



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN**

**NICOLÁS DE HIDALGO**

**Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra  
Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio**



**Análisis de la criticalidad de la corteza superior y sus relaciones tectónicas con el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla, a partir de registros de ruido sísmico.**

**TESIS**

Para obtener el grado de:  
**Maestro en Geociencias y Planificación del Territorio**

Autor:

**Geólogo**

**Pablo David Ibarra Bustos**

Asesor:

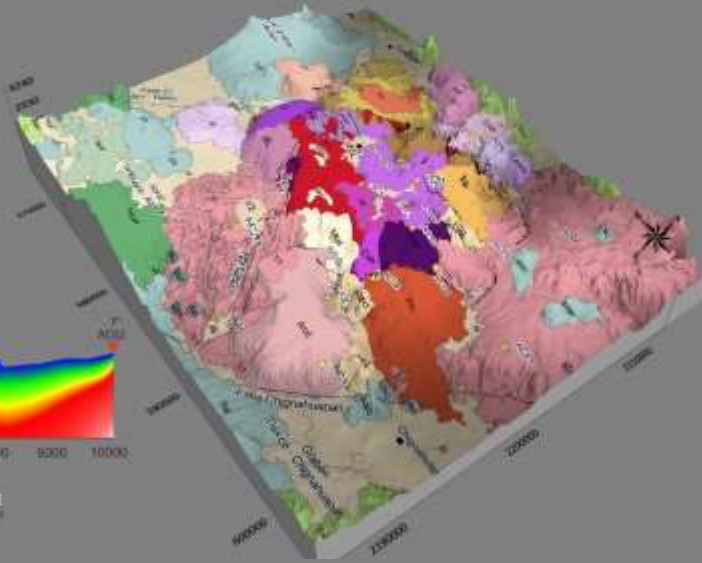
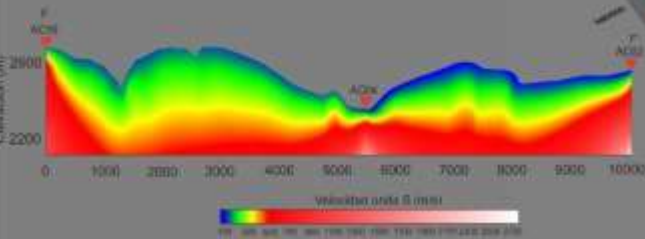
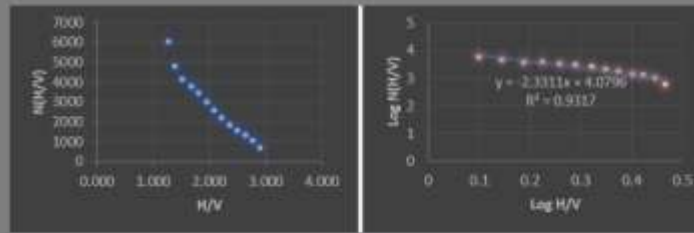
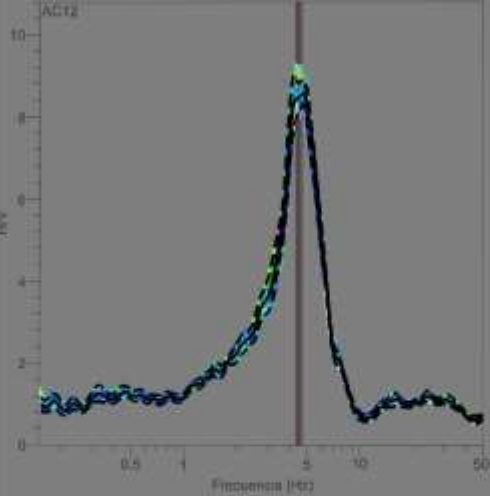
**Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto**

Co-asesor:

**Dr. Ricardo Vázquez Rosas**



Morelia, Michoacán  
Noviembre de 2019



Análisis de la criticidad de la corteza superior y sus relaciones tectónicas con el sistema geotérmico de Acapulco, Puebla, a partir de registros de ruido sísmico.

universidad michoacana de san nicolás de hidalgo

Autor  
Geólogo  
Pablo David Ibarra Bustos.

Director  
PhD.  
Ángel Gregorio Figueroa Soto.



Central geotermoelectrica Humeros

## ***Dedicatoria***

A mis padres y hermanos, motor de mi vida, energía que alimenta mi ambición de cada día alcanzar nuevas metas y logros.

Al ser que creo este maravilloso universo, este planeta dinámico y cambiante, al cual, muchos apasionados estudiamos tratando de comprender y entender su maravillo y perfecto funcionamiento.

A mis familiares que han dejado este mundo terrenal y que algún día me dieron ánimo y apoyo incondicional para luchar incansablemente por alcanzar mis metas.

*“Si lo que quieres es encontrar los secretos del universo, piensa en términos de energía, frecuencia y vibración”: Nicola Tesla.*

## ***Agradecimientos***

Expreso un sincero agradecimiento a la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por aceptarme como un alumno más dentro de Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT). Creo que las palabras no son ni serán suficientes para expresar todo el agradecimiento que tengo hacia el pueblo mexicano, de quienes he recibido cosas maravillosas, y que puede ser más maravilloso, que ser aceptado en su país, en sus ciudades y hacerme sentir como en casa. Gracias a ustedes mexicanos y a su trabajo constante, logré ser un becario más del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) (No de registro: 633247).

Gracias Dr. Ángel Figueroa, gracias por aceptarme en este gran proyecto, lleno de grandes retos personales y académicos. Gracias por su enorme paciencia, gracias por estar tan al pendiente y siempre exigirme compromiso y resultados ante este grandioso trabajo. Gracias Dr. por estar siempre conmigo y ayudarme a crecer tanto personal como profesionalmente. Gracias por todo lo que me enseñó, gracias a ello hoy me siento con más aptitudes y herramientas para enfrentar los retos que la geología y la geofísica me quieran poner en mi camino.

Gracias, infinitas gracias a mi querida y respetada Dra. Isabel Israde Alcántara, ella junto a su maravilloso esposo Dr. Víctor Hugo Garduño, me recibieron con los brazos abiertos desde mi primer día en esta hermosa Morelia. Gracias, porque sin su apoyo y ayuda mis primeros meses habrían sido decisivos para dejar atrás un gran sueño que hoy se hace realidad.

En la última etapa de este gran proyecto tuve la grandiosa oportunidad de contar con el apoyo de un nuevo sinodal, Dr. Pedro Corona Chávez, que maravilloso ser humano, que mente tan brillante, no hizo falta estar dos años con usted, para sentirse tan apoyado y en confianza, dos aspectos vitales para fluir junto a una persona.

Gracias a mi gran amiga Tania Lucia Gaspar, una mujer inteligente, luchadora, trabajadora, que fue un apoyo desde nuestros inicios como estudiantes de geología en Colombia. Gracias a ti Tania por motivarme para llegar a México en busca de hacer realidad un sueño más de mi vida, eres maravillosa.

Gracias al Maestro Alejandro Clemente Chávez, quien me aceptó con gran disposición durante mi estancia en la universidad Autónoma de Querétaro. Gracias por su apoyo, su amabilidad, su respeto y la amistad brindada durante este tiempo. Gracias por el conocimiento que me brindó y el cual hoy puedo emplear a mi vida profesional.

Gracias Dra. Hortensia Flores Estrella, su recibimiento en Alemania, en las universidades de Leipzig y Tecnológica de Berlín, conllevó a una estancia académica maravillosa, donde aprendí y corregí multitud de cosas tanto académicas como personales. Una maravillosa persona que siempre me alagó por mi entrega y dedicación a mi tesis y mi amada geología. Yo, igualmente la alago, expresándole mi asombro ante su maravillosa personalidad, amabilidad e inteligencia. Asombrado sigo de sus conocimientos y hasta donde ha llegado con ellos.

Gracias a todos los maestros que hicieron parte de esta etapa de mi vida y que me brindaron muchos de sus conocimientos y que hoy con orgullo puedo decir gracias a ello, que se mucho más de lo que sabía hace dos años y me siento capaz de cumplir con retos, trabajos y proyectos mucho más ambiciosos que este. Gracias Dr. Arturo Muñoz, Dr. Ricardo Vásquez, Dra. Aida López, Dra. Isabel Israde, Dr. Víctor Garduño.

Gracias a los proyectos de los cuales hizo parte este trabajo

- Al PT5.2 del proyecto GEMex "Sísmica"
- Al PT4.3 del proyecto GEMex "Origen y Trayectoria de los Fluidos"
- Al proyecto "CARACTERIZACIÓN DE RESERVORIOS GEOTÉRMICOS MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE LEYES DE POTENCIA PARA LOS COCIENTES ESPECTRALES DE REGISTROS DE SISMICIDAD Y MECANISMOS FOCALLES" de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH.

Gracias a todos los que me apoyaron en este trabajo y quienes aceptaron se parte de el.

Gracias totales.

## Tabla de contenido

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUMEN .....</b>                                                                         | <b>1</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                        | <b>3</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                 | <b>5</b>  |
| <b>2. JUSTIFICACIÓN.....</b>                                                                 | <b>7</b>  |
| <b>3. HIPOTESIS.....</b>                                                                     | <b>8</b>  |
| <b>4. OBJETIVOS .....</b>                                                                    | <b>9</b>  |
| <b>4.1 Objetivo general.....</b>                                                             | <b>9</b>  |
| <b>4.2 Objetivos específicos .....</b>                                                       | <b>9</b>  |
| <b>5. GENERALIDADES .....</b>                                                                | <b>10</b> |
| <b>5.1 Localización y vías de acceso .....</b>                                               | <b>10</b> |
| <b>5.2 Clima y Fisiografía.....</b>                                                          | <b>15</b> |
| <b>5.3 Morfología .....</b>                                                                  | <b>15</b> |
| <b>6. METODOLOGIA.....</b>                                                                   | <b>17</b> |
| <b>6.1 Revisión bibliográfica. ....</b>                                                      | <b>18</b> |
| <b>6.2 Fase de campo .....</b>                                                               | <b>18</b> |
| <b>6.3 Recopilación de datos sísmicos, microtemores y/o ruido ambiental .....</b>            | <b>20</b> |
| <b>6.4 Procesamiento de datos en software y análisis e interpretación de resultados.....</b> | <b>20</b> |
| <b>7. GEOLOGÍA REGIONAL .....</b>                                                            | <b>21</b> |
| <b>8. GEOLOGÍA LOCAL.....</b>                                                                | <b>24</b> |
| <b>8.1 Unidades Pre Complejo Tulancingo-Acoculco.....</b>                                    | <b>24</b> |
| <b>8.1.1 (Jurásico - Cretácico). ....</b>                                                    | <b>24</b> |
| <b>8.1.2 Granito de hornblenda. ....</b>                                                     | <b>25</b> |
| <b>8.1.3 Grupo Pachuca. ....</b>                                                             | <b>25</b> |
| <b>8.1.4 Andesitas de Apan. ....</b>                                                         | <b>25</b> |
| <b>8.1.5 Dacita el Rosario. ....</b>                                                         | <b>25</b> |
| <b>8.1.6 Andesita El Peñón. ....</b>                                                         | <b>26</b> |
| <b>8.1.7 Ignimbrita Tetlapayac. ....</b>                                                     | <b>26</b> |
| <b>8.1.8 Ignimbrita de Alcholoya. ....</b>                                                   | <b>26</b> |
| <b>8.2 Unidades del Complejo de Tulancingo. ....</b>                                         | <b>26</b> |

|        |                                                                                     |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.2.1  | <i>Riodacita Las Minas.</i>                                                         | 26 |
| 8.2.2  | <i>Ignimbrita Los Azufres.</i>                                                      | 27 |
| 8.2.3  | <i>Dacita Acaxochitlán.</i>                                                         | 27 |
| 8.2.4  | <i>Domos de Tulancingo y productos piroclásticos.</i>                               | 27 |
| 8.3    | Unidades asociadas a la evolución de La Caldera de Acoculco (Unidades pre-caldera). | 27 |
| 8.3.1  | <i>Andesitas basálticas Los Laureles.</i>                                           | 27 |
| 8.3.2  | <i>Riolitas pre-caldera.</i>                                                        | 28 |
| 8.3.3  | <i>Dacita Cruz Colorada.</i>                                                        | 28 |
| 8.3.4  | <i>Basalto de Cuautelolulco.</i>                                                    | 28 |
| 8.4    | Unidades sin-caldera de Acoculco (Ignimbrita de Acoculco).                          | 28 |
| 8.4.1  | <i>Sedimentos Lacustres.</i>                                                        | 28 |
| 8.4.2  | <i>Basalto de Potrerillos.</i>                                                      | 29 |
| 8.4.3  | <i>Riolita de Acoculco.</i>                                                         | 29 |
| 8.4.4  | <i>Ignimbrita Piedras Encimadas.</i>                                                | 29 |
| 8.4.5  | <i>Ignimbrita Tecoloquillo.</i>                                                     | 29 |
| 8.4.6  | <i>Riolita las Tetillas.</i>                                                        | 30 |
| 9.     | GEOLOGÍA ESTRUCTURAL                                                                | 32 |
| 10.    | ANTECEDENTES.                                                                       | 37 |
| 11.    | MARCO TEORICO                                                                       | 45 |
| 11.1   | Análisis de Sismogramas y/o registros sísmicos.                                     | 45 |
| 11.2   | Transformada de Fourier                                                             | 46 |
| 11.3   | Deconvolución de señales sísmicas.                                                  | 48 |
| 11.4   | Análisis de ruido sísmico.                                                          | 50 |
| 11.5   | Cocientes espectrales H/V.                                                          | 54 |
| 11.6   | Elipticidad de ondas Rayleigh.                                                      | 57 |
| 11.6.1 | <i>Ondas sísmicas superficiales.</i>                                                | 57 |
| 11.7   | Metrología fractal (MF)                                                             | 60 |
| 11.8   | Fractales, leyes de potencia y sistemas críticamente auto-organizados.              | 61 |
| 11.9   | Análisis fractal de cocientes espectrales.                                          | 64 |
| 11.10  | Caracterización unifractal (serie-autoafin) de los cocientes espectrales.           | 65 |

|       |                                                                                                       |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.11 | Análisis de Ondoleta (Wavelet).....                                                                   | 67  |
| 11.12 | Análisis estadístico usando el principio porosidad de Delesse. ....                                   | 67  |
| 12    | RESULTADOS.....                                                                                       | 70  |
| 12.1  | Obtención de cocientes espectrales.....                                                               | 70  |
| 12.2  | Obtención de los diferentes valores de exponentes de Hurst (H). ....                                  | 75  |
| 12.3  | Sensibilidad e incertidumbre de los valore de H para dieciséis estaciones.....                        | 75  |
| 12.4  | Cálculo de exponente de frecuencia acumulada para diecisiete estaciones....                           | 77  |
| 12.5  | Cálculo de los valores de porosidad aplicando el principio de Delesse para diecisiete estaciones..... | 80  |
| 12.6  | Inversión de un segmento de la curva H/V para la obtención de modelos de velocidad 1D. ....           | 81  |
| 12.7  | Perfiles de velocidad 2D. ....                                                                        | 83  |
| 13.   | DISCUSIÓN.....                                                                                        | 86  |
| 13.1  | Cocientes espectrales H/V y zonificación espectral.....                                               | 87  |
| 13.2  | Correlación perfiles de velocidad y unidades geológicas. ....                                         | 91  |
| 13.3  | Valores de porosidad secundaria usando el principio de Delesse. ....                                  | 106 |
| 13.4  | Exponente de frecuencia acumulada (Efa).....                                                          | 110 |
| 14.   | CONLCUSIONES.....                                                                                     | 114 |
|       | BIBLIOGRAFIA .....                                                                                    | 116 |
|       | Apéndice 1 .....                                                                                      | 124 |
|       | Cocientes espectrales de la red sísmica de Acoculco. ....                                             | 124 |
|       | Apéndice 2 .....                                                                                      | 128 |
|       | Valores de exponente de Hurst (H) de 16 estaciones de la red sísmica de Acoculco ..                   | 128 |
|       | Apéndice 3 .....                                                                                      | 129 |
|       | Graficas de leyes de potencia de los cocientes espectrales .....                                      | 129 |
|       | Apéndice 4 .....                                                                                      | 133 |
|       | Inversión de curva H/V y perfiles de velocidad de onda S y P. ....                                    | 133 |
|       | Apéndice 5 .....                                                                                      | 137 |
|       | Validación modelos de velocidad. ....                                                                 | 137 |
|       | Apéndice 6 .....                                                                                      | 139 |
|       | Interpolación perfiles de velocidad 2D .....                                                          | 139 |

## Lista de figuras

- Figura 1.** Mapa de localización geográfica de la zona de estudio. El polígono cuadrado rojo delimita el área donde se configura la caldera de Acoculco, la cual se sitúa en gran parte del municipio Chignahuapan, perteneciente al estado de Puebla..... 11
- Figura 2.** Mapa de elevación digital (DEM) de la zona de estudio correspondiente a la Caldera de Acoculco, donde se ha representado con símbolos triangulares amarillos y circulares azules, las 18 estaciones sísmicas y los 2 pozos exploratorios de la CFE, respectivamente. En gris se representan los polígonos de las principales localidades y las vías que las conectan. Para simbología y significado de los diferentes trazos estructurales ver figura 3a. Estructuras tomadas de Avellán et al. (2018)..... 12
- Figura 3a.** Mapa Geológico de la zona de estudio, donde se delimita las estructuras topográficas e inferidas de la Caldera de Acoculco. Modificado de Avellán et al. (2018).. 13
- Figura 3b.** Modelo geológico 3D de la zona de estudio. En este se puede apreciar las diferentes morfologías que se encuentran presentes en la Caldera de Acoculco, además de la litología del área sobre la cual se han desarrollado las diversas geoformas. El relieve se encuentra exagerado 3 veces para una mejor visualización de la topografía. Para la simbología, ver la figura 3a. .... 14
- Figura 4.** En la imagen se puede apreciar la morfología de la zona de estudio, Caldera de Acoculco, en la cual resaltan topografías quebradas y diferentes derrames lávicos que modelan el paisaje, así como la presencia de diferentes cuerpos volcánicos alrededor de la estructura de colapso calderico. Las 18 estaciones de la red sísmica instalada en esta área, están representadas por triángulos amarillos. Además, se incluyó las principales fallas que afectan el área, tomadas de Avellán et al. (2018). .... 16
- Figura 5.** Diagrama de flujo para la metodología llevada a cabo..... 17
- Figura 6.** Registros fotográficos de la preparación e instalación de cada una de las 16 estaciones sísmicas de la zona de estudio..... 19
- Figura 7. a.** Columnas estratigráficas del área de Tulancingo-Acoculco **b.** Columnas estratigráficas del área de Tulancingo-Acoculco (continuación). **C.** Columnas estratigráficas del área de Acoculco y Piedras Encimadas. Tomado de López-Hernández, (2009). .... 31
- Figura 8. a.** Mapa de anomalía de Bouguer de tercer grado, en el cual se han delimitado las estructuras que atraviesan la Caldera de Acoculco, algunas trazadas con base en los fuertes cambios de gradientes gravimétricos. **b.** Mapa de elevación digital (DEM) de la zona que comprende la Caldera de Acoculco. Las líneas blancas corresponden a los diferentes lineamientos estructurales que atraviesan la caldera. Tomado de López-Hernández (2009). .... 33
- Figura 9. a.** Bloque diagrama que representa la configuración tectónico-estructural actual de un sector y las principales fases magmáticas de la Caldera de Acoculco. **b.** Mapa de elevación digital en el que se muestran los diferentes sistemas de fallas regionales y locales (intra-caldera y extra-caldera) que afectan a la zona de estudio. GAp: Graben de Apan; HRA: Horst Rosario-Acoculco; GCh: Graben Chignahuapan; HCh: Horst Chignahuapan; GAqx: Graben

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Aquixtla; FAp: Falla Apan; FCh: Falla Chignahuapan; FAx: Falla Axaxalpa; FAc: Falla Acoculco; FTx: Falla Tlaxco; FTlx: Falla Tlaxcala; CAC: Caldera de Acoculco; VCG: Volcán Cerro Grande; DAT: Depresión Apizco-Tlaxco; Tlc: Tulancingo; Ac: Acoculco; Zc: Zacatlán; Ch: Chignahuapan; Tlx: Tlaxco; Aqx: Aquixtla; TO: Tetela de Ocampo; Zp: Zacapoaxtla; Co: Coyuaco; Mx: Mexcaltepec; LC: Lázaro Cárdenas; Apz: Apizaco; Or: Oriental; Pfp: plano de falla principal. Tomado de Gómez-Álvarez (2019).                                                                                                                                                                                                                                                          | 36 |
| <b>Figura 10.</b> Curvas PSD según el modelo de Peterson en las que se señala los eventos naturales y su posible rango de frecuencias. UF (una frecuencia) DF (doble frecuencia) son picos de microsismos dominantes. Tomado y modificado de De Caro et al. (2014).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 53 |
| <b>Figura 11.</b> Curvas de PSD según el modelo de Peterson. Modificado del Servicio Geológico de los Estados Unidos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 53 |
| <b>Figura 12.</b> Representación idealizada de una cuenca sedimentaria típica, donde el basamento de la misma podría corresponder a una roca cristalina ígnea, metamórfica y/o roca sedimentaria con un grado considerable de diagénesis, sobre las cuales en la zona de valle o llanura se han depositado sedimentos (detritos) poco o nada consolidados. Los cuadros en negro representan estaciones sismológicas, H y V son las componentes en las que se polariza cada una de las ondas a través del medio. (Hr, Vr) afloramiento rocoso, (Hb, Vb) basamento rocoso y (Hf, Vf) en la superficie de la cuenca. Modificado de Nakamura (2000).                                                                                                                  | 55 |
| <b>Figura 13.</b> Representación del movimiento de las partículas de onda Rayleigh para varios valores del ángulo de elipticidad. <b>a.</b> El movimiento elíptico de partículas para una onda Rayleigh retrógrada. Se muestran las cantidades $\xi$ , $\alpha$ , H y V. <b>b.</b> La onda de Rayleigh está polarizada horizontalmente para $\xi = \pm \pi / 2$ . <b>c.</b> Movimiento retrógrado de partículas para $\xi = -\pi / 6$ . <b>d.</b> Movimiento de partículas retrógrado para $\xi = -\pi / 3$ . <b>e.</b> La onda de Rayleigh está polarizada verticalmente para $\xi = 0$ . <b>f.</b> Movimiento progrado de partículas para $\xi = \pi / 6$ . <b>g.</b> Movimiento progrado de partículas para $\xi = \pi / 3$ . Tomado de Maranò et al., (2017). | 59 |
| <b>Figura 14.</b> Construcción jerárquica de metrología fractal MF. En la imagen se puede observar como todo análisis parte de los datos originales, relacionados a series auto-afines, es decir, series de tiempo y conjuntos auto-similares o simplemente imágenes 2D. En general, para los dos tipos de datos, auto-afines y/o auto-similares, el objetivo en común será llegar a un valor de H, con el cual se procede a los análisis e interpretaciones de cada investigador. Modificado de Torres-Argüelles et al. (2010).                                                                                                                                                                                                                                  | 61 |
| <b>Figura 15.</b> Esquematación de la pila de arena. Tomado de Bak (1996).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 64 |
| <b>Figura 16.</b> Diferentes escalas de medida (reglas) para medir el perímetro de la isla de Gran Bretaña. Tomado de Mandelbrot (1967).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 64 |
| <b>Figura 17.</b> Cocientes espectrales para las estaciones AC01 y AC02.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 72 |
| <b>Figura 18.</b> Mapa de elevación digital en el que se muestran los polígonos de los 5 grupos en los que se clasificaron los 18 cocientes espectrales, de cada una de las estaciones que hacen parte de la red sísmica de Acoculco.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 74 |
| <b>Figura 19.</b> En las gráficas se puede observar la tendencia de los datos analizados y como en el segmento entre 5000 y 7000, los datos presentan una fluctuación menor respecto a los                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |

demás valores. La línea naranja representa el promedio de del total de los valores analizados.

..... 77

**Figura 20.** Se muestra las gráficas de los resultados de frecuencia acumulada obtenidos para las estaciones AC01 Y AC02. En la gráfica izquierda se puede observar cómo los datos presentan una tendencia logarítmica, un comportamiento común en los sistemas fractales. En la gráfica de la derecha se grafica el logaritmo con base 10 de los datos de frecuencia acumulada, con lo cual se pueden observar las tendencias lineales de los datos, de igual manera, como en los sistemas naturales que presentan comportamiento fractal. En la gráfica de la derecha se muestran todos los datos en color naranja y los que hicieron parte de la regresión lineal hasta obtener el mejor ajuste de la recta con el mejor **R<sup>2</sup>**, son los de color azul. .... 79

**Figura 21a.** Se muestra el segmento de la curva H/V que se tomó en cuenta para su inversión y los resultados del procedimiento. Se puede observar que para la estación AC01, se la inversión de la curva permitió observar hasta 6 capas o sustratos rocos, con una profundidad máxima de 90 metros y para la estación AC02, la inversión de la curva permitió observar 7 capas a una profundidad máxima de 388.2 metros..... 82

**Figura 21b.** Se puede observar para tres estaciones AC01, AC02 y AC04, como la curva del cociente espectral H/V (rojo), tiene un buen ajuste respecto al modo fundamental invertido (negro). .... 83

**Figura 22a.** Mapa de elevación digital en el que se muestran las líneas que unen las estaciones que hicieron parte de la construcción de los perfiles de velocidad de onda S, A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' y F-F'. .... 84

**Figura 22b.** Perfiles E-E' y F-F', en los cuales se muestran las estaciones que hicieron parte de la construcción de dichos perfiles, además de los cambios de velocidad de onda S respecto a la profundidad. Conjuntamente se observa un perfil topográfico, con el cual, se trata de mostrar la gran similitud que existe entre este y la topografía que se usó para la interpolación de los diferentes modelos de velocidad. .... 85

**Figura 23.** Mapa de elevación digital en el que se muestran los polígonos de los 5 grupos en los que se clasificaron los 18 cocientes espectrales, de cada una de las estaciones que hacen parte de la red sísmica de Acoculco. .... 90

**Figura 24. a.** Columna estratigráfica descrita para el pozo exploratorio EAC-01. Tomado de López-Hernández (2009) **b.** Mapa Geológico de la zona de estudio, donde se delimita las estructuras topográficas e inferidas de la Caldera de Acoculco. Modificado de Avellán et al. (2018). .... 93

**Figura 25.** Mapa de elevación digital en el que se han marcado los valores de porosidad de Delesse (NL; en negro) y exponente de frecuencia acumulada (Efa; en rojo) para 17 estaciones de la red sísmica de Acoculco. Estructuras tomadas de Avellán et al., (2018). 109

## Lista de tablas

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1.</b> Coordenadas geográficas de un sector del mapa geológico (carta E14-B13) de la zona de estudio. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 10  |
| <b>Tabla 2.</b> Modelo de velocidades para los arreglos 1 y 2. Modificado de Lermo et al., (2009). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 38  |
| <b>Tabla 3.</b> Modelo de velocidades para la parte externa de la cuenca endorreica. Modificado de Lermo et al., (2009). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 39  |
| <b>Tabla 4.</b> Parámetros obtenidos del manual del sensor Trillium Compact 120 S. Tomado de Trillium Compact User Guide. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 49  |
| <b>Tabla 5.</b> Parámetros obtenidos del manual del digitalizador o Recorder / DATA CUBE3 TYPE II (EXT). <a href="https://digos.eu/seismology-and-cubes/#1498960574577-c2db2790-60bc">https://digos.eu/seismology-and-cubes/#1498960574577-c2db2790-60bc</a> .....                                                                                                                                                                                                    | 49  |
| <b>Tabla 6.</b> Frecuencia de ruido ambiental de acuerdo a su fuente. Tomado de Bard et al. (2004) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 52  |
| <b>Tabla 7.</b> Fuentes de ruido ambiental y sus posibles frecuencias. Tomado y modificado de Bonnefoy-Claudet et al. (2006) en Sánchez-López (2017) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 52  |
| <b>Tabla 8.</b> Frecuencia fundamental y amplificación de los cocientes espectrales promedio de las 18 estaciones de la red sísmica de Acoculco. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 72  |
| <b>Tabla 9.</b> Agrupación de las 18 estaciones de la red sísmica de Acoculco, de acuerdo a la cantidad de picos del cociente espectral y la forma del mismo. Con esta agrupación se realizó una zonificación y mapeo de la zona de estudio (fig.18). ....                                                                                                                                                                                                            | 73  |
| <b>Tabla 10.</b> Exponentes de Hurst .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 128 |
| <b>Tabla 11a.</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 78  |
| <b>Tabla 11b.</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 78  |
| <b>Tabla 11c.</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 78  |
| <b>Tabla 11d.</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 78  |
| <b>Tabla 12.</b> Se muestran los resultados obtenidos para NL, además de los valores de exponente de Hurst “H” y dimensión fractal “D”. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 81  |
| <b>Tabla 13.</b> Densidad de bulk o densidad volumétrica en estado seco o no saturado para algunas rocas ígneas de tipo extrusivo. Modificado de Schön (2011). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 92  |
| <b>Tabla 14.</b> Clasificación de algunos tipos de suelos según sus propiedades mecánicas (NEHRP). Tomado de (Lermo-Samaniego y Limaymanta-Mendoza, 2007).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 92  |
| <b>Tabla 15.</b> <b>NYT:</b> Tobas Amarillas Neapolitan. <b>CIYF:</b> Facies Ignimbrita Amarilla Campanian. <b>CIGF:</b> Facies Ignimbrita Gris Campanian. <b>TRH:</b> Lava Traquítica. <b>PAB:</b> Basalto Alcalino Porfirítico. <b>PTB:</b> Traquibasalto Porfirítico. <b>ATT:</b> Traquiandesita Afanítica. <b>ABT:</b> Basalto Afanítico. Trabajo de rocas ígneas extrusivas del Campo de Flegueri y el Monte Etna, Italia. Tomado de Vanorio et al. (2002). .... | 92  |

## RESUMEN

El sistema geotérmico de Acoculco, también denominado como Complejo Caldera de Acoculco, se encuentra estructurado en el “Horst de Acoculco” entre el “Graben de Chingahuapan y el “Medio Graben de Apan”, en la parte oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), entre los estados de Puebla e Hidalgo. Diversos estudios realizados en este complejo, se han enfocado en comprender su evolución tectónica, magmática, geológica, hidrotermal y la posible configuración del sistema como un potencial yacimiento geotérmico, el cual, además, ha demostrado tener propiedades de un sistema de roca seca caliente, es decir, un yacimiento con ausencia de fluidos hidrotermales. La litología que hace parte de la configuración de este complejo, en su mayoría corresponden a rocas ígneas volcánicas, que reposan sobre un “basamento relativo” sedimentario compuesto principalmente por calizas de edad Jurásico-Cretácico, y que hacen parte de la Sierra Madre Oriental (SMOr). Este complejo ha sido afectado por diversos eventos tectónicos regionales y algunos locales, dando como resultado el desarrollo de importantes sistemas de fallas, que a su vez han generado diversos grados de fracturamientos en las secuencias litológicas del sector. Dichos eventos, además, han llevado al sistema al desarrollo de una corteza superior hacia diversos estados de criticalidad y a la configuración de un eventual yacimiento geotérmico, sobre el cual se han desarrollado diversas estructuras y han actuado diversos eventos geológicos que han aportado a dichos grados de críticos de la corteza.

Existen métodos geofísicos (indirectos) a través de los cuales se puede interpretar de manera teórica el medio geológico, uno de ellos y que hace parte de los estudios de sismica pasiva, son los cocientes espectrales, puesto que, en esta técnica su principio fundamental está basado en las ondas superficiales, las cuales llevan consigo un registro de todas las secuencias litológicas por las cuales han viajado antes de llegar a la fuente de registro.

En este trabajo se realizaron los cocientes espectrales de las 18 estaciones sísmicas instaladas en diversos puntos de la Caldera de Acoculco, los cuales se agruparon de acuerdo a las características del espectro, en cinco grupos diferentes, los cuales a su vez hicieron parte de una zonificación espectral de área de estudio. La información contenida en un cociente espectral, se aprovechó para realizar modelos de velocidad puntuales de onda P y S en cada estación de monitoreo sísmico, así como, modelos de velocidad de onda S con un arreglo

máximo de tres estaciones. Los datos numéricos de cada espectro fueron tratados geoestadísticamente aplicando la metodología estadística de frecuencias acumuladas, logrando obtener diferentes valores de exponente de frecuencia acumulada (Efa), con los cuales se logró clasificar la criticalidad de la corteza en bajo 17 estaciones del área de estudio, lo cual se resume en tres grupos generales. *i)* valores de Efa menores a 2, estaciones AC01-07-09-10-12-15-17-18. *ii)* valores de Efa entre 2 y 4, estaciones AC02-03-08-11. *iii)* valores de Efa entre 4 y 6, estaciones AC04-05-06-12-16. Siendo este último grupo el que representaría lugares donde la corteza se encontraría con un grado de criticalidad mayor o alto. El cálculo de los cocientes espectrales también permitió realizar adicionalmente, un análisis complementario de porosidad teórica aplicando el principio estadístico de Delesse (NL), con el cual al igual que con Efa, se agruparon en 4 grupos los sitios bajo cada estación de monitoreo. *i)* Valores de NL muy bajos, menores a 20, estaciones AC01-04-05-06-07-08-09-10-11-13-16. *ii)* Valores de NL bajo, entre 20 y 40, estaciones AC03-15. *iii)* Valores de NL intermedios, entre 80 y 100, estación AC12. *iiii)* Valores de NL altos, mayores a 100, estación AC12.

Los resultados reflejan un sistema dinámico que, al estar expuesto a diversos fenómenos geológicos, da como resultado un medio anisotrópico, o simplemente con diferencias notables en diferentes puntos del mismo, un claro ejemplo de cambios en la criticalidad de la corteza superior.

***Palabras clave:*** critico, cociente espectral, frecuencia, porosidad, caldera, fracturamiento.

## ABSTRACT

The geothermal system of Acoculco, also called the Caldera de Acoculco Complex, is structured in the “Horst de Acoculco” between the “Graben de Chingahuapan” and the “Middle Graben de Apan”, in the eastern part of the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), between the states of Puebla and Hidalgo. Several studies carried out in this complex have focused on understanding its tectonic, magmatic, geological, hydrothermal evolution and the possible configuration of the system as a potential geothermal reservoir, which, in addition, It has been shown to have properties of a system of dry rock heats, that is, a reservoir with no hydrothermal fluids. The lithology that is part of the configuration of this complex, mostly correspond to volcanic igneous rocks, which rest on a “basement relative” sedimentary composed mainly of limestones of Jurassic-Cretaceous age, which are part of the Sierra Madre Oriental (SMOr). This complex has been affected by various regional and some local tectonic events, resulting in the development of important fault systems, which in turn have generated varying degrees of fractures in the lithological sequences of the sector. These events, in addition, have led the system to the development of a superior crust towards various states of criticality and to the configuration of an eventual geothermal deposit, on which various structures have been developed and various geological events that have contributed to these degrees of Crust critics.

There are geophysical (indirect) methods through which these geological mediums can be interpreted theoretically, one of them and which is part of the passive seismic studies, are the spectral ratios, since, in this technique its fundamental principle is based in surface waves, which carry with them a complete record of all the lithological sequences through which they have traveled before reaching the record source.

In this work the spectral ratios of the 18 seismic stations installed in various points of the Acoculco Caldera were made, which were grouped according to the characteristics of the spectrum, in five different groups, which in turn were part of a zoning Spectral study area. The information contained in a spectral quotient was used to make specific P and S wave velocity models at each seismic monitoring station, as well as S wave velocity models with a maximum arrangement of three stations. The numerical data of each spectrum were geostatistically treated applying the statistical methodology of cumulative frequencies, getting

obtain different values of cumulative frequency exponent (Efa) were obtained, with which the crust's criticality was classified into under 17 stations of the study area, which is summarized in three general groups. i) Efa values less than 2, stations AC01-07-09-10-12-15-17-18. ii) Efa values between 2 and 4, stations AC02-03-08-11. iii) Efa values between 4 and 6, stations AC04-05-06-12-16. This last group being the one that would represent places where the crust would meet a higher or higher degree of criticality. The calculation of the spectral ratios also allowed to perform additionally, a complementary analysis of theoretical porosity applying the statistical principle of Delesse (NL), with which as with Efa, the sites under each monitoring station were grouped into 4 groups. i) Very low NL values, less than 20, stations AC01-04-05-06-07-08-09-10-11-13-16. ii) Low NL values, between 20 and 40, AC03-15 stations. iii) Intermediate NL values, between 80 and 100, station AC12. iiiii) High NL values, greater than 100, station AC12.

The above are results that reflect a dynamic system that, being exposed to various geological phenomena, results in an anisotropic environment, or simply with notable differences at different points thereof, a clear example of changes in the criticality of the upper cortex.

**Keywords:** critical, spectral ratio, frequency, porosity, caldera, fracturing.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), geológicamente se configura como una franja alargada en el centro del país con una orientación aproximada ONO-ESE, constituida en su gran mayoría por rocas volcánicas y en menor proporción depósitos sedimentarios de ambientes lacustres. Esta provincia está asociada a los eventos de subducción de las placas oceánicas Rivera y Cocos bajo la placa continental Norteamericana, dando lugar a la configuración de un arco volcánico continental (Molnar y Sykes, 1969; Urrutia-Fucugauchi y Del Castillo, 1977; Karig et al., 1978). El origen, en especial la orientación de este arco volcánico, ha sido objeto de discusión y debate planteando como posibles hipótesis un mega-shear (Mooser, 1972) o un fracturamiento cortical (Verma, 2001). Dentro del CVTM, en su parte centro-oriental, se localiza el complejo volcánico Tulancingo-Acoculco, al sureste de Tulancingo en el límite de los estados de Hidalgo y Puebla el cual se caracteriza por la presencia de diversas estructuras volcánicas como estratovolcanes, volcanes escudo y algunos domos (López-Hernández, 2009).

Muchos de los estudios realizados en este complejo volcánico (López-Hernández, 2009; Lermo et al., 2009; Viggiano-Guerra et al., 2011; Avellán et al., 2018; Sosa-Ceballos et al., 2018; Gómez-Alvarez, 2019; entre otros), se han enfocado en determinar las relaciones geológicas, tectónicas y geofísicas, con los procesos geotérmicos que podrían estar actuando en el área, en especial la relación del vulcanismo y los procesos hidrotermales que se asocian a la estructura calderica y su fase terminal o post-eruptiva. Sin embargo, la presencia de actividad hidrotermal reciente en este complejo, parece estar ausente. Aunque, De la Cruz y Castillo-Hernández (1986) reportan antiguas zonas de alteración hidrotermal que evidencian la existencia de fluidos hidrotermales fósiles, que hicieron parte e interactuaron con el complejo volcánico en un periodo previo a la evolución de la actual Caldera de Acoculco.

Uno de los métodos indirectos para poder establecer la posible presencia de fluidos entre los espacios vacíos en una determinada roca a cierta profundidad, es a través del análisis de registros geofísicos, más específicamente señales asociadas a registros de sismica pasiva, es decir, análisis e interpretación del ruido de fondo o también conocido como ruido sísmico. La técnica empleada para llevar a cabo las interpretaciones en las variaciones de dichos registros, es la conocida como cocientes espectrales H/V, que relaciona la variación de amplitudes de las componentes horizontales respecto a la componente vertical de un registro

sísmico. Woith et al. (2014) estudiaron un yacimiento geotérmico poco profundo en Heybeli al sureste de Turquía, correlacionando las variaciones de la relación H/V con la migración de hidrocarburos en yacimientos petrolíferos, revelando anomalías en los registros sísmicos en el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz. El fenómeno físico que podría dar explicación a dicha anomalía en ese rango de frecuencias, podría asociarse a una amplificación resonante causada por la oscilación de las burbujas de gas que acompañan al fluido. Dangel et al. (2003) encuentran que las señales de registros sísmicos sobre yacimientos de hidrocarburos, son “estructuralmente similares” a las señales registradas cerca de estructuras volcánicas, una premisa de gran importancia para llevar a cabo un análisis exhaustivo sobre la migración de fluidos hidrotermales en yacimientos geotérmicos.

Adicionalmente, la técnica de cocientes espectrales ha sido empleada para interpretar el comportamiento físico de la corteza superior y su relación con una ley de potencia (power law) que estaría estrechamente relacionada con el fracturamiento de las rocas que la conforman y la presencia de fluidos en dichos espacios, determinando de esa manera una corteza en estado crítico (Signanini y De Santis, 2012).

En este trabajo se presenta la evaluación, el análisis, y la interpretación de la técnica H/V de las señales de registros de ruido ambiental, adquiridos en las dieciséis estaciones instaladas en el centro y alrededores de la Caldera de Acoculco, con el fin de caracterizar el rango de frecuencias presentes en los sitios de instalación de las estaciones sismológicas y su posible relación con el fracturamiento o la presencia de fluidos hidrotermales, que podrían estar presentes en algún acuífero dentro de la configuración geológica de la caldera. Además, se presenta un modelo de velocidades puntual para 17 de las 18 estaciones de la red sísmica, con el fin de correlacionar las variaciones geológicas del área de estudio y asociar las anomalías de los registros sísmicos, con algún sustrato rocoso que se configure como el posible acuífero del yacimiento geotérmico. Se realizará una interpretación de las leyes de potencia que determinan y caracterizan la corteza superior como una corteza crítica, y las cuales podrían asociarse al fracturamiento e hidrofracturamiento de los sustratos rocosos que la conforman, tomando como hipótesis el comportamiento fractal de los cocientes espectrales.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

Las técnicas más empleadas para la caracterización de una red sísmica consisten en la caracterización del nivel de ruido, cocientes espectrales para conocer las frecuencias fundamentales, así como el reconocimiento de las diferentes frecuencias asociadas a diferentes litologías o a la actividad propia del yacimiento geotérmico como puede ser la migración de fluidos. Para la caldera de Acoculco se ha planteado la posibilidad de ser un sistema geotérmico de roca seca caliente, es decir, un sistema con ausencia de fluidos hidrotermales, lo cual se ha confirmado a través de pozos exploratorios secos y también por la muy poca presencia de manifestaciones termales y/o hidrotermales en superficie. En relación a lo anterior, se intenta a través de métodos indirectos como el análisis de registros sísmicos, poder identificar una señal que evidencie de alguna manera, la posible presencia de fluidos que podrían estar ausentes en dicho sistema geotermal, así como, caracterizar el fracturamiento del subsuelo y su relación con el estado crítico de la corteza superior en la Caldera de Acoculco.

### **3. HIPOTESIS**

La determinación de las dimensiones fractales para los cocientes espectrales de registros sísmicos en la red sismológica de Acoculco, permitirá determinar la criticalidad de la corteza que estará relacionada con el nivel de fracturamiento o presencia de fluidos en el yacimiento. Además, se podrá dar una explicación a la actividad tectónica del área de estudio, asociada a los dos sistemas de fallas regionales con dirección NE (fallas Apan-Tlaloc y Chignahuapan) y NO (falla Manzanito) que la atraviesan, así como a la posible actividad hidrotermal de la caldera.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

- Caracterización del posible fracturamiento y la criticalidad de la corteza superior, aplicando el análisis fractal de los cocientes espectrales H/V.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Determinar los cocientes espectrales para los sitios de instalación de la red sísmica temporal de Acoculco.
- Determinar modelos 1D y 2D a partir de la inversión de los cocientes espectrales y comparar con estudios previos.
- Determinar y clasificar las leyes de potencia para los cocientes espectrales.
- Determinar la porosidad secundaria del medio aplicando el principio de Delesse.
- Correlación de los modelos de velocidad con la geología del medio.

## 5. GENERALIDADES

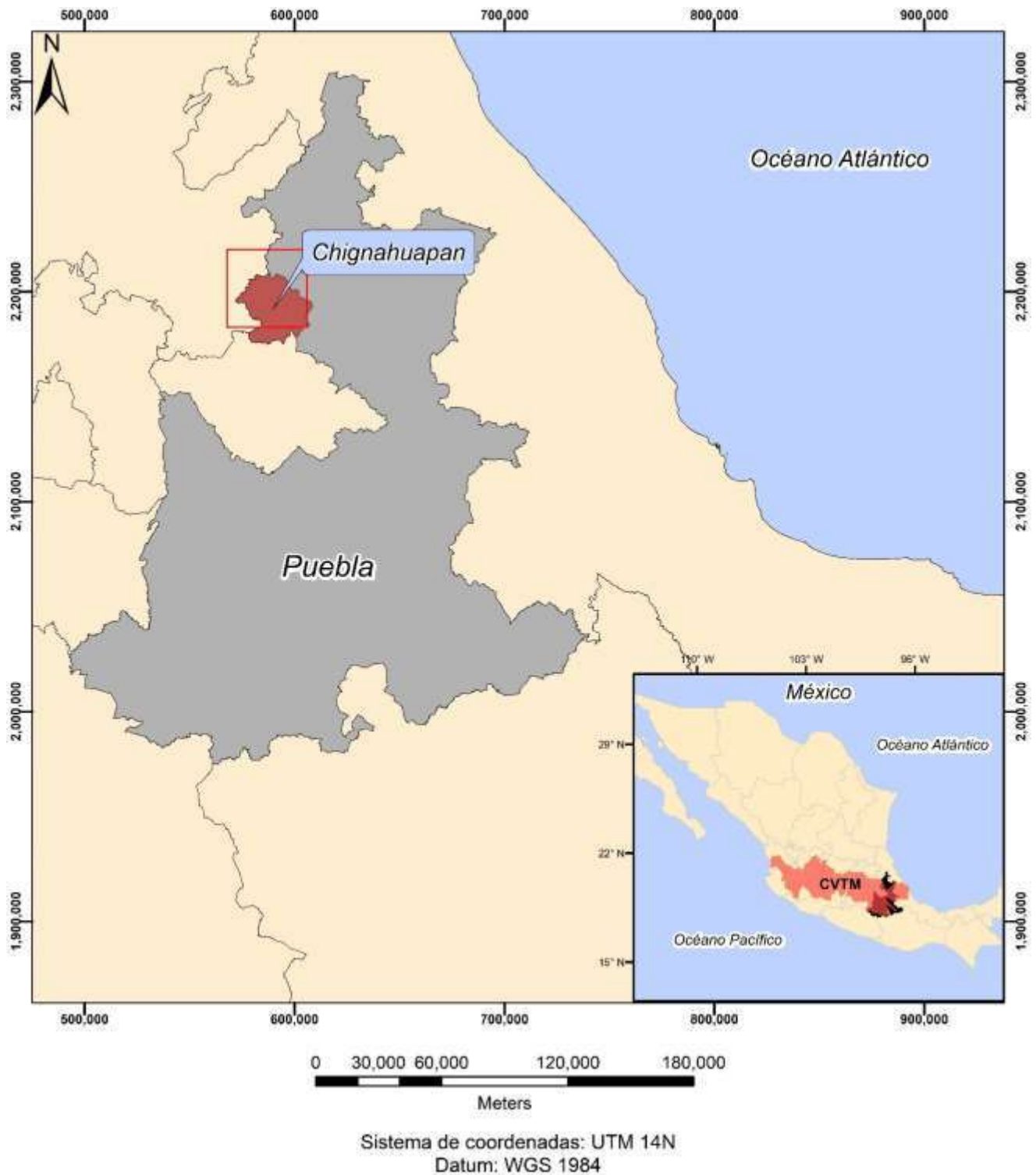
### 5.1 Localización y vías de acceso

El sector donde se llevó a cabo el estudio se ubica en la fracción oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), que se extiende con dirección ONO-ESE en el centro del país; entre los municipios de Acapulco, Chignahuapan, Zacatlán y La Soledad en el estado de Puebla, ubicado al centro-oriental de México.

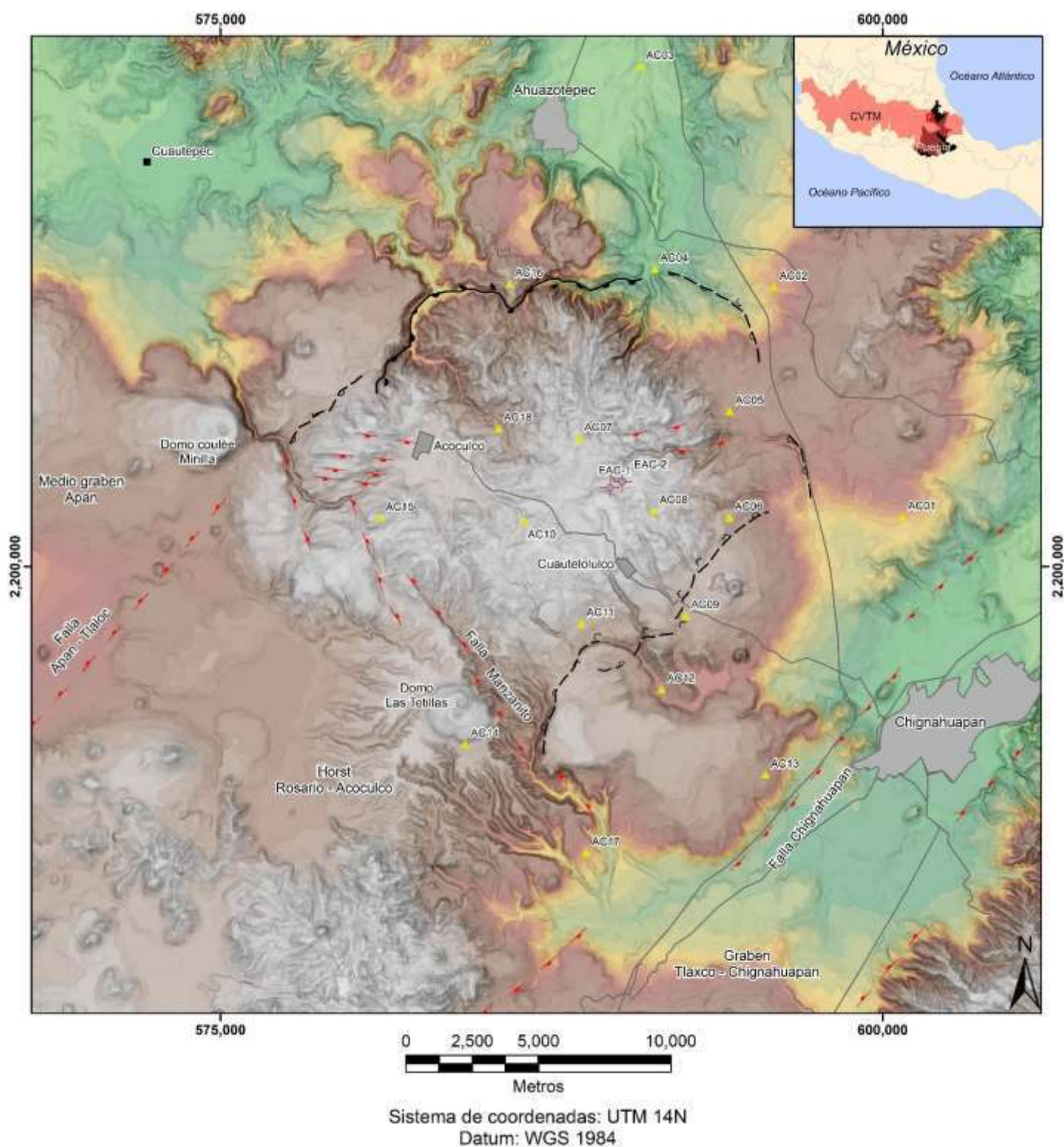
**Tabla 1.** Coordenadas geográficas de un sector del mapa geológico (carta E14-B13) de la zona de estudio.

| Coordenadas zona de estudio WGS84 |               |               |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
| Punto                             | Longitud      | Latitud       |
| 1 S.I.                            | 98°41'31.247" | 20°13'42.291" |
| 2 S.D.                            | 97°57'41.922" | 20°13'42.291" |
| 3 I.I.                            | 98°41'31.247" | 19°33'15.528" |
| 4 I.D.                            | 97°57'41.922" | 19°33'15.528" |

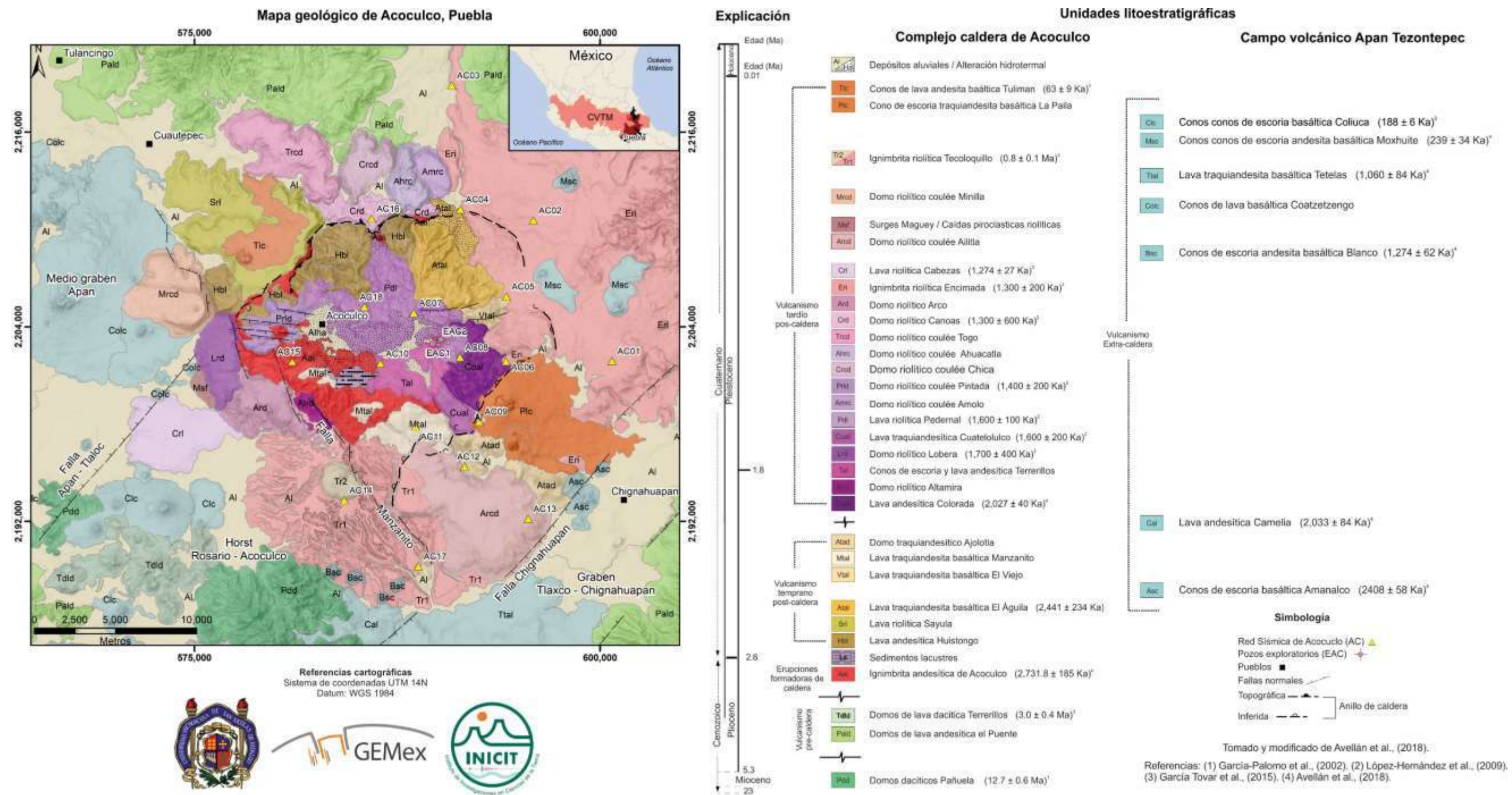
La principal vía de acceso corresponde a la que comunica a los municipios Puebla y Chignahuapan, además de vías alternas como las que conectan a este último con los pueblos de Cuautelolulco, Acapulco y Ahuazotepic. En la figura 1, se muestra la localización de la zona estudiada y en la figura 2, el mapa de elevación digital con los puntos donde se instaló cada uno de los sensores de la red sísmica.



**Figura 1.** Mapa de localización geográfica de la zona de estudio. El polígono cuadrado rojo delimita el área donde se configura la caldera de Acoculco, la cual se sitúa en gran parte del municipio Chignahuapan, perteneciente al estado de Puebla.



**Figura 2.** Mapa de elevación digital (DEM) de la zona de estudio correspondiente a la Caldera de Acapulco, donde se ha representado con símbolos triangulares amarillos y circulares azules, las 18 estaciones sísmicas y los 2 pozos exploratorios de la CFE, respectivamente. En gris se representan los polígonos de las principales localidades y las vías que las conectan. Para simbología y significado de los diferentes trazos estructurales ver figura 3a. Estructuras tomadas de Avellán et al. (2018).



**Figura 3a.** Mapa Geológico de la zona de estudio, donde se delimita las estructuras topográficas e inferidas de la Caldera de Acoculco. Modificado de Avellán et al. (2018).



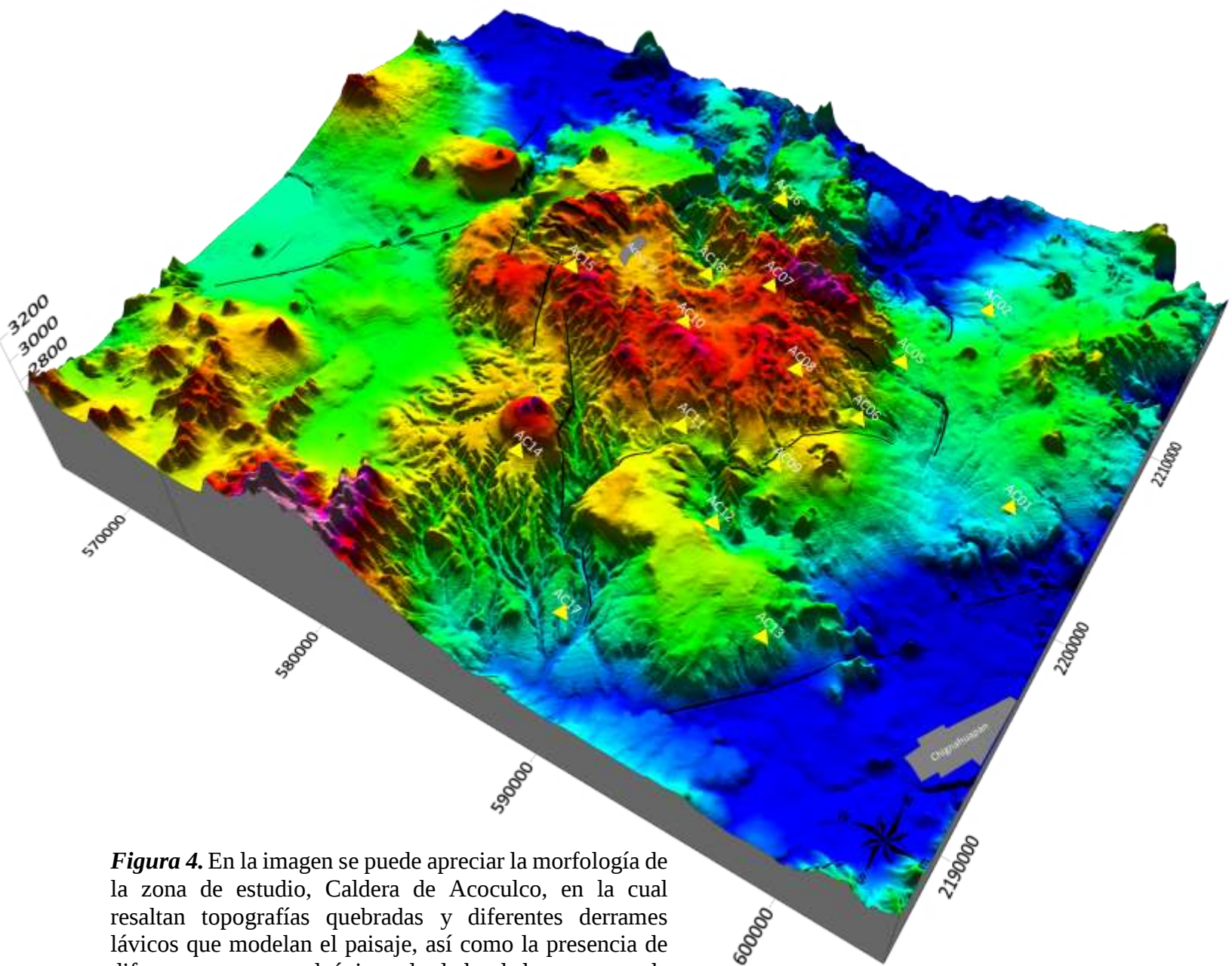
## **5.2 Clima y Fisiografía**

La zona donde se llevó a cabo el estudio presenta gran diversidad de relieves, esculpidos por la acción de diversos procesos denudativos sobre litologías principalmente sedimentarias e ígneas extrusivas, como antiguos depósitos volcánicos de formas tabulares con una leve inclinación que dan origen a mesetas. Dichos depósitos corresponden a diversas corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos) que reposan discordantemente sobre antiguos derrames lávicos.

La zona se encuentra a una altura promedio de 2.600 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura de 5-12°C, precipitación 751 mm/año y dentro de un área de aproximadamente 2.396 Km<sup>2</sup>, que corresponde al espacio donde se configura La Caldera de Acoculco.

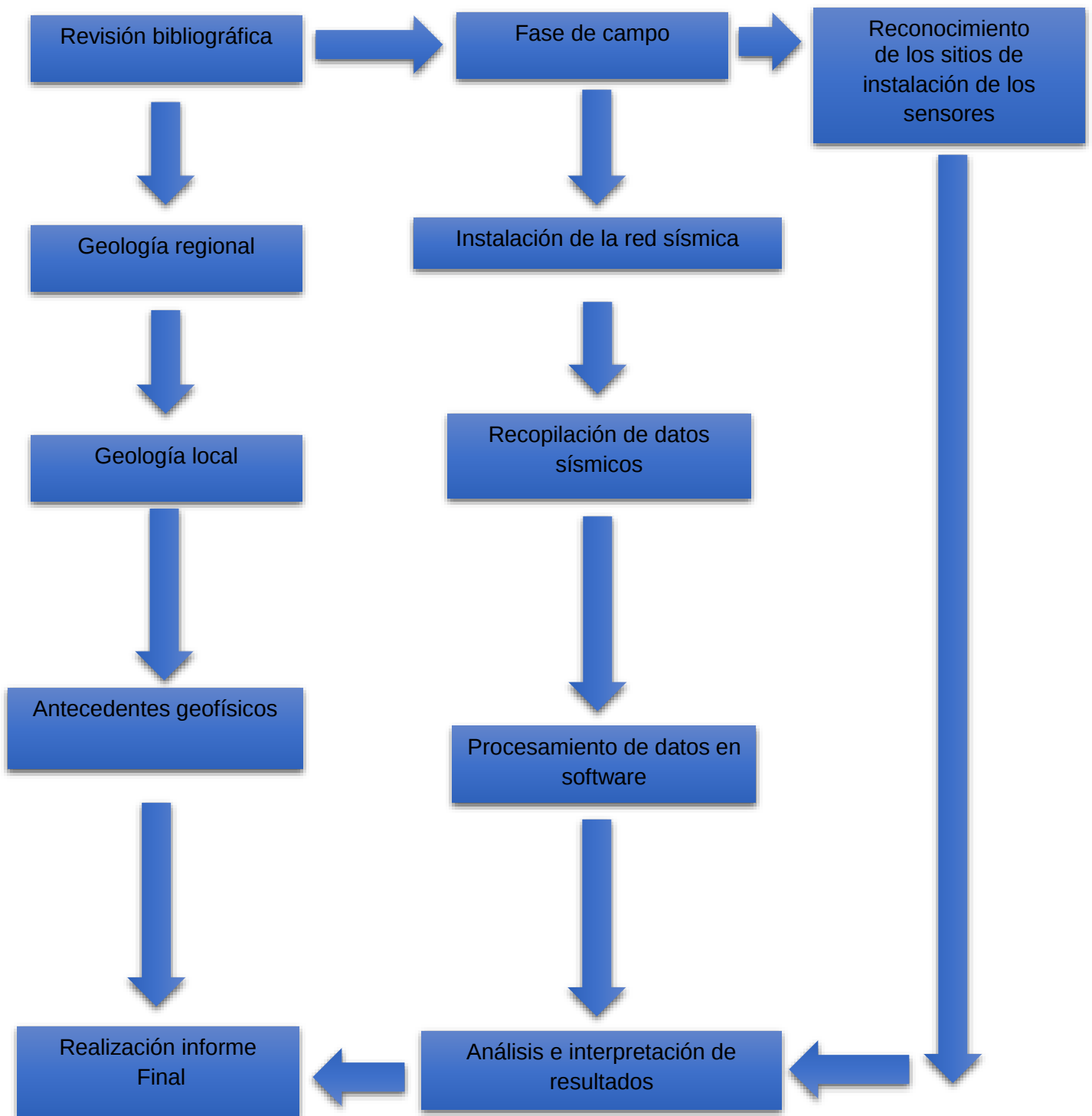
## **5.3 Morfología**

En el área de estudio se presentan tres morfologías principalmente (figs. 3b y 4), con al menos 5 orígenes: morfología volcánica, estructural, lagunar, denudativa y regional que contribuyen a definir las formas del relieve característico y las causas directas que originan las geoformas expresadas como relieves típicos de ambiente volcánico al que se asocia una topografía montañosa y en mesetas.



**Figura 4.** En la imagen se puede apreciar la morfología de la zona de estudio, Caldera de Acoculco, en la cual resaltan topografías quebradas y diferentes derrames lávicos que modelan el paisaje, así como la presencia de diferentes cuerpos volcánicos alrededor de la estructura de colapso calderico. Las 18 estaciones de la red sísmica instalada en esta área, están representadas por triángulos amarillos. Además, se incluyó las principales fallas que afectan el área, tomadas de Avellán et al. (2018).

## 6. METODOLOGIA



**Figura5.** Diagrama de flujo para la metodología llevada a cabo.

## **6.1 Revisión bibliográfica.**

En esta etapa se realizó la consulta y recopilación de algunos estudios geofísicos y geológicos que se han llevado a cabo en la zona de estudio, con el fin de ampliar el conocimiento de estudios previos y realizar comparaciones con los análisis obtenidos, y de este modo poder lograr cumplimiento de los objetivos propuestos en este trabajo.

## **6.2 Fase de campo.**

En esta etapa se realizó trabajo de campo en los alrededores de La Caldera de Acoculco (figs. 2 y 3a) con el fin de instalar la red sísmica constituida por dieciocho sismógrafos tipo Trillium Compact 120S-108Hz con sus respectivos digitalizadores tipo DATA CUBE3 TYPE II (EXT), Breakout Box o BOB (regulador de voltaje), antena GPS, batería de ciclo profundo, un panel solar con su respectivo controlador de carga, con la capacidad de proporcionar recargas a la batería. Además, se realizó un breve recorrido en las zonas donde se llevaría a cabo la instalación de cada sensor, con el fin de tener una breve idea de la litología presente en cada zona. Una de las primeras labores en esta fase, consistió en solicitar un permiso en las viviendas donde se llevaría a cabo la instalación de cada estación. Una vez obtenido, se procedió a realizar una excavación de al menos 1.20 metros de profundidad, dentro de la cual se ubicó una cubeta cilíndrica en la cual se niveló el sensor sobre una base de concreto. Al lado de esta sección se realizó otra excavación en la cual se ubicó una cubeta con forma rectangular, dentro de la cual se instalan el digitalizador, el breakout-box y la batería que alimenta el sistema, además de todo el sistema de cables del que se compone toda una estación. En la figura 6, se muestran algunos registros fotográficos desde la preparación de las excavaciones, hasta el momento en el cual se prepara y se realiza la configuración de la estación para su posterior funcionamiento y recopilación de datos. Cada estación fue configurada con una ganancia de 4 y una recopilación de 200 datos por segundo.

Esta fase tuvo una duración aproximada de 19 días, desde el 16 de abril hasta el 4 de mayo de 2018, tiempo durante el cual se realizaron todos los trabajos mencionados anteriormente y la instalación de las estaciones AC01, AC02, AC03, AC04, AC05, AC06, AC07, AC08, AC09 y AC16. Tuvo lugar una segunda campaña que llevó a cabo durante los días 4 al 8 del mes de junio, la instalación de las estaciones restantes AC10, AC11, AC12, AC13, AC14 y AC15. Finalmente, una tercera campaña en agosto para la instalación de AC18 y AC17 (fig. 2).



**Figura 6.** Registros fotográficos de la preparación e instalación de cada una de las 16 estaciones sísmicas de la zona de estudio.

### **6.3 Recopilación de datos sísmicos, microtemores y/o ruido ambiental.**

Para esta fase, tres meses y medio después de haber realizado la instalación de la red sísmica, se regresó a la zona de estudio con el fin de descargar y obtener la información de cada uno de los sensores para posteriormente procesarla y analizarla en diferentes softwares.

### **6.4 Procesamiento de datos en software y análisis e interpretación de resultados.**

En esta etapa se llevó a cabo el procesamiento de la información obtenida a partir de la instalación de la red sísmica, usando los softwares Geopsy (Wathelet, 2005; Wathelet et al., 2005) y el software de acceso libre Código Análisis Sísmicos (SAC, por sus siglas en ingles). Una vez realizado dicho procesamiento, se analizaron los resultados para dar las posibles interpretaciones tanto geológicas como geofísicas que se asocian o relacionan a dichos resultados. Se tomó como base la información proporcionada en algunos trabajos geológicos y geofísicos realizados por autores como López-Hernández (2009); Avellán et al. (2018); Gómez-Alvarez (2019); Lermo et al. (2009), la cual fue de gran utilidad para la comparación y correlación de los datos geofísicos y geoestadísticos obtenidos en este trabajo.

## 7. GEOLOGÍA REGIONAL

La geología en el país se ha visto marcada por el acontecimiento de grandes eventos geotectónicos, que a través del tiempo han dado lugar a la configuración actual de México. Algunos de esos eventos o acontecimientos son los que dieron lugar al desarrollo y paulatina evolución del llamado Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), para el cual se ha discutido y propuesto diversos orígenes. El CVTM corresponde como su nombre lo indica, a una faja volcánica que se extiende con una dirección preferencial ONO-ESE en la parte central del país, desde el estado de Nayarit, límite del océano pacífico, hasta el estado de Veracruz, límite Golfo de México.

El origen y evolución de este cinturón volcánico se ha tratado junto con la evolución de la de la Sierra Madre Occidental (SMOc), es decir, se han estudiado estas dos provincias geotectónicas limitadas por la falla regional Querétaro-Taxco, con el fin de entender y dar explicación a dos diferentes procesos de subducción que dieron origen a su actual configuración. El análisis y la interpretación de diversos datos geocronológicos en diferentes rocas de estas dos provincias, demuestran al menos seis eventos durante los cuales se dio su progresiva evolución.

Garduño-Monroy y Gutiérrez-Negrín (1992) recopilan la información de al menos 230 dataciones de diferentes tipos de rocas volcánicas pertenecientes al CVTM y SMOc, con el fin de determinar la evolución de estas dos provincias a través del tiempo. El primer grupo de rocas se ubican desde el Eoceno Tardío al Oligoceno y estas estarían asociadas a los procesos vulcano-magmáticos de tipo calcoalcalinos propios de la SMOc. Durante un breve periodo de entre 28 a 25 millones de años (Ma) se presenta según los autores un primer hiato, es decir, un periodo de tiempo durante el cual cesa o disminuye notablemente el vulcanismo, esto posiblemente asociado al fin de los eventos compresivos que dieron lugar a la Orogenia Laramide. Durante un periodo de 25 a 18 Ma la actividad magmática nuevamente se hace evidente para la SMOc. Entre 17 a 15 Ma nuevamente disminuye la actividad magmática para la provincia SMOc, dando lugar según los autores a un segundo hiato que estaría asociado con la individualización de la placa Cocos y la llegada de un nuevo evento tectónico compresivo durante el Mioceno Superior. Durante un periodo de 15 a 7 Ma aparecen los primeros eventos vulcano-magmáticos que darían como resultado a la configuración de la

secuencia basal del CVTM, y sería a comienzos de este mismo intervalo de tiempo, en el que sucederían los últimos eventos magmáticos de la SMOc. Entre un periodo de 7 a 5 Ma de acuerdo a los análisis realizados por Garduño-Monroy y Gutiérrez-Negrín (1992), se observa un último hiato que marcaría la transición entre el vulcanismo basal y el vulcanismo más reciente (5-0 Ma) del CVTM, que ha dado lugar a la actual configuración volcánica del mismo. Algo característico que observan Garduño-Monroy y Gutiérrez-Negrín (1992), es la variación en la orientación de los diversos procesos vulcano-magmáticos, es decir, los eventos de la SMOc presentan una orientación NO-SE, mientras que los eventos asociados al Cinturón Volcánico Transmexicano tanto en su etapa basal como en la actual, presentan una alineación ONO-ESE o incluso se puede decir que es prácticamente E-O, una particularidad que hace que esta provincia se torne más compleja en sus posibles interpretaciones.

La provincia geotectónica denominada como Sierra Madre Oriental (SMOr), es otro sector geológico de gran importancia dentro de la configuración geológica de México y más aún para las interpretaciones que puede tener dentro de la configuración del yacimiento geotérmico de la Caldera de Acoculco. Esta provincia se constituye principalmente de secuencias sedimentarias marinas, dentro de las cuales las calizas intercaladas con algunos paquetes de lutitas negras a grises, son los paquetes más abundantes, las cuales se han descrito y agrupado según sus características litológicas, paleontológicas, estratigráficas, geocronológicas, entre otras, en diferentes formaciones, como por ejemplo: la Formación Tamán del Jurásico Tardío (Heim, 1926; Cantú-Chapa, 1969), la Formación Palo Blanco del Jurásico Medio (Cantú-Chapa, 1969), la Formación Pimienta del Jurásico Tardío (Heim, 1926; Cantú-Chapa, 1971), sobre las cuales descansan unidades sedimentarias del periodo Cretácico como las Formaciones Tamaulipas inferior y superior (SGM, 1997), por mencionar algunas. Las anteriores, son algunas de las unidades que se hacen parte de la configuración geológica de la SMOr y que de igual forma se han descrito en otros trabajos como el de López-Hernández (2009), al este de Chignahuapan, Puebla, una localidad cercana a la zona donde se llevó a cabo este trabajo, las cuales, de igual forma han sido descritas con características muy similares por Morales y Garduño (1984), en sectores aledaños a Zacatlán, Puebla. Desde el punto de vista de la evolución tectónica de esta provincia, durante el periodo Triásico los eventos que dieron origen a la ruptura de Pangea, hicieron parte del desarrollo

de fosas o cuencas sobre las cuales se dio la depositación de diferentes secuencias sedimentarias marinas como: evaporitas, calcáreas, hasta siliciclásticas relacionadas con eventos regresivos y que a su vez se desarrollaron en un margen pasivo que era invadido paulatinamente por el paleo-océano atlántico o también conocido como el Tetis. Posteriormente los procesos tectono-compresivos como la Orogenia Laramide que inicio a finales del Paleoceno e inicios del Eoceno, serían los causantes del plegamiento de dichas secuencias sedimentarias, dando como resultado la configuración del cinturón plegado conocido como Sierra Madre Oriental.

## 8. GEOLOGÍA LOCAL

Diversos investigadores ( López-Hernández y Martínez, 1996; Lopez-Hernandez y Castillo-Hernandez, 1997; López-Hernández et al., 2009; García-Palomo et al., 2002, 2017; Viggiano Guerra et al., 2011; Avellán et al., 2018; Sosa Ceballos et al., 2018; Gómez-Alvarez, 2019), han realizado importantes aportes para el estudio y comprensión de la evolución geológica y tectónica del sistema geotérmico de Acoculco. Sus estudios han sido de gran utilidad para la continua reconstrucción evolutiva del área, así como para el entendimiento de un posible yacimiento geotermal que ha involucrado diferentes etapas y/o eventos vulcano-magmáticos. Uno de los trabajos en los que se describe ampliamente la mayoría de las unidades geológicas presentes en el sector de Acoculco y más específicamente en el área de la Caldera de Acoculco, es el realizado por López-Hernández (2009). En el trabajo López-Hernández (2009), identifica diversas etapas pre y post caldericas que juntas dieron lugar a la configuración actual de dicha caldera. A continuación, se mencionan de manera resumida las diferentes unidades litológicas identificadas por López-Hernández (2009) y que hacen parte de cada una de las etapas.

### 8.1 Unidades Pre Complejo Tulancingo-Acoculco.

#### 8.1.1 (*Jurásico - Cretácico*).

Corresponde a una secuencia sedimentaria marina de gran espesor que forma parte de la Sierra Madre Oriental (SMOr). Esta unidad aflora principalmente en la parte nor-oriental de la zona de estudio, aunque en el mapa geológico modificado de Avellán et al. (2018) no se visualizan. López-Hernández (2009), describió una sección bien expuesta de estas rocas en el sector de Los Baños de Chingahuapan al este de Chingahuapan en Tenexapa. La autora mencionó la presencia de una secuencia de calizas intercaladas con lutitas, las cuales, presentan gran similitud con las formaciones Tamán, Palo Blanco y Pimienta que afloran al E de Zacatlán, a las cuales se les asignó una edad del Jurásico Superior (Morales y Garduño, 1984). Hacia la cima o hacia la parte superior de la secuencia estratigráfica, López-Hernández (2009), describió un paquete de calizas con abundantes nódulos de pedernal negro, las cuales se asemejan a la Formación Tamaulipas Inferior y a la Formación Tamaulipas Superior de edad Cretácico (SGM, 1997). En la figuras 7a y 7b,

se muestra un punto en el cual López-Hernández (2009), realizó un reconocimiento litológico de esta unidad.

#### **8.1.2 Granito de hornblenda.**

Esta unidad no aflora en el área de estudio, pero López-Hernández (2009), hizo una descripción de esta roca a partir de ripios de núcleo durante la realización del pozo exploratorio EAC-1. Describió esta unidad como un granito de hornblenda de textura holocristalina y que se habría emplazado en las secuencias sedimentarias marinas del J-K, causando un metamorfismo de contacto (skarn) en dichas secuencias. La edad podría estar relacionada con la del intrusivo que aflora en el sector de Humeros y para el cual se han reportado edades K-Ar de 14 Ma (Yáñez-Gracia, 1980).

#### **8.1.3 Grupo Pachuca.**

Corresponden a gruesos paquetes volcánicos que reposan discordantemente sobre las secuencias sedimentarias de fondo marino y que estarían asociados a los eventos que dieron lugar a la configuración de la Sierra Pachuca y Real del Monte. De manera general López-Hernández (2009), describió a esta unidad como paquetes de flujos o derrames andesíticos acompañados de tobas y brechas. Las relaciones estratigráficas de estos depósitos y la presencia de fósiles en otras secuencias, se ha utilizado como método indirecto para asignarle una posible edad Oligoceno-Medio al Mioceno (Geyne et al., 1963).

#### **8.1.4 Andesitas de Apan.**

López-Hernández (2009) describió esta unidad litológica como conos y grandes derrames lávicos de composición andesítica, cubiertos en algunos sectores por derrames basálticos correspondientes a eventos monogenéticos del Cuaternario. El nombre formal y una edad K-Ar de 13.4 Ma es asignada por García-Palomo et al., 2002.

#### **8.1.5 Dacita el Rosario.**

Corresponde según López-Hernández (2009), a grandes y espesos derrames lávicos de composición dacítica que subyace la ignimbrita Tetlapayac y en algunos sectores se encuentra cubierto por derrames basálticos asociados a conos monogenéticos del Grupo

Tezontepec-Chignahuapan del Cuaternario. Texturalmente describe una textura porfídica, en algunas ocasiones con la presencia de xenolitos posiblemente andesíticos.

#### **8.1.6 *Andesita El Peñón.***

García-Palomo et al. (2002), describieron y consideraron a esta unidad como un complejo volcánico compuestos de estrato-volcanes, derrames lávicos principalmente de composición andesítica, domo y flujos piroclásticos. Además, asignan para esta unidad una edad 12.7 Ma.

#### **8.1.7 *Ignimbrita Tetlapayac.***

López-Hernández (2009), describió esta unidad como una roca volcanoclástica de composición riolítica, color gris crema y con variaciones en el grado de soldamiento. La edad radiométrica que reporta para esta unidad por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  es de 12.6 Ma.

#### **8.1.8 *Ignimbrita de Alcholoya.***

Es el nombre informal que propuso López-Hernández (2009), para una secuencia de depósitos piroclásticos que reposan discordantemente sobre unidades sedimentarias del Mesozoico (fig. 7a). Además, para esta unidad se propone una posible relación con el colapso de la Caldera de Tulancingo o al colapso del volcán localizado en Chichicuahtla.

### **8.2 Unidades del Complejo de Tulancingo.**

#### **8.2.1 *Riodacita Las Minas.***

Corresponde a otra unidad descrita por López-Hernández (2009), en ripios o fragmentos de roca recuperados en la perforación del pozo exploratorio realizado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el área de La Caldera de Acoculco y nombrado como EAC-1. No encuentra una relación directa con las otras unidades que también se encuentran en el área y constituye la base de la secuencia volcánica de la zona donde se realizó dicha perforación. Además, describió esta unidad con un color gris blanquecino producto de alteración hidrotermal de tipo silicificación; reposa discordantemente sobre la secuencia sedimentaria metamorfozada y la suprayace la ignimbrita de Los Azufres.

### **8.2.2 *Ignimbrita Los Azufres.***

Al igual que la unidad anterior esta también es descrita por López-Hernández (2009), a través de los fragmentos de roca recuperados durante la perforación del pozo EAC-1. Describió esta unidad de composición riolitica y con un alto grado de alteración hidrotermal del tipo silicificación. Hacia la base y cima de estas rocas describe las unidades riodacita Las Minas y dacita Cruz Colorada respectivamente.

### **8.2.3 *Dacita Acaxochitlán.***

Esta unidad fue descrita como derrames lávicos poco viscosos con baja pendiente y muy disectados, que cubren discordantemente hacia el norte y al oriente las secuencias sedimentarias, mientras que hacia el sur esta secuencia es cubierta por depósitos más recientes de Acoculco. La edad reportada por López-Hernández (2009), para esta unidad mediante el método K-Ar es de 3.0 Ma.

### **8.2.4 *Domos de Tulancingo y productos piroclásticos.***

López-Hernández (2009), describió esta unidad principalmente como, un domo de composición riodacitica con un alto grado de disectación al que se asocian otros domos de menor tamaño y con menor grado de erosión, pero de la misma composición; además de algunos flujos piroclásticos e ignimbritas soldadas. La edad asignada mediante el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  es de 2.7 Ma.

## **8.3 Unidades asociadas a la evolución de La Caldera de Acoculco (Unidades pre-caldera).**

Las unidades que se mencionan a continuación de acuerdo a la descripción realizada por López-Hernández (2009), corresponden a la etapa pre-caldera.

### **8.3.1 *Andesitas basálticas Los Laureles.***

Describió esta unidad como flujos de lava de composición andesitica basáltica, textura microporfídica y cubiertos por la ignimbrita de Acoculco, sedimentos lacustres y rocas volcánicas de composición dacítica (figs. 7a, b y c). Para esta unidad López-Hernández (2009) no reporta edades.

### **8.3.2 *Riolitas pre-caldera.***

Esta unidad fue descrita por López-Hernández (2009), como cuerpos riolíticos en forma de domo y derrames lávicos con un espesor máximo de 200 metros. No se describe la base de esta unidad y en algunos sectores se encuentra cubierta parcialmente por la ignimbrita de Acoculco (fig. 7c). La edad asignada a estas rocas mediante el método K-Ar es de 1.7 Ma.

### **8.3.3 *Dacita Cruz Colorada.***

Se describió a esta unidad como espesos derrames lávicos de composición dacítica. En algunos sectores con intensa alteración hidrotermal. Estratigráficamente esta unidad se encuentra por encima de la ignimbrita Los Azufres y a su vez subyace bajo la ignimbrita de Acoculco y sedimentos lacustres (figs. 7a y b). La edad asignada a esta unidad mediante el método K-Ar es de 1.6 Ma.

### **8.3.4 *Basalto de Cuautelolulco.***

Esta unidad fue descrita por López-Hernández (2009), básicamente como flujos de lava densos y de color negro. Al microscopio los describió con una textura microporfídica hialopilitica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno, olivino y xenocristales de cuarzo corroído. Debido a su poca distribución no fue cortado por el pozo exploratorio EAC-1. La edad asignada mediante el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  es 1.6 Ma.

## **8.4 Unidades sin-caldera de Acoculco (Ignimbrita de Acoculco).**

Esta unidad piroclástica según López-Hernández (2009), es la más importante que se observa dentro de la caldera (figs. 7a y c). Fue descrita como un paquete compuesto por siete flujos principales y separados por eventos de caída y oleadas piroclásticas. El soldamiento de las unidades es variable, pero en general se puede decir que es bajo. La edad que se reporta para esta unidad mediante el método K-Ar es de 1.4 Ma.

### **8.4.1 *Sedimentos Lacustres.***

Según la descripción de López-Hernández (2009), corresponden a sedimentación intracalderica en pequeñas depresiones o cuencas donde se depositaron los sedimentos producto de la erosión de las rocas volcánicas de las etapas anteriores. Figuras 7b y c.

#### **8.4.2 Basalto de Potrerillos.**

López-Hernández (2009), describió esta unidad como derrames lávicos de color gris oscuro y grano fino. Estratigráficamente se encuentran por encima de La ignimbrita de Acoculco y los sedimentos lacustres (figs. 7a y c), por lo cual le asigna una edad < 1.4 Ma.

#### **8.4.3 Riolita de Acoculco.**

Este es el nombre que asigno López-Hernández (2009) para siete domos de composición riolitica emplazados con un patrón semicircular y que afloran cerca del poblado de Acoculco. De la Cruz y Castillo (1986) en López-Hernández (2009), asignaron a este grupo de cuerpos rioliticos una edad de 1.36, 1.34 Ma por el método K-Ar.

#### **8.4.4 Ignimbrita Piedras Encimadas.**

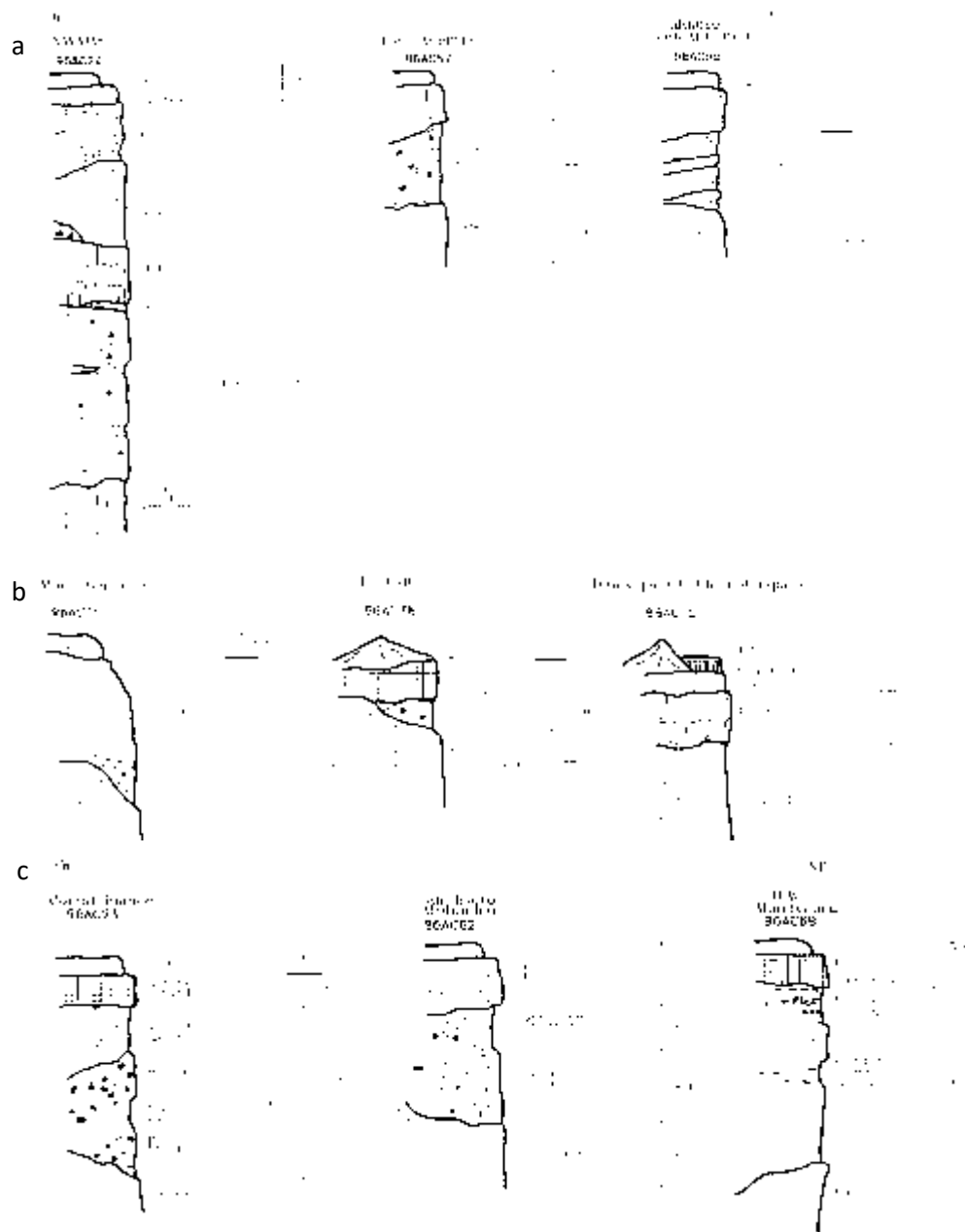
Bajo este nombre López-Hernández (2009), clasificó a una serie de depósitos piroclásticos ricos en cristales, de muy alta densidad, alto grado de soldamiento y con una distribución restringida alrededor del centro de emisión. Además, por sus notables características dividió a la unidad en miembro inferior y miembro superior. Estratigráficamente, la unidad se encuentra cubriendo derrames basálticos posiblemente de la unidad Atotonilco y sobreyaciendo a esta unidad (Ignimbrita Piedras Encimadas) se describieron depósitos retrabajados de la misma ignimbrita (fig. 7c). La edad radiométrica que reporta para esta unidad mediante el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  es 1.26 Ma.

#### **8.4.5 Ignimbrita Tecoloquillo.**

López-Hernández (2009), describió esta unidad como una secuencia de flujos piroclásticos de tonalidades gris-blanco con alto porcentaje de cristales y poco soldados. La unidad suprayace las secuencias lacustres y a su vez se encuentra cubriendo el domo riolitico las Tetillas, para el cual se han obtenido edades de 0.8 Ma. La anterior relación estratigráfica sugiere para López-Hernández (2009), una estrecha relación entre ambas unidades que indicarían el final de los procesos eruptivos. De esa misma manera la edad de esta unidad sería muy próxima a 0.8 Ma.

#### **8.4.6 *Riolita las Tetillas.***

Esta unidad ha tenido diversas denominaciones en diversos estudios. Originalmente De la Cruz y Castillo-Hernández (1986), asignaron a esta unidad el nombre de Riolita Tetillas, Caballero et al. (1999), denominan a la unidad con el nombre de volcán Tecoloquillo y finalmente García-Palomo et al. (2002), incluye a estas rocas como parte de la ignimbrita de Tecoloquillo. López-Hernández (2009), hizo uso del nombre propuesto originalmente como Riolita Tetillas (De la Cruz and Castillo-Hernández, 1986) y que su suprayace a la unidad Ignimbrita Tecoloquillo. Este flujo se describió como un flujo de lava riolítica que formó un domo con una morfología plana hacia la cima, con un cono de ceniza, un cráter de aproximadamente 0.6 km de diámetro y un pequeño domo al interior de este, dando lugar a una morfología particular y a la cual se alude su nombre “Tetillas”. Petrográficamente López-Hernández (2009), describió una textura porfídica con matriz vítrea y presencia de fenocristales como feldespatos potásicos, cuarzo, hornblenda y óxidos. La distribución espacial de esta unidad es reducida y seguramente se emplazó en una fractura anular de la Caldera de Acoculco hacia la parte SO. Estratigráficamente, se encuentra suprayaciendo la ignimbrita de Tecoloquillo y parcialmente cubierta por capas de suelo. La edad que reporta López-Hernández (2009), mediante el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , es de 0.8 Ma.



**Figura 7. a.** Columnas estratigráficas del área de Tulancingo-Acochulco **b.** Columnas estratigráficas del área de Tulancingo-Acochulco (continuación). **C.** Columnas estratigráficas del área de Acochulco y Piedras Encimadas. Tomado de López-Hernández, (2009).

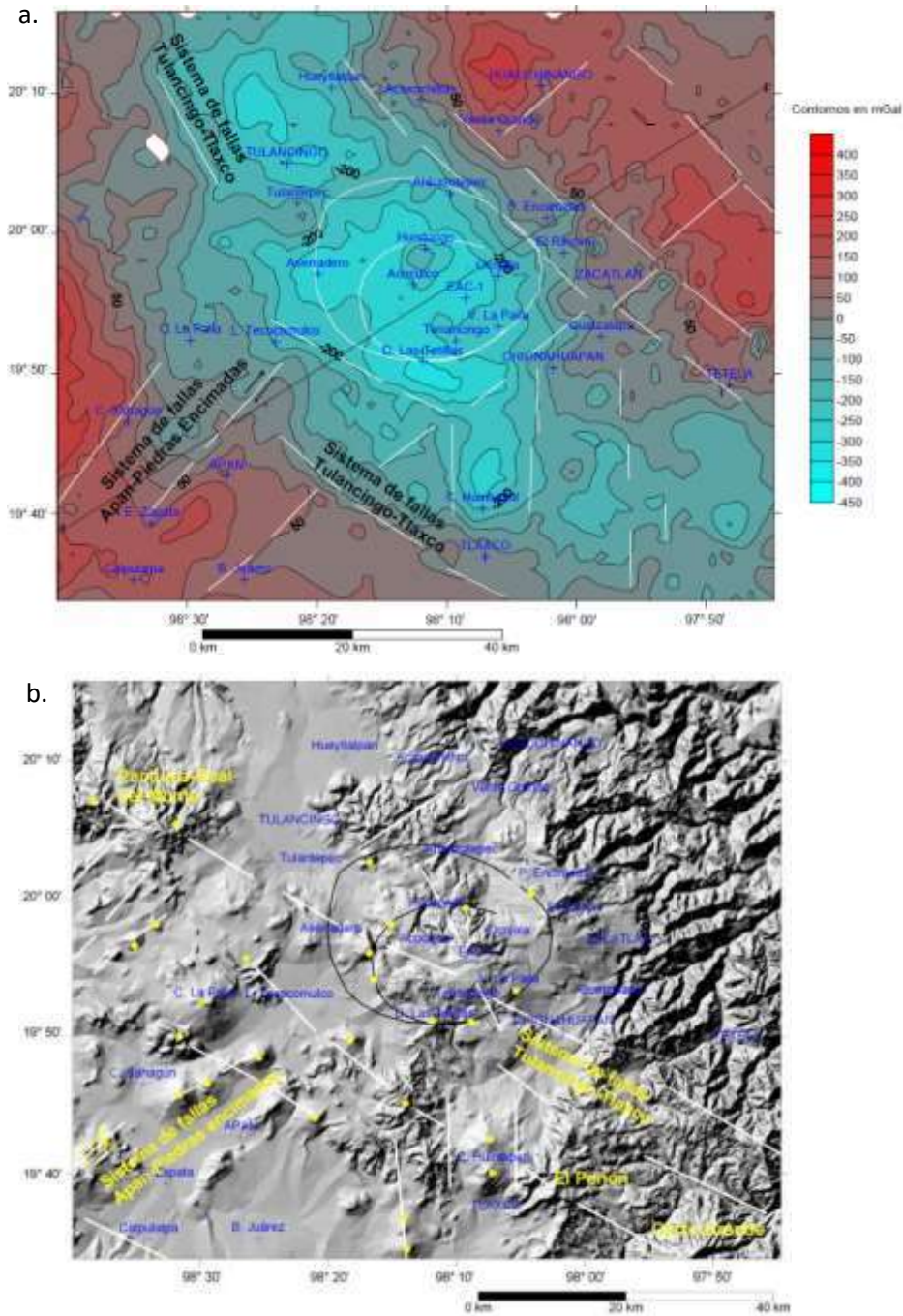
## 9. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área donde se llevó a cabo este estudio presenta complejidad tanto litológica como tectónica. Dos grandes sistemas de fallas predominan en la región y posiblemente controlaron diversos procesos geológicos como el emplazamiento de diferentes cuerpos volcánicos.

**López-Hernández (2009)** mediante el análisis de modelos de elevación digital (DEM) por sus siglas en inglés, junto a estudios geofísicos como gravimetría y magnetometría identificó el sistema de falla Apan-Piedras Encimadas y el sistema de fallas Tulancingo- Tlaxco (figs. 8a y 8b).

El sistema de fallas Tulancingo-Tlaxco con dirección preferencial NO-SE, se describe como el sistema distensivo más antiguo, Mioceno-medio, en la zona y sería el responsable de un sucesivo emplazamiento de cuerpos volcánicos con la misma dirección y cuyas edades migran de más antiguo en la parte NO a la más reciente en la parte SE. El sistema de fallas Apan-Piedras Encimadas se describe como un sistema reciente con dirección preferencial NE-SO que afecta la zona e interrumpe o disecta al sistema con dirección NO-SE. Este sistema estaría asociado a una tectónica extensiva que habría causado el emplazamiento de cuerpos volcánicos de edades más recientes, es decir, del Pleistoceno y que aún podría estar activo. Un tercer lineamiento con dirección N-S es mencionado por la autora y está evidenciado por la presencia de dos cuerpos volcánicos tipo escudo alineados en esa misma dirección al SE de La Caldera de Acoculco.

Localmente la autora describió la presencia de un sistema escalonado de fallas normales al O del poblado de Acoculco, además de un sistema de fracturas intra-calderico con direcciones NO-SE, NE-SO y N-S que en conjunto generan un patrón de fracturamiento radial que podría estar asociado al emplazamiento de un domo resurgente dentro de la caldera, el cual a su vez habría dado lugar a la configuración de un graben apical; sin descartar la influencia tectónica asociada de los tres lineamientos regionales mencionados anteriormente.



**Figura 8. a.** Mapa de anomalía de Bouguer de tercer grado, en el cual se han delimitado las estructuras que atraviesan la Caldera de Acoculco, algunas trazadas con base en los fuertes cambios de gradientes gravimétricos. **b.** Mapa de elevación digital (DEM) de la zona que comprende la Caldera de Acoculco. Las líneas blancas corresponden a los diferentes lineamientos estructurales que atraviesan la caldera. Tomado de López-Hernández (2009).

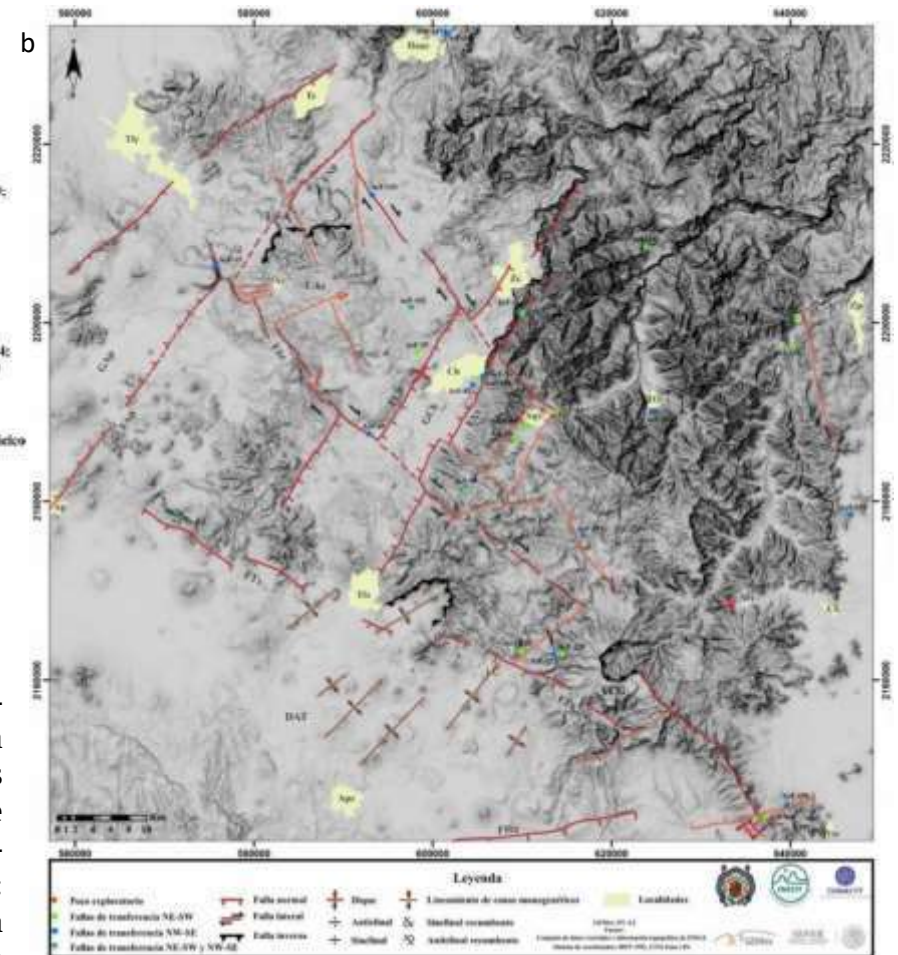
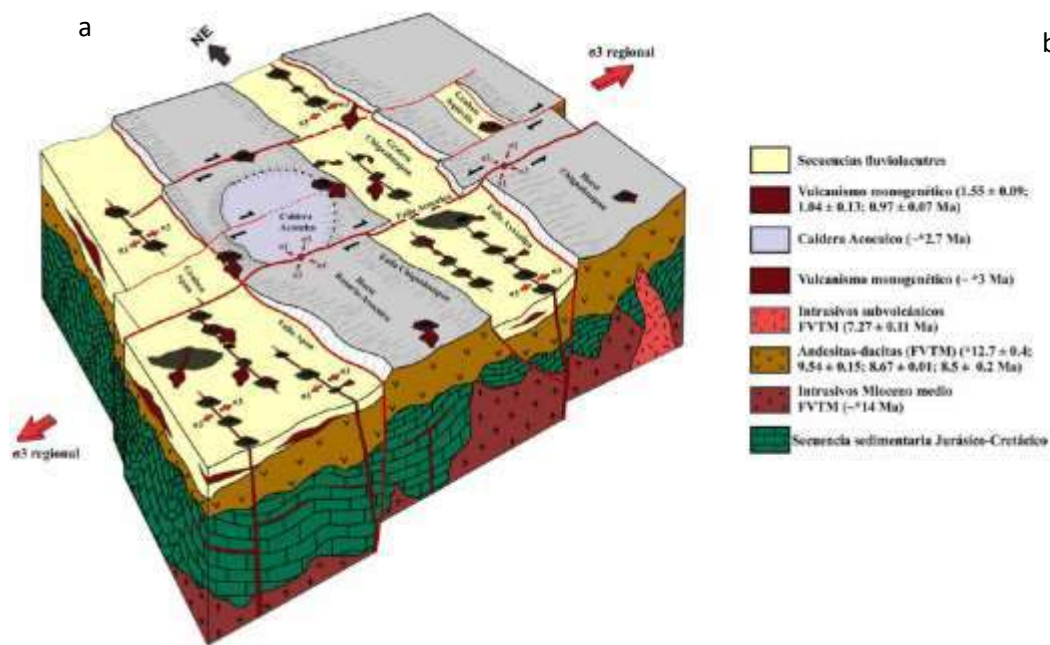
**Gómez-Álvarez (2019)** Realizó la caracterización espacial y temporal de la evolución tectónica y magmática en el alto estructural de Chignahuapan, Puebla, logrando un avance importante en las interpretaciones geo-evolutivas que se han desarrollado en el área de estudio y las implicaciones que estas tienen con el yacimiento geotérmico de la Caldera de Acoculco. El trabajo realizado por el autor, involucra el análisis y entendimiento de la variabilidad composicional de los magmas que interactuaron y se emplazaron tanto en la Caldera de Acoculco, como en la caldera de Los Humeros, separadas por lo que el autor ha denominado como Horst de Chignahuapan (Hch). En este trabajo el autor discute la composición magmática (dentro del rango de basaltos y riolitas) de los diferentes cuerpos emplazados entre las dos calderas, cuyos porcentajes en peso de SiO<sub>2</sub> (%wt) varían entre un 47.52 a un 76.03 %, y que estarían asociados a diferentes eventos tectónicos que habrían facilitado sus emplazamientos en la corteza del área estudiada. Gómez-Álvarez (2019), tomó en cuenta dos conjuntos magmáticos principales. El primero correspondería a la fase inicial del cinturón volcánico Transmexicano (CVTM) en el HCh y habría ocurrido en un periodo de  $12.7 \pm 0.4$  y  $7.2 \pm 0.11$  Ma, (Mioceno Medio) un periodo magmático en el cual, fue característico la evolución e intrusión de magmas calcoalcalinos en forma de cuerpos sub-volcánicos de composición granito-diorita, acompañado de eventos efusivos representados por derrames lávicos de composición andesítica y dacítica. El anterior vulcanismo según el autor, estuvo influenciado por un régimen tectónico distensivo para el cual su esfuerzo mínimo horizontal ( $\sigma_3$ ) tendría una orientación NE-SO y que formó fallas normales de dirección NO-SE NNO-SSE (fig. 9b).

El segundo conjunto magmático habría ocurrido en la transición de los periodos Mioceno-Plioceno representado por cambios tanto en el régimen tectónico, como en los procesos magmáticos involucrados y adicionalmente acompañados de periodo de inactividad volcánica comprendido entre 7 y 3 Ma. Un vulcanismo monogenético se habría desarrollado a inicios del plioceno producto de los eventos tectónicos extensionales con un esfuerzo mínimo horizontal ( $\sigma_3$ ) con orientación NO-SE (fig. 9a), el cual facilitó la generación de magmas alcalinos y de transición en coexistencia con *melts* calcoalcalinos. La geometría de las actuales cuencas en el sector de Acoculco y Chignahuapan, así como el emplazamiento de un vulcanismo monogenético con lineamientos paralelos a las fallas normales Apan, Chignahuapan y Axaxalpa que delimitan el graben de Apan y el graben Tlaxco-

Chignahuapan, así como los horst Rosario-Acocolco y Chignahuapan, estarían controlados por el sistema estructural distensivo y/o extensional NO-SE y desarrollado en el Plioceno-Pleistoceno (figs. 9a y b).

Los dos eventos tectónicos extensionales NE-SO del Mioceno y NO-SE del Plioceno-Pleistoceno, también han estado acompañados de un evento de fallamiento importante y asociado a zonas de transferencia, del cual, el mejor ejemplo es según el autor, la Falla Acocolco con una dirección NO-SE y cinemática lateral derecha (figs. 9a y b), la cual a su vez, corta algunos domos de composición riolítica emplazados al oeste de la Caldera de Acocolco, en un periodo de entre 1.7 a 0.6 Ma.

Finalmente Gómez-Álvarez (2019), relacionó su trabajo estructural, principalmente de las fallas con dirección NE-SO (evento extensional del Plioceno-Pleistoceno) y los sistemas de fallas de transferencia con dirección NO-SE, con las evidencias de actividad hidrotermal y el potencial que podrían llegar a tener la intersección de estas estructuras para conducción de fluidos hidrotermales. También se mencionó un sistema de fallamiento intracalderico con dirección aproximada E-O (fig. 9b) asociado a los eventos propios de tectónica local de Caldera de Acocolco (subsistencia y resurgencia), el cual es aparentemente somero, razón por la cual su potencial geotérmico se vería reducido.



**Figura 4. a.** Bloque diagrama que representa la configuración tectónico-estructural actual de un sector y las principales fases magmáticas de la Caldera de Acoculco. **b.** Mapa de elevación digital en el que se muestran los diferentes sistemas de fallas regionales y locales (intra- caldera y extra-caldera) que afectan a la zona de estudio. **Gap:** Graben de Apan; **HRA:** Horst Rosario-Acoculco; **GCh:** Graben Chignahuapan; **HCh:** Horst Chignahuapan; **GAqx:** Graben Aquixtla; **FAp:** Falla Apan; **FCh:** Falla Chignahuapan; **FAX:** Falla Axaxalpa; **FAC:** Falla Acoculco; **FTx:** Falla Tlaxco; **FTlx:** Falla Tlaxcala; **CAC:** Caldera de Acoculco; **VCG:** Volcán Cerro Grande; **DAT:** Depresión Apizco-Tlaxco; **Tlc:** Tulancingo; **Ac:** Acoculco; **Zc:** Zacatlán; **Ch:** Chignahuapan; **Tlx:** Tlaxco; **Aqx:** Aquixtla; **TO:** Tetela de Ocampo; **Zp:** Zacapoaxtla; **Co:** Coyuaco; **Mx:** Mexcaltepec; **LC:** Lázaro Cárdenas; **Apz:** Apizaco; **Or:** Oriental; **Pfp:** plano de falla principal. Tomado de Gómez-Álvarez (2019).

## 10. ANTECEDENTES.

El sector de la Caldera de Acoculco, es una zona en la que últimamente se han realizado diversos estudios geológicos, con el fin de estudiar su potencial como yacimiento geotérmico. Sin embargo, los análisis del subsuelo con ayuda de las diversas herramientas que proporciona la geofísica son muy pocos. A continuación, se presenta un breve resumen de los resultados obtenidos a partir de dichos estudios geofísicos realizados en la zona, además de los estudios geológicos que también se han llevado a cabo en el sector.

➤ **Lermo et al. (2009)** realizaron un trabajo de investigación sobre la actividad sísmica en la que denominan como zona geotérmica de Acoculco, con una red sísmica instalada durante cuatro meses y conformada por siete sismógrafos (triaxiales) digitales, para un total de 7 estaciones sismológicas, de los cuales solo 6 se utilizaron para el análisis y procesamiento de los datos registrados. Una de las principales conclusiones por parte de los autores en este trabajo, es la ausencia de registros sísmicos asociados a sismos locales; por lo que asumen que las fallas que intersecta el área de estudio estarían “inactivas” y posiblemente la reactivación de estas estructuras podría estar influenciada si el yacimiento es puesto en producción. Los datos que analizaron y procesaron corresponden a 30 sismos regionales, de los cuales 14 son de zona de subducción, 7 de intraplaca, 6 corticales y 3 profundos. Con estos datos y la ayuda del pozo exploratorio EAC-1 realizado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), logran obtener los siguientes resultados:

❖ Funciones de transferencia empírica (FTE) para cada una de las seis estaciones, con el fin de identificar el efecto de sitio de los lugares donde se instalaron: estación Cruzada Colorada (ACO- 01) máximo espectral en la banda entre 0.6-0.8 Hz, Estaciones Atotonilco y Pedernales (ACO-02 y ACO-03) máximo espectral en la banda entre 0.6-0.9 Hz, y estaciones Potrerillo, Terrerillos y Tenancingo (ACO-04, ACO-05 y ACO-06) máximo espectral en la banda entre 0.4 y 0.6 Hz. Dichos efectos de sitio podrían estar asociados a los paquetes volcánicos (secuencias litológicas sub-superficial) o a la secuencia litológica profunda (calizas metamorfozadas) con referencia al pozo EAC-1.

- Correlación espectral entre estaciones sísmicas (SPAC): los autores llevan a cabo dos arreglos lineales, cada uno constituido por tres sismógrafos digitales triaxiales de banda ancha, uno con dirección N-S sobre el pozo EAC-1 cerca del lugar conocido como manantial Los Azufres y otro con dirección N45°O cerca del manantial Alcaparrosa, con el fin de registrar microtemores, inducidos, analizar la variación de los mismos y estudiar la relación del coeficiente de correlación en función de la distancia entre estaciones de sismógrafos, y a partir de esto encontrar curvas de dispersión calculada, dicho de otro modo, estimar la estructura de velocidades en la que fue denominada como cuenca endorreica por los estudios de la GIGSA (2002). La tabla 2 indica los valores obtenidos con una única variación en los espesores de las capas. La igualdad de los otros valores se debe según los autores, al corto espaciamientos entre los dos arreglos, pero toman en cuenta el arreglo 2 como modelos de velocidades para el interior de la cuenca endorreica.

| Espesor<br>arreglo 1<br>(m) | Espesor<br>arreglo 2<br>(m) | Veloc. Vp<br>(m/s) | Veloc. Vs<br>(m/s) | Densidad<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | QP   | QS   |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|------|------|
| 60                          | 70                          | 410                | 236.9              | 2000                             | 675  | 300  |
| 200                         | 200                         | 762                | 440.4              | 2,100                            | 562  | 250  |
| 520                         | 510                         | 3000               | 1734.1             | 2,300                            | 675  | 300  |
| 870                         | 860                         | 4000               | 2312.1             | 2,650                            | 675  | 300  |
| 0                           | 0                           | 6000               | 3468.2             | 2,700                            | 5000 | 5000 |

**Tabla 2.** Modelo de velocidades para los arreglos 1 y 2. Modificado de Lermo et al., (2009).

- Con ayuda del resultado anterior los autores determinan la función de transferencia teórica (FTT) para los dos arreglos lineales, con el fin de realizar una comparación con la FTE encontrada en las seis estaciones sismológicas. Los resultados que obtienen no concuerdan entre sí, es decir, existen diferencias en espesor y velocidad tanto de los arreglos lineales como de los modelos individuales de las 6 estaciones sismológicas instaladas hacia la periferia de la cuenca.
- El anterior resultado es la premisa usada por los autores para intentar determinar un modelo de velocidades para las estaciones ACO-01, ACO-03 Y ACO-05, que se encuentran en la parte externa o el borde de la que sería según el estudio de la GIGSA

(2002), una cuenca endorreica. La tabla 3 indica los resultados que obtienen con la diferencia que en esta parte de la cuenca no estaría presente la capa más superficial que identificaron dentro de la cuenca. Adicionalmente los autores añaden lo que sería un basamento granítico al que no se le asigna espesor.

| Espesor arreglo 2 (m) | Veloc. Vp (m/s) | Veloc. Vs (m/s) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | QP   | QS   |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------|------|
| 120                   | 762             | 440             | 2,100                         | 562  | 250  |
| 280                   | 3000            | 1734.1          | 2,300                         | 675  | 300  |
| 1670                  | 4000            | 2312            | 2,650                         | 675  | 300  |
| 0                     | 6000            | 3468            | 2,700                         | 5000 | 5000 |

**Tabla 3.** Modelo de velocidades para la parte externa de la cuenca endorreica. Modificado de Lermo et al., (2009).

Finalmente, llegan a la conclusión que los resultados obtenidos en este trabajo mejoran las interpretaciones obtenidas mediante los modelos geoelectricos realizados por GIGSA (2002), y complementan la información de velocidades de ondas P y S, densidad y amortiguamientos.

- **López-Hernández (2009)** mediante un estudio gravimétrico en el Complejo Tulancingo-Acocolco, interpreta los alineamientos y altos gradientes de los contornos gravimétricos (mGal) como indicadores de las diferentes estructuras regionales que configuraron dicho complejo. Además, se determina de manera clara la presencia de máximos gravimétricos que están asociados a los diferentes cuerpos volcánicos como, por ejemplo, los que se encuentran dentro de lo que la autora delimita como Caldera de Tulancingo. Los mínimos gravimétricos asociados tanto a depocentros, pequeñas cuencas, como también a los depósitos de baja densidad acumulados en la zona donde se dio el colapso de la caldera. Sumado a lo anterior, la autora pudo interpretar a partir del mapa, una serie de contornos con tendencia curvilínea asociada a los límites de la caldera.

En cuanto al estudio y análisis magnetométrico, del mapa magnético total reducido al polo, de manera regional se determina un mínimo magnético de dirección NO-SE que atraviesa la zona de estudio y dentro del cual se observa dos máximos magnéticos alineados NE-SO, donde uno de ellos se ubica justo en la zona de complejo de calderas

y que estaría asociado a los eventos intrusivos someros y/o de resurgencia más recientes. Además, se describe un máximo magnético justo el E de la zona y con la misma tendencia NO-SE, que estaría asociado a cuerpos intrusivos del CVTM.

Además de los dos estudios mencionados anteriormente, realizó al menos 63 sondeos magnetotelúricos en un área de aproximadamente  $2200 \text{ km}^2$ , con el fin de interpretar a grandes profundidades la configuración de la Caldera de Acoculco. La interpretación de los resultados le permite concluir que la zona geotérmica se encuentra en un área alrededor del pozo exploratorio EAC-1 y una tendencia predominante NO-SE de los contornos ( $\text{ohm/m}$ ), en el mapa de resistividades aparentes, que estaría asociada a los lineamientos de regionales mencionados anteriormente.

- **Viggiano Guerra et al. (2011)** analizaron petrográficamente las unidades presentes en el pozo exploratorio EAC-2, con una profundidad máxima de 1900 m, y perforado en el año 2008 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en sector de la Caldera de Acoculco. La columna litológica que presentaron de manera sintetizada para dicho pozo, comprende las siguientes unidades: entre **2 y 340**, metros una secuencia de ignimbritas, dacitas y andesitas con alto grado de alteración hidrotermal; entre **340 y 450** metros, calizas lutítico-limolíticas metamorfizadas y alteradas; entre **450 y 1580** metros, hornfels de calcita, wollastonita, granate y diópsido intruidos por cuerpos cuarzo-monzoníticos y micrograníticos; entre **1580 y 1900** metros, granito de hornblenda intruyendo a las calizas, además de algunos xenolitos de calizas asimiladas. Además, reportaron los principales minerales y/o asociaciones minerales de alteración como: cuarzo, pirita, caolinita, clorita, smectita, calcita, anhidrita, cuarzo *bladed*, wairakita, epidota cristalina y granate. El estudio petrográfico y de mineralogía hidrotermal, permitió concluir a los autores la presencia de una alteración hidrotermal superficial de tipo ácido sulfatada, que al menos estaría presente hasta una profundidad de 200 metros; siendo esta la causante de la formación de una capa altamente impermeable constituida principalmente por arcillas caoliníticas. Finalmente, tanto el estudio petrográfico, la mineralogía hidrotermal y los análisis de presión y temperatura del pozo EAC-2 realizados por los autores, les permitió concluir con la idea de un posible yacimiento geotérmico con características conductivas y la presencia de un importante volumen de masa caliente  $\sim 300^\circ\text{C}$ , dando posibilidad a la explotación de un sistema geotérmico mejorado (EGS, por sus siglas en inglés).

- **García-Palomo et al. (2017)** realizaron un estudio sobre los eventos tectónicos-extensionales que han afectado la región de Apan-Acocolco, al este del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, y en la cual se presentan al menos dos áreas contrastantes con diferentes estilos estructurales y volcánicos. Su trabajo se basó en el análisis estadístico de ciertos elementos como: el alargamiento, deformación e inestabilidad de conos de escoria, diques, fracturas de extensión y la cinemática de fallas, con el fin de determinar la dirección de extensión que ha dado origen a la evolución de la región de Apan-Acocolco. Los resultados del estudio llevado a cabo por los autores, demuestran que la región ha sido afectada por un sistema extensional de dirección  $N50^{\circ}O \pm 7^{\circ}$ , un evento que ha permitido el desarrollo de diversas fallas de tipo normal con dirección NE-SO, por ejemplo, la Falla Apan-Tlaloc, Falla Chignahuapan, Falla Texcoco, Falla Axaxalpa, entre otras y que en conjunto han evolucionado dando lugar a una configuración tectónica dominada por horsts, grabens y semi grabens.
  
- **Sosa-Ceballos et al. (2018)** Llevaron a cabo el estudio de la evolución y origen entre los diferentes eventos magmáticos que se han desarrollado en el Complejo Caldera de Acocolco y la relación que estos tienen con el sistema geotérmico de Acocolco e incluso la profundidad de la fuente de calor. Los análisis de laboratorio tales como: petrografía, geoquímica de elementos traza y óxidos mayores, química mineral y análisis isotópicos les permitieron llegar a las siguientes conclusiones. Hace 2.7 Ma, el colapso de la caldera habría llevado consigo una modificación del campo de tensión local, facilitando el ascenso de magmas per-alcalinos (provocando una fusión de la corteza metamorfozada) a través de nuevos conductos producto de la descompresión y fallamiento local de sistema tras el colapso calderico. La anterior habría sido la causa que conllevo a una mezcla de los magmas per-alcalinos con magmas calco-alcalinos (que en su momento dominarían en los eventos pre-caldera) y que habrían dado lugar a los eventos volcánicos tempranos post-caldera, evidenciados en el emplazamiento de un complejo de domos en algunos sectores del anillo calderico. Los magmas per-alcalinos gradualmente habrían dominado en volumen a los magmas calco-alcalinos, siendo responsables de los eventos magmáticos tardíos post-colpaso, evidenciados en el emplazamiento de domos en el centro de la caldera. En adición a lo anterior, la deformación post-colpaso, promovería la formación de un enjambre de diques y sills sobre el reservorio colapsado. Dicho enjambre

sería alimentado por un reciente magmatismo, siendo así la fuente de calor que mantiene activo al sistema geotérmico de Acoculco. Finalmente, el conjunto de estudios del trabajo realizado por los autores, demuestran zonas de almacenamiento poco profundas, entre 200-500 bars, donde el magma cristaliza y/o se almacena y enfría.

- **Avellán et al. (2018)** Presentaron un nuevo mapa geológico a una escala 1:80,000 y que comprende el área de la Caldera de Acoculco. En el trabajo los autores dan a conocer una nueva y actualizada cartografía geológica de 31 unidades litoestratigráficas, las cuales, a su vez, son agrupadas dentro de cinco grandes eventos que hicieron parte de la configuración del Complejo Caldera de Acoculco: 1. Vulcanismo post-caldera temprano. 2. Vulcanismo post-caldera tardío. Un tercer evento previo al mencionado en el numeral 1, correspondería a los que los autores denominaron como “*Caldera-forming eruption*”. Un cuarto agrupamiento previo al anterior que corresponde al vulcanismo pre-caldera. Un quinto y último agrupamiento corresponde al vulcanismo extra-caldera, siendo los cuatro primeros los que se habrían dado durante un periodo de 2.7 a 0.06 Ma. Los autores presentaron, además, 9 fechamientos nuevos con la técnica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .

- ❖ Cono de lava andesita-basáltica Tulimán (Tlc):  $63 \pm 9$  ka.
- ❖ Lava andesítica Colorada (Coal):  $2,027 \pm 40$  ka.
- ❖ Lava traquiandesita-basáltica Águila (Atal):  $2,441 \pm 234$  ka.
- ❖ Ignimbrita andesítica de Acoculco (Aai):  $2,7331 \pm 185$  ka.
- ❖ Cono de escoria de andesita-basáltica Moxhuite (Msc):  $239 \pm 34$  ka.
- ❖ Lava traquiandesita-basáltica Tetelas (Ttal):  $1,060 \pm 84$  ka.
- ❖ Cono de escoria de andesita-basáltica Blanco (Bsc):  $1,274 \pm 62$  ka.
- ❖ Lava andesítica Camelia (Cal):  $2,033 \pm 84$  ka.
- ❖ Conos de escoria basáltica Amanalco (Asc):  $2,408 \pm 58$  ka.

- **Gómez-Álvarez (2019)** realizó un estudio sobre la evolución tectónica y magmática que ha afectado tanto a la Caldera de Acoculco, como a la caldera de Los Humeros, dos estructuras geológicas separadas por el Horst de Chignahuapan (Hch). En su trabajo se establecen dos eventos magmáticos importantes que están asociados a dos eventos tectónicos extensionales, los cuales, habrían facilitado la evolución de dichos eventos ígneos. El primer evento habría ocurrido en el Mioceno Medio, dando lugar a la evolución

de un sistema de fallas con dirección NO-SE, por ejemplo, la Falla Tlaxco, y el cual, a su vez permitió la generación, evolución y emplazamiento de magmas de afinada calcoalcalina en forma de cuerpos sub-volcánicos y eventos volcánicos caracterizados por diversos derrames lávicos de composición andesítica-dacítica. El segundo evento tectónico habría de llevarse a cabo en la transición de los periodos Mioceno Medio-Plioceno y como consecuencia de este se habrían de generar uno de los sistemas de fallas más importantes del sector, con una dirección NE-SO, por ejemplo, la Falla Chignahuapan, siendo este evento el que causaría la generación de una fase magmática alcalina bien representada en el área de estudio, por la presencia de diversos cuerpos volcánicos monogenéticos. Adicionalmente se menciona la presencia de un conjunto de estructuras con sentido NO-SE, por ejemplo, la Falla Acoculco, con una cinemática lateral derecha, asociado zonas de transferencia y que habrían acompañado a los eventos extensionales mencionados anteriormente. La importancia de su trabajo radica en el entendimiento del comportamiento de los diversos sistemas estructurales y la relación que estos tienen con eventos hidrotermales, un trabajo fundamental para el futuro estudio y análisis de la zona donde ocurre la intersección de estructuras y la circulación de fluidos hidrotermales.

➤ **Magaña-Ortega (2019)** Realizó la caracterización del fracturamiento del sistema geotérmico de Acoculco, Puebla, aplicando la denominada metrología fractal. Su estudio se llevó a cabo en rocas volcánicas de edad Mioceno-Oligoceno y en rocas sedimentarias, calizas de edad Jurásico-Cretácico, de la Sierra Madre Oriental. En general su estudio le permitió determinar 3 familias de fracturas con direcciones NE-SO, NO-SE y N-S. Los diferentes métodos empleados por el autor muestran resultados específicos, pero que en conjunto dan las tendencias mencionadas anteriormente.

- ❖ Mediante el análisis estadístico de frecuencia acumulada, la autora identificó una mayor densidad de fracturamiento y apertura o espesor para estructuras con dirección NE-SO. Para el caso de estructuras con orientación NO-SE y N-S, obtiene una menor densidad de fracturamiento y mayor espaciamiento entre fracturas.
- ❖ El análisis de dimensiones fractales 1D, mostró resultados favorables, pues metodologías como: dimensión de caja y porosidad de Delesse, le permitieron a

la autora identificar a la familia de fracturas con dirección NE-SO, como el conjunto de estructuras con mejores características de porosidad y permeabilidad.

- ❖ El análisis de puntos medios que realizó el autor y que además fue comparado con trabajos similares, pero realizados en diferentes zonas geotérmicas, son favorables para rocas volcánicas como: ignimbritas y andesitas, mismas que fueron estudiadas por Bermejo-Santoyo (2018), en los campos geotérmicos de Cuitzeo.
- ❖ Finalmente, la autora describe a la familia de fracturas con dirección NE-SO, como las estructuras más importantes para la circulación de fluidos, tanto por su porosidad y permeabilidad, y las cuales a su vez están relacionadas con el actual campo de esfuerzos.

**Signanini y De Santis (2012)** analizaron varios registros de estaciones sísmicas ubicadas en el centro de Italia, con el fin de establecer si la técnica de cocientes espectrales o H/V presenta alguna distribución estadística propia de una ley de potencia caracterizada por las propiedades de la corteza terrestre. Para cumplir con el objetivo de este trabajo, los autores utilizaron dos partes de cada uno de los registros analizados, el ruido de fondo y dos eventos sísmicos de magnitudes ( $M_w$ ) 2.4 y 2.8. En los dos casos obtienen una dimensión fractal “D” de aproximadamente 1.9, un valor que lo asocian al posible fracturamiento y filtración de fluidos en cada una de las rocas que configuran la corteza superior por debajo de cada una de las estaciones sísmicas. La conclusión principal dada por parte de los autores a este valor de dimensión fractal, es la invariancia de escala, es decir, el valor “D” se mantiene más o menos constante en el análisis tanto para eventos de muy baja magnitud como lo es el ruido sísmico, como para eventos de mayor magnitud asociados a sismos. Lo anterior, es interpretado como una firma general del medio de propagación de las ondas, sin importar la fuente que las genera. Este fenómeno podría estar asociado al fracturamiento acompañado de la presencia de fluidos en las rocas de la corteza, dando lugar a una “corteza crítica” la cual al ser excitada por algún fenómeno energético, aparentemente responde de manera similar a una pila de arena en sistema críticamente auto-organizados (Bak, 1996).

## 11. MARCO TEORICO

Al momento de analizar registros geofísicos en general, es de suma importancia tener en cuenta que dentro de estos se encuentran gran variedad de datos donde cada uno de ellos es respuesta de algún elemento en específico. Por ende, es necesario realizar los procedimientos adecuados para obtener los valores precisos y necesarios para cumplir de manera adecuada con la finalidad del estudio.

En el caso de la sismica que es objeto de estudio en este trabajo, los registros sísmicos se encuentran convolucionados, es decir, estos son señales en las cuales se encuentran gran variedad de respuestas combinadas. Así, por ejemplo, dicho registro tendrá señales características del evento sísmico local o regional, señales del medio a través de cual viajaron las ondas del evento principal, señales asociadas a eventos locales antrópicos (paso peatonal, circulación de vehículos, maquinaria, etc.) y la propia señal del instrumento con el que se realiza la medición. Por lo tanto, es necesario realizar una deconvolución del sismograma y obtener la señal adecuada para el análisis adecuado. Este procedimiento se lleva a cabo de manera relativamente sencilla con la ayuda del software de uso libre Código de Análisis Sísmicos (SAC, por sus siglas en inglés).

### 11.1 Análisis de Sismogramas y/o registros sísmicos.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se puede definir un sismograma como una función  $f(t)$  que involucra diferentes señales en función del tiempo, por lo tanto:

$$f(t) = \dot{x}(t) * \dot{r}_i(t) \quad (1)$$

De donde  $\dot{x}(t)$  representa la velocidad del suelo en  $m/s$ , correspondiente la primera derivada del desplazamiento. Esta respuesta del suelo puede incluir diversas señales como las ya mencionadas.  $\dot{r}_i(t)$  representa la respuesta del instrumento y está dada en *cuentas/m/s*, por lo tanto  $f(t)$  en unidades de cuentas. El símbolo matemático " $*$ " representa convolución. Con respecto a esta primera aproximación que representa de manera general un sismograma, queda claro que estos registros están en función del tiempo, por lo tanto, resulta imposible analizar todas y cada una de las frecuencias de las que se compone, es por esta razón que se recurre al procesamiento matemático conocido como transformada de Fourier (Eq 3) (Arfken y Weber, 2005; Figueroa Soto et al., 2010).

## 11.2 Transformada de Fourier

$$F(\tau) = \int_a^b K(\tau, t) f(t) dt. \quad (2)$$

La anterior, es la forma general para convertir o transformar una función, donde  $f(t)$  es la función o datos de entrada que representa el problema original (sismograma),  $\tau$  parámetro de la transformación (dominio al cual deseamos transformar  $f(t)$ ) y  $K(\tau, t)$  nucleo o kernel para llevar a cabo la transformada. Con esto tenemos que:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad \tau = \omega, \text{ y } K(\omega, t) = e^{-i\omega t}. \quad (3)$$

Con la ecuación anterior, podemos observar que la función original  $f(t)$  en función del tiempo al tratarla con el núcleo o kernel del Fourier obtenemos la misma función, pero en el dominio de las frecuencias  $F(\omega)$ , donde ya es posible visualizar las diferentes respuestas de las que se compone el registro.

Si observamos el kernel de la ecuación 3 y lo comparamos con la función de Euler, podemos observar que existe gran similitud, por consiguiente, esta ecuación se puede reescribir de la forma (la expresión (z) hace referencia al sistema de números complejos):

$$Z = |z|e^{i\theta} \sim 1 \cdot e^{-i\omega t} \text{ y } A = |z| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \theta = \omega t,$$

por lo tanto:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\theta} dt, \quad e^{-i\theta} = (\cos \theta - i \sin \theta),$$

resolviendo la integral tenemos:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) (\cos \theta - i \sin \theta) dt,$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \theta dt + \int_{-\infty}^{\infty} f(t) - i \sin \theta dt,$$

$$F(\omega) = F_r(\omega) + iF_i(\omega). \quad (4)$$

Con lo anterior podemos observar que la transformada de Fourier comprende una parte real y una imaginaria, dicho de otro modo, esta transformada es compleja. Además, a partir de la ecuación 4 es posible obtener:

$$F(\omega) = A(\omega) e^{i\theta}, \quad (5)$$

$$A(\omega) = \sqrt{F_r^2 + F_i^2}, \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{F_i}{F_r} \right), \quad (7)$$

$$A^2 = F_r^2 + F_i^2, \quad (8)$$

donde:

$A(\omega)$ : Amplitud o magnitud espectral. Contenido de amplitudes, frecuencias del que se compone el registro.  $\theta$ : Fase espectral.  $A^2$ : Espectro de potencial (que tan ruidosa es una determinada señal o registro).

Como se mencionó anteriormente, uno de los primeros pasos a seguir en el procesamiento de los registros, consiste en transformar la función original en función del tiempo, al espacio de las frecuencias. Por lo tanto, al aplicar la transformada de Fourier a  $f(t)$  obtenemos:

$$f(\omega) = \dot{X}(\omega) \cdot \dot{R}_i(\omega). \quad (9)$$

Se puede observar que el símbolo matemático " $\cdot$ " cambia por el símbolo " $\cdot$ " de multiplicación, es decir, ya es posible realizar filtros de diferentes señales. De acuerdo a las propiedades de la transformada de Fourier es posible expresar la ecuación 5 de diferentes formas:

$$f(\omega) = (-i\omega) \cdot \dot{X}(\omega) \cdot R_i(\omega), \quad (10)$$

$$f(\omega) = (-i\omega) \cdot X(\omega) \cdot \dot{R}_i(\omega), \quad (11)$$

$$f(\omega) = (\omega)^2 \cdot X(\omega) \cdot R_i(\omega). \quad (12)$$

En cuanto a los sismógrafos utilizados en este trabajo, su respuesta instrumental está dada en (*cuentas/m/s*), por lo tanto, si la respuesta del suelo es en  $m$  o  $m/s$ , las ecuaciones 9 y 11 son concordantes con las unidades mencionadas con anterioridad.

$$cuentas = m/s \cdot cuentas/m/s \text{ de (9)}$$

$$cuentas = (1/s) \cdot (m) \cdot cuentas/m/s \text{ de (11)}$$

### **11.3 Deconvolución de señales sísmicas.**

Dentro del gran conjunto de señales del que se compone un sismograma, se encuentra el denominado ruido sísmico. Este hace referencia a una variedad de eventos que tienen características particulares, tanto en la frecuencia o periodo de sus ondas, como en la amplitud o magnitud de las mismas. Este tipo de señales está asociado principalmente al paso peatonal, vehicular, la misma acción de la vegetación de gran envergadura, maquinaria o instrumentos cerca la estación y que emitan algún tipo de frecuencia e incluso la actividad ganadera o agrícola. En el mejor de los casos visto desde el punto de la investigación, el ruido sísmico en el sector donde se llevó a cabo este estudio, podría estar asociado a fallas activas que atraviesan el área, como también a microtemores producto de hidrofracturamiento y/o emplazamiento magmático que estaría actuando en el yacimiento asociado a la caldera. Otra manera indirecta de ruido sísmico es el asociado a las ondas superficiales, Love (L) y Rayleigh (R), que pueden llegar al área de estudio suponiendo la ocurrencia de algún evento sísmico de carácter regional asociado a: zona de subducción, intraplaca, corticales (Cinturón Volcánico Transmexicano) y asociados a zonas profundas. En cada uno de los casos anteriores, de modo general, tenemos conocimiento de la ocurrencia de ondas de cuerpo o internas, compresivas (P) y de cizalla (S), y ondas superficiales (“L” y “R”). Estas últimas pueden ser de gran importancia desde el siguiente punto de vista o argumento: si el sismo ocurre a gran distancia con respecto a la posición de las estaciones, queda claro que la magnitud o energía con la que cada una de estas ondas llega a dicho lugar, será mucho menor que a una distancia relativamente cerca del epicentro., por lo tanto, un evento sísmico regional a gran distancia podría favorecer el estudio de ruido sísmico, principalmente con la interpretación de las ondas Rayleigh, ya que los estudios de este tipo de ondas demuestran gran cantidad de reflexiones en la capa más superficial o suelo, y teniendo en cuenta que su magnitud o energía no es lo suficientemente grande para saturar la respuesta del instrumento, podrían favorecer las interpretaciones que se deseen llevar a cabo. Cabe aclarar que cualquiera de los eventos mencionados anteriormente da origen al mismo tipo de ondas, la diferencia radica en la magnitud que libera cada evento, para lo cual se asocian diferentes tipos de energía a cada onda en un evento en particular.

Cualquiera que sea la señal de ruido sísmico que se desee interpretar, se necesita realizar una deconvolución del registro para poder obtener dicha señal que posteriormente será procesada

y analizada con diferentes herramientas y para diferentes propósitos. Para realizar este proceso de deconvolución se requieren de los siguientes datos:

- La respuesta instrumental de los sismógrafos Trillium Compact 120 S que hacen parte de la red sísmica de este estudio, está dada en unidades de velocidad y está expresada en forma de polos y ceros (tabla 4) que indican las respuestas del instrumento ante el movimiento del terreno. Con estos valores que además son específicos para este instrumento, se elabora un archivo que incluya una constante total de sensibilidad. Para llevar a cabo este procedimiento se usó el software de acceso libre Código Análisis Sísmicos (SAC, por sus siglas en inglés).

**Tabla 4.** Parámetros obtenidos del manual del sensor Trillium Compact 120 S. Tomado de Trillium Compact User Guide.

| Símbolo   | Parámetro                   | Valores Nominales                                                                                              | Unidades    |
|-----------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| $Z_n$     | Ceros                       | 0<br>0<br>-392<br>-1960<br>$-1490 \pm 1740i$                                                                   | $rad/s$     |
| $P_n$     | Polos                       | $-0.03691 \pm 0.03712i$<br>-343<br>$-370 \pm 467i$<br>$-836 \pm 1522i$<br>$-4900 \pm 4700i$<br>-6900<br>-15000 | $rad/s$     |
| <b>K</b>  | Factor de Normalización     | $8.184 \cdot 10^{11}$                                                                                          | $(rad/s)^n$ |
| <b>fo</b> | Frecuencia de Normalización | 1                                                                                                              | Hz          |
| <b>S</b>  | Constante del Sensor a fo   | 750<br>* 75                                                                                                    | $V/(m/s)$   |

\* En conjunto con CUBE y Breakout Board

**Tabla 5.** Parámetros obtenidos del manual del digitalizador o Recorder / DATA CUBE3 TYPE II (EXT). <https://digos.eu/seismology-and-cubes/#1498960574577-c2db2790-60bc>

| Dispositivo<br>*CUBE3 | Ganancia | LSB    | Sensitividad        | Clip  |
|-----------------------|----------|--------|---------------------|-------|
|                       |          |        | [Cuentas/Volt]      | (PP)  |
|                       | 1        | 244nV  | $4.0984 \cdot 10^6$ | 4.1V  |
|                       | 2        | 122nV  | $8.1967 \cdot 10^6$ | 2.05V |
|                       | 4        | 61nV   | $1.6393 \cdot 10^7$ | 1.02V |
|                       | 8        | 30.5nV | $3.2787 \cdot 10^7$ | 0.51V |

|  |    |        |                     |       |
|--|----|--------|---------------------|-------|
|  | 16 | 15.3nV | $6.5574 \cdot 10^7$ | 0.26V |
|  | 32 | 7.6nV  | $1.3115 \cdot 10^8$ | 0.13V |

\* En conjunto con un equipo Trillium Compact, la sensibilidad necesita a 8c multiplicada por 1/10

La constante total de sensibilidad está determinada por la siguiente multiplicación (Figueroa Soto et al. 2010):

$$\text{CONSTANT} = A_0 * \text{Sensor Sensitivity} * \text{Digitizer sensitivity},$$

donde:

$$A_0 = K \text{ (Factor de normalización): } 8.184 \cdot 10^{11} \text{ (rad/s)}^n$$

$$\text{Sensor Sensitivity or Sensor Gain: } 75.43 \text{ V/(m/s)}$$

**Digitizer Sensitivity or Digitizer Gain:** En este caso se tienen 6 valores para las tres componentes, que dependen de la ganancia (amplificación de la señal) que se tuvo en cuenta durante la configuración del equipo para el registro de las señales. Para este estudio cada estación se configuro con una ganancia de 4 para la cual corresponde una sensibilidad, sensibilidad de  $1.6393 \cdot 10^7$  [cuentas/volt].

$$\text{CONSTANT} = 8.184 \cdot 10^{11} \text{ (rad/s)}^n * 75 \text{ V} \cdot \text{s/m} * 1.6393 \cdot 10^7 \text{ [cuentas/volt]}$$

Una vez calculada la anterior constante, se construye el archivo de polos y ceros con extensión “.pz” para poder usarse en el software SAC.

#### 11.4 Análisis de ruido sísmico.

Las ondas superficiales Rayleigh y Love, son una forma de energía transmitida por la incidencia de las ondas de cuerpo, principalmente ondas s, se propagan en todas la direcciones paralelas a la superficie de la tierra y de manera general su amplitud o energía decrece en profundidad (Aki, 1957 y Morikawa et al., 2004 en Flores-Estrella, 2004).

Cada una de las estaciones sísmicas que se instalan están sometidas a registrar diversos fenómenos que provocan alteraciones en los registros y que de alguna manera afectarían la calidad de los mismos, aunque desde hace algún tiempo, eso que causaba incertidumbre en la interpretación de sismogramas, se ha convertido en una herramienta útil para diversos estudios, como por ejemplo, el análisis de efecto de sitio o propiedades dinámicas locales de acuerdo a la geología de la zona en la cual donde se obtiene el registro (Vargas, 2006).

Existen varias fuentes que dan lugar a la generación de ruido de fondo o también llamado ruido sísmico, entre ellas las más importantes son las antropogénicas, es decir, aquellas asociadas a la actividad humana, agricultura, circulación peatonal, circulación vehicular, entre otras. El caso de las estaciones de este trabajo, este tipo de ruido podría estar asociado mayoritariamente a circulación de ganado, circulación peatonal y a la acción de la vegetación, debido a que cada estación se instaló en viviendas de la zona rural, lugares donde la agricultura y la ganadería podrían ser fuentes de este tipo de ruido. Otras de las fuentes que dan origen a ruido de fondo, son los asociados a acción eólica, por ejemplo, fuertes vientos pueden perturbar y generar movimientos sobre postes de luz o árboles que estén cerca de la estación, de tal manera que dichos movimientos quedarían registrados como una señal, ya sea, de alta o baja frecuencia, dependiendo del objeto en movimiento y la cercanía a la estación, al igual que eventos geológicos locales como una eventual erupción (Vargas, 2006). La acción del oleaje y las mareas se han denominado como microtemores, provocando movimientos continuos de la tierra; dando lugar a otro origen o naturaleza de ruido. Cualquiera que sea la fuente que da origen a este tipo de señales conocida como microtemores o microsismos (Bonnefoy-Claudet et al., 2006) (tablas 6 y 7), se consideran como fenómenos compuestos principalmente de ondas superficiales, ondas de cuerpo y difractadas que configuran un campo estacionario y homogéneo, lo que permite el uso de la propiedad de dispersión (p. eg., Tokimatsu, 1997; Chouet et al., 1998; Flores-Estrella, 2004). Las variaciones climáticas y barométricas son otra de las causas que pueden generar algún tipo de perturbación en las señales que registran los sismógrafos. Inclusive, la misma acción de un sismo podría generar algún tipo de ruido en la estación, dependiendo de la magnitud del mismo y la cercanía con respecto a la estación, puesto que el equipo no estaría en condiciones de registrar cierta señal con un determinado tipo de energía, por lo tanto, habría una saturación de señales y se interpretaría como una estación ruidosa, aclarando que esto podría suceder siempre y cuando la fuente esté lo suficientemente cerca del equipo.

|              | Natural            | Humano                                |
|--------------|--------------------|---------------------------------------|
| Denominación | Microsismo         | Microtemor                            |
| Frecuencia   | 0.1-0.5 hasta 1 Hz | 0.5 hasta 1-10 Hz                     |
| Origen       | Océano             | Tránsito, industria, actividad humana |

**Tabla 6.** Frecuencia de ruido ambiental de acuerdo a su fuente.  
Tomado de Bard et al. (2004)

|                                                              | Gutenberg (1958) | Asten (1978) Asten y Henstridge (1984) |
|--------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| <b>Olas oceánicas golpeando la costa</b>                     | 0.05 - 0.1 Hz    | 0.5 - 1.2 Hz                           |
| <b>Mozones y perturbaciones meteorológicas a gran escala</b> | 0.1 - 0.25 Hz    | 0.16 - 0.5 Hz                          |
| <b>Ciclones sobre los océanos</b>                            | 0.3 - 1 Hz       | 0.5 - 3 Hz                             |
| <b>Condiciones meteorológicas a escala local</b>             | 1.4 - 5 Hz       |                                        |
| <b>Tremor volcánico</b>                                      | 2 - 10 Hz        |                                        |
| <b>Urbano</b>                                                | 1 - 100 Hz       | 1.4 - 30 Hz                            |

**Tabla 7.** Fuentes de ruido ambiental y sus posibles frecuencias. Tomado y modificado de Bonnefoy-Claudet et al. (2006) en Sánchez-López (2017)

Las anteriores son razones fundamentales para poder realizar una buena instalación de los sensores y obtener registros de buena calidad. Por lo tanto, es recomendable que la instalación se lleve a cabo al menos a un metro de profundidad, para disminuir cualquiera de los efectos mencionados, ya que podrían generar ruido de fondo y/o saturación de las señales.

Uno de los métodos más usados para realizar este tipo de interpretaciones, es la denominada Función de Densidad Espectral de Potencias o PSD (por sus siglas en inglés) con la cual se evalúa de manera objetiva las diversas variaciones del ruido del lugar donde se encuentra la estación. La PSD es una herramienta de análisis que permite observar los periodos o frecuencias dentro de las cuales una señal tiene variaciones significativas, es decir, cambios significativos de energía en función de la frecuencia. Este análisis se lleva a cabo mediante la transformada de Fourier ( $F(\omega)$ ) y tratando al ruido como un proceso estocástico, es decir, impredecible y/o aleatorio y con una alta probabilidad de ocurrir. A pesar de que este fenómeno es aleatorio, cada sitio o lugar donde se encuentra cada una de las estaciones sísmicas tiene un propio ruido ambiental que lo caracteriza.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

Debido a la anterior consideración del ruido como un fenómeno estocástico o aleatorio, la función  $F(\omega)$  que expresa la transformada de Fourier no converge. Por lo tanto, es necesario recurrir a la PSD expresada como:

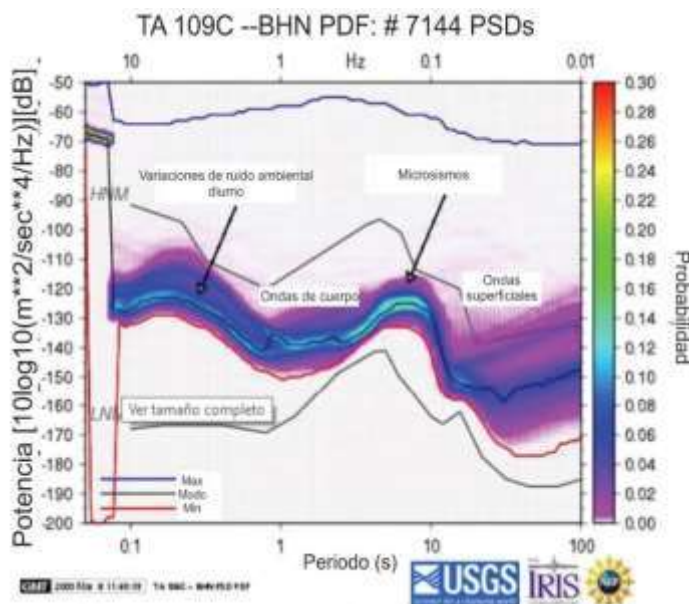
$$PSD(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F(\omega)|^2}{T} \quad (13)$$

Recordando que:

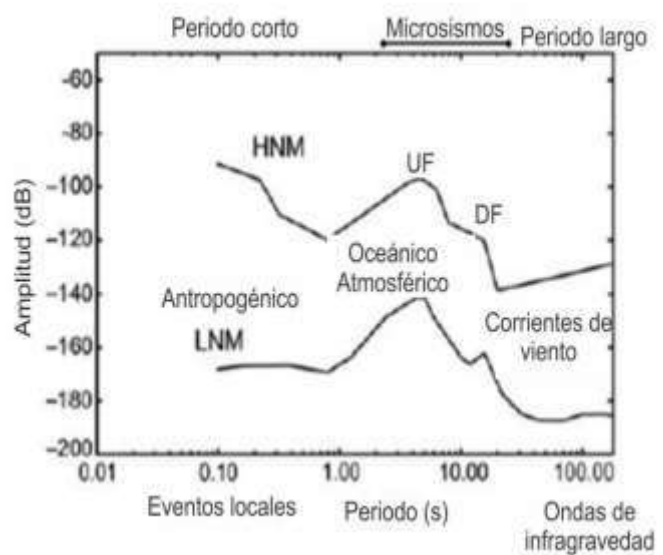
$A^2$  o  $F(\omega)^2$ : Espectro de potencial (que tan ruidosa es una determinada señal o registro).

T representa el periodo y las unidades de PSD están dadas en decibeles de aceleración con respecto a  $1\text{m/s}^2$  ( $[PSD] = \text{dB relativo a } (m/s^2)^2/\text{Hz}$ ).

Peterson (1993) con base en registros sísmicos recolectados en diversos lugares del mundo, construyó curvas de límite superior e inferior de ruido para la función PSD (figs. 10 y 11) y que son utilizadas para la comparación de los niveles de ruido de una determinada estación sismológica.



**Figura 6.** Curvas de PSD según el modelo de Peterson. Modificado del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

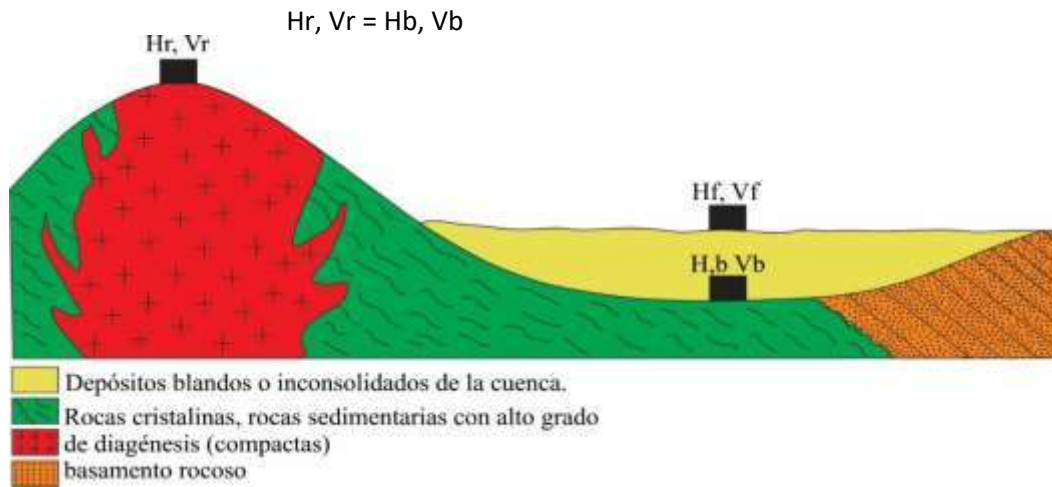


**Figura 5.** Curvas PSD según el modelo de Peterson en las que se señala los eventos naturales y su posible rango de frecuencias. UF (una frecuencia) DF (doble frecuencia) son picos de microsismos dominantes. Tomado y modificado de De Caro et al. (2014).

La caracterización de los niveles de Peterson es muy importante, debido a que este complementa el estudio que se vaya a llevar a cabo, ya que en general, para cada uno de los sismogramas de cada estación se determina el ruido de fondo, es decir, hacer una consideración de los niveles de ruido a los que está sometida una determinada estación. De esto dependerá la calidad de los datos, como también de la técnica de instalación y fenómenos antropogénicos en los alrededores.

### 11.5 Cocientes espectrales H/V.

Los primeros autores que trabajan y proponen la idea de un cociente entre las componentes horizontal (H) y la componente vertical (V) de un registro sísmico son Nogoshi e Igarashi (1971), demostrando que dicha relación o cociente espectral presenta alguna relación con las curvas de elasticidad de las ondas Rayleigh. De acuerdo a la suposición de los autores, el cociente espectral tiene como fundamento teórico el estudio e interpretación de ondas superficiales de un registro sísmico del cual se ha interpretado y seleccionado ventanas asociadas a ruido de fondo, ruido sísmico o también conocido como ruido ambiental o antropogénico. Nakamura (1989), realiza estudios de la técnica H/V para microtemores generados en estaciones cercanas a vías férreas de Japón, con el fin de analizar y afirmar el cociente espectral como una relación confiable para la función de transferencia de ondas S u ondas cortantes, asignando un nuevo nombre al método de Función de Cuasi-Transferencia (QTS por sus siglas en inglés). Aunque la interpretación realizada por Nakamura (1989), generó gran controversia entre la comunidad científica dedicada al estudio del tema, tuvo gran acogida ya que el método suponía facilidad y economía para llevar a cabo estudios e interpretaciones como las implementadas por Bard (1999). Tiempo después se dar a conocer una técnica aparentemente sencilla y económica para la interpretación de la relación de amplificación de señales de ondas. Nakamura (2000), aclara su teoría de Cuasi-Transferencia afirmando que un registro sísmico se compone de ondas de cuerpo (ondas S para este tipo de estudios e interpretaciones) y ondas superficiales tipo Rayleigh; por lo cual sugiere dividir los registros o señales de microtemores en ventanas en las que se identifiquen la presencia de este tipo de ondas. Este supuesto lo hace sobre un área de estudio que represente una cuenca sedimentaria típica (fig. 12).



**Figura 7.** Representación idealizada de una cuenca sedimentaria típica, donde el basamento de la misma podría corresponder a una roca cristalina ígnea, metamórfica y/o roca sedimentaria con un grado considerable de diagénesis, sobre las cuales en la zona de valle o llanura se han depositado sedimentos (detritos) poco o nada consolidados. Los cuadros en negro representan estaciones sismológicas, H y V son las componentes en las que se polariza cada una de las ondas a través del medio. (Hr, Vr) afloramiento rocoso, (Hb, Vb) basamento rocoso y (Hf, Vf) en la superficie de la cuenca. Modificado de Nakamura (2000).

Respecto a lo mencionado anteriormente, la técnica H/V, tiene como supuesto teórico que los microtemores naturales o antropogénicos están compuestos principalmente de ondas superficiales tipo Rayleigh, que se propagan sobre estratos o capas superficiales que se reposan sobre un semi-espacio o basamento rocoso (Lermo y Chavez-García, 1993).

Finn (1991), plantea que la propagación de las ondas superficiales producto de los microtemores, presentan gran variabilidad en sus propiedades de onda, por ejemplo, la amplificación, al interactuar con los espacios (estratos o capas) “blandos” o poco consolidados. El fundamento teórico-matemático se toma como un resumen de Nakamura. (1989) en Sánchez-López (2017), en el cual se plantea el cálculo del efecto de la amplitud del sitio mediante la razón:

$$A_s = V_s/V_B, \quad (14)$$

donde:

$A_s$ : amplitud de superficie,  $V_s$ : espectro de amplitud de la componente vertical en la superficie y

$V_B$ : espectro de amplitud de la componente vertical en el semi-espacio (basamento)

Posteriormente se define el efecto de sitio para el espectro de las componentes horizontales.

$$S_E = H_S/H_B, \quad (15)$$

donde:

$S_E$ : estimación del efecto de sitio.

$H_S$ : espectro de amplitud de la componente horizontal en superficie.

$H_B$ : espectro de amplitud de la componente horizontal en el basamento (roca compacta).

El siguiente paso será compensar  $S_E$  por el efecto de la fuente, de tal modo que se calcula una función de efecto de sitio modificada:

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} \quad (16) \quad \text{equivalente a} \quad S_M = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} = \frac{H_S \cdot V_B}{H_B \cdot V_S} \quad (17)$$

Una suposición respecto al efecto de sitio en el modelo idealizado de cuenca sedimentaria, hace referencia a la relación  $H_B/V_B$  es igual a la unidad para el análisis de ruido sísmico, un supuesto confirmado por Nakamura. (1989) quien realizó pruebas experimentales con microtemores en un pozo profundo. Lermo. (1992) aplica esta técnica para mediciones de 4 ciudades en México, obteniendo resultados coherentes con mediciones previas realizadas a partir de análisis de cociente espectral estándar.

Teniendo en cuenta la aproximación de  $H_B/V_B \sim 1$  la ecuación 17 se traduce en:

$$S_M = \frac{H_S}{V_S}. \quad (18)$$

La anterior ecuación se ha considerado como una buena aproximación de la función de transferencia, que permite determinar la frecuencia fundamental y la máxima amplificación del suelo o sitio del lugar donde se hace la medición.

Respecto a las anteriores consideraciones y fundamentos teóricos se puede establecer los siguientes puntos fundamentales para el estudio y análisis de la técnica H/V (Sánchez-López. 2017).

- Registro y análisis de ruido sísmico o de fondo en las tres componentes de la señal.

- Cálculo y suavizado de la amplitud del espectro de Fourier para cada ventana según el método de Konno and Ohmachi (1998).
- Estimación del promedio de las dos componentes horizontales, N-S y E-O.
- Cálculo del cociente espectral H/V para cada ventana
- Cálculo del promedio del cociente espectral H/V respecto a todas las ventanas seleccionadas.

Con lo anterior, se puede establecer la relación entre la suma de las componentes horizontales entre la vertical como:

$$H(f) = \sqrt{\frac{E(f)^2 + N(f)^2}{2}} \quad (19)$$

$H(f)$ : media cuadrática de las componentes horizontales.

$$H/V = \frac{H(f)}{V(f)} \quad (20)$$

$E(f)$ ,  $N(f)$  y  $V(f)$  representan las tres componentes del registro llevadas al espacio de las frecuencias mediante la transformada de Fourier (ecuación 3). De esta manera podemos calcular la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) del sitio evaluado y la respectiva amplificación o función de transferencia.

## 11.6 Elipticidad de ondas Rayleigh.

Maranò et al. (2017), en su trabajo presentaron una síntesis sobre el análisis de las ondas superficiales Rayleigh y Love. Para este trabajo se toma como referencia la introducción del modelo matemático que los autores presentan, el cual, resume de manera clara y concisa los fundamentos de este tipo de ondas; como sigue a continuación.

### 11.6.1 Ondas sísmicas superficiales.

Cada sensor empleado para la medición de ondas sísmicas, está diseñado para registrar el arribo de todo tipo de ondas y la velocidad de fondo (suelo), a lo largo de un sistema de coordenadas tridimensionales  $x$ ,  $y$  y  $z$ . Por motivos de simplicidad, los autores proporcionan una ecuación de onda para el desplazamiento de campo  $\mathbf{u}$ , a pesar de que la medida real es la velocidad de campo  $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ . El desplazamiento de campo en la posición  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$  y el tiempo  $t$  puede ser descrito por el vector de campo

$$\mathbf{u}(\mathbf{p}, t) \triangleq (u_x(\mathbf{p}, t), u_y(\mathbf{p}, t), u_z(\mathbf{p}, t)) : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^3.$$

La forma y el modo propagación cerca de la superficie terrestre, es uno de los fundamentos básicos a tener en cuenta en este tipo de ondas, que precisamente por tener un comportamiento distintivo en las partes más someras de la corteza terrestre, se les ha denominado como ondas superficiales. Además, considerando que un campo de ondas está compuesto por una superposición de gran cantidad tanto de ondas Rayleigh, como de ondas Love. La dirección de propagación de una onda está dada por el vector  $\mathbf{k} \triangleq k (\cos \psi, \sin \psi, 0)^T$ , cuya magnitud  $k$  es el número de onda. La velocidad de fase  $v$  en frecuencia  $f$  se relaciona con al número de onda como  $v = 2\pi f / k$ .

Las ondas Rayleigh son ondas sísmicas con un movimiento de partículas elíptico, confinado en el plano vertical perpendicular a la superficie de la tierra y que contiene la dirección de propagación de la onda. Estas pueden verse como una superposición de ondas de presión y ondas de corte verticalmente polarizadas. Usualmente, la elipse del movimiento de una partícula, depende de las propiedades del subsuelo y varía con la frecuencia. El término elipticidad se refiere al radio de la amplitud del movimiento horizontal y la amplitud del movimiento vertical. El movimiento de la partícula puede ser retrogrado o progrado, dependiendo de la diferencia de fase entre las componentes vertical y horizontales. El desplazamiento de partículas generado por una única onda Rayleigh es

$$u_x(\mathbf{p}, t) = \alpha \sin \xi \cos \psi \cos(\omega t - \mathbf{k}^T \mathbf{p} + \varphi)$$

$$u_y(\mathbf{p}, t) = \alpha \sin \xi \sin \psi \cos(\omega t - \mathbf{k}^T \mathbf{p} + \varphi)$$

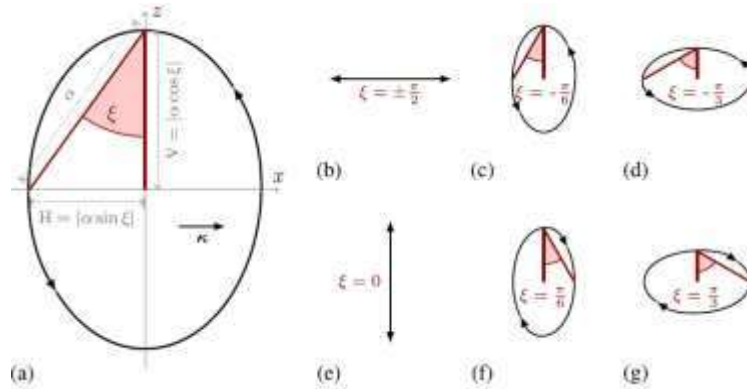
$$u_z(\mathbf{p}, t) = \alpha \cos \xi \cos(\omega t - \mathbf{k}^T \mathbf{p} + \pi/2 + \varphi).$$

Una onda Rayleigh esta parametrizada con un vector parámetro

$$\theta = (\alpha, \varphi, k, \psi, \xi)$$

El ángulo  $\xi \in [-\pi / 2; + \pi / 2]$  se llama ángulo de elipticidad de la onda de Rayleigh y determina la excentricidad y el sentido de rotación del movimiento de la partícula. La figura 13a, representa el movimiento de partículas de una onda Rayleigh y cómo se define el ángulo de elipticidad. El movimiento de las partículas de onda de Rayleigh se representa con una elipse negra y el sentido de rotación con las flechas negras en la elipse. El eje  $z$  es vertical a la superficie. El eje  $x$  se encuentra en la superficie y es paralelo al vector de

onda  $\kappa$ . El ángulo de elipticidad ( $\xi$ ) tiene el vértice en la intersección más alta entre el eje  $z$  y la elipse de movimiento de partículas. El primer lado del ángulo de elipticidad es el eje  $z$ . El segundo lado es la línea que conecta el vértice con la intersección de los ejes  $x$  y  $y$  la elipse de movimiento de partículas (la intersección se elige de tal manera que el movimiento de partículas en la intersección tenga un cambio de  $+\pi/2$  radianes con respecto al vértice). En la figura 13a, las cantidades  $H$  y  $V$  están definidas. Representan la amplitud del movimiento horizontal y vertical, respectivamente. La cantidad  $H/V = |\tan \xi|$  Es conocida como la elipticidad de la onda de Rayleigh. La figura 13a también proporciona una interpretación gráfica de la amplitud  $\alpha$ . Cuando  $\xi \in (-\pi/2, 0)$ , se dice que el movimiento de la partícula de la onda Rayleigh es retrógrado, es decir, la oscilación en la componente vertical ( $u_z$ ) se desplaza en  $+\pi/2$  radianes con respecto a la oscilación en la dirección de propagación. En la fig. 13 (c) y (d) se muestran dos posibles movimientos de partículas retrógrados y los correspondientes ángulos de elipticidad. Cuando  $\xi \in (0, \pi/2)$  se dice que el movimiento de la partícula es progrado, cf. Figura 13, f y g. Para  $\xi = \pm \pi/2$  (cf. Fig. 13b) y  $\xi = 0$  (cf. Fig. 13e) la polarización del movimiento de partículas es horizontal y vertical, respectivamente.

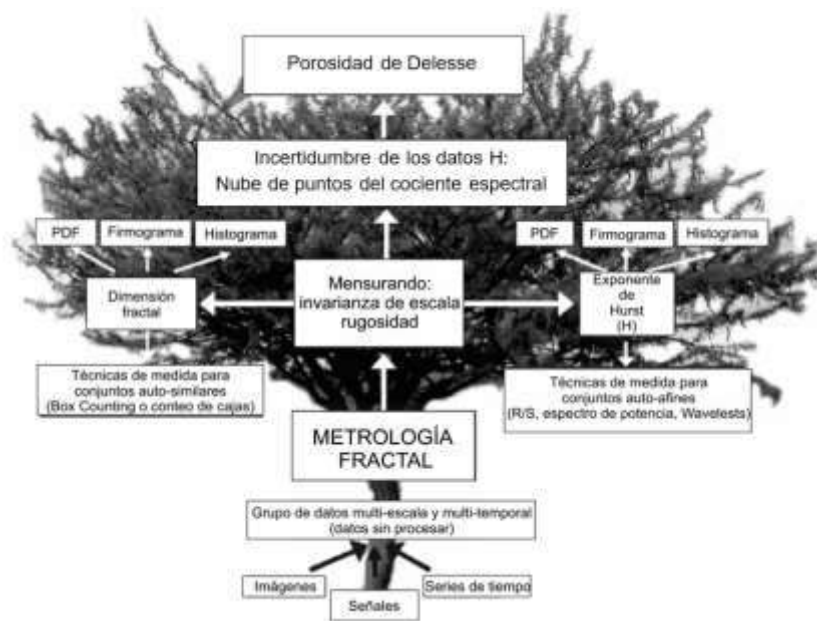


**Figura 8.** Representación del movimiento de las partículas de onda Rayleigh para varios valores del ángulo de elipticidad. a. El movimiento elíptico de partículas para una onda Rayleigh retrógrada. Se muestran las cantidades  $\xi, \alpha, H$  y  $V$ . b. La onda de Rayleigh está polarizada horizontalmente para  $\xi = \pm \pi/2$ . c. Movimiento retrógrado de partículas para  $\xi = -\pi/6$ . d. Movimiento de partículas retrógrado para  $\xi = -\pi/3$ . e. La onda de Rayleigh está polarizada verticalmente para  $\xi = 0$ . f. Movimiento progrado de partículas para  $\xi = \pi/6$ . g. Movimiento progrado de partículas para  $\xi = \pi/3$ . Tomado de Maranò et al., (2017).

### **11.7 Metrología fractal (MF)**

Torres-Argüelles et al. (2010) llevaron a cabo el análisis de las variaciones de la porosidad en tres diferentes tipos de suelo, los cuales pueden verse sometidos a diferentes procesos físicos, químicos e incluso biológicos que podrían afectar las propiedades estructurales del medio, que, para el caso del trabajo de los autores, dichas propiedades son la relación sólido-poro de los suelos analizados y que tienen en común su composición mineralógica de arcillas tipo montmorillonita. Este análisis lo desarrollan aplicando varias metodologías para el estudio fractal, entre ellas, metodología de Wavelet y rango re-escalado (R/S) e interpretación de conjuntos autosimilares o tratamiento de imágenes con el método de “Box-Counting”, con la ayuda del software Benoit 1.3 (TruSoft, 1999), además de las técnicas de desarrollo propio. Con la anterior los autores proponen en su trabajo lo que denominan como Metrología Fractal (MF), mostrando la utilidad de esta técnica para el análisis de sistemas complejos, tratándose básicamente de la integración de las diferentes herramientas de estudio fractal, para de esa manera obtener resultados sólidos y soportados por la implementación de diferentes análisis. Lo anterior es resumido y graficado por los autores por la figura 14, donde muestra cómo se construye con diferentes técnicas la MF, para llegar a un resultado sólido de los datos analizados, para cualquier medio analizado.

Con el trabajo llevado a cabo por los autores, se resume de forma clara y sencilla el desarrollo del esquema, con el cual, para el caso particular de esta investigación sobre la criticalidad de la corteza superior, se llegó al cálculo de los valores de porosidad de Delesse. Este tema se abordará en la sección de resultados.



**Figura 9.** Construcción jerárquica de metrología fractal MF. En la imagen se puede observar como todo análisis parte de los datos originales, relacionados a series auto-afines, es decir, series de tiempo y conjuntos auto-similares o simplemente imágenes 2D. En general, para los dos tipos de datos, auto-afines y/o auto-similares, el objetivo en común será llegar a un valor de  $H$ , con el cual se procede a los análisis e interpretaciones de cada investigador. Modificado de Torres-Argüelles et al. (2010).

## 11.8 Fractales, leyes de potencia y sistemas críticamente auto-organizados.

Para poder comprender los resultados del exponente de frecuencia acumulada obtenidos para 17 estaciones de la red sísmica de Acapulco y la relación de estos con los procesos geológicos y naturales que podrían estar ocurriendo en la zona de estudio, es necesario comprender el termino fractal, criticalidad y/o criticalidad auto-organizada (SOC, por sus siglas en inglés).

Mandelbrot (1967), se planteó la idea de saber cuan largo podría ser el perímetro de la isla de Gran Bretaña (fig. 15) idea con la que surgen grandes preguntas por resolver y el punto de partida para estudiar objetos en la naturaleza que aparentemente sus formas físicas parecieran caóticas o aleatorias y no con una distribución regular u organizada. Mandelbrot (1967), realizó varias mediciones del perímetro de la isla de Gran Bretaña, iniciando con escalas de medida (reglas) grandes, luego con una escala de medida intermedia, hasta llegar a medir con reglas demasiado pequeñas, con las cuales obtenía un valor total del perímetro mayor comparado con el de las escalas de medida grande (fig. 15). Lo anterior debido a la resolución que obtuvo con escalas pequeñas, las cuales permitían medir con mayor precisión sectores muy quebrados o irregulares de la isla. Con este análisis de curvas auto-similares

(análisis estadísticos de imágenes) Mandelbrot (1967), obtuvo valores de dimensión de Hausdorff entre 1 y 2, con un valor de 1.25 para la isla de Gran Bretaña, pues hasta ese entonces el autor no acuñaba el término fractal (Mandelbrot, 1975). En este planteamiento se presentan dos ideas fundamentales en los sistemas fractales. La primera de ellas tiene que ver con la invarianza de escala, es decir, aunque la medición de la isla se realizó con diferentes escalas o reglas de medida y el valor del perímetro total incrementaba a medida que se aumentó la resolución de la regla, el valor de dimensión de Hausdorff, más adelante visto como dimensión fractal, no varía significativamente, manteniéndose entre 1 y 2, siendo esta una de las características más importantes de los objetos fractales, la invarianza de escala. La segunda de ellas como se mencionó anteriormente, en la naturaleza existen objetos aparentemente desorganizados, aleatorios e incluso caóticos, sin un orden que los gobierne, pero en realidad las fuerzas que les dan origen y gobiernan, aparentemente son las adecuadas para que cierto objeto encuentre su punto de equilibrio en la naturaleza. Lo anterior se lo puede observar en muchos casos de eventos sísmicos. Por ejemplo, si en un algún lugar del planeta ocurre un evento sísmico de gran magnitud, seguido de este ocurren réplicas, las cuales a medida que se da una liberación de energía por la tensión acumulada en las rocas, ocurrirán cierta cantidad de eventos de magnitud intermedia y una gran cantidad de eventos de magnitud pequeña o imperceptible, hasta que llega un momento en el cual cesarán los eventos y el sistema retoma su equilibrio. Esto pareciera estar asociado a eventos naturales caóticos que ocurren en cualquier momento y no tienen un orden, pero en realidad son fenómenos naturales organizados, de tal manera que siempre tratan de mantener cualquier sistema en equilibrio. El anterior ejemplo también ha sido mencionado por Signanini y De Santis, (2012) y Amitrano (2012), por mencionar algunos, como eventos que siguen una ley de potencia según lo planteado y demostrado por Gutenberg y Richter (1956) o por Bak et al. (2002), en donde mencionan que muy probablemente estos fenómenos están asociados o relacionados con elementos fractales, pues no todos los elementos que siguen una ley de potencia tienen un comportamiento fractal, pero si todo fractal sigue una ley de potencia.

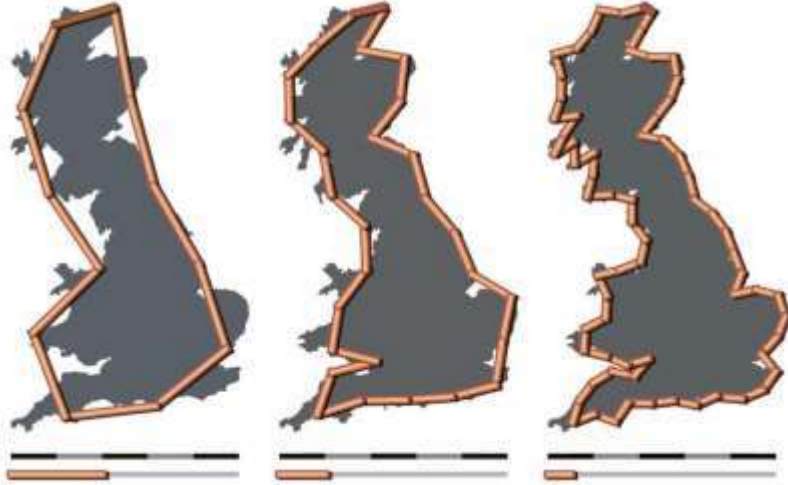
Siguiendo con la secuencia de ideas y ejemplos mencionados en párrafos anteriores, Bak (1996), introdujo la idea de los sistemas que se encuentran críticamente auto-organizados, lo cual, se lo puede simplificar con el ejemplo que el mismo planteó. Una persona intenta construir una pila de arena (fig. 16), cada vez agrega más y más granos hasta darle forma a una pequeña montaña de granos que poco a poco darán origen a dicha pila. Llegará un

momento en cual la montaña de granos de arena crecerá con menor velocidad, pues el sistema empieza a saturarse hasta llegar al máximo que su naturaleza le permite, es decir, el objeto o sistema llega al punto donde se encuentra críticamente auto-organizado. El calificativo crítico está dado por la siguiente razón: al estar el sistema o la pila de arena en un punto tal que ha alcanzado su estabilidad y/o su máximo permitido de granos de arena, llegará un momento en el cual agregarle un solo grano más, hará que esta colapse, pero dicho colapso será de forma organizada, pues primero se originan deslizamientos grandes, pero con poca frecuencia, seguidos de deslizamientos de tamaño intermedio hasta deslizamientos pequeños y de mucha frecuencia. Así la pila de arena decrecerá hasta cierto punto, a partir de cual esta volverá a crecer para llegar nuevamente a su punto críticamente-autorganizado.

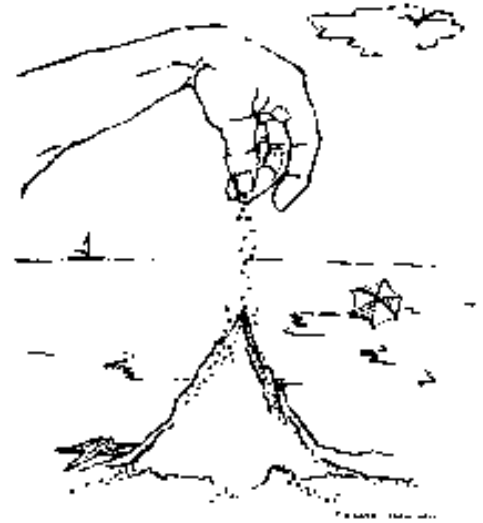
Retomando el ejemplo de los sismos, podríamos compararlos con la pila de arena, donde los granos son los esfuerzos que se acumulan en determinada zona de la corteza oceánica y/o continental y que dan lugar a la compresión o dilatación de estas. Habrá un momento en el cual se dé un último incremento de los esfuerzos que generan tensión en cierta región de la corteza, provocando que el sistema colapse y genere eventos similares a los deslizamientos de la pila de arena, es decir, el sismo de gran magnitud seguidos de los de magnitud intermedia y finalmente las réplicas de baja magnitud y alta frecuencia u ocurrencia (p. eg. Monterrubio-Velasco et al., 2017).

Las ondas sísmicas y para el caso de este trabajo, las ondas superficiales tipo Rayleigh producto del ruido ambiental, viajan a través del medio con la particularidad de recolectar y guardar la información de cada uno de los medios sean suelo o roca que atraviesan. Es así que, dichas ondas al atravesar o viajar por los diferentes tipos de rocas que configuran la geología de la caldera de Acapulco y las cuales presentan diferentes propiedades mecánicas y más importante aún, diferentes grados de fracturamiento producto de los diferentes eventos tectónicos que se han desarrollado en la región, guardan esa información física del medio, la cual, se puede tratar y/o procesar a partir de diferentes métodos físicos, geofísicos y estadísticos para interpretarla y entender el comportamiento de subsuelo en esta porción de la corteza superior. Autores como Crampin (2006), expuso la importancia de analizar cuidadosamente los registros de sísmica activa enfocada a la prospección de hidrocarburos, pues las ondas viajan a través de un medio poroso y con fluidos que generan cambios notables en la frecuencia y el modo de viajar de las ondas, una información valiosa que según el autor,

si se logra extraer y procesar, los rendimientos de las compañías petroleras aumentaría considerablemente.



**Figura 11.** Diferentes escalas de medida (reglas) para medir el perímetro de la isla de Gran Bretaña. Tomado de Mandelbrot (1967).



**Figura 10.** Esquemización de la pila de arena. Tomado de Bak (1996).

### 11.9 Análisis fractal de cocientes espectrales.

En este trabajo se toma como referencia tanto el análisis y el procedimiento matemático y estadístico realizado por Signanini y De Santis (2012), en el cual, se lleva a cabo la siguiente metodología.

- Al ser el principal fundamento teórico-matemático la fractalidad de los cocientes espectrales, el primero paso a realizar será aplicar la transformada de Fourier a cada componente de cada uno de los registros sísmicos analizados en cada una de las dieciséis estaciones de Acoculco, para luego realizar los cálculos correspondiente la media aritmética de las componentes horizontales y finalmente realizar la relación de dicha media aritmética entre la componente vertical y de este modo obtener la relación  $H/V$  para cada registro sísmico.
- Se estima la distribución estadística de la relación  $H/V$ , dejando  $N = (H/V)$  como numero de ocurrencias de una relación dada  $H/V$  dentro de  $M$  muestras. Lo anterior corresponde al análisis estadístico de frecuencias acumuladas, para el cual, se mencionará más adelante cada uno de los parámetros empleados para obtener el valor

del exponente de cada frecuencia acumulada para cada una de las dieciocho estaciones que hacen parte de la red sísmica.

- El objetivo de los autores con el procedimiento estadístico mencionado anteriormente, es analizar las colas pesadas “heavy tails” de la distribución, por lo tanto y para realizar una buena interpretación de los resultados, el análisis excluye los valores menores o iguales a 1 y mayores que 100, enfocándose así, en un análisis sobre dos órdenes de unidades. Con lo anterior se trata de obtener distribuciones de probabilidad estadística donde la gráfica de importancia corresponda a la indicativa de un comportamiento fractal de los datos y obviar el conjunto de datos que puedan interferir en el análisis principal.
- Otra consideración que toman en cuenta los autores para la realización de este análisis, es la construcción de la distribución estadística sin considerar datos de puntos después del primer valor cero. Lo anterior es una consideración que toma como premisa, que los valores de frecuencia muy bajos tanto en las componentes horizontales como en la vertical, pueden causar ruido al momento de obtener la relación H/V, dando lugar a la obtención de datos que pueden causar problemas en el cálculo del análisis estadístico. Lo anterior podría estar relacionado al espectro de resolución de los instrumentos con los que se realizan las medidas.
- Finalmente, dentro del análisis llevado a cabo por los autores, se toma en cuenta que para cada uno de sus análisis estadísticos, la pendiente de la recta de las distribuciones de ley de potencia obtenidas es denominada como “ $-\alpha$ ” (teniendo en cuenta que el signo negativo hace referencia a una pendiente negativa, lo cual es totalmente normal en una distribución de ley de potencia), y para el caso específico de los resultados obtenidos por los autores, el valor de dimensión fractal de cada una de sus distribuciones, lo asocian con la relación matemática  $-\beta = -\alpha + 1$ , donde la única excepción es cuando  $\alpha = 1$ . Finalmente considerando la distribución como fractal con una dimensión fractal  $D = \beta$ .

### **11.10 Caracterización unifractal (serie-autoafin) de los cocientes espectrales.**

El coeficiente o exponente de Hurst es una medida de independencia de las series de tiempo que fue estudiada inicialmente por el británico Harold Edwin Hurst, como elemento para distinguir series fractales. Hurst (1951), descubrió que muchos fenómenos de la naturaleza exhiben un comportamiento que puede ser caracterizado por un proceso aleatorio sesgado,

en el cual existe “memoria a largo plazo” entre las observaciones, es decir, que los eventos de un periodo influyen en todos los siguientes.

Calcular el exponente de Hurst se ha convertido en una herramienta útil para el análisis de un sistema a lo largo del tiempo. Hurst (1951), estudió también las fluctuaciones de las alturas del nivel del Río Nilo como herramienta para distinguir la existencia de series fractales y creo una metodología estadística para determinar si las tendencias de las series de tiempo tienen o no persistencia después de determinar la duración de los ciclos de las series de tiempo y establecer si dicha serie de tiempo tiene “memoria a largo plazo”. El cálculo del exponente de Hurst se realiza por medio del análisis de rango re-escalado o “R/S”, metodología estadísticas desarrollada en los estudios llevados a cabo por Hurst (1951; 1956)

Mandelbrot (1975) demostró que el valor del exponente de Hurst esta acotado entre 0 y 1 explicando que este fenómeno ocurre debido a un proceso de invarianza al cambio de escala, el cual, es la característica clave de las series de tiempo fractales, de tal forma que es posible calcular y estimar la dimensión fractal de una serie de tiempo mediante la ecuación  $D = 2 - H$ . Cabe aclarar que es una ecuación válida para el análisis de datos que ocurren a través del tiempo o también denominadas series autoafines.

Por otro lado de acuerdo a Mandelbrot (1975), se establecieron tres grupos dentro de los cuales varia el exponente de Hurst.

- Cuando  $H = 0.5$ : Implica un proceso totalmente aleatorio e independiente con la ausencia de correlación entre el incremento de la señal (ruido blanco).
- Cuando  $0 \leq H < 0.5$ : Corresponde con un comportamiento de anti-persistencia o anti-correlacional en series de tiempo. Un aumento en los eventos del pasado supone un descenso en los eventos del futuro y viceversa. Un sistema anti-persistente tiende a regresar constantemente a su lugar de origen y tiene la particularidad de tratarse de señales muy irregulares (ruido rosa).
- Cuando  $0.5 < H \leq 1$ : Corresponde a una serie persistente, se refuerza la tendencia, es decir, si la serie estaba por encima o debajo de su media de largo plazo en el periodo anterior, los más probable es que continúe en ese estado en el periodo siguiente. Dicho de otra manera, las series de tiempo persistentes implican memoria y comportamientos similares a futuro (ruido negro).

### 11.11 Análisis de Ondoleta (Wavelet).

El análisis de Ondoleta (Wavelet) es una herramienta para analizar las variaciones localizadas en potencias al descomponer una traza en el espacio de frecuencia temporal para determinar tanto los modos de variabilidad dominantes como la forma en que esos modos varían en el tiempo. Este método es conveniente para el análisis de trazas no estacionarias, es decir, donde la varianza no permanece constante al aumentar la longitud del conjunto de datos. Las propiedades fractales están presentes donde el espectro de potencia wavelet es una función de la ley de potencia de la frecuencia. El método de Wavelet se basa en la propiedad de que las transformaciones de Wavelet de las trazas auto-afines tienen propiedades auto-afines.

Considere  $n$  ondoletas (wavelets) se transforma cada una con un coeficiente de escala diferente  $a_i$ , donde  $S_1, S_2, \dots, S_n$  son las desviaciones estándar de cero de los coeficientes de escala respectivos  $a_i$ .

Definiendo la relación de las desviaciones estándar  $G_1, G_2, \dots, G_{n-1}$  como:  $G_1 = S_1 / S_2, G_2 = S_2 / S_3, \dots, G_{n-1} = S_{n-1} / S_n$ . Se estima el valor promedio de  $G_i$  como: El exponente de Hurst (H) es  $H = f(G_{avg})$ , donde  $f$  es una función heurística que se aproxima al exponente de Hurst de  $G_{avg}$  para las trazas auto-afines estocásticas. Benoit 1.3 (TruSoft, 1999) establece  $n = 4$  y  $a_i = 2^i$  para  $i = 0, 1, 2, 3$ . La dimensión fractal  $D_w = 2 - H$ .

La función “madre” de Wavelet utilizada dentro de estos análisis en Benoit 1.3 (TruSoft, 1999), es una función escalonada.

### 11.12 Análisis estadístico usando el principio porosidad de Delesse.

Oleschko (1999) llevó a cabo un análisis unidimensional (conjunto de líneas o porosidad lineal, NL), bidimensional (conjunto de imágenes o porosidad areal, AP) y tridimensional (volúmenes o porosidad volumétrica, VP), para calcular y estimar la porosidad de diferentes tipos de suelos, a través de un modelo fractal empírico comparado con otros modelos teóricos; dando lugar al desarrollo de un modelo que permite de manera rápida y estadísticamente coherente, el cálculo de la porosidad y el cual fue denominado por el autor como “Modelo Fractal Unificado” (MFU).

Para el caso particular del análisis y cálculo de la porosidad de un determinado suelo a través de distintos conjuntos de líneas, es decir, análisis unidimensional de porosidad del suelo (NL), el autor siguió el siguiente fundamento estadístico, el cual, se basa en la siguiente expresión que relaciona la dimensión fractal de un determinado conjunto analizado y la escala de resolución o de medida que se ha empleado para el análisis de dicho conjunto. Cualquier intervalo de longitud  $L$  contiene  $N$  puntos del conjunto fractal en la resolución  $r$  ( $L/r \gg 1$ ) (Korvin, 1992). Lo anterior se lo puede reescribir de la siguiente forma:

$$N \propto (L/r)^D, \quad (21)$$

donde:  $N$  se asume como el número de puntos o el mensurando que se desea analizar, en el caso de la investigación del autor, corresponde a los espacios vacíos (poros) y/o los elementos sólidos de un suelo,  $N_p$  y  $N_s$  respectivamente, en una línea horizontal de prueba, asumiendo una cuadrícula o malla sobre la cual se realizan varios análisis. La relación entre  $L$  y  $r$  representa el número total ( $N_t$ ) de puntos de prueba, considerados a lo largo de cada línea de longitud  $L$ . Por lo tanto, de la ecuación 21 se tiene:

$$N_s \propto N_t^D. \quad (22)$$

$$N_p \propto N_t^D. \quad (23)$$

De esta manera  $NL$  representa la porosidad del suelo, que a su vez estaría definida como la proporción de la longitud de cada línea ( $N_t$  multiplicado por  $r$ ) ocupada por poros ( $N_p$  multiplicado por  $r$ , donde  $r$  es la escala de observación), dando lugar a la estimación de la distribución de poros tomado desde la ecuación 23:

$$NL \propto \left( N_p / N_t \right). \quad (24)$$

Con lo anterior,  $NL$  en la ecuación 22, se considera como el complemento del espacio euclidiano-unidimensional, ocupado por la parte sólida a lo largo de una sección de longitud  $L$ :

$$NL \propto 1 - \left( N_s / N_t \right). \quad (25)$$

Tomando como referencia las ecuaciones 22 y 23, se puede establecer la dimensión fractal tanto de poros como de sólidos  $D_p$  y  $D_s$  respectivamente, mediante las siguientes ecuaciones:

$$NL \propto N_t^{D_p-1}. \quad (26)$$

$$NL \propto 1 - N_t^{D_s-1}. \quad (27)$$

Finalmente, si la dimensión fractal de un conjunto sólido es  $D$ , es posible proponer un modelo general para la porosidad del suelo ( $\Phi$ ) en base a los argumentos empíricos y teóricos aplicados por el autor:

$$\Phi = 1 - (L/r)^{D-E}, \quad (28)$$

donde:  $L$  es la longitud de una sección  $E$ -dimensional del conjunto fractal, y  $r$  el tamaño de la unidad de cuadrícula de prueba, o la resolución con la cual se lleva a cabo las medidas del análisis. Este modelo general de conjuntos fractales se puede escribir de tres maneras diferentes, dependiendo del espacio euclidiano sobre el cual que se lleva a cabo el estudio. Espacio euclidiano unidimensional (Eq. 29), espacio euclidiano bidimensional (Eq. 30) y espacio euclidiano tridimensional (Eq. 31) y tomando en cuenta el conjunto de sólidos lineales ( $D_s$ ), areal ( $D_{asm}$ ) y dimensiones fractales volumétricas ( $D_{vsm}$ ).

$$\Phi = 1 - (L/r)^{D_s-1}, \quad (29)$$

$$\Phi = 1 - (L/r)^{2(D_s-1)} = 1 - (L/r)^{D_{asm}-2}, \quad (30)$$

$$\Phi = 1 - (L/r)^{3(D_s-1)} = 1 - (L/r)^{D_{vsm}-3}. \quad (31)$$

Cabe resaltar que, para este trabajo de investigación, el cual se lleva a cabo en series de tiempo (series auto-afines) o registros de ruido sísmico, es decir, espacio euclidiano unidimensional, se toman en cuenta las ecuaciones 26 y 29.

## 12 RESULTADOS.

### 12.1 Obtención de cocientes espectrales

Los primeros análisis que se llevaron a cabo, corresponden a la obtención de cocientes espectrales para las 18 estaciones que hacen parte de la red sísmica de Acoculco. Este primer procesamiento se realizó con la ayuda del software Geopsy (Wathelet, 2005; Wathelet et al., 2005) con el cual, se emplearon los siguientes parámetros de procesamiento de las señales:

- ***Substract Value:*** Remover el valor medio de cada una de las componentes N-S, E-O y Z de la señal sísmica
- ***Removed Trend:*** Remover la tendencia de los datos de amplitud en cada una de las componentes de la señal sísmica.

Los dos primeros filtros que se le realiza a la señal sísmica son de suma importancia, pues permiten realizar correcciones en las señales, las cuales pueden influir considerablemente en los resultados de cada cociente espectral. Además de la fundamental corrección instrumental (deconvolución)

- ***Configuración para obtención de cociente espectral.***
  - *Número de ventanas para un registro de 24 horas:* 1150, este número es resultado de realizar ventanas de muestreo cada 150 segundos y cada una de ellas con traslape del 50%.
  - *Constante de Suavizado:* El valor utilizado para cada análisis fue de 50%. Se realizaron varias pruebas con valores desde 10 hasta 80, concluyendo un valor 50 como óptimo para estos análisis, pues entre más alto sea esta constante, mayor definición tendrán los picos de los cocientes espectrales, aclarando que valores demasiado altos exageran la forma del cociente.
  - *Output:* Los datos de salida de cada cociente espectral presentan las siguientes características: frecuencia entre 0.15Hz y 50Hz y cantidad de puntos contenidos en cada cociente espectral igual a 10000. El primer parámetro se definió así después de realizar varias pruebas en las cuales se observó que por debajo de los 0.15Hz la gráfica del cociente espectral y las ventanas de cada cociente, presentaban distorsión o ruido, esto posiblemente se deba a la respuesta del instrumento o el sensor con el que se hace la medida. El segundo parámetro puede

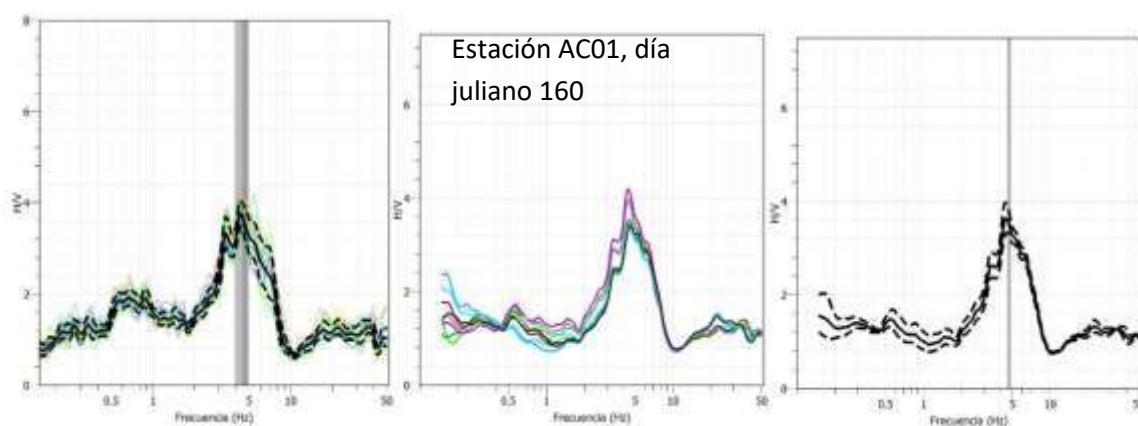
variar desde 1 hasta máximo 10000 puntos X-Y o Frecuencia (Hz)-Amplificación (H/V) que dan forma al cociente espectral, se optó por el máximo número, ya que entre mayor sea la cantidad de puntos, mayor definición tendrá el cociente espectral, hablando desde el punto de vista gráfico.

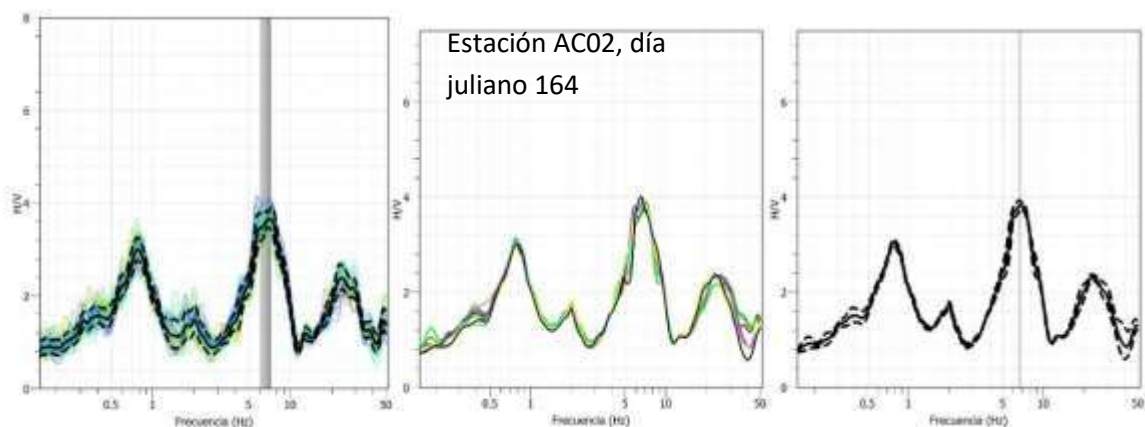
Finalmente, la cantidad de días para cada estación que se cargaron en el software, fueron máximo ocho, de esta manera se realiza un procesamiento simultaneo de los ocho días para obtener una gráfica promedio y más aproximada al cociente espectral del sitio. La limitante de la cantidad de días que se pueden procesar simultáneamente, radica en la capacidad del procesador de los computadores con los cuales se llevó a cabo el análisis. En la figura 17 se presentan los cocientes espectrales para dos estaciones AC01 y AC02, cada una de ellas con tres imágenes. La primera de ellas corresponde al cociente espectral de uno de los ocho días y el que más correspondencia grafica tiene a la gráfica promedio, la cual es la tercera de cada grupo, y finalmente la segunda grafica muestra en diferentes colores los cocientes espectrales de los ocho días procesados simultáneamente.

Adicional a lo anterior, se muestra en la tabla 8 las frecuencias fundamentales ( $f_0$ ) y la amplificación máxima de  $f_0$  para cada una de las 18 estaciones, valores que se tomaron de la gráfica promedio de los ocho días analizados. La tabla 9 corresponde a la agrupación de los cocientes espectrales de acuerdo a la cantidad de amplificaciones, picos o modos superiores, presentes en cada grafica  $H/V$ . Con base en la tabla 9 se realizó la digitalización de los grupos, en un mapa de elevación digital (DEM) de la zona estudio (fig. 18).

En el [apéndice 1](#), se muestran los resultados de los cocientes espectrales obtenidos.

*Cociente espectral de un solo día      Cocientes espectrales de 8 días      Cociente espectral promedio*





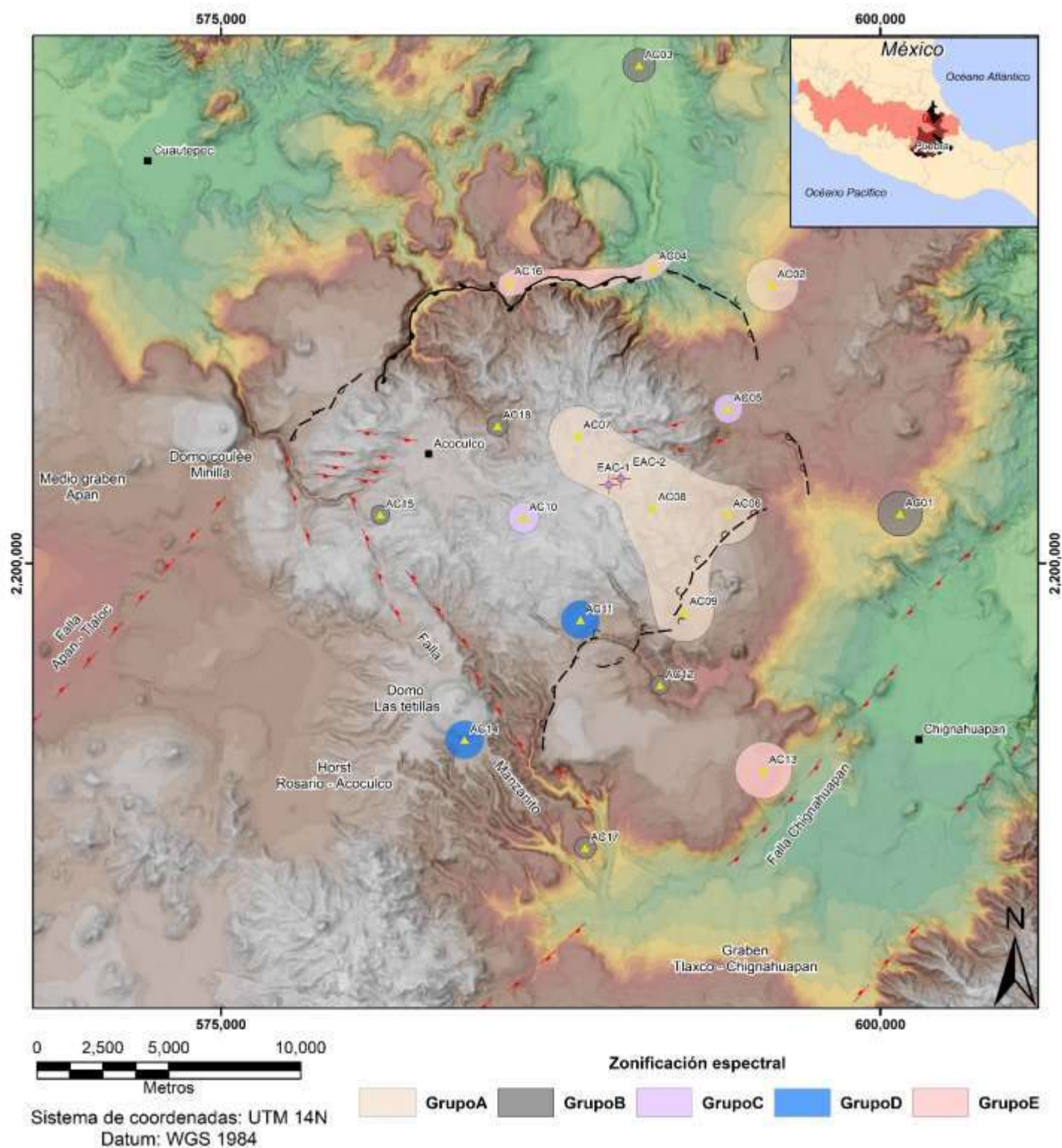
**Figura 127.** Cocientes espectrales para las estaciones AC01 y AC02.

| Estación | Frecuencia fundamental $F_0$ (Hz) | Amplificación ( $A_0$ ) o relación H/V |
|----------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| AC01     | 4.46                              | 3.63                                   |
| AC02     | 6.67                              | 3.82                                   |
| AC03     | 10.15                             | 3.18                                   |
| AC04     | 2.19                              | 2.83                                   |
| AC05     | 1.44                              | 2.08                                   |
| AC06     | 1.51                              | 2.73                                   |
| AC07     | 0.8                               | 2.97                                   |
| AC08     | 1.09                              | 3.11                                   |
| AC09     | 0.66                              | 2.35                                   |
| AC10     | 0.823                             | 2.53                                   |
| AC11     | 5.57                              | 2.09                                   |
| AC12     | 4.58                              | 9.15                                   |
| AC13     | 3.23                              | 2.47                                   |
| AC14     | 0.22                              | 1.5                                    |
| AC15     | 3.3                               | 4.53                                   |
| AC16     | 1.5                               | 2.35                                   |
| AC17     | 1.07                              | 4.98                                   |
| AC18     | 1.106                             | 3.2                                    |

**Tabla 8.** Frecuencia fundamental y amplificación de los cocientes espectrales promedio de las 18 estaciones de la red sísmica de Acapulco.

| Grupo | Estaciones            | Características       | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                     | Distancia entre estaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Localización en caldera                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A     | 2, 6, 7, 8 Y 9        | Varios picos $\geq 2$ | Estas estaciones se agruparon entre sí por la ocurrencia de varios picos bien definidos, con Fo similares y forma de espectro similar                                                                                                                                           | En este grupo las estaciones 6, 7, 8 y 9 son aquellas que presentan mayor cercanía entre sí. La mayor distancia se da entre 7 y 9 (7.7 km) y la menor distancia entre 6 y 8 (2.8 km). La estación 2 es la más alejada del grupo con la mayor distancia respecto a la estación 9 (12.8 km) y la más cercana con la estación 7 (8.9 km) | Las estaciones 6, 8 y 9 se localizan en la parte oriental dentro del sistema calderico, la estación 7 y 2 en la parte nor-oriental con la única diferencia de que la estación 2 está por fuera del borde calderico actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| B     | 1, 3, 12, 15, 17 y 18 | Un solo pico          | Se agrupan estas 4 estaciones por la ocurrencia de un solo pico muy bien definido                                                                                                                                                                                               | Las estaciones 12 y 3 prácticamente alineadas con dirección N-S son las más alejadas entre si (23.6 km). Las estaciones 1 y 15 alineadas prácticamente con dirección E-O están separadas por una distancia de 19.7 km. Las estaciones 12 y 1 son las más cercanas entre si 11.1 km                                                    | La estación 1 se encuentra en la parte oriental de la caldera fuera del borde calderico. La estación 3 se encuentra en la parte nor-oriental fuera del borde calderico. La estación 12 se encuentra en la parte sur-oriental en la parte exterior pero muy próxima del borde calderico. La estación 15 se encuentra en la parte occidental y dentro del sistema calderico. La estación 17 se encuentra en el exterior del anillo calderico en el sector sur. Finalmente, la estación 18 se encuentra al interior del anillo calderico en la parte norte. |
| C     | 5 y 10                | Una meseta grande     | Estas dos estaciones presentan un espectro muy particular en forma de meseta cuyos extremos están en el orden de 5 a 0.2 Hz. Además, en dicha meseta se puede observar una serie de picos característicos para las dos estaciones                                               | 8.7 km                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | La estación 5 se encuentra en la parte nor-oriental dentro del sistema calderico y la estación 10 se encuentra hacia el centro del sistema calderico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| D     | 11 y 14               | Planas                | Estas dos estaciones presentan un espectro con tendencia relativamente plana, excepto por algunos picos en altas frecuencias, pero con bajas amplitudes $<2$ .                                                                                                                  | 6.15 km                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | La estación 11 se encuentra en la parte sur-oriental dentro del sistema calderico y la estación 14 se encuentra hacia la parte sur-occidental fuera del borde calderico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| E     | 4, 13 y 16            | Formas complejas      | Estas tres estaciones presentan un espectro con forma muy distinta a las estaciones de los anteriores grupos. Sus formas entre sí de igual forma no presentan gran similitud, a excepción de la presencia de al menos dos picos y un pequeño valle en frecuencias entre 0 y 1Hz | Distancia más corta entre las estaciones 4 y 16 (5.5 km). La mayor distancia se da entre las estaciones 16 y 13 (20.1 km)                                                                                                                                                                                                             | La estación 4 se encuentra en la parte nor-oriental fuera del borde calderico, pero muy próxima a este. La estación 13 se encuentra hacia la parte sur-oriental fuera del sistema calderico. Finalmente, la estación 16 se encuentra hacia la parte norte dentro del sistema calderico y muy próxima al borde de este.                                                                                                                                                                                                                                   |

**Tabla 9.** Agrupación de las 18 estaciones de la red sísmica de Acoculco, de acuerdo a la cantidad de picos del cociente espectral y la forma del mismo. Con esta agrupación se realizó una zonificación y mapeo de la zona de estudio (fig.18).



**Figura 13.** Mapa de elevación digital en el que se muestran los polígonos de los 5 grupos en los que se clasificaron los 18 cocientes espectrales, de cada una de las estaciones que hacen parte de la red sísmica de Acapulco.

## **12.2 Obtención de los diferentes valores de exponentes de Hurst (H).**

En la [tabla 10](#) ([apéndice 2](#)), se presenta para dieciséis estaciones los diferentes valores del exponente de Hurst, respecto a los diferentes rangos de análisis o también denominada en este trabajo como la nube de puntos, sobre la cual se analizaron los cocientes espectrales. El mínimo valor 100 esta predeterminado en la configuración inicial del software Geopsy (Wathelet, 2005; Wathelet et al., 2005) y el valor 10000, es el máximo valor que permite analizar el software. Una vez obtenidos los datos de los 36 cocientes espectrales de cada estación, pero cada uno de ellos con diferente nube de puntos, variando desde 100 con cambios constantes de 100 hasta 2000 y desde este último valor con variaciones constantes de 1000 hasta el máximo valor 10000 que permite el software libre Geopsy (Wathelet, 2005; Wathelet et al., 2005), se procede a calcular cada valor H de cada nube de puntos asociada a cada cociente espectral, con la ayuda del software Benoit 1.3 (TruSoft, 1999). Al graficar el rango de análisis contra los diferentes valores de “H” obtenidos (fig. 19), se puede observar una gráfica y/o firmagrama muy similar en todas las estaciones analizadas, una prueba más sobre la fractalidad de los cocientes espectrales, pues sin importar el sitio y los diferentes estratos rocosos sobre los que se encuentra cada una de estas estaciones, presentan una firma o patrón similar sobre sus diferentes análisis de esta primera prueba, la cual como se mencionó anteriormente, es base fundamental para los posteriores análisis.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente en la sección **11.11**, el modelo matemático y estadístico empleado para el cálculo del exponente de Hurst, y el cual hace parte de las diferentes metodologías propuestas para este tipo de procesamiento de señales auto-afines, corresponde al análisis de “Wavelet”, el cual, junto al análisis de rango re-escalado R/S, hacen parte de las herramientas que ofrece el software libre Benoit 1.3 (TruSoft, 1999).

En el [apéndice 2](#), se encuentra la tabla con todos los valores de H obtenidos para las 16 estaciones.

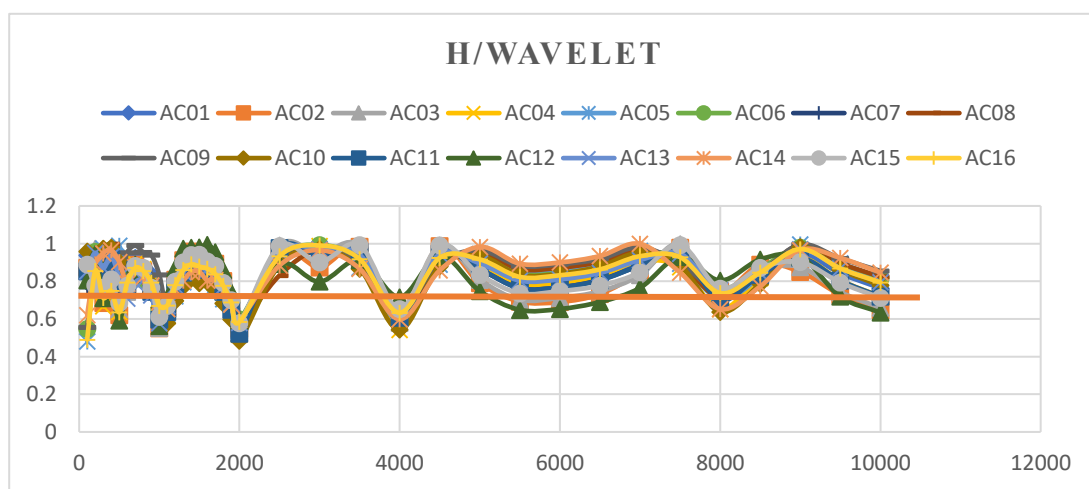
## **12.3 Sensibilidad e incertidumbre de los valores de H para dieciséis estaciones.**

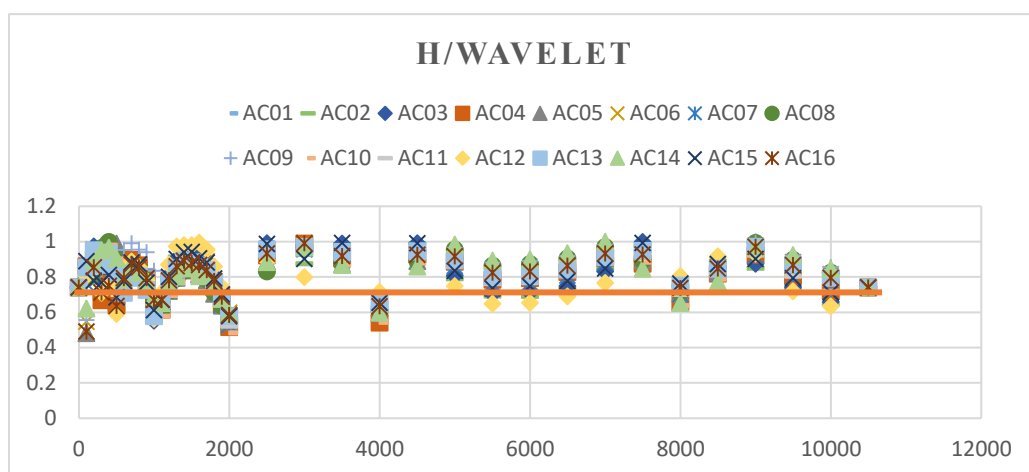
Se puede establecer que, en las 16 estaciones (fig. 19) para las cuales se ha realizado el cálculo del valor H, las señales presentan escasa o poca fluctuación en los valores de “H” que se obtienen entre los puntos de muestreo de 5000 y 7000, pues los valores tienden a presentar estabilidad o poca fluctuación en el valor “H”; por lo cual, se necesita analizar la viabilidad

de usar todos los valores de “H” dentro de esos dos rangos para obtener la que se ha denominado como sensibilidad. Incluso la existencia de estos dos rangos donde se puede observar la escasa fluctuación del exponente de Hurst, podría ser una primera prueba de la multifractalidad de las señales que se analizan en este proyecto, aclarando que en principio el análisis se enfoca en la monofractalidad de las series de tiempo.

Este es un análisis necesario y de gran utilidad con el cual se puede determinar un rango de estabilidad para los valores del exponente de Hurst, es decir, con el es posible obtener de manera visual los momentos, en este caso los rangos de o nube de puntos, en los cuales los valores de “H” tienen una tendencia más o menos estable, similar o con muy poca variación, y es con ese grupo de valores con el cual se procede a realizar los posteriores análisis de fractalidad. Este conjunto de valores nos da información clara y precisa sobre la variable en la cual se ajusta el mensurando que estamos trabajando o analizando, el cual, en este proyecto, es la relación de las componentes horizontales contra las verticales de un registro de ruido sísmico o también conocido como cocientes espectrales H/V.

Finalmente, teniendo en cuenta que el rango donde los valores de H son más estables entre 5000 y 7000 datos de la nube de puntos del cociente espectral, se realizó un cálculo del promedio entre los valores H de 5000, 6000 y 7000 para cada una de las estaciones, obteniendo como valor de exponente de Hurst promedio de  $H = 0.74$ .





**Figura 1914.** n las gráficas se puede observar la tendencia de los datos analizados y como en el segmento entre 5000 y 7000, los datos presentan una fluctuación menor respecto a los demás valores. La línea naranja representa el promedio de del total de los valores analizados.

#### 12.4 Cálculo de exponente de frecuencia acumulada para diecisiete estaciones.

Este cálculo se llevó a cabo siguiendo la fundamentación esta dística planteada por Signanini y De Santis. (2012), la cual se resumió en el apartado 11.9. El procedimiento que se llevó a cabo para el cálculo de exponente de frecuencia acumulada (EFA) para diecisiete estaciones de la red sísmica de Acapulco, sigue los siguientes pasos.

De acuerdo al anterior análisis de sensibilidad de los datos, se decidió dejar como base de procesamiento de cada uno de los siguientes cálculos, una nube de puntos de 6000, esto fundamentado en la estabilidad que comienzan a presentar los cálculos de los cocientes espectrales dentro del rango de valores de 5000 a 7000 puntos.

- Se exporta el cociente espectral calculado con los parámetros mencionados en el apartado 12.1, con una nube de puntos de 6000, en formato .txt, el cual se organiza en un archivo Excel para continuar con el procesamiento estadístico, tomando como ejemplo para cálculo de frecuencias acumuladas el fundamento matemático de Sturges, (1926).
- De todos los 6000 datos se calcula el mínimo y el máximo de los valores. Tabla 11a.
- El rango  $R$  de los valores corresponde a la diferencia entre el máximo y mínimo valor de los datos. Tabla 11a.
- La cantidad de clases  $k$  de acuerdo a la cantidad de datos a analizar, está definida bajo la fórmula:

$k = 1 + 3.322 * \log_{10}(N)$ , donde  $N$  representa la cantidad de datos a analizar. Tabla 11a.

- Finalmente se calcula la amplitud  $A$  entre clases, la cual es la relación entre el rango  $R$  de los valores y el valor de  $k$ . Tabla 11a.
- Con lo anterior se construyó una tabla con cada una de las clases obtenidas y los límites de cada clase  $k$ , definidos por el rango  $R$ . Tabla 11b.
- En la tabla 11b, el límite inferior “Lim Inf”, corresponde a los valores de  $H/V$ , los cuales se siguen tomando para la construcción de la tabla 11c, en la cual se calcula para cada límite inferior la cantidad de datos mayor o igual al valor correspondiente en cada clase  $k$ . De este modo obtenemos  $N = (H/V)$  como número de ocurrencias de una relación dada  $H/V$  dentro de  $M$  muestras.
- Con lo anterior se calcula el EFA de cada estación para un cociente espectral cuya nube de puntos fue de 6000. La tabla 11c, corresponde a la tabla 11d, con la diferencia de que a cada uno de los valores de  $H/V$  y  $N(H/V)$  para cada clase  $k$ , se les aplicó logaritmo en base 10 para la construcción de las gráficas Log/Log de los EFA. Figuras 15.

**Tabla 13a.**

| N               | 6000       |
|-----------------|------------|
| <b>Xmin</b>     | 0.75897089 |
| <b>Xmax</b>     | 3.63540824 |
| <b>Rango</b>    | 2.87643735 |
| <b>Clases</b>   | 13         |
| <b>Amplitud</b> | 0.22126441 |

**Tabla 12b.**

| clases | Lim Inf | Lim Sup |
|--------|---------|---------|
| 1      | 0.759   | 0.980   |
| 2      | 0.980   | 1.201   |
| 3      | 1.201   | 1.423   |
| 4      | 1.423   | 1.644   |
| 5      | 1.644   | 1.865   |
| 6      | 1.865   | 2.087   |
| 7      | 2.087   | 2.308   |
| 8      | 2.308   | 2.529   |
| 9      | 2.529   | 2.750   |
| 10     | 2.750   | 2.972   |
| 11     | 2.972   | 3.193   |
| 12     | 3.193   | 3.414   |
| 13     | 3.414   | 3.635   |

**Tabla 11c.**

| clases | H/V   | N(H/V) |
|--------|-------|--------|
| 1      | 0.759 | 6000   |
| 2      | 0.980 | 4498   |
| 3      | 1.201 | 4072   |
| 4      | 1.423 | 3800   |
| 5      | 1.644 | 3562   |
| 6      | 1.865 | 3296   |
| 7      | 2.087 | 3012   |
| 8      | 2.308 | 2775   |
| 9      | 2.529 | 2553   |
| 10     | 2.750 | 2121   |
| 11     | 2.972 | 1399   |
| 12     | 3.193 | 1017   |
| 13     | 3.414 | 509    |

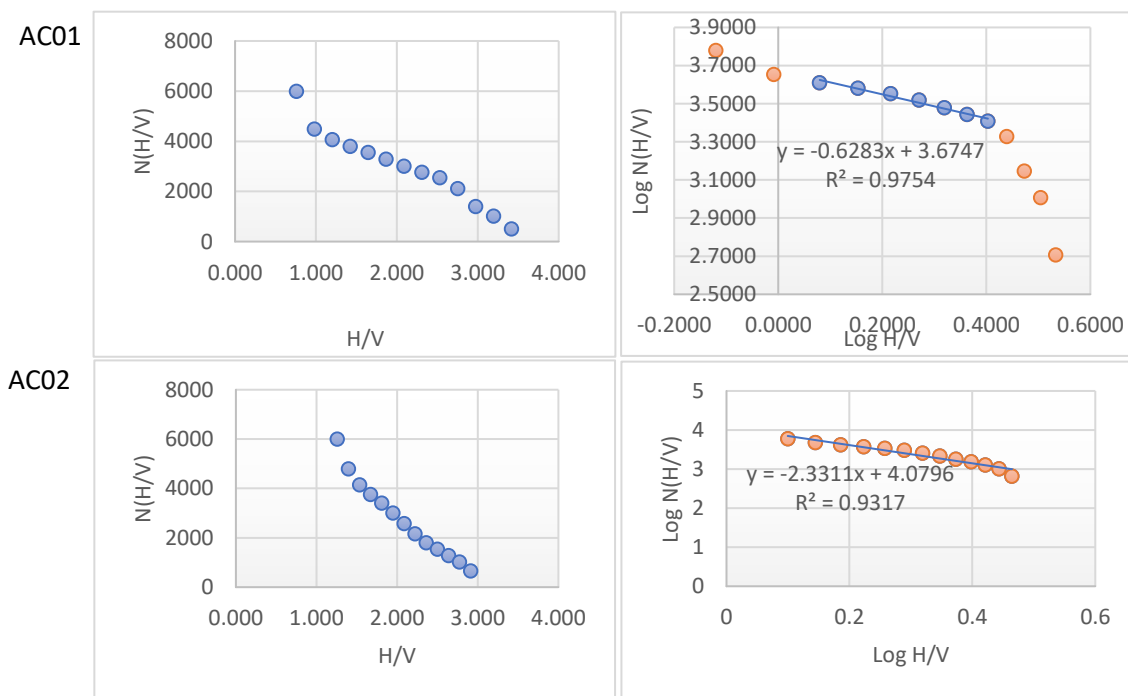
**Tabla 10d.**

| clases | Log (H/V) | Log N(H/V) |
|--------|-----------|------------|
| 1      | -0.1198   | 3.7782     |
| 2      | -0.0087   | 3.6530     |
| 3      | 0.0797    | 3.6098     |
| 4      | 0.1531    | 3.5798     |
| 5      | 0.2159    | 3.5517     |
| 6      | 0.2707    | 3.5180     |
| 7      | 0.3194    | 3.4789     |
| 8      | 0.3632    | 3.4433     |
| 9      | 0.4030    | 3.4071     |
| 10     | 0.4394    | 3.3265     |
| 11     | 0.4730    | 3.1458     |
| 12     | 0.5042    | 3.0073     |
| 13     | 0.5333    | 2.7067     |

Finalmente se hace una regresión lineal de cada conjunto de datos de la tabla 11d correspondiente a las gráficas  $\text{Log } N(H/V)/\text{Log } (H/V)$ , y también se obtiene la ecuación de la recta, de la forma  $y = mx + b$ , de la cual la pendiente  $m$  de dicha recta representa el exponente de frecuencia acumulada EFA; valor que se utiliza más adelante en el cálculo de la porosidad de Delesse.

Todos los datos de cada una de las clases calculadas definen una tendencia lineal o una recta. Para este estudio los valores o conjunto de datos  $x/y$  que se toman en cuenta para el cálculo de dicha tendencia, corresponden a aquellos que dan la mejor regresión lineal  $R^2$  y que definen mejor la tendencia lineal de los mismos (fig. 20).

En el [apéndice 3](#), se muestran los resultados obtenidos para las estaciones las estaciones restantes.



**Figura 15.** Se muestra las gráficas de los resultados de frecuencia acumulada obtenidos para las estaciones AC01 Y AC02. En la gráfica izquierda se puede observar cómo los datos presentan una tendencia logarítmica, un comportamiento común en los sistemas fractales. En la gráfica de la derecha se grafica el logaritmo con base 10 de los datos de frecuencia acumulada, con lo cual se pueden observar las tendencias lineales de los datos, de igual manera, como en los sistemas naturales que presentan comportamiento fractal. En la gráfica de la derecha se muestran todos los datos en color naranja y los que hicieron parte de la regresión lineal hasta obtener el mejor ajuste de la recta con el mejor  $R^2$ , son los de color azul.

## 12.5 Cálculo de los valores de porosidad aplicando el principio de Delesse para diecisiete estaciones.

Para el cálculo de valores de porosidad de Delesse para 17 de las 18 estaciones que hacen parte de la red sísmica de Acoculco, se llevó a cabo siguiendo los pasos que se describen a continuación:

Como primer paso se procedió a identificar las diferentes incógnitas que tiene la ecuación  $NL \propto N_t^{Dp-1}$  y la manera de encontrarlas, para luego reemplazarlas y obtener el resultado final.

- Según la teoría presentada en el apartado **11.12**, el análisis estadístico para calcular de manera empírica la porosidad de suelos, puede realizarse en tres espacios euclidianos, es decir, una, dos y tres dimensiones. Para el caso específico de este trabajo de investigación, se recurrió a un cálculo de este tipo de porosidad haciendo uso de la ecuación 26, la cual permite realizar los cálculos unidimensionales, recordando que los datos que se analizaron en este trabajo, son señales de ruido sísmico, por lo tanto, son trazas auto-afines.
- El primer procedimiento que se llevó a cabo fue la obtención de los cocientes espectrales de cada estación del arreglo sísmico. Con la ayuda del análisis de sensibilidad, se logró observar que la escala de medida sobre la cual los datos de los cocientes espectrales presentan poca variabilidad corresponde a 6000 puntos. Este es el valor  $r$  o  $N_t$  (número total de puntos de prueba o escala de observación) que se tomó en cuenta para el desarrollo de la ecuación 26.
- Como segundo paso, se buscó obtener el valor  $Dp$  o dimensión fractal de poros. Los cocientes espectrales calculados con una nube de dispersión de 6000 puntos, fueron tomados en cuenta para este siguiente análisis. Los datos del segmento de la curva  $H/V$  que se invierte para la obtención de modelos de velocidad 1D, son tratados en el software Benoit 1.3 (TruSoft, 1999), mediante el módulo de análisis de trazas auto-afines y con la herramienta de análisis estadístico Wavalet, con el fin de obtener el valor de  $H$  de ese segmento que representa un modelo de velocidades puntual del subsuelo en cada estación de la red sísmica.
- Una vez obtenido el valor  $H$ , se recurre a la ecuación  $D = 2 - H$  (apartado **11.10** y **11.11**) (Mandelbrot, 1975a) para la obtención del valor  $D$ , pues solo es necesario reemplazar el valor  $H$  que se calculó en el paso anterior.

- Con lo anterior se tienen los valores de  $N_t$  y  $D_p$  necesarios para el cálculo de los valores de la porosidad de Delesse de 17 estaciones (tabla 12). Los valores obtenidos se agregaron al mapa de elevación digital (DEM) en la figura 25.

| Estación | H     | D     | NL     |
|----------|-------|-------|--------|
| AC01     | 0.895 | 1.105 | 2.49   |
| AC02     | 0.482 | 1.518 | 90.59  |
| AC03     | 0.614 | 1.386 | 28.73  |
| AC04     | 0.777 | 1.223 | 6.96   |
| AC05     | 0.966 | 1.034 | 1.34   |
| AC06     | 0.746 | 1.254 | 9.11   |
| AC07     | 0.904 | 1.096 | 2.31   |
| AC08     | 0.677 | 1.323 | 16.61  |
| AC09     | 0.865 | 1.135 | 3.24   |
| AC10     | 0.931 | 1.069 | 1.82   |
| AC11     | 0.736 | 1.264 | 9.94   |
| AC12     | 0.45  | 1.55  | 119.67 |
| AC13     | 0.941 | 1.059 | 1.67   |
| AC15     | 0.638 | 1.362 | 23.32  |
| AC16     | 0.868 | 1.132 | 3.15   |
| AC17     | 0.671 | 1.329 | 17.50  |
| AC18     | 0.921 | 1.079 | 1.99   |

**Tabla 14.** Se muestran los resultados obtenidos para NL, además de los valores de exponente de Hurst “H” y dimensión fractal “D”.

## 12.6 Inversión de un segmento de la curva H/V para la obtención de modelos de velocidad 1D.

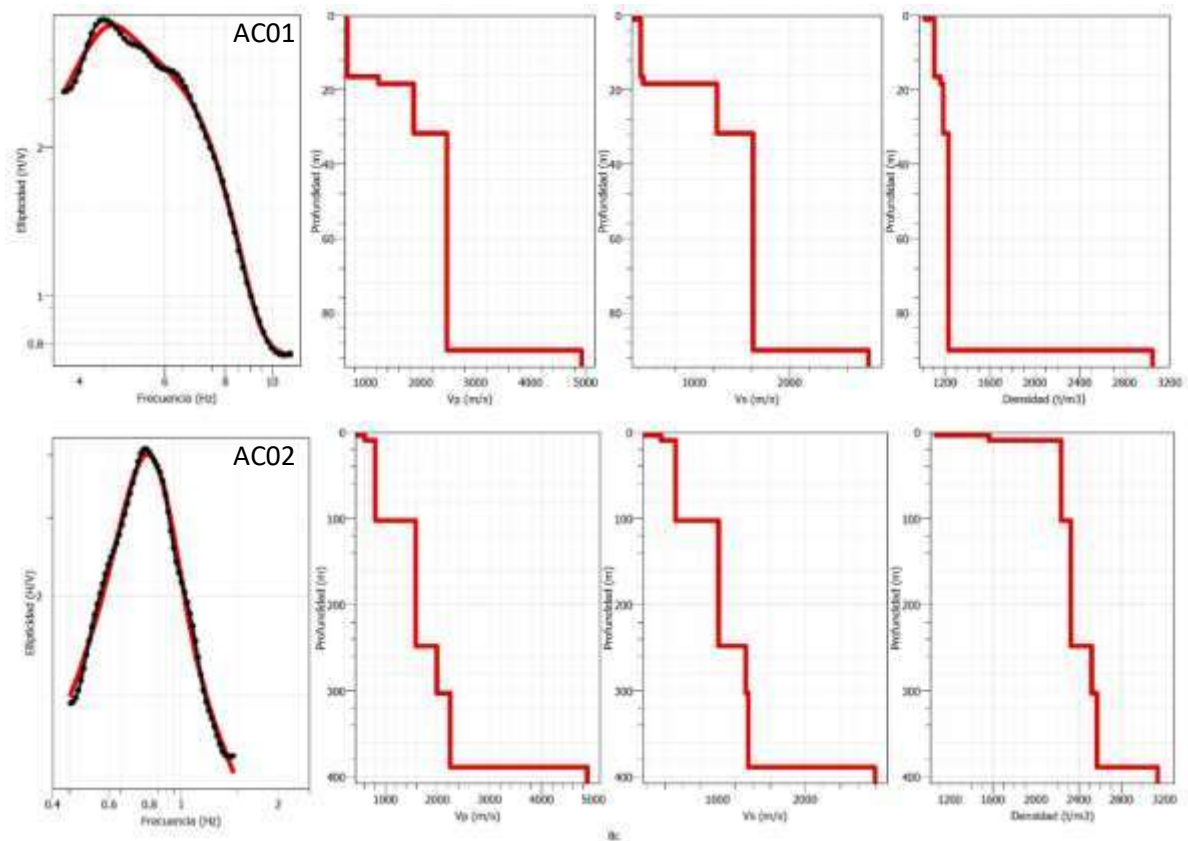
Una vez calculados los cocientes espectrales de cada una de las 18 estaciones de la red sísmica, se procede a determinar el segmento de la curva H/V que se tomará en cuenta para su respectiva inversión. En la figura 21a, se muestra para dos estaciones, a la izquierda: el segmento de curva invertido, imágenes centrales: cambios en la velocidad de  $V_p$  y  $V_s$  respecto a la profundidad (número de capas de suelo y roca observadas) y a la derecha, cambios de densidad respecto a la profundidad (densidad de las diferentes capas obtenidas en la inversión).

El procedimiento de inversión de la curva H/V, se llevó a cabo con el módulo **Dinver** que hace parte de la paquetería del software Geopsy (Wathelet, 2005; Wathelet et al., 2005), haciendo uso de la herramienta *inversión de curva de elipticidad*.

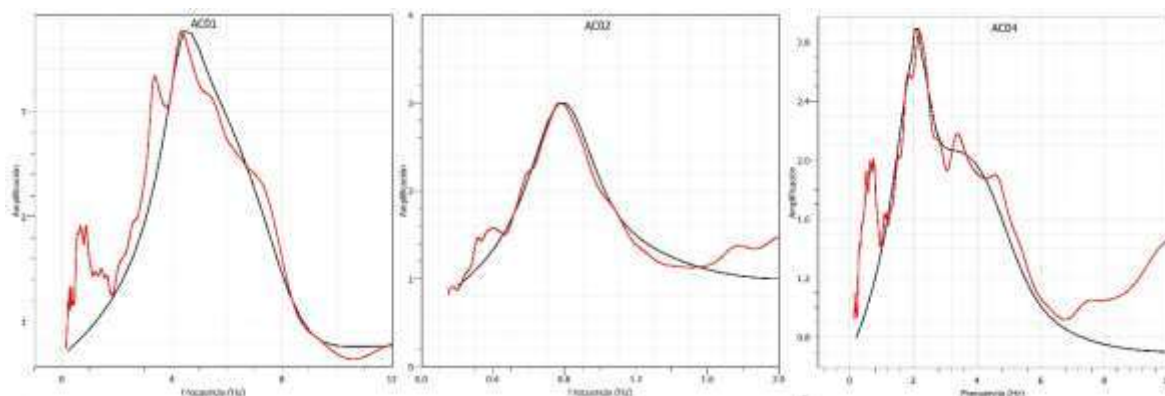
Los modelos obtenidos son una primera aproximación de las diferentes inversiones realizadas, es necesario validarlos haciendo uso del módulo **gpell** (dentro de la paquetería de Geopsy (Wathelet, 2005; Wathelet et al., 2005) con el cual, básicamente se realizaron ajustes en los valores de  $V_p$ ,  $V_s$ , profundidad y/o densidad de las diferentes capas tanto de suelo como de roca que se lograron observar en cada inversión, obteniendo como resultado final la mejor correlación y/o ajuste entre la curva H/V y el modo fundamental de la inversión. En la figura 21b, se muestra los resultados obtenidos para 3 estaciones.

Cabe aclarar que este análisis es independiente a los anteriores, es decir, no se ve afectado por la nube de dispersión, estos análisis no son dependientes de dichos valores.

En los [apéndices 4 y 5](#), se muestran los resultados obtenidos de las estaciones restantes, tanto de inversión de curva H/V, como de los ajustes o validaciones de las inversiones, respectivamente.



**Figura 16a.** Se muestra el segmento de la curva H/V que se tomó en cuenta para su inversión y los resultados del procedimiento. Se puede observar que para la estación AC01, se la inversión de la curva permitió observar hasta 6 capas o sustratos rocos, con una profundidad máxima de 90 metros y para la estación AC02, la inversión de la curva permitió observar 7 capas a una profundidad máxima de 388.2 metros.



**Figura 17b.** Se puede observar para tres estaciones AC01, AC02 y AC04, como la curva del cociente espectral H/V (rojo), tiene un buen ajuste respecto al modo fundamental invertido (negro).

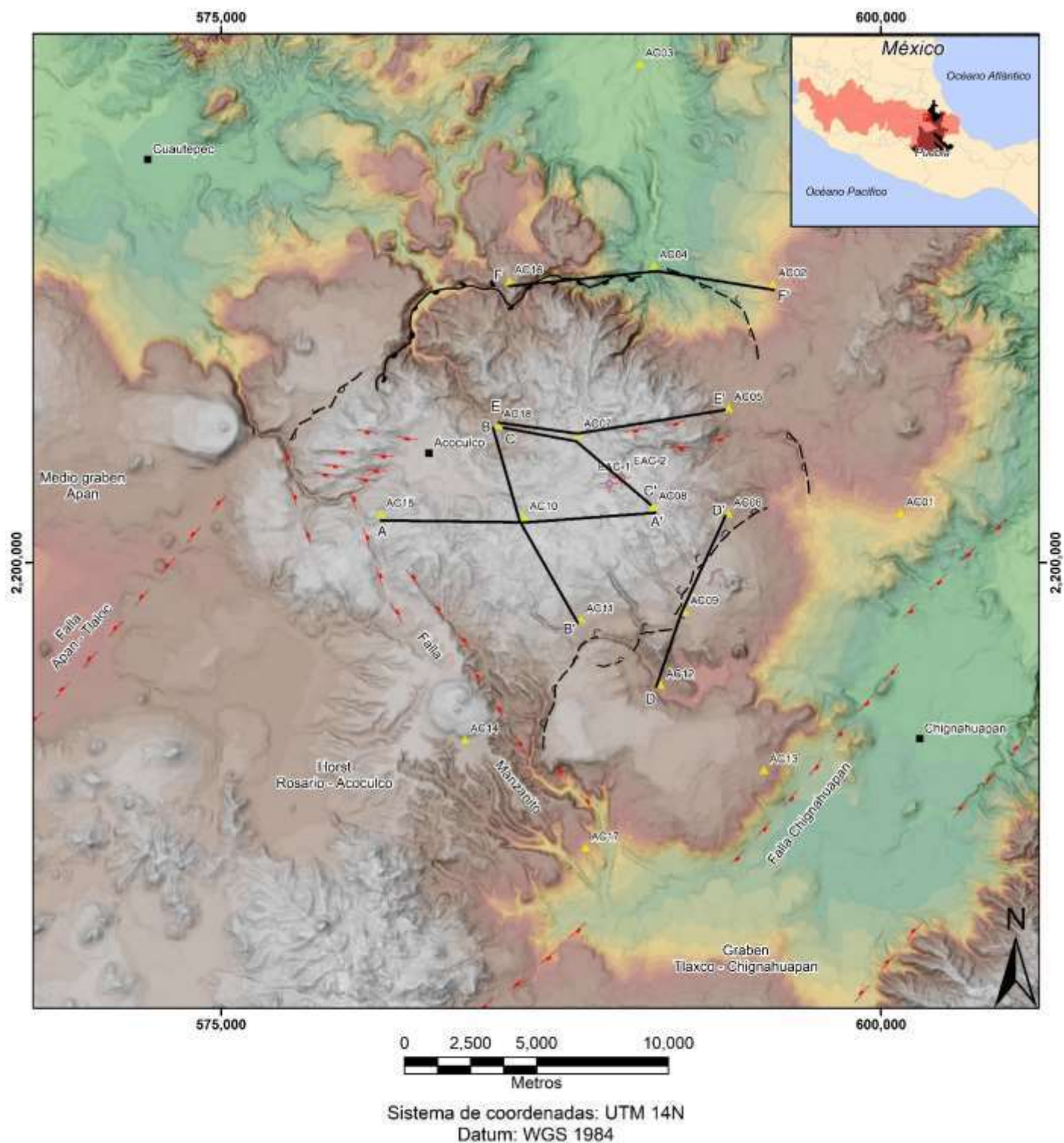
Adicionalmente, con los datos de onda P, S y densidades obtenidos en cada modelo de velocidad, se elaboró una tabla Excel con el fin de desarrollar las ecuaciones matemáticas que permiten obtener de manera indirecta valores de: módulo de Poisson ( $\nu$ ), módulo de rigidez ( $G$ ), módulo elástico ( $E$ ), módulo de Bulk ( $K$ ) y relación  $V_p/V_s$ . Los resultados no se discuten en este trabajo, pues que, estos se pueden tomar en cuenta para realizar un nuevo estudio que involucre su comparación, análisis y discusión con nuevos resultados o valores empíricos. El fundamento se tomó de Manilla-Aceves et al. (2003). Junto a este archivo se adjunta la hoja de cálculo Excel.

## 12.7 Perfiles de velocidad 2D.

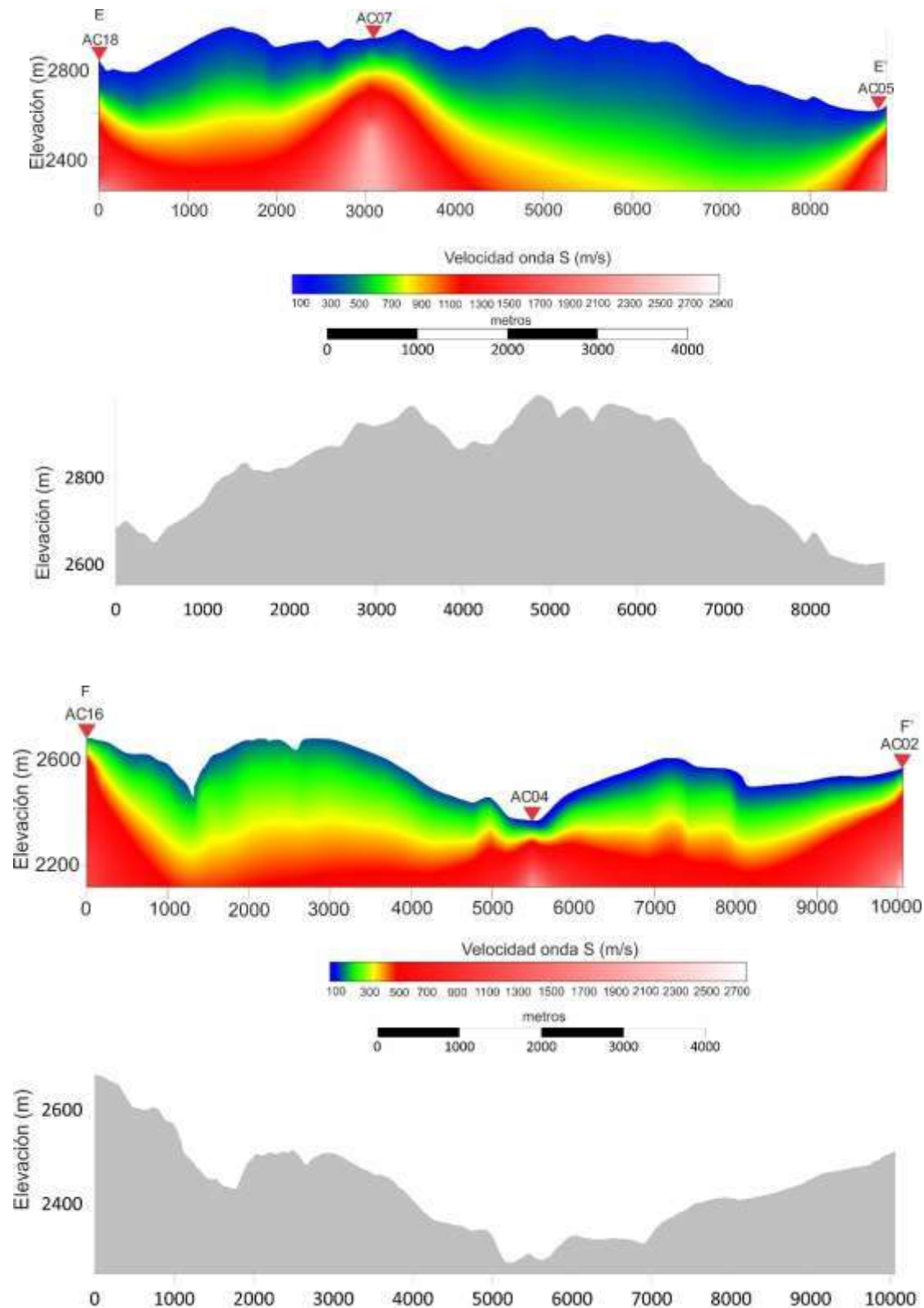
Una vez realizados los perfiles de velocidad puntual (1D) de cada una de las 17 estaciones para la cuales se realizó la inversión de la curva H/V, se estableció correlaciones de perfiles entre estaciones cercanas, de tal manera que, se lograra realizar un perfil de velocidad 2D, con los cuales se pueda correlacionar las variaciones de velocidad de onda S ( $V_s$ ), tanto lateral con verticalmente. En la figura 22a, se muestra las ubicaciones de las líneas de los diferentes perfiles y las estaciones que hacen parte de estos, además de los perfiles de profundidad vs  $V_s$  (fig. 22b).

Las interpolaciones que permitieron obtener estos perfiles se realizaron con el software Surfer V.16.

En el [apéndice 6](#), se muestran los cuatro perfiles restantes.



**Figura 18a.** Mapa de elevación digital en el que se muestran las líneas que unen las estaciones que hicieron parte de la construcción de los perfiles de velocidad de onda S, A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' y F-F'.



**Figura 192b.** Perfiles E-E' y F-F', en los cuales se muestran las estaciones que hicieron parte de la construcción de dichos perfiles, además de los cambios de velocidad de onda S respecto a la profundidad. Conjuntamente se observa un perfil topográfico, con el cual, se trata de mostrar la gran similitud que existe entre este y la topografía que se usó para la interpolación de los diferentes modelos de velocidad.

### 13. DISCUSIÓN

El sistema geotérmico de Acoculco, de acuerdo a los diversos estudios de investigación, se ha considerado hasta el momento como un sistema de roca seca caliente López-Hernández (2009), es decir, un sistema con ausencia de geofluidos, con lo cual, el calor que emana la fuente magmática del yacimiento, se distribuye de manera conductiva a través del mismo, pues dicha ausencia de fluidos imposibilita procesos convectivos, los cuales son comunes en yacimientos geotérmicos convencionales. En general, el área de Acoculco ha sido objeto de varios estudios, en su gran mayoría estructurales, geológicos y escasos geofísicos (López-Hernández, 2009; Avellán et al., 2018; Gómez Alvarez, 2019; García-Palomo et al., 2017; Lermo et al., 2009) y a nivel regional respecto a la Sierra Madre Oriental (SMOr) (Morales y Garduño, (1984), con el fin de entender la evolución geotectónica que se ha desarrollado en el área de estudio, a través de diferentes periodos geológicos y sus relaciones con los eventos volcánicos y/o caldericos que han evolucionado y han configurado el escenario actual. Estos estudios, por otro lado, han tenido un propósito muy importante desde el ámbito económico, pues en cada una de ellos se busca entender la configuración geológica, estructural, geohidrológica e incluso mineral del yacimiento geotérmico de Acoculco, que permita entender el comportamiento del mismo y con esto establecer con claridad la importancia económica que podría representar para una eventual explotación de energía geotérmica del mismo.

En este trabajo se realizó principalmente cuatro análisis: cocientes espectrales, inversión de la curva H/V para obtención de modelos de velocidad 1D, exponente de frecuencia acumulada (EFA) y porosidad de Delesse, siendo los dos últimos, análisis que se realizan por primera vez en el área de estudio, pues la criticalidad y/o fractalidad de la corteza superior haciendo uso de ruido sísmico, es un estudio que se llevó a cabo en Italia por Signanini y De Santis (2012).

En este trabajo se optó por complementar y llevar más afondo el trabajo de criticalidad, añadiendo la porosidad de Delesse que se podría obtener a partir de la información contenida en un cociente espectral. Con estos análisis se pretende contribuir a los estudios investigación del área de estudio y aportar al entendimiento geológico, geofísico y geoestadístico del mismo.

### 13.1 Cocientes espectrales H/V y zonificación espectral.

En la zona de estudio se realizó la instalación de 18 estaciones sísmicas, para las cuales se calculó su respectivo cociente espectral (fig. 17). Para estos se realizó una clasificación grupal de acuerdo a características como: cantidad de picos y forma de cada cociente espectral, así como la ubicación de los mismo dentro del área de estudio. Con lo anterior se logró realizar cinco grupos A, B, C, D y E (tabla 9), los cuales, también se delimitaron como en el caso de A y E, con un polígono por su cercanía y particularidades del sitio donde se han instalado, es decir, de la topografía de los sectores.

Las estaciones que hacen parte del grupo A (figs. 17 y 23), se encuentran relativamente cerca entre ellas y en la parte centro-este de la caldera, a excepción de la estación 2 que se encuentra más hacia la parte NE. Estas estaciones tienen como característica principal la forma del cociente, por ejemplo, las estaciones 2 y 6 son muy similares en forma y cantidad de picos que forman el cociente, con la única excepción del pico en el cual se ha marcado la frecuencia fundamental, aclarando que esta es una interpretación que realiza Geopsy (Wathelet, 2005; Wathelet et al., 2005) pues este marca como punto de frecuencia fundamental un intervalo, en cual, la señal presenta su mayor amplificación, por lo tanto como criterio propio de investigador, es más probable que el intervalo de frecuencia fundamental de la estación 2, corresponda al primer pico entre los valores de 0.7 y 0.8 Hz, siendo estos últimos, valores más próximos a los que presenta la estación 6. Observando las estaciones 2, 6 y 7, aparentemente la estación 7 presenta una disminución en la cantidad de picos respecto a la estación 2 y 6, a excepción del primer pico, el cual se mantiene y se amplifica en 7 con respecto a 6 y las frecuencias fundamentales (tabla 8) se mantienen por debajo de 2 Hz. La particularidad sigue siendo la similitud en la forma del cociente espectral, aun con la disminución en la cantidad de picos, o tal vez la variación en la amplificación y las frecuencias en la que se encuentran dichos picos, de una estación con respecto a otra. Las estaciones 8 y 9 aunque son las que presentan menor cantidad de picos o mayor variación en la amplificación de los mismos respecto a las demás estaciones del grupo, siguen manteniendo una forma similar en su cociente espectral, aunque aparentemente la estación 9 y 7 guardan una gran similitud en la parte inicial del espectro, la forma y frecuencia del primer pico del cociente espectral presentan formas muy similares. La estación 8 pareciera una transición entre las estaciones 7 y 9, pues es una estación que presenta una disminución en la amplificación de algunos picos

respecto a la estación 7 y la presencia de otros que con respecto a la estación 9 han desaparecido o disminuido considerablemente su amplificación, aunque como característica principal, el primer pico se mantiene en una frecuencia fundamental por debajo de los 2 Hz y con una forma muy similar. En cuanto a la topografía y/o morfología del terreno donde se encuentran (figs. 4, 18 y 23), las estaciones 6, 7, 8 y 9 se instalaron en una zona dentro del anillo de colapso, es decir, en el área que conforma la caldera con morfología circular y donde se tiene una configuración geológica más completa en cuanto a los paquetes de rocas ígneas tanto extrusivas como intrusivas, sedimentarias y metamórficas. La estación 2 está en la parte externa de la caldera, en una zona topográficamente más plana.

Para las estaciones del grupo **B**, la característica más importante entre ellas y la cual fue base para su clasificación, fue la presencia de un pico muy marcado a excepción de la estación 3 en la que se puede observar unos picos de baja amplificación a frecuencias más bajas respecto a la del pico principal. Estas estaciones presentan una característica muy común entre todas, la topografía o morfología del terreno en la cual se llevó a cabo su instalación corresponde a zonas planas, más específicamente a zonas de valles en las cuales la acumulación de sedimentos es mucho mayor respecto a otras áreas. Podría ser esta una de las causas que contribuye a esta característica de los cocientes espectrales de estas estaciones, en los cuales se tiene una gran amplificación de la señal (figs. 17, estación 12, 18 y 23) siguiendo el principio de Nakamura (1989), en el cual se simplifica el medio con un espacio y un semi-espacio, estos lugares son los que mejor contraste generan en las señales, es decir, la gran acumulación de sedimentos actúa como un buen elemento para el atrapamiento de las ondas superficiales, además del efecto físico que genera en ellas como la amplificación o amplitud de las mismas.

El grupo **C** es relativamente sencillo, pues lo compone tan solo dos estaciones 5 y 10, la característica principal entre sus cocientes espectrales corresponde a la forma de los mismo y la cual se ha denominado en meseta. Sus frecuencias fundamentales son por debajo de los 2 Hz, aunque pareciera algo confuso el pico del periodo o frecuencia fundamental, pues la misma forma similar a la de una meseta se configura de varios picos muy pequeños de muy baja amplificación. En cuanto a la morfología en su posición dentro del área de estudio, la estación 10 se encuentra dentro del anillo de colapso de la caldera en una zona topográficamente muy quebrada, al igual que las estaciones 6, 7, 8 y 9 del grupo **A** y la

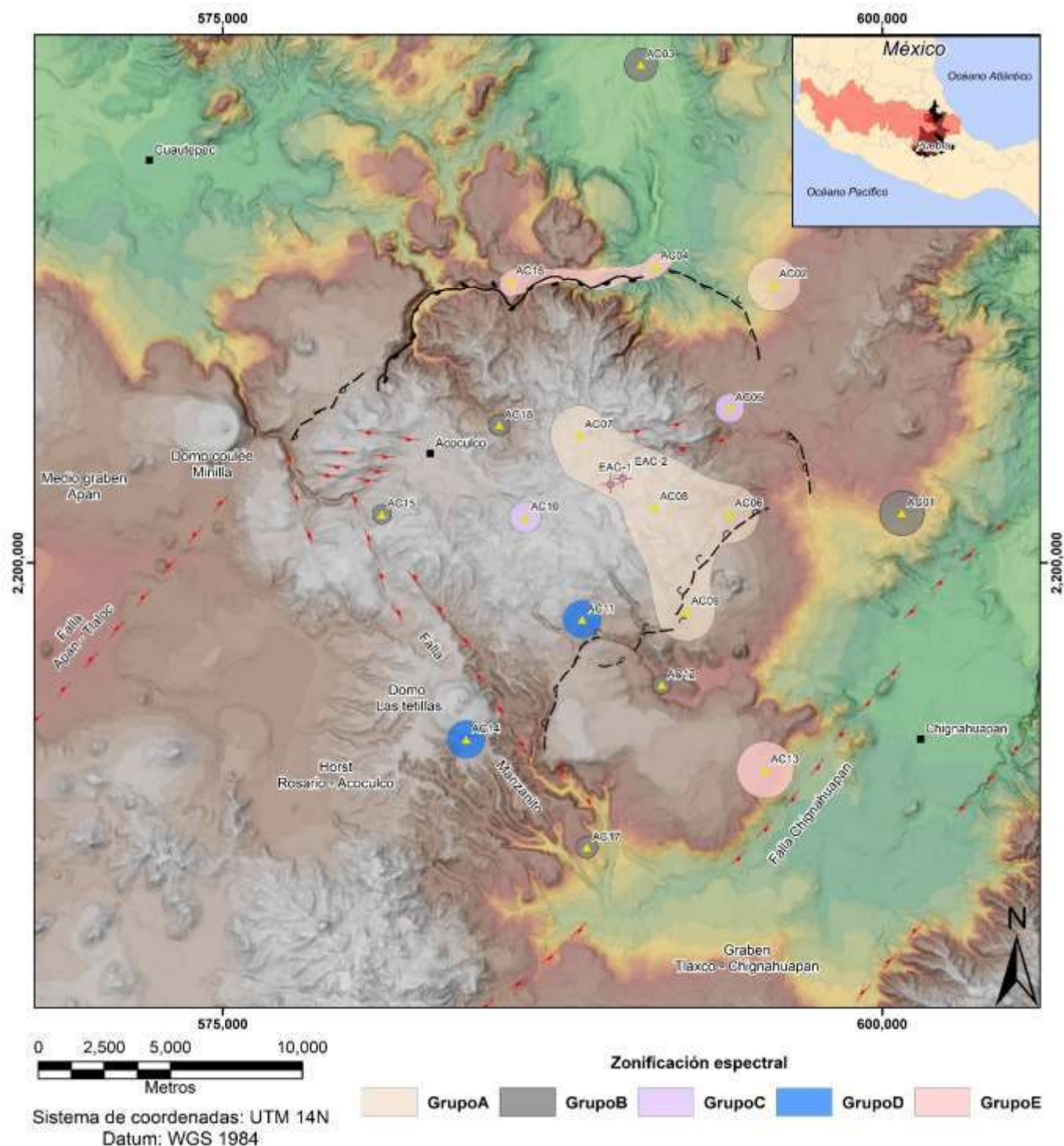
estación 5 se encuentra en una zona más plana y en la que podría ser la parte externa del anillo de colapso (figs. 18 y 23).

En el grupo **D** se encuentran las estaciones 4, 13 y 16. Se decidió ubicarlas dentro de este grupo, debido a la forma de su cociente espectral, aunque las tres presentan más de un pico, la forma del cociente como tal no presenta ninguna similitud con los de otras estaciones, por lo mismo su clasificación se ha denominado como formas complejas. Estas estaciones presentan una característica muy importante y es más notable en las estaciones 4 y 16, pues estas están muy cerca del anillo de colapso de la caldera, es decir, una zona de falla, al igual que la estación 13, la cual se encuentra en el bloque yacente o también llamado bloque de piso de una falla normal con dirección NE-SO, la falla Chignahuapan (figs. 18 y 23).

Finalmente, el grupo **E** (figs. 18 y 23) lo conforman las estaciones 11 y 14 las cuales presentan un cociente espectral particularmente plano muy cercano a 1 en cuanto a amplificación. Es muy probable que esta particularidad sea a causa de la poca interacción que puedan tener las ondas superficiales en una configuración geológica en la cual no exista un buen contraste entre el espacio y semi-espacio, o como se mencionó anteriormente, este sería el caso contrario a los sitios donde existe una gran acumulación de sedimentos y existe un buen entrampamiento de las ondas. La anterior es razón por la cual calcular un cociente espectral sobre roca da como resultado un espectro con tendencia lineal más o menos constante en 1 (fig. [17](#)).

Dado que un cociente espectral es una firma propia del sitio donde se realiza la medición y el análisis, es decir, depende de medio geológico de cada lugar donde se lleva a cabo el estudio, las variaciones que se observan en dichos cocientes, es muy probable que se deban a la configuración geológica propia del medio. Teniendo en cuenta que el área que se estudió y analizó, es un sitio que fue tectónicamente muy activo dando origen a una configuración geológica compleja, en la cual se puede tener tanto diferentes secuencias de rocas y sedimentos continuos lateralmente, como repetición o desaparición de unidades de litológicas producto de los diversos sistemas de fallas que atraviesan la zona, o simplemente por extensión y alcance lateral de las unidades volcánicas, las más predominantes en la zona. Es recomendable analizar cuál es el punto clave que genera formas tan similares de la relación  $H/V$  entre ciertas estaciones, aun cuando estas pueden estar a varios kilómetros de distancia,

en los cuales, diversos eventos geológicos y tectónicos pueden dar lugar a diversas configuraciones o estructuraciones geológicas.



**Figura 203.** Mapa de elevación digital en el que se muestran los polígonos de los 5 grupos en los que se clasificaron los 18 cocientes espectrales, de cada una de las estaciones que hacen parte de la red sísmica de Acapulco.

### 13.2 Correlación perfiles de velocidad y unidades geológicas.

Uno de los primeros estudios realizados y con el que se buscó obtener perfiles de velocidad 1D tanto de la parte interna como externa de la Caldera de Acoculco, fue el realizado por Lermo y Chávez-García (1993). Con el método geofísico SPAC, lograron obtener dos modelos, uno para la cuenca endorreica desarrollada al interior de la caldera y otro para la parte externa de dicha cuenca. Lograron profundizar a 1650 y 2070 metros, respectivamente y correlacionaron los datos con los núcleos de los pozos perforados EAC01. Para el caso de este trabajo en cual se implementa la técnica de inversión de la curva H/V como una aproximación a una curva de elipticidad, se logró obtener modelos de velocidad con una profundidad máxima de 507.8 metros (estación AC09) y los valores de los diferentes cambios de velocidad se los correlacionaron con la información del pozo EAC01 y el mapa geológico de la zona. Esta correlación se realizó principalmente para las estaciones que hicieron parte de los perfiles de velocidad 2D realizados con arreglos de máximo 3 estaciones (fig. [22a y b](#)). La limitante en cuanto a la profundidad de inversión de las curvas puede deberse probablemente a la técnica empleada para realizar la inversión y/o más importante aún, a la configuración geológica que existe en cada sitio de estudio, por ejemplo, al contraste que exista entre el espacio y semi-espacio siguiendo el modelo de Nakamura (1989) y de igual manera al mismo contraste de densidades que exista entre cada uno de los sustratos rocosos presentes en cada lugar.

Tomando en cuenta la descripción litológica del pozo EAC01 (fig. 24a) realizada por López-Hernández (2009) y la última cartografía geológica del área de estudio realizada por Avellán et al, (2018) (fig. 3a y 24b); para facilitar la correlación de las diferentes capas obtenidas en las diferentes inversiones de curva de H/V, las unidades litológicas asociadas a eventos volcánicos de tipo piroclásticos (ignimbritas), se tomaron en cuenta como un solo paquete rocoso volcanoclástico. Los derrames lávicos de riolitas, dacitas, andesitas y basaltos se tomaron como otro paquete ígneo de tipo volcánico, distinguiendo los primeros derrames de los últimos, por la marcada diferencia en densidades. Las rocas como mármol y skarn se agruparon dentro de un solo paquete de rocas metamórficas de contacto. Finalmente, las rocas ígneas que al parecer hacen parte del basamento de la secuencia litológica, se infirió como roca ígnea plutónica o intrusiva. Además, se realizó una revisión bibliográfica, en la cual, se tratan y estudian las velocidades de onda P, S y densidades en diferentes tipos de rocas volcánicas, con el fin de realizar una comparación con los resultados obtenidos en este trabajo

(tablas 13, 14 y 15). Para facilitar la lectura de este apartado, se muestra nuevamente el mapa geológico de la zona estudiada y el pozo exploratorio EAC-01 (figs. 24a y b).

| Densidad volumétrica seca para varios tipos de rocas (Dry bulk densities) |                    |                |                     |               |                  |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|---------------------|---------------|------------------|
| Tipo de roca                                                              | numero de muestras | media (gr/cm3) | desviación estándar | moda (gr/cm3) | mediana (gr/cm3) |
| Todas las rocas                                                           | 1,647              | 2.73           | 0.26                | 2.65          | 2.86             |
| Andesita                                                                  | 197                | 2.65           | 0.13                | 2.58          | 2.66             |
| Basalto                                                                   | 323                | 2.74           | 0.47                | 2.88          | 2.87             |
| Diorita                                                                   | 68                 | 2.86           | 0.12                | 2.89          | 2.87             |
| Dolerita (diabasa)                                                        | 224                | 2.89           | 0.13                | 2.96          | 2.9              |
| Gabro                                                                     | 98                 | 2.95           | 0.14                | 2.99          | 2.97             |
| Granito                                                                   | 334                | 2.66           | 0.06                | 2.66          | 2.66             |
| Pórfido cuarzoso                                                          | 76                 | 2.62           | 0.06                | 2.6           | 2.62             |
| Riolita                                                                   | 94                 | 2.51           | 0.13                | 2.6           | 2.49             |
| Sienita                                                                   | 93                 | 2.7            | 0.1                 | 2.67          | 2.68             |
| Traquita                                                                  | 71                 | 2.57           | 0.1                 | 2.62          | 2.57             |
| Arenisca                                                                  | 107                | 2.22           | 0.23                | 2.22          | 2.22             |
| Dacita                                                                    |                    | 2.402          | 0.175               |               |                  |
| Ignimbrita                                                                |                    | 1.85 - 2.125   |                     |               |                  |

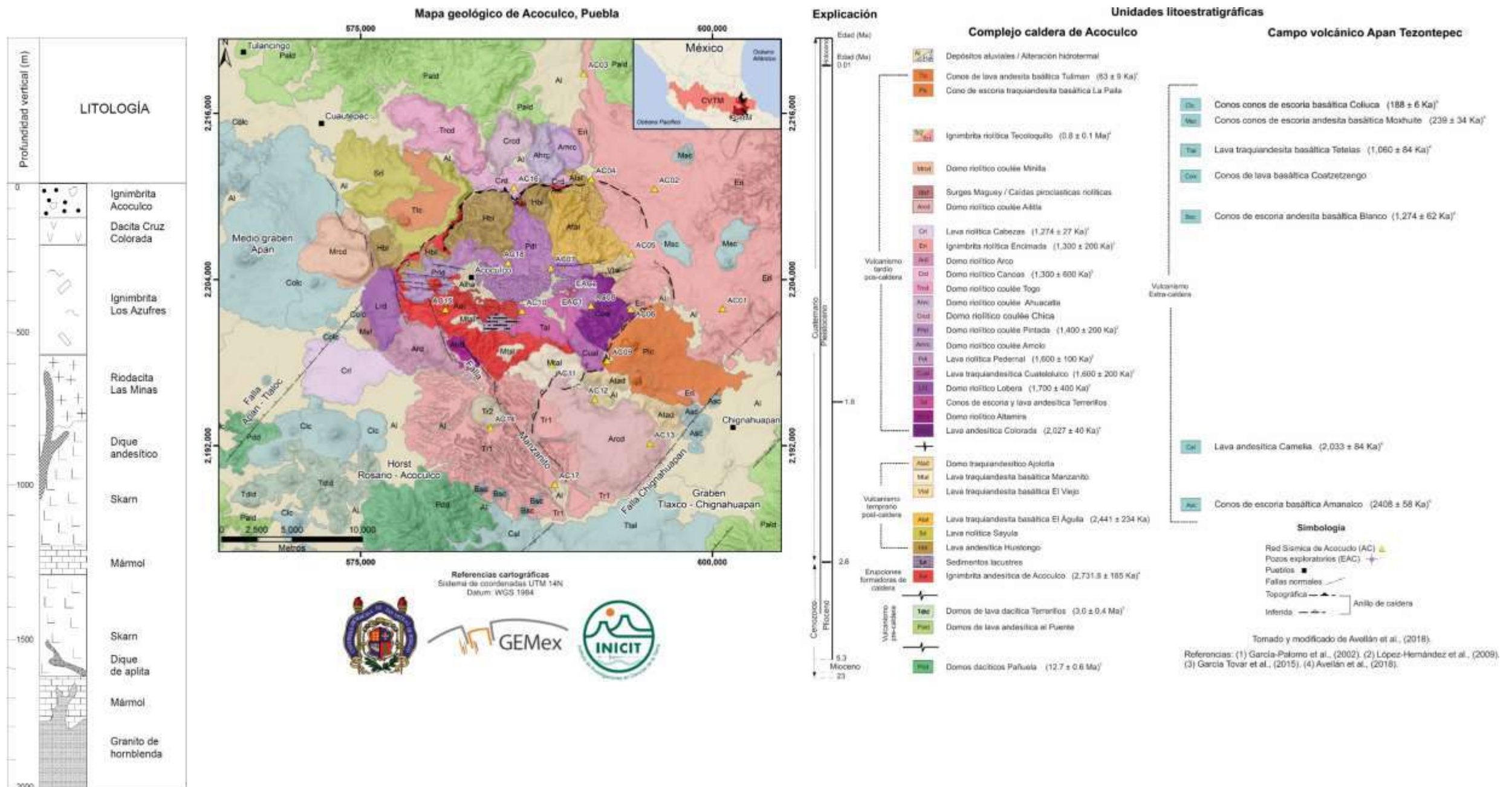
**Tabla 15.** Densidad de bulk o densidad volumétrica en estado seco o no saturado para algunas rocas ígneas de tipo extrusivo. Modificado de Schön (2011).

| Tipo de suelo | descripción del suelo | VS30 (m/s) |
|---------------|-----------------------|------------|
| A             | Roca dura             | >1500      |
| B             | Roca                  | 760 – 1500 |
| C             | Suelo muy denso       | 360 – 760  |
| D             | Suelos arenosos       | 180 – 360  |
| E             | Suelos blandos        | <180       |
| F             | Suelos especiales     | -          |

**Tabla 16.** Clasificación de algunos tipos de suelos según sus propiedades mecánicas (NEHRP). Tomado de (Lermo-Samaniego y Limaymanta-Mendoza, 2007)

| Velocidad onda S en algunos tipos de rocas ígneas extrusivas |           |                         |
|--------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Roca                                                         | Vs (m/s)  | Referencia              |
| Basalto                                                      | 2400-3400 | (Schön, 2011)           |
| Andesita                                                     | 2400-3500 |                         |
| Traquita                                                     | 2400-3500 |                         |
| Riolita                                                      | 2631      | (SJ Bauer et al., 2011) |
| Andesita basáltica                                           | 2900      |                         |
| NYT                                                          | 1350      | (Vanorio et al., 2002)  |
| CIYF                                                         | 1375      |                         |
| CIGF                                                         | 2000      |                         |
| TRH                                                          | 2560      |                         |
| PAB                                                          | 2860      |                         |
| PTB                                                          | 3290      |                         |
| ATT                                                          | 2970      |                         |
| ABT                                                          | 3013      |                         |

**Tabla 17.** NYT: Tobas Amarillas Neapolitan. CIYF: Facies Ignimbrita Amarilla Campanian. CIGF: Facies Ignimbrita Gris Campanian. TRH: Lava Traquítica. PAB: Basalto Alcalino Porfirítico. PTB: Traquibasalto Porfirítico. ATT: Traquiandesita Afanítica. ABT: Basalto Afanítico. Trabajo de rocas ígneas extrusivas del Campo de Flegueri y el Monte Etna, Italia. Tomado de Vanorio et al. (2002).



➤ **Estación AC01.**

La inversión de la curva  $H/V$  de esta estación permitió obtener hasta los primeros 19.1 metros, posiblemente, tres capas de suelo, una con una velocidad de 360  $m/s$ , 440  $m/s$  y 466  $m/s$ . El primero de ellos, hasta una profundidad de 1.3 metros, puede corresponder a un suelo duro, mientras que el segundo y tercero con un espesor de 15.6 y 2.2 metros respectivamente, pueden corresponder un suelo con una consolidación mayor o también producto de la meteorización de la capa subyacente asociada a una roca compacta, es decir, el saprolito de la roca. A partir de los 19.1 hasta los 90.7 metros con la inversión de un segmento de la curva  $H/V$ , se obtuvieron dos capas más con velocidad de onda S de 1,236 y 1,617  $m/s$ , las cuales de acuerdo a la cartografía geológica del área de estudio, podrían corresponder a la secuencias volcániclastica o de depósitos de flujos piroclásticos, denominada como ignimbrita riolitica Encimada (Eri), misma unidad descrita por López-Hernández (2009) como ignimbrita de Piedras Encimadas. Finalmente, a 90.7 metros la última capa que mostró la inversión de la curva, presenta una alta velocidad onda S con una densidad de 3,047.9  $kg/m^3$ , valores que podrían corresponder muy probablemente a flujos o derrames lávicos de composición basáltica y/o andesita basáltica. De acuerdo al mapa y evolución geológica de la zona, el sustrato rocoso que podría estar asociado a esta última capa podría corresponder a alguna de las secuencias de volcanismo pre-caldera, pero debido a la cercanía de la estación a domo de escoria de andesita basáltica, es más probable que corresponda a las unidades cartografiadas como conos de escoria de andesita basáltica Moxhuite (Msc) (Avellán et al., 2018).

➤ **Estación AC02.**

Para esta estación donde la inversión de la curva  $H/V$  permitió obtener un modelo de velocidades con siete capas, las dos primeras con Vs de 158 y 357  $m/s$  y con profundidades de 3.2 y 9.2 metros respectivamente, posiblemente corresponden a dos tipos de suelo con diferente grado de compactación o consolidación, desde blando a duro. Una tercera capa aparece a los 102.3 metros de profundidad con Vs 525  $m/s$ , esta de acuerdo al mapa geológico, muy probablemente corresponde a un sustrato rocoso con algún grado de meteorización y/o alteración hidrotermal de la roca subyacente, la cual puede corresponder de acuerdo a la cartografía de la zona a la ignimbrita riolitica

Encimada (Eri) y para la cual se obtuvo un valor de Vs 1,013  $m/s$  hasta una profundidad de 248 metros. Claramente existe una diferencia entre esta velocidad y las que se le asocia a la misma unidad en la estación AC01, esto muy seguramente se puede asociar al grado de compactación, y en este caso tratándose de una ignimbrita, al grado de soldamiento de la misma o también a factores como grado de fracturamiento y/o alteración de la roca. A partir de los 248 hasta los 302 y 388 metros, la inversión muestra dos capas adicionales con velocidad de Vs 1,325 y 1,352  $m/s$  y densidades de 2,522 y 2,573  $kg/m^3$ , en ambas propiedades físicas se puede notar la poca variación entre estas dos capas y de acuerdo a la correlación que se realizó con la cartografía geológica de la zona, estos dos sustratos rocosos podrían corresponder al derrame lávico de traquiandesitas basálticas Águila (Atal). La última y séptima capa que mostró la inversión inicia a partir de los 388 metros, para cual se obtuvo velocidad de Vs 2,796  $m/s$  y densidad de 3,140  $kg/m^3$ , valores muy similares a los obtenidos para la última capa de la estación AC01, por lo cual es muy probable que este sustrato rocoso corresponda a algún derrame lávico producto de los conos de escoria de la actividad denominada como vulcanismo extra caldera, incluso esta estación se encuentra relativamente cerca de este tipo de domos asociados a dicha actividad volcánica.

➤ **Estación AC04.**

Para esta estación la primera capa obtenida en la inversión de la curva  $H/V$  llega hasta una profundidad de 13.5 metros con una velocidad de onda S de 343  $m/s$ , la cual, corresponde al suelo del sitio donde se encuentra el sensor de la estación. A partir de la anterior profundidad, la inversión dio como resultado cuatro capas más con variaciones graduales de Vs 516  $m/s$ , 604  $m/s$ , 722  $m/s$ , 993  $m/s$ , con densidades de 1,153  $kg/m^3$ , 1,265  $kg/m^3$ , 1,347  $kg/m^3$ , 1,928  $kg/m^3$ , y a profundidades de 24, 34, 43 y 144 metros respectivamente. Las cuatro capas anteriores de acuerdo a lo observado en la geología del mapa geológico, pueden corresponder a una misma unidad geológica, y esto se fundamenta en las siguientes premisas: la estación se encuentra muy cerca del anillo de la caldera, es decir, próxima a la falla anular producto del colapso del sistema calderico, lo que implica un alto fracturamiento, fallamiento o agrietamiento de la roca, además de la misma circulación de fluidos geotermales que pudieron causarle diferentes grados de alteración hidrotermal, siendo así todos estos factores la causa de que la misma unidad

rocosa presente diferentes comportamientos físicos que afectan su densidad y la forma en como las ondas viajan a través de ese medio con diferentes comportamientos. La estación estuvo instalada en lo que se ha denominado como un derrame lávico de traquiandesitas basálticas Águila (Atal), el cual de acuerdo a la cartografía justo del lugar donde se encuentra la estación, presenta alteraciones hidrotermales. Finalmente, a partir de los 144 metros se tiene un cambio considerable en Vs con  $2,246 \text{ m/s}$  y una densidad de  $2,814 \text{ kg/m}^3$ , siendo estos valores los que probablemente correspondan a la misma roca, pero con grado muy bajo de alteraciones hidrotermales y tectonismo.

➤ **Estación AC05.**

Para esta estación la primera capa de la inversión de la curva, mostró una velocidad de onda S de  $109 \text{ m/s}$  y hasta una profundidad de 33.4 metros. Se obtuvo una siguiente capa con un cambio considerable de Vs a  $544 \text{ m/s}$  y una densidad de  $1,300 \text{ kg/m}^3$ . Esta última muy posiblemente corresponda al saprolito de la capa subyacente, que de acuerdo a la cartográfica del mapa geológico corresponde a la unidad de ignimbrita riolítica Encimada (Eri). Esta unidad inicia desde los 33.4 hasta los 165.9 metros con tres variaciones de Vs de  $831 \text{ m/s}$ ,  $1086 \text{ m/s}$ ,  $1130 \text{ m/s}$ , densidades de  $1,671 \text{ kg/m}^3$ ,  $1,947 \text{ kg/m}^3$ ,  $2,216 \text{ kg/m}^3$ , y a profundidades de 56.7, 151.6 y 165.9 respectivamente, las cuales se podrían deber a los diferentes grados de compactación y/o soldamiento que presenta la unidad volcániclaística, pues en este tipo de eventos piroclásticos es muy común que existan diferentes pulsos durante un mismo evento, dando lugar a diferencias en los componentes del producto piroclástico y más importante aún, diferencias en el soldamiento de la roca, debido a diferencias en las temperaturas del expulsión del material. Lo anterior pudo haber generado la formación de una unidad volcániclaística que presenta variaciones dentro del mismo paquete rocoso. También los eventos tectónicos y tratándose de un sistema calderico, pueden ser los causantes de diferentes grados de fracturamiento y alteración hidrotermal que afectan la roca, generando así, cambios físicos importantes que se ven reflejados en parámetros como velocidad de las ondas que las atraviesan y sus densidades. Finalmente, a 165.9 metros de profundidad, la inversión mostró un nuevo cambio de Vs a  $2180 \text{ m/s}$  y una densidad de  $2678 \text{ kg/m}^3$ , lo que podría corresponder de acuerdo a la geología del área, a una unidad de derrames lávicos denominada como traquiandesitas basálticas Viejo (Vtal), una unidad más joven

que los derrames lávicos de traquiandesitas basálticas Águila (Atal), cartografiados a escasos kilómetros del sitio de la estación y que seguramente se encuentran por debajo y a mayor profundidad que la unidad Vtal.

➤ **Estación AC06.**

Las dos primeras capas que dio como resultado la inversión, se encuentran a una profundidad de 1.1 y 4.1 metros de profundidad, con Vs de 228 y 315  $m/s$ , las cuales corresponden al suelo del sitio donde se llevó a cabo la instalación del sensor. A partir de los 4.1 metros de profundidad, la inversión arrojó como resultado la presencia de cinco capas con Vs de 790  $m/s$ , 855  $m/s$ , 1,188  $m/s$ , 1,524  $m/s$ , 2,074  $m/s$ , densidades de 1,215  $kg/m^3$ , 1259  $kg/m^3$ , 1294  $kg/m^3$ , 1386  $kg/m^3$ , 1952  $kg/m^3$ , y a profundidades de 46.1, 106.4, 152.3, 201.3 y 305.4 metros. Al igual que en la estación AC01 y AC02, de acuerdo a la geología que se ha cartografiado en el sector, estos valores podrían corresponder a la unidad denominada como ignimbrita riolitica Encimada (Eri) y al igual que en las estaciones AC01, AC02 Y AC05 estas variaciones pueden ser producto de los cambios en el mismo paquete rocoso durante la actividad volcánica que da origen a este tipo de depósitos volcaniclástico, o más importante aún, a los eventos tectónicos e hidrotermales que actual en el sistema caldericos y que cambian las propiedades físicas de la roca, dando como resultado cambios que se ven reflejados en el comportamiento de las ondas que la atraviesan. Como resultado final, en esta inversión se tiene a la profundidad de 305.4 metros un cambio de Vs a 2,598.5  $m/s$  y una densidad de 2,987.8  $kg/m^3$ , valores que podrían corresponder a la unidad inmediatamente inferior al paquete volcaniclástico y que de acuerdo al mapa geológico corresponden a derrames lávicos denominados como lavas andesíticas Colorada (Coal), aunque es muy importante mencionar que un derrame lávico puede presentar variaciones composicionales que dan como resultado a un paquete de rocas lávicas que puede presentar desde composición andesítica hasta basáltica y de acuerdo a la densidad de esta última capa que dio como resultado la inversión, es más probable que al menos hasta el lugar donde avanza el flujo, este tenga una composición más básica.

➤ **Estación AC07.**

La inversión de la curva  $H/V$  de esta estación, dio como resultado hasta los 5.8 metros de profundidad 3 capas con una velocidad de onda S muy baja, de 105, 172 y 179  $m/s$ , estas tres primeras unidades posiblemente corresponden a diferentes tipos de suelos blandos presentes en el lugar. Desde los 5.8 hasta los 155 metros de profundidad, aparece una capa con  $V_s$  de 592  $m/s$  y densidad de 1,612  $kg/m^3$ , esta es probable que corresponda de acuerdo a la visualización del mapa geológico, a las lavas riolíticas de Pedernales (Pdl) con una intensa alteración hidrotermal, la cual podría provocar un alto debilitamiento de la roca, cambiando considerablemente sus propiedades físicas. A partir de los 155 hasta los 362 metros, es muy probable que las siguientes capas de roca sigan correspondiendo a lavas riolíticas de Pedernales, con aumentos graduales en  $V_s$  hasta los 1,524  $m/s$  y una densidad de 2,473  $kg/m^3$ , muy cercana a la de este tipo de rocas en un estado inalterado. La última capa que se tiene en esta inversión es la que continua o inicia a partir de los 362 metros con una velocidad de 2,452  $m/s$  y una densidad considerablemente alta de 2,731  $kg/m^3$ . Esta última capa de acuerdo a la geología, muy probablemente corresponde a un derrame lávico de intermedia/alta densidad, como por ejemplo, la unidad de lavas cartografiadas con el nombre de traquiandesitas basálticas Águila (Atal), una unidad posterior (cronológicamente hablando) a los derrames lavas de traquiandesitas basálticas Viejo (Vtal), aunque por la cercanía de la estación con dichos derrames y la dirección de flujo de los mismos, se asume que es mas probable que dicha capa corresponda a la unidad Atal.

➤ **Estación AC08.**

Las dos primeras capas producto de la inversión de la curva  $H/V$  de esta estación, presentaron valores muy bajo de  $V_s$  desde 158 a 357  $m/s$ , hasta una profundidad de 0.7 metros, las cuales estarían asociadas al suelo del sitio. De acuerdo a la cartografía geológica del sector, la estación se encuentra en una zona de alteración hidrotermal en la unidad de derrames lávicos denominada como lavas andesíticas Colorada (Coal), una de las consecuencias que podría haber causado diferentes cambios en las propiedades físicas de esta unidad rocosa y lo cual se ve reflejado en las siguientes capas de la inversión. Desde los 0.7 metros de profundidad, se obtuvieron cuatro capas adicionales a profundidades de 24.6, 64.5, 103.6 y 328.3 metros, con velocidades de onda S de 413

*m/s*, 634 *m/s*, 708 *m/s*, 1,248 *m/s*, y densidades de 1,269 *kg/m*<sup>3</sup>, 1,890 *kg/m*<sup>3</sup>, 1,909 *kg/m*<sup>3</sup> y 2,006 *kg/m*<sup>3</sup> las cuales de acuerdo a lo mencionado anteriormente, es muy probable que correspondan a diferentes grados de alteración hidrotermal de la misma unidad Coal. Finalmente, la última capa obtenida en la inversión comienza a los 328.3 metros y presenta valores de Vs y densidad de 2687 *m/s* y 3109 *kg/m*<sup>3</sup> respectivamente. Estos valores podrían corresponder a la unidad Coal sin algún grado de alteración hidrotermal que pudiera afectar de manera drástica propiedades físicas y químicas de la roca. Además, en contraste con la correlación de la estación AC06, estos valores son muy similares al último sustrato o capa de roca de dicha estación, la cual está a escaso kilómetros al este de la estación AC08. Probablemente a la profundidad que se presenta esta unidad y con los valores de Vs y principalmente de densidad, podría corresponder a un flujo lávico de composición más básica de la misma unidad, o a la parte inicial de dicho derrame.

#### ➤ **Estación AC09.**

Esta estación se instaló en la parte externa de la caldera, en una zona de valle o por su geomorfología, una microcuenca, limitada por unidades como: lavas andesíticas Colorada (Coal) lavas traquiandesitas de Cuautelolulco (Cual) y flujos de traquiandesitas basálticas la Paila (Plc) producto de la actividad volcánica de conos de escoria e incluso podría hacer parte del basamento rocoso de dicha microcuenca, la unidad de ignimbrita riolítica Encimada (Eri) de acuerdo a la geología de la zona. La inversión de la curva *H/V* de esta estación, dio como resultado dos capas iniciales con Vs de 287 *m/s* y 357 *m/s* a profundidades de 3.2 y 4.4 metros, que indiscutiblemente corresponder al suelo del sitio. Siguiendo la idea cronológica de las unidades que muy probablemente se encuentran en una columna litológica en el subsuelo del sitio o estación, la más profunda y antigua sería Coal seguida de la unidad Cual, por encima de estas dos, si los flujos piroclásticos alcanzaron el área, en dicha columna seguramente sigue la unidad Eri y finalmente sobre todas las anteriores se tendría a la unidad más joven Plc, incluso de acuerdo a la cartografía geológica se puede observar coherencia en la anterior secuencia. En relación a lo anterior, se esperaba que la siguiente unidad obtenida en el perfil de velocidad, sus valores correspondan a los de la unidad Plc, con Vs mayor a 2000 *m/s* y de acuerdo a la composición de las rocas de dicha unidad, con una densidad mayor a 2500 *kg/m*<sup>3</sup>.

Siguiendo el orden litológico, la siguiente capa esperada en el perfil de velocidades era una capa con una velocidad y densidad semejante a las descritas en estaciones anteriores y a las que se le atribuyó a la unidad Eri. Lo anterior muestra un inconveniente al momento de realizar las inversiones, pues claramente este es un ejemplo en el cual tenemos una disminución de la velocidad de onda S y obviamente de onda P con aumento de la profundidad, es decir,  $V_n > V_{n+1}$ , lo cual no cumple con un aumento progresivo de la velocidad de ondas con el aumento de la profundidad. Aunque el módulo Dinver con el cual se obtuvieron las diferentes inversiones de la curva  $H/V$  permite hacer cambios en la relación de velocidad entre capas, el proceso se torna complejo, pues los desajustes entre la curva teórica y la experimental se vuelven mayores y con menor coincidencia entre sí, lo que lleva a pensar sobre la susceptibilidad del método y el software a este tipo de variaciones en el medio. Asumiendo que la unidad Plc no es el primer sustrato rocoso en la microcuenca y por el contrario la primera unidad corresponde a Eri, entonces la tercera, cuarta, quinta e incluso sexta capa de la inversión con Vs de 630  $m/s$ , 964  $m/s$ , 1,033  $m/s$ , 1,075  $m/s$ , densidades de 1,798  $kg/m^3$ , 1986  $kg/m^3$ , 2,047  $kg/m^3$ , 2,123  $kg/m^3$  y a profundidades de 108.5, 146.3, 293.7 y 420.3 metros respectivamente, podrían corresponder a las secuencias volcánicas asociadas a eventos piroclásticos que dieron a origen a este tipo de rocas, que como se mencionó en estaciones anteriores, podrían corresponder a una unidad con diferentes pulsos eruptivos que dan como resultado diferentes grados de composición y consolidación o soldamiento de las ignimbritas, teniendo en cuenta además el grado de meteorización que pueden tener la unidad en su parte más superficial y/o si presenta alguna alteración hidrotermal que cambia sus propiedades físicas y que no se ha manifestado en superficie. Finalmente, en el perfil se obtuvieron dos capas adicionales con Vs de 2,116  $m/s$ , 2,384  $m/s$ , densidad de 2,302  $kg/m^3$ , 2720  $kg/m^3$  y a profundidades de 420.3 hasta 507.8 metros respectivamente, de las cuales la primera de ellas podría corresponder a la unidad Cual y la última a la unidad más vieja Coal.

Cabe aclarar que la última suposición no es tan viable, pues como se mencionó anteriormente, de acuerdo a la geología es muy probable la presencia de la unidad Plc, la cual sería la secuencia más superficial del “basamento relativo” de la microcuenca.

➤ **Estación AC10.**

En esta estación las tres primeras capas que dio como resultado la inversión de la curva  $H/V$ , con velocidades de  $V_s$  292 392 475 y a profundidades de 1.6, 4.5 y 21 metros respectivamente, corresponden al suelo del sitio. De acuerdo a la cartografía geológica del área, la estación se instaló sobre la unidad cartografiada como conos de escoria y lavas andesíticas de Terrerillos (Tal). Además, en las unidades cercanas a la estación o cerca del sector como la ignimbrita andesítica de Acoculco (Aai), Pdl, Coal y depósitos aluviales (Al) se ha descrito la presencia de varios tipos de alteración hidrotermal, e incluso cartografiadas sobre dichas unidades. Lo anterior lleva a pensar que la unidad Tal también podría haber sido afectada por dichos procesos de alteración asociados a la circulación de fluidos geotermales y lo cual puede estar evidenciado en las siguientes capas que mostró la inversión. La cuarta, quinta, sexta y séptima capa o sustrato rocoso muestran un aumento gradual de velocidad de onda S desde 919  $m/s$ , 1,006  $m/s$ , 1,406  $m/s$ , 1,555  $m/s$ , densidades de 1,432  $kg/m^3$ , 1,755  $kg/m^3$ , 2,030  $kg/m^3$ , 2,293  $kg/m^3$  y a profundidades de 84.2, 120, 200.4 y 205.9 metros respectivamente, los cuales podrían corresponder a la misma unidad Tal, pero con diferentes grados de alteración hidrotermal y sumado a esto los procesos físico-químicos que en el transcurso del tiempo han generado diferentes grados de meteorización de la unidad. Además, es importante tener en cuenta los eventos tectónicos que se han desarrollado en la zona y que también podrían haber dado origen al fracturamiento de las unidades cambiando así sus propiedades físicas. Otra consideración que es de suma importancia a tener en cuenta en este tipo de unidades, son los dos posibles eventos volcánicos que se pueden dar durante un episodio eruptivo. Generalmente y en muchos casos, durante una erupción volcánica el primer evento corresponde a una erupción explosiva como consecuencia de una desgasificación del magma, dando como resultado la liberación grandes cantidades de material piroclástico, el cual no siempre corresponde a depósitos de tipo ignimbrita. Seguido de dicho explosivo en muchos casos continúan los eventos efusivos de un mismo pulso eruptivo, dando lugar a los derrames lávicos como los que se han cartografiado en el área de estudio. Si se toma en cuenta esta consideración, es muy probable que algunas de las capas que suprayace o infrayacen a los derrames lávicos como las de esta estación o en estaciones descritas anteriormente, correspondan tanto a procesos de alteración hidrotermal como también a estos eventos explosivos y efusivos que de alguna manera

podrían dar origen a estas diferentes capas que se visualizan en los perfiles de inversión. A 397.9 metros de profundidad la inversión de la curva muestra una octava capa con  $V_s$  a 1,614  $m/s$  y un aumento considerable en la densidad de 2,751  $kg/m^3$ . Este sustrato rocoso probablemente se trate de la unidad Tal con un grado muy bajo tanto de alteración hidrotermal, tectonismo e incluso meteorización. Finalmente, a una profundidad mayor que 397.9 metros se encuentra la última capa de esta inversión con un aumento considerable en la velocidad de onda S de 2,816.7  $m/s$  y densidad de 2,937  $kg/m^3$ , la cual se podría correlacionar de acuerdo a la geología con las lavas traquiandesita basáltica de Manzanito (Mtal) una unidad más vieja que probablemente se encuentra justo por debajo de la unidad Tal.

➤ **Estación AC11.**

La inversión de la curva  $H/V$  de esta estación permitió obtener dos primeras capas con velocidades de 123 y 171  $m/s$ , a profundidades de 3.8 y 9.2 metros de profundidad, las cuales estas asociadas a dos diferentes tipos de suelo en el sitio. A partir de 9.2 hasta 42 y 102.4 metros, se obtuvieron dos capas o sustratos rocosos con  $V_s$  de 353  $m/s$  y 628  $m/s$  y con densidades de 2,073  $kg/m^3$  y 2,113  $kg/m^3$ . Estas dos capas muy probablemente corresponden a diferentes grados de meteorización (saprolito) y/o fracturamiento de las rocas que hacen parte de la unidad geológica sobre la cual se encuentra la estación y que de acuerdo a la geología del área es la unidad de lavas traquiandesitas basálticas de Manzanito (Mtal). A una profundidad mayor a los 102.4 se obtuvo una última capa con un aumento considerable en  $V_s$  de 2,531.4  $m/s$  y densidad de 2,817  $kg/m^3$  la cual podría corresponder a las rocas de la unidad Mtal que no se han visto afectadas por un alto grado de fracturamiento o alteraciones físico-químicas.

➤ **Estación AC12.**

Esta estación fue instalada en una zona de valle o una microcuenca desde el punto de vista geomorfológico y limitada por las unidades domo traquiandesítico Ajolotla (Atad) y domo Coulée riolitico Ailitla (Arcd) siendo esta última la unidad más reciente de las dos. De acuerdo a lo anterior la inversión de la curva  $H/V$  de esta estación, mostró dos capas superficiales relacionadas con los suelos del sitio y con velocidades de onda S de 249 y 581  $m/s$  a profundidades de 9.4 y 30.4 metros respectivamente. Las dos siguientes

capas que dio como resultado la inversión, presentan velocidades de 1,013 y 1,142  $m/s$ , densidades de 1,771 y 1,880  $kg/m^3$ , a profundidades de 44.3 y 87 metros respectivamente, las cuales no necesariamente podrían estar asociadas a depósitos volcanoclásticos o rocas volcánicas como se ha descrito en estaciones anteriores, por lo que también podrían considerarse de acuerdo al sitio asociado a una microcuenca o una zona de valle donde se genera una gran acumulación de sedimentos, a depósitos sedimentarios con diferentes grados de diagénesis, compactación y/o litificación, sin obviar la posibilidad que dentro de los depósitos de dicha microcuenca también puedas estar presentes secuencias piroclásticas. Finalmente, la quinta y última capa obtenida, presenta valores de onda S de 1,878  $m/s$  y densidad de 2,100  $kg/m^3$ , a una profundidad mayor a 87 metros. Esta última podría estar relacionada posiblemente con una roca dura con algún grado de meteorización y/o fracturamiento que hace parte del basamento de la microcuenca y que de acuerdo a la geología del sector podría ser la unidad más joven denominada como Arcd.

➤ **Estación AC15.**

De acuerdo al mapa geológico, esta estación se instaló sobre la unidad denominada como ignimbrita andesítica de Acoculco (Aai) donde además se han reportado y cartografiado diferentes grados de alteración hidrotermal sobre las rocas que hacen parte de dicha unidad. La inversión de la curva  $H/V$  de esta estación dio como resultado un perfil con siete capas, de las cuales las tres primeras presentan velocidades de onda S muy bajas de 101  $m/s$ , 151  $m/s$ , 212  $m/s$ , a profundidades de 7.3, 7.7 y 8.9 metros respectivamente, correspondientes al suelo del sitio. La cuarta, quinta y sexta capa muestran un aumento relativo en Vs de 374  $m/s$ , 489  $m/s$ , 555  $m/s$ , con densidades de 1,453  $kg/m^3$ , 1,589  $kg/m^3$ , 2,073  $kg/m^3$ , a profundidades de 36.3 54.2 y 175 metros. Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, estas podrían corresponder a la unidad Aai con diferentes grados de meteorización, fracturamiento y más importante aún, de acuerdo a la cartografía geológica, a diferentes grados de alteración hidrotermal que han afectado a las rocas volcanoclásticas que configuran dicha unidad geológica. Finalmente, a una profundidad mayor a los 175 metros se obtuvo una séptima capa con Vs de 973  $m/s$  y densidad de 2,817  $kg/m^3$ , siendo este último valor el que lleva a pensar que la capa corresponde a una roca muy diferente a una ignimbrita, pues este tipo de densidades y de

acuerdo al ambiente geológico, estaría más relacionada con un flujo lávico poco diferenciado o de tipo intermedio-básico, como derrames andesíticos o andesitas basálticas, que de igual forma se habrían visto afectadas por algún proceso físico como tectonismo o alteraciones hidrotermales que cambian sus propiedades físicas originales y las cuales se ven reflejadas en la velocidad de las ondas que las atraviesan. Por lo anterior esta última capa podría corresponder a los eventos pre-caldera o a los eventos volcánicos extra caldera que seguramente también se encuentran en la parte interna de la misma.

➤ **Estación AC16.**

La inversión de la curva  $H/V$  de esta estación permitió obtener un perfil de velocidades con siete capas. Las dos primeras corresponden al suelo del sitio y son las que presentan valores en onda S más bajos de  $108\text{ m/s}$  y  $198\text{ m/s}$ , a profundidades de 7 y 13.8 metros. La tercera, cuarta, quinta excepto la sexta capa, muestran un aumento poco significativo en los valores de onda S de  $219\text{ m/s}$ ,  $256\text{ m/s}$ ,  $264\text{ m/s}$ ,  $645\text{ m/s}$ , con densidades de  $1,503\text{ kg/m}^3$ ,  $1,594\text{ kg/m}^3$ ,  $1,651\text{ kg/m}^3$ ,  $2,025\text{ kg/m}^3$  y a profundidades de 17.1, 42.2 49.1 y 370.7 metros. Se pueden asumir dos consideraciones para estas cuatro capas o sustratos rocosos. La primera de ellas se asocia a la meteorización a la cual pudo haber estado expuesta la roca, dando lugar al desarrollo de diferentes horizontes, saprolito y/o suelos para las capas más superficiales y que claramente presentan diferentes grados de degradación física y/o química sobre la roca sana. La segunda consideración y la más importante se asocia con el lugar donde se instaló la estación, estuvo en la parte norte de la caldera muy cerca de las estructuras desarrolladas durante el colapso de la misma y que dieron origen a un fallamiento anular. Por lo tanto, las unidades geológicas pre, sin y post fallamiento se han visto afectadas por este tipo de estructuras, pues estas siguen actuando a través del tiempo aun cuando ha cesado la actividad volcánica, buscando establecer un equilibrio en el sistema. La última y séptima capa de la inversión a una profundidad mayor de 370.7 metros, presenta una velocidad de onda S de  $1,023.6\text{ m/s}$  y densidad de  $2,528\text{ kg/m}^3$ , podría corresponder a la unidad sobre la cual se han desarrollado los seis sustratos rocosos anteriores y la cual de acuerdo a la cartografía geológica del sector corresponde a la unidad domo riolítico Canoas (Crd). La densidad es muy coherente con el tipo de roca, pero la velocidad de onda S para este tipo de roca,

asumiendo que no presenta ninguna degradación, es muy baja, lo que sugiere que la roca probablemente se encuentra muy afectada por los eventos tectónicos del sector, pues el fracturamiento de una roca no involucra cambios significativos en la densidad de la misma, pero genera grandes efectos en el modo en como las ondas viajan a través del medio con ese tipo de porosidad secundaria.

➤ **Estación AC18.**

Para esta estación se obtuvieron como resultado seis capas en la inversión de la curva  $H/V$ . Las dos primeras de ellas con valores de  $V_s$  de 357 y 457  $m/s$ , a profundidades de 8.1 y 10.4 metros respectivamente, y las cuales corresponden al suelo del sitio. Se observó que, de acuerdo a la cartografía geológica de la zona, la estación se encuentra sobre la unidad lava riolítica Pedernales (Pdl), sobre la cual también se reportaron y cartografiaron zonas de alteración hidrotermal. En relación a lo anterior es probable que la unidad Pdl presente variaciones considerables en sus propiedades físicas y las cuales podrían estar evidenciadas en las capas tres cuatro y cinco, para las cuales se obtuvieron velocidades de onda S de 935  $m/s$ , 1,435  $m/s$ , 1,508  $m/s$ , con densidades de 1,200  $kg/m^3$ , 1,257  $kg/m^3$ , 2,274  $kg/m^3$  y a profundidades de 150 327 y 427 metros respectivamente. Probablemente quinta capa o sustrato rocoso corresponda a la unidad Pdl con un menor grado de debilitamiento producto de los procesos hidrotermales e incluso tectónicos. La sexta capa de esta inversión presenta valores de  $V_s$  de 2,938  $m/s$ , densidad de 2,978  $kg/m^3$ , a una profundidad mayor a 427 metros, la cual, de acuerdo a los eventos geológicos del sector, corresponde muy probablemente a la unidad lava andesita basáltica Huistongo (Hbl) que además, de acuerdo a los valores de  $V_s$  y densidad que tienen correspondencia con estas rocas, probablemente no presenta afectaciones por los procesos hidrotermales que si afectan a la unida Pdl que suprayace a este tipo de rocas.

### 13.3 Valores de porosidad secundaria usando el principio de Delesse.

Autores como Oleschko (1999) y Torres-Argüelles et al. (2010) han implementado metodologías estadísticas para el cálculo de porosidad en diferentes tipos de suelos, que al estar expuestos a diversos eventos físicos y químicos de intemperismo, podrían haber cambiado sus propiedades originales, es decir, dichos eventos o procesos pueden ser uno de los causantes principales que dan lugar a la degradación física del medio (suelo), como agrietamientos producto de las raíces de la vegetación y/o agrietamientos por procesos de desecación. Desde el punto de vista de la degradación química, principalmente por disolución de algunos componentes del suelo, posibles fluidos que entran en contacto con el medio generando un aumento de espacios entre partículas como líticos o granos minerales y que, a su vez, los sólidos disueltos en dichos fluidos, pueden precipitar dentro de las cavidades, espacios, poros o fracturas que ellos mismos han generado y en los espacios preexistentes. Oleschko (1999) implementó la metodología estadística “Modelo Fractal Unificado” (MFU) para el cálculo de la porosidad unidimensional, bidimensional y tridimensional de diferentes tipos de suelo basándose en el principio de Delesse. En general, para los valores altos que obtuvo el autor, están asociados a un suelo que presenta una porosidad secundaria relativamente alta en comparación con otros tipos de suelos.

En este trabajo se obtuvieron valores de porosidad secundaria aplicando el principio de Delesse, para 17 de las 18 estaciones que hicieron parte de la red sísmica de Acoculco. Recordando que este análisis puede llevarse a cabo para datos unidimensionales o trazas autoafines, las señales sísmicas de manera resumida, para este caso, son señales en tiempo de las variaciones de la amplitud de las diferentes ondas que viajan a través del medio. Por lo tanto, el cociente espectral obtenido de la relación de las componentes horizontales con la vertical, sigue siendo una señal que, para fines de estudios e interpretaciones geofísicas, su tratamiento y construcción se realiza en el espacio de las frecuencias. El cociente espectral obtenido y del cual se decidió extraer un segmento de la curva  $H/V$  para su inversión y obtención de un modelo de velocidades 1D, es la traza autoafin a la cual se le realizó el procesamiento estadístico y a partir de la cual, se obtuvieron los diferentes valores de porosidad de Delesse para toda la columna litológica que dio como resultado la inversión de la curva  $H/V$ .

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, las estaciones que presentan los valores más altos de porosidad secundaria (NL) son: AC12 (119.67), AC02 (90.59), AC03 (28.73), AC15 (23.32), AC17 (17.50) y AC08 (16.61). Observando los sitios en los que fueron instaladas estas estaciones (figs. 24b y 25), se pudo determinar que todas ellas a excepción de la AC08 y AC03, se encuentran muy cerca de zonas que estructuralmente fueron y son activas y dieron lugar a la configuración de diversos sistemas de fallas, tanto de los procesos tectónicos que dieron origen al emplazamiento de la caldera, como a los posteriores a esta. Como ejemplo, la estación AC02, la cual se encuentra en la parte nor-este de la caldera muy cerca de una zona de fractura que se ha cartografiado como la posible continuación del anillo de colapso de la estructura (fig. 25), es decir, una zona que muy probablemente ha tenido actividad tectónica y/o deformación local, y la cual, habría generado continuos fracturamientos de las unidades que al menos se lograron observar con la inversión de la curva *H/V* de esa estación.

Igualmente sucede con la estación AC12, aparentemente su instalación se llevó a cabo en una zona de valle, el cual se desarrolló por una gran y profunda disectación de las unidades presentes en el sector, la cual podría deberse a un posible alineamiento que genera un mayor debilitamiento de las rocas, dando como resultado una mayor meteorización y erosión de las mismas. Incluso la estación AC11 (9.94) parece estar relacionada con un sitio sobre el cual se han desarrollado estructuras producto del fallamiento anular de la caldera (fig. 25). Teniendo en cuenta las anteriores descripciones y observando la localización de las otras estaciones como la AC17 y AC15, se determinó que su instalación fue cerca de sectores que muy probablemente están altamente afectados por esfuerzos locales y regionales.

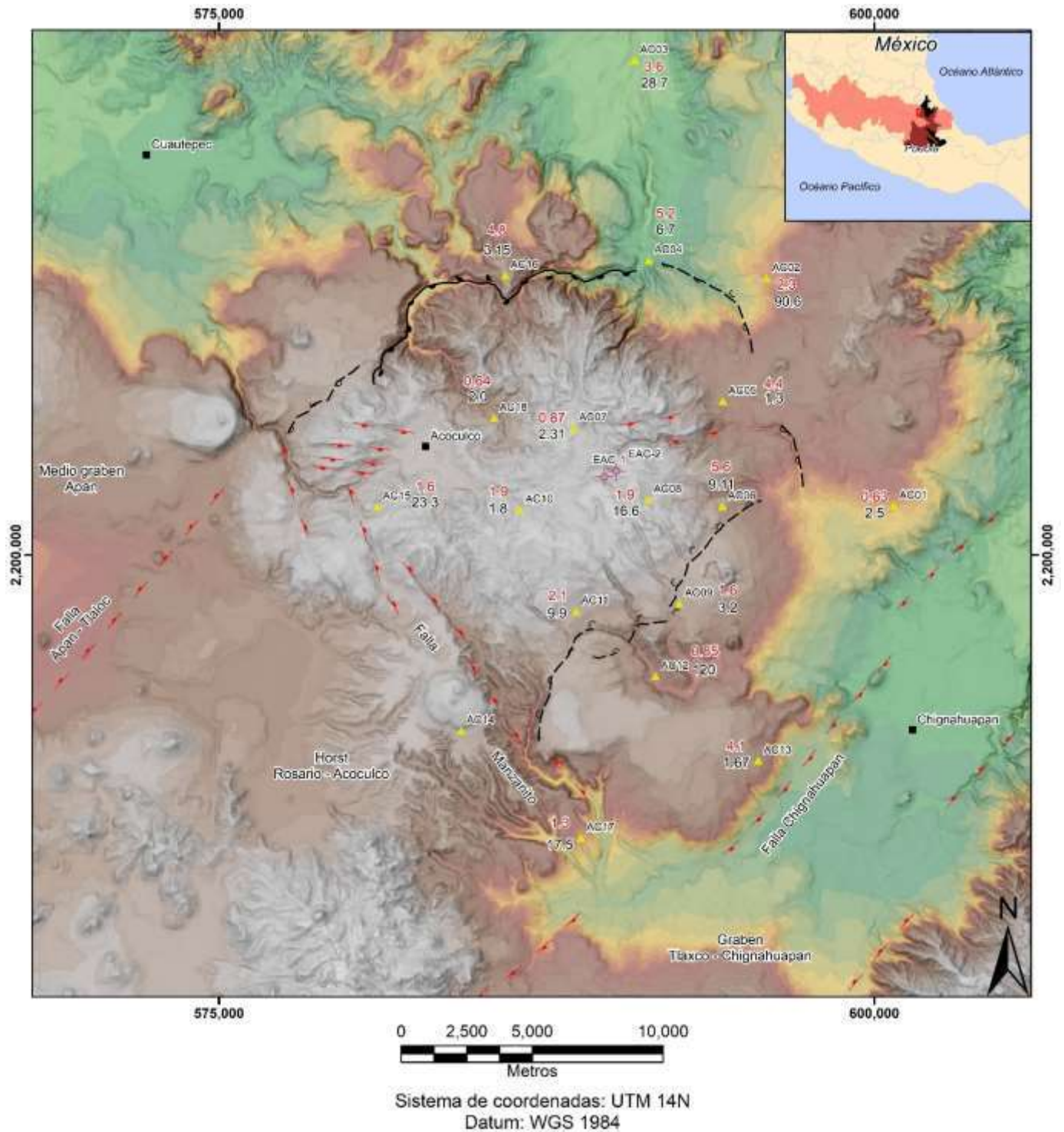
Siguiendo la premisa anterior asociada al fracturamiento pre, sin y post-calderico, las estaciones AC04 (6.96) y AC16 (3.15) las cuales, se encuentran en la parte norte de la caldera (fig. 25), son las que más cerca se encuentran de una zona de falla asociada al anillo de colapso de la caldera, pero son estaciones con valores relativamente bajo de porosidad secundaria, en relación a las anteriores estaciones. Una de las causas por la cual se podría estar presentando esta irregularidad, posiblemente se deba al mismo sellamiento de las fracturas producto de la interacción con fluidos hidrotermales que circularon sobre las rocas de la zona y que provocaron el sellamiento de la porosidad producto del fracturamiento. La estación AC04 es la que más podría probar esta posible afirmación, pues ella se encuentra

sobre la unidad Atal (fig. 24b), sobre la cual se ha cartografiado manifestaciones de alteraciones hidrotermales.

En relación a la ubicación de las estaciones sobre o cerca de zonas de fallas o alineamientos, la estación AC13 (1.67) se encuentra sobre el bloque de piso o también llamado bloque yacente de la que se ha cartografiado como falla Chignahuapan con dirección NE-SO (fig. 25). El valor de porosidad secundaria de esta estación es muy bajo respecto a las otras estaciones, seguramente hasta el sitio donde se encuentra la estación, la columna litológica del lugar no presenta mayor afectación por este alineamiento estructural, al menos hasta la profundidad que se logró obtener en la inversión. Las estaciones AC01 (2.47), AC05 (1.34) y AC06 (9.11) igualmente presentan un valor bajo de NL respecto a las primeras estaciones mencionadas, estas se encuentran en la parte oriente y nor-oriental de la caldera y relativamente alejadas de zonas de alineamientos estructurales (fig. 25).

Las estaciones AC07 (2.31), AC08 (16.61), AC10 (1.82) y AC18 (1.99) son las que se encuentran en la parte central de la caldera y cuyos valores son relativamente bajos a excepción de AC08. La particularidad de este sector está en la gran cantidad de áreas cartografiadas con alteraciones hidrotermales, posiblemente los procesos geotermales han generado sellamiento de fracturas en las diferentes unidades de la zona y esto se estaría reflejando en los valores bajos de NL obtenidos en este trabajo de investigación (figs. 24b y 25). Lo anterior se puede apoyar en el trabajo de López-Hernández (2009) quien describe para la mayoría de las unidades del pozo exploratorio EAC01 (fig. 24a), fracturas con silicificación, es decir, una porosidad secundaria muy baja producto de la precipitación de las sustancias diluidas en los fluidos hidrotermales, e incluso describe la ausencia de fracturas para algunas unidades que hacen parte de la columna litológica de la zona.

Finalmente, para la estación AC09 no se podría dar una explicación para el valor NL obtenido, pues su inversión posiblemente no cumple con las condiciones mencionadas en la parte de correlación del perfil de velocidad. Para la estación AC14 no fue posible realizar la inversión de la curva  $H/V$  debido a que esta relación dio como resultado un espectro con una amplificación muy cercana a 1 (fig. 17), relativamente plana, lo cual imposibilitó la selección de un modo fundamental para su inversión.



**Figura 22.** Mapa de elevación digital en el que se han marcado los valores de porosidad de Delesse (NL; en negro) y exponente de frecuencia acumulada (Efa; en rojo) para 17 estaciones de la red sísmica de Acapulco. Estructuras tomadas de Avellán et al., (2018).

### **13.4 Exponente de frecuencia acumulada (Efa).**

En el caso de este trabajo, el fracturamiento juega un papel muy importante tanto desde el punto de vista económico para futuras perforaciones para la producción de energía eléctrica, como para el entendimiento de la criticalidad de la corteza superior. Siguiendo la idea de la pila de arena (Bak, 2002) para el caso de la zona de estudio, cada grano que se ha ido agregando al sistema, corresponde probablemente a diversos fracturamientos productos de diversos eventos tectónicos o deformacionales, tanto locales como regionales que han afectados a las rocas que hacen parte de la configuración geológica de la zona de estudio. En el transcurso del tiempo geológico, cada evento tectónico que ha dado lugar a la configuración del sistema calderico, son los causantes de cada fractura (granos de arena) que se ha ido acumulando en cada una de las secuencias tanto ígneas volcánicas, volcanoclásticas, plutónicas, como metamórficas (de contacto) hasta sedimentarias (calizas de la Sierra Madre Oriental) y que han llevado a la corteza a diferentes grados de criticalidad. Cabe como posibilidad, que en algún momento ocurra un evento natural como, por ejemplo, un sismo o un evento antropogénico como un fracturamiento hidráulico, los cuales, se tratarían del último grano de arena (fractura) que soporta el sistema para llegar al colapso, el cual, para este estudio podría corresponder a una gran interconexión de fracturas, hasta volver a un estado crítico y auto-organizado.

En este trabajo de investigación se propone la idea del estado de criticalidad, en el cual, puede encontrarse la corteza superior en cada punto del subsuelo de las 17 estaciones de la red sísmica de Acoculco, de las cuales se lograron obtener los valores de exponente de frecuencia acumulada (Efa). Los valores altos (máx. 5.6) (fig. 25), se asocian a una mayor criticalidad, respecto a los valores bajos (min. 0.62). Las estaciones con los valores más altos de Efa son: AC06 (5.605), AC04 (5.176), AC16 (4.783), AC05 (4.435), AC13 (4.105) y AC03 (3.621), AC02 (2.331), AC08 (2.309) y AC11 (2.112). Las estaciones restantes son las que tienen los valores de Efa bajos o menores a 2: AC10 (1.961), AC09 (1.610), AC15 (1.550), AC17 (1.311), AC07 (0.874), AC12 (0.850), AC18 (0.635) y AC01 (0.628). Tomando los valores altos de Efa, como sectores de la zona de estudio donde la corteza se encuentra más cerca del estado crítico en relación a los valores bajos.

La estación AC04 y AC16 presentan valores altos de Efa, estas se encuentran en la parte norte de la caldera muy cerca de una falla semicircular producto del colapso de la estructura (fig. 25). Cabe mencionar que estas mismas estaciones en contraste presentan bajos valores de porosidad de Delesse (NL).

Es de gran importancia aclarar que los dos análisis estadísticos Efa y NL no dependen o están directamente relacionados uno del otro. Por ejemplo, la estación AC04 se instaló sobre la unidad Atal (fig. 24b), la cual, según la cartografía geológica, el sector de la instalación presenta alteraciones hidrotermales, teniendo así dos eventos que podrían dar respuesta a los valores altos de Efa y bajos de NL. Como se mencionó anteriormente, en el transcurso del tiempo geológico diversos eventos tectónicos han afectado la zona, como el mismo colapso de la caldera que dio origen a un sistema de fallas semicirculares, las cuales habrían causado un intenso fracturamiento de las rocas, es decir, una gran acumulación de fracturas que generaron un incremento en la criticalidad de la corteza del sector. Así mismo, el fracturamiento y/o fallamiento habría sido el evento que permitió la migración de fluidos geotermales, que a su vez precipitaron y sellaron dicho fracturamiento, dando como resultado los valores Efa y NL que se obtuvieron para la columna litológica justo por debajo de la estación AC04.

La estación AC16 igualmente se instaló muy cerca de esa porción del anillo de colapso, presentando un valor alto de Efa y aunque cartográficamente no hay reportadas alteraciones hidrotermales afectando las rocas bajo esta estación, esto no implica la ausencia de alteraciones a profundidad, por lo cual, muy probablemente los valores de porosidad son bajos de acuerdo a NL, pero el fracturamiento presenta un estado crítico alto. La estación AC13 presenta un valor de Efa alto y bajo NL. Esta estación justo se encuentra en lo que sería el bloque de piso o bloque yacente de la falla Chignahuapan (fig. 25). En la secuencia litológica del sector podría ocurrir que la porosidad de acuerdo a NL es baja, pero el sistema de fracturas que afectan a las secuencias, aunque no sea muy intenso, se encuentra en un sistema muy cercano al crítico, al igual como sucede con la estación AC16.

Las estaciones AC05 y AC06 al igual que las anteriormente descritas, presentan altos valores de Efa y bajos valores de NL, con la diferencia que estas dos últimas aparentemente no se

encuentran cerca de un alineamiento o fallamiento (fig. 25), pero recordando lo mencionado anteriormente, la zona de estudio ha estado expuesta a diferentes fenómenos tectónicos a través del tiempo, los cuales son los causantes del aporte de diferentes fracturamiento en diferentes tiempos. Además, en muchas ocasiones existen fallas que aún no tienen manifestación en superficie o que simplemente el plano de falla o plano de ruptura aún no alcanza a llegar a superficie. De acuerdo a lo anterior, probablemente ocurre algo similar con la estación AC03, con la diferencia que para esta el valor de NL es relativamente alto comparado con las anteriores estaciones.

La estación AC02 presenta un valor de Efa no muy alto como las primeras estaciones, pero si el segundo valor más alto de porosidad de Delesse. Esta estación se encuentra cerca de la continuación del fracturamiento producto del anillo de colapso (fig. 25), donde probablemente se ha generado un gran fracturamiento, que ha generado un aumento en la porosidad de la columna litológica del sector, pero sin estar sometida a un punto muy cercano al crítico.

La estación AC08 se instaló sobre un sitio aparentemente sin mucha influencia de fallas o fracturamiento cercano y de acuerdo a la cartografía geológica en el sector de instalación se reportan zonas de alteración hidrotermal (fig. 24b), lo cual podría explicar un valor no muy alto de Efa y muy bajo en NL. Finalmente, para la estación AC11 con el valor más bajo de Efa respecto a las anteriores estaciones, su instalación se llevó a cabo en una zona posiblemente afectada por el fracturamiento del anillo de colapso de la caldera, lo cual no implica que la corteza en ese sector tenga un grado alto de criticalidad.

Las estaciones restantes corresponden a aquellas con valores de Efa menores a 2. Las estaciones AC10, AC07 y AC18 se encuentran en el centro de la caldera y sobre unidades para las cuales se ha reportado la presencia de alteraciones hidrotermales (figs. 24b y 25), además de una aparente ausencia de fallamientos o fracturamiento, siendo estas las causas probablemente de los bajos valores tanto de Efa como de NL.

La estación AC09 presenta un bajo valor de Efa y NL, pues de acuerdo a la cartografía geológica, no se instaló sobre una zona de alteraciones hidrotermales ni cerca de fallamientos

o fracturamiento (figs. 24b y 25), causas que podrían explicar los bajos valores de los dos análisis estadísticos. En contraste con la anterior estación la AC15 de acuerdo al mapa geológico, se instaló muy cerca de una falla con tendencia NO-SE asociada a la falla Manzanito, aunque es probable que en el sector la secuencia litológica bajo la estación si esté muy afectada por el fallamiento, esto no implica que el sistema de fracturas se encuentre en un estado muy cercano al crítico, lo cual estaría representado en su valor de Efa (figs. 24b y 25).

La estación AC17 al igual que la anterior, se instaló cerca de la traza de la falla Manzanito, hacia la parte sur de la caldera y aunque la zona está probablemente afectada o influenciada estructuralmente por el paso de la falla, no involucra necesariamente que la corteza en ese sitio, esté cercana del punto crítico (fig. 25).

La estación AC01 es la que presenta el valor más bajo de Efa de entre todas las estaciones de la red sísmica, probablemente esta parte de la corteza, es una de las que inicia su evolución hacia el estado críticamente auto-organizado y sumado a esto un valor de NL igualmente bajo en relación a los valores de otras estaciones. Para finalizar, la estación AC12 presenta un valor muy bajo de Efa, pero el valor más alto de NL lo cual no implica relación indirecta de los dos análisis. La zona sobre la cual se instaló esta estación, corresponde morfológicamente a un valle producto de la una intensa disectación de las unidades cercanas, esto podría deberse a un alineamiento que pasa por el sector y da lugar a una mayor meteorización y erosión de las rocas (figs. [3b](#), [4](#), 24b y 25). La anterior podría ser causa de un aumento en los valores de porosidad de la secuencia litológica, pero no necesariamente con implicaciones relevantes en la criticalidad del sistema.

## 14. CONCLUSIONES.

La realización, interpretación y agrupación de los cocientes espectrales, permite discriminar el comportamiento del subsuelo bajo cada sitio o lugar de estudio, pues con esta técnica es posible tener una idea previa de la complejidad geológica donde se lleva a cabo el estudio.

La técnica de  $H/V$  y la inversión de una o varias partes del espectro como una aproximación a una curva de elipticidad, permite de manera teórica obtener modelos uni y bidimensionales útiles del subsuelo, pero es de vital importancia realizar correlaciones de sus resultados con estudios empíricos o probados, tales como, registros de pozo, columnas litológicas y análisis conjunto con otros estudios geofísicos.

Las inversiones de un segmento de la curva  $H/V$ , además de obtener con ellas buenas profundidades de exploración, se logró una buena correspondencia o correlación con la posible configuración geológica presente bajo cada una de las estaciones en las que se realizaron los estudios.

Analizando conjuntamente los valores de porosidad de Delesse, se pudo visualizar la existencia de al menos 4 grupos en los que se pueden clasificar las estaciones de acuerdo a dichos valores. El grupo con valores muy bajos, menores a 20, dentro del cual están las estaciones AC01-04-05-06-07-08-09-10-11-13-16 y AC18. El grupo de valores bajos, mayores a 20 y menores a 40, las estaciones AC03 y AC15. El grupo de valores intermedios, mayor a 80 y menor a 100, la estación AC02. Y el grupo de valores altos, mayor a 100, la estación AC12.

El principio estadístico de Delesse, aunque ha sido aplicado al estudio de la porosidad secundaria en suelos, sigue siendo una técnica estadística en la cual se busca despejar ciertas variables para ejecutar su fórmula, variables que en este trabajo se lograron encontrar satisfactoriamente para desarrollar dicho principio. Aun así, queda abierta la posibilidad de retomar los resultados presentados en este trabajo y someterlos a comparaciones con futuros estudios, que busquen determinar la porosidad de diferentes tipos de rocas a través de metodologías teóricas y empíricas.

La criticalidad de la corteza puede ser muy variables en unos cuantos kilómetros, eso quedó evidenciado en la diferencia de valores exponente de frecuencia acumulada (Efa) entre estaciones cercanas entre sí. Lo anterior es congruente con la geología, es decir, los diversos eventos tectónicos y geológicos en general, tanto locales como regionales, afectan de manera diferencial a la corteza, generando en ella diversos comportamientos que quedan grabados o registrados en las ondas que viajan a través de ese medio anisotrópico, registros que se pueden extraer, analizar e interpretar con diversas técnicas geofísicas, geológicas y geoestadísticas.

Los valores de Efa obtenidos, al igual que los de NL, muestran una agrupación general. Con valores bajos, por debajo de 2, las estaciones AC01-07-09-10-12-15-17 y AC18. Con valores intermedios, mayores a 2 y menores que 4, las estaciones AC02-03-08-11. Con valores mayores a 4, las estaciones AC04-05-06-13-16.

Las metodologías que permitieron obtener los valores de Efa y NL, no tiene relación matemática y/o estadística, aun así, en algunas estaciones como la AC01 (valores bajo de Efa y NL), AC02 (alto NL y bajo Efa), estos valores parecieran relacionarse o estar ligados a un comportamiento geológico específico del lugar de la estación.

Los perfiles 2D realizados en arreglos de máximo de 3 estaciones, son solamente una manera de visualizar los datos puntuales (en cada estación) de variación de la velocidad de onda S con la profundidad. La distancia que existe entre las estaciones que hacen parte de cada perfil, es demasiado grande, incluso puede llegar a superar los 4 kilómetros, distancias considerablemente grandes sobre las cuales pueden existir cambios o variaciones geológicas importantes, razón por la cual es demasiado riesgoso realizar interpretaciones conjuntas de dichos perfiles.

## BIBLIOGRAFIA

- Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors.: Bulletin of the Earthquake Research Institute, v. 35, p. 415–456.
- Amitrano, D., 2012, Variability in the power-law distributions of rupture events, how and why does b-value change.: Eur. Phys. J.-Spec. Top, v. 205(1), p. 199–215, doi:doi:10.1140/epjst/e2012-01571-9.
- Arfken, G.B., and Weber, H.J., 2005, Mathematical methods for physicists: Charlottesville, VA, ELSEVIER, 1–1195 p.
- Avellán, D.R. et al., 2018, Geology of the late Pliocene – Pleistocene Acoculco caldera complex , eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México): v. 5647, p. 11, doi:10.1080/17445647.2018.1531075.
- Bak, P., 1996, How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality.: Nueva York Copernicus., v. ISBN, p. 0–387.
- Bard, P., 1999, Microtremor measurements: A tools for site effect estimation?. The effect of surface geology on seismic motion, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds): 1251-1279:
- Bard, P., Duval, A., Koehler, A., and Rao, S., 2004, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation Sesame European research project: , p. 1–62.
- Bermejo-Santoyo, G., 2018, Análisis geométrico y fractal de fracturas geológicas en los campos geotérmicos del lago de Cuitzeo.: Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio., p. 1- 121.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., and Fäh, D., 2006, The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review, Earth-Science Reviews 79, 205-227.:
- Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B., Urrutia, J., and Macías, J.L., 1999, Environmental

- characteristics of Lake Tecocomulco, northern basin of México, for the last 50,000 years.: *Journal of Paleolimnology*, v. 22, p. 399–411.
- Cantú-Chapa, A., 1969, Estratigrafía del Jurásico Medio-Superior del subsuelo de Poza Rica, Veracruz (Área de Soledad-Miqueta): *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, v. 1(1), p. 3–9.
- Cantú-Chapa, A., 1971, La Serie Huasteca (Jurásico Medio-Superior) del Centro-Este de México: *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, v. 3(2), p. 17–40.
- De Caro, M., Monna, S., Frugoni, F., Beranzoli, L., and Favali, P., 2014, Seafloor Seismic Noise at Central Eastern Mediterranean Sites: *Seismological Research Letters*, v. 85, p. 1019–1033, doi:10.1785/0220130203.
- Chouet, B., De Luca, G., Milana, G., Dawson, P., Martini, M., and Scarpa, R., 1998, Shallow velocity structure of Stromboli Volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of strombolian tremor. *of the Seismological Society of America*, 88:653–666.:
- Crampin, S., 2006, The New Geophysics: a new understanding of fluid-rock deformation.: *Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics – Van Cotthem, Charlier, Thimus & Tshibangu (eds)*, p. 539–544.
- Dangel, S., Schaepman, M., Stoll, E., Carniel, R., Barzandji, O., Rode, E., and Singer, J., 2003, Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs.: *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, p. 128 (1–3), 135–158.
- Figueroa Soto, A., Clemente Chávez, A., and Zúñiga Dávila, F.R., 2010, Deconvolución de sismogramas digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM:p. 1–9,
- Finn, W.D., 1991, Geotechnical engineering aspects of microzonation, *Proc. Fourth Int. Conf. On Seismic Zonation*, Stanford, California, I:, p. 199–259.
- Flores-Estrella, H., 2004, Método SPAC: Una alternativa para la estimación de modelos de velocidades en el Valle de México. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, México.:

- García-Palomo, A., Macías, J.L., Jiménez, A., Tolson, G., Mena, M., Sánchez-Núñez, J.M., and Lermo-Samaniego, J., 2017, NW-SE Pliocene-Quaternary extension in the Apan-Acocolco region, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt.: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 349, p. 240–255.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Tolson, G., Valdez, G., and Mora, J.C., 2002, Volcanic stratigraphy and geologic evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, v. 41, p. 133–150.
- Garduño-Monroy, V.H., and Gutiérrez-Negrín, L.C., 1992, Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano.: *Geofísica Internacional*, v. 31, p. 417–429,
- Geyne, A.R., Fries, C., Segerstrom, K., and Wilson, I., 1963, *Geología y yacimientos minerales del distrito Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Naturales No Renovables reporte interno 5E*, Mexico City, Mexico: , p. 222.
- GIGSA, 2002, Estudio de resistividad con transitorios electromagnéticos en la zona geotérmica de Acocolco, Pue. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Informe Técnico DEX-AC-023/00: , p. 65. Inedito.
- Gómez Alvarez, F., 2019, *Evolución Tectónica y Magmatismo en el Alto Estructural de Chignahuapan Localizado entre las Calderas Acocolco y Los Humeros, Puebla.: Ms.C. UMSNH*, p. 78.
- Gutenberg, B., and Richter, C.F., 1956, Magnitude and Energy of Earthquakes.: *Annali di Geofisica*, v. 9, p. 1–15.
- Heim, A., 1926, Notes on the Jurassic of Tamazunchale (Sierra Madre Oriental, México): *Eclogae Geológicae Helvetiae*, v. 20(1), p. 84–87.
- Hurst, H., 1951, “Long Term Storage Capacity of Reservoirs,”: *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, p. 116,770-799.
- Hurst, H., 1956, Methods of using long-term storage in reservoirs. Eng.: Part 1.Proc. Inst. Civ. Part I. 519 p.,

- Karig, D., Cardwell, R., Moore, G., and Moore, D., 1978, Late Cenozoic subduction and continental margin truncation along the north Middle America Trench.: *Bull Seismol. Soc. Am*, v. 89, p. 265–276.
- Konno, K., and Ohmachi, T., 1998, Ground-motion characteristics estimated from espectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor: *Bull Seismol. Soc. Am*, v. 88–1, p. 228–241.
- Korvin, G., 1992, *Fractal Models in the Earth Science.*: Elsevier, Amsterdam, p. 395.
- De la Cruz, M. V, and Castillo-Hernández, D., 1986, Estudio geológico de la zona geotérmica de la caldera de Acoculco, Puebla. CFE-GPG reporte interno: v. 36/86, p. 23.
- Lermo, J., 1992, Observaciones de microtremores en México y su aplicación en la Ingeniería Sísmica, MS Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México: , p. 75.
- Lermo, J., Antayhua, Y., Bernal, I., Venegas, S., and Arredondo, J., 2009, Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acoculco, Pueblas., México.: *Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 22, p. 40–58.
- Lermo, J., and Chavez-García, F., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station: *Bull Seismol. Soc. Am*, v. 83 No.5, p. 1574–1594, Octubre 1993.
- López-Hernández, A., 2009, Evolucion Volcánica del Complejo Tulancingo-Acoculco y su Sistema Hidrotermal, Estados de Hidalgo Y Puebla, México: Universidad Autonoma de México, 185 p.
- Lopez-Hernandez, A., and Castillo-Hernandez, D., 1997, Exploratory drilling at Acoculco, Puebla, Mexico: a hydrothermal system with only nonthermal manifestations: (Report No. CONF-971048--). United States: Geothermal Resources Council, Davis, CA.,.
- López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., and Quijano-León, J., 2009, Hydrothermal activity in the Tulancingo–Acoculco caldera complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics*,: v. 38, p. 279–293.
- López-Hernández, A., and Martínez, E.I., 1996, Evaluación volcanológica y estructural de la

- zona geotérmica de Acapulco, Puebla, y su relación con la anomalía termal detectada en el pozo EAC-1.: (Internal Report OGL-AC- 11/96). México: CFE-GPG.,.
- Magaña-Ortega, A. de M., 2019, Aplicación de la metrología fractal para la caracterización del fracturamiento en el yacimiento geotérmico de Acapulco, Puebla, México.: Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio., p. 1–151.
- Mandelbrot, B., 1967, “How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension”: *Science*, v. 156 (3775), p. 636–638,
- Mandelbrot, B., 1975a, “Limit Theorems on the Self-Normalized Range for Weakly and Strongly Dependent Processes,”: *2. Wahrscheinlichka’tstheorie venu., Gebiete*, p. 31, 271- 285.
- Mandelbrot, B., 1975b, Stochastic models for the earth’s relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, v. 72, p. 3825–3828.
- Manilla Aceves, A.A., Garnica Anguas, P., and Pérez Salazar, A., 2003, Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre  $V_p/V_s$  y el ángulo de fricción interna: *Publicación Técnica*, p. 1–39,
- Maranò, S., Hobiger, M., and Fäh, D., 2017, Retrieval of Rayleigh wave ellipticity from ambient vibration recordings: *Geophysical Journal International*, v. 209, p. 334–352.
- Molnar, P., and Sykes, L., 1969, Tectonics of the Caribbean and Middle American region from focal mechanisms and seismicity: *Bull Seismol. Soc. Am*, v. 80, p. 1639–1684.
- Monterrubio-Velasco, M., Zúñiga, F. R., Márquez-Ramírez, V. H., & Figueroa-Soto, A. 2017. Simulation of spatial and temporal properties of aftershocks by means of the fiber bundle model. *Journal of Seismology*, 1-17.
- Mooser, F., 1972, The Mexican Volcanic Belt. Structure and tectonics.: *Geofísica Internacional*, v. 12.
- Morales, G.J., and Garduño, V.H., 1984, Estudio tectónico-estructural del proyecto

- Huauchinango, Puebla. Instituto Mexicano del Petróleo, México City, México, internal report.: , p. 113.
- Morikawa, H., Sawada, S., and Akamatsu, J., 2004, A method to estimate phase of velocity of Rayleigh waves using microseisms simultaneously observed in two sites.: Bull Seismol. Soc. Am, v. 94, p. 961–976.
- Nakamura, Y., 1989, A Method for Dynamic characteristics Estimation of Subsurface using Microtremors on the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI): v. 30 No.1.
- Nakamura, Y., 2000, Clear Identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12 World Conference of Earthquake Engineering, New Zealand.:
- Nogoshi, M., and Igarashi, T., 1971, On the amplitude characteristics of microtremor (part 2): Journal Seismological Society Japan, p. 24,26-40 (en Japonés con resumen en Inglés).
- Oleschko, K., 1999, Delesse principle and statistical fractal sets : 2 . Uni ® ed Fractal Model for soil porosity: v. 52.
- Peterson, J., 1993, Observations and modelling of background seismic noise. Open-file 93-322: U. S Geological Survey, Albuquerque, New Mexico.,.
- Sánchez-López, Z., 2017, Interferometría sísmica a partir de registros de ruido sísmico con fines de exploración en campos geotermicos: Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio., v. Universida, p. 118.
- Schön, J., 2011, Physical Properties of Rocks: A Workbook: 481 p.,  
<http://books.google.com/books?id=ZkFpYNNgGLUC&pgis=1%5Cnhttp://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.
- Servicio Geológico Mexicano, 1997, Mapas en línea, Hoja Zacatlán. Carta INEGI E14B13.:
- Signanini, P., and Santis, A. De, 2012, Power-law frequency distribution of H / V spectral ratio of seismic signals : Evidence for a critical crust: v. 1, p. 49–54.

- SJ Bauer, P., Barrow, A., Robbins, M., and Hileman, S.N.L., 2011, Mechanical and Fluid Flow Properties of Basaltic Andesite and Rhyolite Analogue Rocks: Sandia National Laboratories, p. 1–17.
- Sosa Ceballos, G., Macías, J.L., Avellán, D.R., and Salazar Hermenegildo, N Boijseauneau López, M.E., 2018, The Acoculco Caldera complex magmas: Genesis, evolution and relation with the Acoculco geothermal system.: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 358, p. 288–306.
- Sturges, H., 1926, The choice of a class-interval: *J. Amer. Statist. Assoc.*, v. 21, p. 65–66.
- Tokimatsu, K., 1997, Geotechnical site characterization using surface waves. *Proc. 1st Intl. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*, volume 3, 1333–1368.:
- Torres-Argüelles, V., Oleschko, K., Tarquis, A.M., Korvin, G., Gaona, C., Parrot, J.F., and Ventura-Ramos, E., 2010, Fractal Metrology for biogeosystems analysis: *Biogeosciences*, v. 7, p. 3799–3815.
- TruSoft, I.I., 1999, Benoit 1.3 Software:
- Urrutia-Fucugauchi, J., and Del Castillo, L., 1977, Un Modelo del Eje Volcánico Transmexicano: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 38, p. 18–28.
- Vanorio, T., Prasad, M., Patella, D., and Nur, A., 2002, Ultrasonic velocity measurements in volcanic rocks: correlation with microtexture: *Geophys.*, v. 149, p. 22–36.
- Vargas, E.C., 2006, El ruido sísmico de fondo: *Compendio de trabajos IGP*, v. 7, p. 89–100.
- Verma, S., 2001, Geochemical evidence for a lithosphere source for magmas in the Mexican Volcanic Belt from Acoculco caldera, Eastern Mexican Volcanic Belt: *Int. Geol. Rev.*, v. 43, p. 31–51.
- Viggiano Guerra, J.C., Flores-Armenta, M., and Ramírez Silva, G.R., 2011, Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones.: *Geotermia*, v. 24, p. 14–24.
- Wathelet, M., Jongmans, D., and Ohrnberger, M., 2005, Direct Inversion of Spatial Autocorrelation Curves with the Neighborhood Algorithm.: *Bulletin of the*

Seismological Society of America, v. 95, p. 1787- 1800.

Woith, H., Parolai, S., Boxberger, T., Picozzi, M., Özmen, Ö.-T., Milkereit, C., and Zschau, J., 2014, Spatio-temporal variability of seismic noise above a geothermal reservoir.: Journal of Applied Geophysics, p. 106, 128–138.

Yáñez-Gracia, C., 1980, Informe geológico del proyecto geotérmico Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. CFE-GPG reporte interno 01/80: , p. 59.

## Apéndice 1

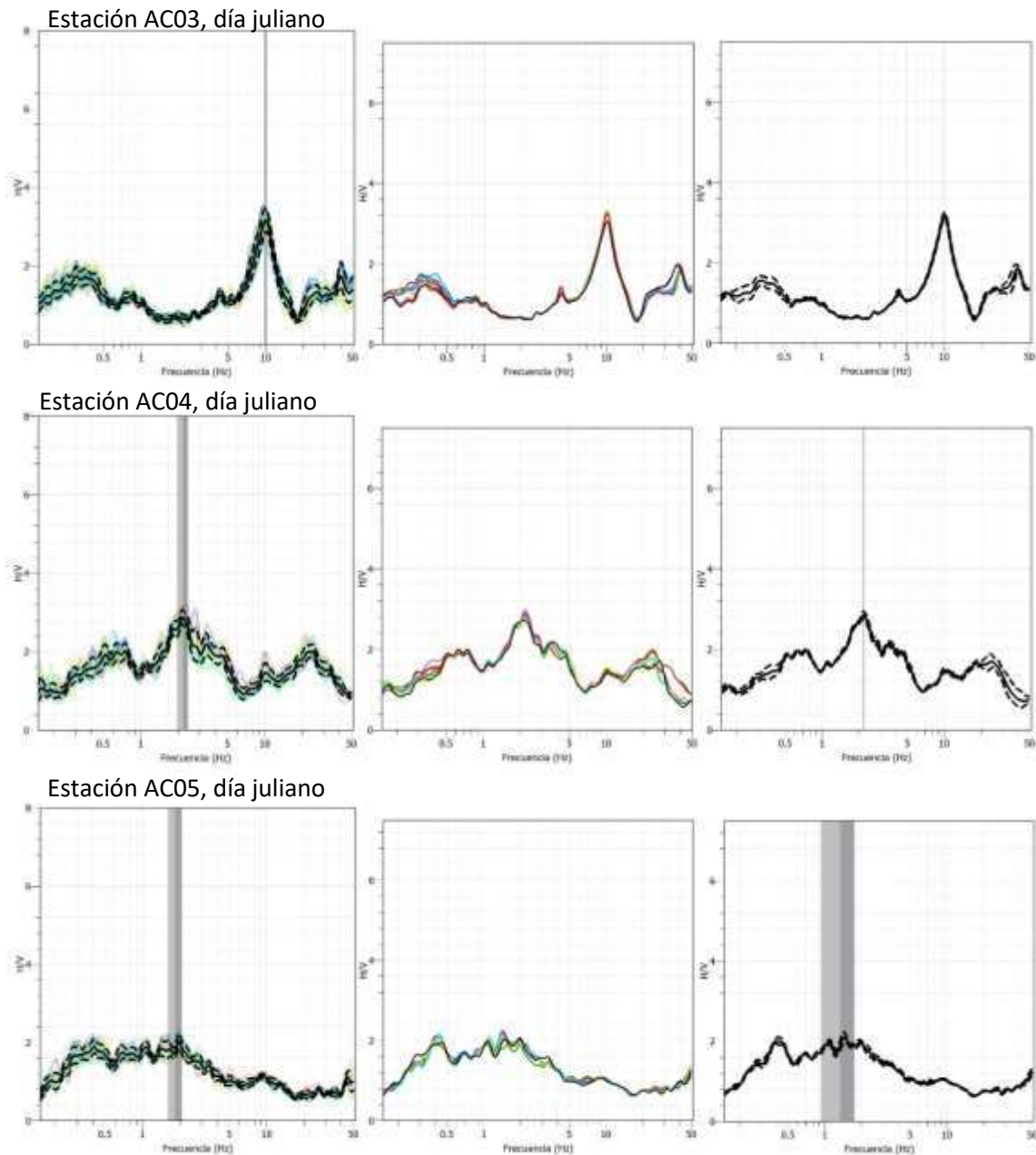
### Cocientes espectrales de la red sísmica de Acapulco.

Se muestran los cocientes espectrales de las estaciones que hicieron parte de la red sísmica de Acapulco. La imagen de a la izquierda corresponde al cociente espectral de un solo día, la imagen central, corresponde a ocho cocientes espectrales para diferentes días y la imagen a la derecha es el cociente espectral promedio de los cocientes espectrales para ocho días diferentes.

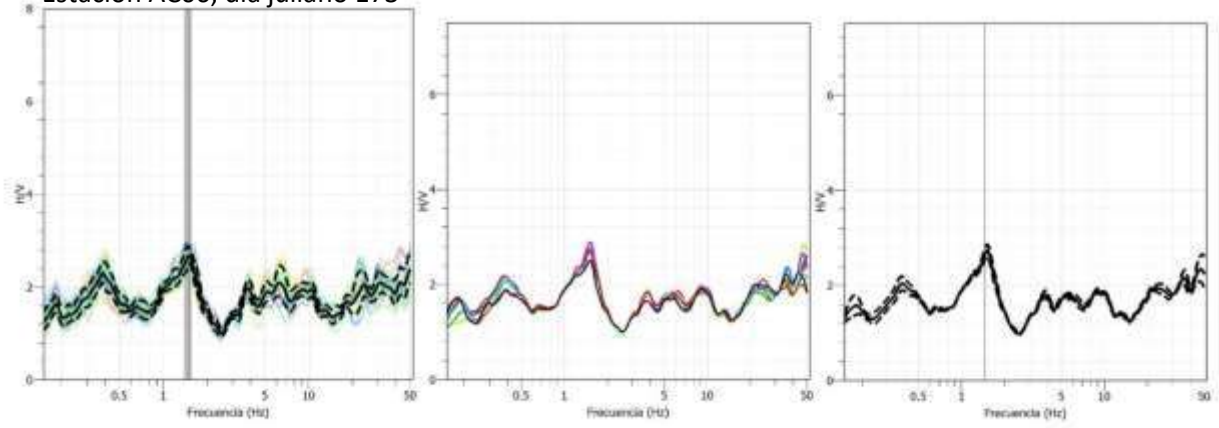
*Cociente espectral de un solo día*

*Cocientes espectrales de 8 días*

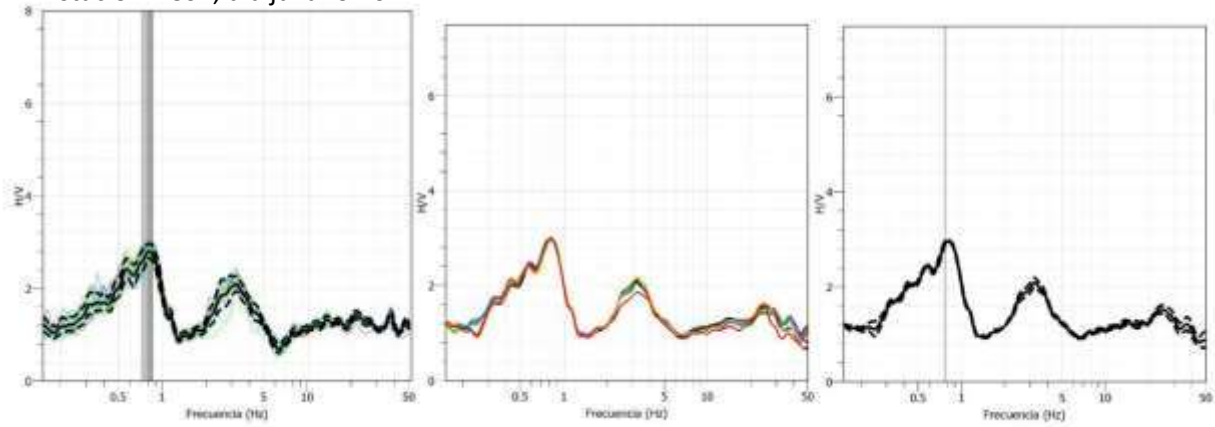
*Cociente espectral promedio*



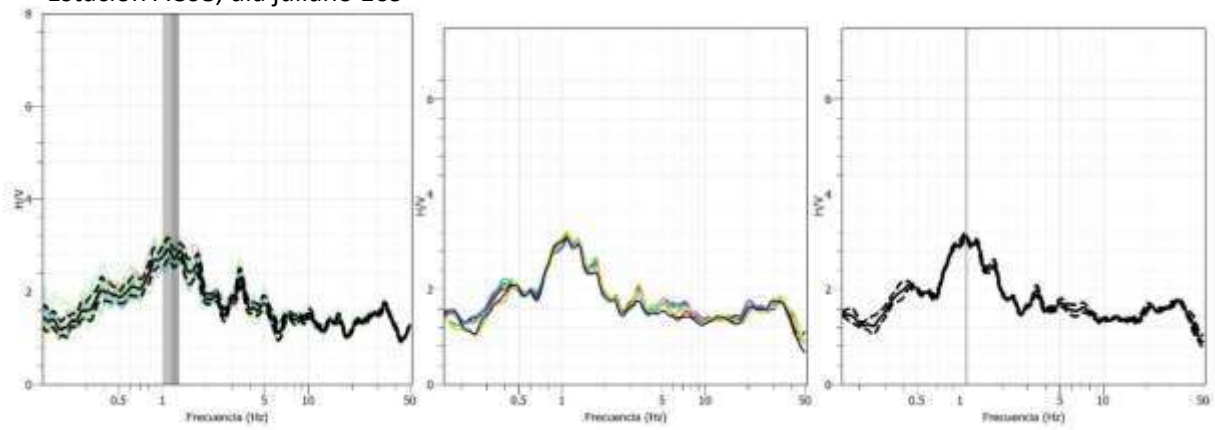
Estación AC06, día juliano 173



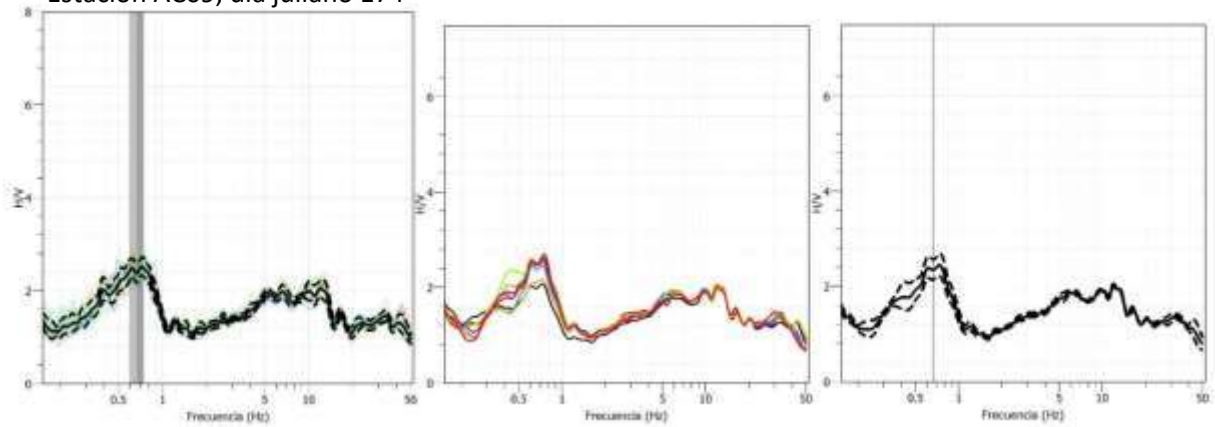
Estación AC07, día juliano 167



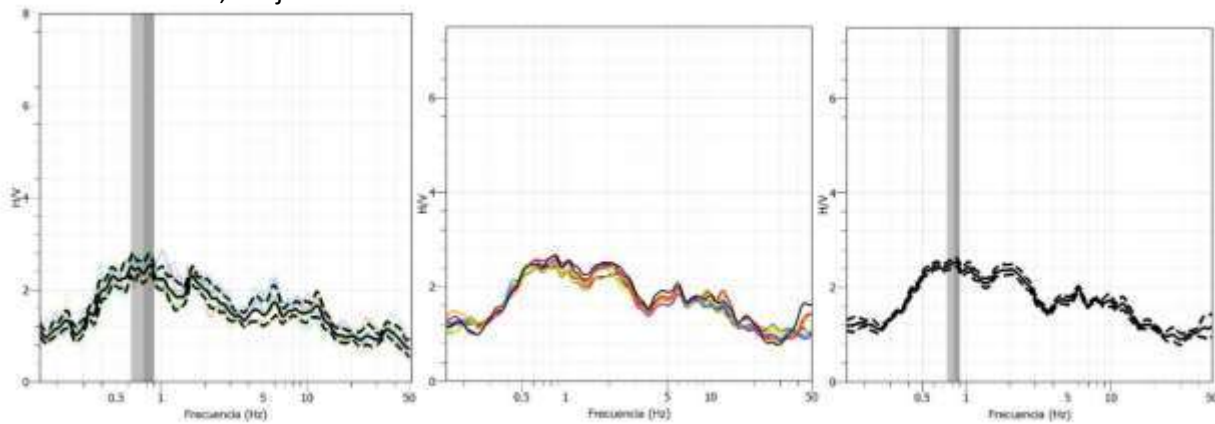
Estación AC08, día juliano 169



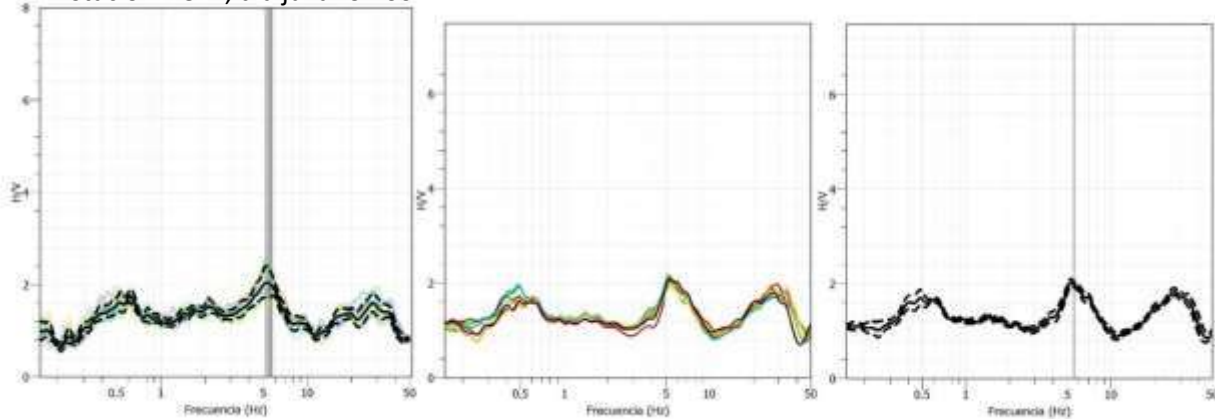
Estación AC09, día juliano 174



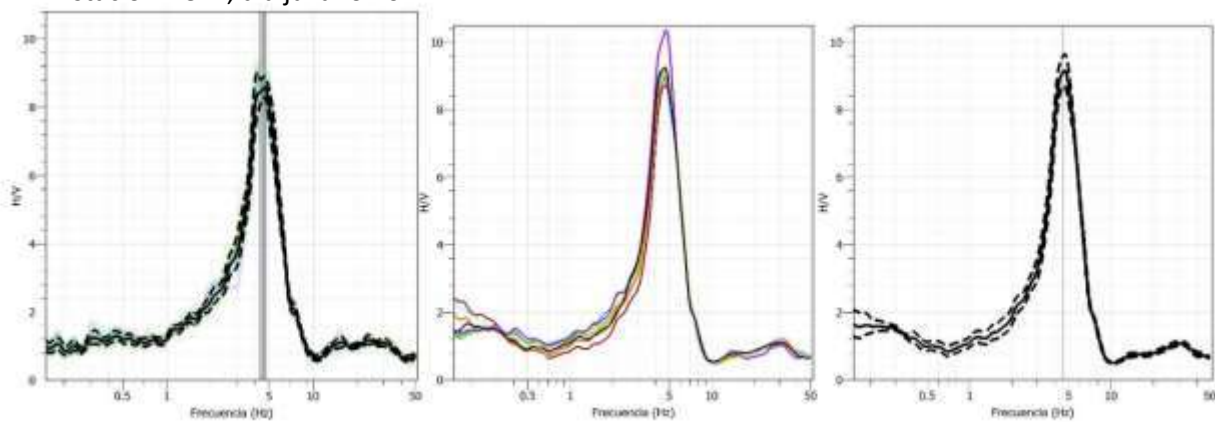
Estación AC10, día juliano 166



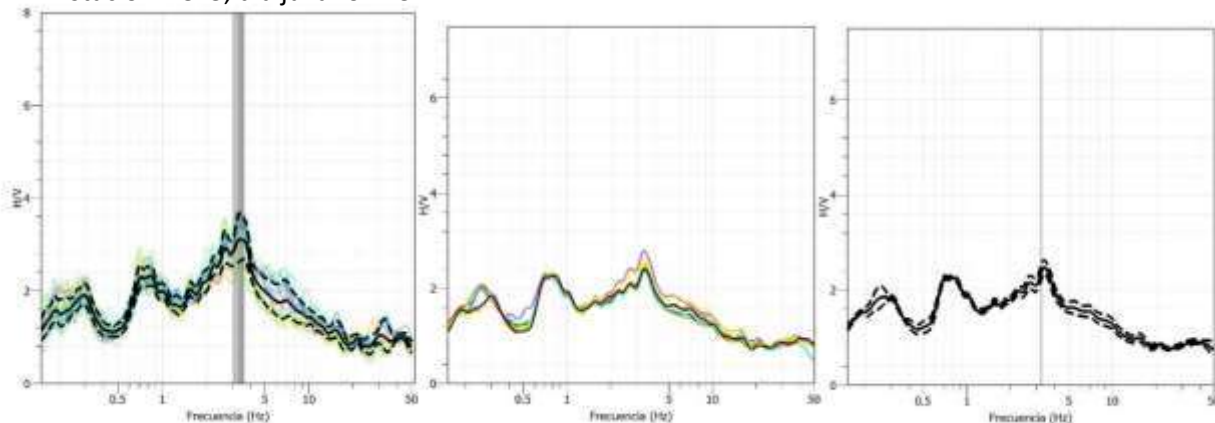
Estación AC11, día juliano 160



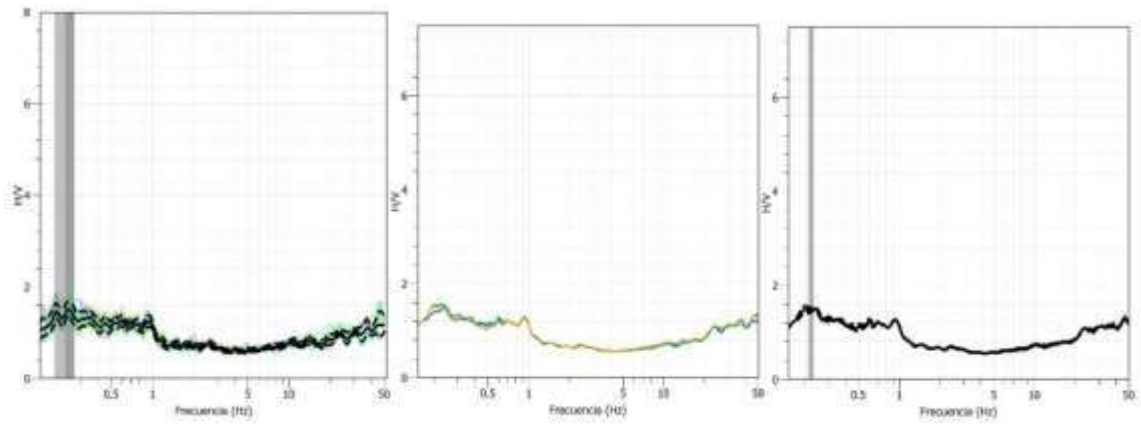
Estación AC12, día juliano 167



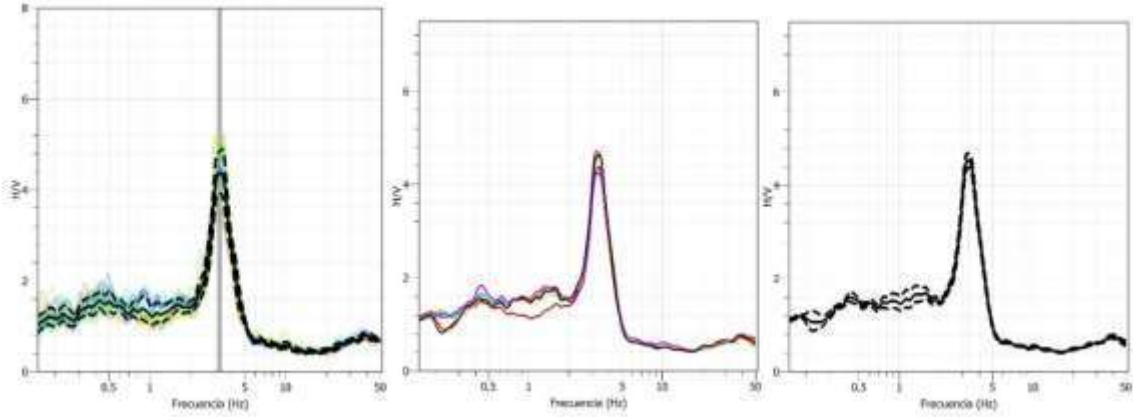
Estación AC13, día juliano 173



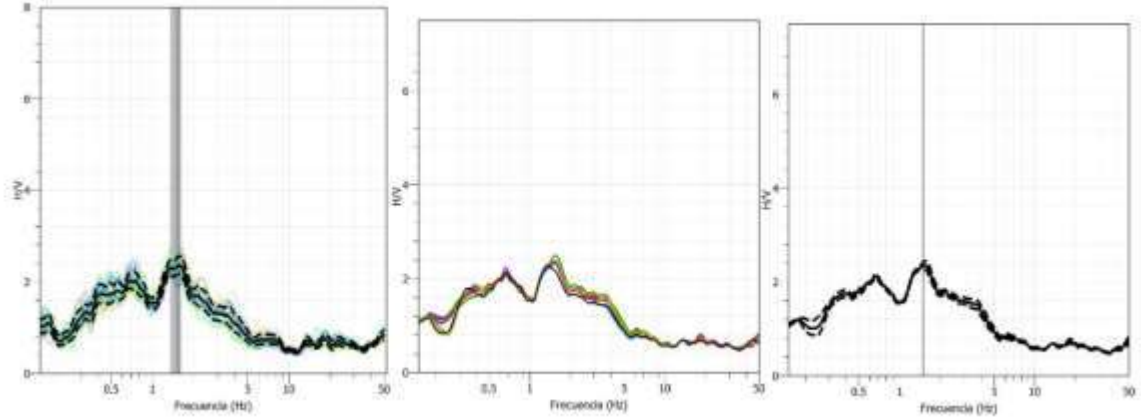
Estación AC14, día juliano



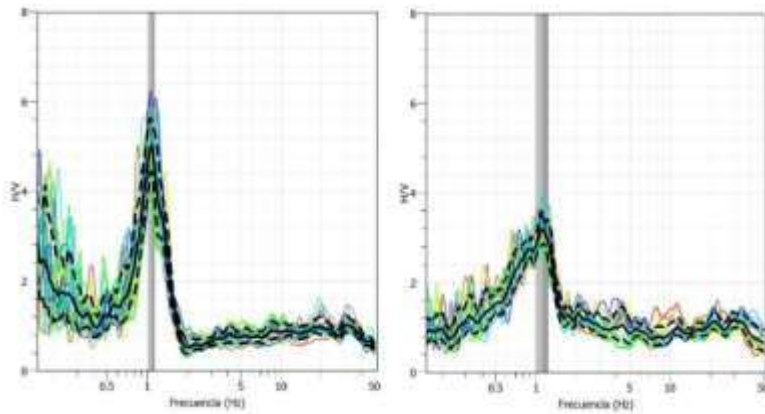
Estación AC15, día juliano



Estación AC16, día juliano



Estación AC17 y AC18, día juliano 03-2019



## Apéndice 2

### Valores de exponente de Hurst (H) de 16 estaciones de la red sísmica de Acoculco

Se muestra los valores de H obtenidos con cada cociente espectral calculo con un determinado valor de N puntos o como se ha denominado en este trabajo, nube de dispersión.

También se muestra el promedio de todos los valores de H de todas las estaciones, el cual es un valor calculado en conjunto para las 16 estaciones con la que se realizó la prueba.

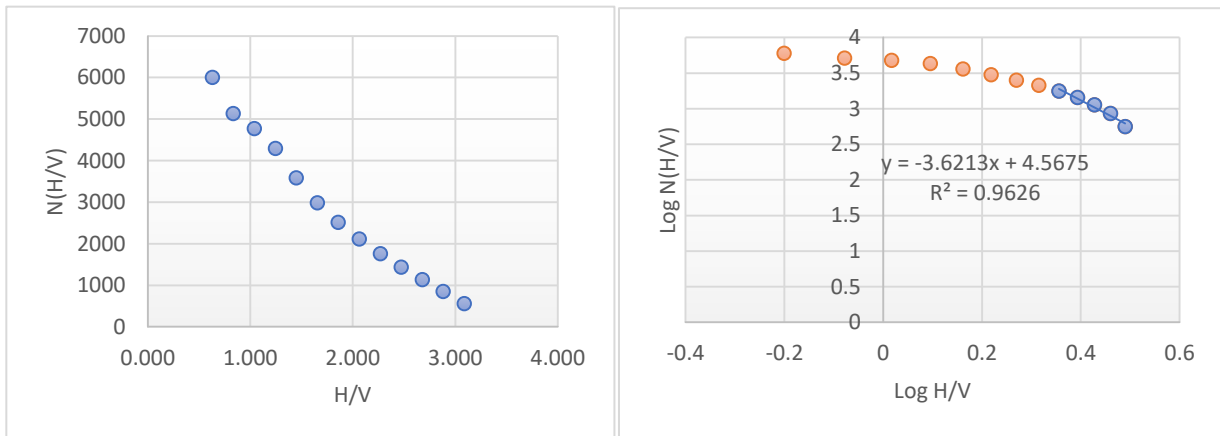
| Estaciones                                                                                                                  | Nube de puntos | AC01               | AC02  | AC03  | AC04  | AC05  | AC06  | AC07  | AC08  | AC09  | AC10  | AC11  | AC12  | AC13  | AC14  | AC15   | AC16  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                                                                                                                             |                | Exponente de Hurst |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |
| <b>Tabla 18.</b><br>Exponentes de Hurst<br><br>Nº de puntos en el rango de frecuencias de 0.15 a 50Hz en el análisis de H/V | 100            | 0.938              | 0.872 | 0.855 | 0.86  | 0.481 | 0.547 | 0.763 | 0.792 | 0.555 | 0.959 | 0.853 | 0.805 | 0.853 | 0.621 | 0.889  | 0.49  |
|                                                                                                                             | 200            | 0.839              | 0.769 | 0.973 | 0.901 | 0.94  | 0.956 | 0.828 | 0.817 | 0.852 | 0.94  | 0.825 | 0.945 | 0.951 | 0.891 | 0.778  | 0.855 |
|                                                                                                                             | 300            | 0.797              | 0.684 | 0.778 | 0.668 | 0.974 | 0.917 | 0.878 | 0.963 | 0.837 | 0.974 | 0.835 | 0.71  | 0.87  | 0.949 | 0.767  | 0.712 |
|                                                                                                                             | 400            | 0.817              | 0.763 | 0.817 | 0.76  | 0.962 | 0.933 | 0.925 | 0.998 | 0.878 | 0.979 | 0.917 | 0.752 | 0.933 | 0.966 | 0.811  | 0.749 |
|                                                                                                                             | 500            | 0.728              | 0.621 | 0.651 | 0.638 | 0.989 | 0.825 | 0.834 | 0.911 | 0.797 | 0.902 | 0.763 | 0.591 | 0.822 | 0.903 | 0.685  | 0.635 |
|                                                                                                                             | 600            | 0.837              | 0.773 | 0.745 | 0.799 | 0.795 | 0.779 | 0.742 | 0.773 | 0.952 | 0.787 | 0.756 | 0.771 | 0.709 | 0.788 | 0.776  | 0.793 |
|                                                                                                                             | 700            | 0.925              | 0.889 | 0.86  | 0.896 | 0.864 | 0.864 | 0.834 | 0.86  | 0.99  | 0.873 | 0.861 | 0.888 | 0.794 | 0.875 | 0.882  | 0.871 |
|                                                                                                                             | 800            | 0.875              | 0.854 | 0.854 | 0.865 | 0.821 | 0.809 | 0.795 | 0.848 | 0.954 | 0.848 | 0.839 | 0.854 | 0.803 | 0.823 | 0.871  | 0.855 |
|                                                                                                                             | 900            | 0.836              | 0.752 | 0.753 | 0.792 | 0.782 | 0.77  | 0.734 | 0.785 | 0.94  | 0.785 | 0.745 | 0.779 | 0.726 | 0.779 | 0.767  | 0.793 |
|                                                                                                                             | 1000           | 0.698              | 0.551 | 0.553 | 0.651 | 0.669 | 0.651 | 0.585 | 0.677 | 0.834 | 0.661 | 0.597 | 0.563 | 0.578 | 0.688 | 0.612  | 0.67  |
|                                                                                                                             | 1100           | 0.663              | 0.664 | 0.658 | 0.614 | 0.623 | 0.685 | 0.623 | 0.621 | 0.645 | 0.578 | 0.637 | 0.712 | 0.668 | 0.652 | 0.67   | 0.672 |
|                                                                                                                             | 1200           | 0.779              | 0.809 | 0.81  | 0.758 | 0.721 | 0.775 | 0.763 | 0.723 | 0.733 | 0.696 | 0.77  | 0.87  | 0.775 | 0.756 | 0.7995 | 0.78  |
|                                                                                                                             | 1300           | 0.826              | 0.912 | 0.902 | 0.843 | 0.795 | 0.85  | 0.847 | 0.792 | 0.799 | 0.773 | 0.847 | 0.973 | 0.848 | 0.803 | 0.901  | 0.86  |
|                                                                                                                             | 1400           | 0.903              | 0.959 | 0.953 | 0.886 | 0.836 | 0.894 | 0.891 | 0.835 | 0.827 | 0.816 | 0.897 | 0.979 | 0.892 | 0.85  | 0.94   | 0.89  |
|                                                                                                                             | 1500           | 0.901              | 0.953 | 0.949 | 0.869 | 0.851 | 0.883 | 0.885 | 0.838 | 0.818 | 0.791 | 0.892 | 0.98  | 0.882 | 0.85  | 0.942  | 0.878 |
|                                                                                                                             | 1600           | 0.889              | 0.924 | 0.922 | 0.845 | 0.814 | 0.862 | 0.86  | 0.814 | 0.817 | 0.797 | 0.862 | 0.994 | 0.863 | 0.804 | 0.906  | 0.867 |
|                                                                                                                             | 1700           | 0.849              | 0.893 | 0.89  | 0.828 | 0.781 | 0.889 | 0.83  | 0.786 | 0.787 | 0.755 | 0.838 | 0.955 | 0.838 | 0.808 | 0.882  | 0.838 |
|                                                                                                                             | 1800           | 0.77               | 0.802 | 0.806 | 0.743 | 0.705 | 0.771 | 0.741 | 0.712 | 0.732 | 0.683 | 0.745 | 0.859 | 0.771 | 0.747 | 0.792  | 0.776 |
|                                                                                                                             | 1900           | 0.684              | 0.688 | 0.685 | 0.647 | 0.638 | 0.691 | 0.643 | 0.638 | 0.65  | 0.598 | 0.649 | 0.743 | 0.681 | 0.676 | 0.7    | 0.688 |
|                                                                                                                             | 2000           | 0.578              | 0.548 | 0.54  | 0.516 | 0.549 | 0.598 | 0.528 | 0.565 | 0.577 | 0.484 | 0.521 | 0.592 | 0.58  | 0.594 | 0.578  | 0.584 |
|                                                                                                                             | 2500           | 0.976              | 0.964 | 0.991 | 0.921 | 0.886 | 0.933 | 0.957 | 0.831 | 0.905 | 0.888 | 0.977 | 0.892 | 0.956 | 0.884 | 0.987  | 0.933 |
|                                                                                                                             | 3000           | 0.946              | 0.874 | 0.949 | 0.988 | 0.963 | 0.993 | 0.956 | 0.968 | 0.969 | 0.972 | 0.939 | 0.798 | 0.971 | 0.965 | 0.901  | 0.99  |
|                                                                                                                             | 3500           | 0.958              | 0.984 | 0.988 | 0.904 | 0.871 | 0.918 | 0.935 | 0.877 | 0.89  | 0.867 | 0.956 | 0.912 | 0.941 | 0.867 | 0.993  | 0.918 |
|                                                                                                                             | 4000           | 0.653              | 0.627 | 0.58  | 0.542 | 0.593 | 0.656 | 0.594 | 0.607 | 0.654 | 0.543 | 0.607 | 0.716 | 0.644 | 0.598 | 0.653  | 0.633 |
|                                                                                                                             | 4500           | 0.942              | 0.988 | 0.99  | 0.928 | 0.889 | 0.923 | 0.944 | 0.89  | 0.898 | 0.879 | 0.948 | 0.936 | 0.945 | 0.858 | 0.991  | 0.925 |
|                                                                                                                             | 5000           | 0.888              | 0.79  | 0.808 | 0.886 | 0.945 | 0.923 | 0.862 | 0.954 | 0.964 | 0.935 | 0.865 | 0.748 | 0.895 | 0.983 | 0.834  | 0.916 |
|                                                                                                                             | 5500           | 0.787              | 0.692 | 0.702 | 0.784 | 0.853 | 0.838 | 0.763 | 0.864 | 0.882 | 0.834 | 0.762 | 0.648 | 0.803 | 0.893 | 0.736  | 0.823 |
|                                                                                                                             | 6000           | 0.792              | 0.69  | 0.712 | 0.793 | 0.864 | 0.843 | 0.768 | 0.872 | 0.89  | 0.84  | 0.768 | 0.653 | 0.81  | 0.9   | 0.748  | 0.832 |
|                                                                                                                             | 6500           | 0.832              | 0.732 | 0.747 | 0.827 | 0.892 | 0.874 | 0.807 | 0.903 | 0.918 | 0.879 | 0.805 | 0.69  | 0.844 | 0.934 | 0.777  | 0.863 |
|                                                                                                                             | 7000           | 0.903              | 0.845 | 0.832 | 0.908 | 0.962 | 0.94  | 0.883 | 0.968 | 0.981 | 0.952 | 0.883 | 0.765 | 0.913 | 0.999 | 0.848  | 0.933 |
|                                                                                                                             | 7500           | 0.947              | 0.978 | 0.997 | 0.875 | 0.893 | 0.936 | 0.948 | 0.894 | 0.895 | 0.883 | 0.947 | 0.929 | 0.947 | 0.846 | 0.993  | 0.928 |
|                                                                                                                             | 8000           | 0.732              | 0.747 | 0.707 | 0.653 | 0.706 | 0.76  | 0.702 | 0.713 | 0.747 | 0.638 | 0.701 | 0.804 | 0.752 | 0.652 | 0.762  | 0.737 |
|                                                                                                                             | 8500           | 0.844              | 0.889 | 0.854 | 0.818 | 0.823 | 0.867 | 0.851 | 0.836 | 0.848 | 0.787 | 0.834 | 0.916 | 0.845 | 0.773 | 0.872  | 0.847 |
|                                                                                                                             | 9000           | 0.946              | 0.85  | 0.875 | 0.926 | 0.996 | 0.978 | 0.919 | 0.993 | 0.995 | 0.982 | 0.924 | 0.931 | 0.97  | 0.966 | 0.902  | 0.971 |
|                                                                                                                             | 9500           | 0.842              | 0.728 | 0.743 | 0.805 | 0.896 | 0.883 | 0.799 | 0.896 | 0.921 | 0.861 | 0.804 | 0.718 | 0.869 | 0.924 | 0.793  | 0.868 |
|                                                                                                                             | 10000          | 0.763              | 0.645 | 0.659 | 0.719 | 0.82  | 0.815 | 0.715 | 0.824 | 0.855 | 0.778 | 0.718 | 0.634 | 0.795 | 0.846 | 0.712  | 0.794 |
| promedio                                                                                                                    | 0              | 0.74               | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74   | 0.74  |
|                                                                                                                             | 10500          | 0.74               | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74  | 0.74   | 0.74  |

### Apéndice 3

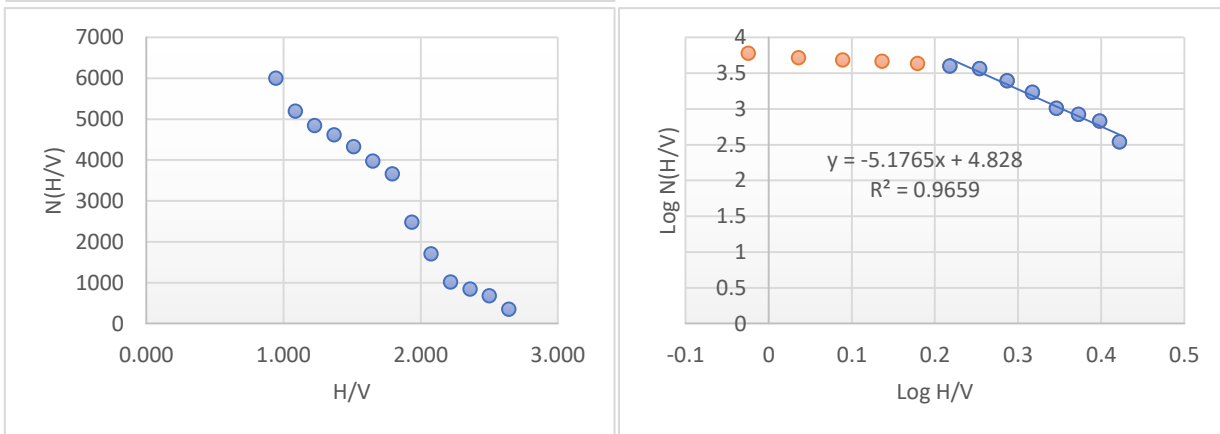
#### Graficas de leyes de potencia de los cocientes espectrales

Se muestran los resultados de exponente de frecuencia acumulada (Efa) para las estaciones que hicieron parte de la red sísmica de Acapulco. En la imagen de la izquierda se muestra claramente la tendencia logarítmica que presentan los datos, una característica fundamental en datos con un comportamiento fractal. La imagen de la derecha (log/log de los datos) se muestra una ley de potencia de los datos, con su respectiva ecuación y su coeficiente de determinación.

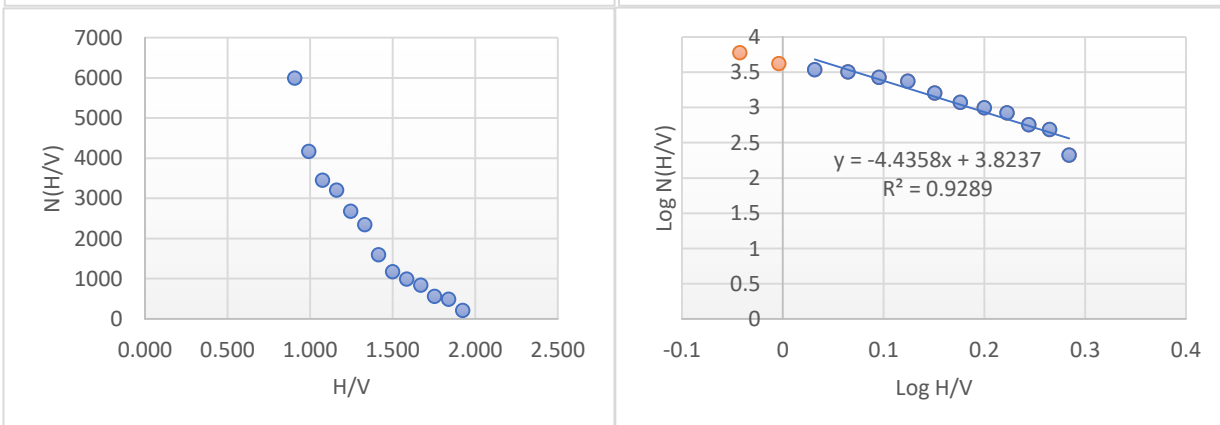
AC03



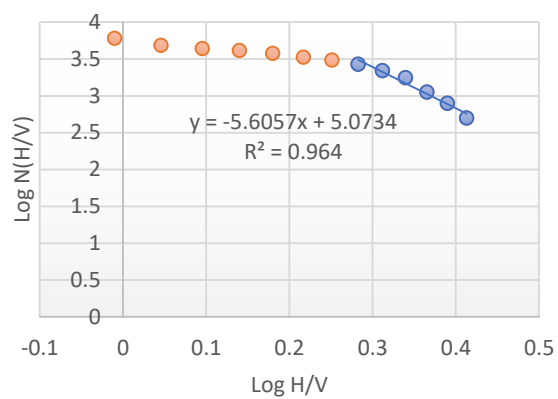
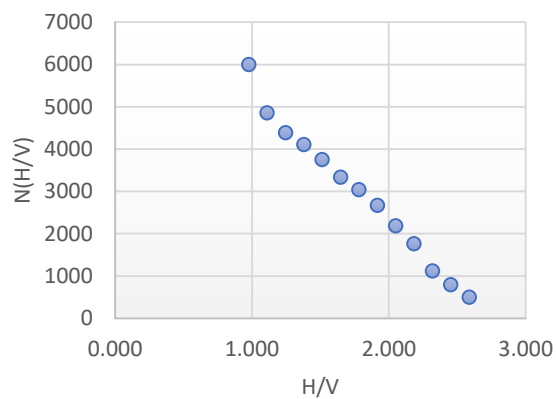
AC04



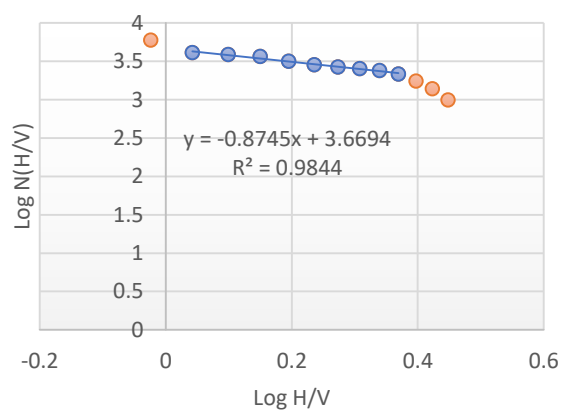
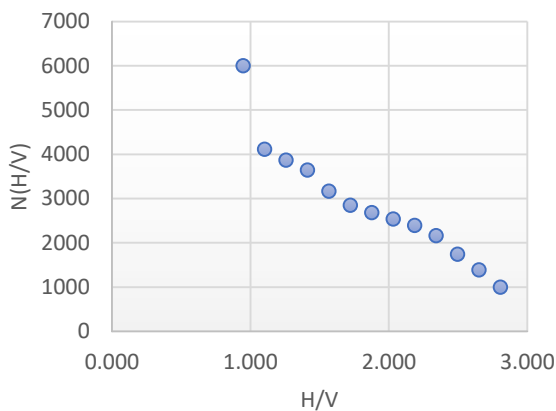
AC05



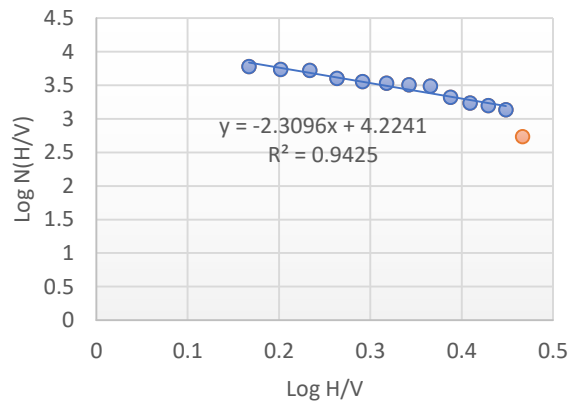
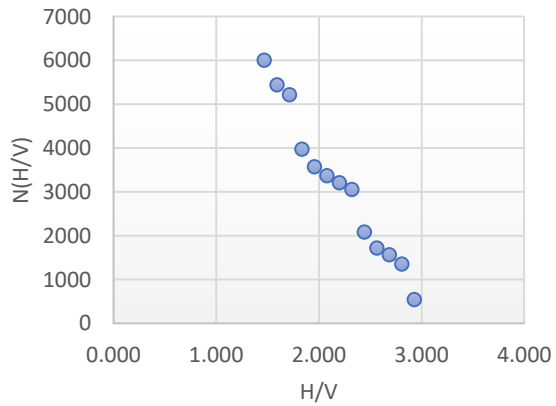
AC06



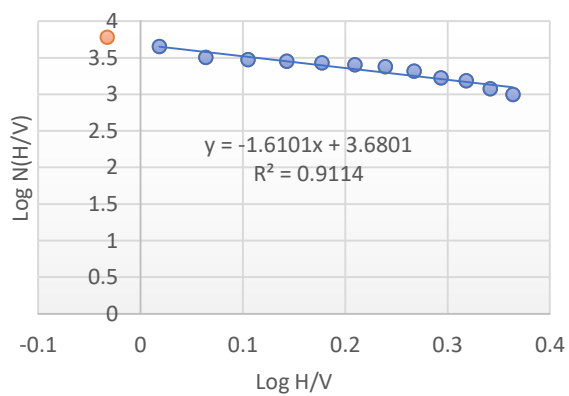
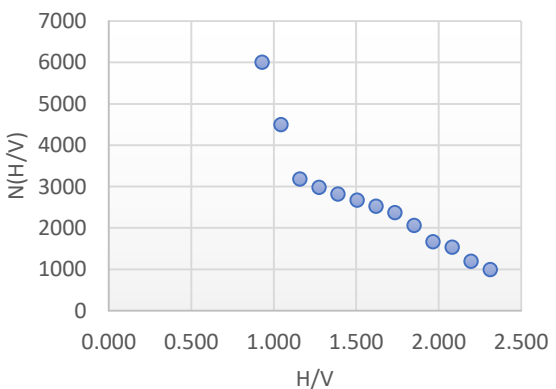
AC07



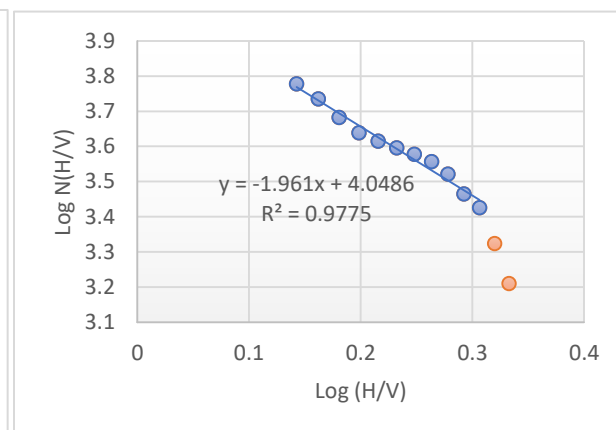
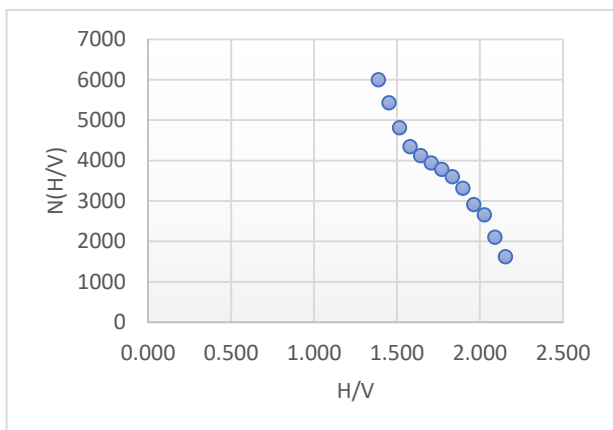
AC08



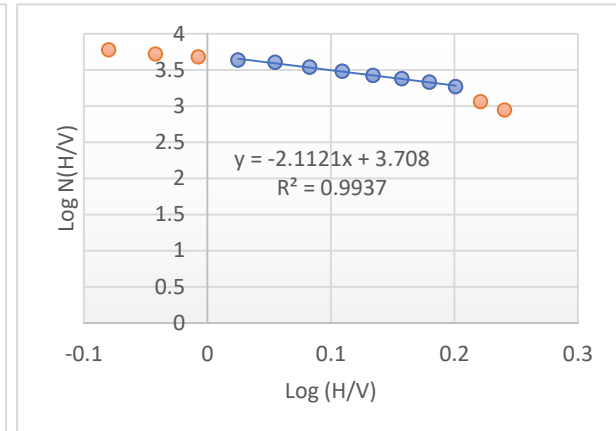
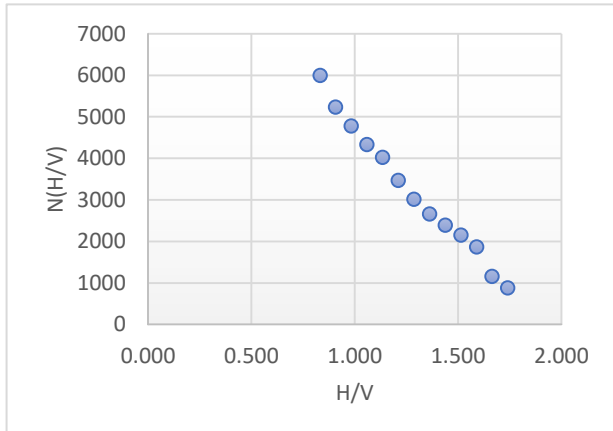
AC09



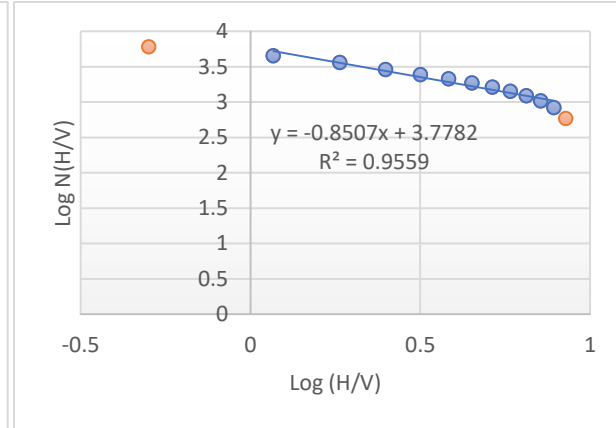
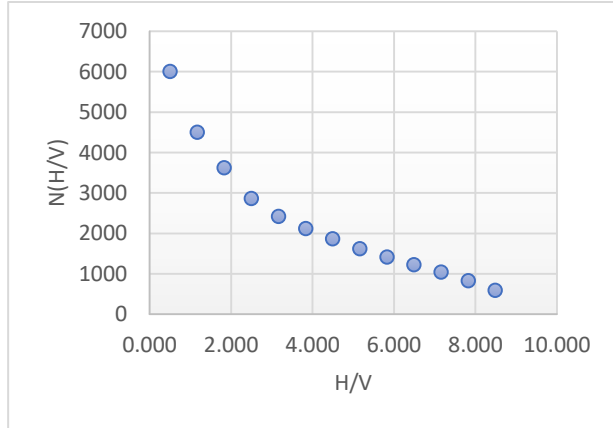
AC10



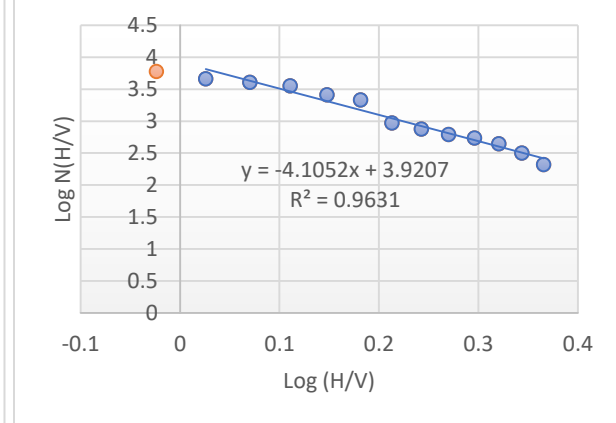
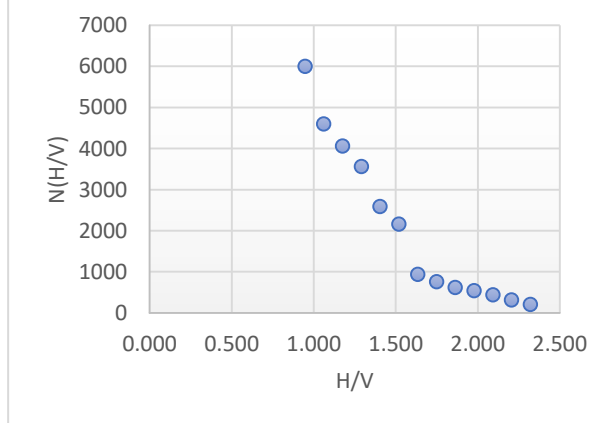
AC11



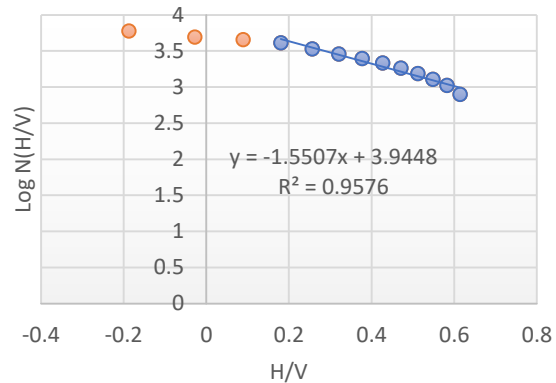
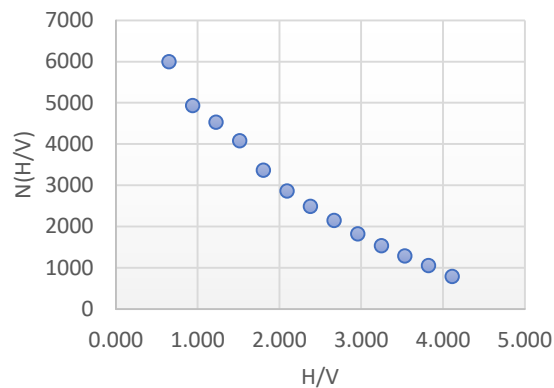
AC12



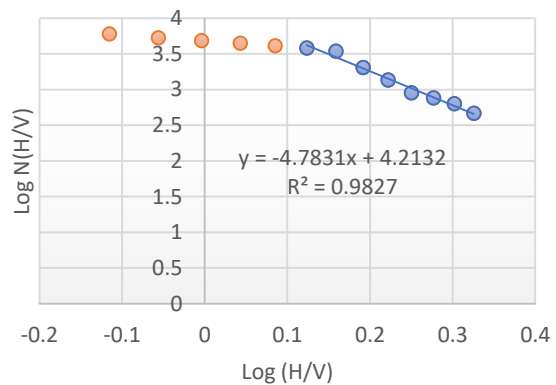
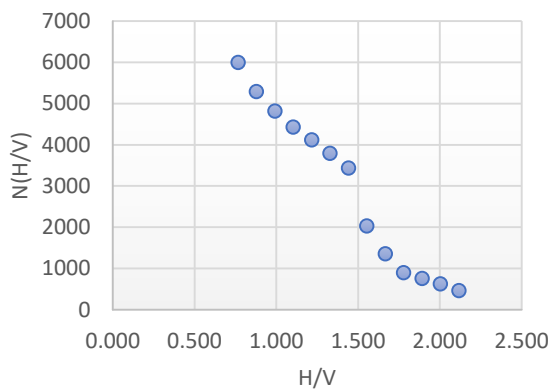
AC13



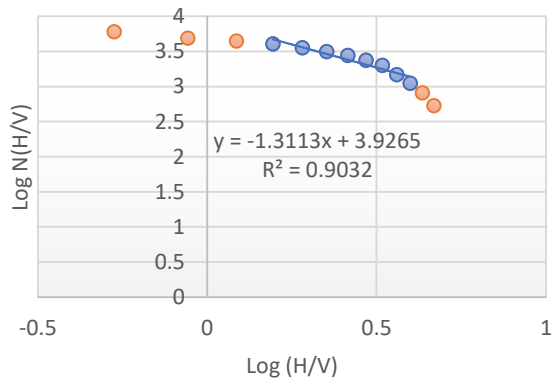
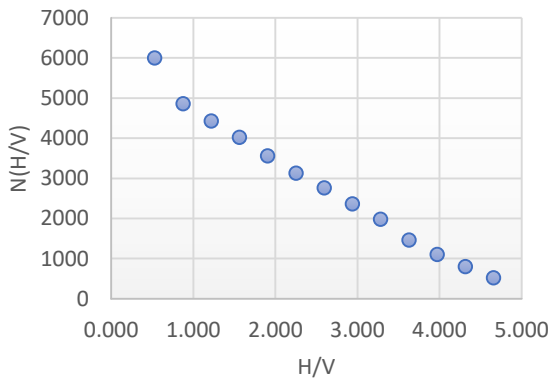
AC15



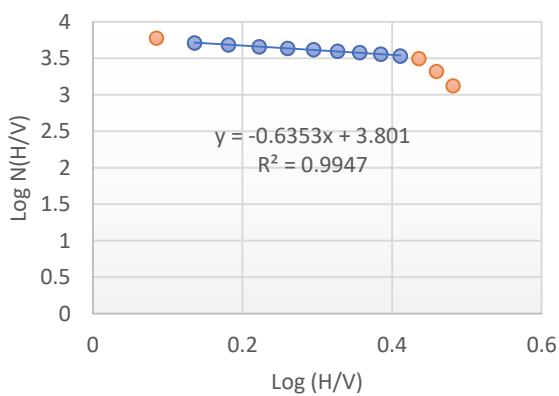
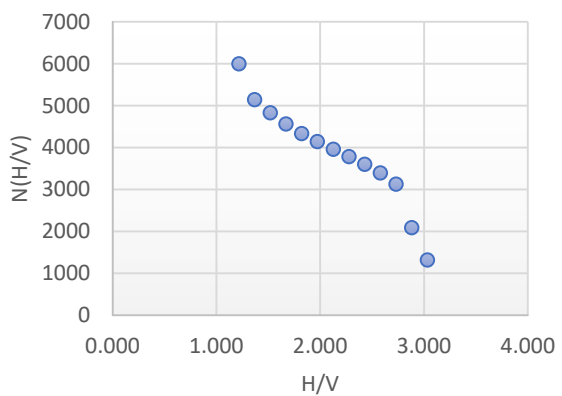
AC16



AC17



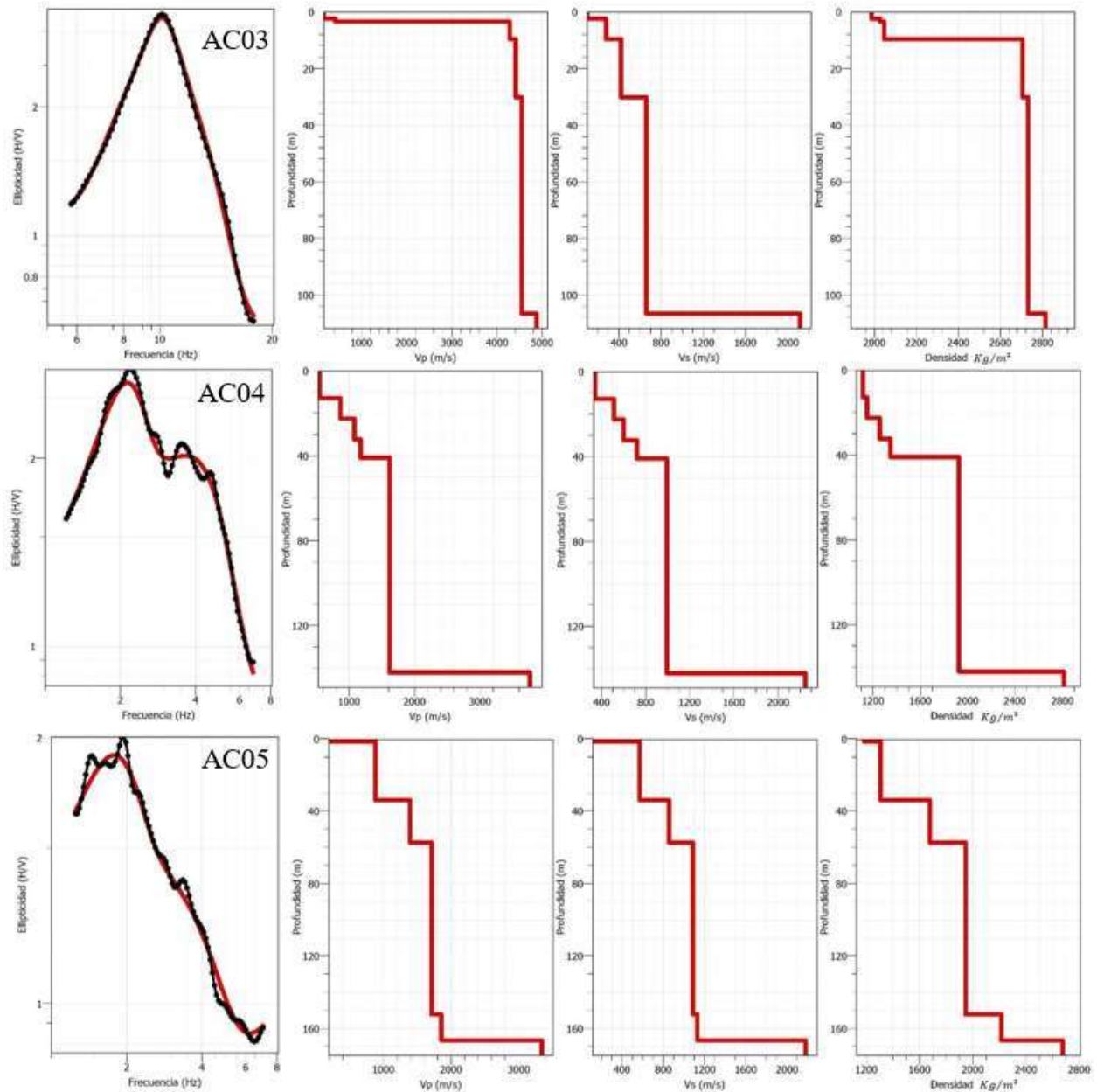
AC18

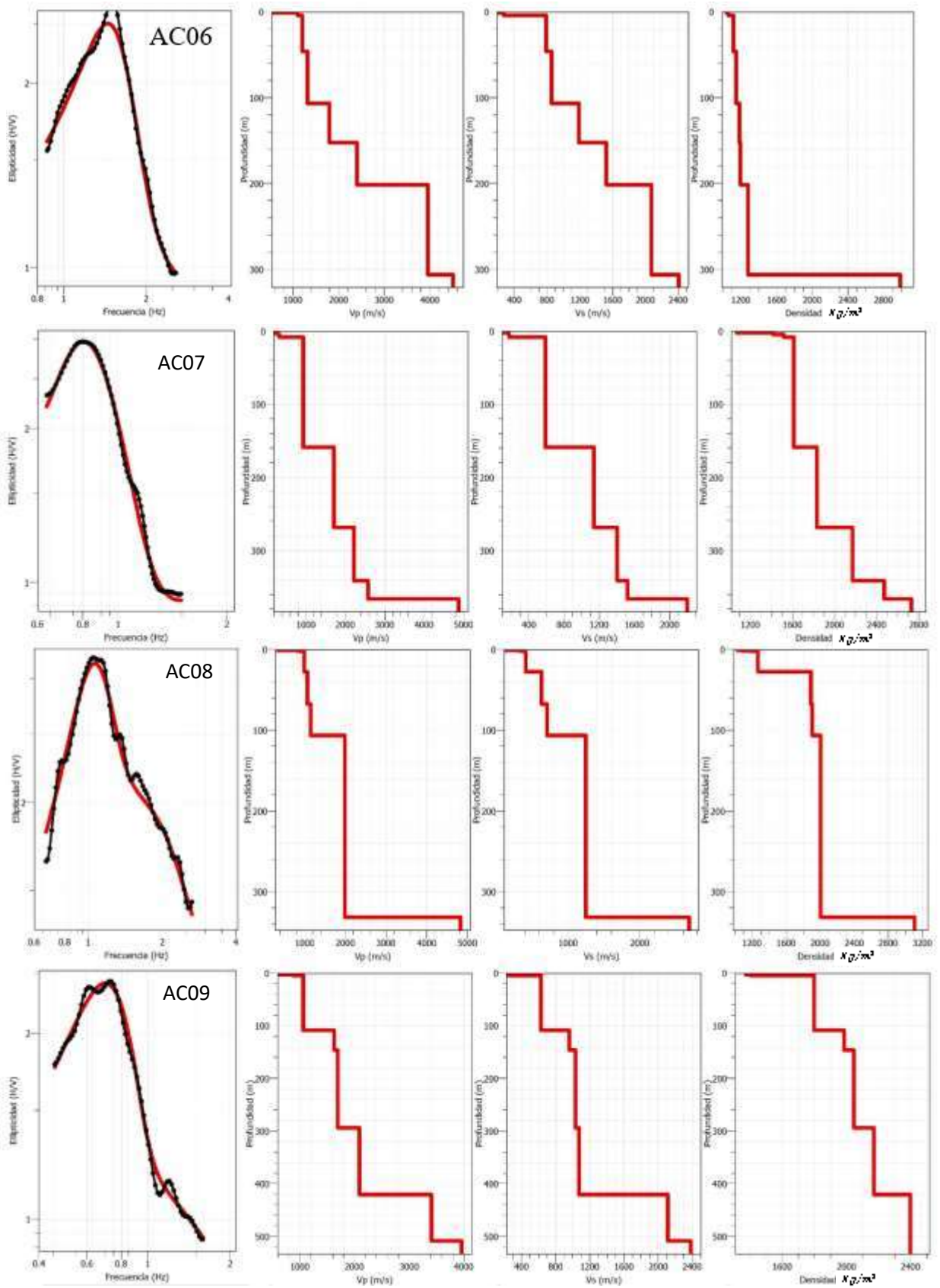


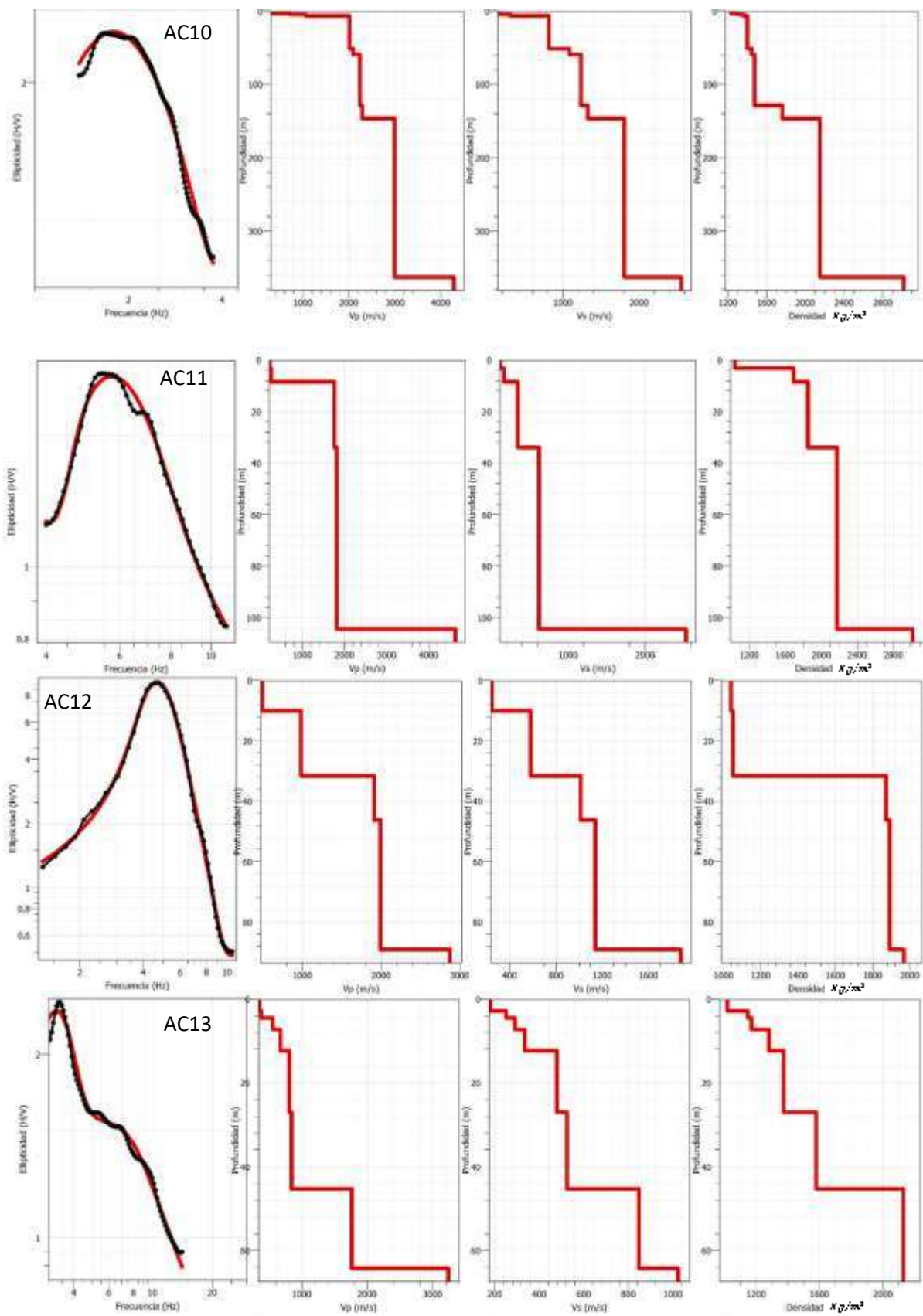
## Apéndice 4

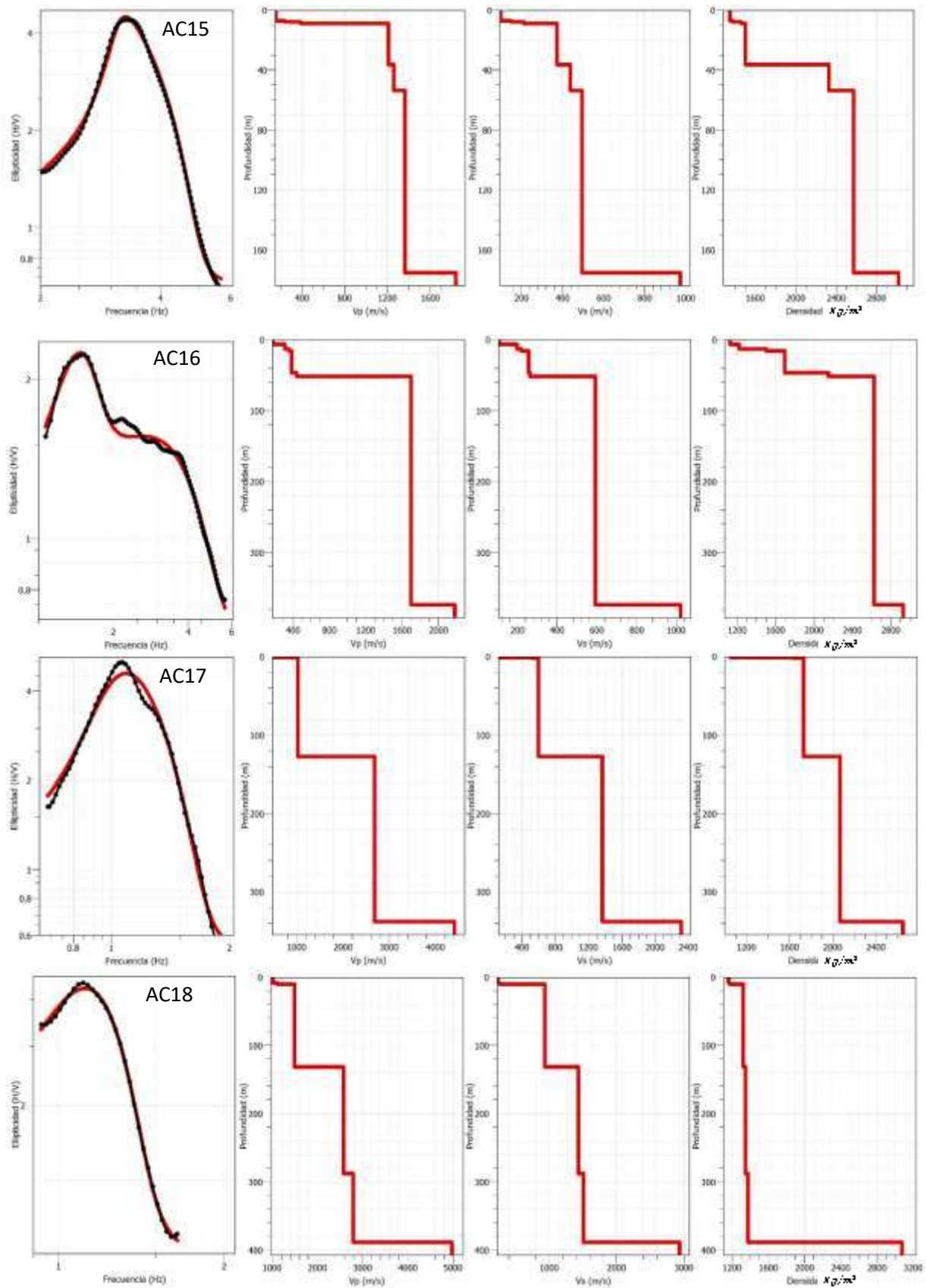
### Inversión de curva H/V y perfiles de velocidad de onda S y P.

Se muestran los resultados obtenidos para la inversión de un segmento de la curva de H/V. La imagen de la izquierda muestra el segmento de la curva H/V (negro) invertida y la curva que se ajusta a la inversión (rojo). Las siguientes imágenes, de izquierda a derecha, corresponden a los cambios de  $V_p$ ,  $V_s$  y densidad respectivamente, en cada capa de la inversión.





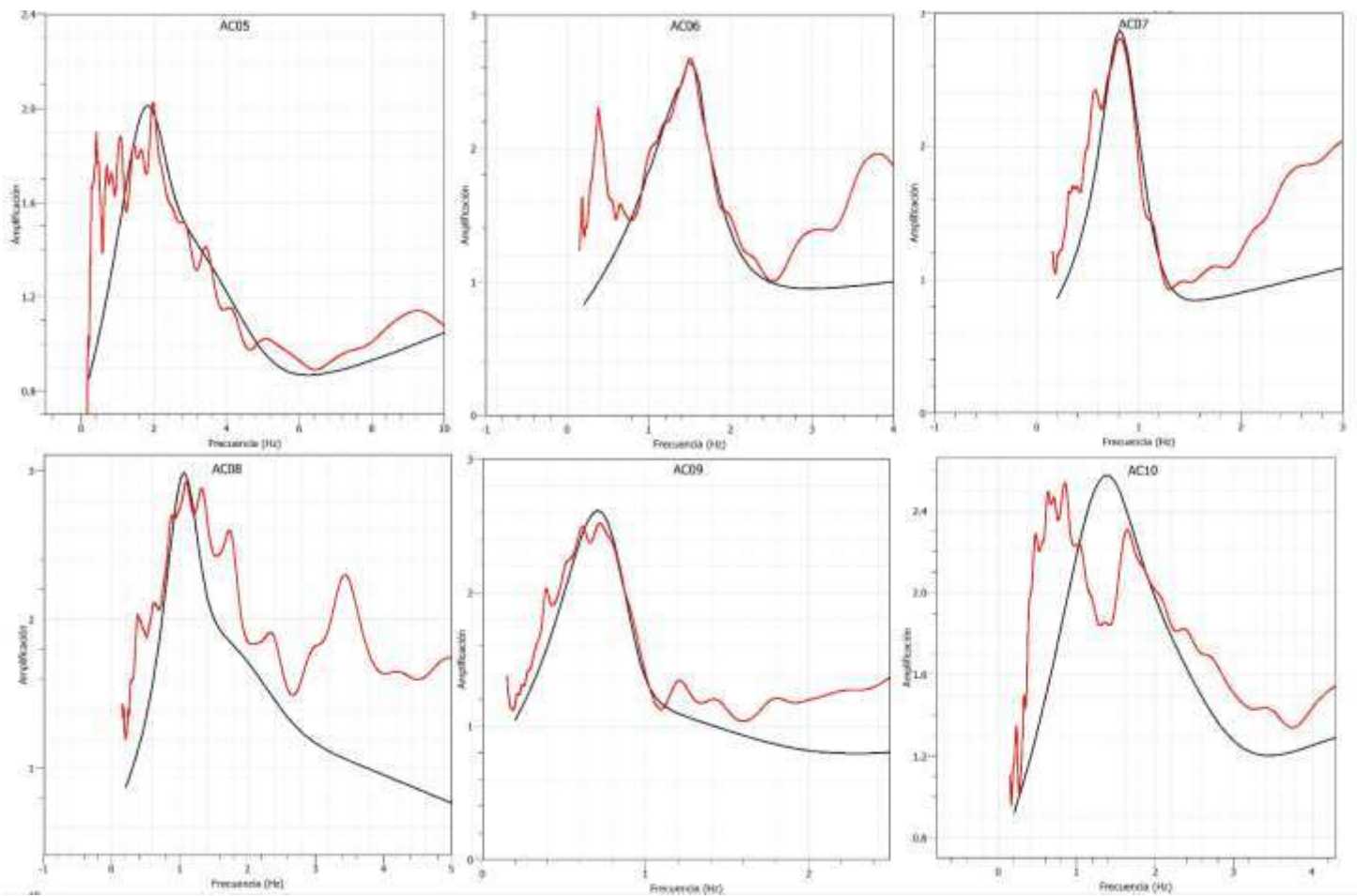


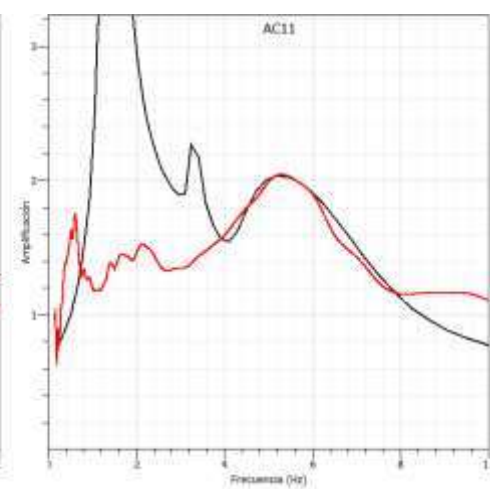
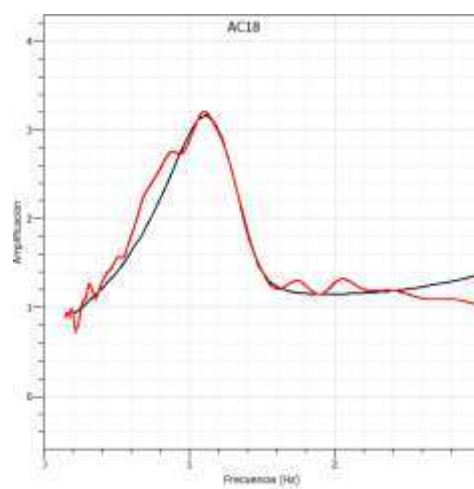
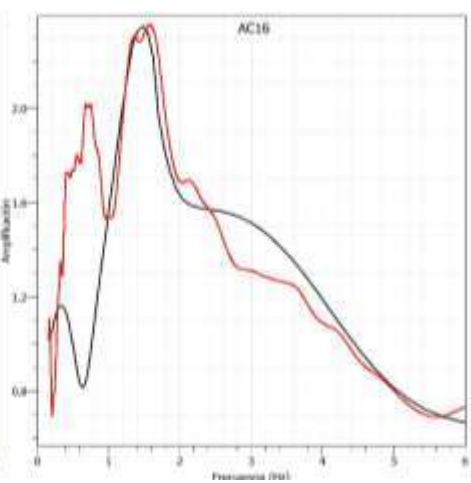
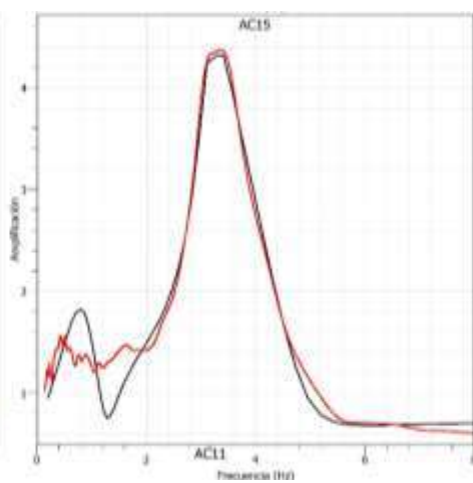
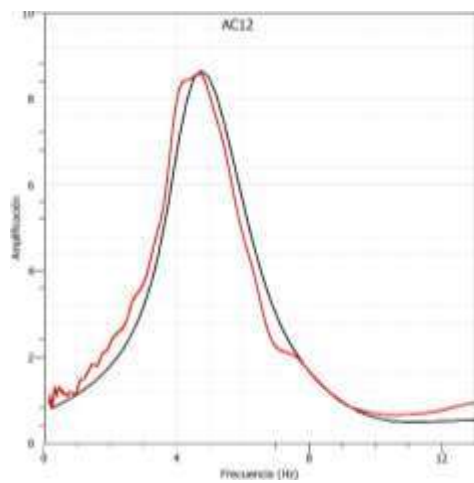


## Apéndice 5

### Validación modelos de velocidad.

Se muestran las validaciones de las estaciones que hicieron parte de la red sísmica de Acapulco y con las cuales se realizaron los perfiles de velocidad de onda S 2D. La curva en negro representa el cociente espectral y la curva en rojo el modo fundamental asociado al modelo de velocidades obtenido en la inversión del segmento de la curva H/V.

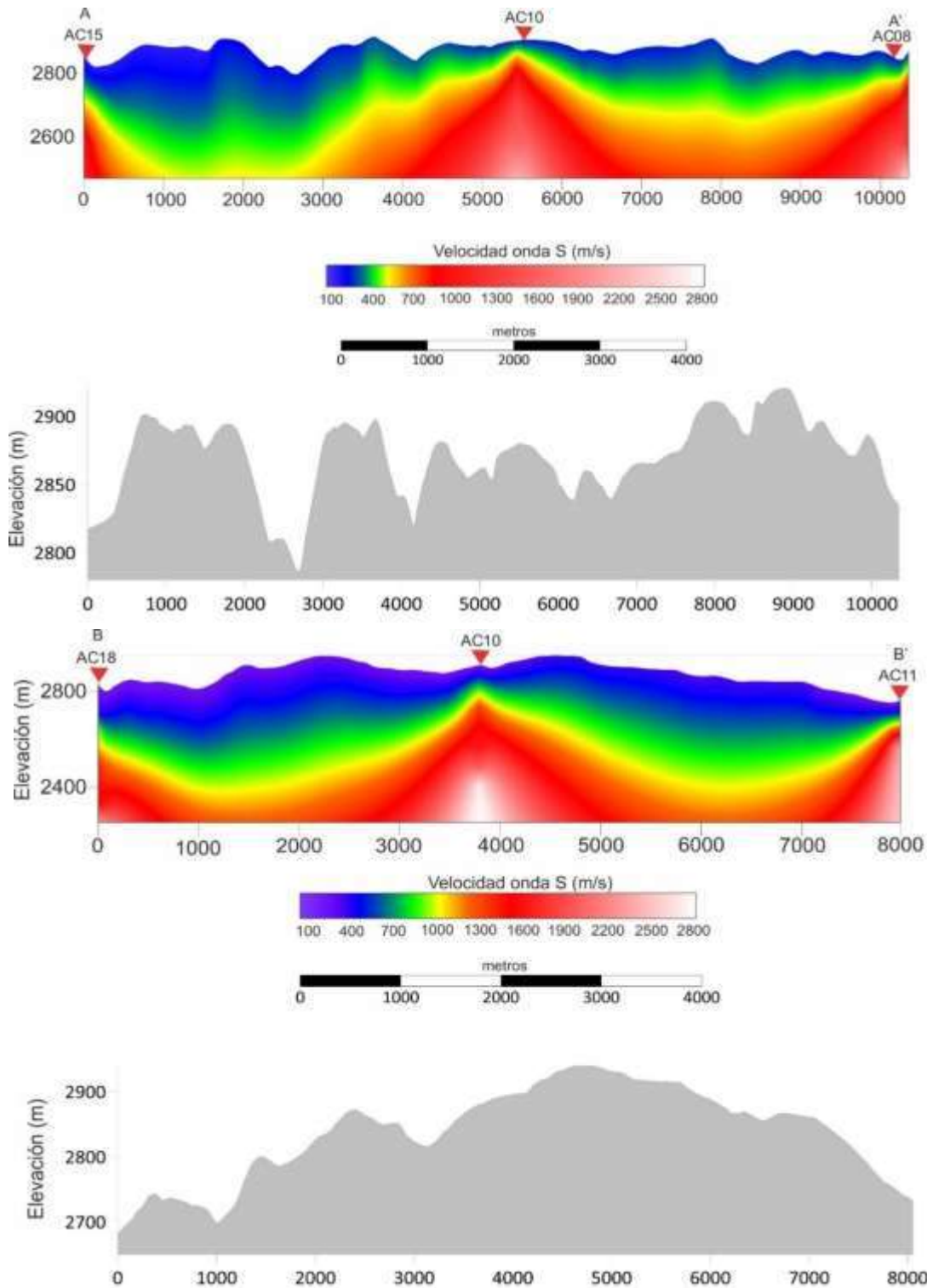


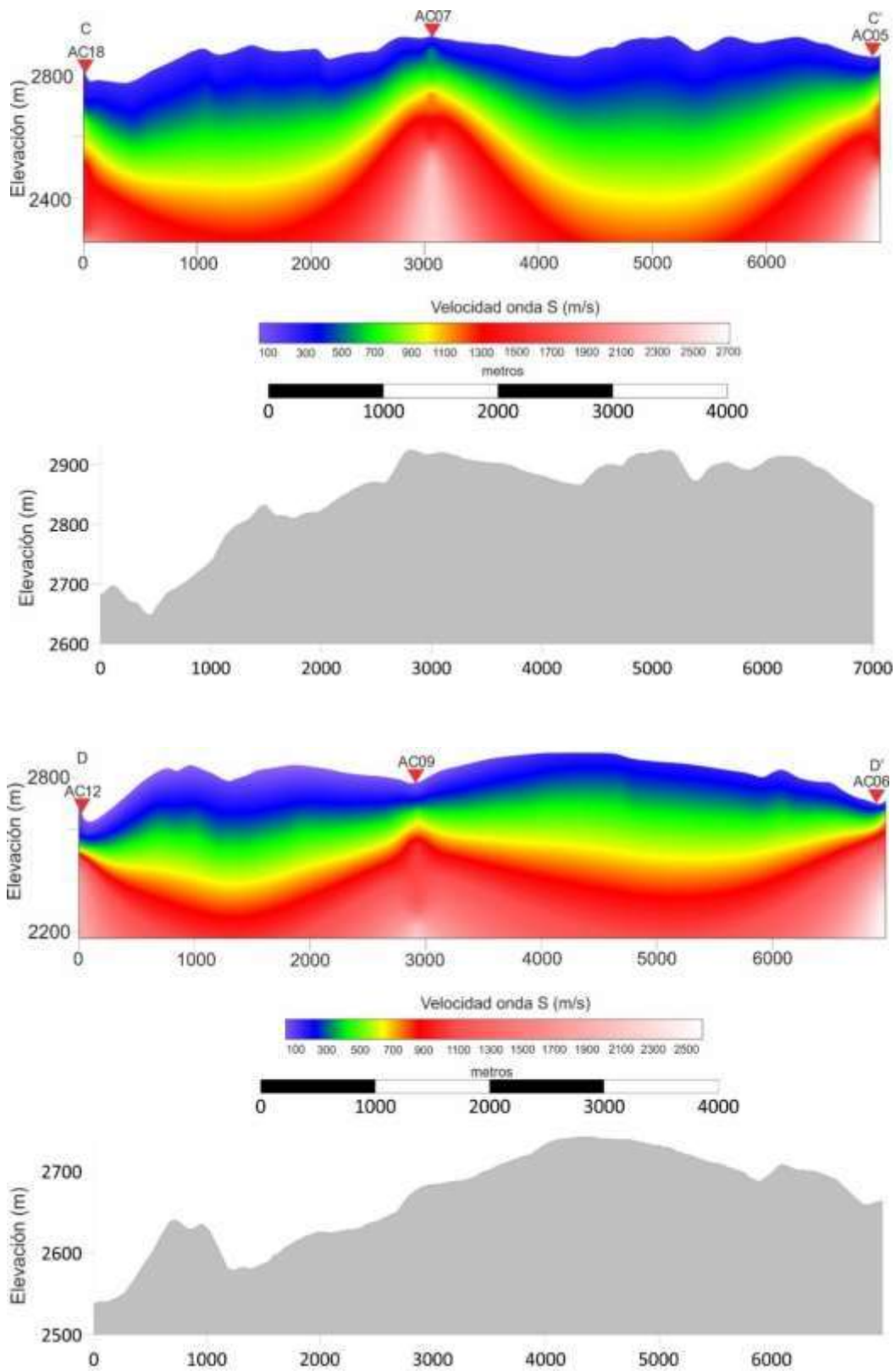


## Apéndice 6

### Interpolación perfiles de velocidad 2D

Se muestran los perfiles de velocidad que se tomaron en cuenta para su interpolación. Además, se muestra un perfil topográfico con el que se intenta demostrar la similitud del mismo, con la que se logró desarrollar dentro de cada interpolación.





| ESTACIÓN AC01 |             |          |          |        |        |       |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|-------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 6    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0     | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson v |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
|               |             |          |          |        |        |       |             |         |                        | VpO                 | VpT  |                             |                           |                          |       |
| 1.30          | 647.64      | 360.96   | 1020.10  | 500.00 | 400.00 | 1.30  | 1.30        | 625.20  | 3.46                   | 0.27                | 0.25 | 1.33E+05                    | 3.39E+05                  | 5.09E+04                 | 1.79  |
| 15.60         | 673.94      | 440.44   | 1104.60  | 500.00 | 400.00 | 16.90 | 16.90       | 762.86  | 13.19                  | 0.13                | 0.25 | 2.14E+05                    | 4.83E+05                  | 1.20E+05                 | 1.53  |
| 2.20          | 1235.50     | 466.37   | 1161.00  | 500.00 | 400.00 | 19.10 | 19.10       | 807.78  | 34.62                  | 0.42                | 0.25 | 2.53E+05                    | 7.16E+05                  | 3.96E+04                 | 2.65  |
| 13.30         | 1876.46     | 1236.58  | 1184.30  | 500.00 | 400.00 | 32.40 | 32.40       | 2141.82 | 14.14                  | 0.12                | 0.25 | 1.81E+06                    | 4.04E+06                  | 1.03E+06                 | 1.52  |
| 58.30         | 2479.35     | 1617.71  | 1232.40  | 500.00 | 400.00 | 90.70 | 90.70       | 2801.96 | 13.01                  | 0.13                | 0.25 | 3.23E+06                    | 7.28E+06                  | 1.80E+06                 | 1.53  |
| 0.00          | 4926.20     | 2824.21  | 3047.90  | 500.00 | 400.00 | 90.70 | 90.70       | 4891.68 | 0.70                   | 0.26                | 0.25 | 2.43E+07                    | 6.10E+07                  | 9.96E+06                 | 1.74  |
| 90.70         | Prof. Total |          |          |        |        |       |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC02 |             |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 7    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson v |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
|               |             |          |          |        |        |        |             |         |                        | VpO                 | VpT  |                             |                           |                          |       |
| 3.20          | 448.20      | 158.00   | 1072.10  | 500.00 | 400.00 | 3.20   | 3.20        | 273.66  | 38.94                  | 0.43                | 0.25 | 2.68E+04                    | 7.65E+04                  | 3.62E+03                 | 2.84  |
| 6.00          | 604.10      | 357.40   | 1564.80  | 500.00 | 400.00 | 9.20   | 9.20        | 619.03  | 2.47                   | 0.23                | 0.25 | 2.00E+05                    | 4.92E+05                  | 8.83E+04                 | 1.69  |
| 93.10         | 805.40      | 525.50   | 2238.90  | 500.00 | 400.00 | 102.30 | 102.30      | 910.19  | 13.01                  | 0.13                | 0.25 | 6.18E+05                    | 1.40E+06                  | 3.45E+05                 | 1.53  |
| 145.70        | 1584.40     | 1013.40  | 2329.80  | 500.00 | 400.00 | 248.00 | 248.00      | 1755.26 | 10.78                  | 0.15                | 0.25 | 2.39E+06                    | 5.52E+06                  | 1.27E+06                 | 1.56  |
| 54.70         | 1991.90     | 1325.80  | 2522.80  | 500.00 | 400.00 | 302.70 | 302.70      | 2296.35 | 15.28                  | 0.10                | 0.25 | 4.43E+06                    | 9.78E+06                  | 2.59E+06                 | 1.50  |
| 85.60         | 2244.50     | 1352.40  | 2573.50  | 500.00 | 400.00 | 388.30 | 388.30      | 2342.43 | 4.36                   | 0.22                | 0.25 | 4.71E+06                    | 1.14E+07                  | 2.17E+06                 | 1.66  |
| 0.00          | 4877.40     | 2796.20  | 3140.20  | 500.00 | 400.00 | 388.30 | 388.30      | 4843.16 | 0.70                   | 0.26                | 0.25 | 2.46E+07                    | 6.16E+07                  | 1.01E+07                 | 1.74  |
| 388.30        | Prof. Total |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC04 |             |          |          |         |         |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|---------|---------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 6    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp      | Qs      | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson v |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
|               |             |          |          |         |         |        |             |         |                        | VpO                 | VpT  |                             |                           |                          |       |
| 13.500        | 546.900     | 343.400  | 1120.700 | 500.000 | 400.000 | 13.50  | 13.50       | 594.79  | 8.76                   | 0.17                | 0.25 | 1.32E+05                    | 3.10E+05                  | 6.74E+04                 | 1.59  |
| 10.500        | 864.300     | 516.400  | 1153.500 | 500.000 | 400.000 | 24.00  | 24.00       | 894.43  | 3.49                   | 0.22                | 0.25 | 3.08E+05                    | 7.52E+05                  | 1.39E+05                 | 1.67  |
| 10.400        | 1074.800    | 604.100  | 1265.200 | 500.000 | 400.000 | 34.40  | 34.40       | 1046.33 | 2.65                   | 0.27                | 0.25 | 4.62E+05                    | 1.17E+06                  | 1.80E+05                 | 1.78  |
| 8.700         | 1175.500    | 722.600  | 1347.800 | 500.000 | 400.000 | 43.10  | 43.10       | 1251.58 | 6.47                   | 0.20                | 0.25 | 7.04E+05                    | 1.68E+06                  | 3.41E+05                 | 1.63  |
| 101.100       | 1616.300    | 993.500  | 1928.500 | 500.000 | 400.000 | 144.20 | 144.20      | 1720.79 | 6.46                   | 0.20                | 0.25 | 1.90E+06                    | 4.55E+06                  | 9.22E+05                 | 1.63  |
| 0.000         | 3765.600    | 2246.500 | 2814.600 | 500.000 | 400.000 | 144.20 | 144.20      | 3891.05 | 3.33                   | 0.22                | 0.25 | 1.42E+07                    | 3.48E+07                  | 6.40E+06                 | 1.68  |
| 144.200       | Prof. Total |          |          |         |         |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC05 |             |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 6    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson v |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
|               |             |          |          |        |        |        |             |         |                        | VpO                 | VpT  |                             |                           |                          |       |
| 1.20          | 186.80      | 109.10   | 1179.30  | 500.00 | 400.00 | 1.20   | 1.20        | 188.97  | 1.16                   | 0.24                | 0.25 | 1.40E+04                    | 3.48E+04                  | 6.01E+03                 | 1.71  |
| 32.20         | 860.20      | 544.00   | 1300.20  | 500.00 | 400.00 | 33.40  | 33.40       | 942.24  | 9.54                   | 0.17                | 0.25 | 3.85E+05                    | 8.98E+05                  | 1.99E+05                 | 1.58  |
| 23.30         | 1381.20     | 831.70   | 1671.70  | 500.00 | 400.00 | 56.70  | 56.70       | 1440.55 | 4.30                   | 0.22                | 0.25 | 1.16E+06                    | 2.81E+06                  | 5.33E+05                 | 1.66  |
| 94.90         | 1715.70     | 1086.50  | 1947.70  | 500.00 | 400.00 | 151.60 | 151.60      | 1881.87 | 9.69                   | 0.17                | 0.25 | 2.30E+06                    | 5.36E+06                  | 1.20E+06                 | 1.58  |
| 14.30         | 1857.90     | 1130.70  | 2216.70  | 500.00 | 400.00 | 165.90 | 165.90      | 1958.43 | 5.41                   | 0.21                | 0.25 | 2.83E+06                    | 6.83E+06                  | 1.34E+06                 | 1.64  |
| 0.00          | 3341.80     | 2180.40  | 2678.00  | 500.00 | 400.00 | 165.90 | 165.90      | 3776.56 | 13.01                  | 0.13                | 0.25 | 1.27E+07                    | 2.88E+07                  | 7.11E+06                 | 1.53  |
| 165.90        | Prof. Total |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC06 |             |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 8    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson v |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
|               |             |          |          |        |        |        |             |         |                        | VpO                 | VpT  |                             |                           |                          |       |
| 1.10          | 433.40      | 228.70   | 1040.10  | 500.00 | 400.00 | 1.10   | 1.10        | 396.12  | 8.60                   | 0.31                | 0.25 | 5.44E+04                    | 1.42E+05                  | 1.83E+04                 | 1.90  |
| 3.00          | 688.40      | 315.90   | 1111.50  | 500.00 | 400.00 | 4.10   | 4.10        | 547.15  | 20.52                  | 0.32                | 0.25 | 1.11E+05                    | 2.94E+05                  | 3.46E+04                 | 2.18  |
| 42.00         | 1211.20     | 790.20   | 1215.70  | 500.00 | 400.00 | 46.10  | 46.10       | 1368.67 | 13.00                  | 0.09                | 0.25 | 7.59E+05                    | 1.66E+06                  | 4.49E+05                 | 1.53  |
| 60.30         | 1324.60     | 855.70   | 1259.50  | 500.00 | 400.00 | 106.40 | 106.40      | 1482.12 | 11.89                  | 0.10                | 0.25 | 9.22E+05                    | 2.04E+06                  | 5.37E+05                 | 1.55  |
| 45.90         | 1803.20     | 1188.30  | 1294.30  | 500.00 | 400.00 | 152.30 | 152.30      | 2058.20 | 14.14                  | 0.08                | 0.25 | 1.83E+06                    | 3.96E+06                  | 1.10E+06                 | 1.52  |
| 49.00         | 2406.40     | 1524.00  | 1386.10  | 500.00 | 400.00 | 201.30 | 201.30      | 2639.65 | 9.69                   | 0.12                | 0.25 | 3.22E+06                    | 7.24E+06                  | 1.81E+06                 | 1.58  |
| 104.10        | 3957.70     | 2074.60  | 1952.40  | 500.00 | 400.00 | 305.40 | 305.40      | 3593.31 | 9.21                   | 0.26                | 0.25 | 8.40E+06                    | 2.12E+07                  | 3.38E+06                 | 1.91  |
| 0.00          | 4504.20     | 2598.50  | 2987.80  | 500.00 | 400.00 | 305.40 | 305.40      | 4500.73 | 0.08                   | 0.20                | 0.25 | 2.02E+07                    | 4.84E+07                  | 9.67E+06                 | 1.73  |
| 305.40        | Prof. Total |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC07 |            |          |          |        |        |      |             |        |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|------------|----------|----------|--------|--------|------|-------------|--------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
|               |            |          |          | Qp     | Qs     | 0.00 | Profundidad | VpT    | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson v |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
| H(m)/N°C 8    | Vpob (m/s) | Vs (m/s) | ρ (t/m3) |        |        |      |             |        |                        | VpO                 | VpT  |                             |                           |                          |       |
| 1.40          | 194.30     | 105.10   | 1072.10  | 500.00 | 400.00 | 1.40 | 1.40        | 182.04 | 6.31                   | 0.29                | 0.25 | 1.18E+04                    | 3.06E+04                  | 4.22E+03                 | 1.85  |

|        |             |         |         |        |        |        |        |         |       |      |      |          |          |          |      |
|--------|-------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|------|------|----------|----------|----------|------|
| 1.30   | 292.20      | 172.90  | 1416.60 | 500.00 | 400.00 | 2.70   | 2.70   | 299.47  | 2.49  | 0.18 | 0.25 | 4.23E+04 | 1.00E+05 | 2.12E+04 | 1.69 |
| 3.10   | 332.50      | 179.90  | 1518.80 | 500.00 | 400.00 | 5.80   | 5.80   | 311.60  | 6.29  | 0.24 | 0.25 | 4.92E+04 | 1.22E+05 | 2.09E+04 | 1.85 |
| 149.40 | 935.10      | 592.20  | 1612.20 | 500.00 | 400.00 | 155.20 | 155.20 | 1025.72 | 9.69  | 0.12 | 0.25 | 5.65E+05 | 1.27E+06 | 3.19E+05 | 1.58 |
| 110.10 | 1715.70     | 1142.00 | 1834.90 | 500.00 | 400.00 | 265.30 | 265.30 | 1978.00 | 15.29 | 0.07 | 0.25 | 2.39E+06 | 5.14E+06 | 1.46E+06 | 1.50 |
| 72.50  | 2222.30     | 1407.30 | 2173.00 | 500.00 | 400.00 | 337.80 | 337.80 | 2437.52 | 9.68  | 0.12 | 0.25 | 4.30E+06 | 9.67E+06 | 2.43E+06 | 1.58 |
| 24.70  | 2580.00     | 1524.00 | 2473.10 | 500.00 | 400.00 | 362.50 | 362.50 | 2639.65 | 2.31  | 0.18 | 0.25 | 5.74E+06 | 1.36E+07 | 2.87E+06 | 1.69 |
| 0.00   | 4877.40     | 2452.20 | 2731.90 | 500.00 | 400.00 | 362.50 | 362.50 | 4247.33 | 12.92 | 0.28 | 0.25 | 1.64E+07 | 4.22E+07 | 6.10E+06 | 1.99 |
| 362.50 | Prof. Total |         |         |        |        |        |        |         |       |      |      |          |          |          |      |

| ESTACIÓN AC08 |             |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 7    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson ν |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
| 0.40          | 304.00      | 158.40   | 1030.30  | 500.00 | 400.00 | 0.40   | 0.40        | 274.36  | 9.75                   | VpO                 | VpT  | 2.59E+04                    | 6.79E+04                  | 8.44E+03                 | 1.92  |
| 0.30          | 822.30      | 357.20   | 1082.90  | 500.00 | 400.00 | 0.70   | 0.70        | 618.69  | 24.76                  | 0.34                | 0.25 | 1.38E+05                    | 3.71E+05                  | 3.87E+04                 | 2.30  |
| 23.90         | 992.60      | 413.90   | 1269.70  | 500.00 | 400.00 | 24.60  | 24.60       | 716.90  | 27.78                  | 0.36                | 0.25 | 2.18E+05                    | 5.90E+05                  | 5.62E+04                 | 2.40  |
| 39.90         | 1074.80     | 634.90   | 1890.50  | 500.00 | 400.00 | 64.50  | 64.50       | 1099.68 | 2.31                   | 0.18                | 0.25 | 7.62E+05                    | 1.80E+06                  | 3.81E+05                 | 1.69  |
| 39.10         | 1152.40     | 708.30   | 1909.40  | 500.00 | 400.00 | 103.60 | 103.60      | 1226.81 | 6.46                   | 0.15                | 0.25 | 9.58E+05                    | 2.20E+06                  | 5.13E+05                 | 1.63  |
| 224.70        | 1991.90     | 1248.90  | 2006.80  | 500.00 | 400.00 | 328.30 | 328.30      | 2163.16 | 8.60                   | 0.13                | 0.25 | 3.13E+06                    | 7.09E+06                  | 1.74E+06                 | 1.59  |
| 0.00          | 4829.10     | 2687.10  | 3109.10  | 500.00 | 400.00 | 328.30 | 328.30      | 4654.19 | 3.62                   | 0.23                | 0.25 | 2.24E+07                    | 5.50E+07                  | 1.01E+07                 | 1.80  |
| 328.30        | Prof. Total |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC09 |             |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 8    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson ν |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
| 3.20          | 622.40      | 287.70   | 1374.90  | 500.00 | 400.00 | 3.20   | 3.20        | 498.31  | 19.94                  | VpO                 | VpT  | 1.14E+05                    | 3.10E+05                  | 2.81E+04                 | 2.16  |
| 1.20          | 881.60      | 357.40   | 1402.60  | 500.00 | 400.00 | 4.40   | 4.40        | 619.03  | 29.78                  | 0.37                | 0.25 | 1.79E+05                    | 4.89E+05                  | 4.38E+04                 | 2.47  |
| 104.10        | 1065.10     | 630.20   | 1798.70  | 500.00 | 400.00 | 108.50 | 108.50      | 1091.54 | 2.48                   | 0.18                | 0.25 | 7.14E+05                    | 1.69E+06                  | 3.58E+05                 | 1.69  |
| 37.80         | 1632.40     | 964.20   | 1986.90  | 500.00 | 400.00 | 146.30 | 146.30      | 1670.04 | 2.31                   | 0.18                | 0.25 | 1.85E+06                    | 4.37E+06                  | 9.24E+05                 | 1.69  |
| 147.40        | 1698.70     | 1033.80  | 2047.10  | 500.00 | 400.00 | 293.70 | 293.70      | 1790.59 | 5.41                   | 0.16                | 0.25 | 2.19E+06                    | 5.07E+06                  | 1.15E+06                 | 1.64  |
| 126.60        | 2093.50     | 1075.80  | 2123.90  | 500.00 | 400.00 | 420.30 | 420.30      | 1863.34 | 10.99                  | 0.27                | 0.25 | 2.46E+06                    | 6.25E+06                  | 9.51E+05                 | 1.95  |
| 87.50         | 3409.00     | 2116.30  | 2302.10  | 500.00 | 400.00 | 507.80 | 507.80      | 3665.54 | 7.53                   | 0.14                | 0.25 | 1.03E+07                    | 2.35E+07                  | 5.62E+06                 | 1.61  |
| 0.00          | 3957.70     | 2384.70  | 2720.00  | 500.00 | 400.00 | 507.80 | 507.80      | 4130.42 | 4.36                   | 0.17                | 0.25 | 1.55E+07                    | 3.61E+07                  | 8.01E+06                 | 1.66  |
| 507.80        | Prof. Total |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC10 |             |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 9    | Vpob (m/s)  | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson ν |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
| 1.60          | 557.20      | 292.40   | 982.40   | 500.00 | 400.00 | 1.60   | 1.60        | 506.45  | 9.11                   | VpO                 | VpT  | 8.40E+04                    | 2.20E+05                  | 2.79E+04                 | 1.91  |
| 2.90          | 622.40      | 392.40   | 1050.30  | 500.00 | 400.00 | 4.50   | 4.50        | 679.66  | 9.20                   | 0.13                | 0.25 | 1.62E+05                    | 3.65E+05                  | 9.05E+04                 | 1.59  |
| 16.50         | 996.60      | 475.90   | 1271.30  | 500.00 | 400.00 | 21.00  | 21.00       | 824.28  | 17.29                  | 0.31                | 0.25 | 2.88E+05                    | 7.53E+05                  | 9.69E+04                 | 2.09  |
| 63.20         | 1811.80     | 919.20   | 1432.60  | 500.00 | 400.00 | 84.20  | 84.20       | 1592.10 | 12.13                  | 0.28                | 0.25 | 1.21E+06                    | 3.09E+06                  | 4.57E+05                 | 1.97  |
| 35.80         | 2003.50     | 1006.50  | 1755.10  | 500.00 | 400.00 | 120.00 | 120.00      | 1743.31 | 12.99                  | 0.28                | 0.25 | 1.78E+06                    | 4.56E+06                  | 6.59E+05                 | 1.99  |
| 80.40         | 2374.50     | 1406.60  | 2030.10  | 500.00 | 400.00 | 200.40 | 200.40      | 2436.30 | 2.60                   | 0.18                | 0.25 | 4.02E+06                    | 9.49E+06                  | 2.02E+06                 | 1.69  |
| 5.50          | 2320.60     | 1555.80  | 2293.30  | 500.00 | 400.00 | 205.90 | 205.90      | 2694.72 | 16.12                  | 0.07                | 0.25 | 5.55E+06                    | 1.18E+07                  | 3.43E+06                 | 1.49  |
| 192.00        | 2905.30     | 1614.80  | 2751.50  | 500.00 | 400.00 | 397.90 | 397.90      | 2796.92 | 3.73                   | 0.23                | 0.25 | 7.17E+06                    | 1.76E+07                  | 3.21E+06                 | 1.80  |
| 0.00          | 4565.60     | 2816.70  | 2937.70  | 500.00 | 400.00 | 397.90 | 397.90      | 4878.67 | 6.86                   | 0.15                | 0.25 | 2.33E+07                    | 5.35E+07                  | 1.26E+07                 | 1.62  |
| 397.90        | Prof. Total |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC11 |            |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |
|---------------|------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 5    | Vpob (m/s) | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0      | Profundidad | VpT     | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson ν |      | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
| 3.80          | 221.10     | 123.20   | 950.00   | 500.00 | 400.00 | 3.80   | 3.80        | 213.39  | 3.49                   | VpO                 | VpT  | 1.44E+04                    | 3.68E+04                  | 5.52E+03                 | 1.79  |
| 5.40          | 259.30     | 171.10   | 1694.50  | 500.00 | 400.00 | 9.20   | 9.20        | 296.35  | 14.29                  | 0.11                | 0.25 | 4.96E+04                    | 1.11E+05                  | 2.84E+04                 | 1.52  |
| 32.80         | 657.70     | 353.00   | 2073.20  | 500.00 | 400.00 | 42.00  | 42.00       | 611.41  | 7.04                   | 0.30                | 0.25 | 2.58E+05                    | 6.70E+05                  | 9.04E+04                 | 1.86  |
| 60.40         | 1211.30    | 628.60   | 2113.00  | 500.00 | 400.00 | 102.40 | 102.40      | 1088.77 | 10.12                  | 0.32                | 0.25 | 8.35E+05                    | 2.20E+06                  | 2.70E+05                 | 1.93  |
| 0.00          | 4640.70    | 2531.40  | 2817.70  | 500.00 | 400.00 | 102.40 | 102.40      | 4384.51 | 5.52                   | 0.29                | 0.25 | 1.81E+07                    | 4.65E+07                  | 6.57E+06                 | 1.83  |
| 102.40        |            |          |          |        |        |        |             |         |                        |                     |      |                             |                           |                          |       |

| ESTACIÓN AC12 |            |          |          |        |        |      |             |        |                        |                     |     |                             |                           |                          |       |
|---------------|------------|----------|----------|--------|--------|------|-------------|--------|------------------------|---------------------|-----|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| H(m)/N°C 5    | Vpob (m/s) | Vs (m/s) | ρ (t/m3) | Qp     | Qs     | 0    | Profundidad | VpT    | Relación VpO Vs VpT(%) | Modulo de Poisson ν |     | Modulo de rigidez G (KN/m2) | Modulo elastico E (KN/m2) | Modulo de Bulk K (KN/m2) | Vp/Vs |
| 9.40          | 490.20     | 249.80   | 1040.60  | 500.00 | 400.00 | 9.40 | 9.40        | 432.67 | 11.74                  | VpO                 | VpT | 6.49E+04                    | 1.72E+05                  | 2.01E+04                 | 1.96  |



