelos en la esquina superior derecha. Los puntos representan epicentros de sismos.

- Mapa modificado (González, 2019) de Kostoglodov y Pacheco (1999) y figura de modelos modificada de <https://bjolley.weebly.com/plate-tectonics-quiz-1-study-guide.html>.
- Figura 18 Regiones sismogenéticas para México. Esta clasificación también considera la profundidad en la Trinchera Mesoamericana por lo que hay regiones a profundidad que abarcan la misma extensión superficial que otras regiones (Zúñiga et al., 2017).
- Figura 19 Subdivisión de la región sismogenética NAM para México, (Zúñiga, 2017).
- Figura 20 Niveles sucesivos de percepción de geoformas desde diversas alturas de observación (Zinck, 2012; 1980).
- Figura 21 Megabloques y macrobloques del relieve de las zonas de sutura de transición interplacas oceánicas-continentales Cocos-norteamericana-Caribe. El megabloque de la Sierra Madre del Sur está compuesto de 9 macrobloques: I) Jalisco, II) Colima, III) Michoacán, IV) Guerrero Occidental, V) Guerrero Oriental, VI) Oaxaca Occidental, VIII) Tehuantepec y IX) Chiapas.
- Figura 22 Subprovincias fisiográficas (INEGI)
- Figura 23 Tipos de paisaje geomorfológico (Zinck, 1980). 1: valle; 2: planicie; 3: altiplanicie; 4: piedemonte; 5: lomerío; 6: montaña.
- Figura 24 Atributos morfográficos y morfométricos. ZInck (1988).
- Figura 25 Mapa geomorfológico. Fuente: Elaborado a partir de datos obtenidos del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).
- Figura 26 Perfil de suelo de Brasil. © ISRIC, www.isric.nl
- Figura 27 Franco limoso marrón rojizo derivado de material de lavado de taludes, China.
- Figura 28 Perfil de suelo fluvisol de Sudáfrica, que muestra estratos típicos de sedimentos depositados en lagos, ríos u océanos. ISRIC.
- Figura 29 Leptosol, sobreyace a roca altamente calcárea. Campeche, México. INEGI, 2015.
- Figura 30 Carlos Saracco Alvarez. Sierra alta con meseta Sierra Alica, Nayarit.
- Figura 31 Lomerío típico en inicio de transición con llanura costera. Casas Viejas, Veracruz, México.
- Figura 32 Perfil de suelo de Regosol de Ghana, sobre sedimento no consolidado. ISRIC,
- Figura 33 Suelo de Vertisol de la India. ISRIC.
- Figura 34 Suelos dominantes en la Zona Metropolitana de Oaxaca. Digitalizado a partir de información de unidades de suelo serie II INEGI.
- Figura 35 Georreferenciación de imagen SENTINEL 2020 a partir de ortofotos de 1994 obtenidas del portal digital de INEGI. FUENTE: Elaboración propia, obtenida del programa SIG.
- Figura 36 Imágenes multibanda en a) color natural, b) y c) falso color. Fuente: Elaboración propia a partir de la combinación de bandas de la imagen Sentinel 2-A.
- Figura 37 Fotografías obtenidas de las visitas a campo que corresponden a los tipos de cubierta vegetal y antrópica en la ZMO.
- Figura 38 Clasificación general de la cobertura dominante en la Zona Metropolitana de Oaxaca.
- Figura 39 Mapa de pendientes generado a partir de la clasificación de Lugo (1988)
- Figura 40 Comportamiento de las Ondas Sísmicas en la roca sólida y en sedimentos desde el punto donde se origina el sismo denominado hipocentro o foco sísmico. (Zambrana, 2019)

- Figura 41 Estructuras y configuraciones tipo que pueden dar lugar a efectos de sitio. A) Capas sedimentarias horizontales sobre un substrato rocoso; b) relleno sedimentario de un valle; c) discontinuidades laterales bruscas; d) relieve. Bard et.al. 1995.
- Figura 42 Un contraste de impedancias provoca un cambio en las características geométricas de las ondas (Tomado de Argudo, J.F.).
- Figura 43 Esquema que ilustra la gravedad de la ocurrencia de daños en las características topográficas (figura tomada de Athanasopoulos et al., 1998).
- Figura 44 Comportamiento de los microtemores dependiendo el tipo de suelo. Tipo I: rocas y gravas arenosas duras del terciario. Tipo II: gravas arenosas, arcillas arenosas duras y otros suelos de tipo aluvial gravoso con espesores de 5 metros o más. Tipo III: suelo aluvial con espesor de 5 metros o más. Tipo IV: suelo aluvial de depósitos deltaicos blandos, suelo superficial y limos con espesores de 30 metros o más (CENAPRED, 2017).
- Figura 45 Mapa de las primeras estaciones autónomas (izquierda). Sismógrafo Wiechert (centro). Tomado del Servicio Sismológico Nacional (SSN)
- Figura 46 Epicentro de sismos que han afectado al estado de Oaxaca ($M > 6.0$). El tamaño indica la magnitud para cada uno de los sismos que han causado mayores afectaciones en el estado. Elaboración propia a partir de la información del catálogo sísmico del SSN (Tabla 12).
- Figura 47 a); Curvas de isoperiodos (Lermo, 1991) b) Mapa de isoperiodo para la Ciudad de Oaxaca (Pérez, 2002) y c) Zonación preliminar propuesta (Castellanos, 2003).
- Figura 48 a) Sismometro Trillium 120s y b) Sensor DataCube
- Figura 49 Análisis de los cocientes espectrales para la Estación 13
- Figura 50 Cocientes espectrales para los puntos de medición en la ZMO
- Figura 51 Mapa de microzonificación sísmica (por agrupación de familias).
- Figura 52 Mapa de microzonificación sísmica para la ZMO utilizando el método geoestadístico Kriging.
- Figura 53 Metodología empleada para la elaboración del mapa de microzonificación sísmica
- Figura 54 Mapa de inundaciones obtenido del análisis multicriterio. Elaborado en el programa Ilwis Academic 3.3.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Tomado de International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)
Tabla 2	Bandas espectrales y su relación espacial.
Tabla 3	Resumen de las principales características de las regiones sismotectónicas de México (Zúñiga, 2017)
Tabla 4	Resultados de parámetros estimados para cada región sismogenética. (Zúñiga, 2017).
Tabla 5	Pasos metodológicos para obtener el mapa geomorfológico
Tabla 6	Resumen de las unidades de paisaje obtenidas de la interpretación geomorfológica.
Tabla 7	Clasificación de suelo en base a la Referencial Mundial del Recurso Suelo publicado en 1999 por la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo, Centro Internacional de referencia e Información en Suelos (ISRIC) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO/UNESCO).
Tabla 8	Suelos de los Valles Centrales de Oaxaca (Vásquez, 2018).
Tabla 9	Leyenda generalizada y específica
Tabla 10	Tabla de clasificación de pendientes Lugo, 1988
Tabla 11	Clasificación de microtemores.
Tabla 12	Sismicidad histórica del estado de Oaxaca. FUENTE: Modificado del catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional (SSN).
Tabla 13	Coordenadas geográficas de los sitios de microtemores medidos, periodos y frecuencias fundamentales para cada sitio y tipo de suelo.
Tabla 14	Factores condiciones utilizados para evaluar la susceptibilidad a inundaciones en el programa Ilwis Academic

CAPITULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2 OBJETIVO GENERAL	4
1.3 OBJETIVO ESPECIFICO	4
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN.....	5
2.2 Clasificación de peligros y zonas geográficas	7
2.1 Susceptibilidad.....	9
2.4 Imágenes satelitales.....	10
CAPITULO III ZONA DE ESTUDIO.....	14
3.1 Ubicación	14
3.2 Geología.....	15
3.3 Geología estructural	17
3.4 Sismotectónica	22
3.5 Fisiografía	25
3.6 Edafología.....	31
3.7 Cobertura	34
3.8 Pendientes.....	38
CAPITULO IV MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA	41
4.1 Efecto de sitio	41
4.2 Microtremores.....	43
4.3 Técnica de Nakamura	44
4.4 Historia sísmica de la región	45
4.5 Metodología	50
CAPITULO V MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES	56
5.1 Método de evaluación multicriterio	56
5.2 Metodología	57
5.3 Resultados.....	58
CAPITULO VI DISCUSION DE RESULTADOS.....	59
CAPITULO VII CONCLUSIONES	61
CAPITULO VIII BIBLIOGRAFÍA.....	62

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

Los desastres causados por los peligros naturales han causado una gran cantidad de pérdidas humanas e infraestructura económica y social, así como, un impacto negativo en los ecosistemas frágiles existentes y en el desarrollo socioeconómico del país afectado. La región de América Latina y del Caribe (LAC), se considera la segunda región más propensa a desastres naturales en el mundo, por su situación geográfica, condiciones climáticas, geológicas, y tectónicas, afectando entre el 2000 y 2019 a más de 152 millones de personas (OCHA, 2020). Por estas mismas razones, México, es susceptible a desastres de origen geológico, sin embargo, los de origen hidrometeorológicos son los que reportan mayor cantidad de daños y pérdidas, ya que tan solo en el 2020 provocaron el 82.8% del valor de las afectaciones totales generadas.

Es cierto que los peligros naturales causan daños, no obstante, las acciones humanas pueden llegar a incrementar o reducir la vulnerabilidad ante estos riesgos y desastres. Los cambios en los patrones demográficos, políticos y socioeconómicos, tales como: el crecimiento poblacional, la pobreza, la inexistencia de normas de construcción, una expansión urbana descontrolada a zonas de alto riesgo y falta de prevención financiera de desastres; la acentuada dependencia económica de actividades agrícolas con alta exposición a variaciones climáticas y huracanes; la creciente degradación del medio ambiente y modificación en el paisaje y cambios de usos de suelo, tanto a escala local como global; y la presencia de procesos de gran escala, que van desde la deforestación de determinados territorios hasta el cambio climático, son factores que contribuyen a una expansión urbana descontrolada hacia zonas de alto riesgo y consecuentemente a la ocurrencia de desastres (CEPAL, 2014).

La incidencia de peligros naturales, sus efectos en la sociedad y su entorno, nos obliga a desarrollar y hacer uso de herramientas y procedimientos para diagnosticar el nivel de peligro y riesgo que se tiene en el país, a nivel regional e idealmente a nivel local, dado la heterogeneidad del relieve mexicano, la geología y el clima. Algunas herramientas son las técnicas cualitativas como entrevistas, diarios de campo, análisis documental; técnicas cuantitativas, como estadísticas, medidas de tendencia central, probabilidad; representaciones gráficas como mapas, redes, diagramas, fotografías aéreas, imágenes satelitales; y sistemas de información geográfica (SIG), asistiendo de manera eficaz a procesos de planificación urbana, regional y ordenación del territorio.

Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten editar, procesar y analizar datos georreferenciados para generar información espacial, en pequeñas y grandes áreas de trabajo y de difícil accesibilidad, con la ventaja de un ahorro de costo y tiempo y con la facilidad de manejar una mayor cantidad de datos que de forma manual resultaría muy complicado. El limitante de esta herramienta como auxiliar del manejo de peligros y planificación del territorio, es la cantidad y calidad de la información y material cartográfico disponible; así como, de la capacidad del analista. El uso de imágenes satelitales proporciona una gran cantidad de datos espaciales contiguos distribuidos a lo largo de extensas áreas geográficas. Estas propiedades les confieren la capacidad de detectar, reconocer e identificar coberturas de suelo, así como medir numerosas propiedades biofísicas y bioquímicas asociadas a ellas, ofreciendo ventajas en comparación con métodos in situ, que muchas veces requieren de mediciones en terreno que pueden resultar prohibitivas a amplias escalas, debido a limitantes de accesibilidad, tiempo y recursos (Lillesand et al., 2004; Aronoff 2005; Eastman 2006; Peña, 2007)

La evaluación multicriterio puede ser vista como un método de apoyo para la toma de decisiones a partir de varios criterios comunes. Estrictamente, puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir los procesos de toma de decisión, investigando un número de alternativas a la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto (Barredo, 1996). La valoración comparativa de las alternativas se realiza mediante la utilización de criterios, que, integrados en un procedimiento de cálculo determinado, permiten la ordenación de estas.

Comprender y cuantificar los peligros, es sin duda el primer paso decisivo para saber establecer procedimientos y medidas eficaces de mitigación para reducir sus efectos. A nivel nacional, el estado de Oaxaca es una de las regiones con mayor sismicidad en México, asociada al proceso de subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica (Nuñez-Cornú, 1989). Este entorno tectónico produce sismos a lo largo de la zona de subducción y sismos superficiales intraplaca (Garduño et al., 2019), probablemente, relacionados con la Falla Oaxaca. Asimismo, predominan los peligros de origen hidrometeorológico por las precipitaciones pluviales extremas asociadas con la entrada al continente de huracanes y tormentas tropicales entre los meses de junio y noviembre.

La Zona Metropolitana de Oaxaca se caracteriza por una zona consolidada y continua al centro de la Ciudad de Oaxaca de Juárez, sin embargo, a los límites de cada municipio que la constituye se identifica una ciudad poco consolidada, desfragmentada y de baja densidad poblacional. Los asentamientos humanos irregulares representan una amenaza latente al ubicarse en zonas de riesgo, como son las laderas de lomeríos y montañas, así, como en los bordes adyacentes de los

ríos, debido al encarecimiento y comercialización ilegal de predios. Lo anterior, se ve reflejado en la urbanización de espacios rurales que eran destinados a la producción de maíz, frijol, calabaza, tomate, alfalfa, chile, entre otros. Ante estos motivos es importante identificar las características que un espacio sea susceptible a sufrir los efectos de un evento natural, ya que, los resultados obtenidos incrementan y actualizan el nivel de conocimiento del área y constituyen una primera herramienta valiosa en la gestión de riesgos y la planificación del territorio para prevenir o reducir el nivel de riesgo.

El presente trabajo se integra en cinco capítulos, el primero nos introduce a las problemáticas, la justificación y los objetivos del presente trabajo. Posteriormente, en el capítulo dos se realiza una breve revisión de conceptos relacionados con la gestión de riesgos y su clasificación. En el tercer capítulo se incluye la descripción de la zona de estudio, así como las metodologías utilizadas para la generación de los factores condicionantes que serán las variables utilizadas para la generación del mapa de inundación explicado en el capítulo cinco, mediante la implementación del análisis multicriterio. En el capítulo cuatro se describe la metodología empleada para la elaboración del mapa de zonas sísmicas con base al registro de ruido sísmico mediante la técnica de cocientes espectrales H/V. En el capítulo 6 se redacta una discusión y las conclusiones generales obtenidas del análisis de los resultados obtenidos, así como un sexto capítulo donde se presenta la bibliografía retomada a lo largo del presente trabajo.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO) posee una población de 713 925 habitantes (INEGI, 2020) y se conforma por 24 municipios de los cuales solo 11 de ellos cuentan con atlas de riesgos previos al 2015, por lo que es necesario: analizar, generar y actualizar los mapas de peligro preexistentes. Esto, debido a que el proceso de desconcentración demográfica ha ocasionado asentamientos irregulares sobre lugares con diferentes grados de peligro aunados a una falta de infraestructura adecuada.

La Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO) es principalmente vulnerable a fenómenos de origen hidrometeorológico y geológico. Siendo, los principales los asociados a inundaciones y sismos, ya que su manifestación puede ser detonante a otros fenómenos como los deslaves, deslizamientos y la caída y/o daño a estructuras dentro y fuera de la Ciudad. Respecto al atlas de riesgo de 2011, para el municipio de Oaxaca de Juárez, las principales manifestaciones de estos peligros se localizan al noroeste y surponiente de la ciudad, ya que, en estas zonas, se localizan la mayor cantidad de asentamientos irregulares y relieves más pronunciados como lomeríos

y montañas. Al sur de la ciudad, la alteración de escurrimientos naturales por obras y vialidades, el desbordamiento del río Atoyac y Salado, ocasiona graves inundaciones, como lo fue en la zona del andador de San José la Noria (2021), colonias y fraccionamientos en Santa Cruz Xoxocotlán (2011, 2014, 2017, 2021) y Villa de Zaachila (2011), como lo reportan los principales periódicos de Oaxaca.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar áreas susceptibles ante peligros geohidrológicos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Oaxaca.

1.3 OBJETIVO ESPECIFICO

- Caracterización de factores condicionantes de los peligros a evaluar a través de sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Realización del modelo cartográfico de susceptibilidad ante peligros geohidrológicos en la zona de estudio.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTUALIZACIÓN

El incremento de la ocurrencia, severidad e intensidad de desastres en el mundo entre 1960 y 2000, condujo a que la comunidad internacional, declarara a la década de los 90's como el Decenio Internacional para la Reducción de los desastres naturales (DIRDN), siendo el principal propósito concientizar sobre la importancia de la reducción de desastres. Asimismo, marcó la pauta de un cambio conceptual, con la introducción de varios conceptos relacionados con la reducción de desastres (Figura 1): peligros naturales, vulnerabilidad y riesgo (UNDRR, 2021). A continuación, se definen los conceptos previamente mencionados, así como, algunos otros que pueden ser causa de confusión.

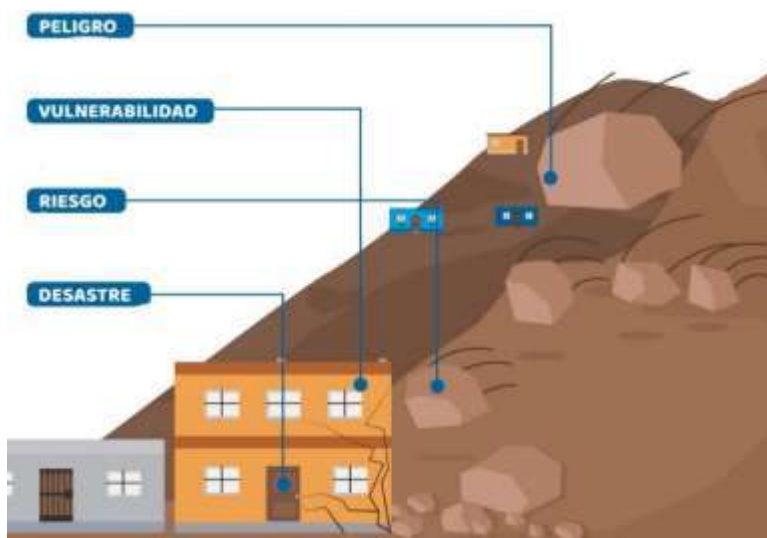


Figura1: Conceptos básicos de la gestión integral del riesgo. FUENTE: INDECI, Perú.

- ❑ **Fenómeno natural:** como toda manifestación de la naturaleza, se refiere a cualquier expresión que adopta la naturaleza como resultado de su funcionamiento interno. Un fenómeno natural se convierte en peligroso cuando adquiere determinado grado de magnitud, intensidad, ocurrencia o extensión del impacto (PNUD,2017).
- ❑ **Peligro** (amenaza) es un proceso o fenómeno natural que puede resultar en la pérdida de la vida, lesiones o impactos en la salud, daños a la propiedad, los medios de vida, daños a la propiedad, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009).
- ❑ **Susceptibilidad** es la probabilidad espacial de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino.

❑ **Vulnerabilidad** inicialmente estaba asociada al concepto de exposición geográfica de personas, propiedades, sistemas u otro tipo de bienes a amenazas naturales fuera del control humano. (Cutter, 2009, CEPAL, 2014, Alcántara, 2019). Sin embargo, a partir de 1970, se introducen nuevos elementos considerándola como una combinación de aspectos de índole social, económico, cultural, político e institucional, conformados a través del desarrollo histórico, y puede definirse como la propensión de la población a ser afectada por el impacto potencial de alguna amenaza, ya sea de origen natural, socio-natural o tecnológico (Alcántara, 2019).

El grado de vulnerabilidad se determina por una combinación de factores, incluyendo la concienciación existente sobre estos peligros, las condiciones que presentan los asentamientos humanos y la infraestructura, las políticas y la administración pública, y las habilidades organizativas en todos los campos relacionados con la gestión de los desastres (UNDRR, 2021).

❑ **Riesgo** es la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir, el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos (figura 2).

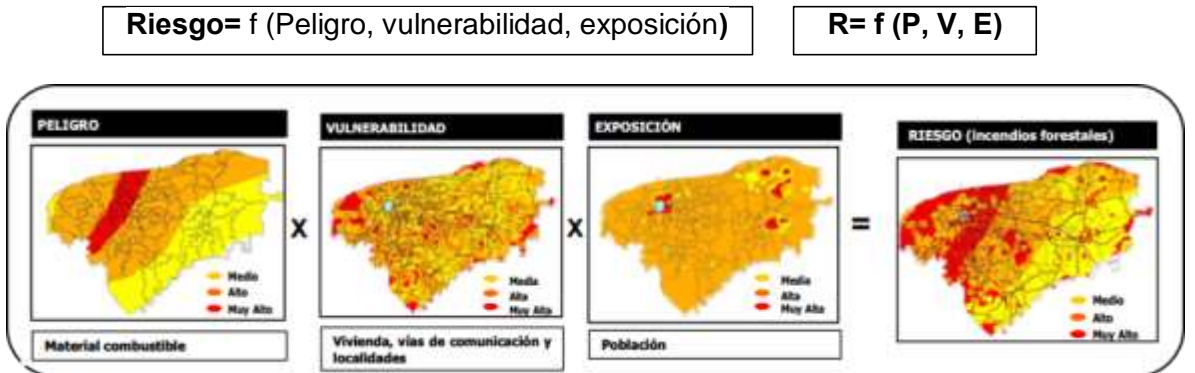


Figura 2: Mapa de riesgo por incendios forestales para la población de Yucatán Fuente: Zepeda, 2003 en CENAPRED, 2021.

❑ **Desastre** es un evento destructivo que afecta significativamente a la población, en su vida o en sus fuentes de sustento y funcionamiento. Implica la conjunción de dos factores: un fenómeno natural o antrópico externo que alcanza proporciones extraordinarias, y ciertos asentamientos humanos y sistemas físicos expuestos a la acción de dicho fenómeno (CENAPRED, 2001, 2003, 2021), esto debido, a la expansión urbana, aunado a condiciones de pobreza, falta de normas de construcción, la degradación del suelo, la deforestación, el cambio climático y falta de políticas ante la prevención de desastres.

2.2 Clasificación de peligros y zonas geográficas

La clasificación de peligros naturales suele realizarse de acuerdo a las características de la amenaza que los origino; al tipo de fenómeno; a la manera en que aparece, súbita o mediata; o duración. Entre las clasificaciones más utilizadas es la Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la reducción de desastres, la cual agrupa a los desastres en cuatro categorías según su origen (EIRD,2009). Otra de las más utilizadas es la de la Base de Datos Internacional sobre Desastres EM-DAT /CRED, con cinco categorías que permite una mayor diferenciación y que tiene una mayor cobertura geográfica e información más detallada respecto del tipo de amenaza que originó el desastre (figura 3).

EIDR	1) Dinámicos internos de la tierra	2) Dinámicos externos de la tierra o Geofísicos	3) Hidrológicos y Meteorológicos		4) Biológicos	
EM-DAT CRED	1) Geofísicos		2) Hidrológicos	3) Meteorológicos	4) Climatológicos	5) Biológicos
CEPAL	1) Geológicos		2) Hidrometeorológicos			
	Propios de la dinámica interna de la Tierra, usualmente, no se pueden predecir ni evitar	Amenazas que podrían evitarse y con frecuencia están asociados a alteraciones que el hombre ha ejercido sobre el medio ambiente.	Relacionados con variaciones en las temperaturas de la atmósfera y los océanos.			Proliferación de agentes como bacterias, virus y toxinas que pueden ocasionar la muerte o incapacitar a personas, provocar daños en animales y cosechas.
	<ul style="list-style-type: none"> Sismos Movimientos de masa (seco) Actividad volcánica 	<ul style="list-style-type: none"> Deslizamientos Desmoronamientos Aludes Aluviones Huajicos 	<ul style="list-style-type: none"> Inundaciones PRM Tsunamis 	<ul style="list-style-type: none"> Tormenta Temperatura extrema Niebla 	<ul style="list-style-type: none"> Sequia Heladas Incendios 	<ul style="list-style-type: none"> Accidentes animales Plagas Virus
						Impacto Viento espacial

Figura 3: Clasificación de peligros naturales (EM-DAT).

Sin embargo, ninguna de las fuentes cuenta con suficientes indicadores que permitan un análisis acabado de los efectos y el impacto económico y social del desastre (CEPAL, 2021). Respecto a los datos publicados por la EM-DAT/CRED (2020), la mayoría de los desastres ocurridos en los últimos veinte años (1990-2019), fueron de origen meteorológico e hidrológico, siendo las inundaciones, tormentas, huracanes y sismos, los tipos de desastres predominantes (figura 4). En este contexto, México ocupa el octavo lugar a nivel mundial, asociado a su ubicación geográfica (figura 5).

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

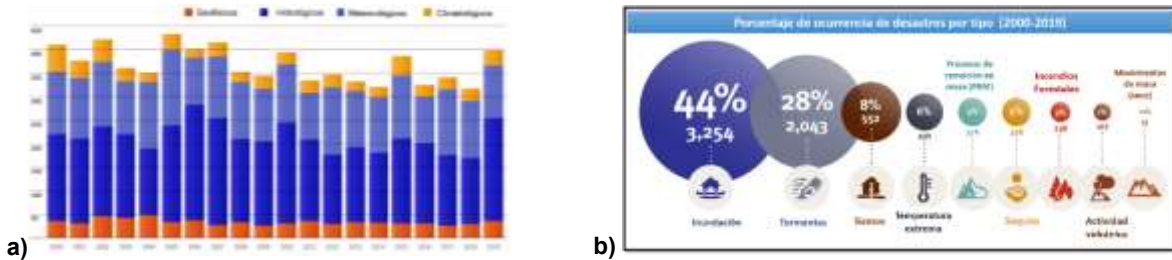


Figura 4: a) Número de desastres por subgrupo de desastres por año (2000-2019) y b) Número de desastres por subgrupo (2000-2019). Tomado de EM-DAT/CRED (2020).

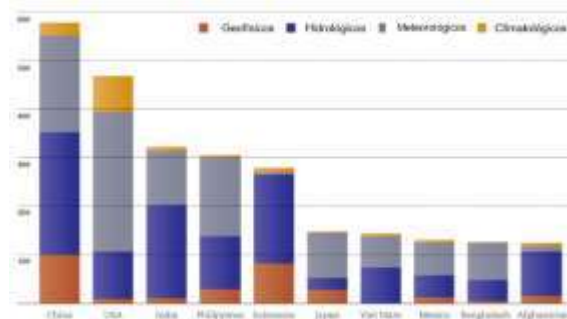


Figura 5: Principales países con el número más alto de desastres por subgrupo (2000-2019). Tomado de EM-DAT/CRED (2020).

No todos los peligros naturales son predecibles, sin embargo, existe posibilidad de que ocurran eventos concatenados, es decir, que la existencia de uno detone a otro evento. Dado estos escenarios es necesario mantener un monitoreo permanente. A continuación, se presentan los principales fenómenos respecto a su periodicidad anual (Figura 6).

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Ciclones tropicales											
Tormenta de granizo				Tormenta de granizo							
Tormentas de nieve											Tormentas de nieve
Tormentas de polvo											Tormentas de polvo
Tormentas electricas											
Heladas											Heladas
				Ondas cálidas							
Ondas gélidas											Ondas gélidas
Tornados											
Inundaciones				Inundaciones							
Deslizamiento de laderas											
Químico-tecnológicos											
Volcanes											
Sismos											
Sociorganizativos											
Incidios forestales											

Figura 6: Tipos de desastres por eventualidad en el año. Elaboración propia a partir de los datos de EM-DAT/CRED (2020).

2.1 Susceptibilidad

El análisis de riesgos, es una herramienta que contribuye a la estimación del riesgo y facilita la toma de decisiones para su reducción, son los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo. Para la elaboración de los mapas de riesgos son necesarios los de peligrosidad y para estos son necesarios los mapas de susceptibilidad. En la tabla 1 se describe la información requerida para la evaluación de la susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

Información requerida	
Para evaluación de la susceptibilidad	Para evaluación de la amenaza
<ul style="list-style-type: none"> • Inventario de procesos previos o actuales (no necesario) • Análisis de factores condicionantes • Superposición de factores 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios científicos/mapas, monitoreo a largo plazo, histórico. • Reportes sobre la incidencia pasada de las amenazas, en particular la localización, frecuencia y severidad de los eventos. • Entendimiento de los factores que influyen en la ocurrencia de amenazas.
Para la evaluación de la vulnerabilidad	Para la evaluación del riesgo
<ul style="list-style-type: none"> • Características de la amenaza (de la evaluación de la amenaza) • Características de los elementos/sistemas de interés: localización/sitio, fortaleza estructural/calidad, contenido de la exposición • Calidad medioambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lo mismo que para la vulnerabilidad de la evaluación similar a la evaluación de la vulnerabilidad, más el daño específico. • estimado de la pérdida de frecuencia para los elementos del riesgo • Escenario específico de la amenaza

Tabla 1: Tomado de International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)

La evaluación de la susceptibilidad es un primer paso para evaluar el peligro, ya que permite identificar áreas potenciales que dadas sus condiciones físicas pueden manifestar la ocurrencia del mismo. Para ello, es útil contar con datos cartográficos del tipo topográfico, geomorfológico, litológico, estructural, cobertura y uso de suelo y vegetación, y otros. Los métodos para evaluar y zonificar la susceptibilidad de un peligro, pueden clasificarse en cualitativos, cuantitativos y semicuantitativos.

Los cualitativos se dividen en directos que dependen de la experiencia del criterio y experiencia del analista y Heurísticos (Combinación de factores), basado en la superposición de variables, para ello, se estiman los coeficientes de ponderación de los factores (intrínsecos), es decir, asignando pesos a las variables

Los métodos cuantitativos utilizan expresiones matemáticas que correlacionan factores causales, lo que incrementa la confiabilidad o probabilidad de ocurrencia del peligro. Los métodos más comunes son los determinísticos y estadísticos. Los métodos determinísticos requieren de información muy completa, detallada y de gran claridad, entre ella: la localización de las áreas potencialmente inestables, propiedades geológicas y geotécnicas de los materiales, momento y circunstancias en las que el fenómeno puede ser activado, distancia de propagación del fenómeno, formas de interacción entre el ambiente, el hombre, el problema analizado y el costo del daño causado. Los métodos estadísticos combinan el uso de puntajes

ponderados y se combinan con ecuaciones matemáticas que determinan la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. La técnica del análisis estadístico univariado se aplica en las áreas de las cuales se tienen muestras estadísticas representativas de los procesos de análisis.

Los métodos semicuantitativos son métodos cualitativos que utilizan procedimientos de ponderación y calificación (Hutchinson y Chandler, 1991; Siddle et. al. 1991; Luna, et. al., 1992; Fell et. al., 1996; Ayalew y Yamagishi, 2005), como es el proceso de jerarquía analítica (AHP) (Saaty 1980; Barredo et al. 2000; Yalcin, 2008; Kamp et. al, 2008) y la combinación lineal ponderada (WLC) (Ayalew et. al., 2005; Akgun et. Alabama, 2010). El propósito del proceso de análisis jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1988), es priorizar alternativas de decisión valoradas según el peso de sus atributos y las características de las alternativas. La Combinación lineal ponderada, no considera la magnitud, duración o recurrencia de los fenómenos en forma cuantitativa, sino que se representan cualitativamente clases (baja, moderada, alta, muy alta).

La evaluación multicriterio, se considera un método indirecto semi-cuantitativo ya que considera: (i) factores de tipo cualitativo y cuantitativo; y (ii) la pluralidad de percepciones de los actores involucrados en el problema de decisión, la cual debe ser participativa para tomar decisiones y trazar alternativas para la solución de conflictos (Romero, 1997 citado por Uribe, 2001; Chen et al., 2012). La metodología consiste primero en identificar el problema y definir la meta u objetivo principal.

En el presente trabajo se implementó el método multicriterio y de jerarquía analítica para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad a inundaciones.

2.2 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales registran el comportamiento de la superficie a través de diferentes regiones del espectro electromagnético (ello depende de la resolución espectral de la imagen), comenzando a utilizarse en la década de los 70's para uso civil. En 1972, se lanza al espacio el ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), siendo el primer satélite para la prospección de recursos naturales, posteriormente fue renombrado como Landsat-1 (land: tierra y sat: satélite) siendo gestionado por la NASA y el US Geological Survey (Aguirre, 2009).

Las imágenes satelitales proporcionan una gran cantidad de datos espaciales contiguos distribuidos a lo largo de extensas áreas geográficas. Estas propiedades les confieren la capacidad de detectar, reconocer e identificar coberturas de suelo, así como medir numerosas propiedades biofísicas y bioquímicas asociadas a ellas, ofreciendo ventajas en comparación con métodos in situ, que muchas veces requieren de mediciones en terreno que pueden resultar prohibitivas a amplias

escalas, debido a limitantes de accesibilidad, tiempo y recursos (Lillesand et al., 2104; Aronoff 2005; Eastman 2006; Peña, 2007).

El Sistema Global de Sistemas de Observación de la Tierra (GEOSS), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia Espacial Europea (ESA), entre otras, colaboran en la adquisición de imágenes multiespectrales de alta resolución espacial (SR), con los programas Landsat Data Continuity Mission (LDCM) y Copernicus Sentinel-2 respectivamente (Padró, 2018). Sentinel-2 es una misión de imágenes operativas multiespectrales dentro del programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security), implementado por la CE (Comisión Europea) y la ESA (Agencia Espacial Europea) para la observación global de la tierra (datos sobre vegetación, suelo y agua, cubierta para tierra, vías navegables interiores y áreas costeras exceptuando imágenes provenientes de océanos o zonas marinas abiertas; y también proporciona correcciones de datos de distorsión y absorción atmosférica) a alta resolución (Figura 7 y 8).



Figura 7: Infografía de los aspectos más relevantes de Sentinel-2, obtenida de Copernicus Europe's eyes on Earth.



Figura 8: El carenado Vega que sostiene el satélite Sentinel-2A en el pórtico de lanzamiento en el puerto espacial europeo en Kourou, Guayana Francesa. (Tomado de la Agencia Espacial Europea).

Las imágenes Sentinel 2 son proporcionados por dos satélites Sentinel 2-A y Sentinel 2B (figura 9), con una resolución de 10 m. La altitud media de la órbita es de 786 km, la inclinación de la órbita es de 98.62° y el medio local hora solar (MLST) en el nodo descendente 10:30 (mañana). La MLST fue elegida por el nivel de iluminación solar y la minimización del potencial de la cobertura de nubes. Los dos satélites est n espaciados con un desfase de 180° en el mismo plano orbital para un ciclo de revisión de 5 días en el Ecuador. Actualmente están en operación dos satélites, de los cuales, el primero se lanzó el 23 de junio del 2015 y el segundo conocido como sentinel 2B el 7 de marzo del 2017. Cada satélite cuenta con un instrumento Multi Espectral (MSI), que mide la radiación que refleja la tierra y que atraviesa la atmósfera (Niño, 2020).



Figura 9: Constelación de satélites Sentinel 2A y 2B. (Tomado de la Agencia Espacial Europea).

En la tabla 2 se muestran las 13 bandas del Sentinel 2, que incluye segmentos del espectro electromagnético visible, cercano al infrarrojo (NIR) hasta los infrarrojos de onda corta (SWIR) (Figura 10).

Los niveles disponibles para su descarga son 1C y 2A. Los primeros corresponden a una imagen ortorectificada con reflectancia Top of atmosphere (TOA) con registros multispectrales y mascara de agua y nubes. Sin embargo, no son fieles a la superficie terrestre debido a que est n distorsionadas por los efectos atmosféricos. Las imágenes 2A o L2A son derivadas de los productos Level-1C asociados. Cada producto de Nivel 2A está compuesto por mosaicos de $100 \times 100 \text{ km}^2$ en geometría cartográfica (proyección UTM/WGS84) y proporcionan imágenes de reflectancia ortorectificada del fondo de la atmósfera (BOA) con registro multispectral y una

clasificación de escenas por nubes, sombra de nubes, vegetación, tierra/desiertos, agua y nieve y se le considera como información lista para su análisis

Bandas del Sentinel -2		Longitud central de onda (µm)	Resolución espacial
Banda 1	Aerosol	0.443	60
Banda 2	Azul	0.490	10
Banda 3	Verde	0.560	10
Banda 4	Rojo	0.665	10
Banda 5	Infrarrojo cercano- NIR	0.705	20
Banda 6	Infrarrojo cercano- NIR	0.740	20
Banda 7	Infrarrojo cercano- NIR	0.783	20
Banda 8	Infrarrojo cercano- NIR	0.842	10
Banda 8A	Infrarrojo cercano- NIR	0.865	20
Banda 9	Vapor de agua	0.945	10
Banda 10	SWIR – Cirrus	1.375	60
Banda 11	SWIR	1.610	20
Banda 12	SWIR	2.190	20

Tabla 2: Bandas espectrales y su relación espacial.

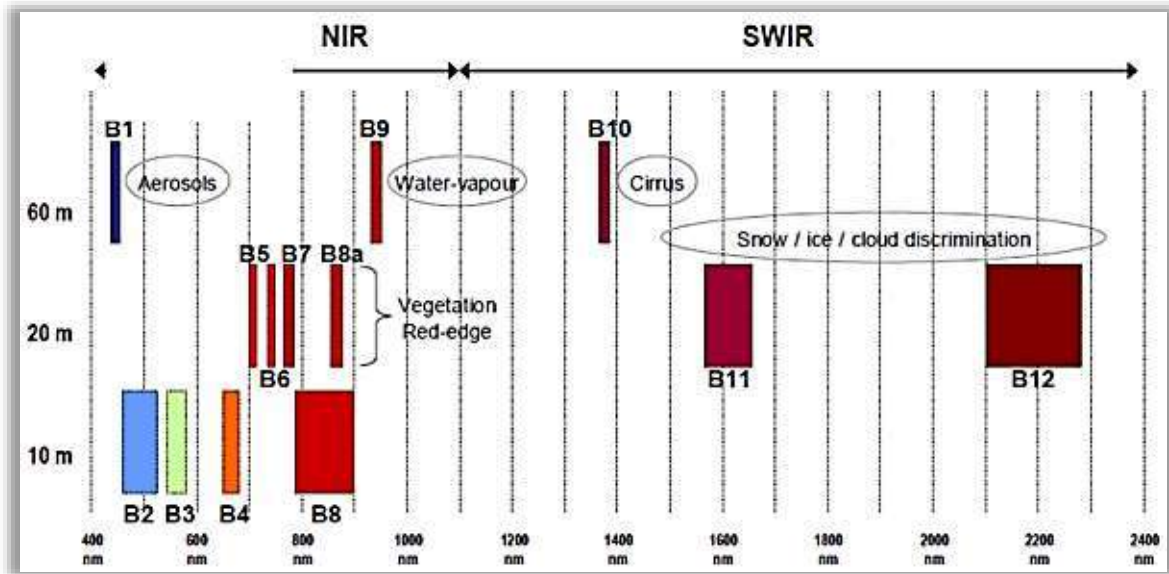


Figura 10: Bandas espectrales MSI versus su relación espacial. Tomado de Gatti (2018)

CAPITULO III ZONA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación

La Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO) es el área metropolitana conformada por su municipio homónimo Oaxaca de Juárez y 23 municipios más del estado de Oaxaca. Se localiza en la parte central del estado de Oaxaca en la región de los Valles Centrales. La ZMO cubre una superficie de 63 786 hectáreas (637.86 km²) (Figura 11) y de acuerdo al último conteo de población realizada en 2020, por el INEGI, cuenta con una población de 713 925 habitantes.

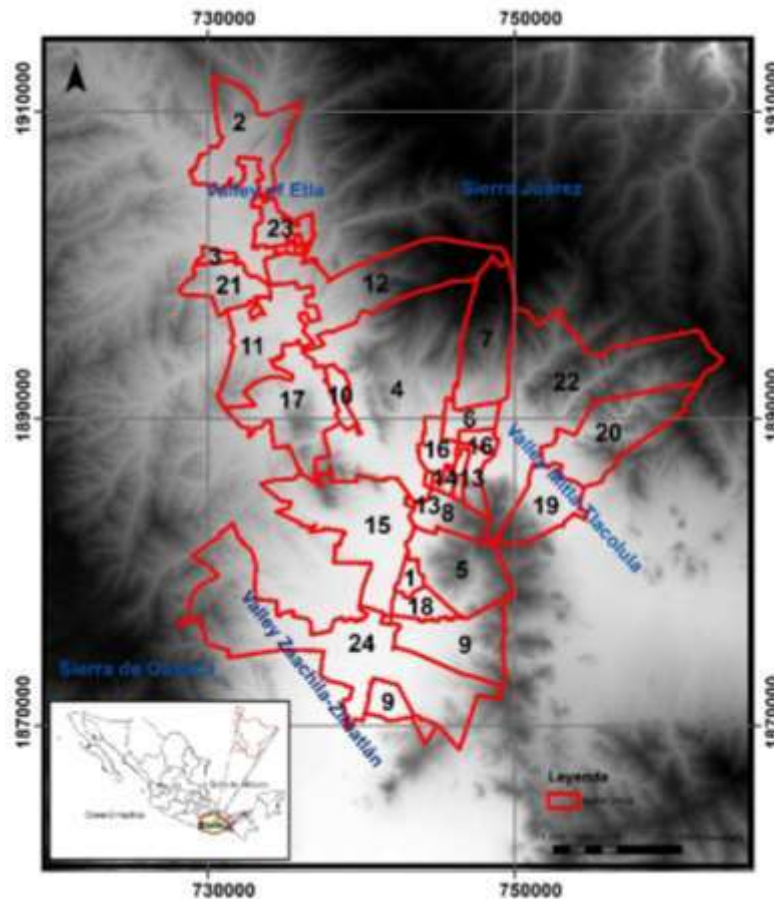


Figura 11: 1. Ánimas Trujano, 2. Magdalena Apasco, 3. Nazareno Etlá, 4. Oaxaca de Juárez, 5. San Agustín de las Juntas, 6. San Agustín Yatareni, 7. San Andrés Huayapam, 8. San Antonio de la Cal, 9. San Bartolo Coyotepec, 10. San Jacinto Amilpas, 11. San Lorenzo Cacaotepec, 12. San Pablo Etlá, 13. San Sebastián Tutla, 14. Santa Cruz Amilpas, 15. Santa Cruz Xoxocotlán, 16. Santa Lucía del Camino, 17. Santa María Atzompa, 18. Santa María Coyotepec, 19. Santa María del Tule, 20. Santo Domingo Tomaltepec, 21. Soledad Etlá, 22. Tlaxiaco de Cabrera, 23. Villa de Etla and 24. Villa de Zaachila. Fuente: Elaborado a partir de datos obtenidos del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

En términos de densidad de población Pérez-Campuzano (2020), identifica tres líneas, la primera al poniente de la ciudad, la segunda en las inmediaciones del oriente de la carretera Panamericana en la parte central de la ciudad y en las faldas

del Cerro del Fortín. Estas dos zonas se localizan sobre pendientes de pronunciada inclinación. La tercera línea, se ubica al oriente de la ciudad, que inicia en la colonia el Rosario, en el sur y termina en la colonia Manuel Ávila Camacho, en el norte.

3.2 Geología

La geología de Oaxaca se considera una de las más complejas del país. Con base a las cartas geológicas obtenidas del Servicio Geológico mexicano (2007), con claves E14D37, E14D38, E14D47, E14D48, E14D57 y E14D58, escala 1:50 000, y el atlas de riesgo del municipio de Oaxaca de Juárez, Oaxaca (2011) que fue elaborado por el Instituto de Geología de la UNAM, se detalla la composición geológica de la ZMO (figura 12).

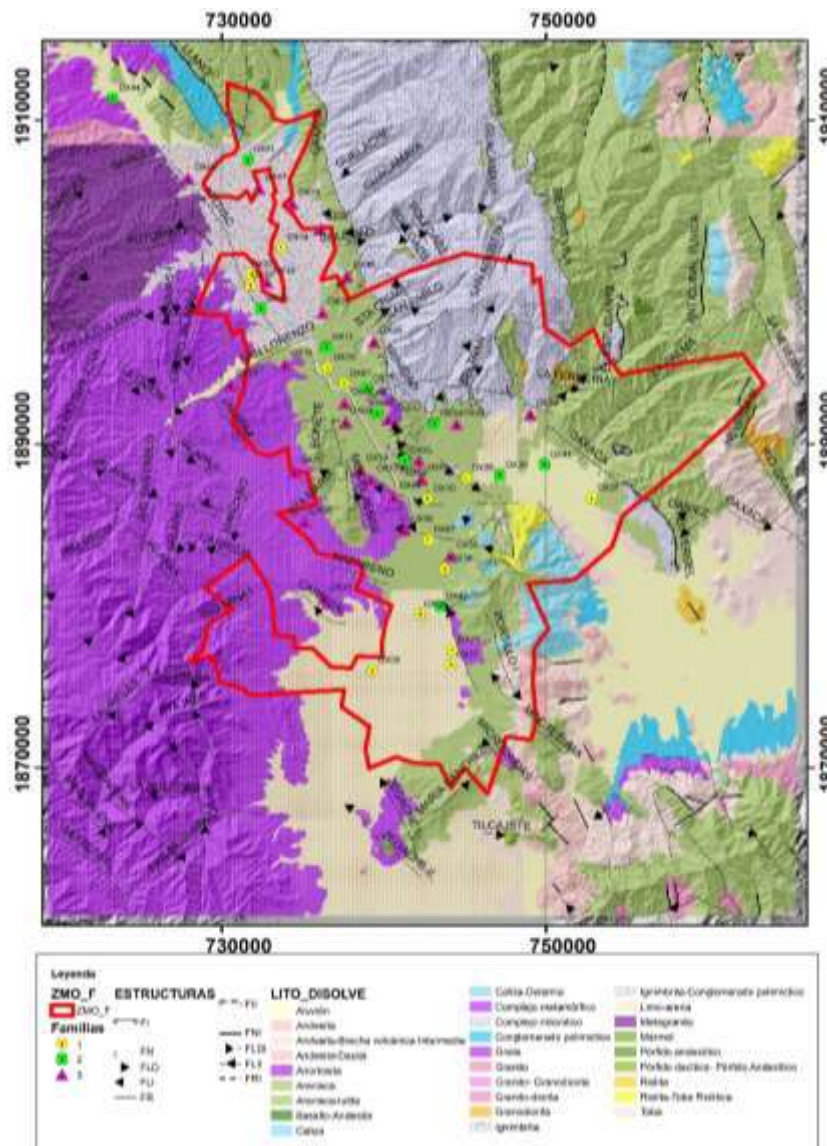


Figura 12: Mapa geológico-estructural. Fuente: Elaborado a partir de datos obtenidos del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

En el Atlas de riesgos elaborada por el municipio de Oaxaca de Juárez y el Instituto de geología de la UNAM, así como en Luna (2017), se describe la distribución de la litología a lo largo de la zona de estudio.

Hacia el sureste se localizan afloramientos de calizas y dolomías, con huellas de disolución, lo que es un indicador de la existencia de cavernas por karsticidad. Las areniscas y lutitas se presentan de forma intercalada, predominando en la parte central del valle y en la zona noreste de la Sierra Juárez.

Intrusivo granítico del Terciario es la de menor distribución en la zona, ya que solo se observa en dos pequeñas áreas al norte y noreste. La roca es masiva de textura granular, holocristalina y presenta un intenso fracturamiento cuyas dimensiones varían de centímetros a decímetros. Su mineralogía está constituida por cristales de cuarzo, mica y feldespato. Tiene cierto grado de intemperismo químico, lo cual se reconoce en la presencia de caolinita como resultado de la alteración de los feldespatos. Por su grado de fracturamiento y alteración, esta unidad es susceptible de generar bloques caídos de roca.

Ignimbrita-conglomerado, toba riolítica del Terciario. En esta unidad se agrupan unidades de origen volcánico y volcanosedimentario. Es una roca de color verde pálido, de estructura masiva, baja densidad y muy vesiculada. Su mineralogía está formada por cristales de cuarzo y feldespato. Presenta oquedades por ausencia de minerales o xenolitos más blandos (muy presumiblemente de pómez), que ya se disolvieron. Algunas de estas oquedades son alargadas.

Limolita-arena y aluvión del Cuaternario. Los materiales del cuaternario están constituidos por fragmentos de gneises, calizas y rocas volcánicas y por gravas, arenas y arcillas cuyo espesor varía entre 10 y 150 m, siendo más profundos en los Valles de Zaachila y Oaxaca que en los Valles de Etna, Tlacolula y Zimatlán – Ocotlán (Belmonte, 2005, Luna, 2012), hacia la Zona del Aeropuerto de la ciudad de Oaxaca podría alcanzar un espesor de hasta 120 m (CONAGUA, 2020).

Wilson y Clabaugh (1970) estudiaron los depósitos sedimentarios volcánicos continentales del Cenozoico en el sector del valle de Etna (al noroeste de la ciudad de Oaxaca con dirección a la localidad de Telixtlahuaca), describiendo y nombrando a estos como la formación Suchilquitongo, la cual se constituye de depósitos volcanoclásticos tobáceos, acumulados sobre o en márgenes a un lago, y un miembro de ignimbrita de color verde a grisáceo (Etna ignimbrita) (Urrutia, J. 2001), que se superpone a la de depósitos lacustres y volcanoclásticos. Este segundo miembro está compuesto por piedra pómez silícica, fragmentos volcánicos, cuarzo, feldespato y abundante biotita incluida en una matriz vítrea alterada. El espesor de la ignimbrita se estimó en 30 m y en algunos afloramientos está cubierta por depósitos de caída de ceniza (Martínez, 2007).

La formación Jaltepetongo, está formada por una secuencia de lutitas apizarradas, areniscas calcáreas, calizas y margas que afloran en el sinclinal de Monte Albán. El

basamento sobre el que descansa la secuencia estratigráfica de la región se constituye por rocas metamórficas que forman parte del complejo Oaxaqueño de edad precámbrico. Este complejo se constituye por gneis, anortosita, mármol, diques pegmatíticos y granitos metamórficos, se distribuyen principalmente en las agencias de Montoya, San Martín Mexicapam y San Juan Chapultepec. Hay afloramientos del macizo anortositico cerca del municipio de San Lorenzo Cacaotepec.

Al noreste, se localizan rocas de bajo metamorfismo y rocas sedimentarias que constituyen el complejo milonítico formado principalmente por esquistos verdes con texturas bandeadas, en la zona de San Felipe del Agua.

3.3 Geología estructural

El sureste mexicano es caracterizado por discontinuidades de la corteza que separan unidades contrastantes del basamento (Ortega-Gutiérrez, 1981). Dado que la mayoría de estas unidades presentan características estratigráficas y tectónicas particulares, se les suele referir como terrenos tectonoestratigráficos o litotectónicos. Los terrenos más antiguos fueron ensamblados entre el Paleozoico y Cretácico tardío (Pardo y Suárez 1995) durante la formación, acreción y ruptura de Pangea, y su geología ha sido influenciada por tectonismo de márgenes convergentes y magmatismo para la mayoría del Cenozoico (Figura 13).

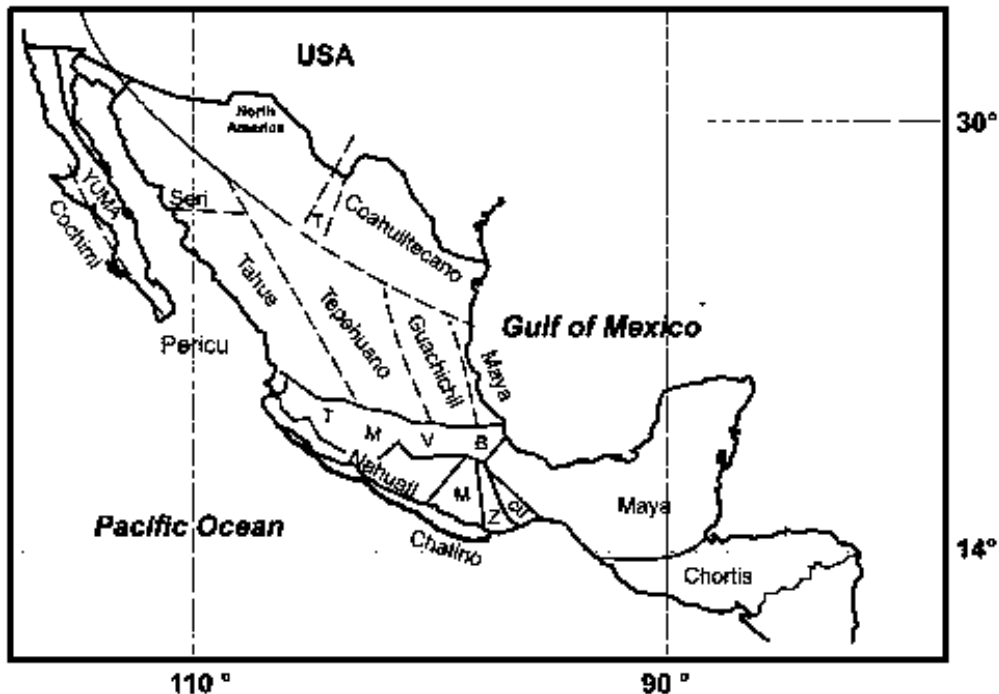


Figura 13 Terrenos tectonoestratigráficos de México de acuerdo a Sedlock et. al. (1993) T. terreno tarahumara; M. Mixteco, Z: Zapoteco; CU Cuicateco; TMVB Cinturón volcánico Trasmexicano.

Geológicamente, Oaxaca corresponde a una región del sureste mexicano, extremadamente compleja. Ortega-Gutiérrez (1988) propone seis terrenos

cristalinos diferenciados por su contraste evolución metamórfica, protolisis y edad. Considera que cuatro de estos terrenos son continentales (Chatino, Zapoteco, Mixteco y Maya) y dos oceánicos (Cocos y Cuicateco) (figura 14).

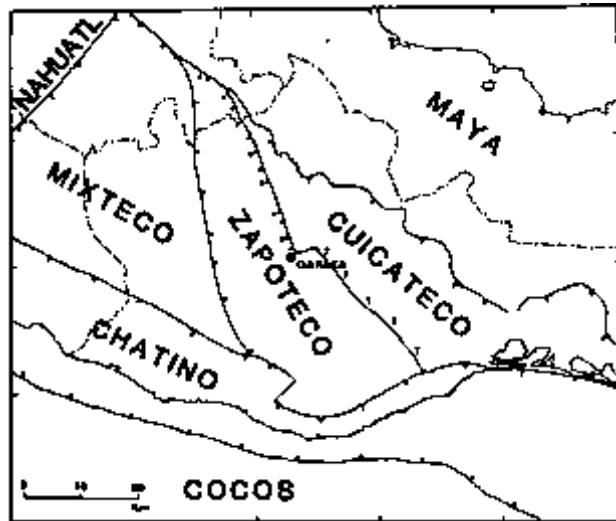


Figura 14: Terrenos cristalinos de Oaxaca (Ortega-Gutierrez, 1988). De oeste a este, el sur de México comprende los terrenos: Guerrero (náhuatl), Xolapa (Chatino), Mixteca, Oaxaca (Zapoteco), Juárez (Cuicateco) y Maya (los nombres entre paréntesis son los utilizados por Sedlock et al., 1993).

El área de estudio, abarca parte de los terrenos: Terreno Zapoteco (Oaxaca), Cuicateco (Juárez) y Mixteco, que se describen a continuación.

El terreno mixteco tiene un basamento metamórfico conocido como Complejo Acatlán. de basamento paleozoico de edad de Greenville. En el pérmico Medio, los terrenos mixtecos y oaxaqueños fueron yuxtapuestos a lo largo de la falla lateral derecha Caltepec (Herrera-Ortega, 2005). Las rocas precámbricas del basamento son en su mayoría paragneis con contenido de grafito, ortogneis máfico, anortosita y migmatita. Las rocas cenozoicas incluyen rocas volcánicas y siliclásticas continentales del Paleógeno depositadas en cuencas extensionales (Dávalos-Álvarez, et. al. 2007). La falla Caltepec se caracteriza por primera vez como una zona de falla dúctil transpresiva dextral, de tendencia NNW y de ENE de la edad pérmica temprana. Asimismo, la CFZ registra fallas dúctiles pérmicas tempranas, transpresivas, dextrales laterales y magmatismo sincrónico, fallas y cataclasis mesozoicas y fallas frágiles cenozoicas. La CFZ es una zona de 2 a 6 km de ancho que se distingue por rocas miloníticas con foliación en dirección NO y deslizamiento ENE. La falla separa las gneiss con granulitas bandeadas del Grenvillian del complejo oaxaqueño de las tectonitas Paleozoicas de bajo a medio grado del complejo Acatlán al oeste (Elías-Herrera, 2005).

En el área de Ixtaltepec, ubicada a 70 km SSE del área de Caltepec, el complejo oaxaqueño está cubierto por una última secuencia de pizarra y piedra caliza ordovícica (formación Tiñú) que contiene trilobites de afinidad gondwanana

(Robison y Pantoja - Alor,1968). En la misma área, el complejo también está cubierto por estratos marinos someros carboníferos (formaciones de Santiago e Ixtaltepec) [Pantoja-Alor , 1970] con faunas que tienen afinidades claras con América del Norte (Sour-Tovar et al. , 1996).

Terreno Zapoteco (Oaxaca): Posee un basamento precámbrico constituido por grafito con paragneiss, ortogneis máfico, anortosita y migmatita de alta susceptibilidad magnética y conductivas introducidos por plutones del Paleozoico tardío. Las rocas incluyen rocas volcánicas y siliciclásticas continentales del Paleógeno depositadas en cuencas extensionales (Dávalos –Álvarez, et. al., 2007). Basado en la construcción de perfiles de conductividad eléctrica y perfiles de gravedad (Pardo y Suárez 1995), se infiere que el terreno Oaxaca (gneis de Grenvillian) se empuja sobre la cuenca Cuicateca (rocas Jurásicas) del terreno Juárez (Ortega - Gutiérrez et al. 1990 ; Alaniz - Álvarez et al. , 1996).

Es limitado al este por el sistema de fallas cenozoicas-terciarias, que siguen la tendencia del cinturón milonítico de la Sierra Juárez (SJMB), siendo la falla Oaxaca la más importante, ya que limita los terrenos Oaxaca (Zapoteco, Oaxaquia) y Juárez (Cuicateco) (Campa y Coney, 1983; Sedlock et al., 1993; Alaníz-Álvarez et al., 1994). La falla Oaxaca de deformación polifásica (milonítica) tiene un ancho de 10-15km y forma parte de un sistema extensional ~250km y un relieve estructural >3km (Dávalos-Álvarez, et.al. 2007). Tiene una orientación media de N10°W que desciende abruptamente hacia el oeste. En superficie, la zona de contacto entre los dos terrenos se encuentra a través de la proyección del sistema de fallas Oaxaca, sin embargo, según datos geofísicos parece descender hacia el sur, viéndose afectada por una falla normal abrupta que produce grandes contrastes de resistividad en la corteza superior.

El estudio regional de levantamientos magnetotélúricos de JöDicke (2006) no detectó un gran contraste eléctrico a través de la falla Oaxaca a profundidad de la corteza a lo largo de un transepto que pasa por el sur de la Ciudad de Oaxaca. No obstante, Jording et. al. (2000) concluyo mediante el análisis de impedancias, un cambio estructural en profundidad en esta región que se desplaza hacia el noreste del Valle de Mitla, a unos 30 km al este del límite del terreno generalmente aceptado como Oaxaca-Juárez (Figura 15). Asimismo, mediante estudios gravimétricos y magnéticos locales en el Valle de Etla se ha establecido una estructura similar a un graben (Martinez-Silva, 2000; Flores-Márquez et al., 2001; Belmonte-Jiménez, 2005). La falla normal la Calavera es parte de este sistema, posee una orientación NW-SE, que presenta evidencias morfológicas de un componente lateral izquierdo. Alrededor de Mitla, el relieve es una pendiente de casi 400m, con una longitud aproximada de 13 km. Estas características sugieren que esta falla pudo haber desencadenado un terremoto de Mw 7 en 1507 según el Códice Telleriano-Remensis (Garduño-Monroy, et al., 2020).

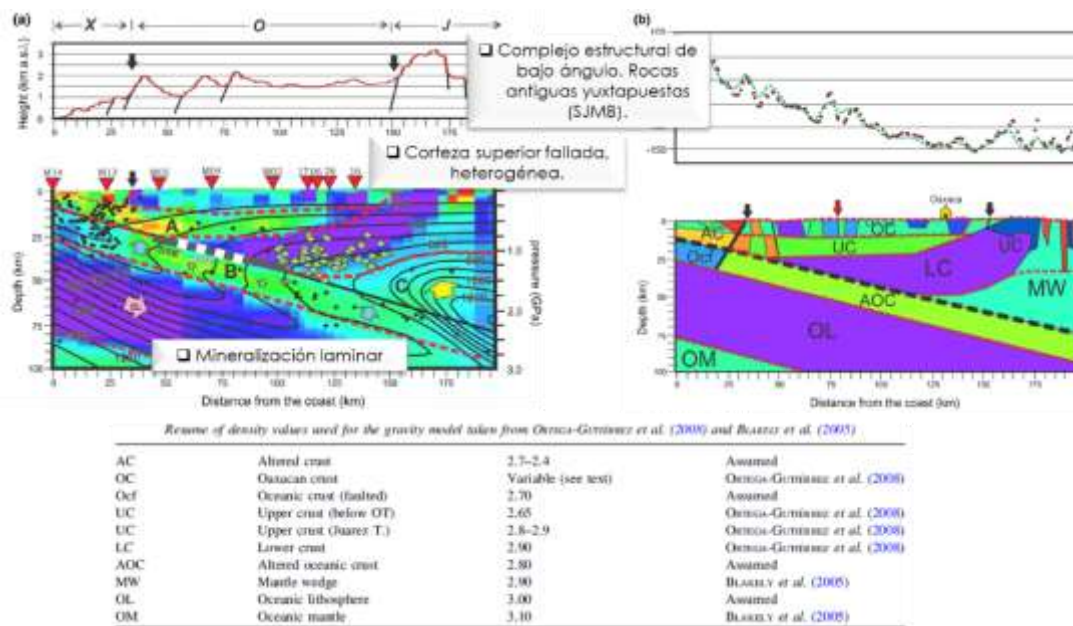


Figura 15 Contacto de bajo ángulo entre los terrenos de Oaxaca y Juárez deducido de datos magnetotelúricos (Arzate-Flores, 2016).

Al norte de la Ciudad de Oaxaca, en la región de Teotitlán, la traza de falla expone migmatitas y granitoides del Jurásico Tardío y Cretácico temprano (Ángeles-Moreno, 2006). En la región de Tehuacán la zona de falla yuxtapone rocas clásticas del Cenozoico y Cretácico tardío y no existen afloramientos de milonita (Dávalos – Álvarez, et. al., 2007).

El basamento del terreno (Cuicateco) incluye el complejo Mazateco (Carfantán 1986; Ángeles Moreno 2006). Las rocas siliciclásticas del Cretácico Inferior del terreno de Juárez se han mapeado como la Formación Chivillas en la porción norte de la cuenca Cuicateco, donde la edad máxima de deposición es a mediados del Aptiano (Mendoza-Rosales, et al. 2009). El terreno de Juárez está limitado al este por la falla de Vista Hermosa. La falla representa el límite con la cuenca veracruzana del terreno maya, (Ortega-Gutiérrez et al., 1990) es una cabalgadura que se encuentra separando a las rocas metamórficas del Mesozoico (o Paleozoico); (Carfantán, 1985) perteneciente al terreno Cuicateco, situado al W de la falla, y a unos lechos rojos, probablemente de la Formación Todos Santos, ubicados al E de la falla. Se le atribuye una edad laramídica. Presenta una orientación SE-NW, aunque no está claramente definida, tiene una longitud de 300 km.

La falla Aloapan tiene un desarrollo de 25 km, con rumbo N-S y echado vertical. Representa una zona cataclástica muy afectada que sugiere un movimiento tectónico inducido por el despegue de las rocas Cretácicas del basamento Precámbrico y representa el contacto tectónico entre las formaciones Cretácicas Jalpetongo y Yushé.

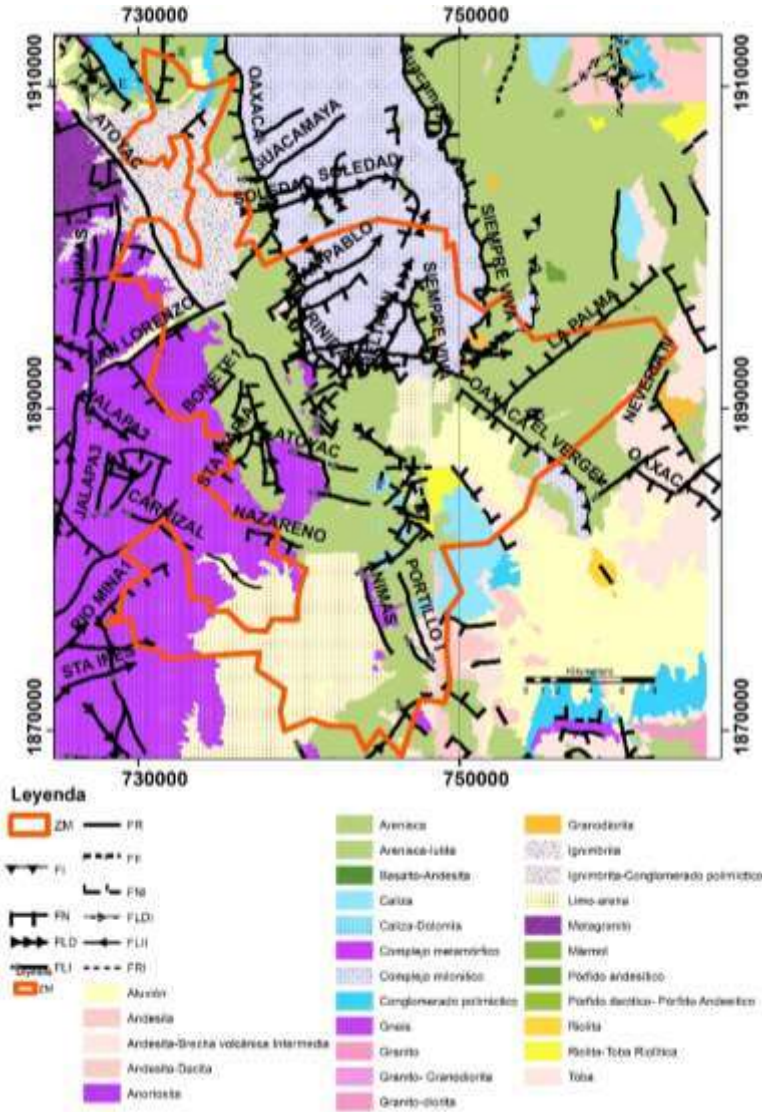


Figura16 Fallas circundantes en la zona de estudio. Fuente: Elaborado a partir de la cartografía del Servicio Geológico Mexicano (2007).

Otra de las características más llamativas de este terreno es la Sierra Juárez (SJ) que es paralela al Cinturón de Milonita de Sierra Juárez (SJMB) la cual se encuentra cubierta por ignimbritas del Mioceno, y que lo separa del terreno Cuicateco (Juárez). La Sierra Juárez es una meseta elevada (N-S), con una elevación de 1500 a 3200m, un relieve imponente de 2500m entre las elevaciones más altas y los valles de los ríos y un rápido declive hasta cerca del nivel del mar de lado este. En ella se encuentran rocas expuestas de esquisto pre-jurásico y asociaciones de serpentinita-gabro, lechos rojos del Jurásico y granitoides y migmatitas del Jurásico tardío, y una secuencia gruesa de turbiditas derivadas del Cretácico Inferior continental (Ángeles, Moreno 2006). Las turbiditas se depositaron en la cuenca Cuicateco. Las rocas sedimentarias incluyen carbonatos. Al este de la Sierra Juárez se encuentra la cuenca de Veracruz, caracterizada por una gruesa sucesión de

rocas sedimentarias del Cretácico al Neógeno. En la Sierra Juárez, existe la presencia de fallas normales activas en la región elevada y su dirección de extensión es casi paralela a la dirección de la placa convergente (Arzate-Flores, 2016).

3.4 Sismotectónica

México, es el séptimo u octavo país más sísmico del mundo, ya que tiene un extenso litoral sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico (Zona más sísmica del mundo, donde ocurre el 80% de los sismos con mayor magnitud y el 90% de los sismos del planeta). En México, interactúan cinco placas tectónicas: la Placa Norteamericana, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe. Las últimas dos subducen debajo de la placa norteamericana (figura 17). La de Rivera se sumerge bajo Jalisco y Colima, mientras que la de Cocos lo hace debajo de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Al sur de Chiapas y en Centroamérica, la de Cocos subduce por debajo de la del Caribe. (Servicio Sismológico Nacional (SSN), Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. URL: <http://www.ssn.unam.mx>)



Figura 17: Sismotectónica de la República Mexicana (sgm.gob.mx). Mapa de las placas tectónicas que interactúan en México. Las flechas rojas representan la dirección de movimiento de cada placa con respecto a la placa de Norteamérica, y el número cerca de la flecha representa su velocidad en cm/año. Los colores de las fronteras entre placas corresponden al tipo de frontera (divergente, convergente o transcurrente) de acuerdo a los modelos en la esquina superior derecha. Los puntos representan epicentros de sismos. Mapa modificado (González, 2019) de Kostoglodov y Pacheco (1999) y figura de modelos modificada de <https://bjolley.weebly.com/plate-tectonics-quiz-1-study-guide.html>.

Zúñiga (1997), basándose en los datos de los catálogos instrumental e histórico, dividió el territorio mexicano en unidades sismotectónicas con el propósito de definir dentro de estas, zonas sismogenéticas (figura 18) para ser utilizadas en las estimaciones del riesgo en base a: a) las características tectónicas y geológicas de cada zona, b) mecanismos focales /o patrones de fallamiento, c) complejidad de las funciones de tiempo de las fuentes de grandes eventos de subducción, d) sismicidad histórica considerada para limitar las regiones y e) factor de acoplamiento observado en eventos de subducción, las características de cada zona, se muestran en la tabla 3 y 4 (Pacheco, 1993; Zúñiga, 2017).

CAPITULO III ZONA DE ESTUDIO

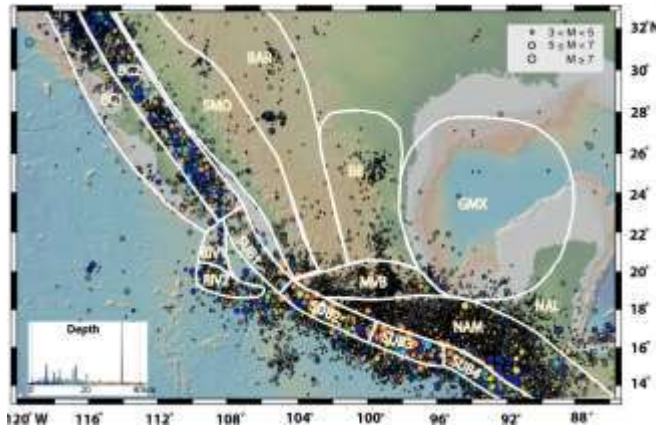


Figura 18: Regiones sismogénicas para México. Esta clasificación también considera la profundidad en la Trinchera Mesoamericana por lo que hay regiones a profundidad que abarcan la misma extensión superficial que otras regiones (Zúñiga et al., 2017).

Nombre	Profundidad	Características
SUB1	Superficial (h < 40 km)	Zona de eventos de subducción de acoplamiento intermedio. Zona de transición entre la convergencia RIV-NOAM (Placa Rivera-Norteamericana) y la convergencia COC-NOAM (Cocos-Norteamérica).
SUB2	Superficial (h < 40 km)	Fuerte zona de eventos de subducción de acoplamiento. Convergencia COC-NOAM.
SUB3	Superficial (h < 40 km)	Fuerte zona de eventos de subducción de acoplamiento. Zona de transición, convergencia COC-NOAM.
SUB4	Superficial (h < 40 km)	Fuerte zona de eventos de subducción de acoplamiento. Convergencia COC-Caribe.
IN1	Intermedio-profundo (40 km ≤ h < 180 km)	Zona de eventos intraplaca. Placa de COC. Extensión en profundidad de la zona SUB2.
IN2	Intermedio-profundo (40 km ≤ h < 255 km)	Zona de eventos intraplaca. Zona de transición, placa COC.
IN3	Intermedio-profundo (40 km ≤ h < 460 km)	Zona de eventos intraplaca (COC). Extensión en profundidad de la zona SUB4.
MVB	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos Intraplaca (NOAM cortical) en el centro de México. Provincia tectónica del Cinturón Volcánico Mexicano.
NAM	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos intraplaca (NOAM cortical), sureste de México. No relacionado con el régimen volcánico del MVB.
BC1	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos Intraplaca(Pacífico cortical). Baja California oeste.
BC2	Superficial (h < 15 km)	Zona de eventos Interplaca (Pacífico cortical NOAM). Región del este de Baja California-Mar de Cortés.
SMO	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos Intraplaca (NOAM cortical). Provincia tectónica de Sierra Madre.
BAR	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos Intraplaca (NOAM cortical). Posible extensión sureste de la Provincia de Cuencas y Sierras (Basin and Range)-Rift del Rio Grande.
BB	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos intraplaca (NOAM cortical). Provincia de extensión Cuenca de Burgos.
RIV1	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos Interplaca. La mayoría de las fallas normales, Interface Pacifico-RIV.
RIV2	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos Interplaca. En su mayoría fallas de deslizamiento (strike-slip). Interface Pacifico-RIV.
GMX	Superficial (h < 20 km)	Zona de eventos Intraplaca (NOAM cortical). Provincia del Golfo de México.
NAL	Superficial (h < 20 km)	Escasa sismicidad, zona de eventos intraplaca (NOAM cortical). Península de Yucatán.

Tabla 3. Resumen de las principales características de las regiones sismotectónicas de México (Zúñiga, 2017)

CAPITULO III ZONA DE ESTUDIO

Región	Eventos	Intervalo de tiempo	b^a	a^a anual	M_c	T_{rec} estimada	T_{rec} observada
SUB1	310	2008–2011	0.55±0.00	2.39±0.00	2.80±0.20	54 (≥7.5)	37±37 (≥7.5) (4 eventos)
SUB2	7202	2002–2006	0.75±0.01	3.95±0.05	2.60±0.20	47 (≥7.5)	12±12(≥7.5)
SUB3	9703	2007–2010	0.77±0.01	4.20±0.04	2.70±0.03	37 (≥7.5)	13±11(≥7.5)
SUB4	3633	2005–2011	0.75±0.03	4.07±0.11	3.20±0.02	36 (≥7.5)	25(≥7.5)(2 eventos)
IN1	849	2003–2010	0.80±0.01	3.50±0.03	2.70±0.05	125 (≥7.0)	(1 evento)
IN2	2005	2003–2008	0.83±0.02	3.77±0.07	2.70±0.02	109 (≥7.0)	11±7(≥7.0)
IN3	6510	2005–2010	0.82±0.03	4.35±0.09	3.00±0.09	24 (≥7.0)	23±22(≥7.0)
BC1	2932	2005–2010	0.69±0.01	2.92±0.06	1.30±0.01	16 (≥6.0)	29(≥6.0)(2 eventos)
BC2	9737	2000–2010	0.57±0.01	3.27±0.05	1.40±0.00	5 (≥7.0)	28±45(≥7.0)
SMO	148	2004–2013	0.65±0.10	2.21±0.37	3.00±0.09	11 (≥5.0)	–
MVB	866	2005–2014	0.78±0.04	2.90±0.11	2.09±0.05	60 (≥6.0)	8(≥6.0)(2 eventos)
NAM	773	1998–2010	0.99±0.02	4.15±0.10	3.00±0.04	6 (≥5.0)	17(≥5.0)(2 eventos)
RIV1	26	–	–	–	–	–	–
RIV2	141	2009–2013	0.42±0.00	2.02±0.03	3.60±0.20	5 (≥6.5)	33±20(≥6.5)(3 eventos)
GMX	129	2008–2014	0.77±0.01	2.50±0.06	2.80±0.03	22 (≥5.0)	16±20(≥5.0)
BB	321	2004–2010	0.60±0.11	1.88±0.37	3.00±0.04	104 (≥6.5)	–
BAR	259	2012–2013	0.68±0.03	1.72±0.11	2.90±0.02	48 (≥5.0)	28±19(≥5.0)
NAL	–	–	–	–	–	–	–

Tabla 4: Resultados de parámetros estimados para cada región sismotectónica.

Respecto, a la clasificación de regiones sismotectónicas en México (Figura X), que se basa en características geológicas y tectónicas comunes; mecanismos focales y/o patrones de fallamiento; complejidad de las funciones de tiempo fuente de grandes eventos de subducción, así como, sus factores de acoplamiento y; eventos históricos de la actividad sísmica (Zúñiga et al. 1987; 1997; 2017) la zona metropolitana de Oaxaca, se localiza en la región sismotectónica y sismotectónica: NAM e IN2, respectivamente (Figura 19).

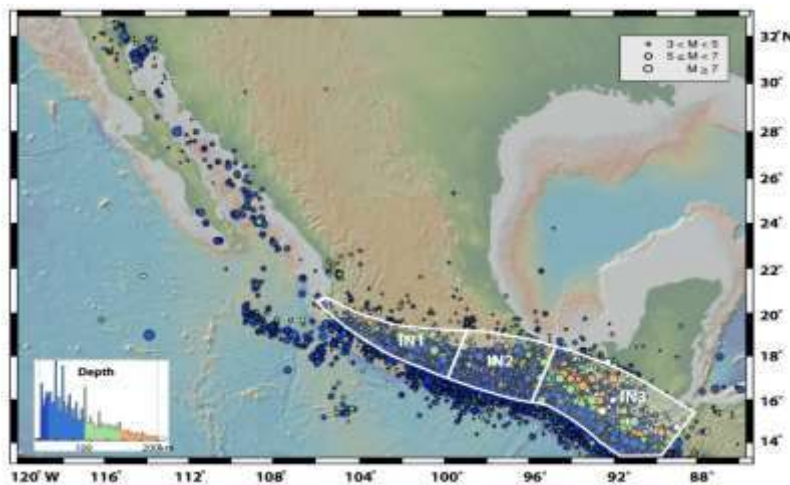


Figura 19: Subdivisión de la región sismotectónica NAM para México. (Zúñiga et al., 2017).

La región **NAM** comprende la actividad somera (profundidad < 20 km) que tiene lugar en la placa continental al sureste de México y no se relaciona con el régimen volcánico del Cinturón Volcánico Transmexicano. A pesar de que el nivel de actividad para magnitudes mayores a 2.9 (rango para el que el catálogo se considera completo desde 1964) se encuentra uniformemente distribuido a lo largo de gran parte de la zona, existe una mayor tasa de sismicidad en la zona del Istmo de Tehuantepec (Jiménez-CENAPRED, 2017). La mayoría de los eventos son de fallamiento normal. En esta región es en donde se presentó el reciente sismo de magnitud 8.2, del 07 de septiembre de 2017. La cantidad de sismos registrados en la zona es de muy alta ocurrencia, considerando que hay registros desde el año de 1902 (CENAPRED, 2019).

Zúñiga et al. (2017) estimaron períodos de recurrencia para la zona central del Estado de Oaxaca, de 6 años para terremotos con magnitudes superiores a 5 que ocurren en la zona NAM (eventos poco profundos con una profundidad inferior a 20 km), períodos de 109 años para magnitudes superiores a 7 que tienen lugar dentro de la placa Cocos subducida (eventos intraplaca con profundidades de 40 a 180 km), y períodos de 37 años para terremotos de magnitud superior a 7,5 que se producen en la zona de acoplamiento de las placas tectónicas de Cocos y América del Norte (área de subducción).

La región IN2 corresponde a eventos intraplaca de profundidad intermedia (40 km < h < 255 km). Zona de transición de la placa de Cocos y corresponde a la extensión a profundidad de la región SUB3. Los mecanismos focales corresponden a falla normal con eje de tensión paralelo a la trinchera. Se caracteriza porque los eventos de profundidad entre 60 y 100 km ocurren a mayor distancia de la trinchera que en las zonas vecinas. Es también una zona con aparente carencia de sismos de profundidad intermedia a distancias entre 100 y 200 km de la trinchera. La cantidad de sismos registrados en la zona es de mediana ocurrencia.

3. 5 Fisiografía

El relieve es el factor principal para delimitar un paisaje. Por tanto, su análisis es fundamental para segmentar las unidades de paisaje de un territorio y constituye, por ello, la base de la regionalización geomorfoedafológica y, después la de los paisajes.

La geoforma es un concepto que designa todos los tipos de formas del relieve, independientemente de su origen, dimensión y nivel de abstracción (Zinck, 1988, Zinck & Valenzuela, 1990b). Tienen un componente interno (hipogeo), relacionado con su génesis y cronología; y externo (epigeo), asociado a sus características morfológicas y morfométricas. El componente externo, puede ser percibido por visión humana o sensores artificiales, porque tienen una apariencia fisionómica en la superficie de la tierra (geopaisaje). El nivel de percepción es subjetivo y nos ayuda

a jerarquizar los componentes estructurales de una superficie. De esta aproximación empírica resulta un esquema jerárquico de geoformas en cinco niveles categóricos anidados (figura 20), cada uno identificado por un concepto genérico pasando de lo general a lo detallado (Zinck, 2012; 1980).

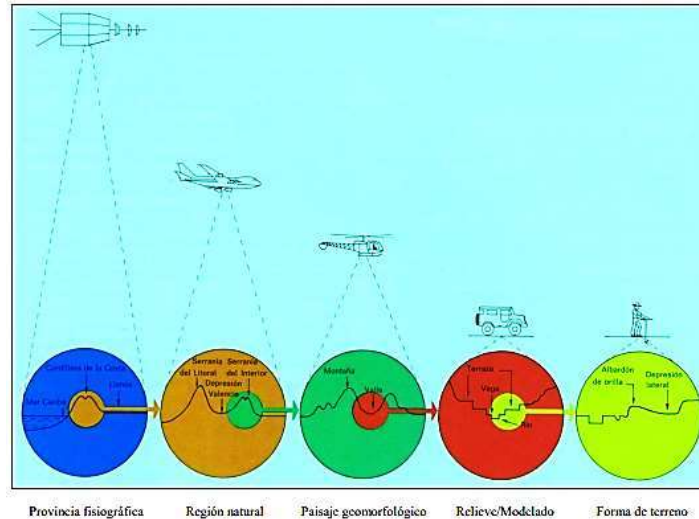


Figura 20: Niveles sucesivos de percepción de geoformas desde diversas alturas de observación (Zinck, 2012; 1980).

Lo anterior, corresponde a una variante genético-cronológica mediante la ordenación de paisajes y geoformas en el ámbito de un país (Zinck, 1974; Elizalde, 2009), combina unidades físico-geográficas en los niveles superiores del sistema con unidades taxonómicas en los niveles inferiores. Las primeras son propias a un contexto regional específico y, por lo tanto, no pueden ser generalizadas o extrapoladas a contextos regionales. Las categorías inferiores presentan un nivel de abstracción suficiente como para poder ser reconocidas mediante características diferenciadas en una variedad de contextos regionales.

Dada la clasificación anterior, para el caso del territorio mexicano, las formas del relieve de mayores dimensiones son los sistemas montañosos, las grandes altiplanicies y las tierras bajas (costeras o continentales). El área de estudio se sitúa en la provincia fisiográfica de La Sierra Madre del Sur, que abarca desde las Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec y que limita al norte con los afloramientos meridionales de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y con el Istmo de Tehuantepec al este y al sur con el margen continental del Pacífico (Figura 21).

La historia geológica de la Sierra Madre del Sur comienza en el precámbrico (Maldonado-koerdell, 1970) y continúa hasta la actualidad. Al sur, las rocas magmáticas han sido reconocidas hasta el borde continental limitado por la Trincheras de Acapulco (Bellón, et.al., 1982). Los sistemas montañosos y depresiones estructuro-litológicas intramontanas presentan un basamento geológico complejo e integrado por la consolidación y yuxtaposición de varias unidades geotectónicas, caracterizadas por rocas cristalinas y metamórficas,

calizas plegadas y otros sedimentos, así como lavas e intrusiones. Siendo el más antiguo, el localizado en la parte central de la Sierra Madre del Sur, conocido como Complejo Oaxaqueño (gneis del precámbrico), caracterizado por primera vez por Pantoja y Robinson (1967). (Hernández, 1994).

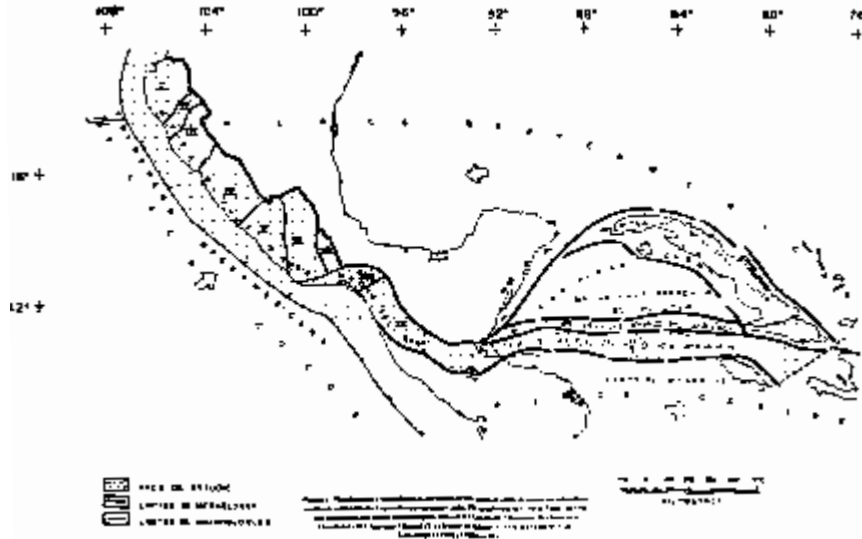


Figura 21 Megabloques y macrobloques del relieve de las zonas de sutura de transición interplacas oceánicas-continentales Cocos-norteamericana-Caribe. El megabloque de la Sierra Madre del Sur está compuesto de 9 macrobloques: I) Jalisco, II) Colima, III) Michoacán, IV) Guerrero Occidental, V) Guerrero Oriental, VI) Oaxaca Occidental, VIII) Tehuantepec y IX) Chiapas.

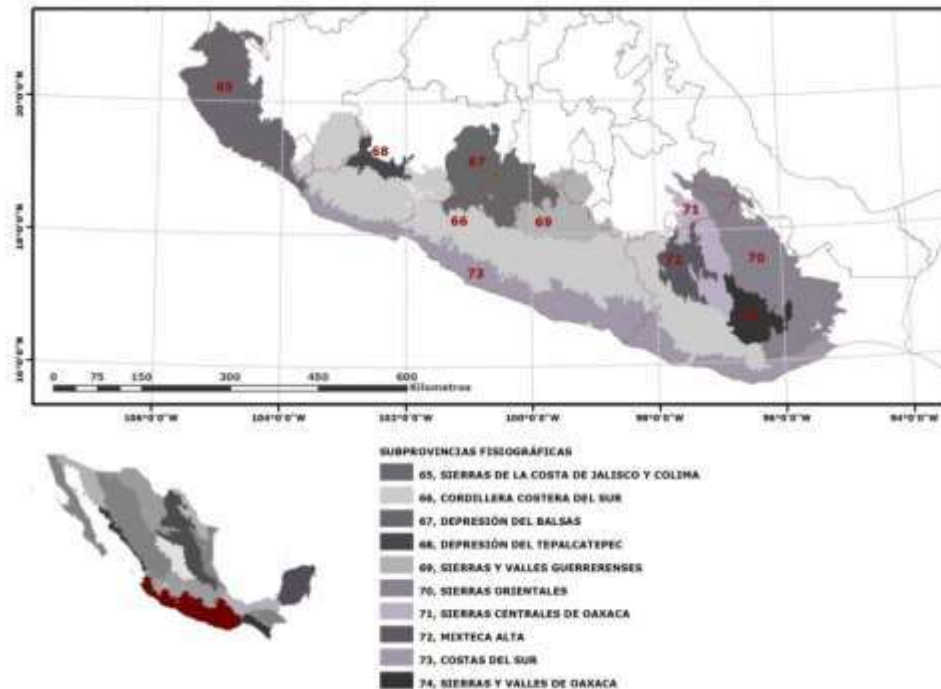


Figura 22: Subprovincias fisiográficas (Tomado de INEGI)

La Sierra Madre del Sur, corresponde a un ambiente morfogenético tectónico-denudativo, conformado por siete taxas a nivel de paisaje, las cuales corresponden a: Valles, altiplanicies, colinas, piedemontes, lomeríos bajos, lomeríos altos y sierras (figura 23).



Figura 23: Tipos de paisaje geomorfológico (Zinck, 1980). 1: valle; 2: planicie; 3: altiplanicie; 4: piedemonte; 5: lomerío; 6: montaña.

Valles: paisajes relativamente planos resultado de la acción fluvial, generalmente limitados por formas transicionales o positivas (piedemonte, altiplanicie, lomerío, o montaña). La pendiente dominante es inferior a 3° y su amplitud puede variar de acuerdo a su extensión longitudinal. Son frecuentes las confluencias de corrientes de agua. Para su reconocimiento, un valle debe tener un sistema de terrazas que, en su mínima expresión, comporta por lo menos una vega y una terraza baja. En ausencia de terrazas, se trata simplemente de un entalle fluvial, el cual queda expresado en un mapa por la red hidrográfica.

Planicies: porción de terreno extensa, plana, no confinada, de posición baja, con poca energía de relieve (1-10 m de diferencia de altura relativa) y pendientes suaves, generalmente menores a 3%. Varios ríos contribuyen a formar un sistema fluvial complejo. Difluencias de corrientes de agua son frecuentes.

Altiplanicies: Paisajes relativamente planos flanqueados por al menos una ladera fuertemente inclinada (altura relativa a partir del rompimiento de la pendiente de la ladera menor a 100m y pendientes menores es a 6°).

Paisajes pedemontanos: Unidades transicionales entre un relieve positivo y la planicie de nivel de base local, al pie de unidades de paisaje más elevadas (p.e. altiplanicie, montaña). Presenta pendientes menores a 10° , la amplitud de relieve puede variar considerablemente, de decenas a cientos de metros. Los piedemontes situados al pie de sistemas montañosos recientes (cordilleras) muestran generalmente rasgos neotectónicos, como por ejemplo terrazas falladas y basculadas.

Dentro de las unidades con relieve positivo se encuentran:

Colinas: elevaciones suaves, con pendientes superiores a 3° y menores a 8° Con alturas relativas menores a 250m.

Lomerío: porción de terreno quebrada, caracterizada por una repetición de colinas redondas o lomas alargadas, con cumbres a alturas variables, separadas por una red hidrográfica moderadamente densa y vallecitos coluvio-aluviales.

Lomerío bajo: Poseen elevaciones más abruptas que las colinas con alturas relativas mayores a 250 m e inferiores a 500m, así como, pendientes que oscilan entre 6° y 20°.

Lomerío alto: Elevaciones con alturas relativas mayores a 500 m e inferiores a 1000 m y pendientes variables entre 20° y 45°.

Montaña: porción de terreno elevada, escabrosa, profundamente disectada, caracterizada por: alturas relativas importantes con relación a las unidades de paisaje circundantes (externas) de posición más baja (planicies, piedemontes); importante disección interna, generando una neta energía de relieve entre las áreas montañosas y los valles intercalados. **Sierra:** Elevaciones abruptas con pendientes superiores a los 30° y alturas relativas superiores a los 1000 m, pero menores a los 4000m.

El objetivo de la caracterización del sistema natural es establecer las condiciones medioambientales que prevalecen en un espacio determinado. Para la elaboración del mapa geomorfológico se propuso una clasificación jerárquica del relieve considerando la clasificación de Zink (1988) y la utilizada por Bocco (1994) para el estado de Michoacán.

Considerando la información proporcionada, se analizaron atributos morfográficos (figura 24) (geometría de las formas, mapa de sombras, topografía) y morfométricos (DEM, pendientes).

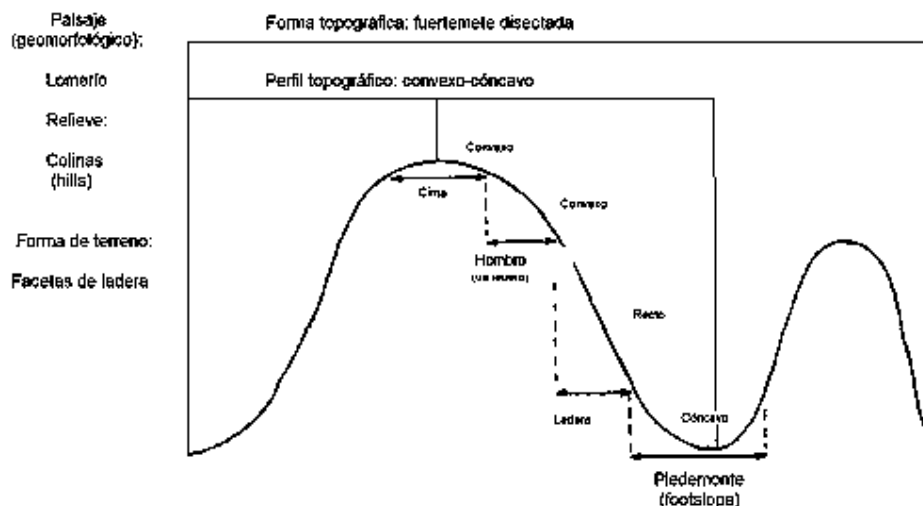


Figura 24: Atributos morfográficos y morfométricos. ZInck (1988).

Los pasos metodológicos para obtener el mapa geomorfológico se resumen en la tabla 5.

FACTOR CONDICIONANTE Mapa Geomorfológico	HERRAMIENTA Arcmap v.10.5.
VARIABLES Modelo digital de elevaciones Curvas de nivel 50 m Modelo de Sombras (HillShade) Mapas base: INEGI (1:1 000 000)	METODOLOGÍA Recopilación de Información. Recopilación de material cartográfico. Generación del modelo de sombras (Hillshade) Generación del mapa de pendientes Caracterización sistemática de las unidades del paisaje.

Tabla 5: Pasos metodológicos para obtener el mapa geomorfológico.

Con base en la clasificación de Zink (1988) y Bocco (1994), se definieron las siguientes unidades de paisaje.

Provincia	Subprovincia	Paisaje	Área
SMS	<ul style="list-style-type: none"> • Sierras y Valles de Oaxaca • Sierras Orientales de Oaxaca • Sierras Occidentales de Oaxaca 	Colina	4.83
		Lomerío alto	117.00
		Lomerío bajo	63.42
		Piedemonte	128.18
		Sierra	131.95
		Valle	192.48

Tabla 6: Resumen de las unidades de paisaje obtenidas de la interpretación geomorfológica.

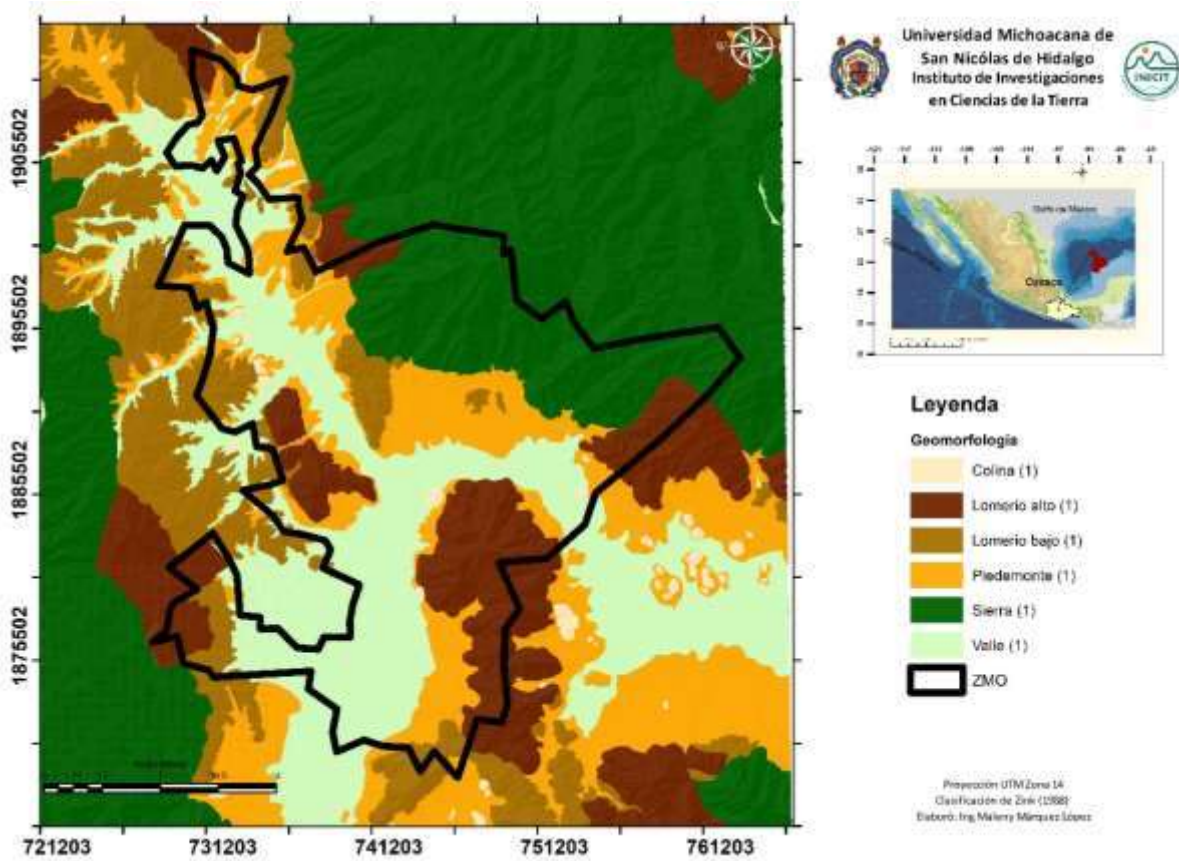


Figura 25: Mapa geomorfológico. Fuente: Elaborado a partir de datos obtenidos del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

3.6 Edafología

Se emplearon las cartas edafológicas con clave E1409 Y E1410, escala 1:250 000, serie II INEGI, en formato digital, ambas cartas fueron realizadas mediante la interpretación visual de imágenes de satélite o espaciomapas en diversas combinaciones de bandas, verificación en campo y análisis de laboratorio por INEGI.

Para la clasificación se utilizó el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo publicado en 1999 por la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo, Centro Internacional de referencia e Información en Suelos (ISRIC) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO/UNESCO). En la tabla 7 se explican las características de los suelos y en la tabla 8 los suelos presentes en la ZMO, así como su ubicación.

Cta	Suelo	Descripción
	<p>Acrisols (114)</p>  <p>Figura 26: Perfil de suelo de Brasil. © ISRIC, www.isric.nl</p>	<p><i>Suelos ácidos fuertemente meteorizados con baja saturación de bases en alguna profundidad. En muchos casos se correlacionan con suelos rojo-amarillos.</i></p> <p>Material parental: Amplia gama de material parental, especialmente rocas ácidas meteorizadas sometidas a constante degradación.</p> <p>Medio ambiente: Antiguas superficies terrestres con topografía accidentada u ondulada, en las regiones con clima húmedo tropical/monzónico, sub-tropical o templado cálido. La vegetación natural típica es el bosque.</p>
	<p>Cambisols (118)</p>  <p>Figura 27: Franco limoso marrón rojizo derivado de material de lavado de taludes, China.</p>	<p><i>Suelos con al menos un horizonte subsuperficial incipiente, evidente por los cambios de estructura y coloración principalmente parduzca, contenido de arcilla y/o remoción de carbonato.</i></p> <p>Material parental: material de textura media y fina.</p> <p>Medio ambiente: Relieve llano a montañoso en todos los climas, amplia gama de tipos de vegetación.</p>
	<p>Fluvisols (120)</p>  <p>Figura 28: Perfil de suelo fluvisol de Sudáfrica, que muestra estratos típicos de sedimentos depositados en lagos, ríos u océanos. ISRIC.</p>	<p><i>Suelos desarrollados en depósitos fluviales, lacustres o marinos. Evidencia de estratificación; pero débil diferenciación de horizontes.</i></p> <p>Material parental: Depósitos recientes fluviales, lacustres y marinos.</p> <p>Medio ambiente: Llanuras de ríos y abanicos fluviales, valles, depresiones lacustres y marismas en todos los continentes y zonas climáticas</p>

Suelo (Clave)	Descripción (Continuación)
<p>Leptosols (94)</p>  <p>Figura 29: Leptosol, sobreyace a roca altamente calcárea. Campeche, México. INEGI, 2015.</p>	<p><i>Suelos delgados.</i></p> <p>Material parental: Varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos del 20% de tierra fina y ricos en fragmentos gruesos.</p> <p>Medio ambiente: Terrenos en elevada o mediana altitud con fuerte pendiente. Comunes en regiones montañosas.</p> <p>Vegetación: Selva Mediana Subcaducifolia, Selva Mediana Subperennifolia, Selva Mediana Caducifolia, Selva Baja Espinosa y Pastizales</p>
<p>Luisols (117)</p>  <p>Figura 30: Sierra alta con meseta Sierra Alica, Nayarit. Carlos Saracco Álvarez.</p>	<p><i>Suelos con una diferenciación edafogenética de arcilla (especialmente migración de arcilla) entre una capa superior con un menor contenido y una capa sub-superficial con un mayor contenido de arcilla.</i></p> <p>Material parental: materiales no consolidados incluyendo till glaciario y depósitos eólicos, aluviales y coluviales. Rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.</p> <p>Vegetación: varía de pastizales, bosque de encino hasta bosque de coníferas; la precipitación varía de 700 a 2,000 mm anuales.</p>
<p>Phaeozems (108)</p>  <p>Figura 31: Lomerío típico en inicio de transición con llanura costera. Casas Viejas, Veracruz, México.</p>	<p><i>Suelos oscuros, ricos en materia orgánica. Porosos, fértiles y excelentes tierras de cultivo.</i></p> <p>Material parental: Eólico (loess), tilla glaciario y otros no consolidados, predominantemente materiales básicos.</p> <p>Medio ambiente: Cálido a frío en regiones moderadamente continentales, terreno plano u ondulado.</p> <p>Vegetación: praderas como la estepa de pastos altos, y/o bosque.</p>
<p>Regosol (121)</p>  <p>Figura 32: Perfil de suelo de Regosol de Ghana, sobre sedimento no consolidado. ISRIC,</p>	<p><i>Suelo poco desarrollado.</i></p> <p>Material parental: material no consolidado, generalmente de grano fino.</p> <p>Medio ambiente: En todas las zonas sin permafrost y a todas altitudes. Son particularmente comunes en zonas áridas y regiones montañosas.</p>
<p>Vertisols (96)</p>  <p>Figura 33: suelo de Vertisol de la India. ISRIC.</p>	<p><i>Suelos arcillosos de color gris o rojo con una alta proporción de arcillas expandibles, no rocosos ni pedregosos, con grietas temporales, son pantanosos durante la temporada de lluvia.</i></p> <p>Material parental: Sedimentos que contienen una alta proporción de arcillas expandibles producidas por neoformación a causa de la meteorización de rocas.</p> <p>Vegetación: Selva Mediana Subperennifolia, Selva Mediana Subcaducifolia, Selva Baja Espinosa, pastizales y áreas agrícolas.</p>

Tabla 7: Clasificación de suelo en base a la Referencial Mundial del Recurso Suelo publicado en 1999 por la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo, Centro Internacional de referencia e Información en Suelos (ISRIC) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO/UNESCO).

Suelo	(Vasquez, 2018)
Acrisols	Sobre rocas del terciario (tobas ácidas y andesitas). La vegetación asociada es bosque de coníferas, y la precipitación varía de 700 a 1000 mm anuales. Su altitud varía desde 1,800 hasta 2,200 msnm.
Cambisols	Lomeríos y premontañas; asociados a bosque de encino, sobre gneis y cataclasita, en un rango de 700 a 1000 mm de precipitación anual.
Fluvisols	Valle intermontano de las partes bajas de cuencas sedimentarias y llanuras, posee una textura arenosa.
Leptosols	Sierras, montañas, pre-montañas y lomeríos. Vegetación de pastizales y bosques, en altitudes de 1,400 a 2,000 msnm desde climas semiáridos a subhúmedos.
Luvisols	Sierras y montañas, y en menor medida, en premontañas y lomeríos, así como en cuencas y llanuras. Se vinculan frecuentemente con los bosques de coníferas y selvas caducifolias de las sierras escarpadas complejas de Oaxaca.
Phaeozems	Sierras y montañas, premontañas y lomeríos y cuencas sedimentarias. Sobre tobas ácidas del terciario y en menor medida sobre lutitas y areniscas en altitudes de 800 a 1,800 msnm.
Regosol	Sobre tierras erosionadas, particularmente en áreas semiáridas y subhúmedas con gran pendiente. Vegetación de pastizal y bosque de encino.
Vertisols	Sobre pendientes menores del 1% y en las llanuras sedimentarias y/o planicies acumulativas de origen lacustre, constituidos por unidades aluvión, gravas, arenas, limos. Arcillas y carbonatadas, (Ortiz-Pérez et al., 2004), en los distritos de Zaachila y Zimatlán.

Tabla 8: Suelos de los Valles Centrales de Oaxaca (Vásquez, 2018).

Esta diversidad de suelos se manifiesta en un mosaico en el que se presentan suelos poco desarrollados como leptosoles hasta altamente desarrollados como los acrisoles. En las sierras y montañas el mosaico de suelos está conformado principalmente por luvisoles y acrisoles asociados con leptosoles, regosoles y cambisoles. En la zona de planicies y lomeríos predominan cambisoles, regosoles, leptosoles y phaeozems; y en la parte baja de los valles se registran vertisoles, phaeozems, luvisoles y fluvisoles (figura 34).

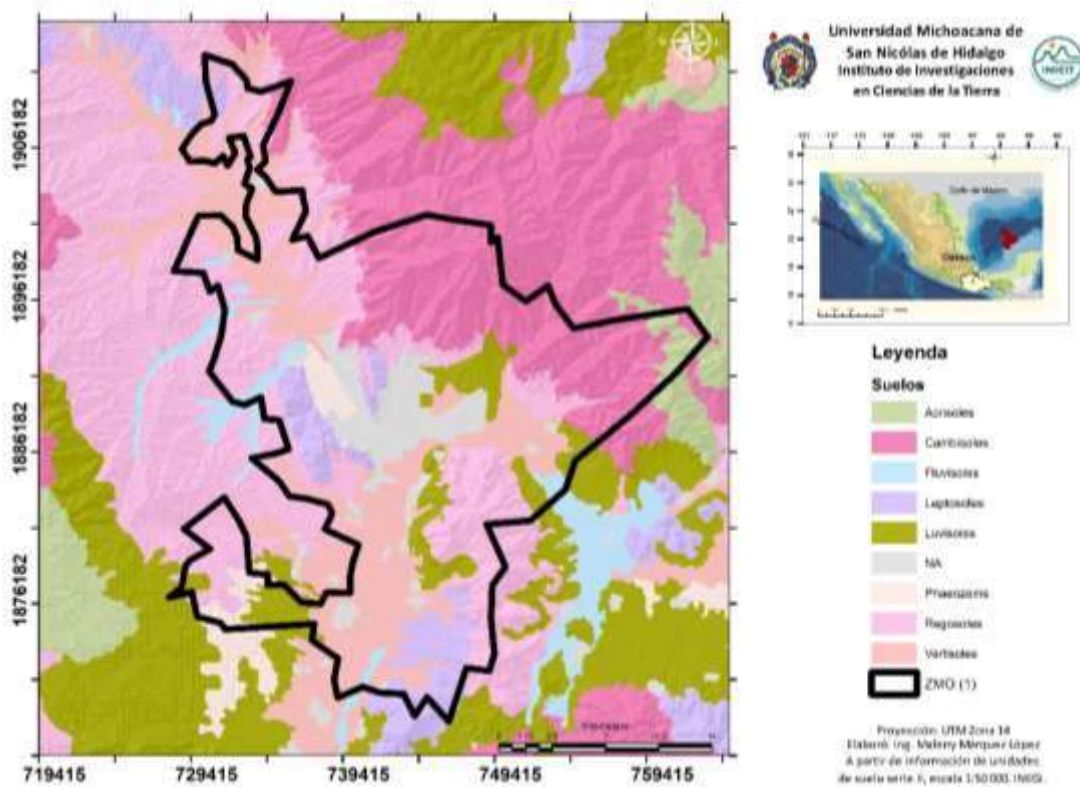


Figura 34: Suelos dominantes en la Zona Metropolitana de Oaxaca. Digitalizado a partir de información de unidades de suelo serie II INEGI.

3.7 Cobertura

En este capítulo se describe la metodología y las fuentes de datos como variables a ser utilizadas en la identificación de peligros geohidrometeorológicos.

En la figura 35 se observa la imagen satelital Sentinel obtenida del portal del portal de la United States Geological Survey (USGS), con fecha del 18 de febrero del 2020 con una resolución de 20 por 20 metros. La imagen fue recortada y georeferenciada agregando puntos de control en el área de estudio. Mediante el uso de un SIG, se interpretó el mapa de cobertura y uso de suelo del año 2020, a escala 1:50 000, con a mediante el uso de un SIG. La clasificación visual de imágenes satelitales se basó en la digitalización en pantalla de imágenes a partir de la combinación de diferentes bandas (RGB) y modificación de sus histogramas, con la finalidad de visualizar simultáneamente información de distintas regiones del espectro.



Figura 35 Georreferenciación de imagen SENTINEL 2020 a partir de ortofotos de 1994 obtenidas del portal digital de INEGI. FUENTE: Elaboración propia, obtenida del programa SIG.

Posteriormente, a partir de los conocimientos previos del área de estudio y las visitas a campo se determinó la leyenda a utilizar en la interpretación de la cobertura y uso del terreno (Ver tabla 9). La leyenda comprende coberturas naturales y antrópicas de acuerdo al grado de conservación, es decir, al grado de densidad de vegetación tipo en un área determinada: cerrada: áreas con un porcentaje de vegetación tipo mayor a 75%; semiabierta: áreas con un porcentaje de vegetación tipo entre 50 y 75%; abierta: superficies con más del 25% y menos del 50% de cubierta vegetación tipo y superficies con menos del 25% de su vegetación tipo, son clasificadas de acuerdo a la cobertura predominante.

Bajo este criterio, los asentamientos humanos se clasificarán como: Superficie construida densificada: con un grado de ocupación por construcciones mayores al 75%. Superficie construida semidensificada: con un grado de ocupación mayor del 50% y menor del 75%. Superficie construida poco densificada: con un grado de ocupación mayor del 25% y menor del 50%. Vacíos urbanos: con un porcentaje de ocupación inferior al 25%, en la cual se incluyen lotes baldíos.

La clasificación visual de imágenes satelitales se basó en la digitalización en pantalla de imágenes, a partir de la combinación de diferentes bandas (RGB), proceso que permite visualizar simultáneamente información de distintas regiones del espectro. El proceso facilitó la delimitación visual de algunas cubiertas, permitiendo que a cada elemento contenido en la imagen se le asignará una

categoría contenida en la leyenda. La escala utilizada es de 1:50 000 con un área mínima cartografiable de 0.04km² (4 ha).

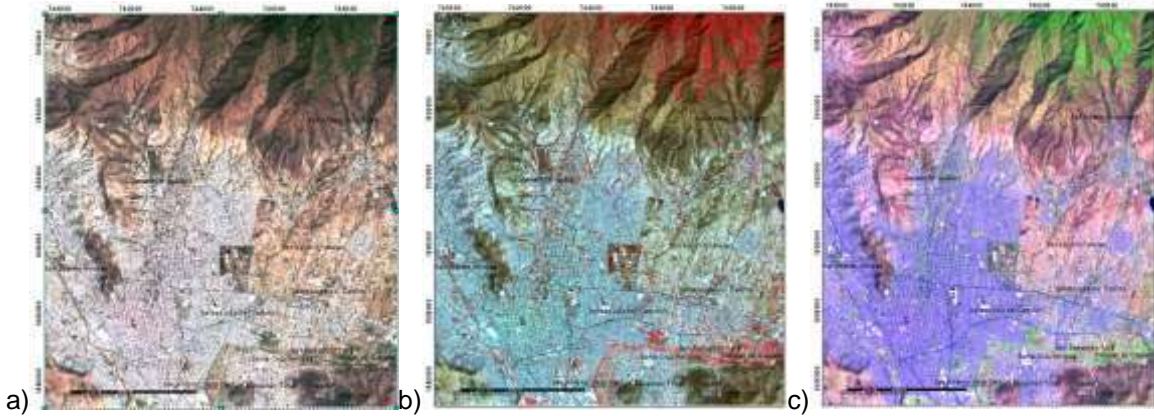


Figura 36 Imágenes multibanda en a) color natural, b) y c) falso color. Fuente: Elaboración propia a partir de la combinación de bandas de la imagen Sentinel 2-A.

Posteriormente, se realizaron salidas al campo para el mejor control de información y las correcciones de la clasificación para su revisión final. Figura 36.



Figura 37: Fotografías obtenidas de las visitas a campo que corresponden a los tipos de cubierta vegetal y antrópica en la ZMO.

Los bosques y selvas de Oaxaca presentan coberturas semiabiertas con algún grado de fragmentación, debido a la tala de árboles y el cambio de uso de suelos por cultivos de riego y uso habitacional. Asimismo, se observa un cambio prominente de zonas de cultivo de temporal por asentamientos urbanos, pastizales y/o matorrales, lo que dificultó la interpretación.

CAPITULO III ZONA DE ESTUDIO

Tabla 6 Leyenda generalizada y específica.

Generalizada	Específica	Km ²	Descripción (INEGI, 2009)
Bosque de pino	Bosque cerrado	49.74 7.80%	Constituida por árboles del género Pinus. Los pinarios priarios presentan un estrato inferior relativamente pobre en arbustos, pero con abundantes gramíneas. La mayoría de pinos tiene afinidad con climas templados a fríos y húmedos.
	Bosque semiabierto		
	Bosque abierto		
Bosque de encino-pino	Bosque cerrado	30.32 4.75%	Comparte espacio con diferentes especies de pino. No obstante, la predominancia de encinares da origen a los bosques de encino. La mayor parte de las zonas templadas son de dosel cerrado.
	Bosque semiabierto		
	Bosque abierto		
Bosque de encino	Bosque cerrado	59.73 9.36%	Junto a los encinos, se considera como una fase de transición al desarrollo de bosques de pino.
	Bosque semiabierto		
	Bosque abierto		
Selva baja caducifolia	Selva baja caducifolia cerrada	35.70 5.60%	Formaciones vegetales en donde más del 75% de las especies que la integran pierden las hojas en la época más seca del año. Componentes arbóreos de 4 a 10 m (eventualmente hasta 15m).
	Selva baja caducifolia semiabierta		
	Selva baja caducifolia abierta		
Matorral	Matorral cerrado	106.07 16.63%	Vegetación arbustiva de zonas áridas, que presenta alturas no mayores a los 4m. La cobertura dominante se conforma por vegetación arbustiva muy densa formada por especies inermes y espinosas
	Matorral semiabierto		
	Matorral abierto		
Pastizal	Pastizal inducido	48.05 7.53%	Surge cuando es eliminada la vegetación original, como consecuencia del desmonte de cualquier tipo de vegetación. Asimismo, puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas o como producto de áreas que se incendian con frecuencia.
Cultivos de temporal	Cultivos de temporal	35.66 5.59%	El ciclo vegetativo de los cultivos que se siembra depende del agua de lluvia, por lo que, su éxito depende de la precipitación y la capacidad del suelo para retener agua.
Cultivos de riego	Cultivos de riego	91.31 14.31%	Estos agro sistemas utilizan agua suplementaria para el desarrollo de cultivos.
	Invernaderos		
	Plantación forestal		
Asentamientos Humanos	Superficie construida densificada	180.86 28.35%	No son parte de la cobertura vegetal ni de las áreas pero inciden sobre ellas.
	Superficie construida semidensificada		
	Superficie construida poco densificada		
	Vacios urbanos		
	Fraccionamientos		
	Zonas industriales		
	Aeropuerto		

Cuerpos de agua	Cuerpos de agua	0.44 0.07%	
	Ríos		
	Represas		
Áreas sin vegetación	Banco de material	0	Zonas que han sido desprovistas de vegetación por actividades humanas, como es el caso de minas
	Área sin vegetación aparente		

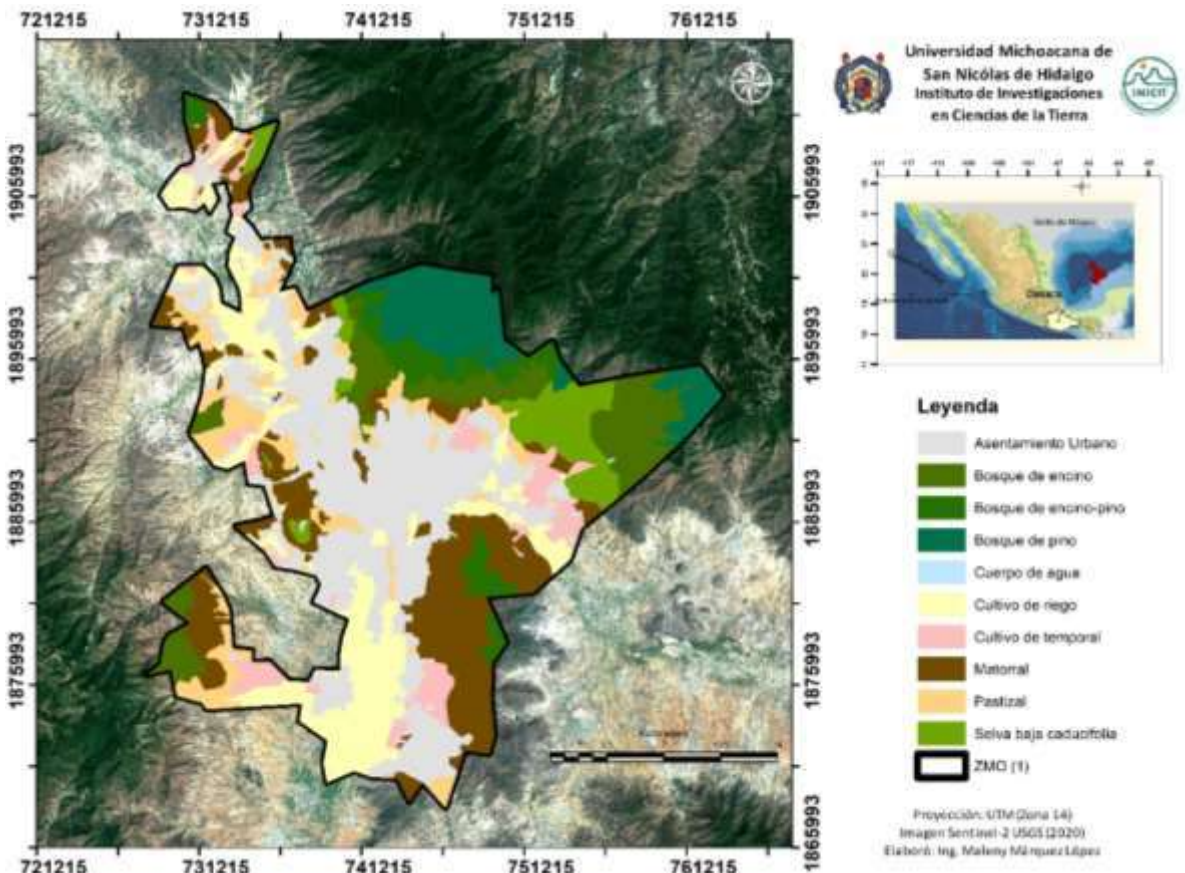


Figura 38: Clasificación general de la cobertura dominante en la Zona Metropolitana de Oaxaca.

3.8 Pendientes

El análisis de pendientes tiene como objetivo caracterizar las formas del relieve en función del grado de inclinación y procesos erosivos que la modelan. Los valores de pendiente pueden obtenerse por medio de fórmulas aritméticas, sus unidades están en función del tipo de información que se quiera obtener como m/km, porcentajes o grados, pero en la cartografía se acostumbra en grados.

Para la metodología de este análisis se utilizaron las curvas de nivel a 50 m obtenidas del mapa digital de elevaciones INEGI (2010). Para la construcción de los rangos de pendiente se tomaron en cuenta los trabajos de García (1993), Gómez (1998), Lugo (1988), Protección Civil (2004), INE, 2003 (Tabla 10)

CAPITULO III ZONA DE ESTUDIO

Rango	Pendiente
<1	Plana
1-3	Muy suavemente inclinada
3-5	Suavemente inclinada
5-10	Ligeramente inclinada
10-15	Ligera a medianamente inclinada
15-20	Medianamente inclinada
20-30	Fuertemente inclinada
30-45	Intensamente inclinada
>45	Abrupta

Tabla 10 Tabla de clasificación de pendientes Lugo, 1988

La región representa una topografía irregular que va de 1300 a 3300msnm, alcanzando pendientes de hasta un 80%. Las pendientes están relacionadas con la morfología y dinámica de las formas de relieve, por ello, los valores más alto de pendientes se asocian a las zonas de montaña, laderas y escarpes de falla donde el terreno es más abrupto y el escurrimiento superficial es más rápido, como se puede observar en la figura 38, esto concuerda con las pendientes pronunciadas al poniente de la zona de estudio donde se localiza la falla Oaxaca y que separa la subprovincia fisiográfica Sierras y valles de Oaxaca de la Sierra Oriental de Oaxaca.

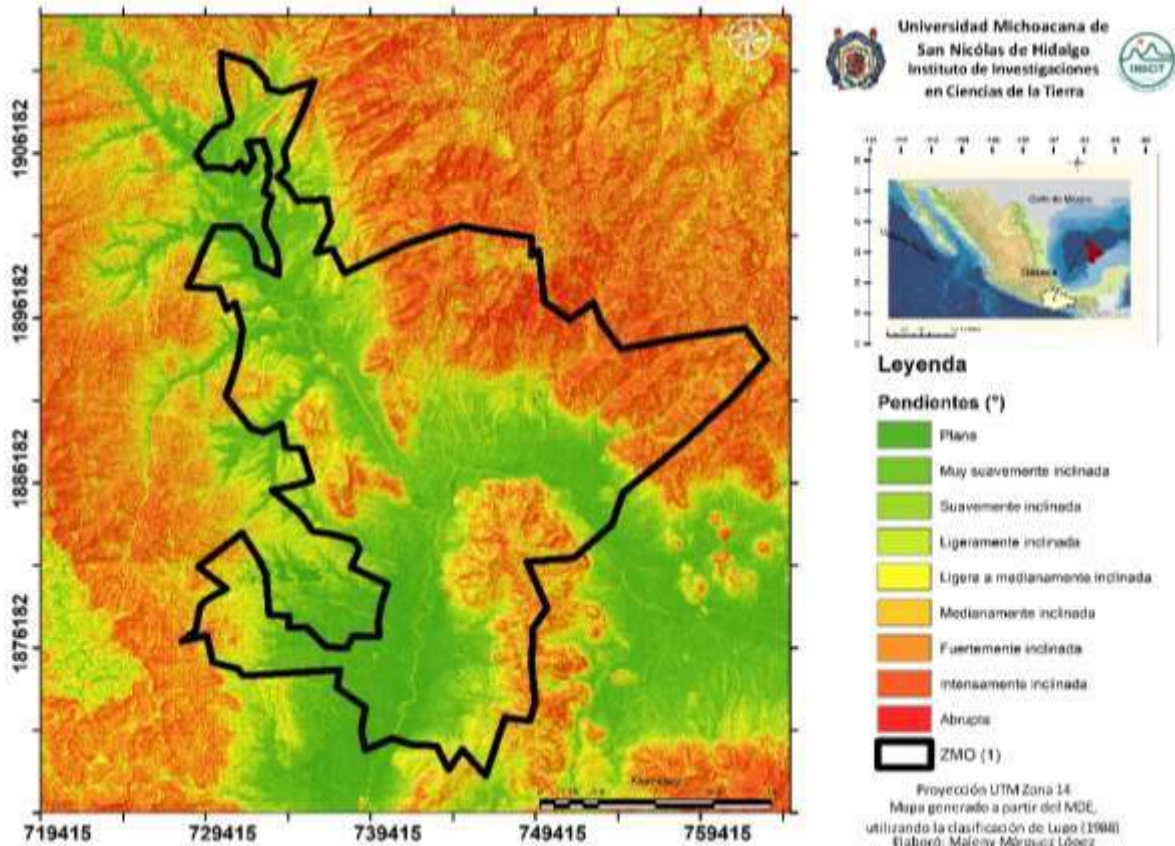


Figura 39 Mapa de pendientes generado a partir de la clasificación de Lugo (1988)

Las zonas de menor pendiente se localizan en las partes más bajas, que corresponde al noroeste al valle de ETLA, al oriente el Valle de Tlacolula y hacia el sur al valle Zimatlán-Ocotlán que juntos con forman una especie de Y. Siendo, este ultimo la zona más baja respecto a las dos anteriores. Lo que ocasiona que sean zonas más susceptibles a inundaciones. Por otra parte, esta región se asocia a la cima de lomeríos, colinas y montañas.

La zona de suave a ligera inclinación corresponde a zonas de piedemonte donde existe una acumulación de sedimentos debido a la erosión y caída de material. Así como en zonas de laderas convexas, en las cuales existe pérdida de suelo y poca vegetación. Mientras que la zona de pendiente ligera a mediana inclinación predomina lomeríos, colinas y laderas de elevaciones menores

CAPITULO IV MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

En la zonificación sísmica se toma en consideración la distribución de los peligros sísmicos en todo el país o en regiones más extensas; mientras que la microzonificación sísmica se refiere en cambio a una distribución más local. Ante el costo de una red permanente que permita registrar movimientos sísmicos fuertes, el análisis de microtremores es una herramienta práctica y útil para evaluar efectos de sitio y son ampliamente utilizados en estudios de microzonificación sísmica.

4.1 Efecto de sitio

El efecto de sitio se define como la modificación de la señal sísmica debido a una variación en la amplitud de la señal durante su trayectoria del basamento rocoso hasta la superficie.

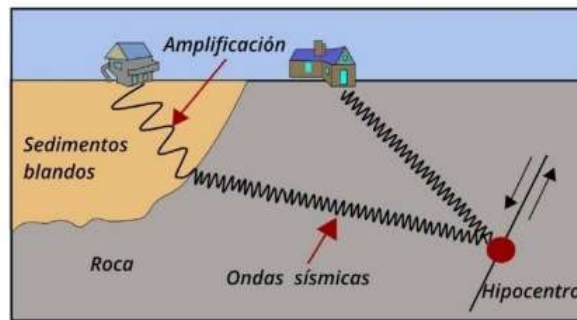


Figura 40 Comportamiento de las Ondas Sísmicas en la roca sólida y en sedimentos desde el punto donde se origina el sismo denominado hipocentro o foco sísmico. (Zambrana, 2019)

La forma, la amplitud, la duración y otras características de una onda sísmica se afectan no solo por su magnitud y la distancia hipocentral, sino también de la geología, la trayectoria de transmisión, las condiciones locales del sitio, y otros factores (Wakabayashi, 2006. Cherry, 1974).

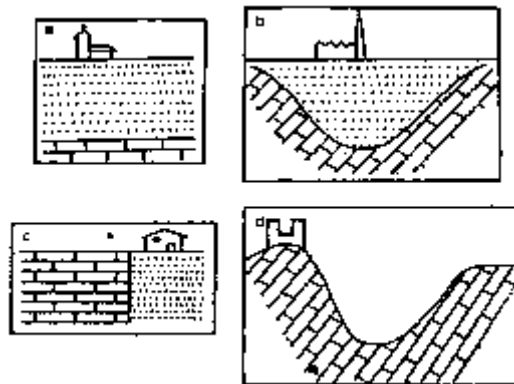


Figura 41: Estructuras y configuraciones tipo que pueden dar lugar a efectos de sitio. A) Capas sedimentarias horizontales sobre un substrato rocoso; b) relleno sedimentario de un valle; c) discontinuidades laterales bruscas; d) relieve. Bard et.al. 1995.

El contraste de impedancias contribuye a los efectos de amplificación. Entre mayor sea el contraste de impedancia (z) entre la roca dura y la roca más joven y no consolidada, mayor será la amplificación debido a que la capa con menor impedancia provoca el atrapamiento de ondas de cuerpo, ocasionando que las ondas de cuerpo incidentes se propaguen a través del aluvión como ondas superficiales, lo que produce efectos de agitación más fuertes y de mayor duración (KRAMER, 1996). La frecuencia de resonancia más baja, se denomina frecuencia fundamental o del sitio natural, f_s y depende del espesor y la consistencia de los sedimentos suprayacentes.

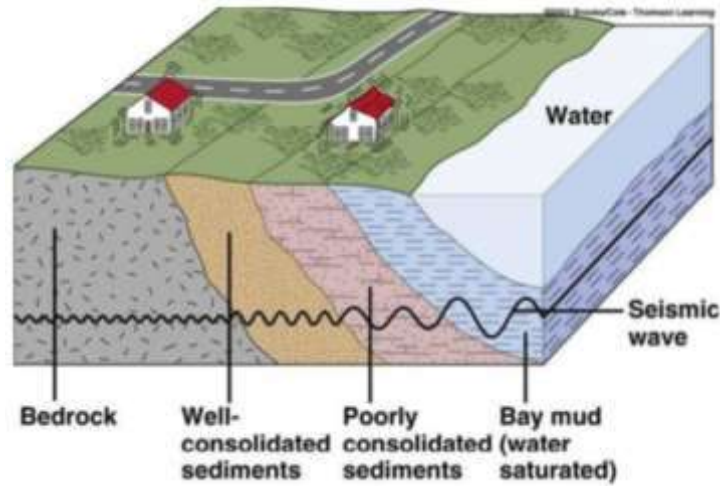


Figura 42: Un contraste de impedancias provoca un cambio en las características geométricas de las ondas (Tomado de Argudo, J.F.).

Asimismo, las topografías convexas a lo largo de la pendiente de la montaña, conducen a una amplificación del movimiento sísmico del suelo, debido al contraste con topografías cóncavas (los valles o las colinas) que tienden a desamplificar las señales sísmicas.

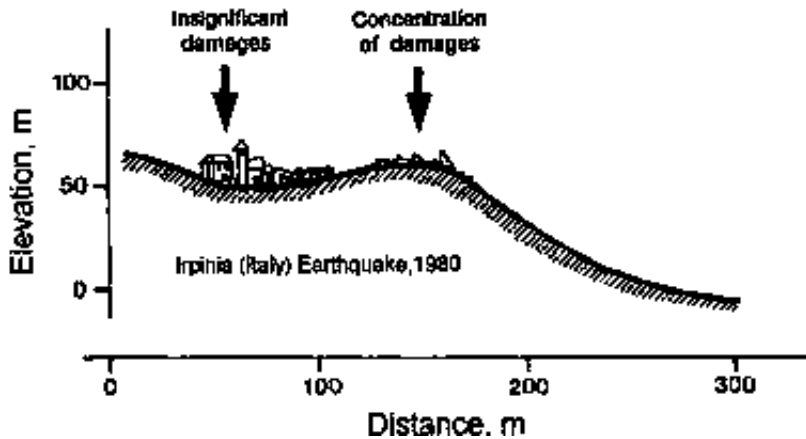


Figura 43 Esquema que ilustra la gravedad de la ocurrencia de daños en las características topográficas (figura tomada de Athanasopoulos et al., 1998).

4.2 Microtremores

Los microtremores se generan por vibraciones generadas por efectos artificiales como tráfico, maquinaria industrial, explosiones de dinamita, transportes, pisadas humanas y/o animales, etc., por lo que, se conocen como ruido sísmico ambiental, y aportan información del medio que atraviesan debido a su estabilidad. Respecto a su fuente se clasifican en naturales (frecuencias <1); naturales y culturales (frecuencias intermedias: 1-5 Hz) y esencialmente culturales (frecuencias >5) (Tabla 11).

	Gutenberg (1958)	Asten (1984)
Olas oceánicas golpeando las costas	0.05 - 0.10 Hz	0.50 - 1.2 Hz
Perturbaciones meteorológicas a gran escala / Monzones	0.10 - 0.25 Hz	0.16 - 0.5 Hz
Ciclones sobre los océanos	0.30 - 1.00 Hz	0.50 - 3.0 Hz
Condiciones meteorológicas a escala local	1.40 - 5.00 Hz	
Tremor volcánico	2.00 - 10.00 Hz	
Urbano	1.00 - 100.0 Hz	1.40 - 30.0 Hz

Tabla 11: Clasificación de microtremores.

Las características espectrales pueden correlacionarse con las condiciones geológicas. En la figura 44 se muestran ejemplo de microtremores observados en diferentes suelos.

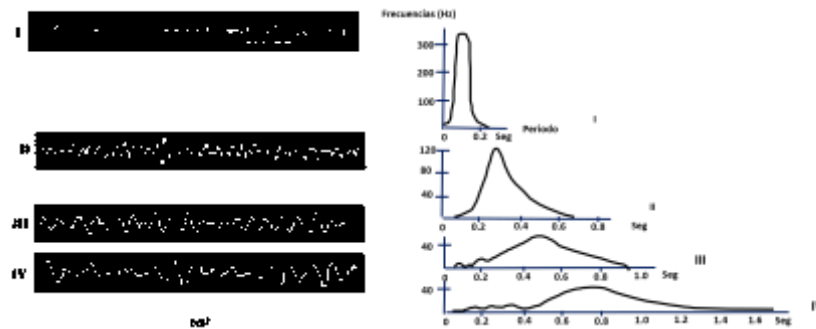


Figura 44. Comportamiento de los microtremores dependiendo el tipo de suelo. Tipo I: rocas y gravas arenosas duras del terciario. Tipo II: gravas arenosas, arcillas arenosas duras y otros suelos de tipo aluvial gravoso con espesores de 5 metros o más. Tipo III: suelo aluvial con espesor de 5 metros o más. Tipo IV: suelo aluvial de depósitos deltaicos blandos, suelo superficial y limos con espesores de 30 metros o más (CENAPRED, 2017).

Udwadia y Trifunac(1973) señalan una nula correlación entre los espectros de movimientos sísmicos fuertes y microtemblores, sin embargo, mostraron que los microtremores son aplicables en áreas que presentan una resonancia fuerte a un terremoto. Ya que el periodo de resonancia obtenido con el registro de microtemblores en superficie concuerda con el obtenido del movimiento sísmico (Kanai y Tanaka, 1961). Lermo y Chávez García (1994) mediante la técnica de Nakamura, concluyeron que la relación espectral de microtremores horizontal y vertical (H/V) da una mejor estimación del periodo predominante en un sitio y

permite una estimación más aproximada al nivel de amplificación que la relación espectral entre dos sitios.

4.3 Técnica de Nakamura

La técnica de Nakamura (1989) está basada en la suposición que el cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical de los microtremores es una aproximación de la función de transferencia de los suelos (García, 1998).

La técnica de la relación HVSR fue propuesta primero por Nogoshia e Igarashi (1971), y luego fuertemente enfatizada por Nakamura (1989, 1996, 2000). Estos autores han señalado la correlación entre la frecuencia máxima H/V y la frecuencia de resonancia fundamental del sitio, y propusieron utilizarla como un indicador de las características del suelo subterránea (Bonnetoy, 2006). Lermo y Chávez-García 1993; Gitterman et al. 1996; Seekins et al. 1996; Fäh, 1997, han demostrado que el procedimiento H/V puede ser exitosamente aplicado para identificar la frecuencia de resonancia fundamental de depósitos sedimentarios.

La técnica de Nakamura (1989) parte del principio de que la energía de los microtremores, consisten principalmente de ondas Rayleigh y que la amplificación de las aceleraciones en la superficie del terreno se deba a las capas de suelo blando que esta sobre sobre el suelo firme o basamento.

Una función de transferencia es un modelo que relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada (E_T).

$$E_T = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad E_S = \frac{\text{Espectro de amplitudes de Fourier en la superficie}}{\text{Espectro de amplitudes de Fourier del basamento}}$$

Que siguiendo el postulado que el efecto de las ondas Rayleigh es visible principalmente en el movimiento vertical, se puede definir el radio como:

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad E_S = \frac{\text{Espectro de amplitudes de Fourier en la superficie}}{\text{Espectro de amplitudes de Fourier del basamento}}$$

En ausencia de ondas Rayleigh toma un valor de 1 y si este número de ondas se incrementa toma un valor de <1. Si el efecto de la onda Rayleigh es igual en la superficie para el movimiento vertical y horizontal.

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad E_S = \frac{\text{Espectro de Fourier en la superficie}}{\text{Espectro de Fourier del basamento}}$$

Entonces, la función de transferencia modificada (S_M) propuesta por Nakamura:

$$S_M = \frac{S_T}{E_S} = \frac{S_{HS} * S_{VB}}{S_{HB} * S_{VS}} \quad S_M = \frac{\text{Función de transferencia clásica}}{\text{Ratio}} = \frac{S_{HS} * S_{VB}}{S_{HB} * S_{VS}}$$

Para un rango de frecuencias entre 0.1 a 20 Hz, se estableció que:

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \cong 1$$

La función de transferencia modificada de Nakamura se expresa como:

$$S_M = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

Los efectos de la topografía de la superficie son mayores en los componentes horizontales que en los verticales, lo que indica que el movimiento S se ve más afectado por la topografía de la superficie que el movimiento P.

4.4 Historia sísmica de la región

El comienzo del monitoreo sísmico en Oaxaca se remonta a la segunda década del siglo XX, ya que, entre 1910 y 1923 se instalaron en total 9 estaciones sismológicas mecánicas autónomas. La central fue instalada en Tacubaya (Ciudad de México) y las foráneas en las ciudades de Mazatlán, Oaxaca, Mérida, Chihuahua, Veracruz, Guadalajara, Monterrey y Zacatecas. Para ello, se eligieron sismógrafos "Wiechert" de fabricación alemana (figura 45).



Figura 45: Mapa de las primeras estaciones autónomas (izquierda). Sismógrafo Wiechert (centro). Tomado del Servicio Sismológico Nacional (SSN)

Adicionalmente a la red del SSN, diversas instituciones, han implementado redes de instrumentación con la finalidad de entender el fenómeno sísmico de la región. Entre ellas, se encuentra la Red regional del Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO), Red Sísmica de la Comisión Federal (CFE), Red Sismológica del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La red de Oaxaca y Ciudad de Oaxaca cuenta con 19 acelerógrafos.

CAPITULO IV MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

En el estado de Oaxaca se registra aproximadamente el 25% de los sismos del país, ya que su actividad está asociada al proceso de subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica. La sismicidad histórica en el estado de Oaxaca, reportada con magnitudes superiores a $M > 6$, se muestran en la tabla 12.

Año	Mes	Día	Magnitud	Profundidad	Observaciones
1495					En Mitla, respecto el Códice Mendoza. (Garduño-Monroy, 2019)
1507			7		Códice Telleriano-Remensis (Garduño-Monroy, 2019)
1537				?	Costas de Oaxaca, se considera un predecesor al sismo de 1787 (Ramírez, et. al. 2020).
1787	3	28	8.6	?	Cercano a la llanura costera de Corralero, Oaxaca. Lo que provocó un tsunami en la costa de Oaxaca. (Ramírez, et. al 2020)
1787	4	3	7.3	?	A 18 km de Tehuantepec, costa de Pochutla y Juquila (Soloviev, 1975; Sánchez, 1993).
1910	9	23	6.9	80	65 km al sureste de Tlacolula, Oaxaca.
1911	2	3	6.5	80	19 km al este de Huajuapán de León, Oaxaca.
1911	8	27	6.7	100	51 km al este de Tlacolula, Oaxaca.
1916	6	2	7	150	42 km al sur de Sayula de Alemán, Veracruz.
1917	12	29	6.9	33	96 km al sur de Puerto Escondido, Oaxaca.
1928	3	21	7.5	33	12 km al sureste de la Crucecita, Oaxaca.
1928	4	16	6.7	115	55 km al suroeste de Tuxtepec, Oaxaca.
1928	6	16	7.6	33	11 km al oeste de Miahuatlán, Oaxaca.
1928	8	4	7.4	33	49 km al sur de la H. Tlaxiaco, Oaxaca.
1928	10	8	7.5	33	35 km al noreste de Río Grande, Oaxaca.
1931	1	14	7.8	40	30 km al oeste de Miahuatlán, Oaxaca.
1937	12	23	7.4	33	46 km al suroeste de H. Tlaxiaco, Oaxaca.
1937	12	25	6.5	33	54 km al suroeste de Río Grande, Oaxaca.
1946	7	10	6.9	130	59 km al este de Matías Romero, Oaxaca
1948	1	6	7	80	45 km al sureste de H. Tlaxiaco, Oaxaca.
1950	12	14	7.2	33	47 km al oeste de H. Tlaxiaco, Oaxaca.
1951	12	11	7	100	59 km al este de Matías Romero, Oaxaca.
1957	4	9	6.7	33	93 km al sur de Pinotepa Nacional, Oaxaca.
1959	5	24	6.8	80	28 km al sureste de Tepelmeme, Oaxaca.
1960	7	13	6.9	150	59 km al este de Matías Romero, Oaxaca.
1965	8	23	7.5	12	53 km al noreste de la Crucecita, Oaxaca.
1968	8	2	7.3	16	39 km al noreste de Pinotepa Nacional, Oaxaca.
1968	11	28	6.6	23	114 km al sureste de Salina Cruz, Oaxaca.
1972	11	12	6.5	14	73 km al sur de Salina Cruz, Oaxaca.
1973	8	28	7.3	82	30 km al suroeste de Tierra Blanca, Veracruz.
1978	11	29	7.6	23	32 km al noroeste de San Pedro, Pochutla, Oaxaca.
1979	6	22	6.9	115	49 km al noreste de Matías Romero, Oaxaca.
1980	10	24	7.1	65	19 km al este de Acatlán de Osorio, Puebla.
1982	6	7	6.9	6	23 km al noroeste de Pinotepa Nacional, Oaxaca.
1982	6	7	7	19	20 km al sureste de Ometepec, Guerrero.
1983	1	24	6.8	50	2 km al suroeste de Salina Cruz, Oaxaca.
1987	7	15	6.0	68	46 km al noreste de Tlaxiaco, Oaxaca.

CAPITULO IV MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

1993	9	30	6.4	13	156 km al sur de Salina Cruz, Oaxaca.
1994	7	4	6.1	19	117 km al sur de Puerto Escondido, Oaxaca.
1995	9	14	7.3	21	29 km al noreste de Ometepec, Guerrero.
1996	2	24	7.1	15	52 km al sur de Pinotepa Nacional, Oaxaca.
1996	3	19	6	15	59 km al sur de Rio Grande, Oaxaca.
1997	7	19	6.7	15	58 km al suroeste de Pinotepa Nacional, Oax
1998	2	2	6.4	33	12 km al sureste de San Pedro Pochutla, Oax
1999	6	15	7	63	29 km al suroeste de San Gabriel Chilac, Puebla.
1999	9	30	7.4	39	22 km al noreste de Puerto Escondido, Oaxaca.
2004	6	14	6.4	10	18 km al suroeste de Pinotepa Nacional, Oax
2010	6	30	6	4	13 km al sureste de Pinotepa Nacional, Oax
2012	3	20	7.5	18	46 km al sur de Ometepec, Guerrero.
2016	5	8	6	7.4	19 km al este de Pinotepa Nacional, Oax
2017	9	7	8.2	45.9	En el Golfo de Tehuantepec a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas.
2017	9	19	7.1	38.5	8 km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla.
2017	9	23	6.1	10	9 km al suroeste de Cd. Ixtepec, Oax
2018	2	16	7.2	16	14 km al sureste de Pinotepa Nacional, Oax.
2018	2	19	6	10.2	31 km al sureste de Pinotepa Nacional, Oax
2020	1	4	6	83	90 km al sureste de Salina Cruz, Oax
2020	6	23	7.4	22.6	2 km al noreste de Crucecita, Oax.

Tabla 12: Sismicidad histórica del estado de Oaxaca. FUENTE: Modificado del catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional (SSN).

Los eventos más importantes ocurridos en esta zona son los del 3 de febrero de 1911 (Ms7.2), 10 de febrero de 1928 (Ms 7.7); el 15 de enero de 1931 (Ms 8.0); el 26 de julio de 1937 (Ms7.2); 6 de enero de 1948 (Ms 7.0); 28 de agosto de 1973 (Ms 7.3) de Córdoba-Orizaba y el del 10 de octubre de 1980 (Mw7.1) cerca de la Cd. De Huajuapán de León (Singh et al. 1985a). Otros sismos importantes son el sismo del 30 de septiembre de 1999 (Mw 7.5); y del 7 de septiembre de 2017 (M 8.2).

El sismo del 15 de enero de 1931 de magnitud 7.8 dañó edificios públicos, así como, templos y exconventos en poblaciones del Valle de Oaxaca, mediante un mecanismo focal de falla normal que aparentemente atravesó la litosfera, en una falla ubicada inmediatamente por debajo de una zona de acoplamiento fuerte (Singh et al. 1985a; Zuñiga, 2017). El sismo del 30 de septiembre de 1999 de magnitud 7.4, causó varios muertos en el estado de Oaxaca y daño importantes a infraestructura en viviendas, escuelas, hospitales, puentes y carreteras. Ambos se originaron en el interior de la placa Norteamericana. El sismo del 7 de septiembre de 2017, con una magnitud de 8.2 en el Golfo de Tehuantepec. El sismo ocasionó graves daños en la región del istmo, principalmente en poblados como Juchitán, El Espinal y Asunción Ixtaltepec. Este fue un sismo intraplaca con mecanismo normal, el cual ocurrió al interior de la placa de Cocos.

El sismo del 2 de febrero de 1998 de magnitud 6.4 y epicentro en las cercanías de Pochutla es recordado en la región como el sismo de La Candelaria. Otros sismos importantes que han ocurrido en la región de Oaxaca son el sismo del 18 de febrero de 2018 de magnitud 7.2, el sismo del 23 de agosto de 1965 de magnitud 7.5 y el

isoamplificación relativa en algunos sitios y un mapa de microzonificación sísmica para la Ciudad de Oaxaca; además, identificaron una zona con pendientes mayores a 15° (Vega, 2004). (CENAPRED, 2017).

Pérez (2002), estableció seis estaciones acelerográficas de ubicación temporal, obteniendo un total de 74 registros de eventos sísmicos mediante la técnica de Nakamura. Asimismo, se aplicó la técnica de vibración ambiental mediante una campaña de 29 sitios. Los periodos menores a 0.3 corresponden a la zona norte, noreste y suroeste de la Cd. De Oaxaca, que corresponden a las partes altas de los En gran parte del centro y extendiéndose hacia el noreste se observan valores de periodos muy constantes de entre 0.3 y 0.4 segundos. Al sur los valores incrementan hasta 1.37 segundos. Hacia el noreste se obtienen periodos de 0.7s con un valor máximo de 0.81s en la zona deportiva del Instituto Tecnológico de Oaxaca.

Castellanos (2003), estimó parámetros preliminares de diseño sísmico para la Ciudad de Oaxaca y sus municipios conurbanos, basándose en trabajos previos que estudian las características de los tipos de suelo subyacentes en la Ciudad y sus municipios conurbados, tales como, registros de vibración ambiental, registros de sismos (Lermo et.al., 1991; Pérez, 2002), evaluación de los daños sufridos en eventos previos (Unidad Estatal de protección Civil, 1931 y 1999), y estudios de mecánica de suelos (León, 1976; Morales, 2003). La sismicidad local fue estimada mediante el cálculo de tasas de excedencia correspondiente a cada una de las zonas consideradas con fuentes sísmicas.

Luna, c. (2012), realizó correlaciones entre los espectros de amplitudes y aceleración obtenidas de registros sísmicos de ocho estaciones acelerométricas a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM y del Instituto de Geofísica (IG) y los valores de espesor de aluvión y pendiente en cada estación. Posteriormente, se realizó una extrapolación de los efectos de sitio para zonas que bajo las mismas condiciones se esperarían presentar efectos de sitio muy parecidos.

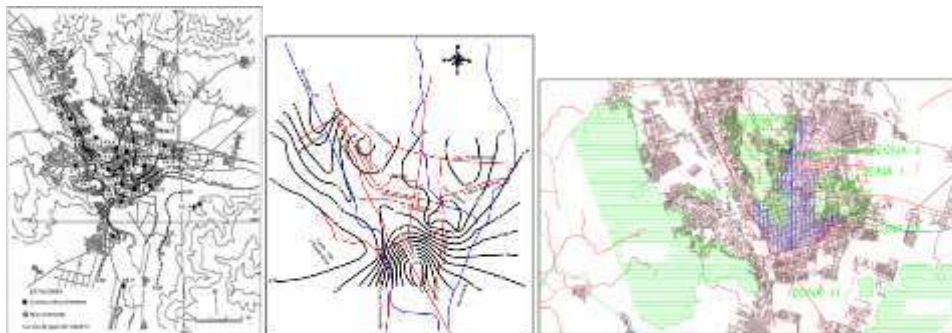


Figura 47: a) Curvas de isoperiodos (Lermo, 1991) b) Mapa de isoperiodo para la Ciudad de Oaxaca (Pérez, 2002) y c) Zonación preliminar propuesta (Castellanos, 2003).

4.5 Metodología

La campaña de adquisición de datos se realizó del 15 de noviembre al 23 de enero del 2021, cubriendo un total de 50 estaciones ubicadas dentro de la zona metropolitana de Oaxaca y en su periferia (Tabla 13) por un periodo aproximado de 12 a 24 hrs. La adquisición de datos se realizó utilizando un sismómetro de banda ancha de la marca Nanometrics con un digitalizador DataCube3, registrando rudio sísmico con un muestreo de 200sps registrando señales en tres componentes (Norte-sur, Este-oeste y Vertical). (figura 48).

Equipo utilizado	
 <p>Figura 48.a) Sismómetro Trillium 120s</p>	 <p>b) Sensor DataCube</p>
<p>Tamaño: 9 cm de diámetro Peso: 1.2 kg Salida: XYZ que representan las componentes del movimiento vertical y horizontal. Observaciones: Combina el rendimiento de un sismómetro de banda ancha e incorpora un diseño de sensor de retroalimentación de fuerza triaxial simétrica con una respuesta plana a la velocidad de 120s a 100 Hz. Fácil instalación.</p>	<p>Consumo de energía bajo Tamaño ultracompacto Registrador de datos sísmicos de 3 canales. Antena GPS externa Fuente de alimentación externa</p>

La información obtenida, se procesó en el programa libre Geopsy, y se obtuvieron los cocientes espectrales por cada estación. Seleccionando un intervalo de tiempo en donde la señal fuera estacionaria y seleccionando los sismos detectados en caso de haber registrado alguno durante el día de medición. (Ver figura 49).

CAPITULO IV MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

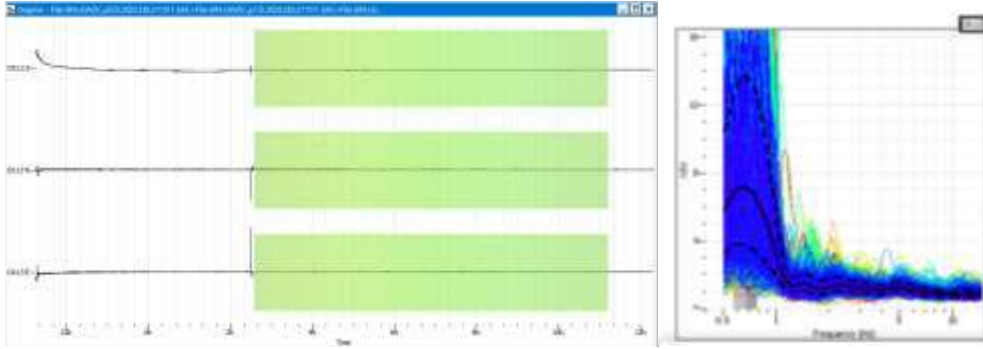


Figura 49: Análisis de los cocientes espectrales para la Estación 13

Posteriormente, se obtuvieron los comportamientos de cada espectro de señal obtenido por cada estación, identificando tres principales familias en el área siguiendo la metodología descrita por Zavala et al. (2021).

En la tabla 13 se muestran los puntos de medición, litología, frecuencia y periodo identificado par cada sitio, así como el tipo de suelo para cada punto de monitoreo sísmico.

Estación	Longitud	Latitud	Litología	f_0	T_0	Suelo
OX01	737533.56	1893756.34	Arenisca Lutita	0.70	1.43	Vertisols L(VR)
OX02	742142.24	1888969.32	Arenisca Lutita	0.71	1.40	NA
OX03	737644.82	1891360.51	Arenisca Lutita	0.72	1.39	Phaeozems (PH)
OX04	740573.17	1886743.92	Gneis	0.71	1.41	NA
OX05	742248.00	1879500.00	Limonita	1.24	0.81	NA
OX06	742317.99	1887861.24	Arenisca Lutita	0.69	1.44	NA
OX07	742698.93	1884109.84	Arenisca	0.73	1.37	Vertisol (VR)
OX08	741292.55	1884660.67	Gneis	12.99	0.08	Vertisol (VR)
OX09	739292.93	1876028.95	Limolita	2.11	0.47	NA
OX10	742684.32	1886640.14	Arenisca Lutita	2.82	0.35	NA
OX11	736472.05	1895992.04	Arenisca Lutita	0.71	1.41	Vertisol (VR)
OX12	730518.57	1893684.90	Anortosita	0.73	1.37	Fluvisols/Regosols
OX13	733887.83	1894922.66	Anortosita	0.68	1.48	NA
OX14	733655.28	1902161.03	Flujo piroclastico	2.85	0.35	Vertisol (VR)
OX15	734507.84	1888303.34	Gneis	0.69	1.45	Regosols (RG)
OX16	737566.01	1892532.14	Arenisca Lutita	0.72	1.38	Phaeozems (PH)
OX17	739171.76	1887800.76	Gneis	7.69	0.13	NA
OX18	738523.51	1888462.99	Arenisca Lutita	0.71	1.40	NA
OX19	738955.32	1893479.20	Arenisca Lutita	0.68	1.46	NA
OX20	736205.69	1898099.80	Arenisca Lutita	0.71	1.40	Regosols (RG)
OX21	731599.98	1907581.99	Arenisca	0.65	1.54	Regosols (RG)
OX23	739587.15	1891898.12	Arenisca Lutita	6.14	0.16	NA
OX24	740235.62	1891497.20	Arenisca Lutita	0.67	1.48	NA
OX25	736528.69	1894734.80	Arenisca Lutita	1.80	0.56	Vertisol (VR)
OX26	745061.82	1887913.58	Arenisca Lutita	2.58	0.39	NA
OX27	752809.25	1886664.93	Aluvion	0.72	1.39	Vertisol (VR)
OX28	739383.58	1896316.50	Arenisca	0.72	1.40	Regosols (RG)

CAPITULO IV MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

OX29	734348.40	1904820.84	Arenisca	0.58	1.73	Vertisol (VR)
OX30	747148.44	1888105.05	Arenisca	2.99	0.33	NA
OX31	736294.69	1880458.28	Gneis	4.56	0.22	NA
OX32	749020.15	1891854.31	Arenisca Lutita	0.72	1.39	Luvisols (LV)
OX33	744497.51	1891230.28	Arenisca	0.68	1.47	NA
OX34	743130.08	1891262.80	Arenisca Lutita	4.18	0.24	NA
OX35	735100.74	1885225.37	Gneis	10.84	0.09	Vertisol (VR)
OX36	743747.57	1882314.47	Arenisca	4.11	0.24	NA
OX37	744124.56	1876374.76	Limolita	4.44	0.23	NA
OX38	731815.00	1900495.00	Arenisca	1.31	0.76	Vertisol (VR)
OX39	731770.00	1899838.00	Arenisca	1.83	0.55	Vertisol (VR)
OX40	743468.00	1879986.00	Arenisca	3.79	0.26	NA
OX41	749874.00	1888742.00	Aluvi3n	3.48	0.29	Vertisol (VR)
OX42	732789.00	1899989.00	Arenisca	0.70	1.44	Vertisol (VR)
OX43	732419.00	1898366.00	Arenisca	0.71	1.40	Vertisol (VR)
OX44	723292.00	1911380.00	Complejo metam3rfico	3.49	0.29	Vertisol (VR)
OX45	737738.00	1900386.00	Arenisca Lutita	0.73	1.37	Regosols (RG)
OX46	727937.67	1906412.39	Arenisca	0.71	1.41	Vertisol (VR)
OX47	732291.00	1905812.00	Arenisca	1.91	0.52	Vertisol (VR)
OX48	736067.00	1903290.00	Arenisca	0.65	1.53	Regosols (RG)
OX49	744202.00	1877318.00	Limonita	4.82	0.21	NA
OX50	744101.00	1883097.00	Arenisca	0.77	1.29	NA
OXIG	741276.90	1888982.60	Arenisca Lutita	4.61	0.22	Leptosols (LP)

Tabla 13. Coordenadas geogr3ficas de los sitios de microtemores medidos, periodos y frecuencias fundamentales para cada sitio y tipo de suelo.

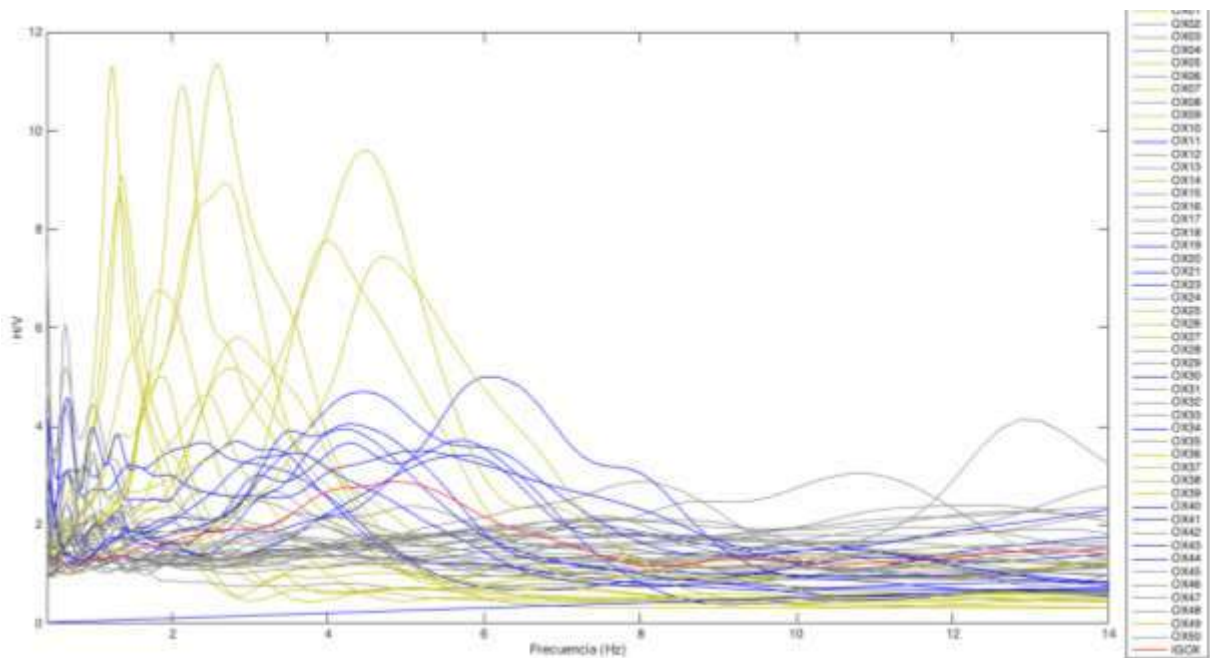


Figura 50. Cocientes espectrales para los puntos de medición en la ZMO.

Las Figura 51 y 52 representa el mapa de microzonificación sísmica a partir de la caracterización de los periodos fundamentales del terreno en la ZMO mostrando en colores las familias a las que corresponden, así como, el mapa de interpolaciones obtenido con el método geostatístico de kriging ordinario.

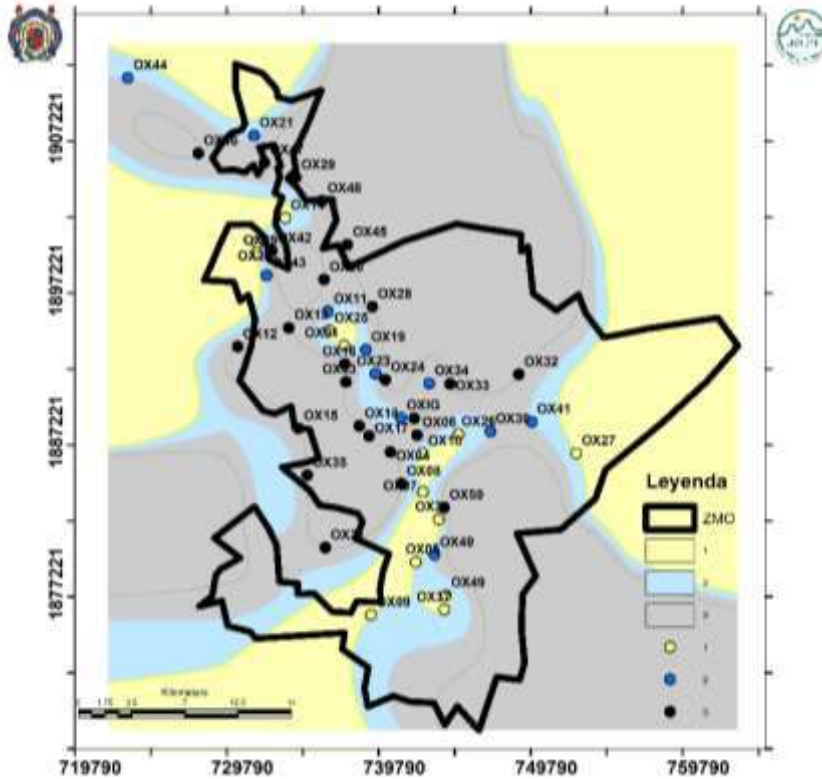


Figura 51. Mapa de microzonificación sísmica (por agrupación de familias).

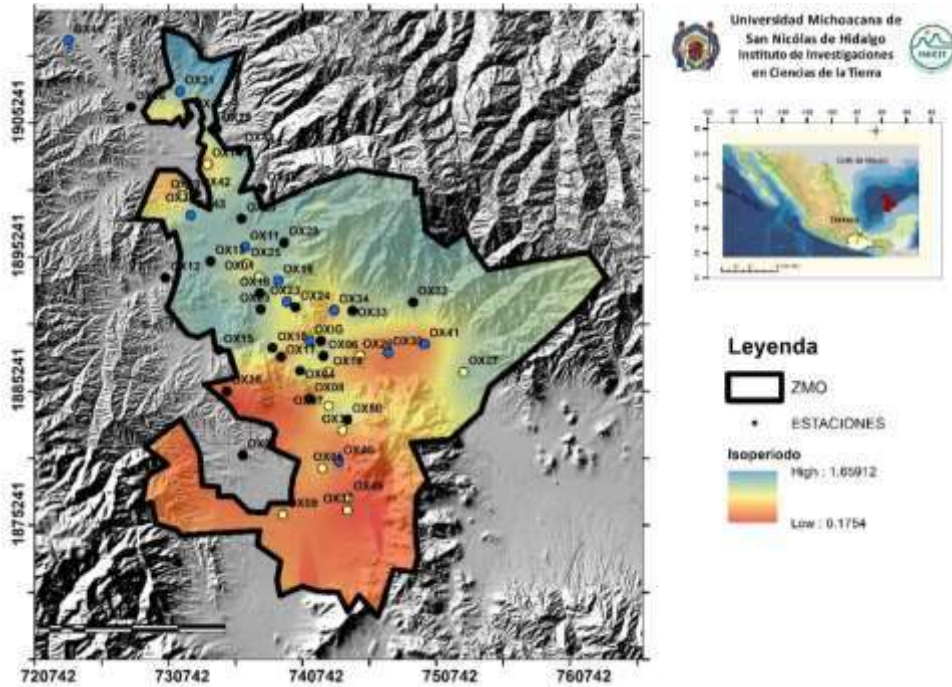


Figura 52. Mapa de microzonificación sísmica para la ZMO utilizando el método geoestadístico Kriging.

Los resultados obtenidos muestran frecuencias características del suelo que varían de 0.5 a 12 Hz (ver figura 50). Los valores de baja frecuencia y alta periodicidad, corresponden a la familia 3, y predominan en las partes bajas de la sierra y lomerío. Las rocas predominantes corresponden a rocas metamórficas como el gneiss, el complejo metamórfico e ignimbrita.

La zona intermedia, corresponde a la familia dos, y se localiza en las zonas de valle a piedemonte, predominando en dirección noroeste-sureste, en dirección a la zona del valle de Etna al norte de la ciudad de Oaxaca.

La familia 1 posee valores de alta frecuencia y baja periodicidad y predominan al sur de la Ciudad en dirección al valle de Zaachila-Zimatlán, donde predominan rocas como limolita, areniscas y aluvión, cuyo espesor de este último es mayor respecto a los Valles de Etna y Tlacolula-Zimatlan (Belmonte, 2005).

La zonificación del territorio permite identificar escenarios de peligro actual y potencial con la finalidad de determinar áreas adecuadas para la expansión urbana y la atenuación de posibles amenazas.

CAPITULO IV MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA



Figura 53. Metodología empleada para la elaboración del mapa de microzonificación sísmica

CAPITULO V MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES

Las inundaciones se deben directa o indirectamente a los fenómenos hidrometeorológicos (factor desencadenante), que ocurren en un tiempo corto o prolongado, así como, de las características propias del terreno como: la geología, la cobertura vegetal, tipo y uso de suelo, red de drenaje, pendiente y geoforma (factores condicionantes).

Las precipitaciones intensas de larga duración minimizan la capacidad de infiltración del suelo y favorecen la escorrentía y el escurrimiento. Es importante tomar en cuenta la red de escurrimiento superficial, ya que son vías naturales de evacuación y al sobrecargarse hacen que un determinado curso de agua rebase su cauce e inunde zonas adyacentes. Los efectos de estas inundaciones estarán en función de la cantidad de agua y escombros transportados, siendo las salidas de la cuenca las áreas más afectadas.

Los factores geomorfológicos (depresiones), así como, la inclinación de las pendientes, favorece los procesos de escurrimiento o acumulación cuando el agua incide sobre el terreno debido a que el ángulo de inclinación del terreno es bajo y de poco relieve (valle, planicies). Por ejemplo, una ladera con una orientación norte en México es propensa a recibir menor cantidad de luz solar que una ladera orientada hacia el sur (Gómez–Tagle y Chávez, 2004), por lo tanto, y suponiendo que ambos flancos recibiesen la misma cantidad de agua y estuviesen formados de los mismos materiales, el suelo de la ladera norte debería retener mayor cantidad de agua, lo cual puede ser un factor importante de inestabilidad. Otro factor importante, es la cobertura y uso de suelo, por ejemplo, la cobertura vegetal protege el suelo interceptando las gotas de lluvia y disipando su energía cinética (Saturnino-Landers, 1997), regulando el escurrimiento y disminuyendo la erosión del suelo. Las coberturas naturales permiten crear zonas de aeración en el suelo que permite la infiltración, contrario a coberturas antrópicas que incrementa hasta seis veces el escurrimiento por falta de infiltración (ACR, 2007). En zonas de poca cobertura y modificadas, como pastizales y cultivos, se presentan procesos de infiltración lenta y deteriorada, lo que provoca un mayor escurrimiento, aumentando la erosión (Hewlett, 1969; Rugai, 2008, Schiettecatte, 2008). No obstante, no debemos olvidar las modificaciones antropogénicas que provocan cambios o interrumpen la red de escurrimiento superficial de las aguas, sin considerar el relieve.

5.1 Método de evaluación multicriterio

La evaluación multicriterio (Munda, 1993), (i) considera factores de tipo cualitativo y cuantitativo; y (ii) considera la pluralidad de percepciones de los actores involucrados en el problema de decisión, la cual debe ser participativa para tomar

decisiones y trazar alternativas para la solución de conflictos (Romero, 1997 citado por Uribe, 2001; Chen et al., 2012).

La metodología consiste primero en identificar el problema y definir la meta u objetivo principal, que en este caso consiste en evaluar la susceptibilidad de la ZMO a sufrir inundaciones. Identificado el objetivo, se analizan los factores condicionantes y desencadenantes que favorecen o no una inundación, y su importancia. A partir de este análisis se configura un árbol de criterios en que se combinan múltiples mapas raster correspondientes a cada factor.

Este árbol contiene la forma en la cual los criterios se agrupan, estandarizan y ponderan, y cuya raíz es el objetivo principal y cuyas hojas son los criterios que en conjunto evalúan el desempeño del objetivo principal. Las ramas dividen el objetivo principal en objetivos parciales. Por ello, es importante dejar en claro los factores que contribuyen al objetivo principal, el material cartográfico disponible y su calidad.

Posteriormente, se realiza la ponderización de los criterios y objetivos que contiene respecto al principal, es decir, indicando su importancia relativa.

5.2 Metodología

Para la evaluación del peligro de inundaciones, se retomó la cartografía vista en el capítulo 2: edafológico (suelo), cobertura y uso de suelo, litología (tipo de roca), geomorfológico (relieve) y pendientes. La escala de los mapas es 1:50 000, por lo tanto, la resolución mínima cartografiarles, es decir, visible al ojo humano es de 25 m (1/2 cm). Para realizar el análisis espacial de información, los mapas vectoriales obtenidos por cada factor condicionante fueron extraídos y posteriormente cargados en el programa Ilwis Academic, donde se transformaron a mapas raster con dimensiones de 25 x 25 m.

Los valores o pesos, fueron asignados mediante tablas ligadas a cada raster y considerando la posición jerárquica de cada clasificación, respecto a la importancia de cada atributo (Rank order). La pendiente y la proximidad a ríos se consideraron los factores más relevantes, considerando la clasificación de Lugo, se reclasificaron en pendientes suaves, ligeras, medianamente y fuertemente inclinadas, indicando el valor más alto, a pendientes $>5^\circ$. Posteriormente, se consideró la influencia del tipo de suelo, que dada la clasificación internacional ISRIC, los suelos más propensos son las unidades de fluvisol, vertisol y phaeozem, seguidos de luvisoles, cambisoles y por último los leptosoles y regosoles. Respecto a la cobertura, la carencia de cobertura vegetal propicia en mayor cantidad el peligro a inundaciones, por lo que, se consideró a la zona urbana como el factor más alto, seguido de pastizales y matorrales, cultivos y finalmente los bosques y selvas. Para el caso de la geología se consideraron las condiciones de la roca respecto a su permeabilidad y porosidad. Asignando el mayor valor al granito y gneis, seguido de aluvión y finalizando con conglomerados.

Peso	Factor
0.46	Pendiente
0.26	Drenaje
0.16	Suelo
0.04	Geología
0.09	Cobertura y Uso de Suelo

Tabla 14 Factores condiciones utilizados para evaluar la susceptibilidad a inundaciones en el programa Ilwis Academic

Para facilitar la visualización de la información espacial, el mapa obtenido fue clasificado en tres categorías, alta, moderada y baja peligrosidad.

5.3 Resultados

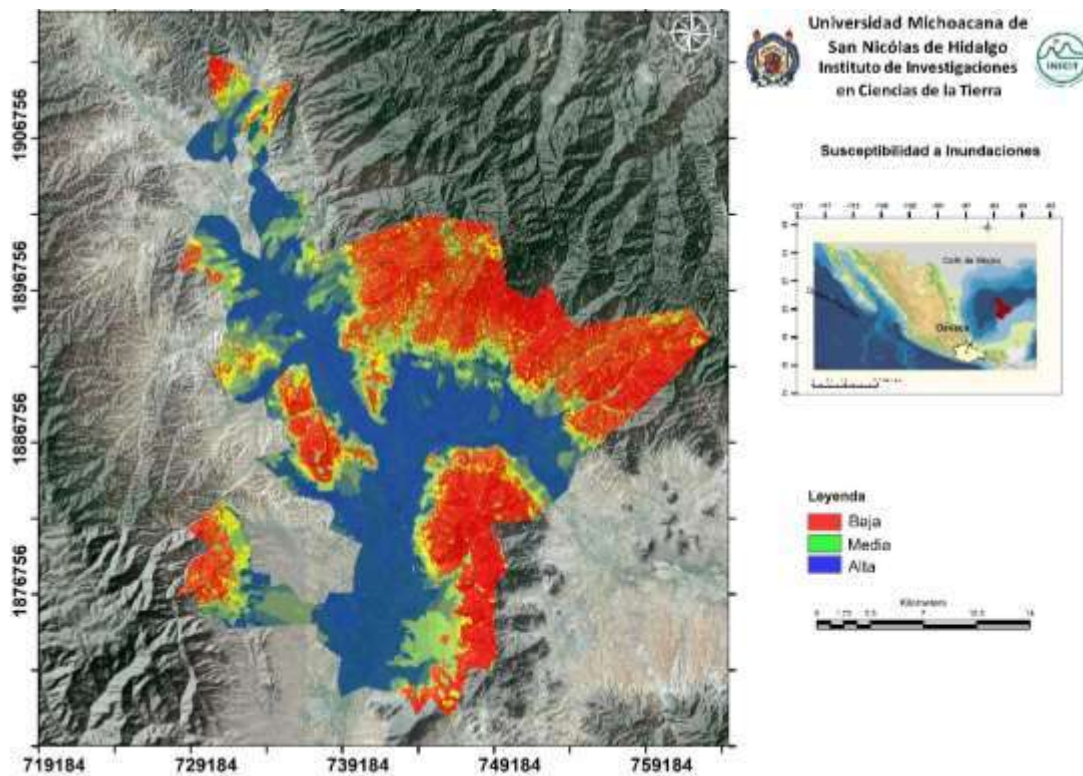


Figura 54: Mapa de inundaciones obtenido del análisis multicriterio. Elaborado en el programa Ilwis Academic 3.3.

CAPITULO VI DISCUSION DE RESULTADOS

La ciudad de Oaxaca se asienta en un antiguo lago (Gay, 1881) originado por la actividad geológica del periodo terciario que con la llegada de los primeros pobladores se drenó hacia el sur, zona que coincidentemente se ve afectada por las lluvias. Por lo anterior, la mayor parte del suelo de los tres valles de Oaxaca se conforman por una secuencia de rocas sedimentarias como: areniscas, aluvi3n y limo, así como por el tipo de suelo: fluvisol y vertisol. Dadas estas condiciones, las amplificaciones sísmicas han ocasionado graves daños a la infraestructura y población de la Ciudad, como los sismos de 1931 y el más reciente en 2017.

Kramer (1996) menciona que el contraste de impedancias es más notorio en materiales jóvenes y menos compactados, provocando mayores valores de amplificación. En estas zonas los valores de H/V presentaron un solo pico, con frecuencias de resonancia fundamental única y clara, lo que refleja un alto grado de impedancia. Las frecuencias de estas zonas oscilan entre los 2.5 y 5 Hz (0.4 y 0.2 segundos de periodo respectivamente), en dirección al Valle de Mitla, predominando en dirección suroeste del valle de Zimatlán, en zonas para las cuales Luna (2012), calculó espesores de aluvi3n de 60m. Los suelos predominantes corresponden a vertisoles, en similitud a la zona noroeste donde se registraron frecuencias y comportamientos similares en menor medida.

Las condiciones edafológicas, nos permiten conocer una segunda zona caracterizada por suelos del tipo vertisol a luvisol, con predominancia de rocas sedimentarias como: areniscas. Esta zona tiene frecuencias fundamentales que oscilan entre 4 y 7 Hz, las frecuencias más altas se localizan en la zona del Valle Etna, disminuyendo en dirección al Valle de Mitla, en esta zona al igual que la anterior se registraron picos claros, con la diferencia que estas se presentan en lugares más elevados con pendientes inferiores a los 10° pero mayores a los 3°.

Como mencionó Pérez (2002), la tercera zona corresponde a valores altos de frecuencias, en las zonas noreste, noroeste y suroeste, en dirección a lomeríos y sierra. Los valores más altos se localizan sobre rocas metamórficas localizadas en Monte Albán, San Juanito, San Martín y Xoxo, que corresponde a pendientes inferiores a los 15° y mayor a los 5°, así como, en la zona de Cuilapa de Guerrero. En dirección a la Sierra Juárez, predominan contrastes de impedancia poco significativos, Kang (2021) asocia estos comportamientos a litologías rocosas, que concuerda con la litología presente en la zona y suelos del tipo regosol.

Los valores obtenidos por Lermo (1991), y Luna (2012), son muy parecidos a los obtenidos en la zona centro de Oaxaca, sin embargo, los resultados de espesor de aluvi3n mencionados por Luna (2012) resultan ser más elevados en esta zona que para la zona sur, lo que no concordaría con los valores más altos de frecuencia obtenidos en esta zona.

Los resultados obtenidos muestran que la respuesta sísmica puede variar sobre distancias cortas (Frischknecht, 2000) dependiendo el tipo de depósito, roca, su compactación, su pendiente y relieve. Asimismo, las modificaciones antrópicas son un factor importante para valorar el riesgo a inundaciones.

Es importante, tomar en cuenta la zona del Valle de Zimatlán debido a los valores bajos de frecuencia y al contraste de impedancia, ya que la amplificación de bajas frecuencias puede causar daños a estructuras con baja frecuencia natural. Sin olvidar, que esta zona, también se considera la zona más propensa a inundaciones. Y la combinación de estos dos factores, puede ser desencadenante para otros procesos como lo son los procesos de remoción en masa.

CAPITULO VII CONCLUSIONES

La identificación de factores condicionantes y detonantes que propician una amenaza, permite identificar escenarios de peligros potenciales y latentes, y que a su vez permite determinar áreas adecuadas para la expansión urbana.

La susceptibilidad a inundaciones depende en muchos casos de los fenómenos hidrometeorológicos, por lo que es necesario prever o mitigar sus afectaciones considerando una serie de medidas en el hogar y en las políticas públicas.

En el caso de los sismos, estos ocurren de forma imprevista, de distinta magnitud y ubicación, por lo que, sus efectos son preocupantes por el potencial de daño humano y material causado. Por lo que, se consideró importante realizar el presente estudio de microzonificación con la finalidad de conocer la respuesta dinámica de la ZMO ante eventos de esta índole.

La interpretación y análisis de cobertura y corrientes, nos permite conocer que no todos los peligros son causados de forma natural, sino que también son socialmente construidos, al construir asentamientos urbanos irregulares al borde de ríos o laderas pronunciadas, al obstruir pasos o cauces naturales, al entubar cauces de ríos sin considerar un futuro inmediato, y, asimismo, un cambio de cobertura que vuelve a una sociedad más vulnerable y expuesta.

El último censo a nivel nacional (2020) revela un aumento en la mancha urbana de la ZMO, que incluye los municipios: al norte de la Ciudad se localiza Guadalupe y Reyes Etlá; al noreste, San Juan Bautista Guelache; al este, San Pedro Ixtlahuaca; al suroeste el municipio de Cuilapam de Guerrero y San Raymundo Jalpan. De la misma forma que el área estudiada esta se caracteriza por tener una forma fragmentada y discontinua, con cambios de uso de suelo, que van de cultivos de riego de temporal y de riego por zonas habitacionales. Por lo que es inminente la necesidad de planificar, gestionar e implementar programas ambientales que mitiguen peligros a corto y largo plazo como la erosión, principalmente en la zona suroeste donde existe una menor cantidad de cubierta vegetal.

El presente trabajo, es un primer acercamiento al conocimiento de la zona metropolitana de Oaxaca (ZMO), que ofrece información para la elaboración de planes de prevención, así como, para otras ramas como la geotecnia.

CAPITULO VIII BIBLIOGRAFÍA

Abril, A. L., Bojórque, J. (2011). Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: caso de estudio sector Quimsacocha (Tesis de licenciatura). Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/739>.

Aguirre, R. (2009), Conceptos de Geomática y estudios de caso en México en Geografía para el siglo XXI. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. México, D.F p. 21. ISBN: 978-607-02-0973-4.

Alcántara, I., Garza, M., López, A., Magaña, V., Oropeza, O., Puente, S., Rodríguez, D., Lucatello, S., Ruiz, N., Tena, R., Urzúa, M., & Vázquez, G. (2019). Gestión Integral de Riesgo de desastres en México: reflexiones y propuestas de transformación de la política pública desde la academia. *Investigaciones geográficas*, (98), 00002. <https://doi.org/10.14350/rig.59784>

Alcántara L, Ovando E, Romo M y Almora D (2000). Algunos efectos de sitio observado en la Ciudad de Oaxaca. *Memorias de la XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Oaxaca, Oax. pp 259-267.

Ángeles–Moreno, E., Elías–Herrera, M., Sánchez–Zavala, J.L., Macías–Romo, C., Ortega–Rivera, A., Iriondo, A., 2004, Terreno Cuicateco, sur de México: evolución tectónica de una cuenca pull–apart para 145–132 Ma (resumen): IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Juriquilla, Querétaro, México, Libro de Resúmenes: Sociedad Geológica Mexicana, 66–67

Aronoff S. 2005. *Remote sensing for GIS managers*. New York, USA. ESRI Press. p. 487

Arzate-Flores, J. A., Molina R., Corbo Camargo, F., y Márquez, V., 2016. Low angle contact between the Oaxaca and Juarez terranes deduced from magnetotelluric data. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 3357-3371

Ayalew, L. and Yamagishi, H. (2005) The Application of GIS-Based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65, 15-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>

Barredo, J.I. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*, Ra-Ma, Madrid.

Belmonte, Jiménez, S., (2005). Caracterización geofísica del sistema hidrogeológico del Valle de Zaachila, Oaxaca y su relación con la geología tectónica regional. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Tesis doctoral. 150p.

Blaikie, P. et al., (1996) Vulnerabilidad, el entorno social, político y económico de los desastres. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina* en Aldana, D.M.A, Moreno, T.C. (), “Estudio de riesgo y vulnerabilidad en la zona metropolitana de Aguascalientes”, pp. 325-345.

Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Yves, P., Cotton, F., Moczo, P., Kristek \$ Fäh, D. (2006). H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophys. J. Int.* (2006) 167, 827–837 doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x

Carfantan, J. Ch., 1985, *Du Systeme Cordilleran nord–american au domaine Caraibe. Etude Geologique du Mexique Meridional: Cambéry, France, Université de Savoie, Mémoire de Thèse de Docteur d'Etat*, 557 pp.

CAPITULO VIII BIBLIOGRAFÍA

CENAPRED (2020). Guía para la prevención, preparación y la gestión de emergencias. Tomado de http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/424-GUIA_COVID19_DESASTRES.PDF

CEPAL (2014) Manual para la evaluación de desastres. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Recuperado el 3 de agosto de 2021 de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/35894/1/S2013806_es.pdf

CEPAL (2021), Guía básica para la elaboración de Atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Serie Atlas Nacional de Riesgos.

CONAGUA (2020) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valles Centrales (2025) Estado de Oaxaca. México.

Cutter, et. al. (2000, 2003, 2009) en Aldana, D.M.A, Moreno, T.C., "Estudio de riesgo y vulnerabilidad en la zona metropolitana de Aguascalientes", pp. 325-345.

Dávalos-Álvarez, O. G., Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Martínez-Hernández, E., & Ramírez-Arriaga, E. (2007). Estratigrafía cenozoica de la región de Tehuacán y su relación con el sector norte de la falla de Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 24(2), 197-215

Elías-Herrera, M.; Ortega-Gutiérrez, F.; Sánchez, J.L.; Macías-Romo, C.; Ortega-Rivera, A.; Iriundo, A. La falla de Caltepec: raíces expuestas de una frontera tectónica de larga vida entre dos terrenos continentales al sur de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LVII, núm. I, 2005, p. 83-109.

Flores-Márquez, E. & Chávez, Rene & Martínez-Serrano, Raymundo & Herrera-Barrientos, Jaime & A, Tejero-Andrade & Belmonte-Jiménez, S.I. (2001). Geophysical characterization of the Etna Valley aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*. 40. 10.22201/igeof.00167169p.2001.40.4.408.

Galeana, P.J.M., Corona R., N. & Ordóñez Díaz, J. A. (2009). Análisis dimensional de la cobertura vegetal-uso de suelo en la Cuenca del Río Magdalena. *Ciencia forestal en México*, 34(105), 135-156. Recuperado en 10 de octubre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000100007&lng=es&tng=es.

García (1993) en Aldana, D.M.A, Moreno, T.C., "Estudio de riesgo y vulnerabilidad en la zona metropolitana de Aguascalientes", pp. 325-345.

Garduño-Monroy, V.H., Figueroa-Soto, A., Magaña-García, N., Ruiz-Figueroa, A., Gómez-Cortés, J., Jiménez-Haro, A., & Hernández-Madrigal, V.M. (2019). "The Mitla Landslide, an Event That Changed the Fate of a Mixteco/Zapoteco Civilization in Mesoamerica", *International Journal of Geophysics*, vol. 2019.

Gatti, A., & Galoppo, A. (2018). Sentinel-2 products specification document. Recuperado el 18 de agosto de 2020.

Gay, José Antonio. Historia de Oaxaca. Tomo I. México, 1881.

Gutenberg, B. (1931) Microseisms in North America, *Bull. Seism. Soc. Am.* XXI, n.1, p. 1-24.

Hewlett, J.D. 1969. Principles of forest hidrology. The University of Georgia Press. Athens, Ga. P.183.

INEGI 2009, Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: escala 1:250 000, serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, vii, 74, p. ISBN 978-607-494-015-2.

Jödicke, H.; Jording, A.; Ferrari, L.; Arzate J.; K. Mezger, K.; Rüpke, L. (2006). Fluid release from the subducted Cocos plate and partial melting of the crust deduced from magnetotelluric studies in

CAPITULO VIII BIBLIOGRAFÍA

southern Mexico: Implications for the generation of volcanism and subduction dynamics. *Journal of Geophysical research, Solid Earth*. Vol. 111 <https://doi.org/10.1029/2005JB003739>

Jordan, L.K., et al. (2000) Magnetic Resonance Imaging Findings in Anterolateral Impingement of the Ankle. *Skeletal Radiology*, 29, 34-39. <http://dx.doi.org/10.1007/s002560050006>

Kanai, K. y Tanaka, T. (1961), On microtremors. VIII, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 39, 97-114.

Lermo S y Chávez-García F (1995). Efectos de sitio en la Ciudad de Oaxaca. Resultado con registro de temblores y mediciones de microtremores. *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS No. 50 pp 1-13.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman J.W., (2004). *Remote sensing and image interpretation*. New York, USA. Wiley. p. 763.

Martínez-Serrano, R., Solís, G., Flores, E., Macías, C., & Delgado, J. (2008). Geochemical and Sr-Nd isotopic characterization of the Miocene volcanic events in the Sierra Madre del Sur, central and southeastern Oaxaca, Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(1), 1-20. Recuperado en 19 de agosto de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742008000100001&lng=es&tIng=.

Niño Romero, D. (2020). Integración de imágenes satelitales sentinel-2 en CDCol. Universidad de los Andes. Recuperado el 17 de Agosto del 2020 en <http://hdl.handle.net/1992/51466>

Núñez-Cornú, F., & Ponce, L. (1989) Zonas sísmicas de Oaxaca. México: Sismos máximos y tiempos de recurrencia para el periodo 1542-1988. *Revista de la unión Geofísica mexicana*. Vol. 28. Núm. 4. P. 587-641.

Ortega-Gutierrez, F., Elias-Herrera, M., Reyes-Salas, C., Macías-Romo y López R. (199) Late Ordovician Early Silurian continental collisional orogeny in Southern México and its bearing on Gondwana-Laurentia connections. *Geology* 27(8): 719-722.

OCHA, (2020). Desastres naturales en América Latina y el Caribe. Oficina para la coordinación de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas, pp.2. Recuperado el 2 de agosto del 2021 de <http://www.sela.org/es/centro-de-documentacion/base-de-datos-documental/bdd/66493/desastres-naturales-en-alc-200-2019>.

Pardo, M. and Suárez, G. (1995) Shape of the Subducted Rivera and Cocos Plates in Southern Mexico: Seismic and Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12373.

Padró, J.-C.; Muñoz, F.-J.; Ávila, L.Á.; Pesquer, L.; Pons, X. (2018). Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry. *Remote Sens.*, 10, 1687. <https://doi.org/10.3390/rs10111687>

Peña, M.A. (2007), Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisén. *Bosque*, vol. 28, núm. 2, 2007, pp. 162-172. Valdivia, Chile. ISSN: 0304-8799

PNUD, Renda E., Rozas Garay, M; Moscardini, O., Torchia, N. P. (2017). "Manual para la elaboración de mapas de riesgo". 1ª edición. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1560-75-2.

Robison, R., y Pantoja-Alor, J., (1968). Tremadocian trilobites from Nochixtlan region, Oaxaca, Mexico: *Journal of Paleontology*, v. 42, p. 767-800.

CAPITULO VIII BIBLIOGRAFÍA

Rugai, D.S. 2008. Combined hidrologycal and hydrodynamic modeling for flood hazard assessment: a case study of upper Kaluganga catchment, Ratnapura, Sri Lanka Enschede, ITC. p. 88.

Schietecatte, W.; Cornellis, W.M.; Acosta, M.L., Leal, Z.; Lauwers, N.; Almoza, Y.; Alonso, G.R.; Díaz, M. Y Gabriels, D. (2008). Influence of landuse on soil erosion risk in the Cuyagueteje watershed, Cuba. pp. 1-12.

Kang, S.Y., Kwa ng-Hee K.. & Byungin K. (2020) Assessment of seismic vulnerability using the horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSR) method in Haenam, Korea. <https://doi.org/10.1007/s12303-020-0040-9>

Udwadia, F.E. and M.D. Trifunac (1973). Comparison of earthquake and microtremor ground motions in California center, Bull. Seism, Soc. Am, 63, 1227-1253.

UNDRR (2021) "Equipo de tareas interinstitucionales sobre reducción de desastres, para la aplicación de la estrategia Internacional de reducción de desastres (EIRD)". Tomado de <https://eird.org/esp/acerca-eird/marco-accion-esp.htm>

UNISDR (2009), Disaster Risk Reduction. International Strategy for Disaster Reduction. Geneva, Switzerland.

Urrutia, J., Ferrusquia, V. (2001). Paleomagnetic results for the Middle-Miocene continental Suchilquitongo Formation, Valley of Oaxaca, southeastern, México. Geofísica Internacional (2001), Vol. 40, Num.3, pp. 191-205. ISSN: 0016-7169 Recuperado el 18/08/2020 en <http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39702/36128>.

Vázquez, P., Rodríguez, G. (2018). Los suelos de los valles centrales de Oaxaca. Revista Mexicana de Agroecosistemas. Vol. 5(2): 156-167. ISSN: 2007-9559.

Wilson, J.A., Clabaugh, S.E., (1970), A new Miocene formation and descriptions of volcanic rocks in northern valley of Oaxaca, State of Oaxaca. México, en Segura, L.R., Rodríguez-Torres, R. (eds.), Libro-Guía de la excursión México-Oaxaca: México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, 120-128.

Zinck, J. A 1988/1989. "Physiography and soils". International Institute for Aerospace survey and Earth Sciences (ITC). Lecture notes. Enschede, The Netherlands, 156 pp.

Zúñiga, F.R., Suarez, G., Figueroa, A.G. & Mendoza, Avith (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. Seismology. 21, p. 1295–1322. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9666-0>.

Páginas electrónicas

ISRIC (s.f.), World soil distribution. Recuperado el 12 de julio de 2021 de <https://www.isric.org/explore/world-soil-distribution>.

Ibañez, J.J. (2007). Los suelos de México y su Geografía II. Madrid, blogs. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/08/13/71688>

Cruz, C., Balbontin, C., Paz, F., Etchevers, J., Krasilnikov, P. (2007). Variabilidad morfogénica de los suelos en México y su relación con el modelo fisiográfico nacional. Madrid, blogs. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/08/13/71688>.