



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA  
FÍSICA DE LA TIERRA SÓLIDA

## **CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA ACTIVA DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HÚMEROS, PUEBLA, MEDIANTE: SISMICIDAD Y POTENCIAL ESPONTÁNEO.**

### **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
ING. NALLELY JIMÉNEZ MÉNDEZ

TUTOR:  
M. EN C. JAVIER F. LERMO SAMANIEGO  
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	3
1.2.1.-Objetivos Generales .....	3
1.2.2.-Objetivos Específicos .....	3
<b>CAPÍTULO 2 ASPECTOS GEOLÓGICOS Y TECTÓNICOS DEL CAMPO LOS HUMEROS, PUEBLA .....</b>	<b>4</b>
2.1 ASPECTO GEOLÓGICO .....	4
2.2 ASPECTO TECTONICO.....	8
2.2.1.-Modelo Estructural de Willcox, 2011 .....	8
2.2.2.-Modelo Estructural de Carrasco et al. 2017 .....	9
2.2.3.-Modelo Estructural Elaborado por CFE .....	9
2.3 ESTUDIOS PREVIOS .....	11
<b>CAPÍTULO 3 ESTUDIO SISMOLÓGICO .....</b>	<b>21</b>
3.1 ANTECEDENTES.....	21
3.2 PROCESAMIENTO Y RELOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS .....	23
3.2.1.- Análisis de tambores .....	24
3.2.2. -Programa de Localización .....	24
3.2.3. -Modelo de Velocidad.....	25
3.2.4.- Ecuación para el cálculo de la Magnitud de Duración.....	25
3.2.5.- Localización Hipocentral .....	25
3.2.6.- Distribución de la Sismicidad en planta.....	26
3.2.7.- Distribución de la Sismicidad en profundidad .....	28
3.3.-MECANISMO FOCALES .....	31
3.2.1.- Mecanismos Focales compuestos de las Zonas Activas del Campo.....	31
3.4.-SISMOS DE MAYOR MAGNITUD (MD).....	33
3.4.1.- Parámetros de Fuente y Mecanismos Focales.....	34
3.4.2.- Modelado De La Fuente.....	34
3.4.3.- Aplicación Del Modelo.....	34
3.5.- RELACIÓN ENTRE LA SISMICIDAD E INYECCIÓN DE LOS POZOS .....	40
3.6.- COCIENTE ESPECTRAL H/V .....	42
3.6.1.- Cociente espectral H/V con ruido.....	42
3.6.2.- Inversión del cociente espectral H/V .....	43
3.6.3.- Resultados .....	46
<b>CAPÍTULO 4 ESTUDIO DE POTENCIAL ESPONTÁNEO .....</b>	<b>48</b>
4.1 ORIGEN DE LAS ANOMALÍAS DE SP.....	48
4.1.1.- Efecto electroquímico.....	49
4.1.2.- Efecto termoeléctrico.....	50
4.1.3.- Efecto electrocinético .....	51
4.1.4.- Efecto topográfico .....	52
4.2 ANOMALÍAS DE POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP).....	54
4.2.1.- Tipo de anomalía positiva .....	54
4.2.2.- Tipo de anomalía negativa .....	54
4.2.3.- Tipo coexistente de anomalías positivas y negativas .....	55
4.2.4.- Tipo dependiente de la estructura .....	55
4.2.5.- Sin tipo de anomalía .....	55
4.3 CASOS DE SP EN MÉXICO .....	55
4.3.1.- Volcán La Malinche .....	56
4.3.2.- Campo Geotérmico Cerritos Colorados, Jal.....	58

4.3.3.- Zona Geotérmica La soledad. Jal .....	60
<b>CAPÍTULO 5 . -ESTUDIO DE SP Y TEMPERATURA EN LOS HUMEROS, PUEBLA. ...</b>	<b>63</b>
5.1 POTENCIAL ESPONTÁNEO.....	63
5.1.1.- Equipo y adquisición .....	64
5.1.3.- Procesamiento .....	66
5.1.4.- Resultados.....	70
5.2 TEMPERATURA.....	73
5.2.1.- Equipo y Adquisición.....	73
5.2.2.- Resultados.....	74
<b>CAPÍTULO 6 . DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL GEOTÉRMICO DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS.....</b>	<b>76</b>
<b>CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>85</b>



## Índice de Figuras

FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS ACTUALES EN MÉXICO, 4 OPERADOS POR CFE Y 1 POR LA EMPRESA PRIVADA GRUPO DRAGÓN.....	1
FIGURA 2. MAPA DEL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO CENTRAL MODIFICADO DE WILLCOX (2011), MOSTRANDO LA UBICACIÓN DE LA CALDERA DE LOS HUMEROS EN EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO (CVM), LOS ASPECTOS TECTÓNICOS Y LOS VOLCANES Y CALDERAS DENTRO DEL CVM.....	2
FIGURA 3. MAPA GEOLÓGICO DE LA CALDERA Y CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, REPRESENTACIÓN DE LOS 4 GRUPOS REGIONALES: G1, POST-CALDERA (CUADRO AMARILLO); G2, CALDERA (CUADRO ROSA); G3, PRE-CALDERA (CUADRO AZUL) Y G4, BASAMENTO. CLAVE PARA LAS UNIDADES LITOLÓGICAS: Pz, BASAMENTO PREVOLCÁNICO; K, GRANODIORITAS Y ESQUISTOS METAMÓRFICOS; J, CALIZAS Y LUTITAS; K, CALIZAS; TIG, GRANITO; TPA, LAVAS BASÁLTICAS DE TEZIUTLÁN; QR4, QR3, DOMOS RIOLÍTICOS; QB2, BASALTOS Y ANDESITAS BASÁLTICAS; QR, DOMOS RIOLÍTICOS DEL C. PIZARRO-ÁGUILAS, QIGX, IGNIMBRITA DE XALTIPAN; QR2, DIQUES RIOLÍTICOS LOS POTREROS; QTF, TOBA FABY; QIGZ, IGNIMBRITA DE ZARAGOZA; QT2, TRAQUITA CHICOMIAPA-LOS PARAJES; QR1, DOMOS RIOLÍTICOS; QTA4, TRAQUIANDESITA MAXTALOYA; QTA2, TRAQUIANDESITA VICTORIA; QTAB, TRAQUIANDESITA BASÁLTICAS DE TEPEYAHUALCO; QAB1, ANDESITAS BASÁLTICAS ATECAX; QAB2, ANDESITAS BASÁLTICAS; QTA3, TRAQUIANDESITA SAN ANTONIO-LAS CHAPAS; QTC, MIEMBRO CUICULTICO; QB1, LAVAS BASÁLTICAS DE OLIVINO; QT1, TRAQUITA EL PÁJARO; QP, DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS INDETERMINADOS. MODIFICADO DE CARRASCO-NÚÑEZ ET AL. (2018).....	5
FIGURA 4. MAPA GEOLÓGICO DE LOS HUMEROS REINTERPRETADO Y MODIFICADO DE CALCAGNO ET AL. (2018) UTILIZANDO LOS CUATRO GRUPOS SELECCIONADOS PARA EL MODELADO A ESCALA REGIONAL.....	6
FIGURA 5. MAPA GEOLÓGICO DE LOS HUMEROS REINTERPRETADO Y MODIFICADO DE CALCAGNO ET AL. (2018) UTILIZANDO LAS NUEVE UNIDADES SELECCIONADAS PARA EL MAPEADO A ESCALA LOCAL. ....	7
FIGURA 6. MAPA GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL FINAL TOMADO DE WILLCOX (2011).....	8
FIGURA 7. MODELO ESTRUCTURAL DE CARRASCO ET AL. (2017), REPRESENTANDO LAS PRINCIPALES FALLAS DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS.....	9
FIGURA 8. MAPA CON LOS TRES MODELOS ESTRUCTURALES: WILLCOX, 2011 (LÍNEAS VERDES), CARRASCO ET AL. 2017 (LÍNEAS BLANCAS) Y CFE (LÍNEAS ROJAS).....	10
FIGURA 9. IZQUIERDA: MAPA DE LA SEGUNDA DERIVADA QUE APROXIMA LOS LÍMITES DE LOS CUERPOS CALCÁREOS; DERECHA: MODELO 3D DE LAS ESTRUCTURAS QUE AFECTAN EL BASAMENTO CALCÁREO. CAMPOS_ENRÍQUEZ ET AL. (1991).....	11
FIGURA 10. MAPA QUE MUESTRA LA DIVISIÓN POR SECTORES DE LA CALDERA DE LOS HUMEROS, PUE., LA UBICACIÓN DE LOS POZOS CON MAYOR PRODUCCIÓN DEL CAMPO, Y LOS SISTEMAS DE FALLAS, PIZIANO Y MACHORRO (1999).....	12
FIGURA 11. PERFIL EN DIRECCIÓN NNW-SSE DE PROFUNDIDAD DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA, GEOLOGÍA, POZOS Y FLUJOS DE VAPOR Y AGUA ( ARELLANO ET AL., 2003). ....	13
FIGURA 12. POZOS 41, 42 Y 43, RESPECTIVAMENTE, QUE MUESTRAN LA GEOMETRÍA DE LOS SISTEMAS DE FALLA. (LEYENDA).....	14
FIGURA 13. MAPA QUE MUESTRA LAS ZONAS DE INFILTRACIÓN DE AGUA METEÓRICA, ANTAYHUA (2007).....	15
FIGURA 14. MAPA QUE MUESTRA LOS TRES SECTORES (IZQUIERDA), ASÍ COMO UN ZOOM DE LA ZONA CENTRO CON LA INTERPOLACIÓN DE LOS PUNTOS DE VERIFICACIÓN DE TEMPERATURA, LA ZONA DE MAYOR TERMALISMO SOBRE LA FALLA DE LOS HUMEROS, EL SISTEMA DE FALLAS DE CFE Y LA UBICACIÓN DE LA ZONA DE ACOMODAMIENTO, ROCHA (2011). ....	16
FIGURA 15. MAPA DE ALTIMETRÍA QUE MUESTRA LA PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN; LAS ÁREAS DEL MISMO COLOR REPRESENTAN FALLAS, FRACTURAS Y ESFUERZOS EN LAS MISMAS DIRECCIONES. ZONA A (ÁREA ROSA, DIRECCIÓN NW-SE), ZONA B (ÁREA AZUL, NE-SW) Y ZONA C (ÁREA AMARILLA, EW).....	17
FIGURA 16. IZQUIERDA: ÁREAS TÉRMICAMENTE ANÓMALAS IDENTIFICADAS EN EL CAMPO LOS HUMEROS. DERECHA: INTERPRETACIÓN MORFOESTRUCTURAL DE LOS TRES PRINCIPALES SECTORES ESTRUCTURALES IDENTIFICADOS EN EL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS Y LA CALDERA POTREROS. EL BLOQUE RESURGENTE CORRESPONDE A LOS SECTORES ESTRUCTURALES S1 Y S2.....	18
FIGURA 17 IZQUIERDA: MAPA QUE MUESTRA LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS 90 SISMIOS ANALIZADOS, LAS ESTACIONES Y TRAYECTORIAS QUE PRESENTARON ATENUACIÓN (AMARILLO) Y LAS 4 ZONAS; DERECHA: EJEMPLOS DE LA ATENUACIÓN DE LAS ONDAS S (RAMOS ET. AL 2016). ....	18
FIGURA 18. IZQUIERDA: PROMEDIOS DE LOS COCIENTES ESPECTRALES DE LAS 4 ZONAS; DERECHA: MAPAS DE ISOAMPLITUDES QUE MUESTRAN UN COMPORTAMIENTO PROGRESIVO EN LAS 3 FRECUENCIAS (0.35, 0.65 Y 1.1Hz). EL COLOR OSCURO MUESTRA LAS ZONAS SIN DISMINUCIÓN DE AMPLITUD Y LAS ZONAS ROJAS Y BLANCAS MUESTRAN LA POSIBLE ANOMALÍA GEOTÉRMICA (TOMADO DE TORRES (2017)). ....	19

FIGURA 19. IZQUIERDA: MAPA QUE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LOS SONDEOS DE MT Y DE LOS PERFILES. DERECHA: PERFIL P1 DONDE LOS TONOS AZULES Y PÚRPURAS REPRESENTAN ZONAS DE RESISTENCIA A PARTIR DE $\sim 250$ OHM-M, Y LOS TONOS VERDES Y AMARILLO-ROJOS ESTÁN ASOCIADOS CON LAS ZONAS CONDUCTIVAS ( $> 100$ OHM-M) Y DE ALTA CONDUCTIVIDAD ( $> 15$ OHM-M) RESPECTIVAMENTE. SE OBSERVAN CAPAS CONDUCTORAS POR ENCIMA DE LOS 3 KM DE PROFUNDIDAD.....	20
FIGURA 20. A). FOTOGRAFÍAS QUE MUESTRAN EL DESPLAZAMIENTO DE LAS UNIDADES DEL CAMPO GEOTÉRMICO COMO CONSECUENCIA DEL SISMO DEL 25 DE NOVIEMBRE DE 1994. LAS FLECHAS INDICAN LA DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO. B). PARÁMETROS HIPOCENTRALES Y EJEMPLOS DE RÉPLICAS DEL SISMO (ANTAYHUA, 2007).....	22
FIGURA 21. EJEMPLOS DE TAMBORES DE 24 HORAS DE REGISTRO PARA LA ESTACIÓN HU11 (EL HILILLO), PARA LOS DÍAS 16 DE AGOSTO DEL 2015 Y 8 DE FEBRERO DEL 2016. ELIPSES AZULES, MUESTRAN MÁS DE 26 REGISTROS DE SISMOS LOCALES Y UN EVENTO LEJANO. ....	24
FIGURA 22. IZQUIERDA: VISUALIZACIÓN DE LOS EVENTOS SÍSMICOS EN SEISAN, MOSTRANDO EL NÚMERO ASIGNADO A CADA ESTACIÓN DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS. DERECHA: SE MUESTRAN LAS TRES COMPONENTES DE DICHO EVENTO, LA FECHA Y HORA DEL EVENTO, ADEMÁS DE QUE NOS PERMITE UN ACERCAMIENTO PARA MAYOR EXACTITUD AL MOMENTO DE SELECCIONAR LA LECTURA DE LAS ONDAS P Y S.....	26
FIGURA 23. CRONOLOGÍA DE LOS SISMOS OBSERVADOS EN LA ZONA DEL RESERVORIO A LOS 2700 M Y EN EL BASAMENTO. EN LOS CUADROS SE PRESENTAN LOS DOS SISMOS DE MAYOR MAGNITUD OBSERVADOS EN EL MONITOREO SÍSMICO DEL CAMPO. LÍNEA AMARILLA INDICA LA SEPARACIÓN ENTRE EL RESERVORIO Y EL BASAMENTO.....	28
FIGURA 24. MAPA QUE MUESTRA LA SISMICIDAD EN PLANTA DEL PERIODO 1997-2016, DIVIDIDA EN 4: 1) 1994-1999 (CIRCULOS AZULES). 2) 2000-2002 (CIRCULOS AZUL CLARO), 3) 2003-2012 (CIRCULOS NARANJAS) Y 4) 2013-2016 (CIRCULOS ROJOS), POZOS PRODUCTORES E INYECTORES, EVENTOS DE MAYOR MAGNITUD Y LOS SISTEMAS DE FALLAS Y UBICACIÓN DE LOS PERFILES SW-NE Y N-S (LINEAS VERDES). ....	29
FIGURA 25. PARTE SUPERIOR: PERFIL N-S, SE OBSERVAN DOS ZONAS DE MAYOR ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL SECTOR NORTE Y ESTE (PROYECCIÓN). PARTE INFERIOR: PERFIL SW-NE SE OBSERVA QUE LA SISMICIDAD DEL PERIODO 2013-2016 SE CORRELACIONA Y TIENE LA MISMA TENDENCIA QUE LA FALLA DE RESURGENCIA, PROPUESTA NORINI ET AL. 2018 (ARTICULO INÉDITO). EN AMBOS SE OBSERVA LA GEOLOGÍA EN 4 GRUPOS, DESCRITOS ANTERIORMENTE, POZOS PRODUCTORES, LÍMITES DE LA CALDERA LOS POTREROS, Y LOS 5 EVENTOS DE MAYOR MAGNITUD.....	30
FIGURA 26. RELACIÓN ENTRE LOS PRIMEROS ARRIBOS Y LA GEOMETRÍA DE LA FALLA. ....	31
FIGURA 27. MAPA QUE MUESTRA LA SISMICIDAD REGISTRADA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HÚMEROS DEL PERIODO 1997-2016, ASÍ COMO LOS MECANISMOS REALIZADOS EN LA ZNW (CÍRCULO ROJO), EN LA PARTE ESTE, ENTRE LA FALLA LAS VÍBORAS Y LAS PAPAS (CÍRCULO VERDE) Y EN LA ZONA OESTE DEL PUEBLO LOS HUMEROS (CÍRCULO MORADO). ....	32
FIGURA 28. EJEMPLO DEL PROCEDIMIENTO EN SEISAN PARA OBTENER REGISTROS EN DESPLAZAMIENTOS EN EL CUAL, PRIMERO SE CORRIGE LA SEÑAL POR LA RESPUESTA INSTRUMENTAL. ....	35
FIGURA 29. IZQUIERDA: ACERCAMIENTO DE LOS PRIMEROS ARRIBOS DE LAS ESTACIONES QUE REGISTRARON EL SISMO CON LA RED DENTRO DEL CAMPO, ASÍ COMO DE LA RED DEL SSN (SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL), CON EL OBJETO DE OBSERVAR SU POLARIDAD, JUNTO CON EL MECANISMO FOCAL COMPUESTO OBTENIDO, CUYA SOLUCIÓN SE INTERPRETA COMO UNA FALLA OBLICUA CON COMPONENTE INVERSA Y DESPLAZAMIENTO LATERAL IZQUIERDO (LERMO ET AL. 2002). ....	36
FIGURA 30. IZQUIERDA: ACERCAMIENTO DE LOS PRIMEROS ARRIBOS DE LAS ESTACIONES QUE REGISTRARON EL SISMO, CON EL OBJETO DE OBSERVAR SU POLARIDAD, DERECHA: JUNTO CON EL MECANISMO FOCAL COMPUESTO OBTENIDO CON LAS RÉPLICAS, CUYA SOLUCIÓN SE INTERPRETA COMO UNA FALLA OBLICUA CON COMPONENTE INVERSA Y DESPLAZAMIENTO LATERAL IZQUIERDO, CON ECHADO DE $54^\circ$	37
FIGURA 31. PARÁMETROS DE FUENTE ESTIMADOS EN EL REGISTRO DE LA COMPONENTE VERTICAL CORREGIDA DE LA ESTACIÓN HU12 (PUEBLO DEL VALLE) TOMADO UNA VENTANA DE 5 SEG DEL PAQUETE DE ONDAS S Y OBTENIENDO SU ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTO. ....	37
FIGURA 32. IZQUIERDA: ACERCAMIENTO DE LOS PRIMEROS ARRIBOS DE LAS 5 ESTACIONES QUE REGISTRARON EL SISMO, CON EL OBJETO DE OBSERVAR SU POLARIDAD. DERECHA: MECANISMO FOCAL SIMPLE OBTENIDO, CUYA SOLUCIÓN SE INTERPRETA COMO UNA FALLA OBLICUA CON COMPONENTE INVERSA Y DESPLAZAMIENTO LATERAL IZQUIERDO. ....	38
FIGURA 33. PARÁMETROS DE FUENTE ESTIMADOS DEL REGISTRO DE LA COMPONENTE VERTICAL CORREGIDA DE LA ESTACIÓN HU11 (RANCHO HILILLO). ....	38
FIGURA 34. IZQUIERDA: ACERCAMIENTO DE LOS PRIMEROS ARRIBOS DE LAS 5 ESTACIONES QUE REGISTRARON EL SISMO, CON EL OBJETO DE OBSERVAR SU POLARIDAD. DERECHA: MECANISMO FOCAL SIMPLE OBTENIDO, CUYA SOLUCIÓN SE INTERPRETA COMO UNA FALLA OBLICUA CON COMPONENTE INVERSA Y DESPLAZAMIENTO IZQUIERDO. ....	39
FIGURA 35. PARTE IZQUIERDA, CORRELACIÓN DE LA CANTIDAD DE INYECCIÓN DE AGUA EN LOS POZOS I29 E I38 VERSUS EL NÚMERO DE SISMOS REGISTRADOS EN LA ESTACIÓN S05. LA INYECCIÓN ESTÁ DADA EN TONELADAS POR MES (TN/MES) Y LOS SISMOS EN NÚMEROS DE SISMOS	

POR MES. DERECHA, CORRELACIÓN DE LA SISMICIDAD REGISTRADA EN LA ESTACIÓN S06 Y LOS 8 POZOS DE MAYOR PRODUCCIÓN DE VAPOR DE AGUA (ANTAYHUA, 2007).	40
FIGURA 36. GRÁFICA QUE MUESTRA LA SISMICIDAD REGISTRADA DEL PERIODO DE NOVIEMBRE DEL 2014 A AGOSTO DEL 2016, CON LA CORRELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LOS POZOS INYECTORES H13D, H40, H38 Y H29 DENTRO DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS (LERMO ET AL. 2016).	41
FIGURA 37. IZQUIERDA: MAPA DE ISOAMPLITUDES PARA UNA FRECUENCIA DE 0.35 HZ. DERECHA: PUNTOS DE MEDICIÓN DE LOS CUALES SE OCUPARON LOS PUNTOS 19 Y 21 (CUADRADO ROJO) TOMADA DE TORRES (2017).	42
FIGURA 38. COCIENTES ESPECTRALES 19 (A) Y 21 (B) QUE SE UTILIZARON PARA REALIZAR LA INVERSIÓN.	45
FIGURA 39. RESULTADO DE LA INVERSIÓN DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V 19 (LÍNEA NEGRA). A) SE OBSERVAN TODAS LAS ITERACIONES QUE SE REALIZARON HASTA LLEGAR AL MEJOR MODELO. B) PERFILES DE Vp, Vs Y DENSIDAD. C) TABLA DE VALORES RESULTADO DE LA INVERSIÓN.	46
FIGURA 40. RESULTADO DE LA INVERSIÓN DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V 21 (LÍNEA NEGRA). A) SE OBSERVAN TODAS LAS ITERACIONES QUE SE REALIZARON HASTA LLEGAR AL MEJOR MODELO. B) PERFILES DE Vp, Vs Y DENSIDAD. C) TABLA DE VALORES RESULTADO DE LA INVERSIÓN.	47
FIGURA 41 ESQUEMA DEL COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL ESPONTANEO CON BASE EN LOS EFECTOS TOPOGRÁFICOS, ELECTROCINÉTICOS Y TERMOELÉCTRICOS EN UN VOLCÁN ACTIVO. (MODIFICADA DE .....	53
FIGURA 42. IZQUIERDA: MAPA DE SP FINAL DEL VOLCÁN LA MALINCHE. DERECHA: RELACIÓN DE SP VS DISTANCIA Y ELEVACIÓN DEL VOLCÁN LA MALINCHE (ANGULO, 2018).	57
FIGURA 43. MAPA DE POTENCIAL ESPONTÁNEO CON LA CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA REALIZADA, EN LA PARTE IZQUIERDA SE MUESTRA LA GRÁFICA PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE mV/M (RELACIÓN DE SP VS ALTITUD).	58
FIGURA 44. MAPA DE SP DE LA ZONA GEOTÉRMICA CERRITOS COLORADOS, JAL, LOS SISTEMAS DE FALLA LOCAL Y LOS POZOS. (LERMO,2018)	59
FIGURA 45. MAPA DE POTENCIAL ESPONTANEO CON LA CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA REALIZADA, EN LA PARTE DERECHA SE MUESTRA LAS GRÁFICAS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE mV/M (RELACIÓN DE SP VS ALTITUD). (LERMO ET AL. 2018)	60
FIGURA 46. MAPA QUE MUESTRA EL MODELO DE POTENCIAL ESPONTANEO CON SUS CORRECCIONES CORRESPONDIENTES, LOS PUNTOS DE MEDICIÓN, SISTEMA DE FALLAS Y MEDICIONES HIDROTERMALES. (LERMO ET AL. 2018)	61
FIGURA 47. DERECHA- MAPA DE POTENCIAL ESPONTANEO CON LA CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA. IZQUIERDA- GRÁFICA QUE MUESTRA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE $\nabla\phi/\nabla H$ . (LERMO ET AL. 2018).	62
FIGURA 48. PUNTOS DE MEDICIÓN REALIZADOS CADA 20 M EN LAS 4 CAMPAÑAS DE CAMPO.	64
FIGURA 49. EQUIPO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DE POTENCIAL ESPONTÁNEO.	65
FIGURA 50. ADQUISICIÓN DE DATOS DE CAMPO EN EL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS.	66
FIGURA 51. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA CORRECCIÓN DE REFERENCIA DE DATOS SP (A LA IZQUIERDA). LAS FLECHAS NARANJAS REPRESENTAN EL DESPLAZAMIENTO DE LOS DATOS, SECCIÓN POR SECCIÓN. ESTO SE PUEDE APLICAR A CUALQUIER EJEMPLO DE PERFIL SP PRESENTADO ANTERIORMENTE (TRAZA EN VISTA AÉREA). MODIFICADO DE BARDE Y FINIZOLA (2013).	67
FIGURA 52. IZQUIERDA- REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA CORRECCIÓN DE CIERRE DE DATOS SP EN UN PERFIL CERRADO COMPUESTO DE 10 PUNTOS DE DATOS. EL PUNTO 0 Y EL PUNTO 10 SON GEOGRÁFICAMENTE IGUALES. DERECHA- CORRECCIÓN POR CIERRE. EN LA IMAGEN VEMOS LOS FACTORES DE DERIVA QUE AFECTAN DIRECTAMENTE LOS VALORES DE SP. SI LOS PERFILES DE SP CIERRAN EN ALGÚN PUNTO, ÉSTE DEBERÍA SER EL MISMO, SIN EMBARGO, ESTO NO ES ASÍ POR LO QUE HAY QUE CORREGIR POR CIERRE. MODIFICADO DE BARDE Y FINIZOLA (2013).	68
FIGURA 53. EJEMPLOS DE REDES DE DATOS CORREGIDO POR CIERRE. A Y B MUESTRAN DOS ALTERNATIVAS DE LA CORRECCIÓN DE CIERRE DE UNA CUADRÍCULA SIMPLE. C Y D MUESTRAN DOS ALTERNATIVAS DE CORRECCIÓN DE CIERRE DE UNA RED DE TIPO VOLCÁNICO (RADIAL). EN LOS PASOS SUCESIVOS, LAS LÍNEAS PUNTEADAS EN NEGRO SON LOS DATOS YA CORREGIDOS. LAS LÍNEAS PUNTEADAS VERDES SON LOS LAZOS CONECTADOS PASO A PASO A LOS DATOS YA CORREGIDOS. MODIFICADO DE BARDE Y FINIZOLA (2013).	69
FIGURA 54. PUNTOS DE MEDICIÓN DE SP, DONDE SE MUESTRA EL PUNTO SELECCIONADO PARA LA CORRECCIÓN GEOHIDROLÓGICA.	69
FIGURA 55. MAPA DE POTENCIAL ESPONTÁNEO, MODELOS ESTRUCTURALES Y UBICACIONES DE LOS POZOS.	71
FIGURA 56. GRAFICAS DE LOS COEFICIENTES (mV/M) OBTENIDOS PARA EL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS, ASÍ COMO LAS SECCIONES UTILIZADAS PARA LA CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA.	72
FIGURA 57. MAPA DE POTENCIAL ESPONTÁNEO CON CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA, MODELOS ESTRUCTURALES Y UBICACIÓN DE LOS POZOS.	73
FIGURA 58. CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.	73
FIGURA 59. MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS.	74

FIGURA 60. SE PRESENTAN LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA ALREDEDOR DEL PUEBLO DE LOS HUMEROS OBSERVANDO VALORES ALTOS EN LA TEMPERATURA PRINCIPALMENTE EN LA REGIÓN NORTE Y SUR, IDENTIFICANDO UNA ZONA INTERMEDIA DE BAJA TEMPERATURA DENOMINADA DE TRANSICIÓN. ....	75
FIGURA 61. MODELO 3D DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS, QUE MUESTRA LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO: LA SISMICIDAD LOCAL, LOS SISMOS MÁS SIGNIFICATIVOS CON SUS MECANISMOS FOCALES RESPECTIVOS, MECANISMOS FOCALES COMPUESTOS, ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y EL MAPA DE POTENCIAL ESPONTÁNEO. ....	76
FIGURA. 62 MODELO 2D CON DIRECCIÓN NW-SE, QUE ATRAVIESA POR LA ZONA CENTRAL DEL CAMPO, ASÍ COMO CON LAS PRINCIPALES ESTRUCTURAS DENTRO DEL CAMPO, ZONAS DE INFILTRACIÓN DE AGUA METEÓRICA, LA SISMICIDAD (1994-2016), ISOTERMAS ARELLANO (2003), UBICACIÓN DEL PUEBLO LOS HUMEROS, Y LÍMITE DEL ALTO RESISTIVO OBTENIDO POR ARZATE ET AL. (2018). ...	77
FIGURA 63 MODELO 3D, QUE PRESENTA LOS RESULTADOS DE LA SISMICIDAD RE-LOCALIZADA, EL MAPA DE SP FINAL, UN PERFIL DE MT, REALIZADO POR ARZATE ET AL, 2018 Y LAS ZONAS DE INFILTRACIÓN DE AGUA DENTRO DEL CAMPO LOS HUMEROS, DESDE DIFERENTES ÁNGULOS. ....	78
FIGURA 64 MODELO 3D DE LA INTERPOLACIÓN GEOLÓGICA BASADA EN LA INFORMACIÓN DE LOS POZOS, MAPA DE ESPECTROS DE AMPLITUD, ZONAS DE ATENUACIÓN Y SISTEMA DE FALLAS DE CFE, DONDE SE OBSERVA LA PARTE ANÓMALA DEL PUEBLO DE LOS HUMEROS. ....	79

---

---

## RESUMEN

---

---

El campo Geotérmico Los Humeros, Puebla, se caracteriza por su complejidad para identificar y ubicar datos geológicos-estructurales de origen secundario en superficie que permitan visualizar la geometría del marco geológico-estructural, la identificación de los principales canales de circulación de los fluidos hidrotermales, constituidos por fallas, y la completa comprensión de la arquitectura estructural de este complejo volcánico es crucial para la operación del campo.

Se re-localizaron 298 sismos en el periodo de diciembre 1997 a junio 2016 (eventos con 5 o más estaciones), con magnitudes de 0.7-3 y profundidades de 0.3 - 5 km, determinando sus parámetros hipocentrales y mecanismos de focales compuestos, con el fin de caracterizar dos zonas de mayor actividad: una ubicada en la zona norte y la otra zona sureste del campo; así como el análisis de los 5 sismos locales de mayor magnitud y que causaron daños dentro de las instalaciones. Igualmente se realizó el análisis de la zona central del campo, donde se encuentra el pueblo de Los Humeros, con ayuda de los cocientes espectrales de la técnica de Nakamura (1989) obtenidos por Torres (2017) en los puntos 19 y 21, se obtuvo un modelo de inversión general donde se estima los sedimentos calcáreos a una profundidad aproximada de 1300-1500 m.

Se empleó el método de potencial espontáneo con el objetivo de identificar zonas de alta permeabilidad, asociadas a un sistema hidrotermal, así como su comportamiento en este tipo de zonas; Las principales anomalías de potencial espontáneo (SP) en el campo, muestran como resultado: (1) una anomalía negativa justo por debajo del pueblo Los Humeros, la cual de acuerdo a los estudios de MT realizados por Arzate et al. (2018) se encuentra un alto resistivo, (2) anomalías positivas en la falla Los Humeros, lo que indica una zona de alta permeabilidad y que, en conjunto con los datos de temperatura muestra la existencia de flujos de calor.

Mediante estas metodologías: monitoreo sísmico, temperatura superficial y la Técnica de Potencial espontáneo (SP), acompañados con estudios previos, así como diferentes modelos estructurales propuestos por diversos autores (Campos\_Enríquez y Arredondo-Fragoso, 1991; Anatyhua, 2007; Arzate et al., 2018, etc.), se determina un modelo 2D sencillo el cual caracteriza como se encuentra el sistema geotérmico en la zona central del campo, indicando futuras zonas para la explotación en el oeste y hacia el sur del campo.

---

---

## ABSTRACT

---

---

The field Los Humeros, Puebla, is characterized by its complexity to search, identify and locate geological-structural data of secondary origin on the surface that allow to visualize the geometry of the geological-structural framework, the identification of the main channels of circulation of hydrothermal fluids, constituted by faults and the complete understanding of the structural architecture of this volcanic complex is crucial for the operation of the field.

In the period from December 1997 to June 2016, 298 earthquakes were re-located (events with 5 or more stations), with magnitudes of 0.7-3 and depths of 0.3 - 5 km, determining their hypocentral parameters and compound focal mechanisms, with the purpose of characterizing two zones of greater activity: one located in the north zone and the other zone southeast of the field; as well as the analysis of the 5 major earthquakes that caused damage within the facilities. As well as the analysis of the central zone of the field, where the town of Los Humeros is located, an inversion of its spectral quotients of the Nakamura technique (1989) made by Torres (2017) in the area (19 and 21), obtaining a general model, where calcareous sediments are estimated at a depth of approximately 1300-1500 m.

The self-potential method was used in order to identify areas of high permeability, associated with a hydrothermal system, as well as its behavior in this type of zones; The main anomalies of spontaneous potential (SP) in the field, show as a result: (1) a negative anomaly just below the village Los Humeros, which according to the MT studies carried out by Arzate (2018) in that area it finds a high resistive, (2) positive anomalies in the Los Humeros fault, which indicates a zone of high permeability and that, together with the temperature data, shows the existence of heat flows in that area.

Through these methodologies: seismic monitoring, surface temperature and the self-potential (SP), accompanied by previous studies, as well as different structural models proposed by various authors (Campos, 1991, Antayhua 2007, Arzate, 2018, etc.), determines a simple 2D model which characterizes how the geothermal system is located in the central area of the field, obtaining future zones for exploitation in the west and towards the south of the field.

---

---

## AGRADECIMIENTOS

---

---

---

---

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

---

---

El aprovechamiento de la energía geotérmica tiene una larga tradición en México. Se estima que un milenio antes de la conquista española muchos asentamientos, principalmente en la parte central del país, se desarrollaron gracias a que había manantiales de agua caliente en su cercanía. Sin embargo, los primeros estudios para utilizar los recursos geotérmicos de México para generar electricidad ocurrieron hasta inicios de la década de los cincuenta.

A fines de 1959 se inauguró, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, ubicado a unos 300 km al norte de la Ciudad de México, una planta geotermoeléctrica de 3.5 MW de capacidad. Esta fue la primera planta geotermoeléctrica que se instaló en el continente americano y estuvo funcionando parcialmente hasta 1973, cuando fue desmantelada. En 1958 se realizaron los primeros reconocimientos geológicos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, posteriormente en abril y octubre de 1973 empezaron a operar las dos primeras unidades de 37.5 MW cada una.

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de su Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), ha venido operando a la fecha cuatro campos geotérmicos de tipo hidrotermal con una capacidad instalada total de alrededor de 932 Megawatts eléctricos (2016), suficientes para satisfacer la demanda de electricidad de unos dos millones de hogares mexicanos promedio, por otra parte, el Grupo Dragón (Figura 1), una empresa privada mexicana tiene en operación el campo denominado Domo san Pedro, en el estado de Nayarit, con una capacidad de 10 MWe.

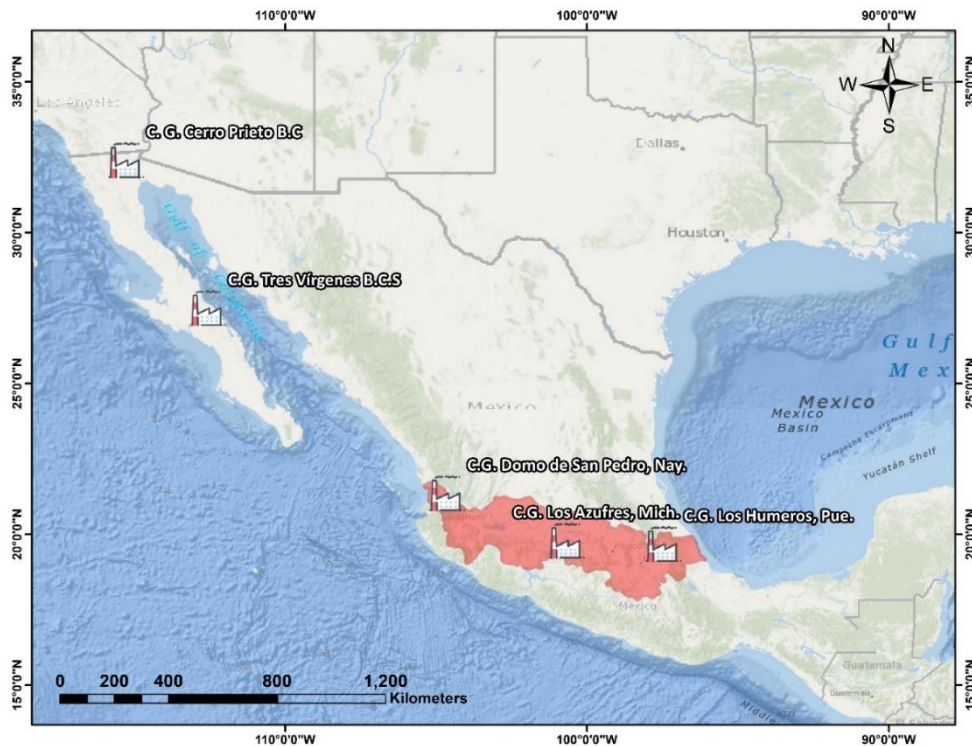


Figura 1. Ubicación geográfica de los campos geotérmicos actuales en México, 4 operados por CFE y 1 por la empresa privada Grupo Dragón.



A nivel mundial México ocupa el cuarto lugar en aprovechamiento de este recurso geotérmico. De estos 5 campos geotérmicos (Figura 1), el Campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla (CGLH), constituye el tema de estudio de esta tesis.

**Tabla 1. Campos geotérmicos actuales en México. (CeMIEGeo)**

CAMPOS DEL PAÍS	CAPACIDAD INSTALADA
Cerro Prieto, Baja California	570MWe
Los Azufres, Michoacán	248MWe
Los Humeros, Puebla	94MWe
Las Tres Vírgenes, Baja California Sur	10MWe
Domo de San Pedro, Nayarit	10MWe

El campo geotérmico Los Humeros se encuentra localizado en el extremo NE del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) entre los límites de los estados de Puebla y Veracruz; aproximadamente a 32 km al NW de Perote (Veracruz), la ciudad más cercana al campo geotérmico y a 200 km de la ciudad de México (Figura 2). El campo tiene un área aproximada de 16 km<sup>2</sup> de explotación y está limitado por las siguientes coordenadas geográficas: 19.655 a 19.733 de latitud Norte y -97.397 a -97.474 de longitud Oeste. El campo tiene un sistema geotérmico activo que está generando electricidad y está siendo desarrollado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

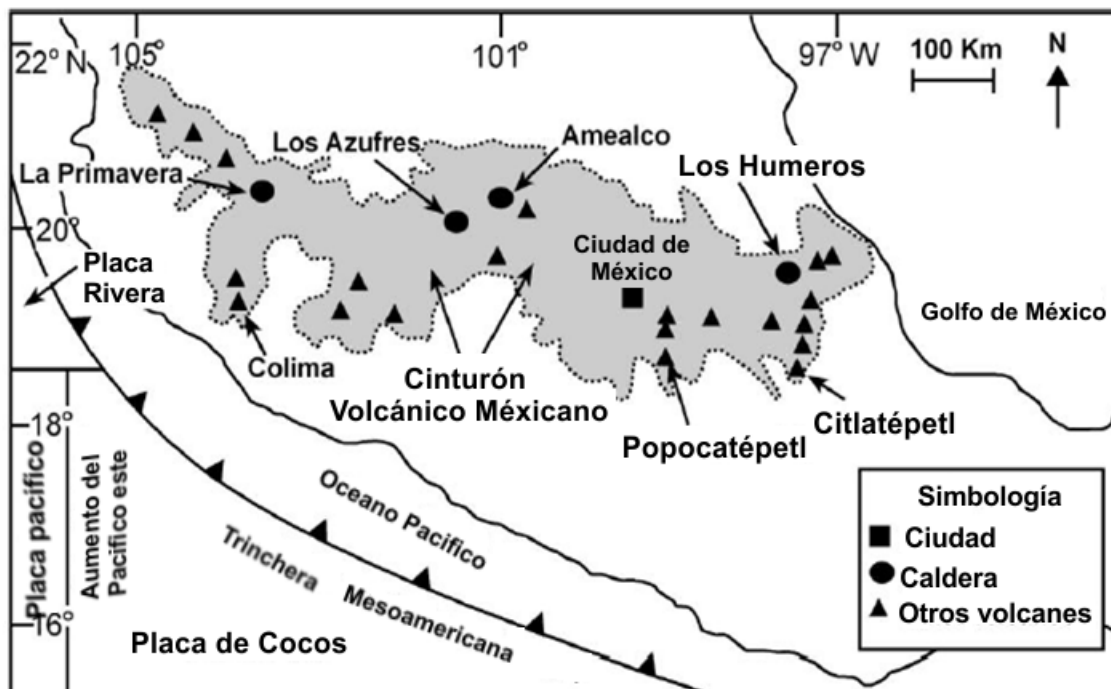


Figura 2. Mapa del Cinturón Volcánico Mexicano central modificado de Willcox (2011), mostrando la ubicación de la caldera de Los Humeros en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), los aspectos tectónicos y los volcanes y calderas dentro del CVM.

En este trabajo se presenta la aplicación de las técnicas de monitoreo sísmico y el análisis del potencial espontáneo (SP) al estudio de este campo geotérmico, con el objetivo de identificar los sistemas de falla activos y las relaciones entre estructuras geológicas y sistemas hidrotermales.

El análisis sísmico permite conocer zonas de mayor actividad tectónica activa. La sismicidad podría estar asociada a los diferentes esfuerzos a los que está sometido el campo como producto de la inyección de agua y explotación del vapor de agua en sí. Estos cambios de esfuerzos han sido ampliamente observados y estudiados en zonas de explotación de agua, gas y petróleo (Gupta, 2002; Rutledge y Phillips, 2004; Tang et al., 2005; Ake et al., 2005).

La técnica del potencial espontáneo es un método de prospección eléctrica, el método consiste en la medición de la diferencia del potencial en superficie entre dos puntos, donde el común denominador de la generación del SP es el flujo de agua subterránea a través de un medio poroso. Las anomalías de potencial espontáneo (SP) se correlacionan con la actividad geotérmica en muchas áreas alrededor del mundo (Corwin y Hoover, 1979). Estas anomalías a menudo se asocian con fallas que sirven como conductos para fluidos térmicos, o con áreas de alto flujo de calor o flujo de fluido subsuperficial (Finizola et al., 2004). Generalmente estas anomalías son estables durante largos periodos, sin embargo, presentan variaciones temporales.

## **1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

Este trabajo cuenta con 3 objetivos generales y 3 específicos:

### **1.2.1.-Objetivos Generales**

- Caracterizar las estructuras geológicas del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, utilizando la información de estudios previos, así como el análisis de la sismicidad, potencial espontáneo (SP) y temperatura.
- Actualizar el termalismo en el sector central del campo geotérmico Los Humeros
- Proponer un modelo geotérmico conceptual del campo geotérmico de Los Humeros y delimitar la extensión superficial del sector central del campo.

### **1.2.2.-Objetivos Específicos**

- Procesar y analizar la información sísmica registrada en el campo geotérmico de Los Humeros, correspondiente al periodo 1997-2016 e identificar los mecanismos focales o de ruptura que los genera.
- Identificar los sistemas de falla activos que sirvieran como conductos para los fluidos térmicos, en áreas de alto flujo de calor superficial. Las estructuras geológicas, los sistemas hidrotermales y las zonas de alta permeabilidad están relacionadas con la infiltración de agua hacia el campo geotérmico.
- Identificar las zonas anómalas que se localizan en el pueblo de Los Humeros.

---

---

## CAPÍTULO 2 ASPECTOS GEOLÓGICOS Y TECTÓNICOS DEL CAMPO LOS HUMEROS, PUEBLA

---

---

### 2.1 ASPECTO GEOLÓGICO

Los primeros intentos de definir la geología y la estratigrafía de CVLH se realizaron a fines de la década de 1970 y principios de la década de 1980 (De la Cruz, 1983; Pérez-Reynoso, 1978; Yañez & García, 1982) hasta una descripción más completa de su evolución volcanológica fue propuesta por Ferriz y Mahood (1984). Recientemente se obtuvo un mapa geológico compilado del área volcánica (Carrasco-Núñez et al., 2018). En la Figura 3 se presenta una versión simplificada de este mapa.

Geomorfológicamente, el sistema volcánico Los Humeros es una estructura de caldera circular de 18 a 20 km de ancho, con una caldera oval subordinada interior y más joven de 5–8 km de ancho (Los Potreros). Geológicamente, es un sistema de basalto-andesita-riolita del Pleistoceno con actividad geotérmica actualmente en explotación. El complejo volcánico de Los Humeros se caracteriza por una evolución de múltiples etapas, con al menos dos episodios principales de colapso de la caldera: la caldera de Los Humeros y la caldera de Los Potreros formadas a 460 y 100 ka, respectivamente (Ferriz y Mahood, 1984). Sin embargo, trabajos recientes basados en métodos modernos de datación geocronológica (U / Th y  $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ ) revelaron una edad de formación mucho más joven de estas calderas en 165 (Los Humeros) y 70 ka (Los Potreros) (Carrasco-Núñez et al., 2018).

Desde un punto de vista geotérmico, las formaciones geológicas del área de Los Humeros consisten en cuatro grupos. Además del Basamento (primer grupo), es importante separar las formaciones volcánicas en tres grupos distintos: pre-caldera, caldera y post-caldera (Carrasco-Núñez et al., 2017a). Para una interpretación más detallada del sistema geotérmico, estos cuatro se pueden dividir en nueve unidades: basamento, pre-caldera basal, pre-caldera intermedia, pre-caldera superior, caldera Los Humeros, caldera intermedia, caldera Los Potreros, post-caldera, y depósitos piroclásticos indefinidos (Tabla 2).

Calcagno et al. (2018) realizaron una reinterpretación del mapa geológico regional con estos cuatro grupos (Figura 4), así como como el mapa geológico local con las 9 unidades litológicas (Figura 5).

Breve descripción de estos cuatro grupos:

- **Basamento (G1):** está compuesto de piedra caliza mesozoica y esquisto de diferente grado de metamorfismo. En la mayoría de los casos, la alteración formó hornfels y skarn, que se acompañan de la intrusión de rocas de tipo andesita y diabasa con granodiorita ocasional.
- **Pre-caldera (G2):** incluye una sucesión con espesor de más de 1500 m en promedio. Está dominada por lavas andesíticas piroxénicas y horizontes menores de lavas basálticas y riololítico-dacíticas. El límite superior de esta secuencia se encuentra a una profundidad de

aproximadamente 1000 m. Este grupo está formado por 3 unidades: basal, intermedia y superior.

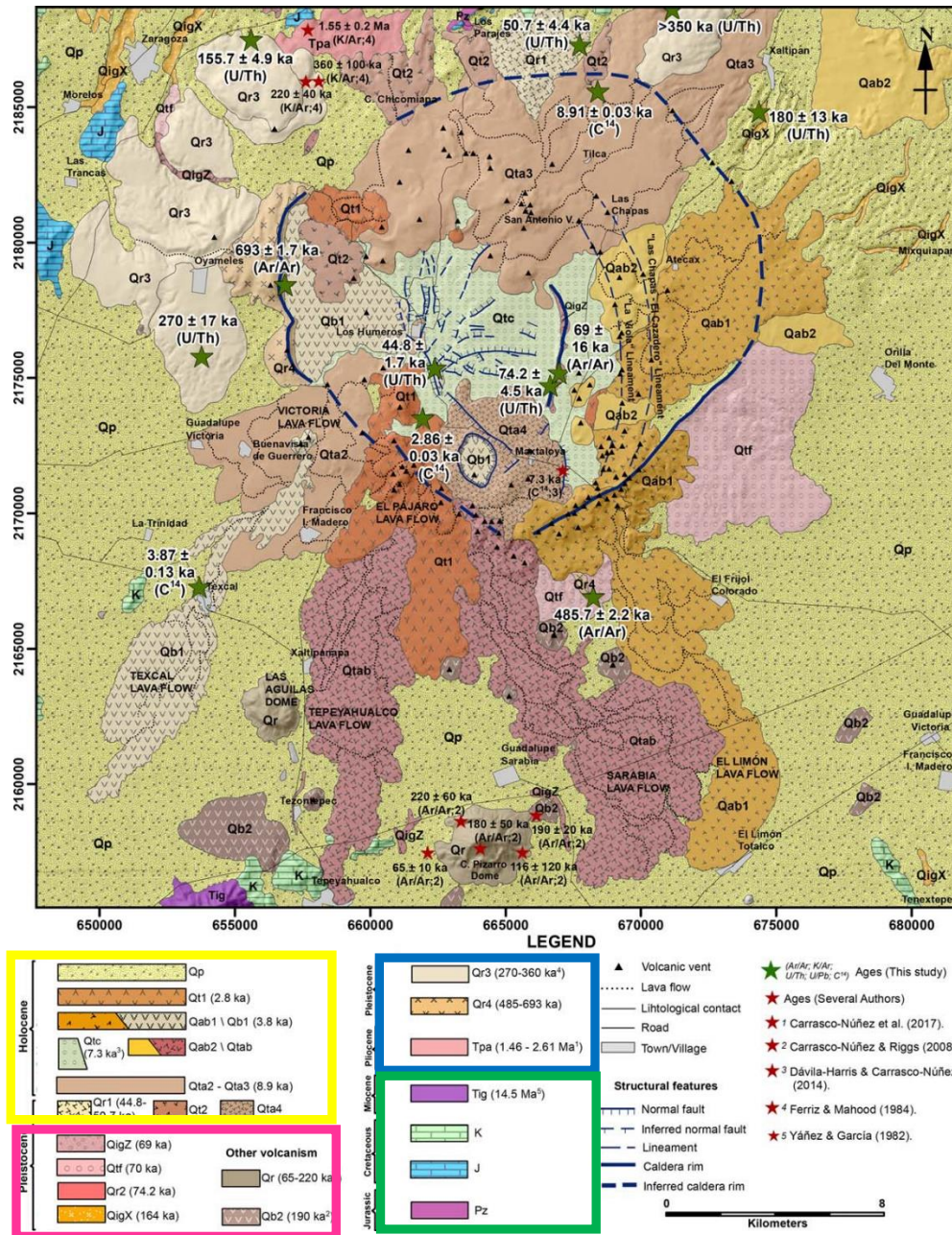


Figura 3. Mapa geológico de la caldera y campo geotérmico de Los Humeros, representación de los 4 grupos regionales: G1, Post-Caldera (cuadro amarillo); G2, Caldera (cuadro rosa); G3, Pre-Caldera (cuadro azul) y G4, Basamento. Clave para las unidades litológicas: Pz, basamento prevolcánico; K, granodioritas y esquistos metamórficos; J, calizas y lutitas; K, calizas; Tig, granito; Tpa, lavas basálticas de Teziutlán; Qr4, Qr3, domos riolíticos; Qb2, basaltos y andesitas basálticas; Qr, domos riolíticos del C. Pizarro-Aguilas, QigX, ignimbrita de Xaltipan; Qr2, diques riolíticos Los Potreros; Qtf, Toba Faby; QigZ, ignimbrita de Zaragoza; Qt2, traquita Chicomiapa-Los Parajes; Qr1, Domos riolíticos; Qta4, traquiandesita Maxtaloya; Qta2, traquiandesita Victoria; Qtab, traquiandesita basálticas de Tepeyahualco; Qab1, andesitas basálticas Ateacax; Qab2, andesitas basálticas; Qta3, traquiandesita San Antonio-Las Chapas; Qtc, miembro cuicuilitico; Qb1, lavas basálticas de olivino; Qt1, traquita El Pájaro; Qp, depósitos piroclásticos indeterminados. Carrasco-Núñez et al. (2018).



- **Caldera (G3):** se subdivide en 3 unidades, incluye gruesos depósitos piroclásticos asociados con los eventos más explosivos relacionados con la formación de las diferentes calderas Los Potreros (ignimbrita de Zaragoza) y Los Humeros (Xaltipan ignimbrite), así como numerosos depósitos de caída agrupados como Toba Faby.
- **Post Caldera (G4):** Este grupo comprende principalmente flujos de lava y depósitos de escoria de composición de andesita basáltica, así como algunos depósitos de pumicita. Estas capas representan los eventos eruptivos más recientes de la caldera de Los Humeros y exhiben fuertes variaciones laterales, tanto en grosor como en estilo eruptivo, lo que indica que tenían diferentes fuentes. El espesor promedio es de alrededor de 100 m, pero en casos es de hasta 300 m.

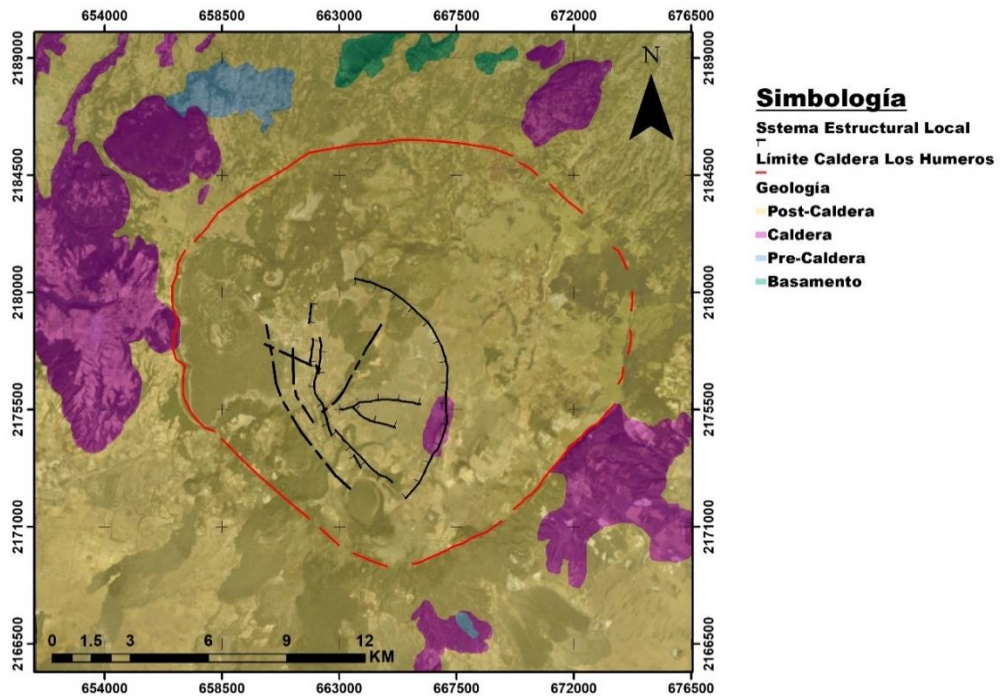


Figura 4. Mapa geológico de Los Humeros reinterpretado y modificado de Calcagno et al. (2018) utilizando los cuatro grupos seleccionados para el modelado a escala regional.

Tabla 2. Descripción de las formaciones geológicas mapeadas en Los Humeros a escala regional reunidas en cuatro grupos y nueve unidades.

Grupo	Unidad	Roca	Edad (Ma)
G1 Post-Caldera	U1 Piroclásticos indefinidos	Toba, pomez y algo de aluvión	<0.003
	U2 Post- Caldera	Riodacita, andesita, andesita basáltica, y flujos de lava de basalto de olivino	0.050 a 0.003
G2- Caldera	U3 Caldera Los Potreros	Flujos de riodacita	
		Ignimbrita Zaragoza	0.069
	U4 Caldera intermedia	Toba Faby con flujos de lava andesíticos-dacítico. Domos riolíticos y de obsidiana.	0.07 0.074

	<b>U5 Caldera Los Humeros</b>	Principalmente compuesto de Ignimbrita Xaltipan con menor lava andesítica y riolítica.	0.165
<b>G3 Pre-Caldera</b>	<b>U6 Pre-Caldera superior</b>	Riolita, dacita, algo de andesita y toba, y poco basalto.	0.693 a 0.155
	<b>U7 Pre-Caldera intermedia</b>	Principalmente andesita con piroxeno (andesita Teziutlán) con andesita máfica en la parte basal y / o dacita.	2.61 a 1.46
	<b>U8 Pre-Caldera basal</b>	Principalmente andesita con hornblenda (andesita Alseseca y Cerro Grande) y dacita secundaria.	10.5 a 8.9
<b>G4 Basamento</b>	<b>U9 Basamento</b>	Granito Mioceno Medio	15.12
		Caliza Cretácica, esquistos sedimentario y poco flint (variedad de sílice)	~140
		Caliza y esquistos sedimentario del jurásico	~190
		Granito Paleozoico y esquistos metamórficos (Macizo de Teziutlán)	>251

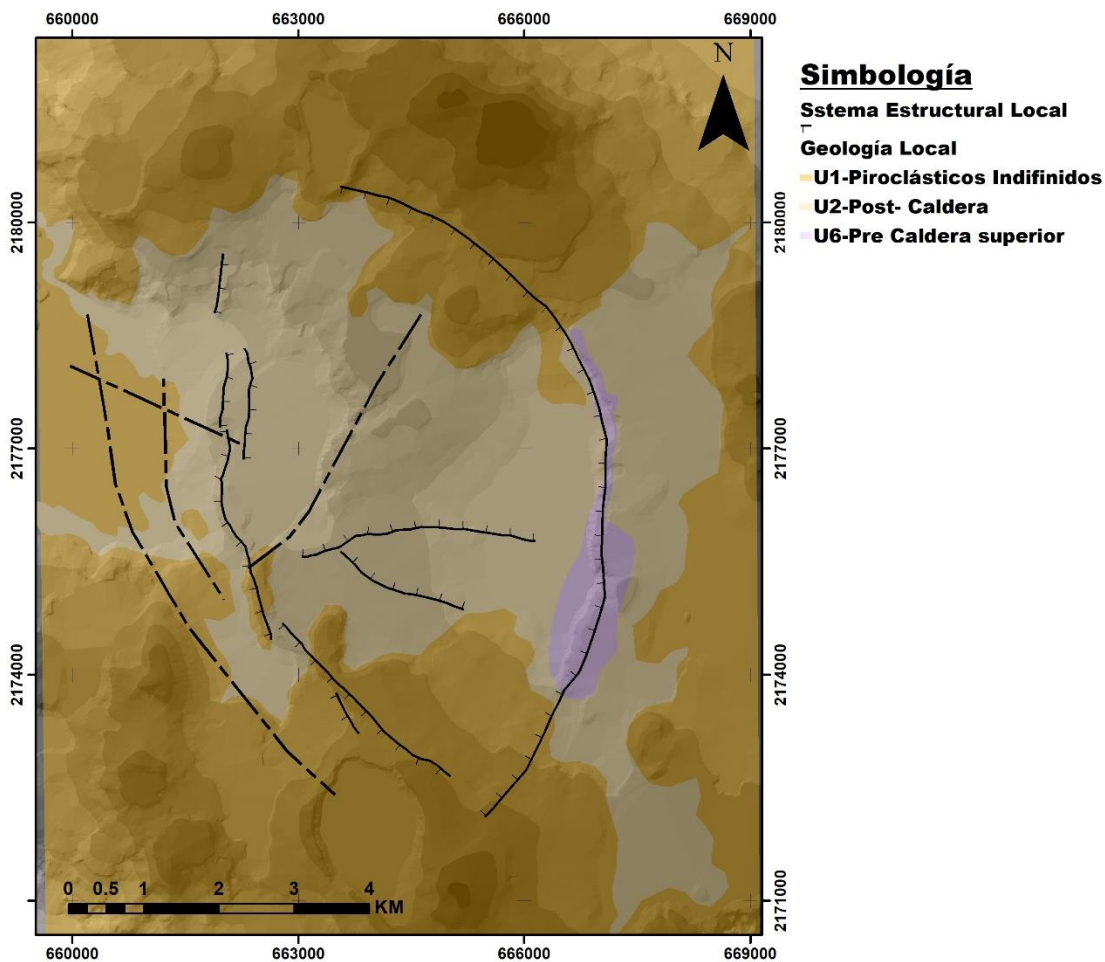


Figura 5. Mapa geológico de Los Humeros reinterpretado y modificado de Calcagno et al. (2018) utilizando las nueve unidades seleccionadas para el mapeo a escala local.

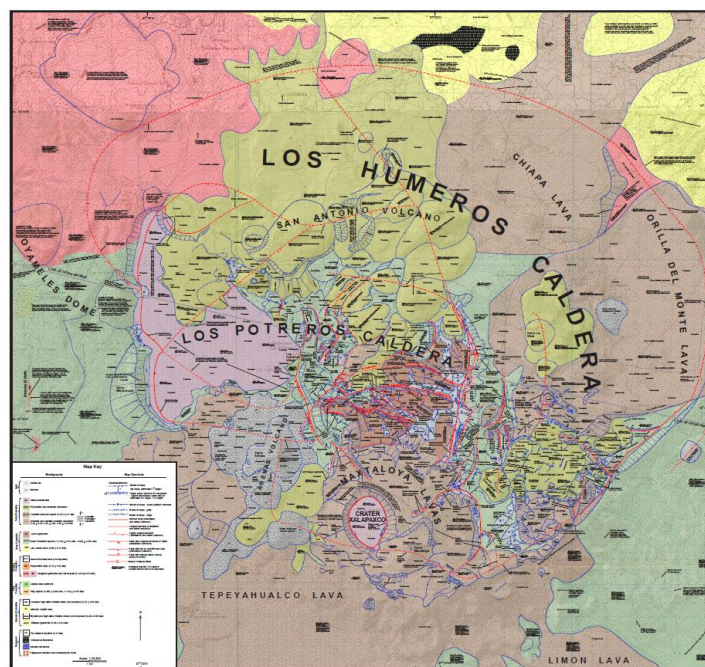
## **2.2 ASPECTO TECTONICO**

Las descripciones estructurales de la caldera Los Humeros varían (por ejemplo, Ferriz y Mahood, 1984; Wilcox, 2011; Prol-Ledesma 1998; Arellano et al., 2017), y las interpretaciones son difíciles de evaluar debido a la insuficiencia (o ausencia) de evidencia. Sin embargo, su relación entre sí es especulativa porque la mayoría de las fallas de la caldera están ocultas. Se presentan los principales elementos tectónicos del campo geotérmico de Los Humeros, mostrando una intensa actividad tectónica activa, representada principalmente por 3 estructuras caldéricas (Los Potreros, Los Humeros y El Xalapasco) formadas durante los diferentes eventos volcánicos ocurridos en el campo.

En este estudio se consideraron 3 modelos estructurales:

### **2.2.1.-Modelo Estructural de Willcox, 2011**

Willcox, 2011 determinó las estructuras de la caldera mediante cartografía estructural basada en trabajo de campo, incluyendo la consideración de las distribuciones de ventilas volcánicas, apoyadas por imágenes satelitales con superposiciones fotográficas aéreas en Google Earth, TM, fotografías aéreas estéreo de pares 1: 5000 y criterios petrográficos y geoquímicos. Las interpretaciones se complementaron con los datos publicados de resistividad para Los Humeros. Se realizó una cartografía de campo sobre fotos aéreas de una franja representativa sin vegetación de 4 km de ancho a través de las calderas de Los Humeros y Los Potreros para documentar la altura del escarpe, el ángulo, las relaciones cortantes o transversales para limitar la edad de desplazamiento.



*Figura 6. Mapa geológico-Estructural final tomado de Willcox (2011).*



### 2.2.2.-Modelo Estructural de Carrasco et al. 2017

Carrasco et al. (2017) sombreadas realizaron un análisis estructural del CGLH (Complejo Geológico Los Humeros), centrado en las características de deformación superficial que interpretaron a partir de datos de satélite orto rectificadas y de imágenes de relieve procesadas a partir de modelos digitales de elevación (MDE). Dichos MDE se calcularon a partir de escalas de 1: 50,000 mapas de contorno digitalizados para el área de LHVC (resolución de 30 metros) y fotogrametría digital para el área de Los Humeros (resolución de 10 metros con bajo nivel de ruido y alta precisión). Las estructuras identificadas se verificaron en el campo mediante el análisis de los sitios estructurales de control, donde se realizaron mediciones geométricas e interpretaciones cinemáticas de todas las características de deformación observadas.

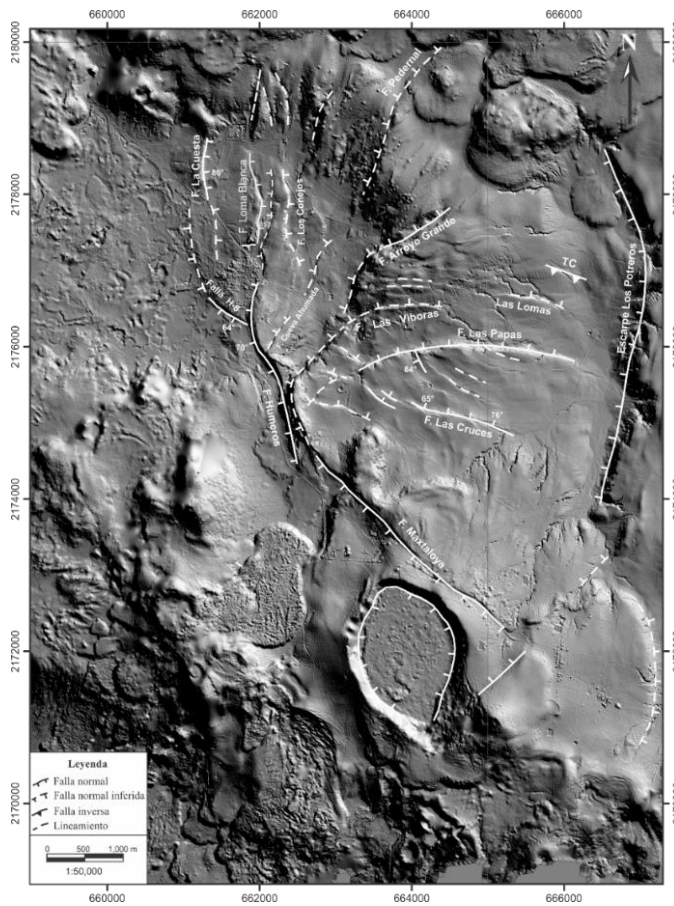


Figura 7. Modelo estructural de Carrasco et al. (2017), representando las principales fallas del campo geotérmico Los Humeros

### 2.2.3.-Modelo Estructural Elaborado por CFE

Este modelo fue proporcionado por Cecilia Lorenzo Pulido, de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración, Morelia, México, el cual fue obtenido mediante los datos de pozos y estudios magnetoteléuticos (MT).



## Comparación

Estos modelos estructurales concuerdan en la mayoría de los sistemas de falla: Falla Los conejos, Arrollo Grande, Las papas, Las cruces, Las Víboras, Maxtaloya y el Cráter del Xalapasco; variando en su ubicación en sólo unos cuantos metros, esto debido a los criterios para digitalizar la longitud y ubicación de los escarpes de las imágenes y metodologías utilizadas por los autores, del mismo modo se observan las siguientes discordancias:

- ✓ Falla Los Húmeros, en la cual se observa que en el modelo proporcionado por CFE (línea roja, Figura 8), esta falla es continua hacia la zona norte con un cambio de buzamiento al Este, el cual, Rocha et al. (2011) lo explicó con un “**Modelo de Zona de Acomodación**” mientras que en los otros modelos no existe esta continuidad
- ✓ Falla la Antigua propuestas por CFE (líneas Rojas), ubicada al oeste de la Falla la Cuesta la cual no se presenta en los otros modelos estructurales, esto debido a que este sistema se ha observado mediante la perforación de pozos, por lo cual no se observa en superficie.
- ✓ Sistema NW-SE (CFE), no se encuentra en ningún otro modelo estructural.

Debido a los resultados del Informe OGL-HM, CFE (2006), que confirman la existencia de las Fallas La Antigua y La Cuesta a profundidad debido a la perforación de los pozos H-41, H-42 (sur del campo) y el H-43 (norte del campo), se trabajará con el modelo estructural de CFE.

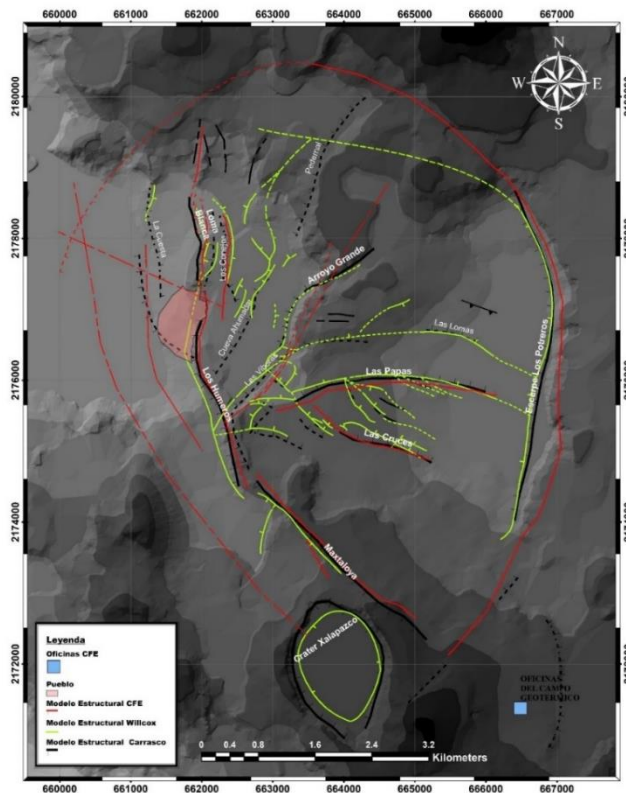


Figura 8. Mapa con los tres modelos estructurales: Willcox, 2011 (líneas verdes), Carrasco et al. 2017 (Líneas blancas) y CFE (líneas rojas)

## 2.3 ESTUDIOS PREVIOS

En las últimas décadas, a nivel mundial, se han realizado estudios de exploración y aprovechamiento de los recursos energéticos contenidos bajo la superficie terrestre. En particular de los estudios geofísicos han contribuido los conocimientos sobre la geología, características del campo geotérmico y las técnicas geofísicas a emplear. Se resumirán los estudios que se correlacionaron con la zona central del campo geotérmico:

- Campos\_Enríquez et al. (1991) desarrollaron un modelo 3-D del basamento calcáreo; mediante anomalías gravimétricas mapearon las principales características de su estructura subsuperficial, el modelo consta de una serie de prismas rectangulares, los prismas integran el efecto basal calcáreo y granítico (Figura 9); uno de ellos tiene límites bien definidos y es más profundo que el otro (caldera Los Potreros). La depresión exterior es menos profunda y tiene pendientes suaves. Sus límites no se reflejan claramente en el mapa de gravedad.

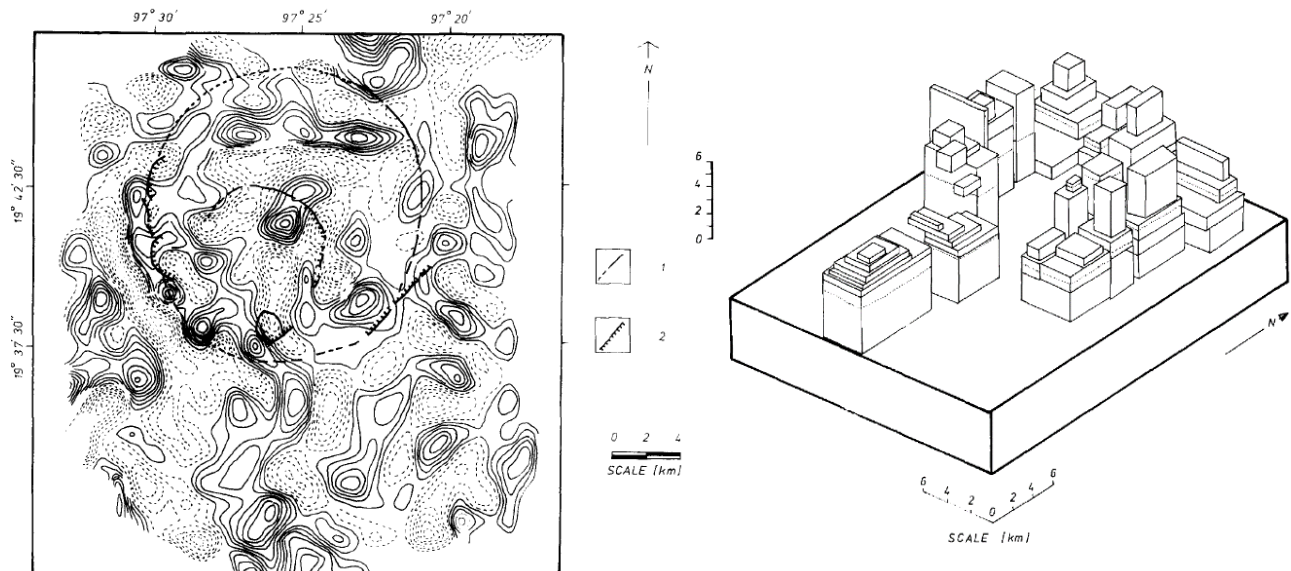


Figura 9. Izquierda: Mapa de la segunda derivada que aproxima los límites de los cuerpos calcáreos; Derecha: Modelo 3D de las estructuras que afectan el basamento calcáreo. Campos\_Enríquez et al. (1991).

El procesamiento digital de los datos de gravedad (derivadas verticales) ayudó a identificar lineamientos y a aproximar los límites de cuerpos y estructuras. Realizaron una correlación con la resistividad, MT, actividad sísmica y datos magnéticos, interpretando que existen dos fuentes de calor relativamente poco profundas a profundidades alrededor de 10 km. Uno está relacionado con la zona de producción geotérmica; el segundo, está ubicado justo al suroeste del complejo de caldera (20km).

- Piziano y Machorro (1999), obtienen los mecanismos de producción en el sector centro del campo los cuales están relacionados con las fallas Humeros-Mastoloya, así mismo con esta información también observan dos intervalos de producción, el 1ro entre 1000 y 1500 msnm

en las Andesitas de Augita, con una temperatura promedio de 250°C y el segundo intervalo entre los 650 a 1000 msnm en los pozos H-7, H-8 y H-40 con 280°C.

Mediante características termodinámicas y el análisis de la información de los pozos, observan las siguientes características en los pozos H-1, H-7, H-8, H-13 y H-40 (Tabla 3), que a pesar de encontrarse en el mismo sector presentan características diferentes:

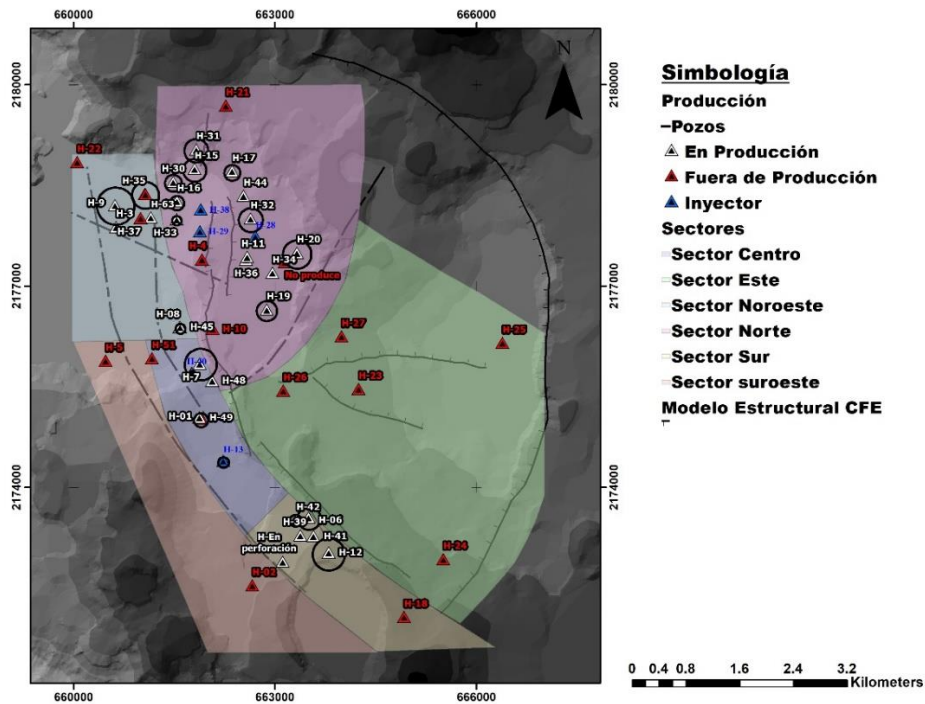


Figura 10. Mapa que muestra la división por sectores de la caldera de los Humeros, Pue., la ubicación de los pozos con mayor producción del campo, y los sistemas de fallas, Piziano y Machorro (1999).

Tabla 3. Resumen de análisis realizado con las características termodinámicas de los pozos en el sector centro del campo geotérmico de Los Humeros.

Pozo	Características
H-1	Tiene mayor producción de agua y moderada producción de vapor, esto debido a la cercanía con el pozo de recarga del yacimiento.
H-7	Produce principalmente mayor vapor, esto debido a su cercanía con la Falla Humeros-Mastoloya, presenta la mayor temperatura en el sector centro.
H-8,	Presentaba moderada producción, la cual ha disminuido por efectos de incrustación en la tubería, se encuentra muy cerca del pozo H-7, sin embargo, cuenta con características termodinámicas y de producción diferente, lo cual es resultado de que ambos están separados por una falla.
H-13	Nunca ha sostenido producción, debido a que no intersectó fracturamiento producto de la falla la Antigua, carece de buena permeabilidad, no atravesó la Falla Humeros.
H-40	Presenta las condiciones termodinámicas necesarias, sin embargo, tiene baja permeabilidad y no logra sostener su producción.

- Arellano et al. (2003) utilizaron las mediciones durante la perforación de los pozos para obtener información de los promedios de presión y temperatura, con la finalidad de determinar las profundidades a las que los pozos penetran las zonas permeables donde las mediciones reflejan las condiciones reales del yacimiento.

Se observa una tendencia bien definida de la temperatura de los pozos se encuentra entre 1025 y 1600 msnm. Observó que el ascenso de los fluidos con mayor temperatura se presenta en la zona de colapso, que se extiende entre los pozos H-31 y H-4.

Las flechas llenas indican algunas zonas del yacimiento profundo, donde primero asciende vapor el cuál a cierta profundidad se condensa y después fluye agua líquida en la dirección contraria. Los cuales determinaron a profundidad las zonas permeables que caracterizan las áreas de depósito hidrotermal.

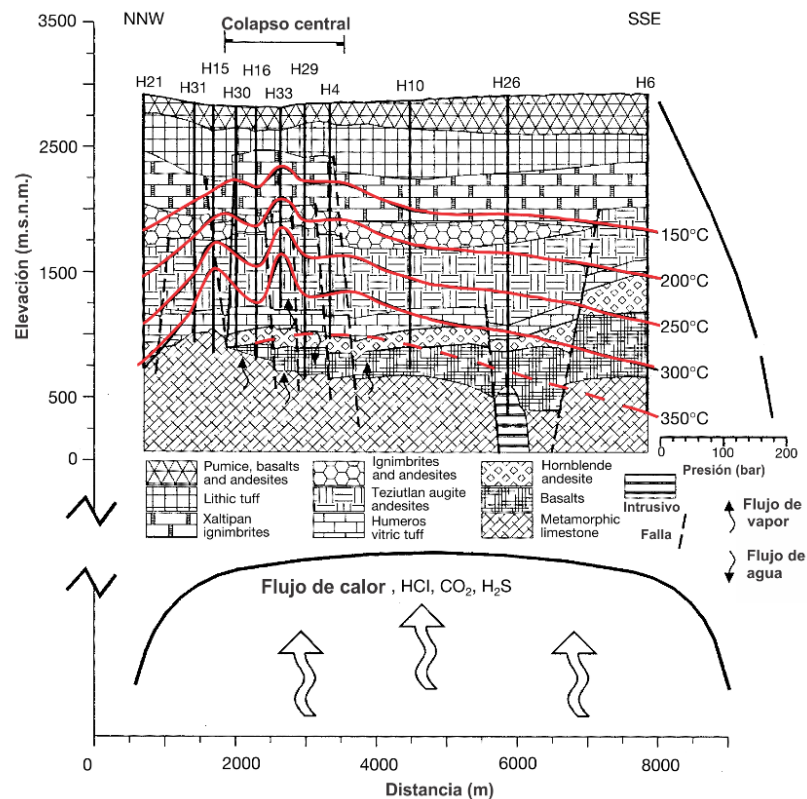


Figura 11. Perfil en dirección NNW-SSE de profundidad de la distribución de la temperatura, geología, pozos y flujos de vapor y agua ( Arellano et al., 2003).

- Informe OGL-HM, CFE (2006), mediante datos estructurales levantados en campo se elaboraron estereogramas, con lo que definieron las tendencias de los principales sistemas: NW-SE, N-S y NE-SW. Además, analizaron la geometría de la Falla Maztaloya de dirección N-S, también, así como las manifestaciones termales tienen un alineamiento N-S, estos resultados se basaron también en la perforación de tres pozos, dos en el sector sur (H-41 y H-42) y uno en el sector norte (H-43)

- **H-41:** tipo vertical con una profundidad total de 2200 m. Interceptó la zona de cruce de las fallas Maztaloya y La Antigua, del sistema NW-SE, que define una zona de interés de 1240-2200 m.
- **H-42:** tipo vertical con una profundidad total de 2200 m. Interceptó la zona de cruce de las fallas Maztaloya y La Antigua, del sistema NW-SE, que define una zona de interés de 1250-2200m.
- **H-43:** tipo vertical con una profundidad total de 2200 m. Interceptó la zona de fracturamiento del sistema escalonado N-S: Malpaís, Antigua y La Cuesta con caído al oriente; y el colapso de los Potrereros NE-SW, que define una zona de interés de 1300-2200 m.

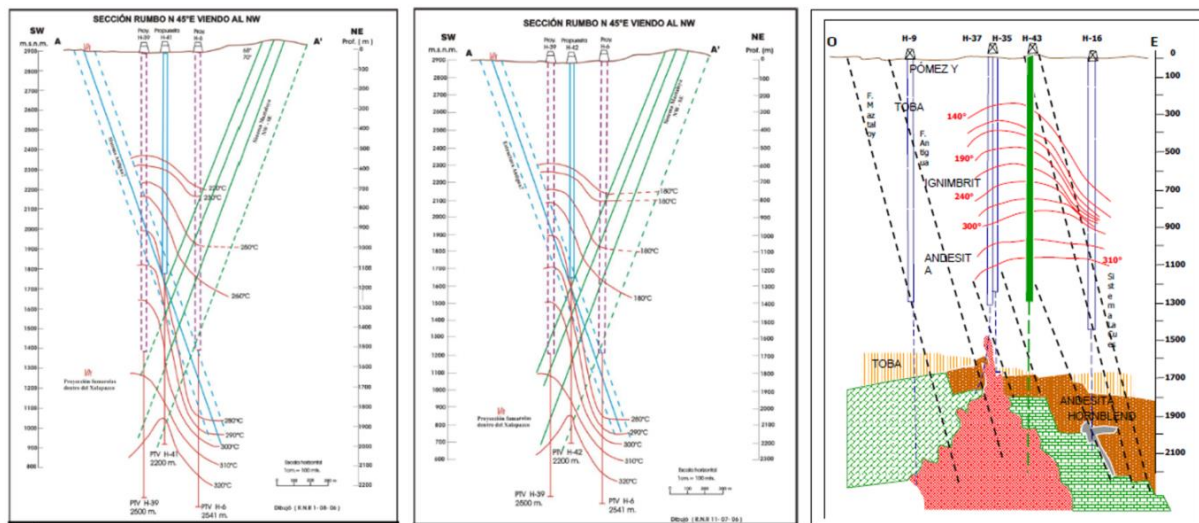


Figura 12. Pozos 41, 42 y 43, respectivamente, que muestran la geometría de los sistemas de falla.

- La topografía superficial es un componente importante de los sistemas hidrotermales: la existencia del flujo de agua hacia el yacimiento, o zona de recarga. Para la ubicación de estas zonas de recarga dentro del CVLH, Prol-Ledesma et al. (1993) identificaron zonas de posible recarga de agua al norte de la Falla Los Humeros (hecho que se observó en los pozos H-4 y H-1) y al extremo este de la Falla Las Papas, a partir del uso de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación. Antayhua en 2007 modificó este mapa con información del análisis de la sismicidad para delimitar los sitios donde se puede tener mayor posibilidad de hallar estas zonas de recarga de agua (Figura 13).





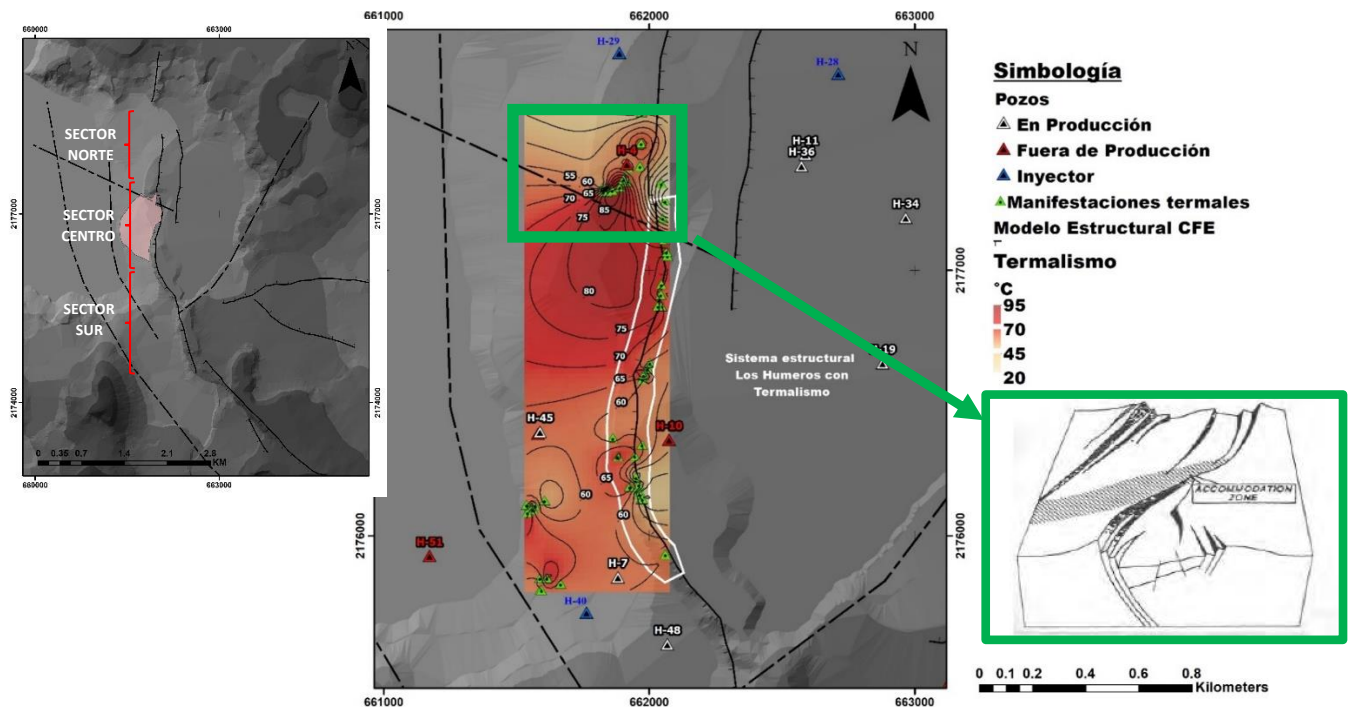


Figura 14. Mapa que muestra los tres sectores (izquierda), así como un zoom de la zona centro con la interpolación de los puntos de verificación de temperatura, la zona de mayor termalismo sobre la falla de Los Hornos, el sistema de fallas de CFE y la ubicación de la Zona de Acomodamiento, Rocha (2011).

- Rodríguez (2011), analizo la anisotropía mediante eventos sísmicos registrados en cinco o más estaciones y en los periodos: de 1997-2002 y de 2004-2006, por medio del fenómeno de birrefringencia o doble refracción de las ondas de corte. Rodríguez (2011). detectó tres zonas de anisotropía con diferentes direcciones dentro el campo geotérmico Los Hornos, Puebla:
  1. La dirección NE-SW 30° (Figura 15, polígono azul), en el centro del campo geotérmico (S05 y HU4), coincide con los esfuerzos regionales estudiados por varios autores. La teoría de la EDA (Anisotropía de Dilatación Extensiva, por sus siglas en inglés de Crampin, 1985a) confirma que las polaridades coinciden con los esfuerzos de compresión máxima.
  2. La dirección casi E-W (NE-SW 85°), es detectada en las estaciones S01, HU1 y S06 (Figura 15, polígonos amarillos). Las dos primeras al norte del campo y la S06 en el centro del campo; ésta última zona presenta una complejidad estructural debido a que en una parte muestra estructuras en dirección NE-SW (casi N-S como la falla Hornos) y E-W (falla Las Papas y Víboras).
  3. La dirección NW-SE 45°, (Figura 15, polígono rosa) detectada en las estaciones S04, S03 y HU3 coincide con las fallas Malpaís y La Antigua, lo que sugiere que la polarización de la onda analizada, se riga por fracturamiento asociada la dirección de éstas fallas.

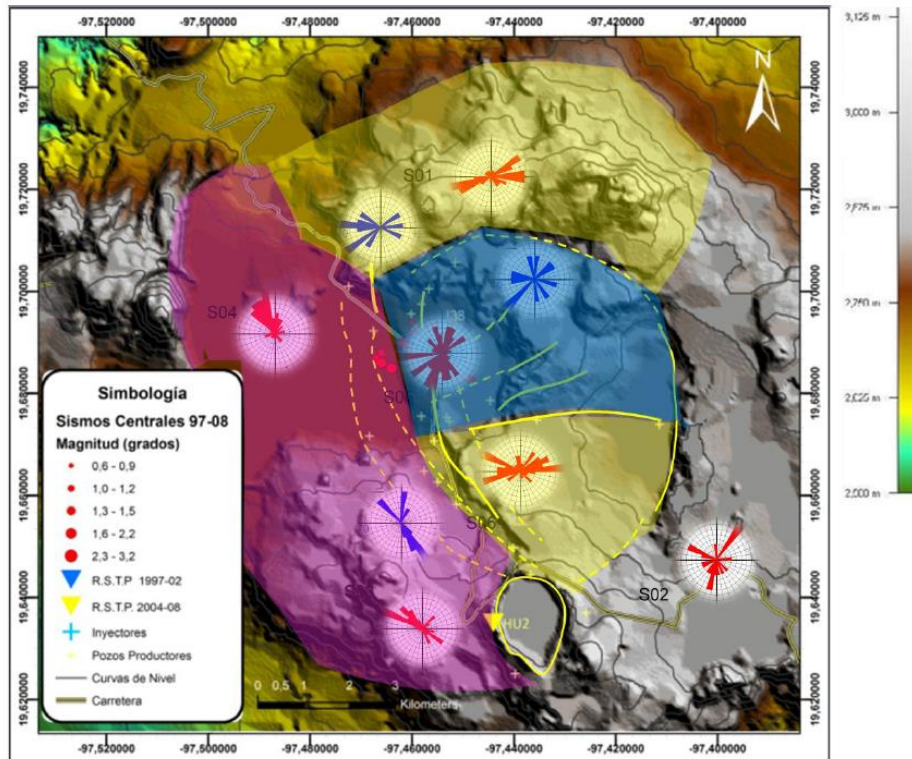


Figura 15. Mapa de altimetría que muestra la propuesta de zonificación; las áreas del mismo color representan fallas, fracturas y esfuerzos en las mismas direcciones. Zona A (área rosa, dirección NW-SE), Zona B (área azul, NE-SW) y Zona C (área amarilla, EW).

- Norini et al. (2015), elaboraron un modelo estructural mediante datos morfoestructurales y estructurales y su relación con la estratigrafía, el mapa geológico, la distribución espacial de los volcanes monogenéticos, igualmente a través de teledetección infrarroja térmica observaron las anomalías térmicas en la superficie y la ubicación de los pozos geotérmicos productores. En este modelo (Figura 16) sugieren que:
  - La estructura NNW-SSE, en el límite oeste de los sectores resurgentes de S1 y S2, es la falla principal activa de desplazamiento vertical.
  - Esta falla y su alineación N – S activa en el sector estructural S2 induciendo y preservando la permeabilidad controlada por la fractura, donde circulan los fluidos.
  - El sector estructural S2 es el objetivo geotérmico principal en el campo geotérmico los Humeros y merece una exploración geofísica detallada.
  - Además, la falla NNW-SSE principal se asocia a una continuación norte-noroeste-oeste de su anomalía térmica (T1).
  - La continuación norte-norte-oeste de la anomalía térmica T1 podría ser un objetivo secundario para la exploración geotérmica.
  - El área de anomalía térmica T3 (Figura 16), fuera de los límites conocidos del campo los Humeros, podría ser un objetivo importante.



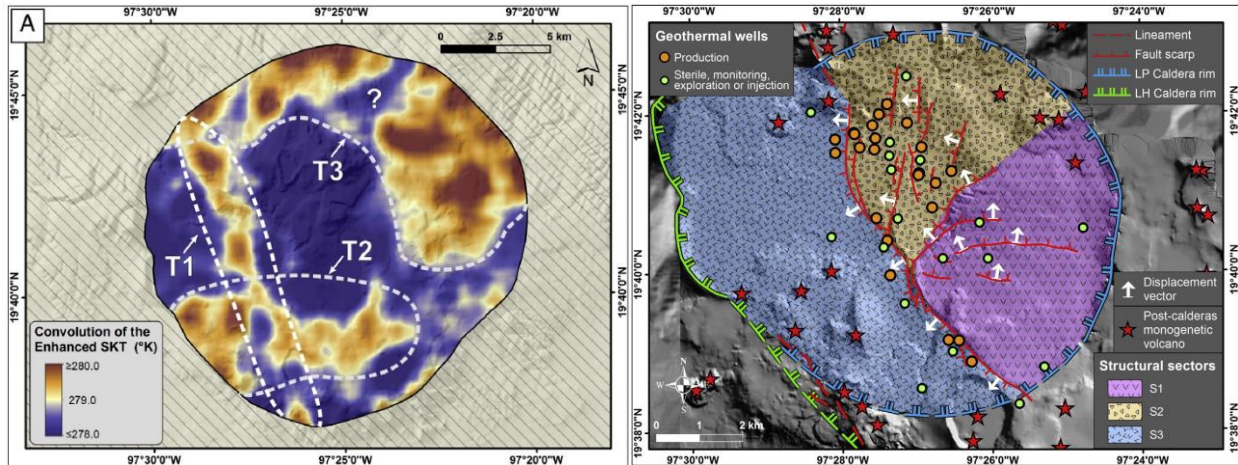


Figura 16. Izquierda: Áreas térmicamente anómalas identificadas en el campo Los Humeros. Derecha: Interpretación morfoestructural de los tres principales sectores estructurales identificados en el campo geotérmico los Humeros y La Caldera Potreros. El bloque resurgente corresponde a los sectores estructurales S1 y S2.

- Ramos et al. (2016), analizaron la trayectoria de 90 sismos registrados dentro del campo geotérmico Los Humeros, identificando, para cada evento, los arribos de las ondas P y S, las trayectorias ayudaron a determinar la ubicación de cuatro zonas donde existen alteraciones magmáticas de temperatura y donde se podría ubicar nuevos pozos productores. En la Figura 17, los puntos de color morado representan los hipocentros de los 90 sismos, cada uno muestra atenuación a lo largo de las trayectorias de color amarillo hacia la estación.

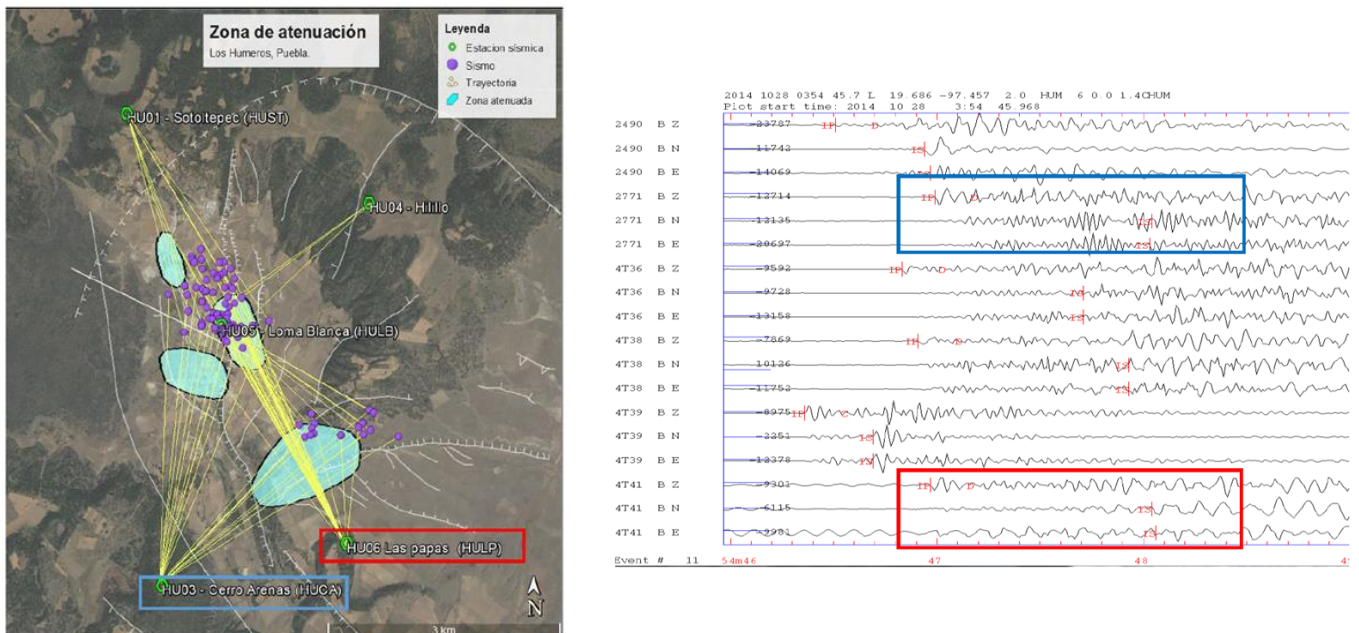


Figura 17 Izquierda: Mapa que muestra la ubicación geográfica de los 90 sismos analizados, las estaciones y trayectorias que presentaron atenuación (amarillo) y las 4 zonas; Derecha: ejemplos de la atenuación de las ondas S (Ramos et. al 2016).

- Torres (2017) aplicó las técnicas de H/V obteniendo espectros de amplitud de la componente horizontal y vertical de 4 zonas, la zona D (rojo), muestran una disminución de la amplitud hasta de un 90% con respecto a los espectros de la Zona A (negro). Las amplitudes de los cocientes disminuyen en diferentes rangos de frecuencia, manteniendo los picos semi-constantés.

Las variaciones de las amplitudes (en el cociente espectral H/V) podrían ser consecuencia de los cambios en las propiedades de la roca, como lo pueden ser: alteraciones por el fracturamiento del medio, flujos laterales y a profundidad, variaciones químicas, un gradiente de temperatura extremo, la presión de poro, la porosidad, entre otros. Las componentes N-S, E-O y Z disminuyen su amplitud en las zonas anómalas y los cocientes espectrales se modifican entre los rangos analizados de 0.35 a 1.1Hz.

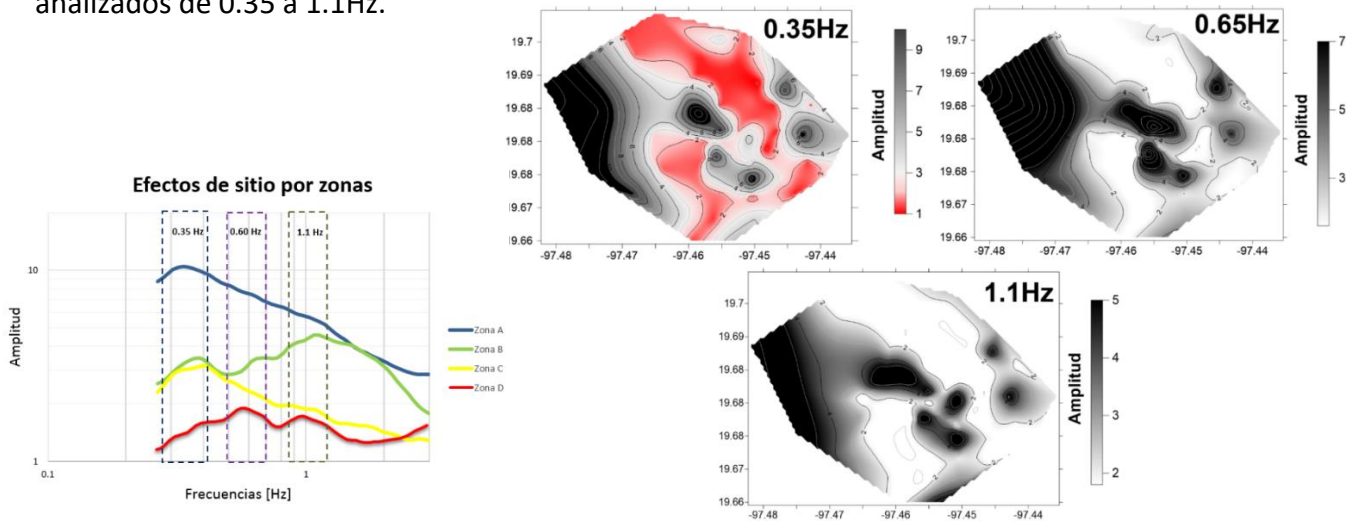


Figura 18. Izquierda: promedios de los cocientes espectrales de las 4 zonas; Derecha: Mapas de isoamplitudes que muestran un comportamiento progresivo en las 3 frecuencias (0.35, 0.65 y 1.1Hz). El color oscuro muestra las zonas sin disminución de amplitud y las zonas rojas y blancas muestran la posible anomalía geotérmica (Tomado de Torres (2017)).

- Arzate et al. (2017) basados en un conjunto de sondeos magnetotelúricos, junto con mapas de anomalías gravimétricas y magnetométricas, observaron un sistema de fallas principales en la porción oeste de la caldera Los Humeros, que funcionan como rutas permeables, aptas como objetivos de interés geotérmico. Algunas anomalías conductivas profundas las consideran como la fuente principal de calor, estas están situadas entre 6 y 7 km de profundidad al centro, y a 5 km en la parte sur del colapso Los Potreros. En la Figura 19 se muestran los perfiles por ellos estudiados. El perfil P1 es el que se acerca más a la zona central del campo, el cual es de mayor interés en este estudio, debido a las anomalías que presenta. En este perfil se puede observar un alto resistivo el cual se encuentra aproximadamente a 1-1.3 km de profundidad.



---

---

## CAPÍTULO 3 ESTUDIO SISMOLÓGICO

---

---

Ponce y Rodríguez (1977) realizaron un monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Los Humeros antes de iniciar la explotación del recurso geotérmico. Ellos instalaron 3 estaciones sísmicas que operaron durante el mes de enero de 1997. Durante este corto periodo de tiempo, las estaciones registraron 7 sismos locales, los mismos que fueron localizados en la periferia del campo geotérmico (fuera de la zona de explotación). De acuerdo con los autores, estos sismos podrían estar asociados a fallas tectónicas.

### **3.1 ANTECEDENTES**

En el campo geotérmico de los Humeros, se cuenta con información sísmica desde el año 1994, debido a la ocurrencia del sismo del 25 de noviembre de 1994 a las 18:52 (hora GMT). Este sismo superficial (2.0 km), fue sentido en las ciudades de Teziutlán y Puebla con una intensidad de III en la escala de Mercalli Modificada (Fernández et al., 1996; reporte sísmico preliminar-SSN). Sin embargo, intensidades de VIII MM fueron observadas en el campo geotérmico de Los Humeros, ocasionando daños en la infraestructura de Comisión Federal de Electricidad (CFE). Un ejemplo de los daños causados está mostrado en la Figura 20 donde se puede observar claramente que unidades de peso considerable fueron desplazadas aproximadamente 10 cm en dirección norte de su posición original.

De acuerdo con la localización preliminar realizada por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), este sismo se encontraría alejado del campo geotérmico (cerca de la ciudad de Teziutlán); mientras que los daños observados mostraban lo contrario, por esa incertidumbre Lermo et al. (1999a), realizaron la relocalización de este sismo. La información sísmica fue obtenida de un sismógrafo Sprengnether MQ800 que fue instalada por CFE cerca del pozo PH21, dos días después de la ocurrencia del sismo y estuvo operativa hasta el 4 de enero de 1995. Las lecturas de las réplicas del sismo principal mostraron una diferencia entre los tiempos de arribo de las ondas P y S menores a 0.8 segundos ( $T_s - T_p > 0.8$  s), lo que confirmó que su hipocentro se ubica dentro del campo geotérmico de Los Humeros y su posible origen estaría relacionado a la activación de la zona norte (ZN) de la falla Los Humeros. Por medio de la Figura 20, se presentan los parámetros hipocentrales obtenidos en la relocalización por Lermo et al. (1999a), y por el SSN; además de un ejemplo de réplicas registradas el 27 de diciembre de 1997 en la estación S01.

Para CFE la ocurrencia de este sismo fue determinante para iniciar el monitoreo sísmico del campo geotérmico en diciembre de 1997, con la instalación de una red sísmica compuesta de 6 estaciones y distribuidas alrededor del campo. A partir de entonces los estudios del comportamiento sísmico fueron realizados y analizados por Lermo et al. (1999- 2016).





SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF. (km)	
Lermo	1994/11/25	18:52:57.8	19.701°	-97.452°	2.0	Mw=3.9
SSN	1994/11/25	18:52:59.7	19.760°	-97.330°	8.0	Md=4.6

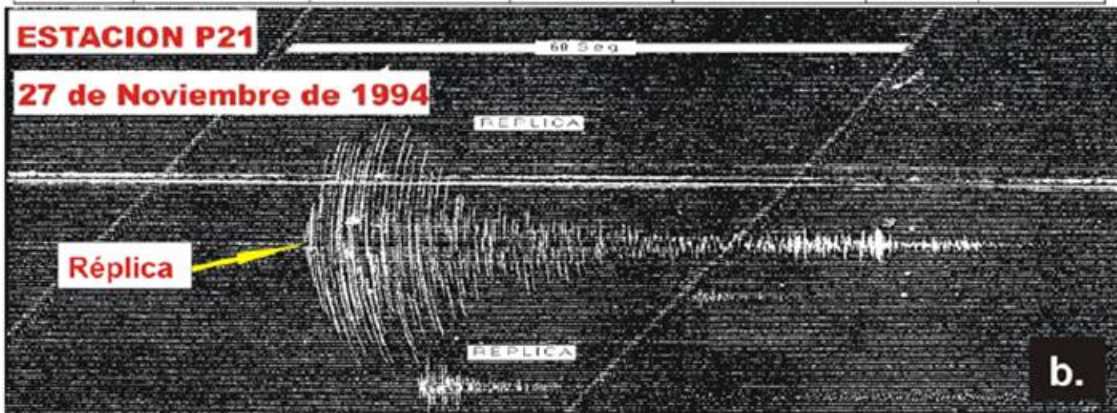


Figura 20. a). Fotografías que muestran el desplazamiento de las unidades del campo geotérmico como consecuencia del sismo del 25 de Noviembre de 1994. Las flechas indican la dirección del movimiento. b). Parámetros hipocentrales y ejemplos de réplicas del sismo (Antayhua, 2007).

Esta información sísmica ocurrida desde diciembre de 1997 y hasta enero de 1999, la sismicidad se concentró principalmente en la ZN alrededor de los pozos inyectores H29 y H38, alcanzando profundidades del orden de 4 km, mostrando así una estrecha relación entre el número de sismos y la cantidad de inyección de agua al yacimiento geotérmico. A partir de febrero de 1999 se

observó una migración de la sismicidad de la zona norte (ZN) hacia la zona sur (ZS) aunque de manera más dispersa, estos sismos se distribuyen entre la falla Humeros. Estos resultados fueron observados también durante los siguientes años de monitoreo (Lermo et al 2016).

En general, estos sismos se distribuyen a lo largo de la falla Los Humeros, precisamente al sur de esta falla ocurrió un sismo de magnitud moderada ( $M_w=3.6$ ) y profundidad superficial (2 km) el 21 de enero de 2002. El análisis de los parámetros de fuente realizados por Lermo et al. (2002), muestra concordancia con las características estructurales de la falla Los Humeros.

En los años 2002 y 2003, el número de sismos se redujo considerablemente y se distribuye en la zona de actividad geotermal, los pocos sismos se localizan en la ZS del campo. Cabe señalar la inoperatividad de 3 estaciones, por problemas de hurto desde el año 2002, no permitió conocer la cantidad de sismos locales ocurridos durante estos años.

Durante los años 2005 y 2006 se realizaron nuevos proyectos con el objetivo de redistribuir las estaciones sísmicas permanentes e instalar un nuevo sistema de telemetría. Nuevamente, durante el 2007 se tuvo una distribución espacial semejante al del año 2006, ya que la mayor concentración de sismos locales se localizó sobre los pozos con más alto índice de productividad (H-9, H-35, H-37 y H-16).

En los siguientes años del 2009-2015 la sismicidad continuó distribuida principalmente en la ZN, sin embargo, la profundidad de los eventos no sobrepasa los 3 km. Así mismo a partir del 2009 se presenta una mayor distribución en la parte este del campo cerca de la Falla las papas, la cual pudo ser activada después del sismo ocurrido el 24 de Julio del 2009, también se puede observar que esta sismicidad en la ZN no va más allá del sistema NW-SE del modelo estructural proporcionado por CFE.

### **3.2 PROCESAMIENTO Y RELOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS**

Para el procesamiento y relocalización de los sismos correspondientes al periodo diciembre 1997 a febrero de 2016, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Recopilación de toda la información sísmica registrada en las estaciones de las diferentes redes sísmicas instaladas durante el periodo de estudio (Anexo A).
- Selección de sismos locales registrados en 5 o más estaciones, tomando como base la estación S05 (HU05), debido a que dicha estación estuvo operando durante todo el periodo de estudio, además de conservar su ubicación original.
- Se analizaron 297 eventos sísmicos registrados por la red sísmica permanente y temporal instalada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II, UNAM).
- Se utilizó el programa SEISAN 10.3 que determina la localización hipocentral y otros parámetros de fuente, mediante la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S.

### 3.2.1.- Análisis de tambores

El análisis de los tipos de eventos sísmicos se realizó aprovechando las características de un sismógrafo de banda ancha, que registra archivos de una hora, los cuales son graficados en forma de tambor de 24 horas, como se muestra en la Figura 21; se muestra un ejemplo de dos tambores o registros de 24 horas la estación HU11 (Rancho El Hillo), para los días 16 de agosto del 2015 (parte izquierda de la Figura 20) y el 8 de febrero del 2016 (parte derecha de la Figura 21). En cada uno de los tambores se muestran eventos encontrado con una elipse de color azul. En el tambor de la izquierda (día 16 de agosto) a las 02 horas con 54 minutos y a las 14 horas con 29 minutos aproximadamente se registraron dos sismos locales, mientras que en el tambor del día 8 de febrero se muestran un sismo lejano y más de 26 locales (tiempo de registro están en GMT). Es importante notar las diferencias de estos registros con la cantidad de señales probablemente provocadas por tráfico vehicular, humano o animales.

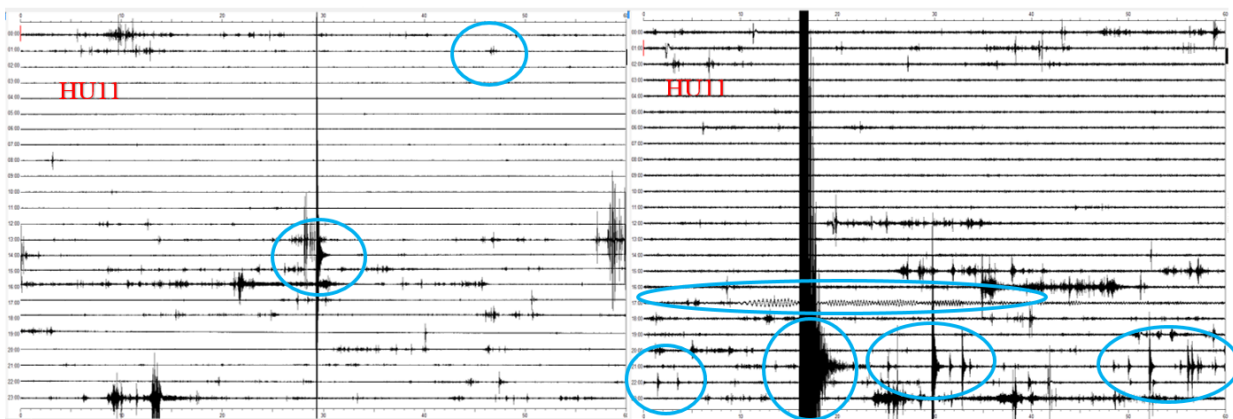


Figura 21. Ejemplos de tambores de 24 horas de registro para la estación HU11 (El Hillo), para los días 16 de agosto del 2015 y 8 de febrero del 2016. Elipses azules, muestran más de 26 registros de sismos locales y un evento lejano.

### 3.2.2. -Programa de Localización

Para obtener los parámetros hipocentrales, se utilizó el programa de localización SEISAN V.10.3 (Otemoller et al., 2015). Este programa, además del modelo de velocidad de capas planas, relación de velocidad y lecturas de los tiempos de arribo de las ondas P y S, utiliza también, las coordenadas y elevación de las estaciones sísmicas, la duración del sismo y una ecuación para estimar la magnitud de duración (Md).

Aunque existen otros programas de localización hipocentral, se ha elegido éste porque presenta herramientas que permiten controlar mejor la profundidad focal del sismo. Asimismo, cuenta con programas adicionales para el realizar mecanismos focales, parámetros de fuente que son utilizados también en el estudio.

### 3.2.3. -Modelo de Velocidad

Entre los diferentes estudios realizados para conocer el modelo de velocidades en el campo geotérmico de Los Humeros, el más adecuado fue el obtenido por Lermo et al. (2001) a partir de cuatro perfiles de reflexión sísmica realizado por COMESA (1998), los mismos que fueron realizados en las direcciones N-S y E-W respectivamente, con una longitud de 4 km, obtuvieron la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) y la profundidad equivalente para los nueve estratos del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros (Cedillo, 1997; Arellano, 2000) siguiendo la metodología descrita por Dix (1995). En la tabla, se muestra el modelo de velocidad obtenido, donde la profundidad para cada estrato está dado en km y la velocidad de la onda P en km/s.

**Tabla 5. Modelo de velocidad obtenido por Lermo (2001). PROF, es la profundidad en kilómetros y  $V_p$  la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.**

<b>PROF. (km)</b>	<b><math>V_p</math> (Km/s)</b>
0.00	1.24
0.24	1.94
0.65	2.85
1.25	3.54
1.79	3.69
1.93	3.90
2.13	4.14
2.37	5.18
30.0	6.00

### 3.2.4.- Ecuación para el cálculo de la Magnitud de Duración

Debido a que los sismos que ocurren en zonas geotérmicas y volcánicas son pequeñas en magnitud, la cantidad de energía liberada estará bien representada con la magnitud de duración  $M_d$  con la relación propuesta por Havskov y Macías (1983):

$$M_d = -1.59 + 2.4 \log_{10}(T) + 0.00046D$$

Dónde:  $M_d$  es la magnitud de duración corregida a partir de la relación propuesta por Lee et al. (1975),  $T$  la duración total del sismo en segundos y  $D$  la distancia epicentral en kilómetros.

### 3.2.5.- Localización Hipocentral

Para obtener una buena localización hipocentral de los sismos registrados en el CGLH, se seleccionaron, únicamente, sismos registrados en 5 a más estaciones sísmicas, con errores en la lectura de los tiempos de arribo de ondas P y S de 0.02 y 0.04s respectivamente. Además, se restringió el error máximo de localización en 2.0 km y el error medio cuadrático (rms) en 0.1 s. Esta



información ha sido adicionada al programa SEISAN para realizar la localización hipocentral de los 297 sismos (Figura 22).

Los resultados obtenidos de la localización muestran:

- Los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores a 1 a 2 km para los sismos localizados con 5 y 6 estaciones
- Las profundidades de los 298 sismos localizados no sobrepasan los 6 km de profundidad.
- Las magnitudes de los sismos varían de 0.7 a 4.6 Md.

Los parámetros hipocentrales de los 298 sismos son presentados en el Anexo B. La ausencia de sismos desde febrero 2002 a diciembre de 2004 y de 2006 al 2008 se debe a que la mayoría de los sismos ocurridos en este periodo fueron registrados únicamente con 3 y 4 estaciones sísmicas (Anexo A).

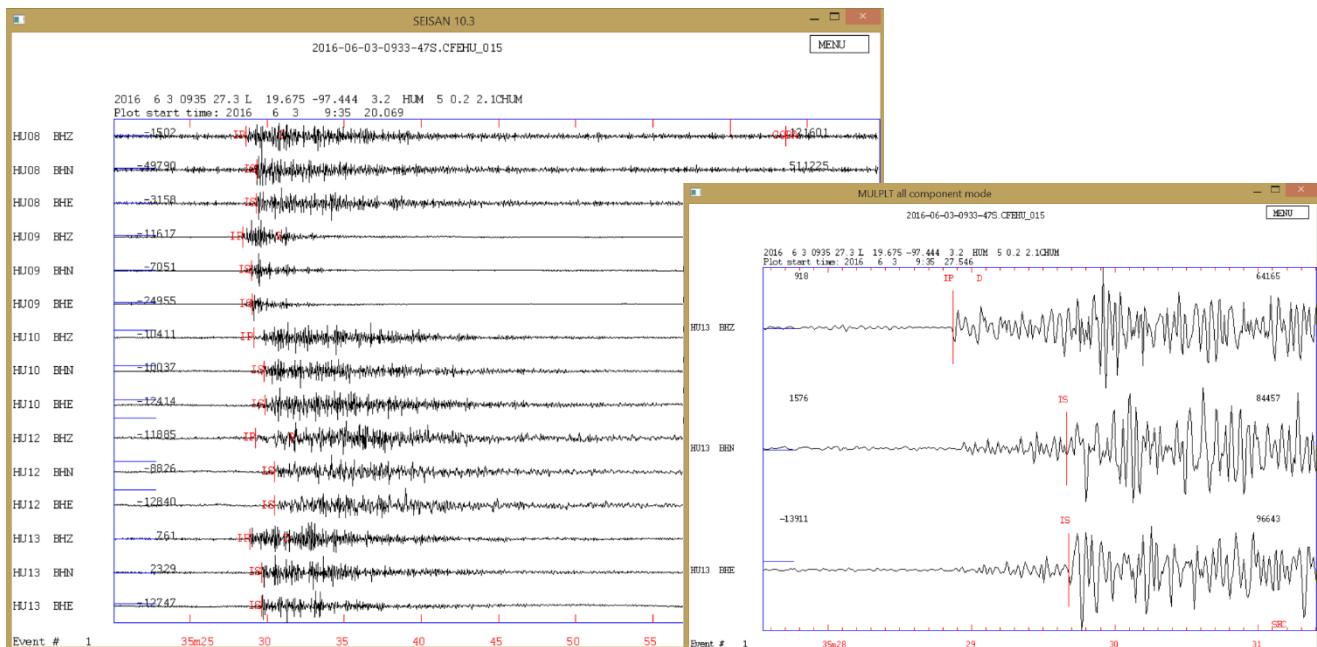


Figura 22. Izquierda: Visualización de los eventos sísmicos en SEISAN, mostrando el número asignado a cada estación del campo Geotérmico Los Humeros. Derecha: Se muestran las tres componentes de dicho evento, la fecha y hora del evento, además de que nos permite un acercamiento para mayor exactitud al momento de seleccionar la lectura de las ondas P y S.

### 3.2.6.- Distribución de la Sismicidad en planta

Logrando localizar un total de 298 eventos sísmicos, los cuales fueron agrupados en cuatro periodos de tiempo: 1997-1999 (círculos de color azul oscuro), 2000-2002 (círculos de color azul claro), 2003-2012 (círculos de color naranja) y del 2013-2016 (círculos de color rojo), como se puede observar en la Figura 24 su distribución en planta y a profundidad en dos perfiles con dirección SW-NE y N-S (Figura 25), donde se definen dos zonas de mayor actividad principalmente, y su relación con los pozos productores e inyectores, sismos de mayor magnitud que han causado

daños en el campo Geotérmico, y en el caso de los perfiles la geología obtenida de Carrasco-Núñez et al. (2018).

Por consiguiente, se explica cómo se ha distribuido la sismicidad en planta y a profundidad con respecto al tiempo y su relación con el yacimiento inferior y superior.

**Tabla 6. Descripción de la distribución local de la sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros.**

PERIODO	DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD LOCAL
1997-1999	La sismicidad inicia en la zona norte del campo, alrededores de los pozos inyectoros I29 (H-29) e I38 (H-38), y entre las fallas La Cuesta, Loma Blanca y Los Conejos, con algunos eventos dispersos en la parte sur del campo; mientras que su distribución en profundidad con respecto al tiempo (Figura 23), inicia fracturando la roca en el basamento, por debajo del yacimiento inferior (o reservorio), que se encuentra aproximadamente entre los horizontes de 1700 a 2700 metros conformada por una roca denominada “hornablenda de andesita”.
2000-2002	Se observa un número menor de sismos, así como una distribución espacial parecida a la del primer periodo en planta; sin embargo, su distribución en profundidad con respecto al tiempo (Figura 23) presenta un cambio abrupto, que se manifiesta desde el basamento hasta el yacimiento superior (que abarca los horizontes desde los 1000 a 1600 metros, conformada por “andesita de augita”), pasando el yacimiento inferior. Este periodo, termina con temblor del <b>21 de enero de 2002 (Mw=3.6)</b> , el cual permitió comprender la influencia de la inyección sobre el estado de esfuerzos del campo geotérmico, observando una estrecha relación, entre la cantidad de sismos locales registrados, con las toneladas inyectadas de salmuera.
2003-2012	<p>Su distribución se localiza en dos zonas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Zona norte:</b> asociados a los pozos inyectoros I29 (H-29), I38 (H-38) y H28 (que inicia su operación en octubre del 2006), y entre las fallas La Cuesta, Loma Blanca, Los Conejos y Cueva Ahumada. La sismicidad local de este periodo tiene dos corrimientos: uno hacia el sur, hasta los límites con el poblado de Los Humeros (mancha de color naranja oscuro, en la Figura 23; y otro hacia el oeste, entre el pozo inyector H28 y la falla Cueva Ahumada. Esta sismicidad anómala y superficial, ocurre con el temblor del <b>24 de julio de 2009 (M=3.3)</b>, que originó un enjambre sísmico en esta zona, la cual probablemente esté asociado a la puesta en marcha del pozo H28 en octubre del 2006.</li> <li>- <b>Zona sur-este:</b> la sismicidad se encuentra limitada entre las fallas Las Papas y las Víboras, y probablemente inicia su actividad cuando se ponen en funcionamiento dos nuevos pozos inyectoros en el 2005 (H13D y H40).</li> </ul> <p>En cuanto a su profundidad con respecto al tiempo, podemos notar que en este periodo, la sismicidad permanece dentro del yacimiento inferior del campo hasta el temblor del 24 de julio de 2009 (M=3.3), después de este sismo superficial</p>

	anómalo, se observa nuevamente una ruptura más profunda en el basamento, manteniéndose así hasta finales de este periodo.
<b>2013-2016</b>	La distribución espacial se mantiene en las mismas zonas que el periodo anterior; sin embargo, se observa un cambio muy significativo, la sismicidad local rodea por la parte norte al pueblo de Humeros (mancha de color naranja oscuro, en la Figura 24) y en su parte sureste presenta una concentración hacia la falla Las Víboras. En este periodo ocurren dos temblores muy significativos el <b>16 de agosto del 2015 (Mw=2.0)</b> y el día <b>8 de febrero del 2016 (Mw=4.2)</b> . En cuanto a sus profundidades con respecto al tiempo este periodo presenta una concentración en el yacimiento inferior desde que se reinició el monitoreo en 2014.

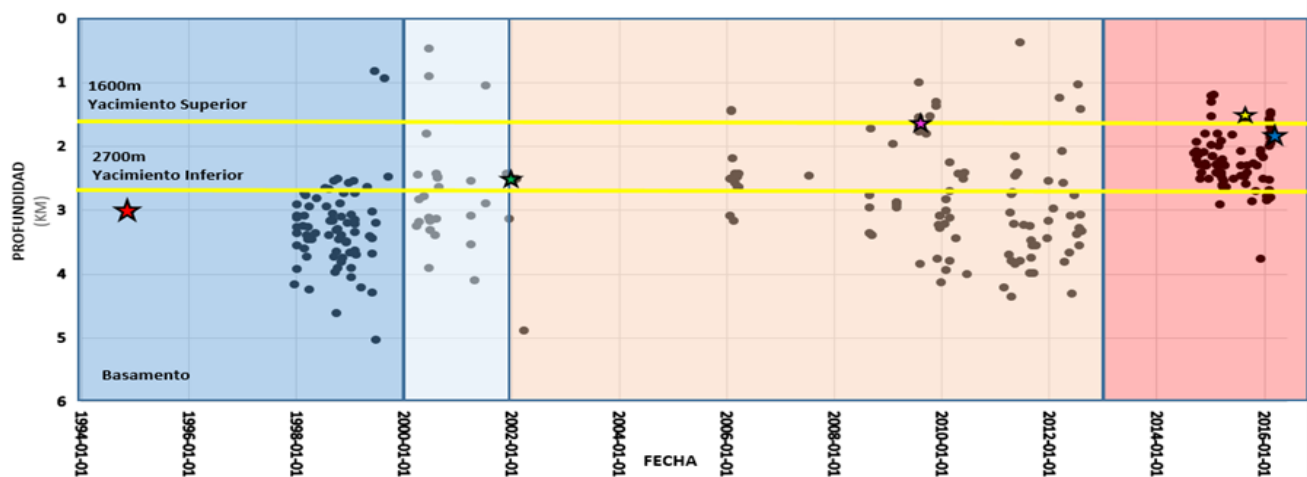


Figura 23. Cronología de los sismos observados en la zona del reservorio a los 2700 m y en el basamento. En los cuadros se presentan los dos sismos de mayor magnitud observados en el monitoreo sísmico del campo. Línea amarilla indica la separación entre el reservorio y el basamento.

### 3.2.7.- Distribución de la Sismicidad en profundidad

Se realizaron dos perfiles a profundidad, los cuales fueron en dirección N-S y SW-NE, utilizando la geología dividida en grupos por Carrasco-Núñez et al., (2018), y los sistemas de fallas de resurgencia (líneas rojas, Figura 25) proporcionadas por Norini (artículo en desarrollo) su ubicación en planta se observa en la Figura 23 (líneas verdes).

#### Perfil N-S(A-A')

Se observan las dos principales zonas activas, la zona norte y la zona este, así mismo la ausencia de sismicidad en la parte central del campo, delimitada por una falla de resurgencia, la sismicidad no sobrepasa los 5 km de profundidad, y se encuentra separada por los 4 periodos (Figura 24); Los periodos de 1994-1999 (círculos azules) y de 2000-2002 (círculos verde claro) se observa principalmente en la zona norte a una profundidad entre 2.5-5 km, el periodo de 2003-2012 probablemente inicia su actividad en la zona este cuando se ponen en funcionamiento dos nuevos pozos inyectores en el 2005 (H13D y H40), por último en el periodo 2013-2016 la sismicidad se encuentra distribuida en estas dos principales zonas, pero a profundidades más superficiales (1.1-

2.5km), además de la ocurrencia de 2 sismos que causaron daños a la infraestructura del campo (16 de agosto del 2015 y 8 de febrero del 2016).

### Perfil SW-NE (B-B')

Al igual que en el perfil anterior, se observa la sismicidad (4 periodos), en este perfil se puede observar los 5 eventos de mayor magnitud dentro del campo en el cual la localización del sismo del 8 de febrero del 2016 coincide con la falla de resurgencia propuesta por Norini (2019).

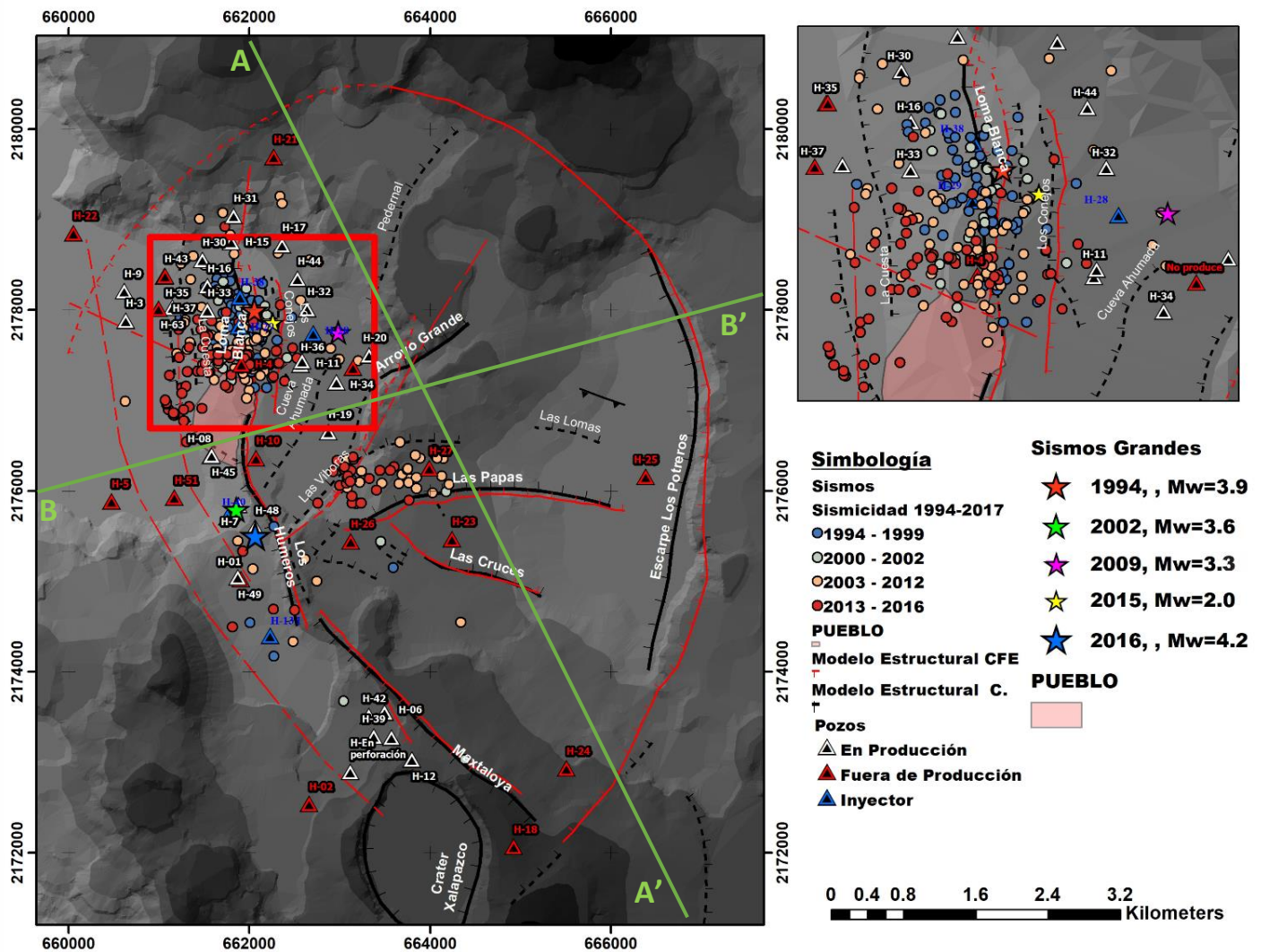
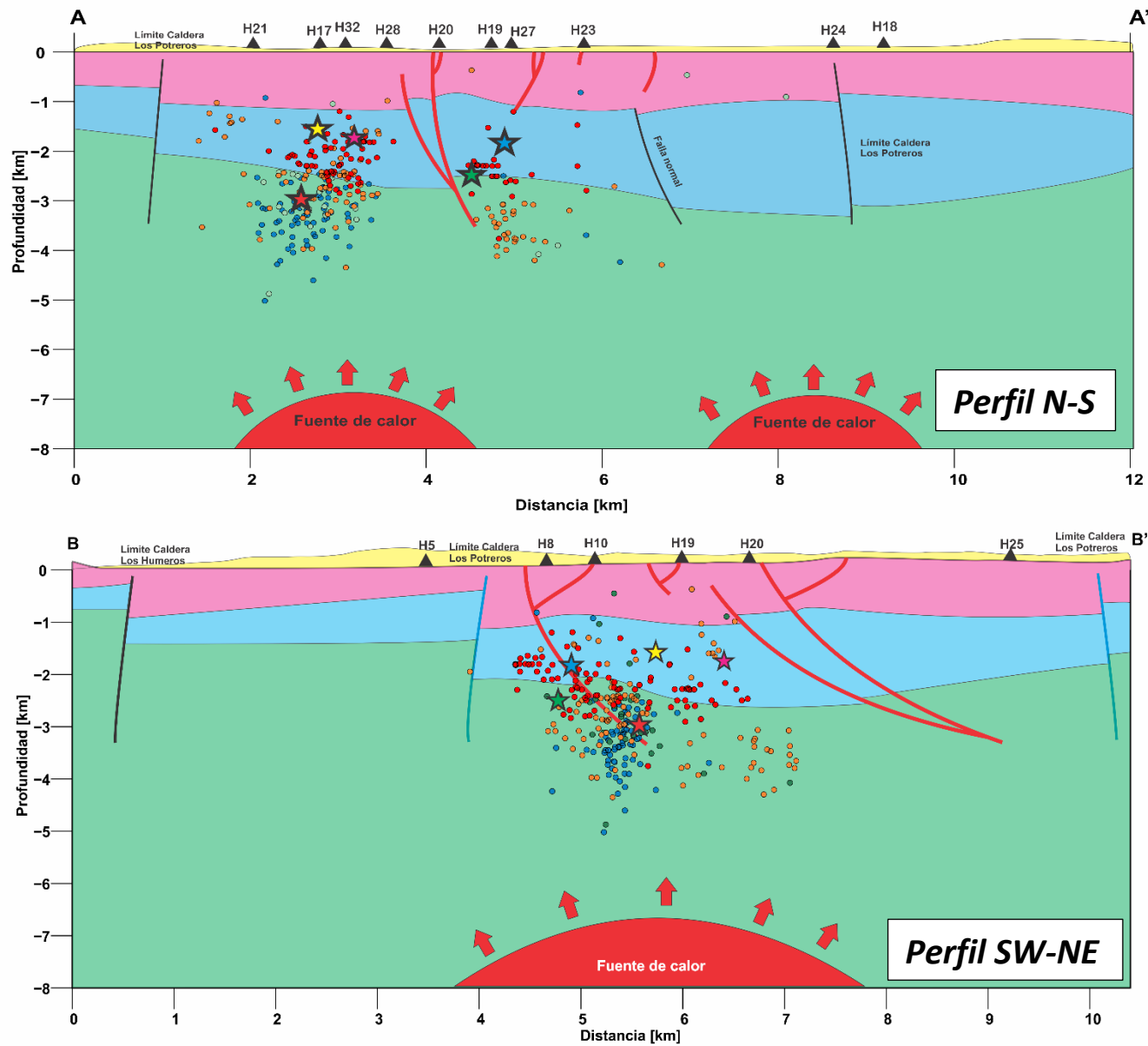


Figura 24. Mapa que muestra la sismicidad en planta del periodo 1997-2016, dividida en 4: 1) 1994-1999 (círculos azules). 2) 2000-2002 (círculos azul claro), 3) 2003-2012 (círculos naranjas) y 4) 2013-2016 (círculos rojos), Pozos productores e inyectoras, eventos de mayor magnitud y los sistemas de fallas y ubicación de los Perfiles SW-NE y N-S (líneas verdes).



### Simbología

- Fallas de resurgencia
- Post-Caldera
- Caldera
- Pre-Caldera
- Basamento

### Sismicidad

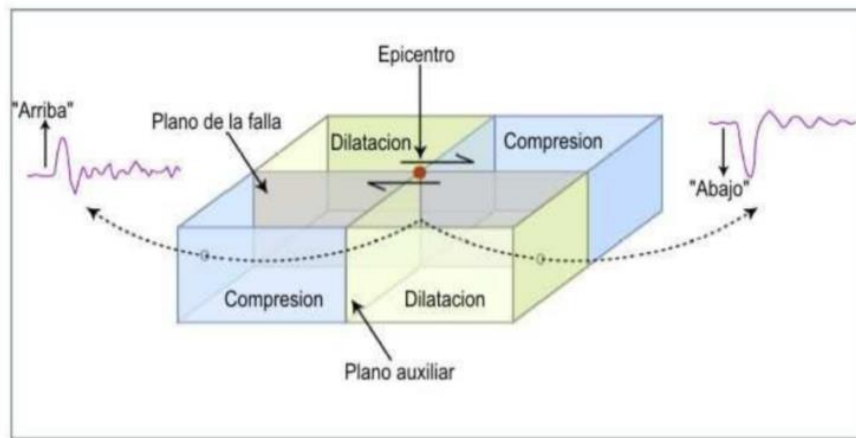
- 1994-1999
- 2000-2002
- 2003-2012
- 2013-2016
- ★ Evento 08-02-2016, Mw=4.2
- ★ Evento 21-01-2002, Mw=3.6
- ★ Evento 24-04-2009, Mw=3.3
- ★ Evento 15-08-2015, Mw=2.0
- ★ Evento 08-02-2016, Mw=4.2

**Figura 25. Parte Superior: Perfil N-S,** se observan dos zonas de mayor actividad sísmica en el sector norte y este (proyección). **Parte inferior: Perfil SW-NE** se observa que la sismicidad del periodo 2013-2016 se correlaciona y tiene la misma tendencia que la falla de resurgencia, propuesta Norini et al. 2018 (Artículo inédito). En Ambos se observa la geología en 4 grupos, descritos anteriormente, pozos productores, límites de la Caldera los Potreros, y los 5 eventos de mayor magnitud.

### **3.3.-MECANISMO FOCALES**

Un mecanismo focal es el resultado del análisis de las formas de onda generadas por un sismo y registrado por varios sismógrafos, un mecanismo focal es una representación de una esfera hipotética que rodea la región hipocentral con regiones claras y oscuras de la “esfera focal” mostrando las direcciones en donde las amplitudes de las ondas sísmicas son positivas y negativas, respectivamente. El mecanismo focal de un sismo proporciona información acerca de la geometría de la falla; es decir la orientación de la falla y la dirección del deslizamiento.

Para la elaboración de un mecanismo focal nos valemos del hecho de que las ondas sísmicas radiadas dependen de la geometría de la falla. El método más simple es el de los primeros arribos, o polaridad, de las ondas de cuerpo. La Figura 26 ilustra el concepto de primeros arribos para un sismo de deslizamiento lateral sobre una falla vertical.



*Figura 26. Relación entre los primeros arribos y la geometría de la falla.*

El primer arribo es de compresión cuando la falla se “desplaza” hacia la estación y dilatación cuando se “aleja” de ella. Un registro del componente vertical de un sismógrafo es hacia “arriba” para compresión y hacia “abajo” para dilatación. El plano de falla real se denomina, plano de falla, el otro es llamado plano auxiliar. Para diferenciarlos, es necesario contar con información geológica adicional, tales como la traza de una falla conocida, observaciones de movimiento del terreno o la distribución de réplicas.

#### **3.2.1.- Mecanismos Focales compuestos de las Zonas Activas del Campo**

Para construir los mecanismos focales compuestos, se ha utilizado una de las utilerías del programa de localización SEISAN versión 10.3 denominado “focmec”. Se obtuvo un mecanismo compuesto para cada una de las dos zonas que se están analizando en este trabajo (Anexo C, se muestra las polaridades), estos mecanismos representan una forma de caracterizar a los agrupamientos de sismos locales dentro del campo geotérmico.



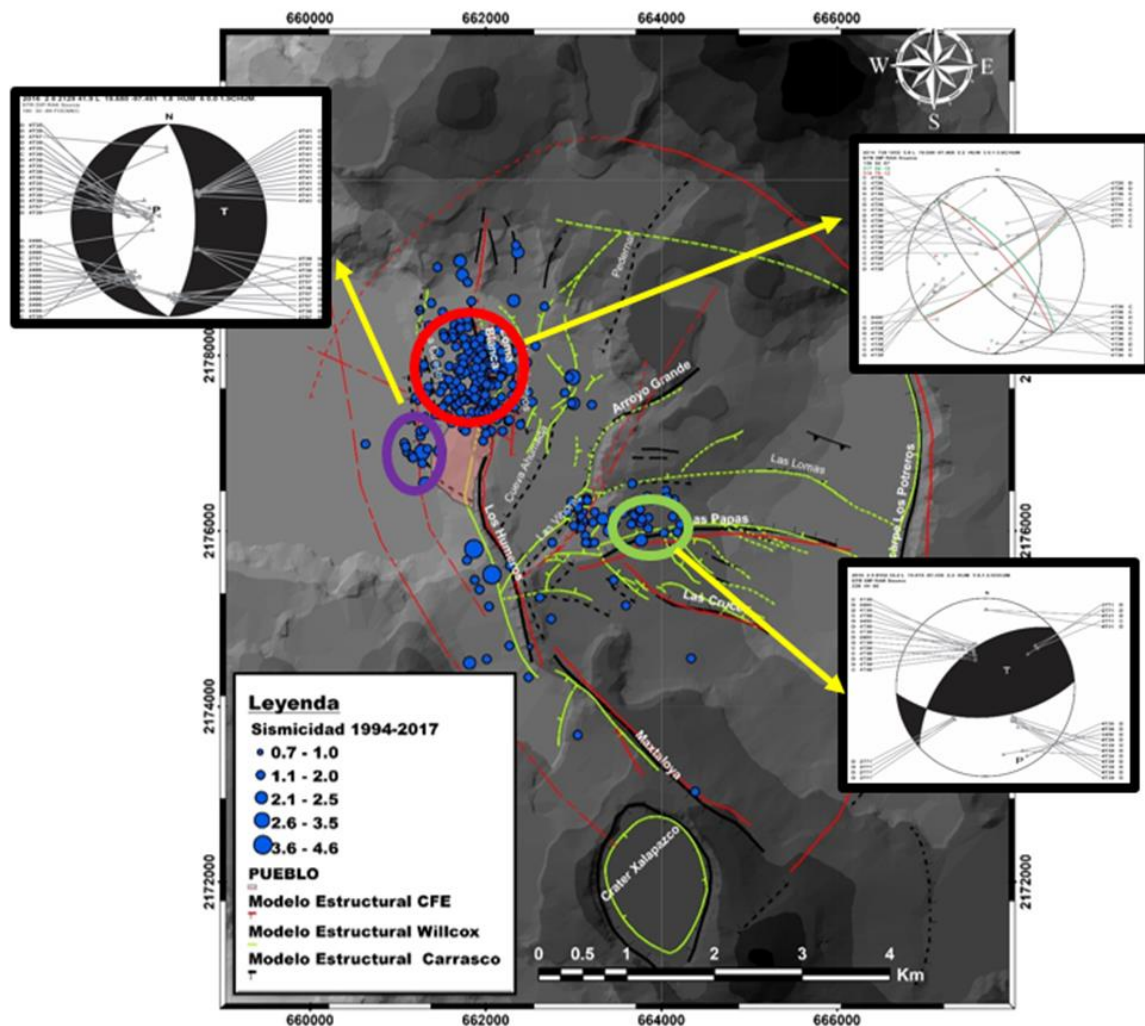


Figura 27. Mapa que muestra la sismicidad registrada en el Campo Geotérmico los Humeros del periodo 1997-2016, así como los mecanismos realizados en la ZNW (círculo rojo), en la parte este, entre la Falla las Víboras y las papas (círculo verde) y en la zona oeste del pueblo los Humeros (círculo morado).

Usando mecanismos compuestos para cada uno de los enjambres que se observaron durante todo el periodo 1994-2016 se observa:

- El primer mecanismo focal compuesto (círculo rojo en la Figura 27) se desarrolla para el grupo de sismos locales localizados en la zona norte, cerca de los pozos inyectores (H29 y H38), no presenta una solución única, presenta todo tipo de fallamiento: normal, inverso, de transcurrencia y sus posibles combinaciones; por lo tanto, el comportamiento de este mecanismo compuesto, es una forma de caracterizar a la sismicidad local, cerca de los pozos inyectores dentro de un campo geotérmico activo, en **sismos locales inducidos**.
- Los otros dos mecanismos focales compuestos se desarrollaron para grupos de sismos localizados cerca o relacionados con las fallas La Cuesta y Las Papas, como se observa en la

parte izquierda y derecha de la Figura 27 , estos mecanismos que presentan una falla normales e inversas, es una forma de caracterizar a los agrupamientos en **sismos tectónicos inducidos**, los cuales están asociados a los sistemas de fallas activos, que en su mayoría de casos son disparados precisamente por la influencia de la salmuera a través de los pozos inyectoros.

Un ejemplo de este segundo tipo de origen (**sismos tectónicos inducidos**), fue iniciado aproximadamente dos meses antes del sismo precursor del 16 de agosto del 2015 (Mw2.0), cuando en los dos pozos inyectoros H40 y H38 se presentaron gastos anómalos de más de 150 y 300 Tn/hr, respectivamente. Este sismo del 16 de agosto ocurre en la parte norte del sistema de fallas Los Humeros (rombo negro). Ubicado en el Anexo B, es el evento #256, cuya magnitud de coda fue de M3.0 a una profundidad de 1.6 km.

### **3.4.-SISMOS DE MAYOR MAGNITUD (Md).**

El 16 de agosto del 2015 a las 14:29 horas y el 08 de febrero del 2016 a las 21:15 horas (GMT) se registraron dos sismos fuertes que fueron localizados sobre la traza del sistema de fallas Los Humeros. Estos dos sismos fueron reportados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) a 24 km al noroeste de Libres, Puebla a una profundidad de 29 km y una magnitud M 3.5; mientras que el sismo principal fue localizado a 7 km hacia el este de Teziutlán, Puebla a una profundidad de 20 km y magnitud M 4.6.

Por esta razón se realizó el análisis de la sismicidad de los 5 eventos sísmicos más significativos, y se han encontrado dentro del campo geotérmico, y de acuerdo con su análisis se puede resumir en la Tabla 7.

**Tabla 7 Resumen de los 5 Eventos más significativo dentro del campo.**

<b>Evento</b>	<b>Observaciones</b>
<b>25/11/1994 18:52 (GMT)</b>	Md: 4.6. Este sismo importante, pudo ser disparado por la puesta en marcha del primer pozo inyector del campo, en agosto de 1993.
<b>21/01/2002 18:15 (GMT)</b>	Md: 3.6. Relación estrecha del aumento de sismos locales con los gastos de los pozos inyectoros (H-29 y H-38). Algunos pozos productores sufrieron un aumento en su producción de vapor, después de este sismo.
<b>24/07/2009 21:05 (GMT)</b>	Md: 3.3. Este sismo se relaciona con la entrada en funcionamiento por primera vez el pozo inyector H28
<b>16/08/2015 14:29 (GMT)</b>	Md: 2.0. Debido a dos gastos máximos producidos por los pozos inyectoros H38 y H40, sólo pasaron aproximadamente dos meses para que se iniciara la activación de la Falla Los Humeros con este sismo.
<b>08/02/2016 21:15 (GMT)</b>	Md: 4.2 Con la entrada de un tercer pozo inyector (H29) el 1ro de febrero, sea la causante de este sismo.



### 3.4.1.- Parámetros de Fuente y Mecanismos Focales

El análisis espectral de las ondas sísmicas constituye uno de los métodos más utilizados para la determinación del tamaño del sismo y las dimensiones de la fractura. Esta técnica se basa en la dependencia del espectro de amplitudes con las dimensiones de la fuente sísmica.

Con la estimación de los parámetros de atenuación de la corteza, se estiman los parámetros de fuente de los sismos mejor registrados, modelando los espectros de desplazamiento del campo de estudio.

### 3.4.2.- Modelado De La Fuente.

El modelado de fuente utilizado se basa en la metodología de Brune (1970), modificado por Havskov y Ottemoller (2015) y considerando la atenuación a altas frecuencias en la corteza ( $\kappa$  y  $Q$ ). Se presenta un resumen de los aspectos teóricos más relevantes y la explicación de la forma en que se llega al modelado teórico manejado en el presente estudio (Havskov y Ottemoller, SEISAN 2015, pag. 144-151).

La ecuación de dicho anexo presenta el modelo de fuente sísmica utilizado y que se reproduce aquí:

$$D(f, t) = \frac{2(0.6)M_o}{4\pi\rho v^3 \left(1 + \left[\frac{f}{f_o}\right]^2\right)} G(r) e^{-\pi f K} e^{-\frac{\pi f t}{Q(f)}} \quad (1)$$

Donde  $D(f, t)$  es el desplazamiento teórico en función de la frecuencia ( $f$ , en Hz) y el tiempo  $D(t)$ , en s); 2 y 0.6 son factores que toman en cuenta el efecto de la superficie libre y el efecto promedio del patrón de radiación, respectivamente;  $M_o$  es el momento sísmico (Nm);  $G(r, h)$  la dispersión geométrica en función de la geodistancia ( $r$ , en Km);  $\rho$  es la densidad ( $Kg/m^3$ );  $v$  es la velocidad ( $m/s$ ) de onda sísmica en la fuente (P o S dependiendo del espectro) y  $f_o$ , la frecuencia esquina. Se puede apreciar que el modelo ya incluye la atenuación en la corteza en los dos exponenciales en cuyos argumentos se encuentran los parámetros  $\kappa$  y  $Q$ . El modelo considera además una dispersión geométrica de ondas de cuerpo, dado que se trata de sismos locales.

### 3.4.3.- Aplicación Del Modelo.

Se calcularon registros de desplazamiento a partir de SEISAN, paquete con el cual fueron corregidos por la respuesta instrumental para luego ser integrados.

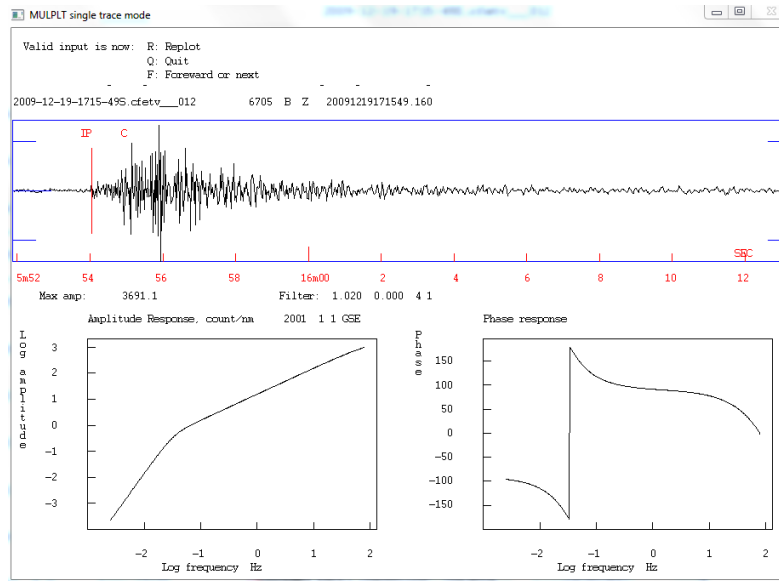


Figura 28. Ejemplo del procedimiento en SEISAN para obtener registros en desplazamientos en el cual, primero se corrige la señal por la respuesta instrumental.

Una vez considerados los parámetros del campo geotérmico Los Humeros y de acuerdo con el modelo descrito anteriormente, los parámetros útiles de un espectro son su parte plana y su frecuencia de esquina. Estos parámetros permiten calcular, el momento sísmico, el radio de ruptura y la caída de esfuerzos.

- **Frecuencia esquina ( $f_0$ ):** Se define como la intersección de la parte plana y el decaimiento.
- **El momento sísmico ( $M_0$ ):** El momento es la mejor medida de la cantidad de energía liberada (indica el tamaño real del sismo). Este parámetro es el producto del coeficiente de rigidez del medio donde se produce el sismo, el área de la dislocación, y el desplazamiento medio de la misma. En la mayoría de los casos es difícil estimar las dimensiones de la falla, y el momento sísmico se determina a partir del espectro de las ondas sísmicas registradas. Más recientemente se utiliza el tensor momento sísmico  $M_{ij}$  cuyas componentes contienen toda la información sobre las características del foco del sismo. Basada en el momento sísmico deducido del espectro de las ondas sísmicas, se ha definido recientemente la magnitud espectral  $M_w$  (Kanamori, 1977).

Los parámetros espectrales se calculan utilizando las relaciones:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 10^{OM}}{G(r, g) * 2(0.6)} \quad (2)$$

Donde  $v$  es la velocidad de onda sísmica de la fuente (P o S, si es espectro de P o S respectivamente) y  $OM$  es el nivel espectral de la atenuación corregido por el espectro de desplazamiento,  $2(0.6)$  es un factor que toman en cuenta el efecto de la superficie libre y el efecto promedio del patrón radiación y  $G(r, h)$  la dispersión geométrica en función de la geodistancia.

- **El radio de ruptura (R):** da una información sobre la extensión de la ruptura asumiendo que el área de ésta tiene forma circular.

$$R = 0.37 \frac{v}{f_0} \quad (3)$$

Donde  $v$  es la velocidad de la onda P o S según sea el caso y  $f_0$  la frecuencia esquina.

- **La caída de esfuerzos (ST):** es la diferencia entre los esfuerzos antes y después de ocurrido el sismo o evento.

$$ST = 0.44 \frac{M_0}{R^3} \quad (4)$$

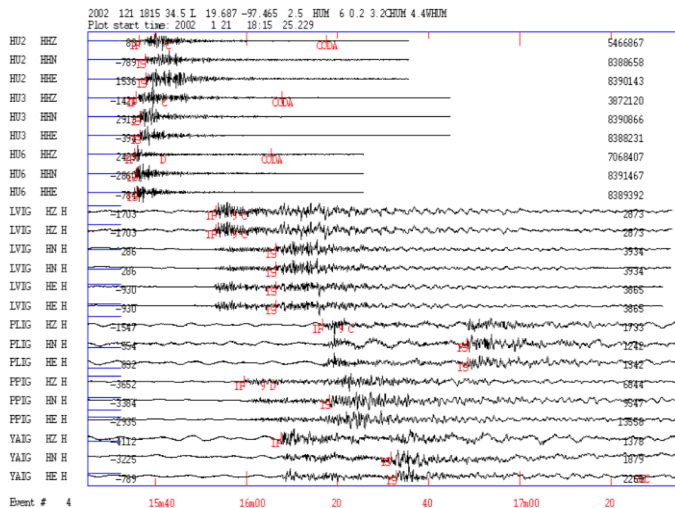
Donde  $M_0$  es el momento sísmico y  $R$  el radio de ruptura.

- **Magnitud de momento ( $M_w$ ):** La cantidad de energía liberada por un sismo calculada a partir del Momento Sísmico (Kamamori, 1977). Para su determinación se utiliza la siguiente expresión:

$$M_w = \frac{2}{3} * \log_{10} M_0 - 6.06 \quad (5)$$

Con la información necesaria se calcularon los parámetros y los mecanismos focales correspondientes para cada sismo:

- **21/Enero/2002**



Falla inversa con rumbo=80°,  
 echado=44° y desplazamiento=22°.

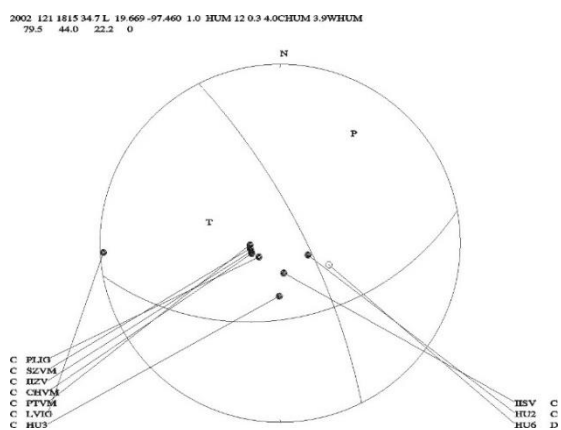


Figura 29. Izquierda: acercamiento de los primeros arribos de las estaciones que registraron el sismo con la red dentro del campo, así como de la red del SSN (Servicio Sismológico Nacional), con el objeto de observar su polaridad, junto con el mecanismo focal compuesto obtenido, cuya solución se interpreta como una falla oblicua con componente inversa y desplazamiento lateral izquierdo (Lermo et al. 2002).

● 24/Julio/2009

Falla inversa con rumbo=259°,  
echado=54° y desplazamiento=57°.

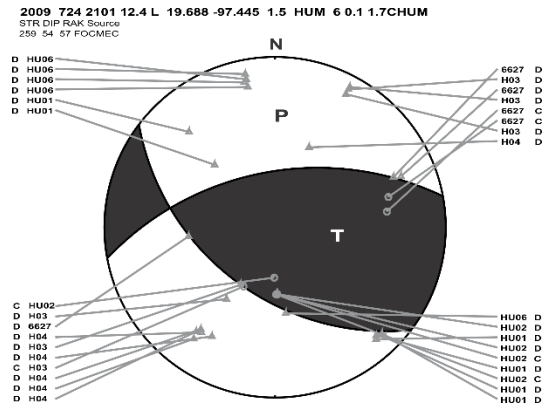
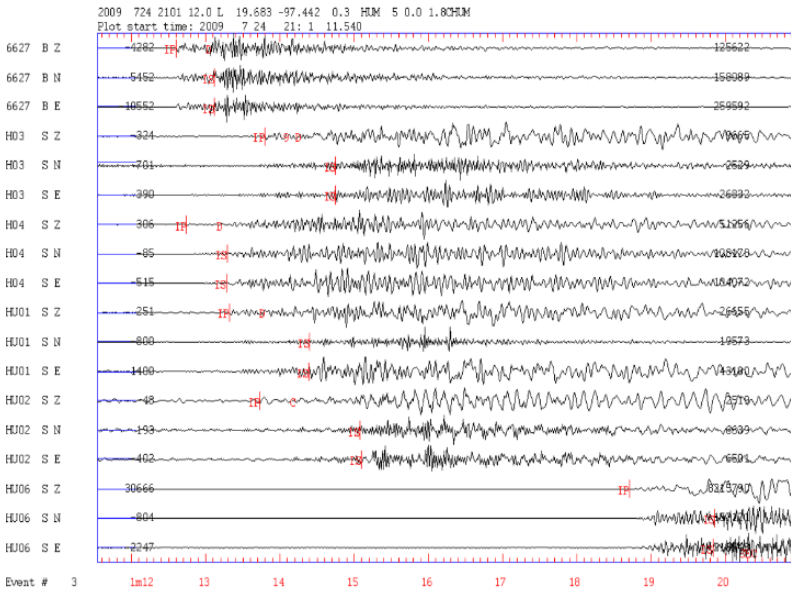


Figura 30. Izquierda: acercamiento de los primeros arribos de las estaciones que registraron el sismo, con el objeto de observar su polaridad, Derecha: junto con el mecanismo focal compuesto obtenido con las réplicas, cuya solución se interpreta como una falla oblicua con componente inversa y desplazamiento lateral izquierdo, con echado de 54°

● 16/Agosto/2015

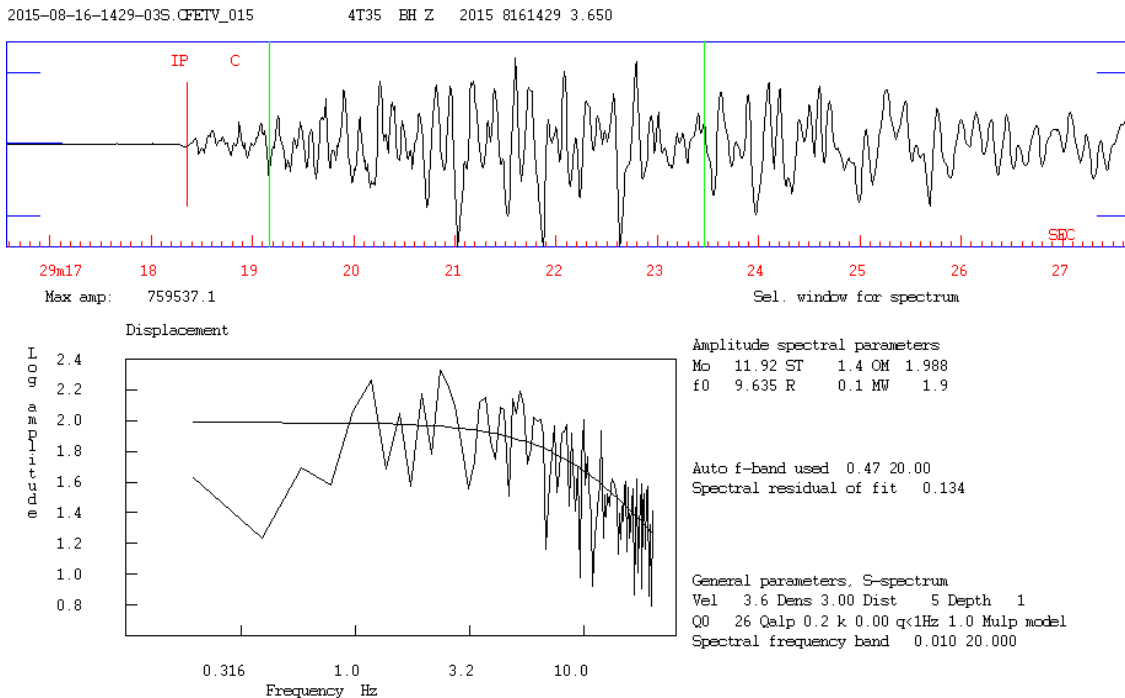
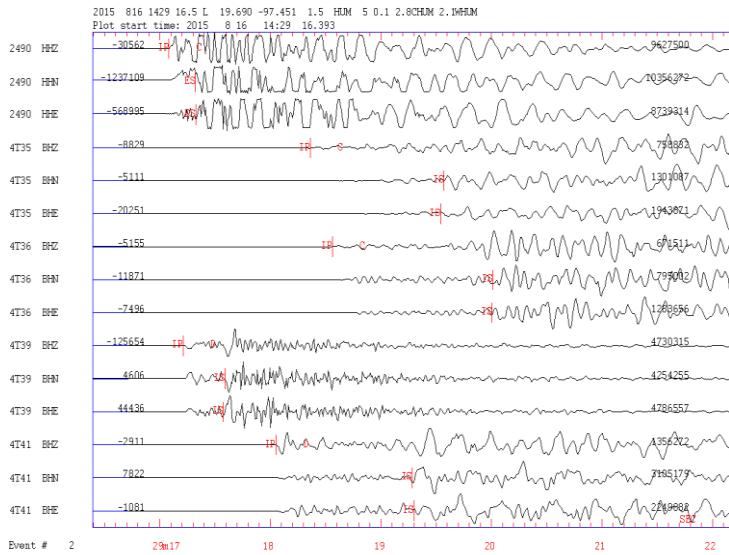


Figura 31. Parámetros de fuente estimados en el registro de la componente vertical corregida de la estación HU12 (Pueblo del Valle) tomado una ventana de 5 seg del paquete de ondas S y obteniendo su espectro de desplazamiento.



Falla inversa con rumbo=318°,  
echado=61° y desplazamiento=28°.

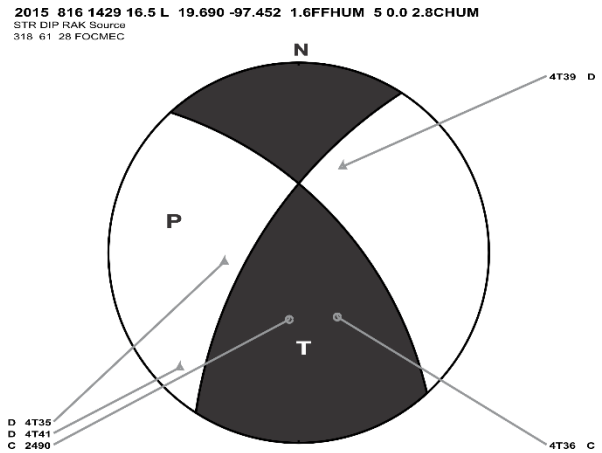


Figura 32. Izquierda: acercamiento de los primeros arribos de las 5 estaciones que registraron el sismo, con el objeto de observar su polaridad. Derecha: mecanismo focal simple obtenido, cuya solución se interpreta como una falla oblicua con componente inversa y desplazamiento lateral izquierdo.

● 8/ Febrero/2016

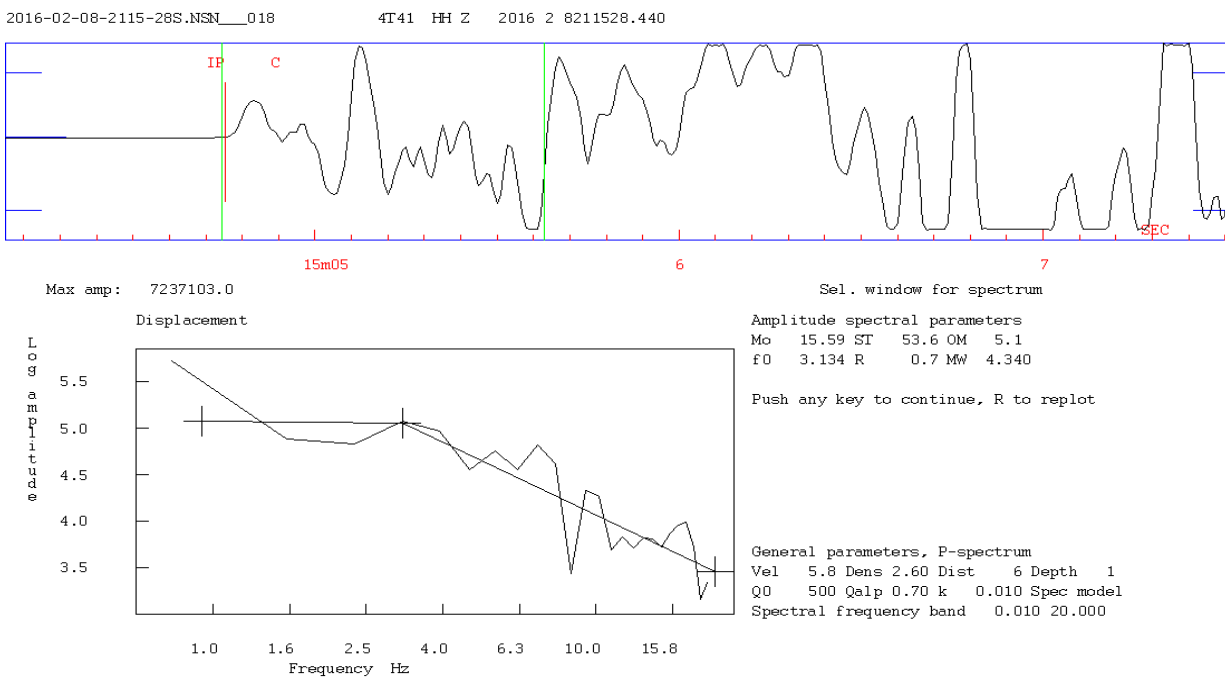
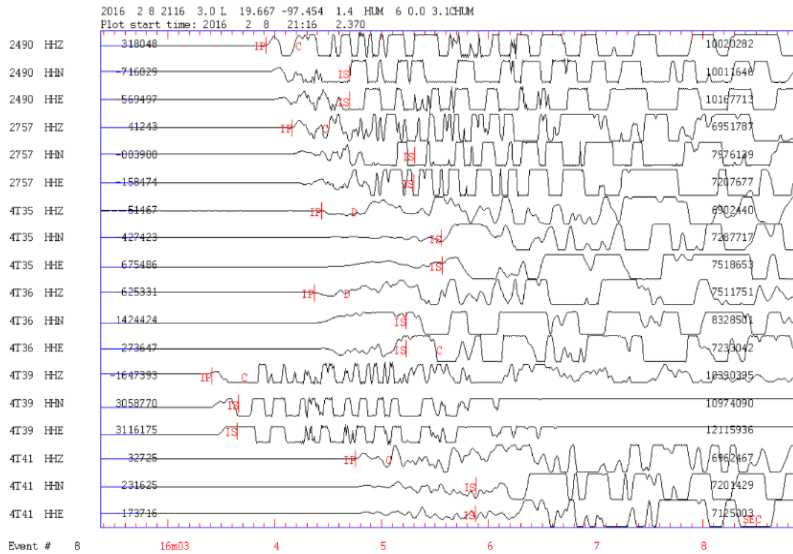


Figura 33. Parámetros de fuente estimados del registro de la componente vertical corregida de la estación HU11 (Rancho Hilillo).





Falla inversa con rumbo=170°,  
 echado=54° y desplazamiento=59°.

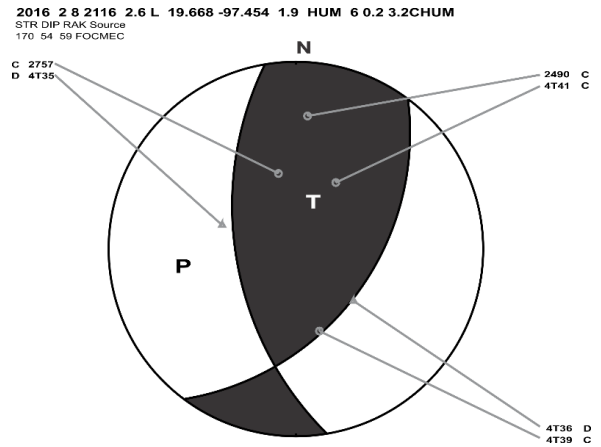


Figura 34. Izquierda: acercamiento de los primeros arribos de las 5 estaciones que registraron el sismo, con el objeto de observar su polaridad. Derecha: mecanismo focal simple obtenido, cuya solución se interpreta como una falla oblicua con componente inversa y desplazamiento izquierdo.

Tabla 8. Resumen de los parámetros de fuente de los sismos de mayor magnitud del campo.

Sismo	Mo (N*m)	ST (bar)	Fo (Hz)	R (km)	Mw
25/11/1994					3.9
21/01/2002					3.6
24/07/2009					3.3
16/08/2015	12	1.4	9.6	0.10	2.0
08/02/2016	16	54	3.2	0.7	4.2

### **3.5.- RELACIÓN ENTRE LA SISMICIDAD E INYECCIÓN DE LOS POZOS**

El objetivo de buscar una relación entre la sismicidad localizada en el campo en el periodo de 1997-2016, con la inyección de los pozos es para analizar que tanto ha influido la reinyección de pozos en el sistema estructural del campo, y de esta manera intentar caracterizar la sismicidad inducida y cuánto afecta está a la sismicidad tectónica del campo.

Antayhua (2007), analizó el comportamiento de los pozos inyectoros y de producción con los sismos locales contabilizados en las estaciones S05 (HU05) y S06 (HU06), en el periodo de 1999 a 2005. Sus resultados se muestra en la Figura 35, donde se observa que al aumentar los gastos del pozo inyector aumenta la sismicidad local, así como un incremento en la producción de algunos pozos productores, después de ocurrido el sismo del 21/01/2002 (Mw3.6). Por lo tanto, en este campo se comprueba por primera vez, que parte de la sismicidad local registrada en el campo de Los Humeros ha sido inducida (sismos locales inducidos) por la liberación de esfuerzos locales debidos a la inyección de agua al yacimiento, lo cual puede estar favoreciendo un ligero aumento en el fracturamiento, y por tanto en la permeabilidad, del paquete de calizas que subyace a las rocas volcánicas que hospedan actualmente a los fluidos del yacimiento. Otra parte de esa sismicidad local tiene un evidente origen tectónico (sismos locales tectónicos inducidos).

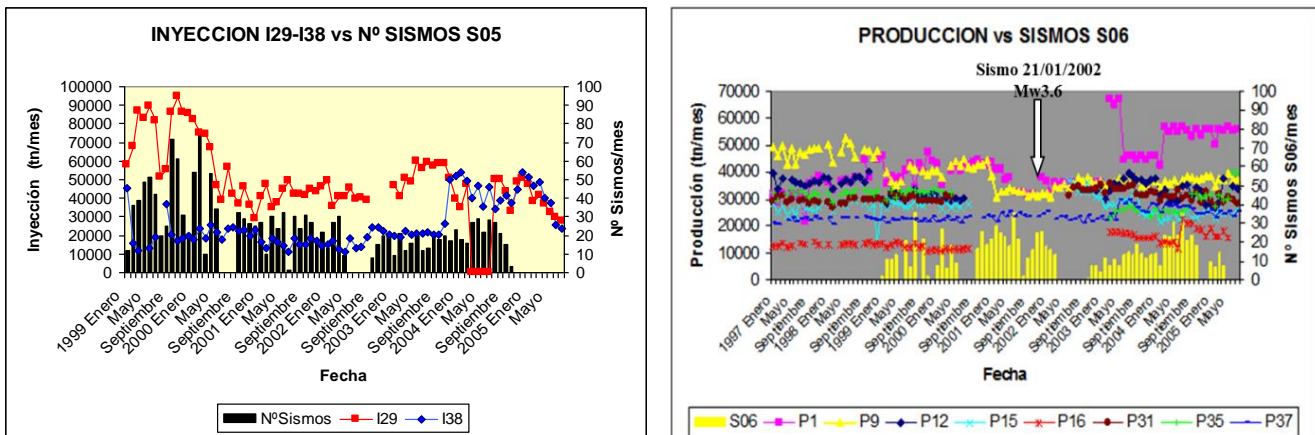


Figura 35. Parte izquierda, correlación de la cantidad de inyección de agua en los pozos I29 e I38 versus el número de sismos registrados en la estación S05. La inyección está dada en toneladas por mes (tn/mes) y los sismos en números de sismos por mes. Derecha, correlación de la sismicidad registrada en la estación S06 y los 8 pozos de mayor producción de vapor de agua (Antayhua, 2007).

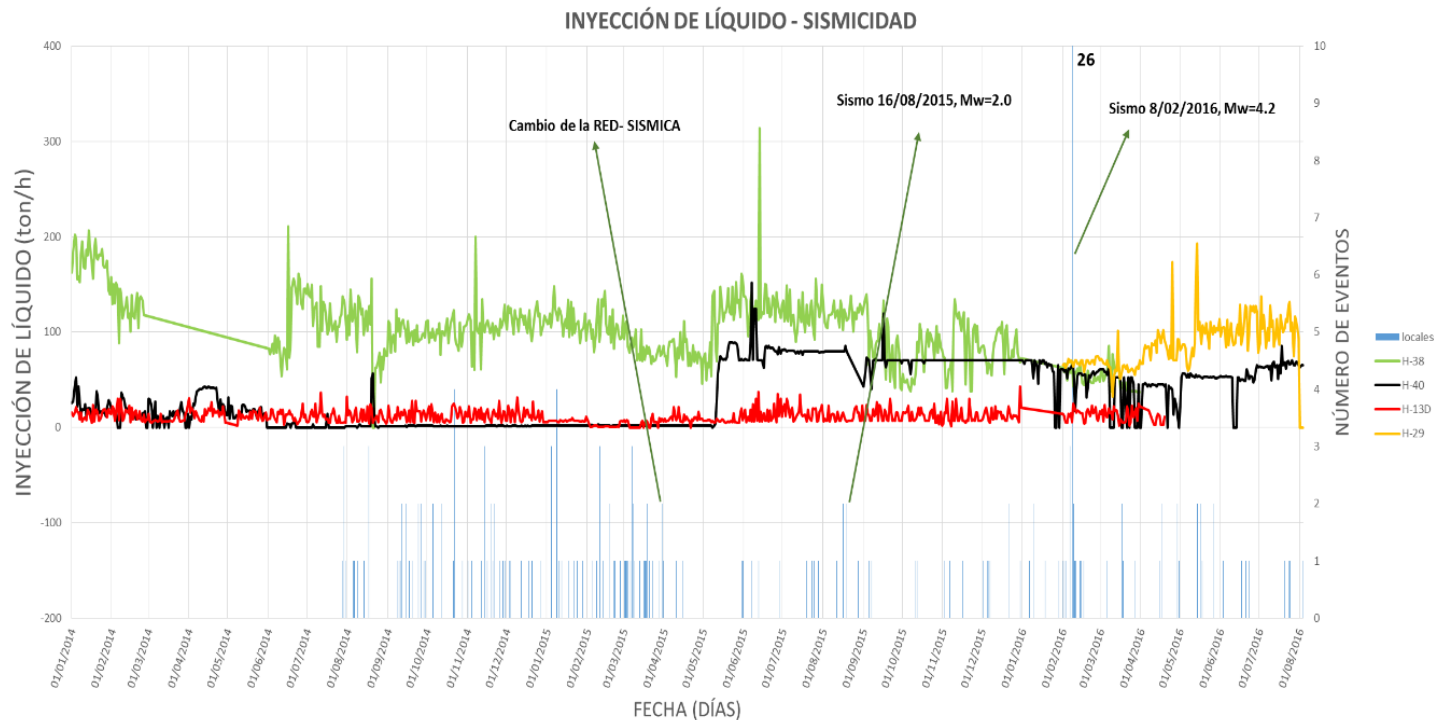


Figura 36. Gráfica que muestra la sismicidad registrada del periodo de noviembre del 2014 a agosto del 2016, con la correlación de la producción de los pozos inyectoros H13D, H40, H38 y H29 dentro del Campo Geotérmico de los Humeros (Lermo et al. 2016).

Se analizó también la relación con los gastos de los pozos inyectoros H-13D, H-29, H-38 y H-40, para el periodo de 2014-2016 (esto debido a falta de información de pozos de producción e inyección de pozos en los años faltantes) confirmándose que la sismicidad es inducida. De la Figura 36, se puede observar que el pozo H38 tuvo un gasto mayor durante el periodo (2013-2016) con un gasto máximo de 314 ton/hr el 13 de junio del 2015 y con una producción promedio de 115 ton/hr. De igual forma unos días antes (07/06/2015) el pozo H40 presenta también su mayor gasto (152 ton/hr), habiéndose reiniciado su inyección el 11 de mayo del 2015, después de más de un año con casi nula inyección. El pozo H13D tuvo una producción promedio de 11.95 ton/hr durante el periodo. Por último, el pozo inyector H29D entra en acción nuevamente el primero de febrero del 2016, con 70 ton/hr en promedio estos primeros meses del 2016, después de mantenerse sin operación aproximadamente más de dos años.

### **3.6.- COCIENTE ESPECTRAL H/V**

En el campo geotérmico de Los Humeros se realizó un estudio de ruido sísmico ambiental (Torres, 2017). Como ya se había mencionado anteriormente en este trabajo se encontraron varias anomalías en la forma y amplificación del cociente espectral H/V, de las cuales la más importante se ubica al centro de la caldera, en el pueblo.

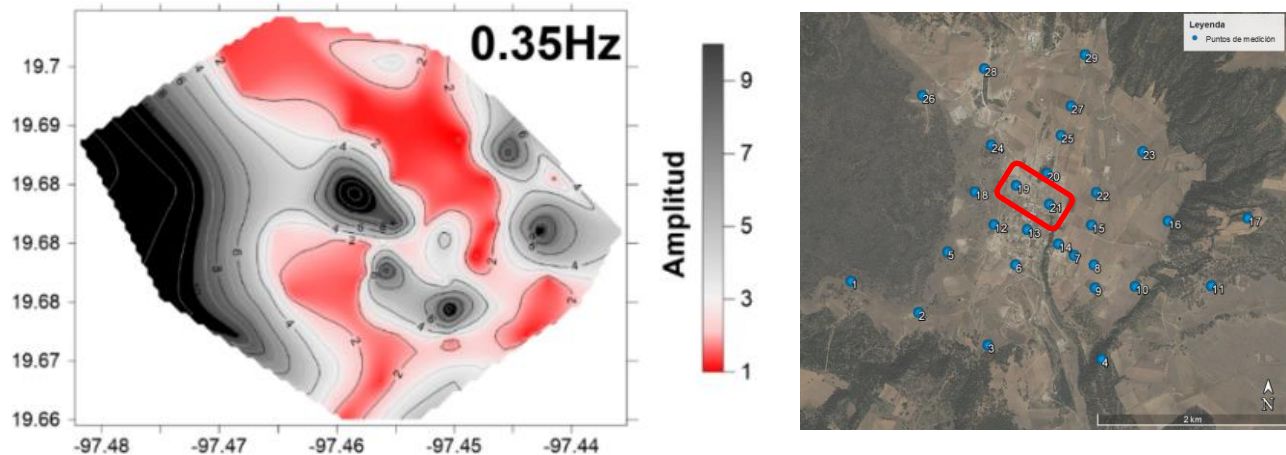


Figura 37. Izquierda: Mapa de isoamplitudes para una frecuencia de 0.35 Hz. Derecha: Puntos de medición de los cuales se ocuparon los puntos 19 y 21 (cuadrado rojo) Tomada de Torres (2017).

#### **3.6.1.- Cociente espectral H/V con ruido.**

El método, también llamado la técnica de Nakamura o HVSR, fue introducido por Nogoshi e Igarashi en 1971 basado en los estudios iniciales de Kanai y Tanaka (1961). Este método presenta un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo como por la rapidez con que permite obtener resultados (SESAME, 2004).

En los trabajos de Lermo y Chávez-García (1993 y 1994), en el cual comparó el cociente espectral estándar que utiliza registros de sismos (SSR) con el cociente espectral utilizando registros de microtremores, se concluyó que el cociente espectral utilizando microtremores determina de forma precisa el periodo dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.3 y 10 Hz, además de estimar de forma preliminar la amplificación.

La metodología propuesta por Nakamura en 1989, y Lermo y Chavez-García (1993), parte de la hipótesis de que la energía de los microtremores o ruido sísmico ambiental consiste principalmente de ondas Rayleigh y que la amplificación del efecto de sitio se debe a la presencia en la superficie de una capa de suelo blando sobre un semiespacio.

En estas condiciones se tienen cuatro componentes del movimiento del suelo: las componentes horizontales del semiespacio y de la superficie, y la componente vertical del semiespacio y de la superficie. De acuerdo con Nakamura, es posible estimar el efecto de la fuente en la amplitud  $A_s$ , por medio del siguiente cociente.

$$A_S = \frac{V_S}{V_B} \quad (6)$$

Donde  $V_S$  es el espectro de Fourier de la componente vertical del movimiento en la superficie y  $V_B$  es el espectro de Fourier de la componente vertical del movimiento en el semiespacio. Entonces, se define como estimación del efecto de sitio,  $S_E$ , el siguiente cociente espectral.

$$S_E = \frac{H_S}{H_B} \quad (7)$$

Donde  $H_S$  es el espectro de Fourier de la componente horizontal del movimiento en la superficie y  $H_B$  el espectro de Fourier de la componente horizontal del movimiento en el semiespacio. Para compensar  $S_E$  por el efecto de la fuente se calcula la función del efecto de sitio modificada  $S_M$ .

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} \quad (8)$$

Si se acepta que el cociente  $H_B/V_B$  es igual a la unidad, la función del efecto de sitio, corregida por la fuente, se puede escribir mediante la siguiente ecuación.

$$S_M = \frac{H_S}{V_S} \quad (9)$$

La suposición  $H_B/V_B$  es igual a la unidad fue verificada experimentalmente por Nakamura usando mediciones de microtemores a profundidad en un pozo.

El cociente espectral  $H/V$  proporciona información relevante del suelo tales como el periodo de vibración y la amplificación relativa, además, puede ser considerado como una función de transferencia empírica.

### 3.6.2.- Inversión del cociente espectral H/V

Con el uso de las correlaciones cruzadas de ruido ambiental entre pares de estaciones, Claerbout en 1968 demostró que se pueden recuperar los coeficientes de reflexión y de transmisión de la estructura. Weaver y Lobkis en 2001 encontraron resultados similares usando la correlación de los campos difusos. Considerando estos resultados, la función de Green entre dos lugares para un medio dado se recupera mediante el promedio de las correlaciones cruzadas de sus respectivos registros (Piña-Flores et al., 2017).

Con las aplicaciones prácticas de la técnica y junto con la teoría establecida se demostró la posibilidad de recuperar las funciones de Green bajo la teoría de los campos difusos haciendo relación de energías de cada tipo de onda, derivado del principio de equipartición (Piña et al., 2017).

Sánchez-Sesma en 2008, y Perton en 2009 demostraron que la frecuencia dominante de la función de Green para un receptor y fuente coincidentes mide la potencia inyectada al sistema por la unidad de carga,



contabilizando tanto las ondas propagadas como las que regresan a la fuente (Piña et al., 2017). Por lo tanto, la densidad de energía dimensional al punto  $x_A$  a lo largo de la dirección  $m$  puede expresarse como:

$$\begin{aligned} E_m(x_A, \omega) &= \rho\omega^2(u_m(x_A, \omega)u_m^*(x_A, \omega)) \\ &= -2\pi\mu E_s k^{-1} \text{Im}(G_{mm}(x_A, x_A, \omega)) \end{aligned} \quad (10)$$

En donde la función de Green ( $G_{mm}(x_A, x_A, \omega)$ ) es el desplazamiento de  $x_A$  en dirección  $m$  producido por una unidad que actúa en la misma dirección  $m$  y el mismo punto  $x_A$ ; ( $u_m(x_A, \omega)u_m^*(x_A, \omega)$ ) es la autocorrelación promedio del desplazamiento en dirección  $m$ ;  $\omega$  es la frecuencia angular;  $k = \omega/\beta$  es el número de onda cortante,  $\beta$  es la velocidad de propagación de la onda cortante;  $E_s = \rho\omega^2 S^2$  se refiere a la densidad de energía promedio de las ondas cortantes;  $\rho$  es la densidad de la masa y  $\rho\beta^2 = \mu$  (Piña et al., 2017).

El ruido sísmico ambiental es el resultado de la dispersión de ondas sísmicas producidas por varias fuentes, conforme a lo anterior, Sánchez-Sesma en 2011 asumió que el ruido sísmico es difuso y consideró el HVSR como (Piña et al., 2017):

$$(H/V)(\omega) = \sqrt{\frac{E_1(x, \omega) + E_2(x, \omega)}{E_3(x, \omega)}} \quad (11)$$

Donde  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  son la energía de densidades sobre una dirección, los subíndices 1 y 2 se refieren al desplazamiento horizontal y el 3 al desplazamiento vertical. De las ecuaciones (10) y (11) se puede expresar el HVSR como (Piña et al., 2017):

$$(H/V)(\omega) = \sqrt{\frac{\text{Im}(G_{11}(x, x, \omega)) + \text{Im}(G_{22}(x, x, \omega))}{\text{Im}(G_{33}(x, x, \omega))}} \quad (12)$$

Kawase en 2011 observó que las componentes verticales y horizontales se describen en la ecuación (12) usando la parte imaginaria de la función de Green para fuentes distribuidas que propagan una onda plana con incidencia vertical. Con esto es posible ajustar el mejor modelo de velocidades de la capa de roca a la superficie para cada interacción resolviendo el problema inverso (Piña et al., 2017).

Cuando se tiene un cociente espectral(H/V) teórico en términos de las funciones de Green, es necesario buscar una comparación con los valores medidos y la inversión a realizar. La curva H/V teórica, depende del espesor de las capas y sus propiedades que surgen de los parámetros elásticos (Piña et al., 2017).

Para la solución es conveniente definir límites superiores e inferiores de los valores objetivo, usando información a priori como sondeos, perfiles estratigráficos, geológicos, etc., o analizando la misma forma del H/V experimental, estas características realizan la inversión, usando modelos simplificados que imitan al H/V experimental. El modelo teórico para la simulación del H/V asume que las capas son horizontales y de carácter infinito, esta configuración permite el cálculo de las funciones de Green que son las que ajustan a la inversión (Piña et al., 2017).

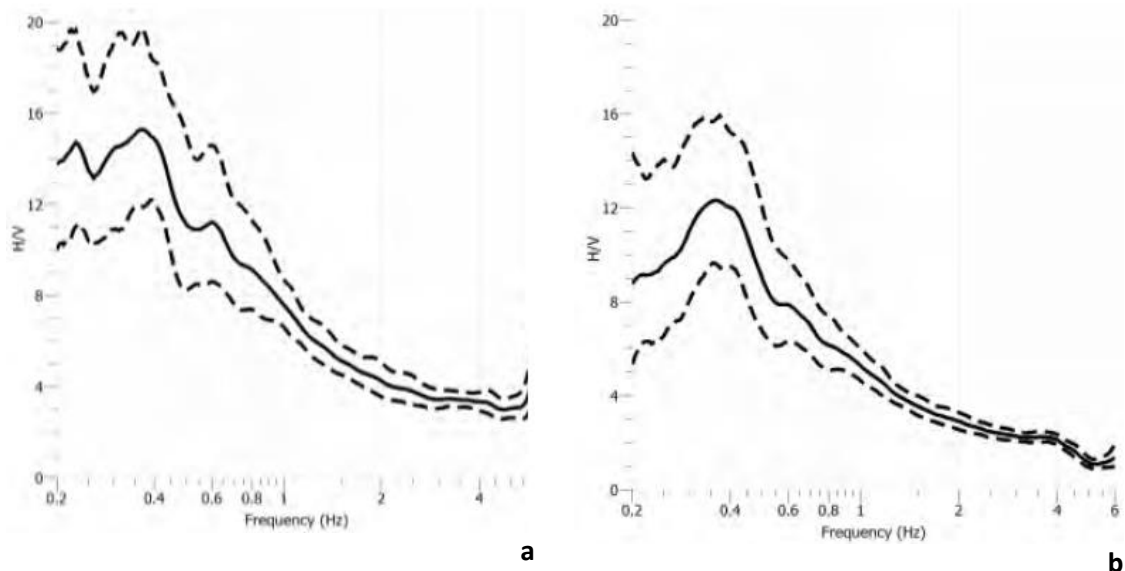
### 3.6.3.- Procesamiento

La inversión del cociente espectral H/V se realizó con el software HV-Inv (Piña et al., 2017) que realiza el cálculo directo e inverso del cociente espectral H/V considerando la teoría de los campos difusos. El software realiza la inversión por medio de métodos de optimización global (Monte Carlo, Simulated Annealing y Modified Simulated Annealing) y métodos de optimización local (Simplex Downhill e Interior Point). Para realizar la inversión se necesita un modelo de capas planas con los siguientes parámetros: espesor en m, velocidad de onda P en m/s, velocidad de onda S en m/s, densidad en Kg/m<sup>3</sup> y coeficiente de Poisson. Para cada parámetro se necesita un rango de valores mínimo y máximo de cada estrato considerado en el modelo.

Para realizar la inversión del cociente espectral H/V se tomaron en cuenta los puntos 19 y 21, del trabajo de Torres (2017), debido a que muestran una anomalía de interés sobre el pueblo de Los Humeros. Los parámetros que se utilizaron para realizar la inversión se basaron en el modelo de velocidades de Los Humeros y en estudios previos (Figura 37). La primera capa se considera como los depósitos volcánicos más jóvenes de la caldera; la segunda capa considera los dos yacimientos y los depósitos volcánicos más antiguos; por último, la tercera capa son las calizas marinas profundas.

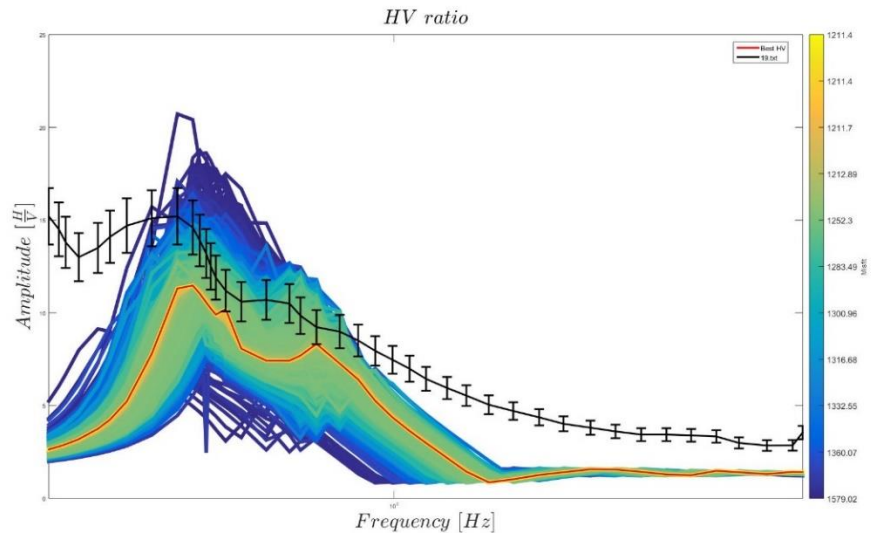
**Tabla 9. Parámetros utilizados para realizar la inversión de los cocientes espectrales 19 y 21.**

Capa	Espesor [m]		Vp [m/s]		Vs [m/s]		Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]		Coeficiente de Poisson	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1	150	500	1000	3000	500	1200	1000	1800	0.1	0.45
2	800	2000	3000	5000	1500	2500	1300	2700	0.1	0.45
3	0	0	4000	1400	2200	6000	2000	3500	0.1	0.30

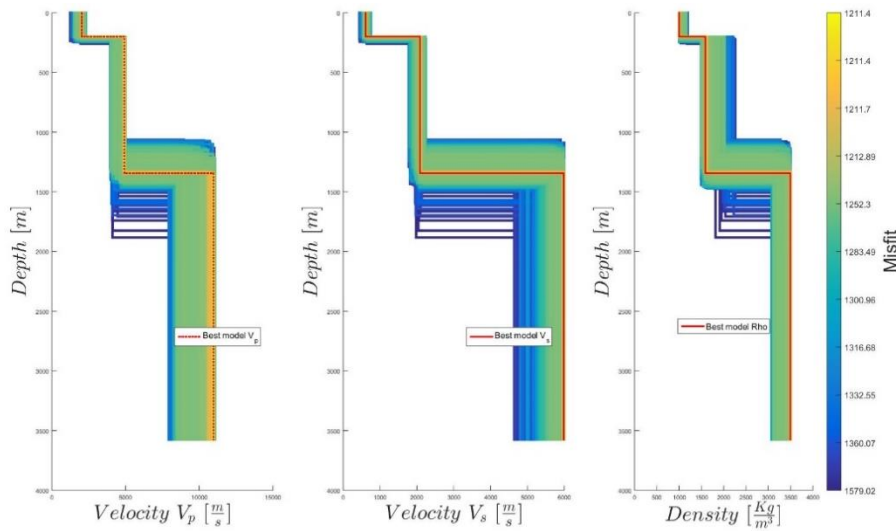


**Figura 38. Cocientes espectrales 19 (a) y 21 (b) que se utilizaron para realizar la inversión.**

### 3.6.3.- Resultados



a

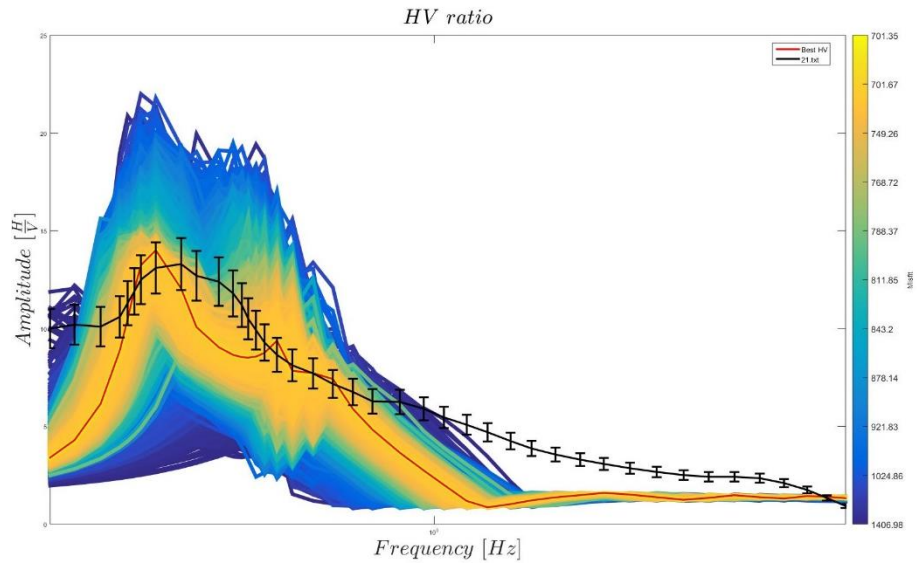


b

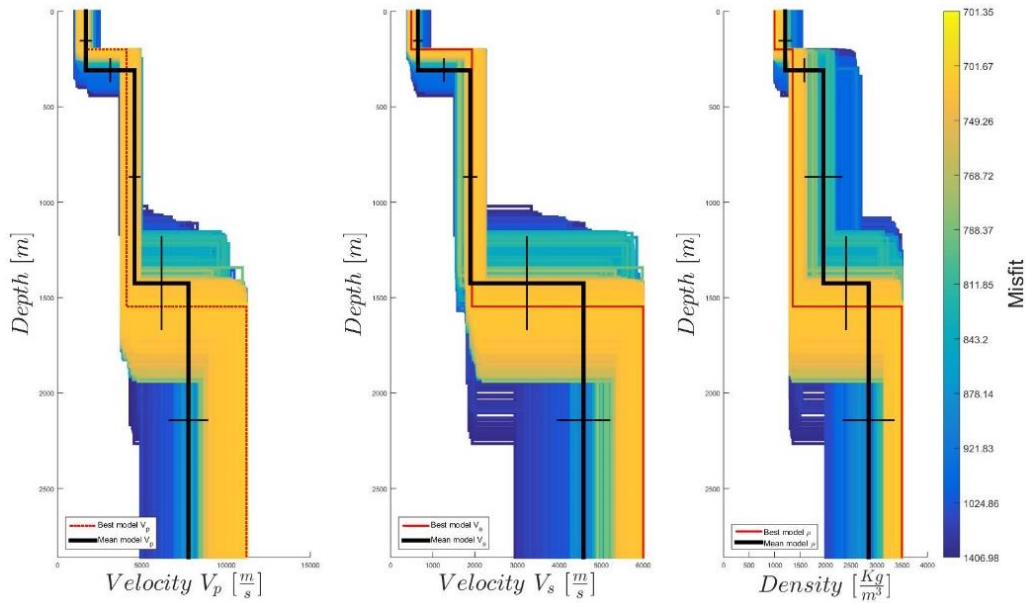
Capas	Esesor [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
1	200	2030	612.1	1001
2	1143	4911	2087	1590
3	0	10970	5981	3496

c

Figura 39. Resultado de la inversión del cociente espectral H/V 19 (línea negra). a) Se observan todas las iteraciones que se realizaron hasta llegar al mejor modelo. b) Perfiles de Vp, Vs y densidad. c) Tabla de valores resultado de la inversión.



**a**



**b**

Capas	Espesor [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
1	200	1634	492.8	1001
2	1347	4088	1934	1355
3	0	11210	5999	3500

**c**

Figura 40. Resultado de la inversión del cociente espectral H/V 21 (línea negra). a) Se observan todas las iteraciones que se realizaron hasta llegar al mejor modelo. b) Perfiles de  $V_p$ ,  $V_s$  y densidad. c) Tabla de valores resultado de la inversión

---

---

## **CAPÍTULO 4 ESTUDIO DE POTENCIAL ESPONTÁNEO**

---

---

El potencial espontáneo (SP, por sus siglas en inglés), es un método de prospección eléctrica, en el cual se mide la diferencia del potencial en superficie entre dos puntos, donde el común denominador de la generación del SP es el flujo de agua subterránea a través de un medio poroso. Este método pasivo nos permite encontrar anomalías de diferencia de potencial superpuestas a las tendencias regionales de la diferencia de potencial. Las anomalías de SP tienen su origen en diferentes mecanismos que pueden usarse para identificar depósitos de minerales, características geológicas, flujos de aguas subterráneas o campos geotérmicos y sistemas hidrotermales. La amplitud tiene un espectro muy amplio, de unos pocos mV a 1 o 2 V/km, y su distribución espacial se correlaciona con el tamaño de las fuentes que se encuentran a una profundidad dentro de los primeros cien metros del subsuelo.

A pesar de que muchos investigadores han llevado a cabo estudios de potencial espontáneo (SP) en el pasado, especialmente en el campo de la prospección minera (Sato y Mooney, 1960), el uso del método todavía estaba restringido porque las fuentes de anomalías del SP no se identificaron completamente. Sin embargo, desde 1970, el método SP ha vuelto a crecer como un moderno método de prospección para delinear el estado térmico de los campos geotérmicos (Banwell, 1970; Zhody et al., 1973; Corwin, 1976; Revil y Pezard, 1998).

El potencial espontáneo nos ayuda a delimitar en superficial las anomalías hidrotermales, así como el flujo de fluidos hidrotermales a través de fallas o fracturas. Este método es de gran utilidad, debido a que relaciona las estructuras geológicas, sistemas hidrotermales y zonas de alta permeabilidad con infiltración de agua.

Una evaluación preliminar de recursos geotérmicos se ha realizado con SP ya que es un método económico, bajo costo de instrumentación, aplicación, tratamiento y modelado de datos.

### **4.1 ORIGEN DE LAS ANOMALÍAS DE SP**

Se han realizado muchos estudios sobre el origen de las anomalías de SP basadas en efectos electroquímicos, termoeléctricos y electrocinéticos. Nourbehecht (1963) presentó una ruta teórica para comprender estos procesos, basada en la termodinámica de procesos irreversibles. Los flujos  $J_i$  (como de calor, disolvente y corriente eléctrica) son inducidos por las fuerzas motrices  $X_j$  (como gradiente de temperatura, gradiente de presión, gradiente de potencial eléctrico). Cada flujo se puede expresar como una combinación lineal de todas las fuerzas (llamadas relaciones fenomenológicas o ecuaciones de movimiento termodinámicas):

$$J_i = \sum L_{ij} X_j \quad (13)$$



Donde:  $L_{ij}$  Son conductividades generalizadas y se denominan coeficientes de acoplamiento cruzado cuando  $i \neq j$ . Estas relaciones proporcionan la base para un tratamiento cuantitativo.

#### 4.1.1.- Efecto electroquímico

La difusión química entre iones de diferentes concentraciones en el suelo puede generar anomalías porque los mismos iones transportan corrientes eléctricas. Para los valores experimentales de los coeficientes de acoplamiento de difusión electroquímica de varias muestras de roca, Nourbehecht (1963) estimó que aproximadamente 20 mV podrían ser el valor máximo esperado para la mayoría de las celdas de concentración geoquímica.

#### Procesos de reacción química.

El sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) son los principales constituyentes de los gases volcánicos. Las reacciones químicas entre los gases volcánicos, las aguas subterráneas y las rocas pueden controlar el entorno químico de los volcanes y los campos geotérmicos. Massenet y Pham (1985a) mencionaron que el  $H_2S$  se transforma parcialmente en  $SO_4^-$  para generar potenciales negativos en la superficie del suelo. Es bien sabido que el ion sulfato es abundante en aguas termales ácidas (White, 1957; Ichikuni, 1959). Los iones sulfato en aguas termales ácidas pueden generarse mediante las siguientes cinco reacciones (Ozawa et al., 1973):

- 1) Oxidación por oxígeno disuelto en agua circulante: Sin embargo, debido a que el contenido de oxígeno disuelto en el agua circulante es muy pequeño, esta reacción no puede explicar estequiométricamente la formación de grandes cantidades de iones sulfato en aguas termales ácidas.
- 2) Oxidación por oxígeno en el aire: La velocidad lenta de esta reacción no puede producir en breve grandes cantidades de iones sulfato. Por lo tanto, la formación de una gran cantidad de iones sulfato en aguas termales no puede deberse a la oxidación del sulfuro de hidrógeno en los gases volcánicos.
- 3) Oxidación por compuestos férricos en paredes de roca: La concentración de iones férricos en aguas termales suele ser inferior a 100 mg/l, y la concentración de iones sulfato generada por esta reacción es de 85 mg/l como máximo. Este resultado muestra que la contribución de esta reacción a la formación de iones sulfato es insignificante.
- 4) Disolución de sulfatos en cenizas volcánicas y rocas alteradas: Los sulfatos y cloruros solubles en agua a menudo se adhieren a las cenizas volcánicas y se sublima. Es común encontrar tales minerales de sulfato en depósitos de área fumarólica.
- 5) Reacción auto redox del ácido sulfuroso: la amplitud de las anomalías SP puede ser pequeña debido al pequeño contenido del ion remanente en general. También tenemos que considerar la reacción química del dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Cuando el dióxido de carbono se combina con el agua, se forma el ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ).

Además de las reacciones mencionadas anteriormente basadas en el equilibrio químico, la cinética química puede ser necesaria cuando consideramos los campos SP variables en el tiempo relacionado con eventos volcánicos transitorios. Hasta ahora, hay poco conocimiento disponible para discusiones cuantitativas de las anomalías de SP que se originan de las reacciones químicas.

- El primer proceso es la difusión química la cual, genera anomalías de SP, hasta algunas decenas de mV de signo positivo o negativo (Nourbehecht, 1963, Cowin y Hoover, 1979). En volcanes, las observaciones geoquímicas enfatizan la existencia de diferentes concentraciones de iones en el gas, en las descargas de agua y en las áreas fumarólica. En general, tales estructuras se someten a hidrotermalización y argilización (producción de arcilla), y se involucran grandes áreas. Por lo tanto, este proceso de difusión química debería dar lugar a anomalías de SP bien distribuidas en estas áreas, y de acuerdo con los flujos de flujo locales.
- El segundo proceso electroquímico principal implica reacciones químicas. Las reacciones químicas entre los gases volcánicos que contienen sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua subterránea pueden generar iones SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> o CO<sub>3</sub>. Tales casos dan lugar a anomalías SP negativas de pequeña amplitud porque se supone que es difícil formar estequiométricamente grandes cantidades de tales iones.

Hasta ahora, estos procesos no han sido bien estudiados en el campo. Con mayor frecuencia, los procesos de difusión y electroquímicos coexisten con otros mecanismos que prevalecen.

#### 4.1.2.- Efecto termoelectrónico

Si se aplica un gradiente de temperatura a través de una muestra de roca, aparece un campo eléctrico a través de la muestra. Este fenómeno se llama efecto termoelectrónico (Corwin y Hoover, 1979).

Los flujos acoplados de calor  $J_T$  y la densidad de corriente eléctrica  $I_T$  inducida por las fuerzas impulsoras: el gradiente de temperatura  $\nabla T$  y el gradiente de potencial eléctrico  $\nabla\phi$  se relacionan de la siguiente manera:

$$J_T = -\sigma\pi\nabla\phi - \lambda\nabla T \quad (14)$$

$$I_T = -\sigma\nabla\phi - \theta\nabla T \quad (15)$$

donde  $\sigma$ ,  $\lambda$ ,  $\pi$  y  $\theta$  son las conductividades eléctricas y térmicas, los coeficientes Peltier y termoelectrónicos, respectivamente. Los términos primero y segundo en el lado derecho de la ecuación (14) muestran el flujo de calor debido al efecto Peltier y la conducción térmica, respectivamente. Los términos primero y segundo en el lado derecho de la ecuación (15) representan la densidad de corriente eléctrica debida a la ley de Ohm y al efecto

termoeléctrico (o efecto Seebeck), respectivamente.  $\nabla\phi/\nabla T$  se llama coeficiente de acoplamiento termoeléctrico.

Los coeficientes de acoplamiento termoeléctrico obtenidos por experimentos de laboratorio oscilan entre -0.25 y 1.5 mV / °C, con un valor medio de 0.2 mV / °C (Yamashita, 1961; Nourbehecht, 1963; Dorfman et al., 1977).

El efecto termoeléctrico puro implica un mecanismo de conducción térmica. Un gradiente térmico aplicado a una roca seca induce un potencial en los lados de la roca. El coeficiente termoeléctrico medio de 0,2 mV / °C implica que las anomalías de SP de 100 mV corresponderían a los cambios de temperatura de 500 °C. Este fenómeno no tiene sentido en el campo, excepto cuando hay flujos de gas sobrecalentado. Un buen ejemplo de un efecto termoeléctrico puro se obtuvo en combustión de carbón en Wyoming (EE. UU.) Donde se midió una anomalía positiva de menos de 30 mV en amplitud (Corwin y Hoover, 1979).

Como resultados principales, parece que:

- (1) el efecto termoeléctrico por el mecanismo de conducción pura sólo debe considerarse para áreas donde se encuentran flujos de gas sobrecalentado,
- (2) el flujo de gas, la circulación del agua subterránea y la precipitación introducen un componente térmico convectivo al componente de conducción, que enfatiza el efecto termoeléctrico
- (3) las amplitudes son positivas, pero generalmente débiles en comparación con los valores SP observados medidos en el campo.

#### 4.1.3.- Efecto electrocinético

Se sabe que el movimiento de un fluido a través de un medio poroso genera un gradiente de potencial eléctrico a lo largo de la trayectoria del flujo, debido a la interacción entre el fluido de poro en movimiento y la doble capa eléctrica en la superficie del poro (Overbeek, 1952) (Figura 41). Esto se llama potencial electrocinético o de transmisión. El flujo de fluido acoplado  $J_E$  y la densidad de corriente eléctrica  $I_E$  debido al gradiente de potencial eléctrico  $\nabla\phi$  y al gradiente de presión de poro  $\nabla P$  se rigen por:

$$J_E = -(\kappa\epsilon\zeta/\eta)\nabla\phi - (K/\eta)\nabla P \quad (16)$$

$$I_E = -\kappa\sigma\nabla\phi - (\kappa\epsilon\zeta/\eta)\nabla P \quad (17)$$

donde  $\sigma$ ,  $\epsilon$  y  $\eta$  son la conductividad eléctrica, la constante dieléctrica y la viscosidad del fluido de poro, respectivamente.  $\kappa$  y  $K$  son la porosidad y la permeabilidad del medio.  $\zeta$  (el potencial zeta), es el voltaje a través de la doble capa de Helmholtz. Los términos primero y segundo en el lado derecho de la ecuación (16) representan el flujo de fluido debido al efecto electro osmótico y la ley de Darcy, respectivamente, mientras que los términos primero y segundo en el lado derecho en la ecuación (17) representan la densidad de

corriente eléctrica debido a la ley de Ohm y el potencial electrocinético, respectivamente. Los coeficientes de los efectos electro-osmótico y electrocinético son iguales de acuerdo con las relaciones recíprocas de Onsager (de Groot y Mazur, 1962).

En el estado de equilibrio ( $I_E = 0$ ), la ecuación (17) se reduce a la expresión simple:

$$\nabla\phi/\nabla P = -\frac{\epsilon\zeta}{\sigma\eta} \quad (18)$$

$\nabla\phi/\nabla P$  se llama coeficiente de acoplamiento electrocinético. El potencial  $\zeta$  es un parámetro importante para el acoplamiento electrocinético. Se han realizado estudios experimentales por, por ejemplo, Ahmed (1964), Ishido y Mizutani (1981), Morgan (1988) y Morgan et al. (1989). Para varios minerales y rocas, Ishido y Mizutani (1981) muestran que el potencial  $\zeta$  es comúnmente negativo en agua con un pH superior a 2 y aumenta negativamente al aumentar el pH. Sus experimentos también revelan que el valor absoluto del potencial  $\zeta$  aumenta negativamente cuando la concentración de electrolitos disminuye y la temperatura aumenta.

A menudo se observan anomalías positivas de SP de gran amplitud, hasta varios cientos de mV en las áreas de cumbres de volcanes activos. Las anomalías están bien correlacionadas ya sea con zonas de fisura o cráteres o conos de cumbre. Estas anomalías positivas se contrarrestan por una relación lineal entre el potencial y la altitud lejos de las zonas activas. El origen principal se relaciona con el flujo de fluidos a través de un medio poroso que genera una corriente eléctrica. Se pueden considerar varios efectos.

#### **4.1.4.- Efecto topográfico**

Debido al agua meteórica, el agua subterránea que se origina en la atmósfera y alcanza la zona de saturación por infiltración y percolación - y/o el flujo de fluido a través de una estructura generalmente da lugar a corrientes eléctricas en la dirección del flujo de fluido. Estas observaciones son bien conocidas y bien utilizadas en las investigaciones de recursos hídricos (Corwin, 1990).

En volcanes, parte de la lluvia se filtra con mayor o menor facilidad en los diferentes lechos geológicos, dependiendo de su permeabilidad. El flujo descendente generalmente se detiene mediante capas subyacentes impermeables al agua (Fournier, 1989; Aubert et al., 1993). La topografía de las capas geológicas rige el flujo gravitacional.

En general, el agua subterránea fluye hacia abajo a lo largo de las capas subhorizontales, dando lugar a afloramientos en la interfaz de flujos de lava permeables y estancos (flujo espeso de lava debajo de un lecho de escoria). Por ejemplo cuando una barrera geológica, como la pared de una caldera, impide el flujo hacia abajo, se forma un acuífero en su interior.

Tal esquema explica el llamado "efecto topográfico" donde el potencial aumenta cuando la altitud de la topografía disminuye. Muy a menudo, los autores expresan la relación negativa

de  $\nabla\phi/\nabla h$  (en mV/m) o  $\nabla\phi/\nabla P$  (en mV /MPa) como el coeficiente de efecto electrocinético. El rango de este coeficiente está entre -1 y -10 mV / m, con un valor promedio de alrededor de -2 mV /m.

El modelado de anomalías SP sigue siendo difícil. Hay muchas incógnitas fundamentales con respecto a la generación de SP, incluso para el efecto topográfico (Zablocki et al., 2003).

Ishido (1988) demuestra teóricamente la relación lineal entre el potencial y la elevación de la superficie del suelo debido a un flujo de fluido hacia abajo para un medio homogéneo. Sin embargo, la aproximación lineal del efecto topográfico a veces no se puede aplicar a toda el área de estudio como en el campo geotérmico. El modelado numérico de Yasukawa y Mogi (1998) muestra claramente que una distribución heterogénea de la permeabilidad hidráulica, así como del contraste de resistividad eléctrica y de los diferentes coeficientes de acoplamiento electrocinético perturban significativamente la relación topográfica lineal.

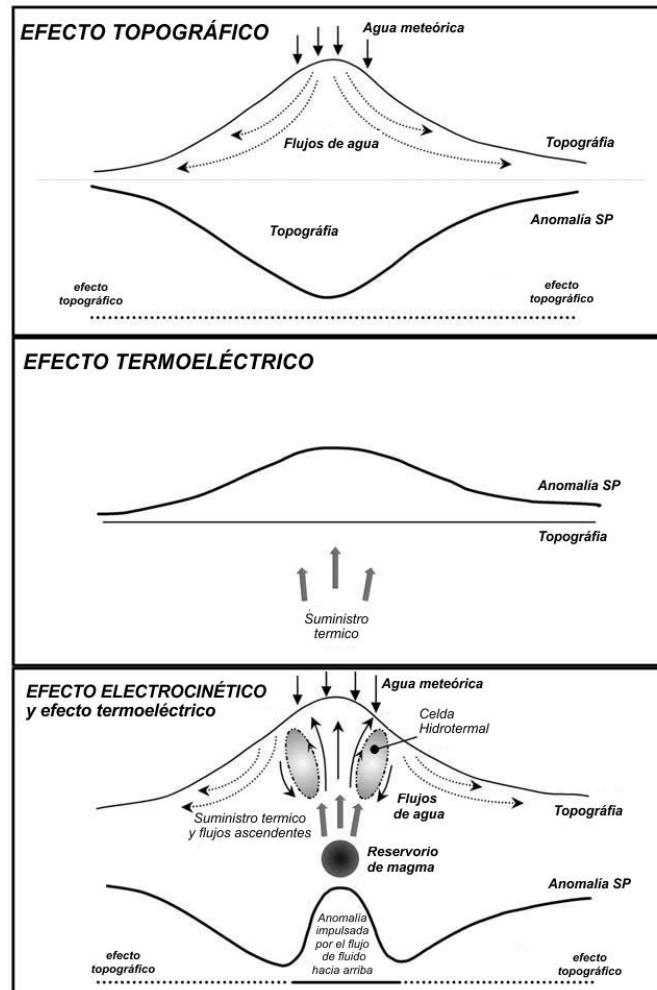


Figura 41 Esquema del comportamiento del potencial espontaneo con base en los efectos topográficos, electrocinéticos y termoeléctricos en un volcán activo. (modificada de

## **4.2 ANOMALÍAS DE POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP)**

Resumiendo, los datos recopilados por los autores recientes y otros investigadores, vemos que las anomalías de SP se clasifican en los siguientes cinco tipos, a pesar de que la aparición de anomalías de SP en los volcanes a veces es demasiado complicada para hacer una clasificación simple. Estas clasificaciones son:

- (1) Tipo de anomalía positiva
- (2) Tipo de anomalía negativa
- (3) Tipo de anomalías positivas y negativas coexistentes
- (4) Tipo dependiente de la estructura
- (5) Sin tipo de anomalía

### **4.2.1.- Tipo de anomalía positiva.**

- Podrían ser el resultado de la divergencia horizontal del enfriamiento del agua de convección que se eleva por encima de las fuentes de calor más profundas. (Zablocki, 1976; Massenet y Pham, 1985b).
- Pueden llegar hasta 300 mV sobre fisuras eruptivas recientes y antiguas que puedan observarse sobre zonas de fisuras superficiales vinculadas a fisuras profundas activas. Por el contrario, no se detectó ninguna anomalía de SP en las áreas fumarólicas ni en las fisuras abiertas cuando estas áreas no se encontraban sobre una fisura profunda. Estas áreas pueden estar situadas sobre un medio no poroso o una fisura rellena.
- La amplitud de la anomalía del SP positivo puede disminuir cuando la temperatura del magma remanente es menor que el punto de ebullición del agua, y que la capa calentada alrededor del magma remanente desaparecerá permitiendo el contacto directo del agua subterránea para enfriar la parte externa del magma.
- Las fuertes precipitaciones (más de 6 m / año) se infiltran en el macizo y el agua meteórica es más o menos canalizada por las fracturas. El flujo descendente es progresivamente calentado por el depósito de magma poco profundo y los diques recientes. Esto da lugar a un flujo ascendente impulsado por el calor, y grandes células hidrotermales dentro del cono. El efecto electrocinético debido a dicha circulación hidrotermal intensa genera anomalías de SP positivas en el cono (Adler et al., 1999).

### **4.2.2.- Tipo de anomalía negativa**

- Se deben a la correlación bien establecida entre los valores SP y la altitud topográfica (efecto topográfico).
- Debido a los flujos de agua descendentes de la lluvia en las zonas permeables.



#### **4.2.3.- Tipo coexistente de anomalías positivas y negativas**

- La precipitación sustancial probablemente recargue fisuras y cráteres altamente permeables para generar las anomalías SP negativas observadas. Mientras que los gases volcánicos calientes de magma relativamente profundo se introducen en el agua recargada para impulsar el intenso flujo ascendente de agua calentada que genera la anomalía positiva del SP. La existencia de esta circulación hidrotermal es apropiada para interpretar un sistema de enfriamiento efectivo de un volcán. (Nakagawa et al. 1984).

#### **4.2.4.- Tipo dependiente de la estructura**

- Un aumento de resistividad generado por la pared de una caldera sirve para aumentar el aumento relativo del potencial eléctrico fuera de la misma (Anderson y Johnson, 1976).
- Un aumento de anomalías de SP se da a lo largo de los bordes de una zona de colapso, debido a que la lluvia que cae se infiltra fácilmente en el macizo a lo largo de las principales interfaces tectónicas (paredes y pisos de caldera, fallas ...) el flujo de agua subterránea se bloquea dentro de la zona de colapso por una discontinuidad estructural enterrada que puede ser la expresión de un desprendimiento de tierra abultado (o una pared de caldera antigua). Dando lugar a un nivel freático.

#### **4.2.5.- Sin tipo de anomalía**

- Las anomalías de SP no están bien desarrolladas en volcanes sobrecalentados.
- El valor de pH bajo, es decir, el pequeño coeficiente de acoplamiento electrocinético, muestra que la circulación hidrotérmica (si la hay) no puede generar una anomalía de SP significativa. El agua recargada que encuentra gas volcánico caliente procedente de magma relativamente profundamente arraigado y da lugar a aguas subterráneas de bajo pH por reacciones químicas. El flujo ascendente del agua subterránea calentada no puede generar anomalías considerables de SP en el cráter de la cumbre.

### **4.3 CASOS DE SP EN MÉXICO**

Una de las principales dificultades en el área de la geotermia, es poder identificar el área hidrotermal de las zonas de interés, por esta razón se han utilizado diversos estudios geológicos, geofísicos y químicos, los cuales ayuden a definir y delimitar las zonas principales que se encuentren conectadas con la principal fuente de calor, y que permita la explotación de un campo geotérmico, con este objetivo se ha empleado la metodología de SP, la cual es comúnmente utilizada en volcanes, para poder determinar el sistema hidrotermal; se presentan 3 casos para una mejor comprensión de esta metodología, que

incluyen sus alcances y delimitaciones de los casos estudiados en México: el volcán la Malinche, Tlax., el campo geotérmico de Cerritos Colorados, Jal., y de la Soledad, Jal.

#### **4.3.1.- Volcán La Malinche**

El volcán La Malinche se localiza entre los estados de Puebla y Tlaxcala, en las coordenadas 19.23° Latitud Norte, 98.032° de Longitud Oeste, su altura es de 4461 msnm, se encuentra a 60 kilómetros del volcán Popocatepetl, a 35 kilómetros al noreste de la ciudad de Puebla y a 20 kilómetros de la ciudad de Tlaxcala, es un estratovolcán del Cuaternario de acuerdo con su datación, con una edad de más de 45 000 años y cuya última erupción ocurrió hace aproximadamente 3100 años (Castro-Govea, 2007).

Actualmente para el estudio de los volcanes se han empleado con mayor frecuencia los métodos geofísicos de exploración, en particular los métodos eléctricos, tal como el potencial espontáneo para identificar volcanes activos principalmente de Europa y Sudamérica. Se realizaron mediciones a lo largo de 8 perfiles, de los cuales 7 se realizaron de forma radial. Los valores de SP muestran claramente la transición de dos zonas principales:

- i. Una zona hidrogeológica producto del agua meteórica que genera un flujo descendiente y que se refleja en valores negativos en la curva de potencial espontáneo.
- ii. Un sistema hidrotermal producto del aumento en la temperatura del agua meteórica debido a la presencia de un cuerpo magmático en profundidad, produciendo un flujo ascendente reflejado en la curva por valores positivos de SP en la parte central del volcán.
- iii. Aún cuando el volcán carece de manifestaciones en superficie tales como fumarolas, las anomalías obtenidas con SP demuestran un comportamiento característico de volcán activo adquiriendo una forma de "V" a partir de los perfiles radiales realizados sobre las laderas del volcán. Esta forma adquirida en la curva de SP, es característica de volcanes estudiados en Sudamérica y en Europa.
- iv. Las anomalías de potencial espontáneo indican zonas de alta permeabilidad que se asocian principalmente a estructuras tales como fallas, colapsos de calderas, límites de calderas y de cráteres. En las curvas obtenidas en el volcán La Malinche se evidencia el límite de una caldera antigua. En estas estructuras es donde se han podido identificar estos flujos ascendentes o descendentes (Figura 42).

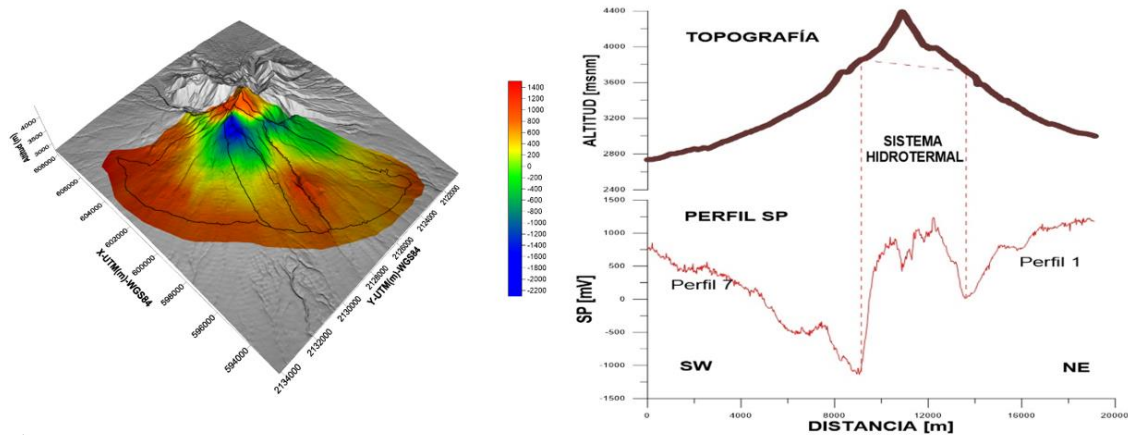


Figura 42. Izquierda: Mapa de SP final del volcán la Malinche. Derecha: Relación de SP VS Distancia y elevación del volcán la Malinche (Angulo, 2018).

En los flancos del volcán se observan las variaciones más significativas de SP. Los valores obtenidos van desde los 1,000 mV hasta los -1,000 mV con excepción del perfil cinco donde se observa la anomalía con mayor variación desde 1000 hasta los -2,300 mV. Los valores máximos de SP se hacen evidentes tanto en la parte superior, como en la parte inferior del edificio volcánico.

Al pie del volcán se observaron valores máximos de SP positivos del orden de 1V, estos valores se pueden interpretar como la existencia de una zona hidrogeológica que corresponde a la acumulación del agua meteórica que se filtra por las laderas del volcán, al estar el nivel freático somero, éste siempre presentará cargas positivas y esto se observa en cada uno de los perfiles al pie del volcán y se explican los valores altos sobre el perfil 8 que rodea al edificio volcánico. Por esta razón se realiza una corrección topográfica que nos proporciona una mejor interpretación del mapa de SP, con respecto a las anomalías relacionadas al sistema hidrotermal.

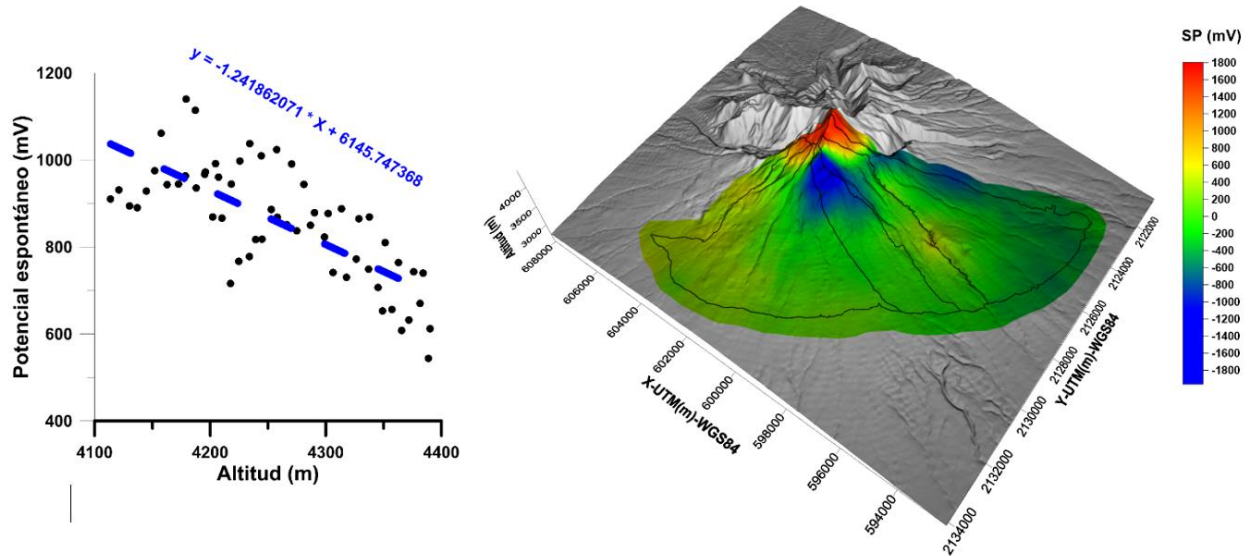


Figura 43. Mapa de potencial espontáneo con la corrección topográfica realizada, en la parte izquierda se muestra la gráfica para la obtención del coeficiente mV/m (relación de SP vs Altitud).

En este caso se puede observar claramente la relación del SP con la estructura del volcán, y puede ser fácilmente interpretado con respecto al comportamiento del SP, de forma que la topografía es fácilmente corregida, dando mayor credibilidad a los datos obtenidos, esto debido a que tiene una topografía no tan abrupta, que permite tener una corrección general, que se adapta mejor a todos los datos en general.

#### 4.3.2.- Campo Geotérmico Cerritos Colorados, Jal.

De acuerdo con la información que se obtiene de los estudios de potencial espontáneo en volcanes se llevó a cabo el estudio de esta metodología en campos geotérmicos de manera que se pueda identificar las zonas hidrotermales, que se presenten en la superficie y de esta manera poder delimitar el campo para la realización de más estudios que ayuden a definir y determinar las zonas con las condiciones adecuadas para la producción de energía.

El campo geotérmico Cerritos Colorados se encuentra localizado dentro el bosque La Primavera. Este campo se extiende desde la parte sur-central de la caldera Cuaternaria de La Primavera. El complejo de La Primavera es una caldera volcánica cuya formación se inició hace aproximadamente 140,000 años (Mahood, 1981a).

Se realizaron un total de 2824 mediciones de potencial espontáneo (SP) cada 20m, en conjunto con mediciones de temperatura y de flujos de CO<sub>2</sub> (1174 mediciones), una vez realizado el procesamiento de los datos, se observan anomalías positivas con valores de hasta +600 mV. Estos resultados generalmente están asociados a sistemas de fallas de alta permeabilidad, así como, a la presencia de flujos afectados por un gradiente de temperatura (sistema hidrotermal) y zonas de acumulación de agua, mayormente asociadas

al nivel freático. Para poder identificar la diferencia entre ambos se requiere de información de temperatura y CO<sub>2</sub> y los mapas topográficos del área de estudio.

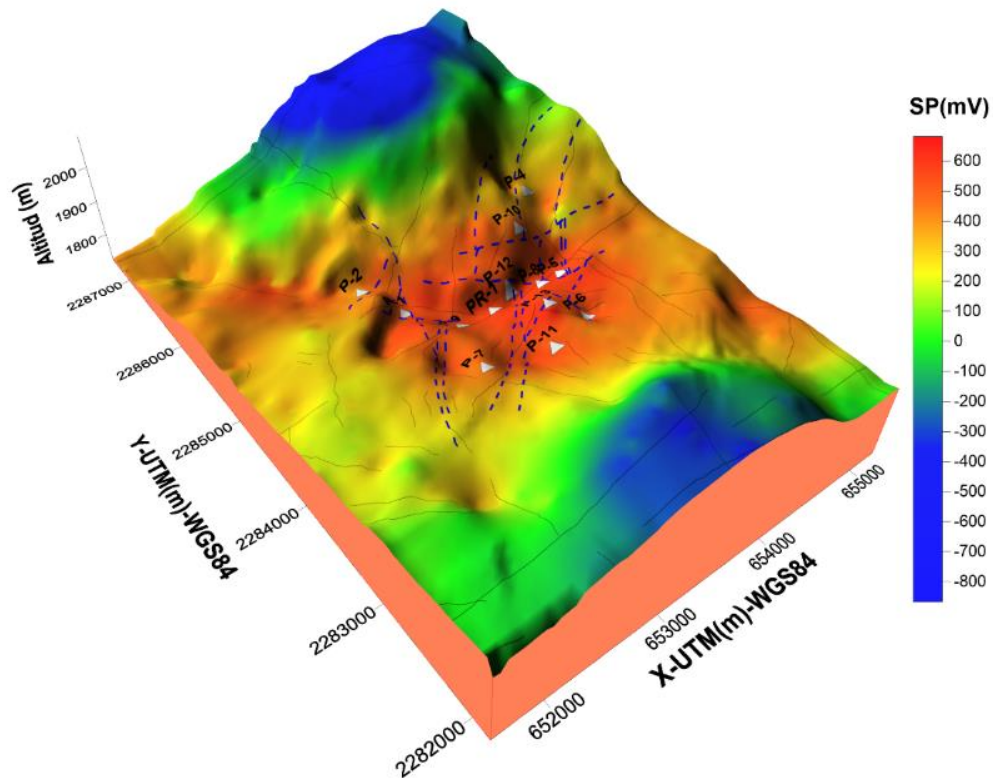


Figura 44. Mapa de SP de la Zona Geotérmica Cerritos Colorados, Jal, los sistemas de falla local y los pozos. (Lermo,2018)

A sí mismo, se tienen anomalías negativas las cuales definen el sistema hidrogeológico, en donde, no hay ninguna afectación por un gradiente de temperatura, y es fácil de identificar, debido a que los valores de SP disminuyen, cuando aumenta la elevación, esto a causa de que nos alejamos de las zonas de acumulación de agua. Sin embargo, también se presentan anomalías demasiado negativas debido al efecto llamado electrofiltración, este efecto está asociado al flujo de cargas que se presentan cuando existe infiltración de agua en zonas de fracturamiento, la cual se observa en una pequeña parte del este del campo cerca de los pozos 4 y 10.

Para la corrección topográfica, la expresión negativa del efecto topográfico se representa en el coeficiente  $\nabla\phi/\nabla h$  (en mV/m); debido a la topografía tan abrupta, se obtuvieron 3 coeficientes como se muestra en la Figura 45, los valores obtenidos son: -2.62mV/m para la zona sur, -1.350mV/m para la zona central y -1.85mV/m.

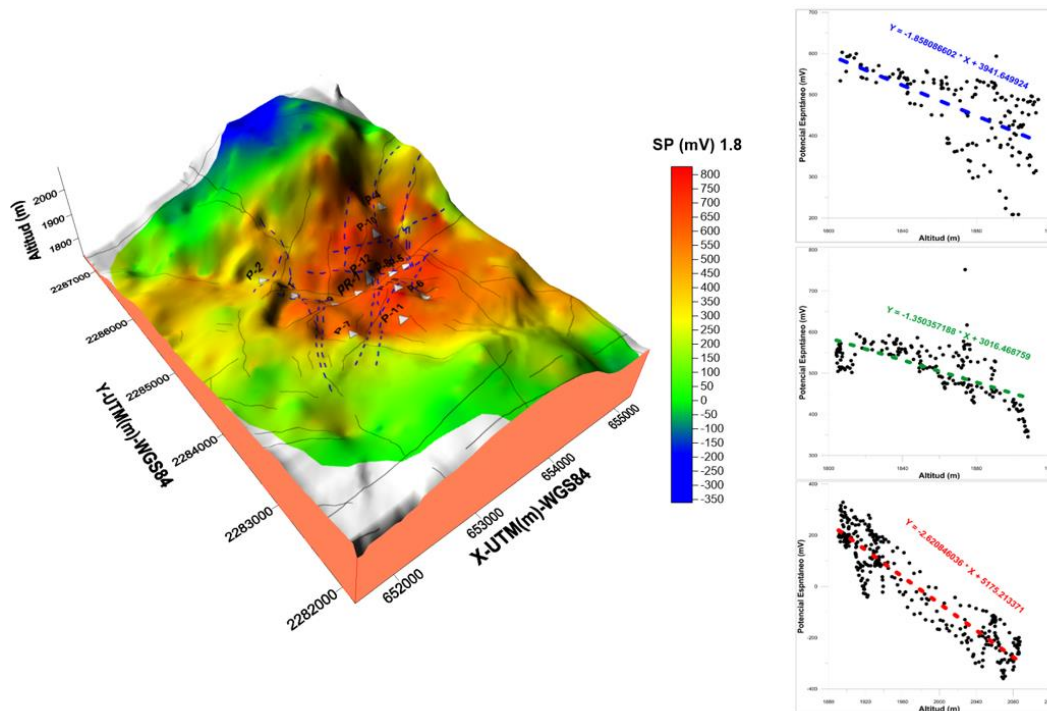


Figura 45. Mapa de Potencial Espontaneo con la corrección topográfica realizada, en la parte derecha se muestra las gráficas para la obtención del coeficiente mV/m (relación de SP vs Altitud). (Lermo et al. 2018)

Existe una variación de los datos. En la Figura 44 se muestra un cambio de valores de SP hacia la zona noroeste del campo. Estos resultados están relacionados tanto a la zona hidrotermal como a zonas de acumulación de agua (nivel freático). Una vez realizada la corrección topográfica se puede observar que esta migración disminuye por lo cual está más atribuido al nivel freático que a una zona hidrotermal. Para poder identificar mejor las zonas asociadas al sistema hidrotermal se realiza la correlación con datos de temperatura y CO<sub>2</sub>. En este caso, no es suficiente la metodología de SP, para delimitar la zona hidrotermal, ya que se encuentra en la parte central de la zona de estudio, por esa razón las mediciones de CO<sub>2</sub> y temperatura, ayudaron a delimitar una zona principalmente cerca de los pozos 12, 8 y 5. (Lermo et al. 2018).

#### 4.3.3.- Zona Geotérmica La soledad. Jal

La zona geotérmica de La Soledad se ubica en el estado de Jalisco, México. Está aproximadamente a 30 km al norte de la ciudad de Guadalajara, entre los municipios de Zapopan y San Cristóbal de la Barranca. Se ubica entre las latitudes 20°55'43" y 20°59'47", y entre las longitudes 103°20'59" y 103°27'55". Es un área rectangular de 12 x 7.5 km aproximadamente, con un área de 90 km<sup>2</sup>.

En este caso, se realizaron un total de 2,020 mediciones de potencial espontaneo (SP) cada 20 m, que corresponden aproximadamente a 40.4 km lineales de tendido.



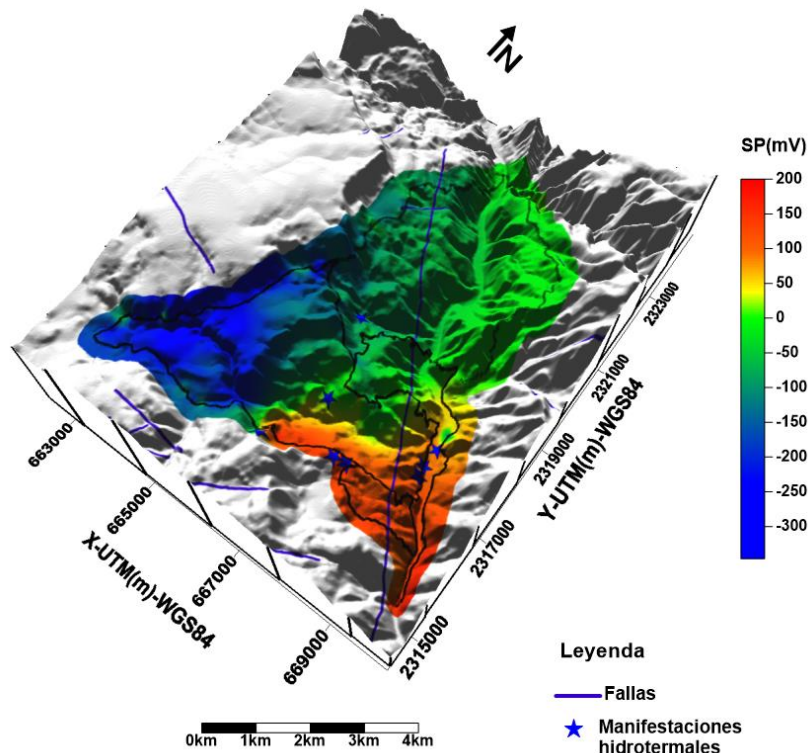


Figura 46. Mapa que muestra el modelo de potencial espontáneo con sus correcciones correspondientes, los puntos de medición, sistema de fallas y mediciones hidrotermales. (Lermo et al. 2018)

#### Resultados Obtenidos:

- En el mapa de SP (Figura 46), se observa una anomalía positiva de potencial espontáneo (+185mV) que se encuentra en la parte sureste, estos valores se atribuyen a zonas de alta permeabilidad, zonas de acumulación de agua y sistemas hidrotermales, los cuales son transportados a través de sistemas fallas conectados con la fuente de calor. Estos valores, aunque no sobrepasan los 200mV, se interpretan como asociados a una zona permeable, en la cual posiblemente exista una parte del sistema hidrotermal el cual podría tener una mayor extensión hacia la parte sur del mismo.
- Asimismo, se observa un punto en el parte este con un valor de aproximadamente +40mV, el cual se encuentra rodeado por valores altos (+180mV), este punto se considera una zona de infiltración de agua, en ese punto existe tanto infiltración (cargas negativas) como una zona permeable asociada a un sistema hidrotermal (cargas positivas).

Como ya se ha mencionado la expresión negativa del efecto topográfico se representa en el coeficiente  $\nabla\phi/\nabla h$  (en mV/m); debido a la topografía tan abrupta se obtuvo 1 coeficiente: -0.49mV/m, esto debido no sólo a la topografía que se tiene en el campo, sino también a la forma en la que fueron obtenidos los datos, y debido a esto, los perfiles realizados, no son paralelos, ni radiales, lo cual dificulta la obtención de dicho coeficiente, por tal motivo se tiene mayor confiabilidad en una interpretación sin dicha corrección (Figura 47).

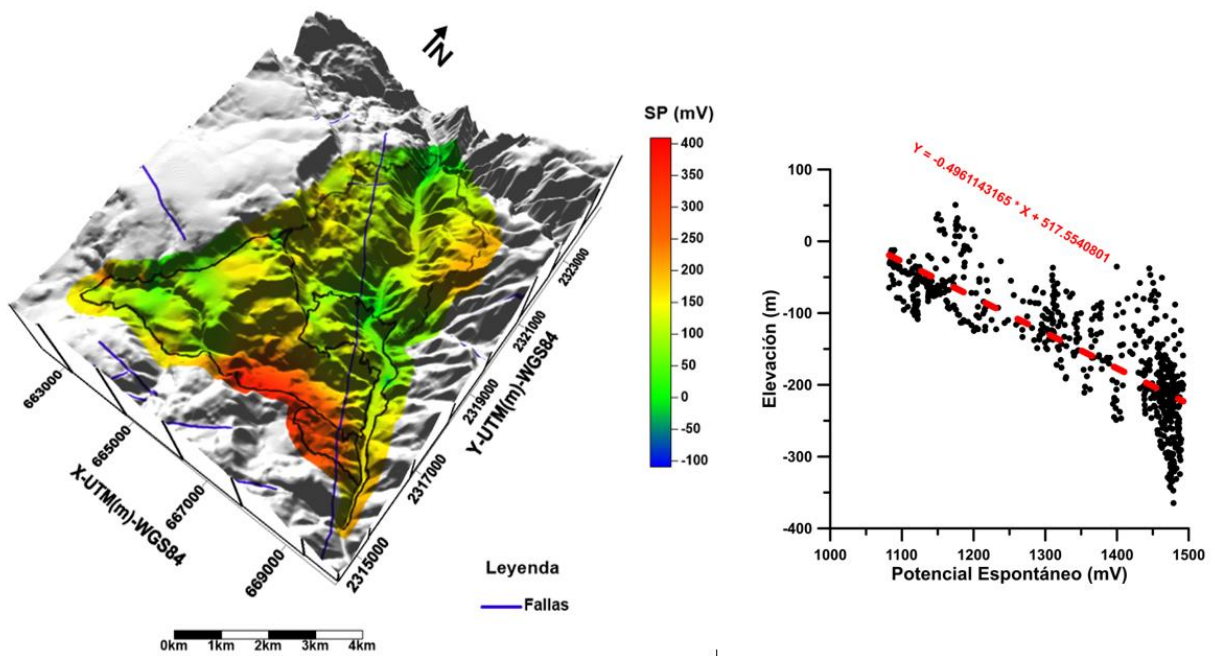


Figura 47. Derecha- Mapa de potencial espontaneo con la corrección topográfica. Izquierda- gráfica que muestra la obtención del coeficiente  $\nabla\phi/\nabla h$ . (Lermo et al. 2018).

Por consiguiente, se puede realizar una mejor apreciación del mapa obtenido sin la corrección topográfica, debido a que a pesar de que se observa la misma tendencia con los valores positivos hacia el sur de la zona de interés, los valores de SP en todo el mapa se elevan considerablemente de 200 mv hasta 400 mV, esto a causa de que el coeficiente obtenido sólo se obtuvo con la mayoría de datos de un sólo perfil, esto debido a que las mediciones a causa de la abrupta topografía no pudieron ser realizados de manera radial o paralela, causando una gran variedad de pendientes para la obtención de el coeficiente  $\nabla\phi/\nabla h$ , por tal motivo se aprecia una mejor interpretación en el mapa de SP, considerando únicamente hasta la corrección geohidrológica.

En la Figura 47 se observa el mapa de SP, donde también se reportan las manifestaciones hidrotermales que se encuentran dentro de la zona y las fallas obtenidas del SGM (Servicio Geológico Mexicano) y del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

---

---

## CAPÍTULO 5 . -ESTUDIO DE SP Y TEMPERATURA EN LOS HUMEROS, PUEBLA.

---

---

### 5.1 POTENCIAL ESPONTÁNEO

Con ayuda de la metodología de potencial espontáneo, se realizará la actualización del termalismo en el sector central del campo geotérmico Los Humeros, Puebla. Por lo tanto, esta actualización termal permitirá proporcionar el argumento para establecer las políticas de crecimiento y expansión en la infraestructura geotérmica.

En el presente estudio se realizaron 4 campañas de adquisición de datos al campo geotérmico de Los Humeros (Figura 48), las cuales se resumen en la Tabla:

*Tabla 10 Resumen de las 4 campañas realizadas en el campo Los Humeros.*

CAMPAÑAS	OBSERVACIONES
<b>1) 26-30/12/2016</b>	Se planificaron tres perfiles de manera regional, de forma que se cubriera desde La falla la Cuesta hasta la falla Las víboras. Se realizaron 932 mediciones cada 20 metros.
<b>2) 20-25/03/2017</b>	De acuerdo con la campaña anterior se realizaron perfiles más pequeños que abarcaron la Falla de los Humeros, así como el Pueblo de Los Humeros. Se realizaron 879 mediciones cada 20 metros.
<b>3) 15-18/05/2017</b> <b>4) 10-12/07/017</b>	En la 3ra campaña se elaboró un perfil que rodeó la parte este en donde se encuentran los basaltos, esto con la finalidad de delimitar el campo. En la 4a campaña se repitieron algunos puntos, para reafirmar los valores obtenidos En total se realizaron 516 mediciones cada 20 metros.

Con un total de 2,327 puntos de medición, con 20 metros de distancia entre ellas, correspondientes a 46.540 kilómetros distribuidos en varios perfiles, en forma paralela en su mayoría, con separaciones entre 200 a 350 m.

La distancia sugerida de 20 m de acuerdo con Finizola (2002, y 2004) es la distancia recomendable entre cada punto de medición para obtener una buena densidad de datos para el mapeo de las anomalías y para distinguir elementos estructurales tales como sistemas fallas, límites estructurales, etc.

En cada medición, se registran los siguientes datos: N° de punto GPS, distancia (m), resistencia (K $\Omega$ ) y SP (mV), marcando cada cambio de referencia (cambio de electrodo móvil a electrodo fijo).

Las estaciones fueron localizadas con precisión empleando un GPS y las alturas se obtuvieron con un modelo de elevaciones proporcionado por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

## Campañas realizadas en Los Humeros

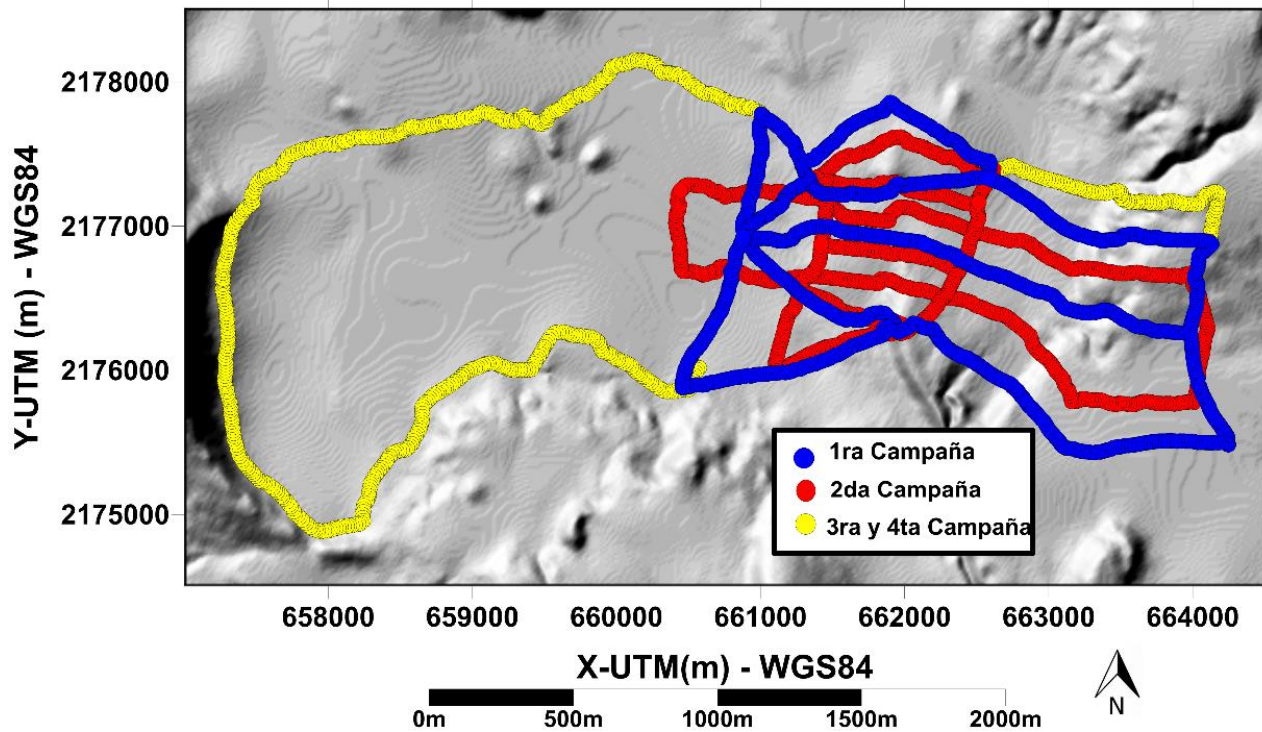


Figura 48. Puntos de medición realizados cada 20 m en las 4 campañas de campo.

Las mediciones se realizan generalmente formando bucles (perfiles cerrados o perfiles conectados en ambos extremos a otros perfiles) con el fin de evaluar y corregir la deriva sufrida durante la adquisición de los datos.

### 5.1.1.- Equipo y adquisición

- Un par de electrodos impolarizables (electrodos  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  en nuestro caso). El extremo microporoso de estos electrodos (hecho de madera de baja permeabilidad) se pone en contacto con el suelo. La diferencia de potencial eléctrico se mide entre el electrodo de referencia (colocado arbitrariamente al comienzo del perfil) y el electrodo móvil.
- Un multímetro de alta impedancia.
- Un cable de cobre (se sugieren 300 metros) para conectar los dos electrodos al multímetro.
- GPS
- Una picoleta
- Libreta de campo

- Radios de comunicación
- Un par de Plugs-in



*Figura 49. Equipo para la adquisición de datos de potencial espontáneo.*

### 5.1.2.- Adquisición de datos

Para la adquisición de los datos se siguieron las siguientes indicaciones

1. Los electrodos se deben dejar dentro de la solución de  $\text{CuSO}_4$  un día previo a realizar la adquisición.
2. Calibrar el multímetro con el apoyo de otros dos para un buen control de calidad.
3. Se realiza prueba de DC de electrodos impolarizables (electrodos  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  en nuestro caso), para disminuir la desviación de los datos y obtener una mejor calidad en estos.
4. Colocar primer electrodo de referencia preferencialmente en una zona húmeda.
5. Anclar el cable a un objeto que no permita su desplazamiento (árbol, arbusto, roca, o una mochila).
6. Desplazar electrodo móvil hasta la marca correspondiente, con una apertura de 20[m] por cada marca, hasta alcanzar 300[m], siguiendo la dirección con ayuda del GPS.
7. En cada estación, se cava un pequeño agujero ( $\sim 10$  cm de profundidad) para mejorar el contacto eléctrico entre el electrodo móvil y el suelo. Se toman las lecturas de resistencia ( $\text{K}\Omega$ ) (como control de calidad de la medición de SP), de SP (mV) y el punto GPS.



8. Una vez alcanzado los 300 m, se desconecta el electrodo base, y se enrolla el cable, aplicando la tensión necesaria para evitar que el cable quede flojo y pueda enredarse.
9. Se establece una nueva estación de referencia cada vez que se alcanza el final del cable o antes (dependiendo de las condiciones de campo).
10. Al terminar la adquisición del perfil se coloca una marca clara para identificar este punto como cierre de circuito.



*Figura 50. Adquisición de datos de campo en el campo geotérmico Los Humeros.*

### 5.1.3.- Procesamiento

Después toda la base de datos de SP se reconstruye eligiendo una estación de referencia única. Este proceso requiere dos correcciones de los datos de SP obtenidos en campo:

- ✓ **Corrección de referencia:** se realiza para unir las diferentes partes de un mismo perfil SP, corrigiendo los diversos cambios de electrodo de referencia. De hecho, cada vez que la diferencia de potencial eléctrico se mide a partir de una nueva referencia, las mediciones empiezan de nuevo desde 0 mV. Cada sección del perfil recolectada con una sola referencia debe desplazarse al final de la sección anterior. Sólo la primera sección permanecerá sin cambios, los otros serán desplazados sección por sección en la dirección en la que se adquirieron las mediciones (Figura 51).



Cuando un conjunto de datos se compone de varios perfiles (en áreas cubiertas para construir un mapa SP), a cada perfil se le debe aplicar independientemente la corrección de referencia.

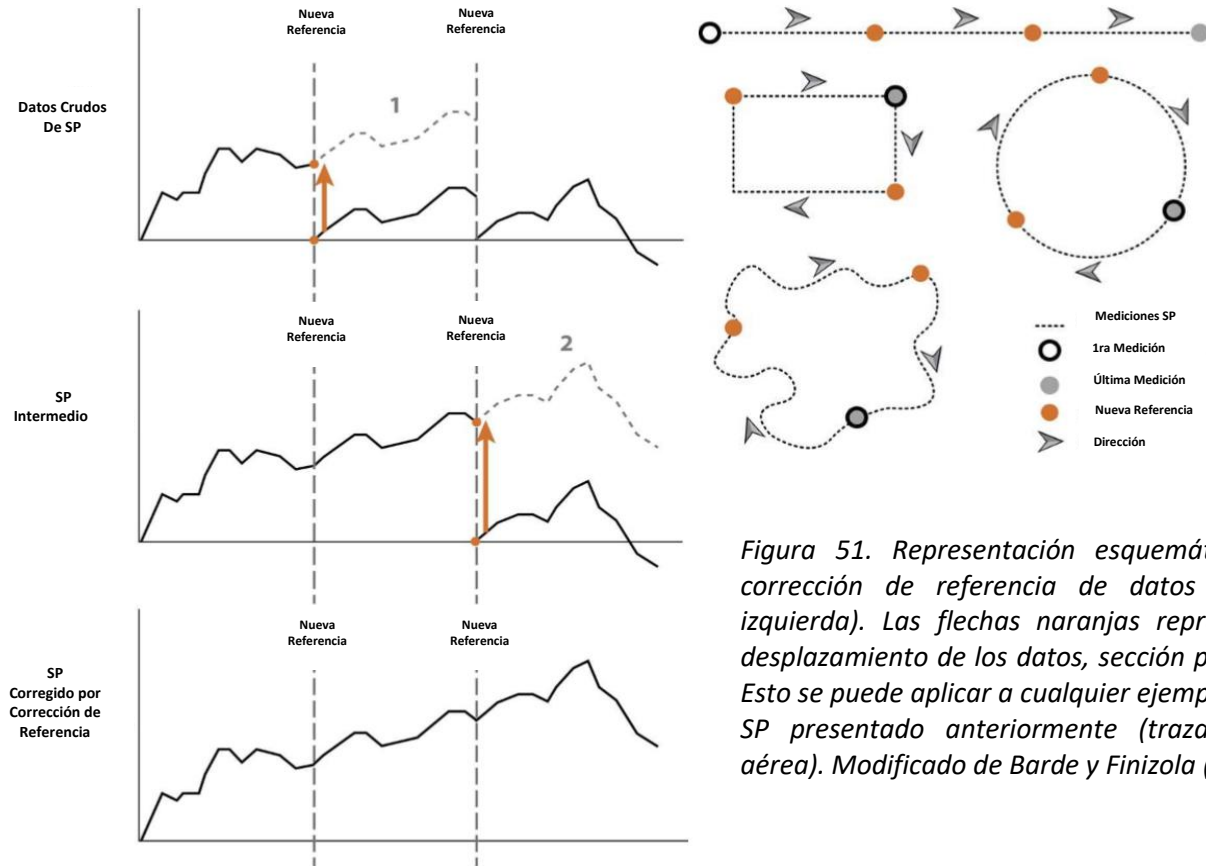


Figura 51. Representación esquemática de la corrección de referencia de datos SP (a la izquierda). Las flechas naranjas representan el desplazamiento de los datos, sección por sección. Esto se puede aplicar a cualquier ejemplo de perfil SP presentado anteriormente (traza en vista aérea). Modificado de Barde y Finizola (2013).

La ecuación de corrección por referencia es:

$$SP_r = SP_{CAMPO} + SP_{CR}$$

Donde:

$SP_r$  = es el valor de SP corregido por referencia

$SP_{CAMPO}$  = es el valor SP medido en campo

$SP_{CR}$  = es el valor SP corregido por cada cambio de referencia.

- ✓ **Corrección de cierre (o corrección de bucle):** Se considera que la deriva aumenta regularmente desde el primer punto hasta el último: a lo largo del período de tiempo de la adquisición, la deriva se acumula. Esta deriva se considera parasitaria y debe ser corregida.

La ecuación de corrección por cierre es:

$$SP_C = SP_r - \left(\frac{D}{N}\right) * n$$

Donde:

$SP_C$  es el valor de SP corregido por cierre

$SP_r$  es el valor de SP corregido por referencia

$D$  es la deriva (diferencia de SP en donde se va a realizar el cierre)

$N$  es el número total de datos a corregirse

$n$  es el lugar del punto de datos a corregirse

Después de la corrección de referencia, cada perfil tiene su referencia única a 0 mV. Para unir todos los perfiles, debemos elegir un primer bucle que será el perfil cerrado de referencia para los próximos pasos de la corrección de cierre. Los otros perfiles se utilizarán para formar varios bucles, unidos paso a paso a los datos ya corregidos (Figura 52).

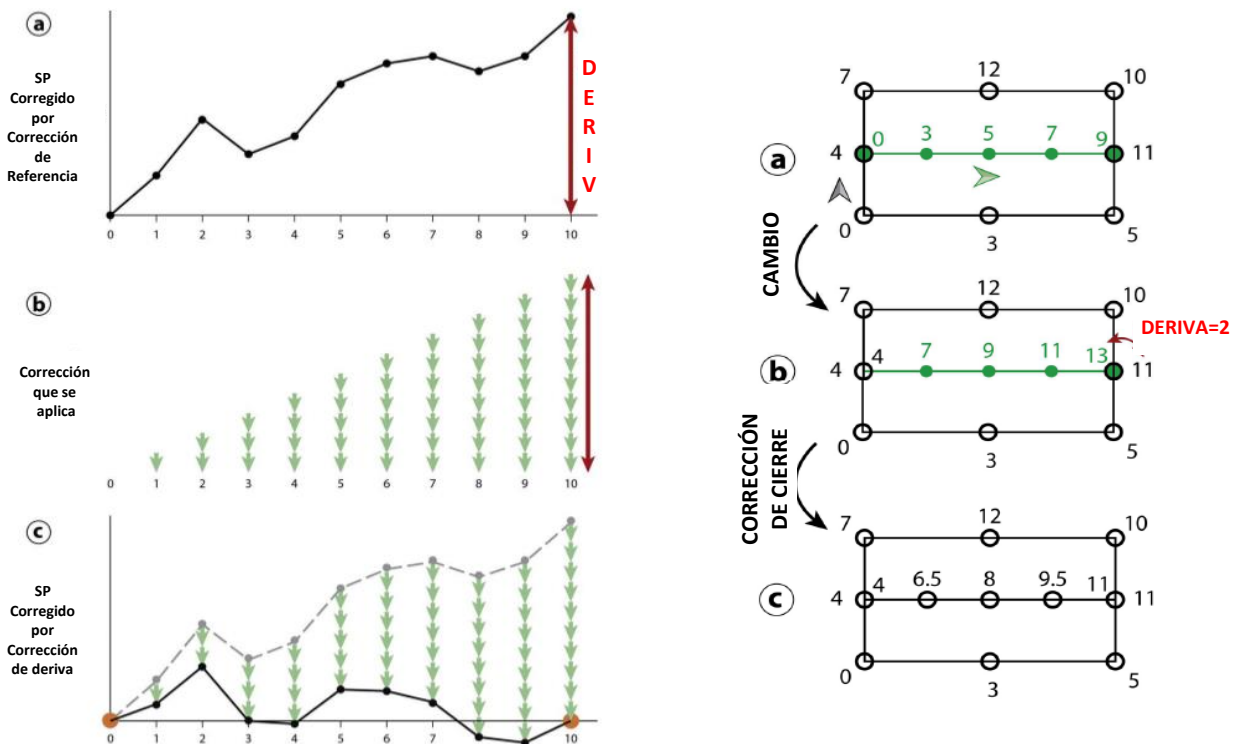


Figura 52. Izquierda- Representación esquemática de la corrección de cierre de datos SP en un perfil cerrado compuesto de 10 puntos de datos. El punto 0 y el punto 10 son geográficamente iguales. Derecha- Corrección por cierre. En la imagen vemos los factores de deriva que afectan directamente los valores de SP. Si los perfiles de SP cierran en algún punto, éste debería ser el mismo, sin embargo, esto no es así por lo que hay que corregir por cierre. Modificado de Barde y Finizola (2013).

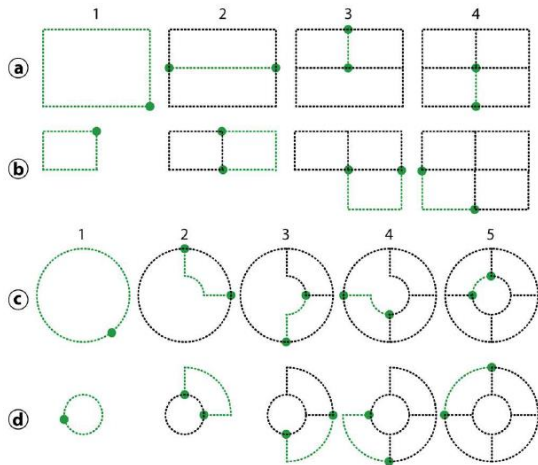


Figura 53. Ejemplos de redes de datos corregido por cierre. a y b muestran dos alternativas de la corrección de cierre de una cuadrícula simple. c y d muestran dos alternativas de corrección de cierre de una red de tipo volcánico (radial). En los pasos sucesivos, las líneas punteadas en negro son los datos ya corregidos. Las líneas punteadas verdes son los lazos conectados paso a paso a los datos ya corregidos. Modificado de Barde y Finizola (2013).

- ✓ **Corrección geohidrológica:** Por convención, el valor atribuido a la fuente es 0 mV y se considera una superficie equipotencial de referencia (Barde and Finizola, 2013). Este valor es tomado en cualquier fuente geohidrológica que se encuentre en la zona de interés: ríos, manantiales, lagunas etc., si la zona no cuenta con esta fuente geohidrológica se considera el punto más alejado de la zona de interés (Figura 54). En el caso del CGLH no se contó con una fuente geohidrológica, por lo que se consideró el valor de medición del punto 1 el cual se encuentra en la parte suroeste con un valor de 109.094mV, por lo tanto, se restará este valor a todas las mediciones realizadas.

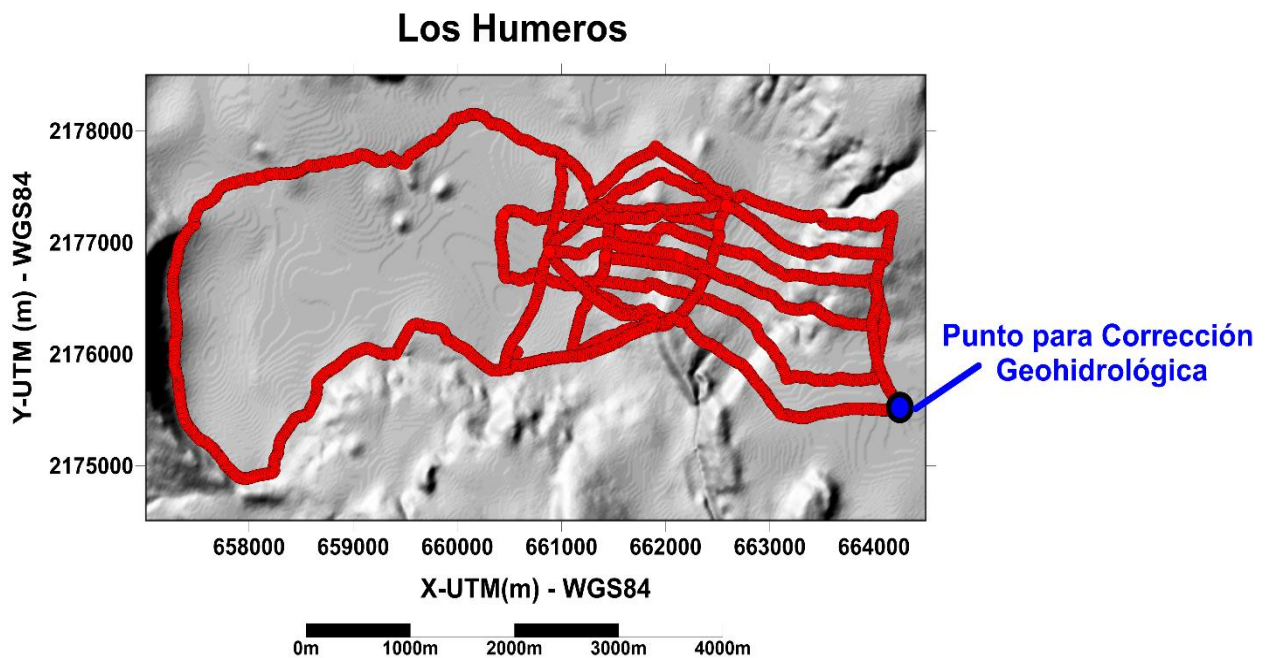


Figura 54. Puntos de medición de SP, donde se muestra el punto seleccionado para la corrección geohidrológica.

Es importante destacar que, de acuerdo con los perfiles realizados, se tienen varias alternativas para el procesamiento de las correcciones antes mencionadas, por lo cual se consideraron los siguientes criterios para dichas correcciones:

- ❖ Para seleccionar el perfil fijo, se considera aquel perfil más interesante en el cual se han observado cambios anómalos significativos, ya que de acuerdo con este perfil las anomalías pueden resaltarse más o minimizarse.
  - ❖ Asimismo, para la corrección de cierre, consideramos: 1) la dirección que lleva el perfil, 2) comenzar con los cierres más grandes, hasta culminar con los cierres pequeños restantes, 3) una apropiada distribución de los cierres, para una mejor distribución equitativa de la deriva en los puntos de medidas realizados.
  - ❖ Una vez teniendo todos los cierres, para la selección del punto para la corrección geohidrológica, se considera un punto fuera de la zona de interés y que no se encuentra afectada por una zona hidrotermal (afectada por un aumento de temperatura) ya que esto podría ocasionar eliminar anomalías significativas para la interpretación del mapa de SP.
- ✓ **Corrección topográfica:** es la corrección debido a los efectos de altitud en el terreno ya que el potencial espontáneo tiende a valores negativos en las zonas más altas.

No obstante, para poder realizar esta corrección se requiere la altitud de cada punto de medición, de igual manera, se considera la parte de mayor elevación de nuestra zona de interés, utilizando varios perfiles, de manera que se obtenga la relación SP vs Elevación, que nos permite obtener el coeficiente mV/m mediante una regresión lineal.

La ecuación de corrección topográfica es:

$$C_T = (E - E_{min}) * m$$

Donde:

$C_T$ = el valor de la corrección topográfica

$E$ = Valor de la elevación en cada punto de medición

$E_{min}$ = Valor de la elevación mínima del perfil seleccionado

$m$ = Valor del Coeficiente mV/m

#### 5.1.4.- Resultados

Como primer resultado, se obtiene un mapa de potencial espontáneo que se muestra en la Figura 55 en el cual se observan anomalías positivas de hasta +165 mV, estos valores se encuentran en las zonas norte y oeste del campo, así mismo se encuentran sobre la Falla los Humeros. También se observan anomalías negativas de hasta -200 mV, principalmente

en la parte este (parte de mayor elevación) del campo, esto debido a como se ha mencionado antes es a causa del efecto topográfico, y la otra anomalía se observa en la zona donde se encuentra el pueblo de Los Humeros y siguiendo una dirección hacia el SW con valores de  $-65$  mV aproximadamente. De la misma manera se observa la asociación de los pozos suspendidos, con valores negativos a causa del fenómeno de óxido-reducción.

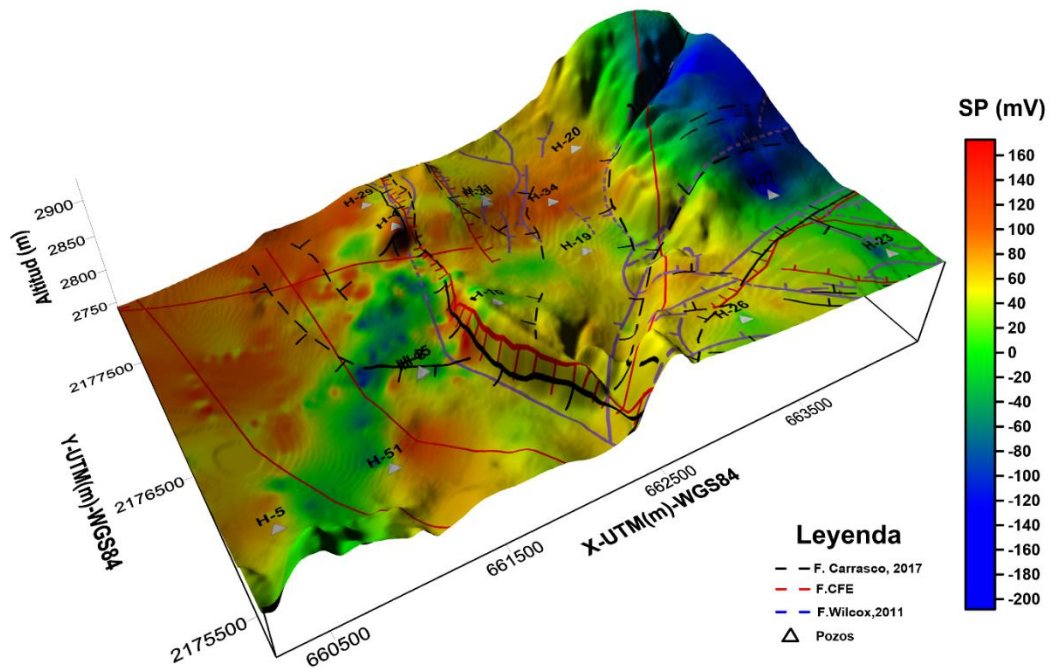


Figura 55. Mapa de potencial espontáneo, modelos estructurales y ubicaciones de los pozos.

Con relación a lo mencionado anteriormente, y debido a que la topografía que se encuentra en el CGLH es muy variable, se realizó la corrección topográfica por secciones de acuerdo con los cambios más significativos, esto con la finalidad de no obtener una corrección general muy abrupta que afecte las anomalías que se presentan en el mapa de SP.

De este modo se seleccionaron 4 secciones, dividiendo los datos obtenidos en cuadrantes, en los cuales se obtuvieron los siguientes valores: zona NE con un coeficiente de  $-0.578$  mV/m, zona NW con un coeficiente de  $-1.357$  mV/m, zona SE con un valor de  $-0.190$  mV/m y la zona SW con un coeficiente de  $-0.061$  mV/m, los cuales se muestran en la Figura 56.

Para el procesamiento de los datos se utiliza el programa de Excel y Surfer 14 (un contorneado y mapa en 3D de la superficie) para interpolar, construir mapas y gráficos con los resultados. En un gráfico, los datos de SP se representan como una función de la distancia. La interpolación utilizada en este trabajo fue mediante el método de Kriging.

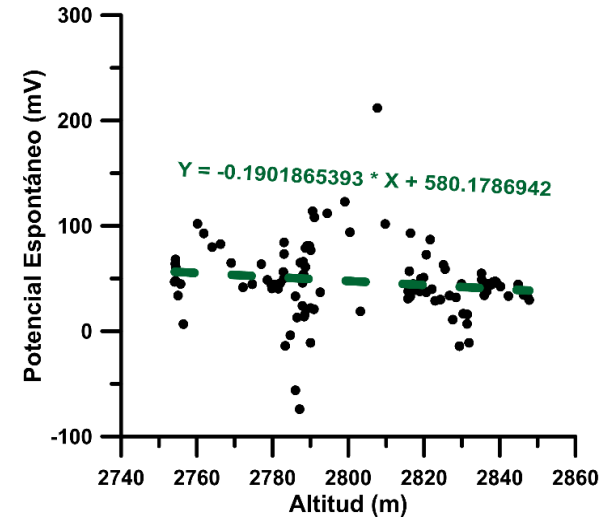
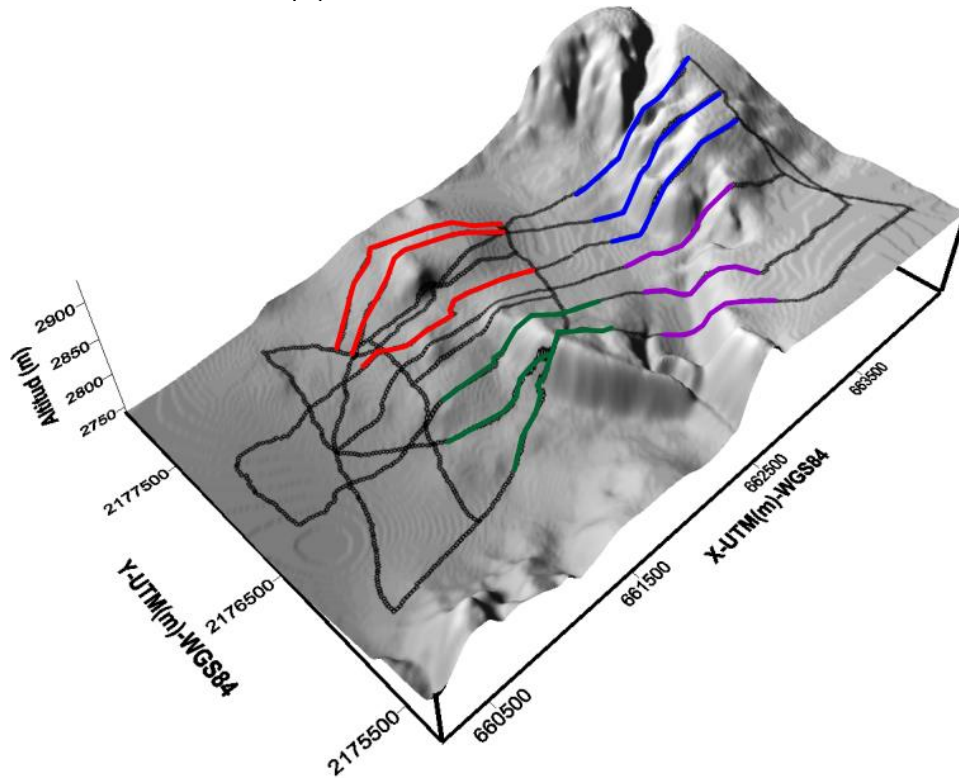
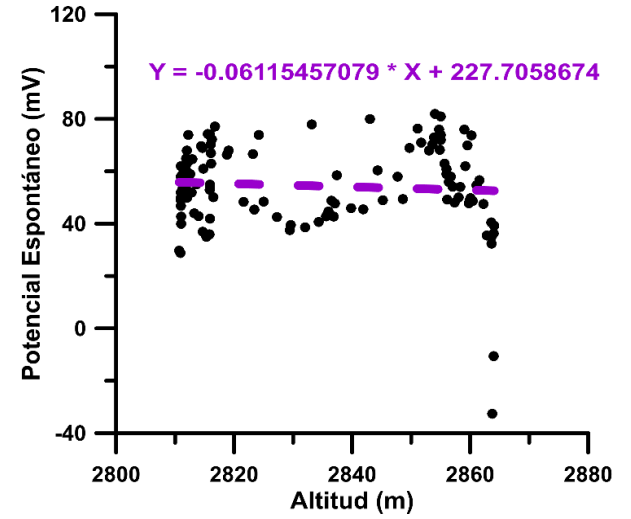
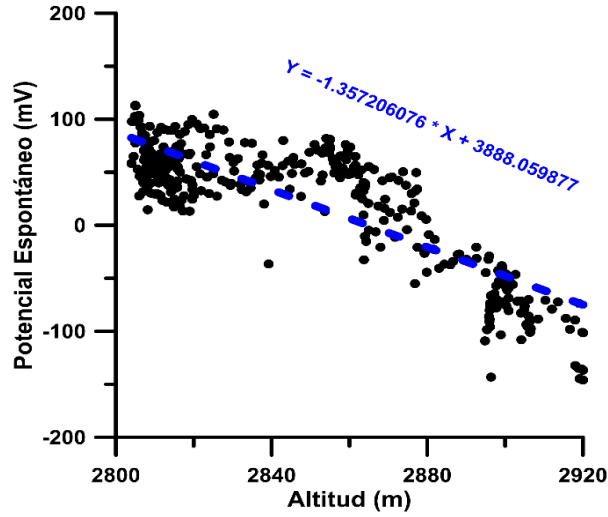
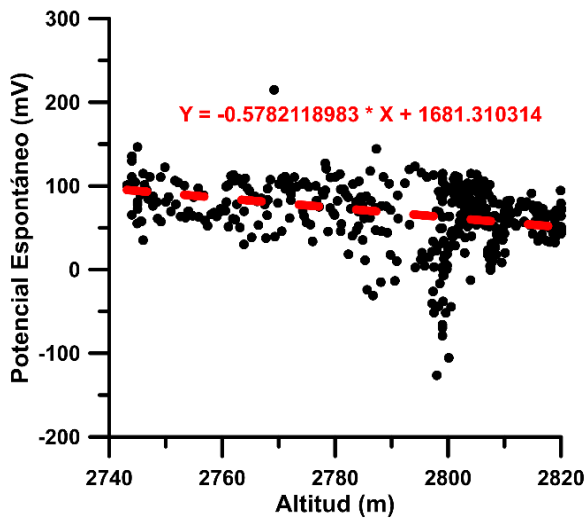


Figura 56. Graficas de los Coeficientes (mV/m) obtenidos para el campo geotérmico Los Humeros, así como las secciones utilizadas para la corrección topográfica.



Una vez realizada la corrección topográfica, se puede observar en la Figura 57 que los valores que afectaban la parte más alta de nuestra zona de estudio disminuyen, permitiendo visualizar mejor cómo los pozos afectan a esta metodología, del mismo modo como en el análisis anterior se observa un aumento en los valores de SP sobre la Falla Los Humeros, así como en la parte norte del campo y las zona de anomalía negativa por debajo del pueblo.

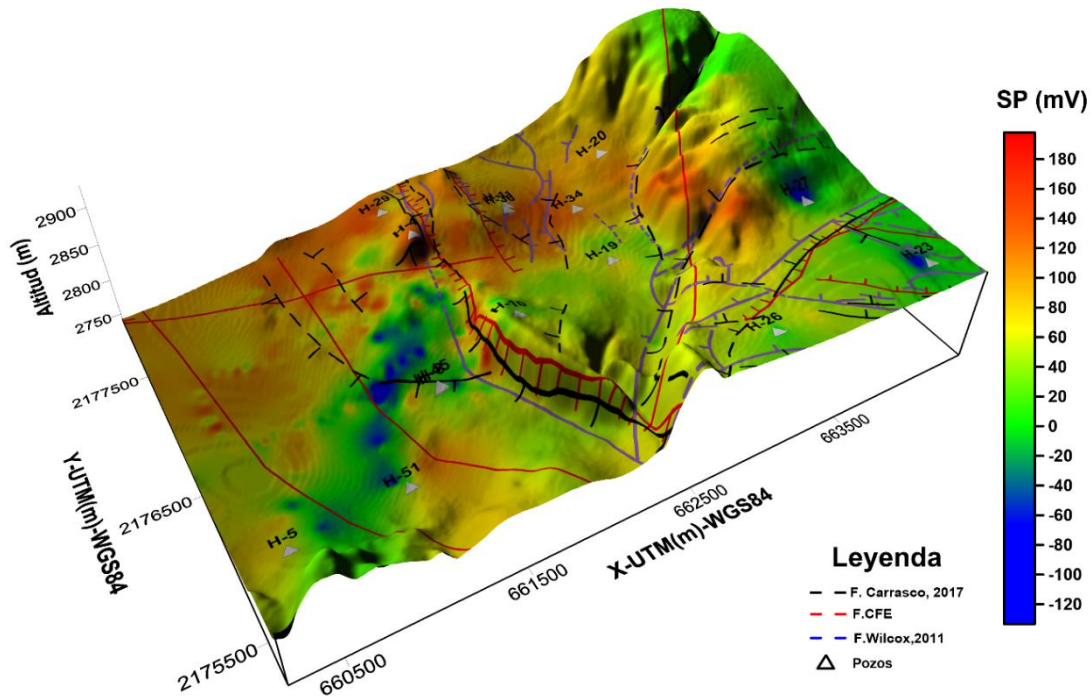


Figura 57. Mapa de potencial espontáneo con corrección topográfica, modelos estructurales y ubicación de los pozos.

## 5.2 TEMPERATURA

### 5.2.1.- Equipo y Adquisición

Para poder medir la temperatura se utilizó el siguiente equipo:

- Una barreta
- 10 sensores para medir la temperatura
- Un mazo
- Cinta adhesiva
- Un multímetro
- GPS
- Una libreta de campo.



Figura 58. Calibración de los sensores de temperatura.

Se realizó una prueba con el fin de calibrar los sensores (a un costado de la Unidad 7 donde el sistema hidrotermal se manifiesta en la superficie) para la medida de temperatura. En la prueba se colocaron 10 sensores a una distancia de 1m cada uno, tomando su medida cada 10 min, para poder estimar el tiempo adecuado para una medida confiable de la temperatura, donde se determinó un tiempo de 20min (Figura 58).

Para la Adquisición de datos:

Para realizar la medición de la temperatura se siguieron los siguientes pasos (Figura 5.12):

Con la ayuda de la barreta y un mazo se realiza un hoyo de 30 cm aproximadamente de profundidad.

- ❖ Una vez enterrada la barreta, se retira para introducir el sensor.
- ❖ Se deja el sensor por aproximadamente 20 min.
- ❖ Con una cinta métrica se mide una distancia de 40m para colocar el siguiente sensor.
- ❖ Con un multímetro se toma la medida de la temperatura en °C, así como el punto GPS



Figura 59. Medición de temperatura en el campo geotérmico de Los Humeros.

### 5.2.2.- Resultados

Los resultados de temperatura nos muestran que existen dos zonas principales. En la parte norte se observan temperaturas mayores a 40 °C, en el área donde se ubican las fallas Los Humeros, Los Conejos y Loma Ahumada. Al sur del pueblo Los Humeros sobre la falla de Los Humeros se observan temperaturas mayores a los 40 °C, al igual que sobre la falla La Antigua al SW del poblado. En la parte centro se observa claramente una disminución de la temperatura, entre 25 y 35 °C, que se asocia a la falla cuya orientación es NW-SE propuesta por CFE, que de acuerdo con los

resultados obtenidos se ha considerado como una zona de transición donde no hay indicios de ascenso del flujo de calor.

### **Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla**

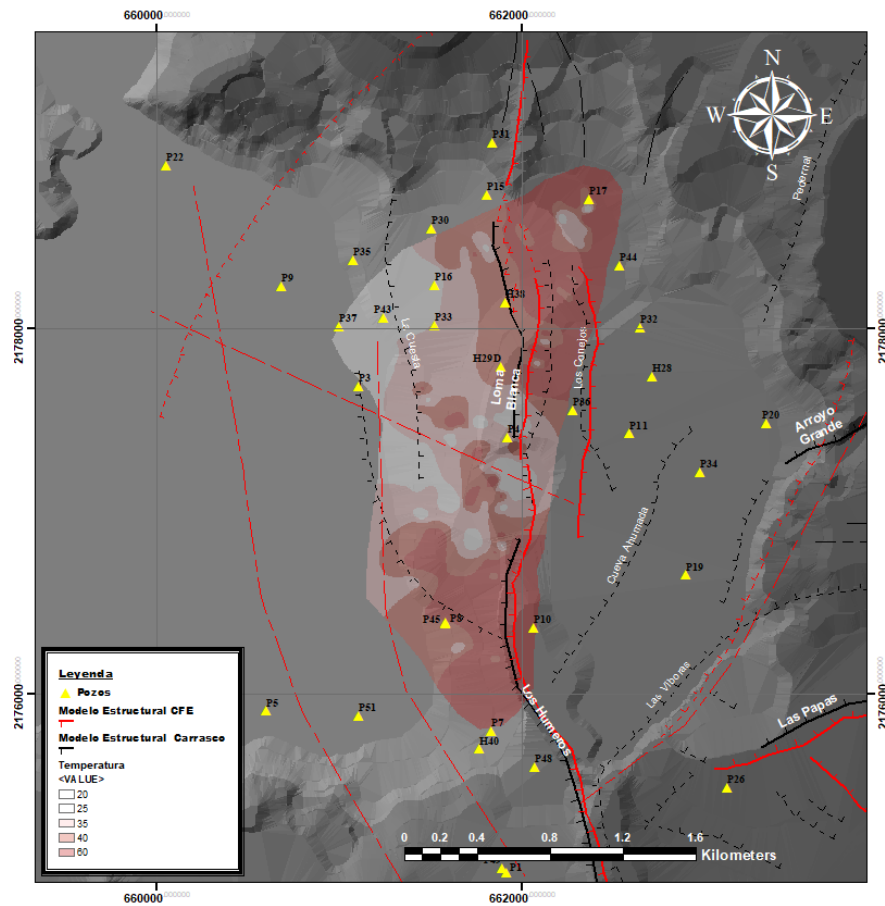


Figura 60. Se presentan los resultados obtenidos de la medición de temperatura alrededor del pueblo de Los Humeros observando valores altos en la temperatura principalmente en la región norte y sur, identificando una zona intermedia de baja temperatura denominada de transición.



## CAPÍTULO 6 . DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL GEOTÉRMICO DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS.

Los resultados de la medición de potencial espontáneo (SP), del análisis de la sismicidad local, la inyección de los pozos y las mediciones de temperatura en el campo permiten realizar un modelo conceptual del área (Figura 61). Los valores más altos de potencial espontáneo (de hasta 200 mV) se ubican principalmente en la zona norte, este y sobre la Falla Los Humeros, generalmente, estos valores de potencial espontáneo están relacionados con zonas de alta permeabilidad, de acumulación de agua y sistemas hidrotermales, así mismo, se observa una anomalía negativa (hasta -100 mV) sobre el pueblo Los Humeros y con una continuidad hacia la parte SW.

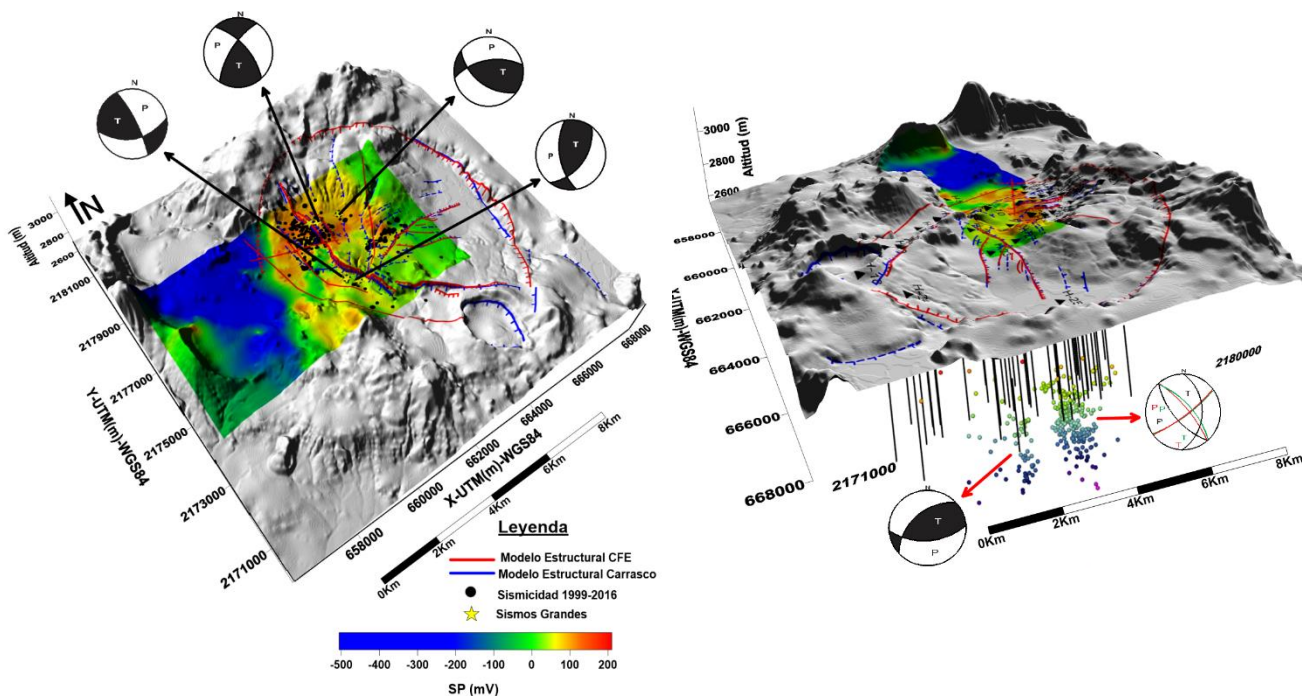


Figura 61. Modelo 3D del campo geotérmico Los Humeros, que muestra los resultados obtenidos en este trabajo: la sismicidad local, los sismos más significativos con sus mecanismos focales respectivos, mecanismos focales compuestos, elementos estructurales y el mapa de potencial espontáneo.

La anomalía que se encuentra en el pueblo se correlaciona con los estudios realizados por Arzate et al. 2018, quienes delimitaron un cuerpo con resistencia baja, que posiblemente afecte esta zona del campo, provocando zonas de debilidad alrededor del pueblo las cuales funcionan como rutas permeables, aptas como objetivos de interés geotérmico, además concuerdan con los mecanismos focales obtenidos de los sismos del 21 de enero del 2002 y del 8 de febrero del 2016 en la parte sur de la Falla Los Humeros, representados por fallas inversas, sin embargo, la falla Los Humeros se ha caracterizado por una falla normal, por lo cual, estos sismos se asocian a las fallas de resurgencia propuestas por Norini (artículo en elaboración), y las que fueron representadas en los

perfiles realizados a profundidad (Figura 25); Por lo tanto, el potencial espontáneo delimita una zona de interés geotérmico que se correlaciona con la información ya obtenida.

La sismicidad está localizada a una profundidad de entre 0.5 y 5 km (Figura 62). Definiendo dos zonas de mayor actividad, la principal en la parte NW en donde se encuentran la mayoría de los pozos productores e inyectores, esta zona no cuenta con un mecanismo focal definido, esto a causa de la inyección y producción de los pozos, que da origen a una sismicidad inducida, produciendo un nivel de fracturamiento mayor, en concordancia con la anomalía de SP hacia esta zona se caracteriza por valores altos. En la zona este, existe menor sismicidad, y está asociada a los sismos mayores que han causado daños en la infraestructura del campo y a la inyección de pozos, los valores de SP en esta zona, también son considerables, sin embargo, se sugiere mayor estudio, el mecanismo focal compuesto realizado nos muestra un fallamiento de tipo inverso.

De los estudios previos mencionados en el Capítulo 1 en conjunto con la sismicidad, temperatura y potencial espontáneo se presenta el siguiente modelo conceptual geotérmico del campo:

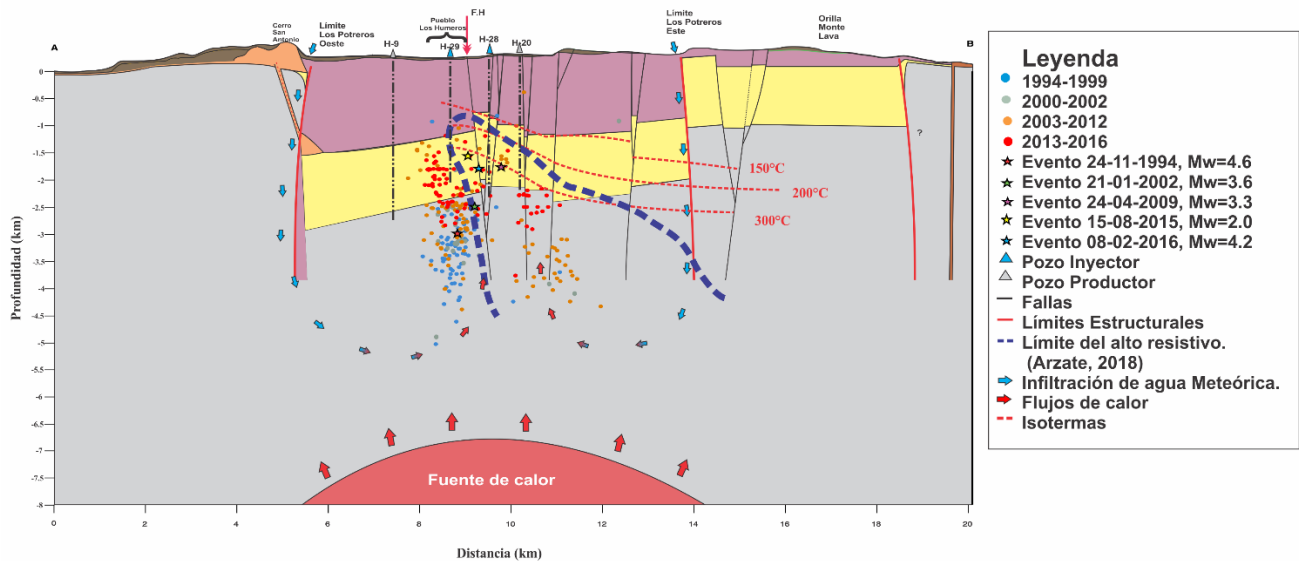
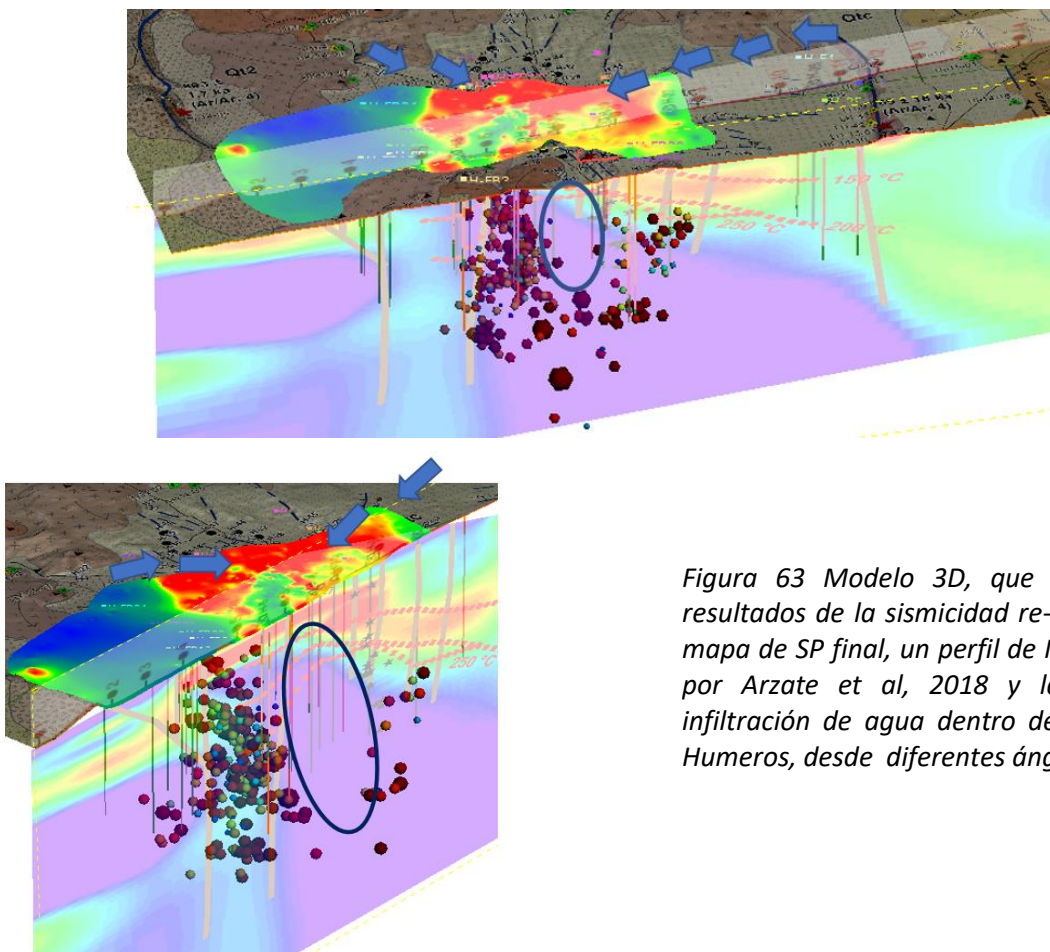


Figura. 62 Modelo 2D con dirección NW-SE, que atraviesa por la zona central del campo, así como con las principales estructuras dentro del campo, zonas de infiltración de agua meteórica, la sismicidad (1994-2016), isotermas Arellano (2003), ubicación del pueblo los Humeros, y límite del alto resistivo obtenido por Arzate et al. (2018).

En este perfil se puede observar una aproximación de cómo se comporta el sistema hidrotermal del campo, este modelo se realizó utilizando la información obtenida en este trabajo en conjunto con información de estudios previos, en nuestros resultados se puede ver principalmente en el desarrollo de la sismicidad, como esta no se presenta en la zona centro (El pueblo Los Humeros), con el paso del tiempo la sismicidad ha migrado de la zona norte del campo a la zona noroeste, además de presentar una menor profundidad; en el potencial espontáneo se delimitaron zonas de alta permeabilidad (anomalías positivas) así como las zonas donde existe flujos de calor (Falla Los Humeros) y anomalías negativas, algunas asociadas al efecto químico de óxido-reducción de los pozos suspendidos, y otra justo en la zona donde se encuentra en el pueblo, debido a estos

resultados se compararon con estudios de gravimetría (Camposanto y Arredondo-Fragoso, 1991) en los cuales mediante la segunda derivada, se delimitan los límites de las rocas calcáreas, principalmente del colapso de la Caldera Los potreros, en la Figura 9 se puede observar que en la zona este a la altura del campo existe un alto gravimétrico, que concuerda con nuestra zona central; estudios magnetoteléuricos (Arzate et al. 2018) en los que se muestra un alto resistivo por debajo de la zona central; zonas de atenuación (Ramos (2016)), las cuales se encuentran en la zonas de mayor potencial geotérmico, las cuales no se encuentran en esta zona central (Pueblo Los Humeros); mapa de amplificación de cociente espectral H/V (Torres (2017)) la zona este está asociado a su zona A con frecuencia de 0.35HZ corroborando que es una zona sin potencial geotérmico, por esta razón se realizaron dos modelo 3D; uno con los resultados de SP, la sismicidad, el Perfil 1 de MT de Arzate et al. (2018) y las zonas de recarga (Antayhua 2007) en el cual se puede observar una zona en la que no hay sismicidad y presenta el alto resistivo (Figura 63); y el segundo con ayuda de la información geológica obtenida de los pozos, las zonas de atenuación y el mapa de amplificación de cociente espectral a .035Hz, en este mapa se muestra que en la zona del pueblo podría no forma parte del colapso de la Caldera los Potreros, además de presentar una zona de alta amplitud (zona A , Torres 2017), esto se correlaciona con el mapa de la segunda derivada de Campos-Enríquez y Arredondo-Fragoso (1991) (Figura 64) en el cual esta zona si presenta la roca calcárea más superficialmente a comparación de las zonas de colapso que presenta anomalías gravimetrías bajas.



*Figura 63 Modelo 3D, que presenta los resultados de la sismicidad re-localizada, el mapa de SP final, un perfil de MT, realizado por Arzate et al, 2018 y las zonas de infiltración de agua dentro del campo Los Humeros, desde diferentes ángulos.*



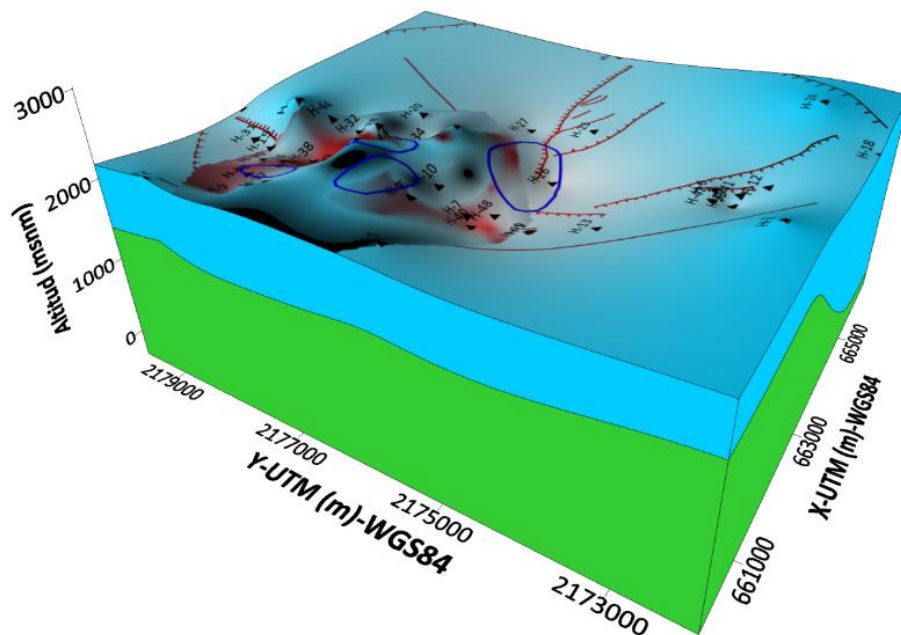
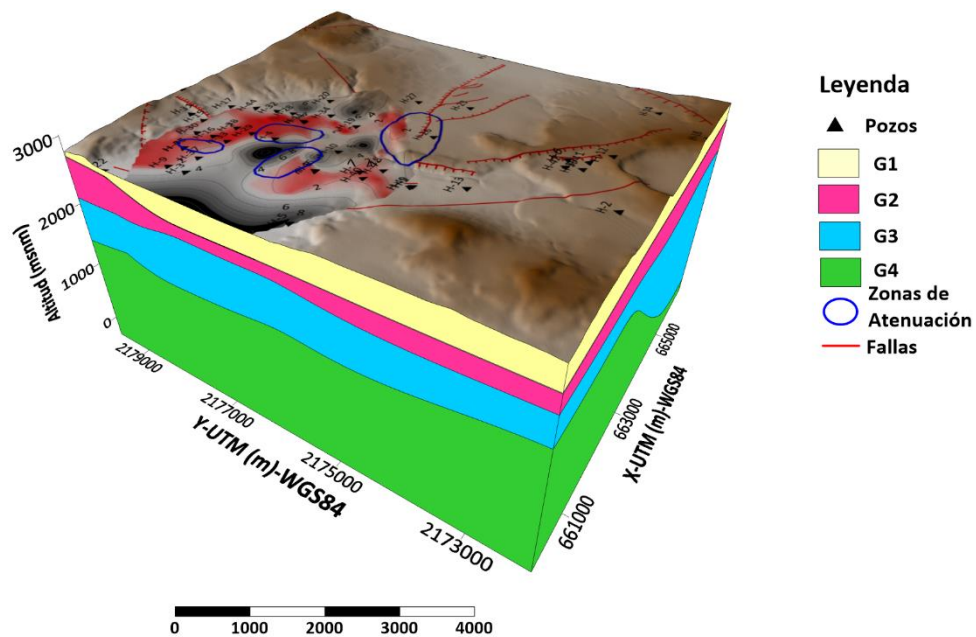


Figura 64 Modelo 3D de la interpolación geológica basada en la información de los pozos, mapa de espectros de amplitud, zonas de atenuación y sistema de fallas de CFE, donde se observa la parte anómala del pueblo de los Humeros.

De acuerdo a estos resultados, en conjunto con la inversión del espectro de amplitud a frecuencia de 0.35Hz de dos puntos de medida (19 y 21) sobre el pueblo Los Humeros, realizadas por Torres (2017), se estimó que el basamento calcáreo podría estar a una profundidad aproximadamente de 1300-1500 m.

---

---

## CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

---

---

- El análisis de la relación de los eventos sísmicos locales nos confirma que la mayoría de esta sismicidad es inducida, se localiza sobre las fallas que se encuentran activas tanto dentro como fuera del campo (Figura 24).
- En este trabajo se intentó caracterizar a estas dos zonas conocidas, de acuerdo a su origen, que a su vez están relacionados con la interacción de la producción y/o inyección de pozos y el arreglo geológico-estructural del campo geotérmico; esto caracteriza a los dos tipos de sismos en: **los inducidos y los tectónicos inducidos**. Los primeros ocurren en zonas cercanas a los pozos inyectoros, donde se agrupan en zonas definidas y probablemente envolviendo al cuerpo anómalo que genera calor; mientras que el segundo, los tectónicos inducidos, están asociados a los sistemas de fallas activos, que en la mayoría de casos son disparados precisamente por la influencia de los pozos inyectoros.
- Para la segunda zona, ubicada hacia el sureste del campo y localizada sobre el sistema de Fallas Las Víboras, y activada probablemente por el pozo inyector H28 el 24 de julio de 2009 (M3.3, y presenta un SP con valores de 120-160mV, lo que nos indica una zona permeable, asociada a la Falla Las Víboras.
- En cuanto al pueblo de Los Humeros se observan anomalías negativas de SP, y no se muestra sismicidad por debajo del sistema NE-SW del modelo de CFE, hasta el 2016 en la parte oeste del mismo sobre la Falla la Cuesta, por esta razón y con apoyo de análisis de la temperatura, mapa de cociente espectral (Torres, 2017), atenuación sísmica (Ramos 2016) y MT que muestra un cuerpo altamente resistivo por debajo del pueblo de los Humeros (Arzate et al. 2018), siendo este un límite hacia el sur de la zona productiva del norte. Este alto resistivo puede ser el cuerpo sedimentario con metamorfismo de bajo grado (caliza) que se quedó durante el colapso en la caldera Los potreros, o que no fue parte de este de acuerdo con los estudios realizados por Campos-Enríquez y Arredondo-Fragoso (1991 y que se observa en los modelos realizados.
- Con ayuda de los cocientes espectrales realizados por Torres (2017), en la zona denominada Zona A de amplitud total con una frecuencia de 0.35Hz, se realizó la inversión de los de los puntos (19 y 21) que se encuentran en esta zona anómala del pueblo de los Humeros, con la que se determinó una profundidad aproximada de las rocas calcáreas de esta zona, obteniendo profundidades de 1300-1500m.
- La distribución de la sismicidad en superficie y en profundidad, sugiere un intenso fracturamiento y/o microfracturamiento entre los 1.8 y 5 km de profundidad, debido a los cambios de presión, temperatura y composición química entre fluidos inyectados y/o reinyectados desde la superficie hacia los yacimientos geotérmicos y su posterior explotación del vapor de agua.
- Se caracteriza la Falla de los Humeros, donde se observa que no existe una continuidad de la Falla hacia el norte del Campo con base en los valores del SP y temperatura, así mismo se observa un aumento en la temperatura(40-45°C) y anomalías positivas de SP (240-280 mV) en la parte sur de la Falla los Humeros, por lo cual la asociamos a la presencia de ascenso del flujo de calor, así mismo se observa las variaciones de anomalías negativas de SP debido a zonas de infiltración de agua, así como a la influencia en los procesos de óxido-reducción de los pozos dentro del campo.

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

---

- ADLER, P., LE MOUËL, J. L., AND ZLOTNICKI, J.: 1999, 'ELECTROKINETIC AND MAGNETIC FIELDS GENERATED BY FLOW THROUGH A FRACTURE ZONE: A SENSITIVITY STUDY FOR LA FOURNAISE VOLCANO', *GEOPHYS. RES. LETT.* 26, 795.
- AHMED, M.: 1964, 'A LABORATORY STUDY OF STREAMING POTENTIALS', *GEOPHYS. PROSP.* 12, 49.
- AKE, J., MAHRER, M., O'CONNELL, D., AND BLOCK, L. (2005). DEEP-INJECTION AND CLOSELY MONITORED INDUCED SEISMICITY AT PARADOX VALLEY, COLORADO. *BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA.* VOL.95, Nº 2, PP. 664-683.
- ANDERSON, L. A. AND JOHNSON, R. G.: 1976, 'APPLICATION OF THE SELF-POTENTIAL METHOD TO GEOTHERMAL EXPLORATION IN LONG VALLEY, CALIFORNIA', *J. GEOPHYS. RES.* 81, 1527.
- ANGULO J, (2018) ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD Y EL SISTEMA HIDROTÉRMICO DE LA MALINCHE, TLAXCALA, UNAM, TESIS DE MAESTRÍA.
- ANTAYHUA Y. 2007. SISMICIDAD EN EL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HÚMEROS-PUEBLA (1997-2004), SU RELACIÓN CON LOS POZOS Y LA TECTÓNICA LOCAL. UNAM. TESIS DE MAESTRÍA.
- ARELLANO, M., GARCÍA, A, BARRAGÁN M.R., IZQUIERDO, G., ARAGÓN, A., Y PIZANO, ARTURO (2000). DISTRIBUCIÓN INICIAL DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS. *BOLETÍN INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS-COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD.* 450 P.
- ARELLANO, V. M., GARCÍA, A., BARRAGÁN, R. M., IZQUIERDO, G., ARAGÓN, A., Y NIEVA D., (2003). AN UPDATED CONCEPTUAL MODEL OF THE LOS HUMEROS GEOTHERMAL RESERVOIR (MÉXICO). *JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH* 124, 67 – 88.
- ARZATE, J, CORBO, F, ET AL. (2018). THE LOS HUMEROS (MÉXICO) GEOTHERMAL FIELD MODEL DEDUCED FROM NEW GEOPHYSICAL AND GEOLOGICAL DATA. *GEOTHERMICS* 71,200-211.
- AUBERT, M., ANTRAYGUES, P., AND SOLERS, E.: 1993, 'INTERPRÉTATION DES MESURES DE POLARISATION SPONTANÉE (PS) EN HYDROLOGÉOLOGIE DES TERRAINS VOLCANIQUES: HYPOTHÈSES D'ÉCOULEMENTS PRÉFÉRENTIELS SUR LE FLANC SUD DU PITON DE LA FOURNAISE (ILE DE LA RÉUNION)', *BULL. SOC. GEOL. FR.* 1, 17.
- AUBERT, M., DANA I.N., GOURGAUD, A., (2000). INTERNAL STRUCTURE OF THE MERAPI SUMMIT FROM SELF-POTENTIAL MEASUREMENTS. *J. VOLCANOL. GEOTHERM. RES.* 100, 337-343.
- BANWELL, C. J.: 1970, 'GEOPHYSICAL TECHNIQUES IN GEOTHERMAL EXPLORATION, U.N. SYMP. ON THE DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF GEOTHERMAL RESOURCES, PISA', *PROCEEDINGS (GEOTHERMICS, SPEC. ISS.2)* 1, 32.
- BIRCH, F. S.: 1993, 'TESTING FOURNIER'S METHOD FOR FINDING WATER TABLE FROM SELF-POTENTIAL', *GROUND WATER* 31, 50
- BRUNE, J., (1970). TECTONIC STRESS AND THE SPECTRA OF SEISMIC SHEAR WAVES FROM EARTHQUAKES. *GEOPHYS. RES.* 75: 4997-5009.
- CAMPOS, E Y GARDUÑO, V., (1987). THE SHALLOW STRUCTURE OF LOS HUMEROS AND LAS DERRUMBADAS GEOTHERMAL FIELDS, MEXICO. *GEOTHERMICS* 16, No. 5/6.
- CAMPOS E., ARREDONDO J.J. (1992). GRAVITY STUDY OF LOS HUMEROS CALDERA COMPLEX, MEXICO: STRUCTURE AND ASSOCIATED GEOTHERMAL SYSTEM. *J. VOLCANOL. GEOTHERM. RES.*, 49: 69-90.
- CARRASCO-NÚÑEZ, G. AND BRANNEY, M.J. (2005). PROGRESSIVE ASSEMBLY OF A MASSIVE LAYER OF IGNIMBRITE WITH A NORMAL-TO-REVERSE COMPOSITIONAL ZONING: THE ZARAGOZA IGNIMBRITE OF CENTRAL MEXICO. *BULLETIN OF VOLCANOLOGY*, 68; 3 – 20
- CARRASCO G., LÓPEZ M., HERNÁNDEZ J., VARGAS V., (2017). SUBSURFACE STRATIGRAPHY AND ITS CORRELATION WITH THE SURFICIAL GEOLOGY AT LOS HUMEROS GEOTHERMAL FIELD, EASTERN TRAN-MEXICAN VOLCANIC BELT. *GEOTHERMICS* 67 (2017) 1-17.
- CEDILLO, F. (1997). GEOLOGÍA DEL SUBSUELO DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUE, INFORME CFE, RE/HU/03/97.
- CFE- GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS, DEX-HU-00/2001, PROYECTO 0563, ENERO DEL 2001.
- CALCAGNO ET AL., 2018. PRELIMINARY 3-D GEOLOGICAL MODELS OF LOS HUMEROS AND ACOCULCO GEOTHERMAL FIELDS (MEXICO) – H2020 GEMEX PROJECT. *ADVANCES IN GEOSCIENCES* 45:321-333
- CORWIN, R. F. (1976). SELF-POTENTIAL EXPLORATION FOR GEOTHERMAL RESERVOIRS, PROC. 2ND U.N. SYMP. ON THE DEVELOPMENT AND USE OF GEOTHERMAL RESOURCES, SAN FRANCISCO 2, 937.
- CORWIN, R.F. HOOVER, D.B. (1979). THE SELF-POTENTIAL METHOD IN GEOTHERMAL EXPLORATION. *GEOPHYSICS* 44-2, 226-245
- DÁVILA-HARRIS, P., CARRASCO-NÚÑEZ, G., (2014). AN UNUSUAL SYN-ERUPTIVE BIMODAL ERUPTION: THE HOLOCENE CUICUILTIC MEMBER AT LOS HUMEROS CALDERA, MEXICO. *J. VOLCANOL. GEOTHERM. RES.* 271, 24–42.
- DE LA CRUZ, V., (1983). ESTUDIO GEOLÓGICO A DETALLE DE LA ZONA GEOTÉRMICA LOS HUMEROS, PUE. INTERNAL REPORT 10/83. CFE 51 PP.
- DIX, C. H. (1995). SEISMIC VELOCITIES FROM SURFACE MEASUREMENTS. *GEOPHYSICS.* VOL. 20. PP.68-86.

- DORFMAN, N. H., OSKAY, M. M., AND GADDIS, M. P. (1977), SELF-POTENTIAL PROFILING: A NEW TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF HEAT MOVEMENT IN A THERMAL OIL RECOVERY FLOOD, PREPRINT; PRESENTED AT 52ND ANN. MEETING, SPE OF AIME, DENVER.
- FERNANDEZ, S., A.URIBE, J.C. FLORES Y R. GÓMEZ (1996). ESTUDIO SISMOLÓGICO EN EL ÁREA DEL TEMBLOR DE XALAPA DE 1920, MEMORIAS DEL VII SIMPOSIUM DE GEOFÍSICA Y EXPOSICIÓN, VERACRUZ, VER., 365-370.
- FERRIZ, H Y MAHOOD, 1984. ERUPTION RATES AND COMPOSITIONAL TRENDS AT LOS HUMEROS VOLCANIC CENTER, PUEBLA, MEXICO. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 89, No. B10, 8511-8524.
- FINIZOLA A., LÉNAT J-F., MACEDO O., RAMOS D., THOURET J-C., SORTINO F. 2004. FLUID CIRCULATION AND STRUCTURAL DISCONTINUITIES INSIDE MISTI VOLCANO (PERU) INFERRED FROM SELF-POTENTIAL MEASUREMENTS. J. VOLCANOL. GEOTHERM. RES., 135-4, 343-360, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2004.03.009
- FOURNIER, C.: 1989, 'SPONTANEOUS POTENTIALS AND RESISTIVITY SURVEYS APPLIED TO HYDROGEOLOGY IN A VOLCANIC AREA: CASE HISTORY OF THE CHAIN DES PUYS (FRANCE)', GEOPHYS. PROSPECTING 37, 647.
- GARDUÑO, V.H., ROMERO, F., TORRES, R., 1985. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUE. (MÉXICO). CFE, PP. 26-85 INTERNAL REPORT
- GUPTA, K. (2002). A REVIEW OF RECENT STUDIES OF TRIGGERED EARTHQUAKES BY ARTIFICIAL WATER RESERVOIRS WITH SPECIAL EMPHASIS ON EARTHQUAKES IN KOYNA, INDIA. ELSEVIER. EARTH-SCIENCE REVIEWS. VOL. 58. PP.279-310.
- GUTIÉRREZ-NEGRÍN, E., IZQUIERDO-MONTALVO, G., 2010. REVIEW AND UPDATE OF THE MAIN FEATURES OF THE LOS HUMEROS GEOTHERMAL FIELD. IN: PROCEEDINGS WORLD GEOTHERMAL CONGRESS. MEXICO, BALI, INDONESIA. APRIL 2010
- HAVSKOV, J. & MACÍAS, M., 1983, A CODA-LENGTH MAGNITUDE SCALE FOR SOME MEXICAN STATIONS: GEOFÍSICA INTERNACIONAL, 22, No.3, p.205-213.
- ICHIKUNI, M.: 1959, 'UNE CONSIDÉRATION SUR LA FORMATION DE L'ION SULPHATE DANS LES EAUX THERMALES', GEOCHIM. COSMOCHIM. ACTA 17, 6.
- ISHIDO, T. AND MIZUTANI, H.: 1981, 'EXPERIMENTAL AND THEORETICAL BASIS OF ELECTROKINETIC PHENOMENA IN ROCK-WATER SYSTEMS AND ITS APPLICATIONS TO GEOPHYSICS', J. GEOPHYS. RES. 86, 1763.
- JACKSON, D. B. AND KAUAHIKAWA, J.: 1987, 'REGIONAL SELF-POTENTIAL ANOMALIES AT KILAUEA VOLCANO', U.S. GEOL. SURV. PROF. PAPER 1350, 947.
- KANAMORI, H., THE ENERGY RELEASE IN GREAT EARTHQUAKES, J. GEOPHYS. RES., 82, 2981-2987, 1977.
- LEE, W.H. & LAHR, J. C., 1975. HYPO71 (REVISED). A COMPUTER PROGRAM FOR DETERMINING HYPOCENTER, MAGNITUDE, AND FIRST MOTION PATTERN OF LOCAL EARTHQUAKES. U.S. GEOLOGICAL SURVEY, OPEN-FILE REPORT 75 - 311, 114 PP.
- LERMO, J., LORENZO, C., ANTAYHUA, Y., RAMOS, E., JIMENEZ, N., 2016. SÍSMICA PASIVA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA-MÉXICO Y SU RELACIÓN CON LOS POZOS IN-
- YECTORES. XVIII CONGRESO PERUANO DE GEOLOGÍA.
- LERMO, J., GUERRERO, J., SOTO, J., MACHORRO, G. (1999A). PROCESADO E INTERPRETACIÓN DE DATOS SÍSMICOS DE LA RED SISMOLÓGICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUE. MEMORIA DEL XII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA SÍSMICA, VERACRUZ, MÉXICO. PP. 127-136.
- LERMO, J., HURTADO, J. SOTO Y J. FLORES. ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUE, INFORME TÉCNICO FINAL, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, ELABORADO PARA LA CFE-GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS, DEX-HU-008/2000, PROYECTO 9523, ABRIL DEL 2000.
- LERMO, J., F. ROMERO, Y. ANTAYHUA, I. BERNAL, D. VEGA Y M. CHAVACÁN. ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LAS TRES VÍRGENES, B.C.S., INFORME TÉCNICO, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, ELABORADO PARA LA CFE- GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS, CONVENIO: 9400012354, PROYECTO 3539, JUNIO DEL 2004, PP 46.
- LERMO, J., YANET ANTAYHUA, GERMAN ESPITIA Y MELITÓN FLORES CÁRDENAS (2006), MONITOREO SÍSMICO EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LAS TRES VIRGENES, B.C.S., COORD. INGENIERÍA SISMOLÓGICA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, REALIZADO PARA: CFE, GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS, DPTO. DE EXPLORACIÓN, PROY 6515, PÁG. 57, MÉXICO.
- LERMO, J., EFREN CRUZ, ELOY MONDRAGON, CARLOS VALDES, GERMÁN ESPITIA, (DICIEMBRE 2008), MONITOREO SÍSMICO EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LAS TRES VÍRGENES, BAJA CALIFORNIA SUR, INSTITUTO DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, REALIZADO PARA CFE, SUBDIRECCIÓN DE GENERACIÓN, PROYECTO 8530, MÉXICO
- LERMO, J., ANTAYHUA, Y., QUINTANAR, L., AND LORENZO, C. (2008). ESTUDIO SISMOLÓGICO DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA, MÉXICO. PARTE I: SISMICIDAD, MECANISMOS DE FUENTE Y DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS, GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA, 21(1): 25-41.

- LERMO, J., EFREN CRUZ, PEDRO HERNÁNDEZ, FERNANDO NUÑEZ, EDGAR URBAN Y GERMÁN ESPITIA, (DICIEMBRE 2009), ESTUDIO DE SÍSMICA PASIVA EN TRES VÍRGENES, BCS, PERIODO 2009, INSTITUTO DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, REALIZADO PARA CFE, SUBDIRECCIÓN DE GENERACIÓN, CONVENIO NO 9400046742, PROYECTO 9520, MÉXICO, 53 PP.
- LERMO, J., ADRIANA VARGAS, EDGAR URBAN, HÉCTOR RODRÍGUEZ, FERNANDO NUÑEZ Y GERMÁN ESPITIA, (DICIEMBRE, 2010), ESTUDIO DE SÍSMICA PASIVA EN LAS TRES VÍRGENES, BCS., PERIODO 2010, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, REALIZADO PARA CFE, GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS, DEPARTAMENTO DE EXPLORACIÓN, PROYECTO CFE-DEV-DGF-TV-25-10, MÉXICO.
- LERMO, J., VARGAS, A., URBAN, E., RODRÍGUEZ, H., NUÑEZ F., ESPITIA, G. AND MARTÍNEZ J. (2011). ESTUDIO DE SÍSMICA PASIVA EN LAS TRES VÍRGENES, B.C.S. PERIODO 2011. INFORME TÉCNICO, GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS, COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. 97 P.
- LERMO J. ET AL. 2016. SÍSMICA PASIVA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HÚMEROS, PUEBLA-MÉXICO Y SU RELACIÓN CON LOS POZOS INYECTORES. XVIII CONGRESO PERUANO DE GEOLOGÍA, P. XXX-XXX
- LERMO J. ET AL. 2016. INNOVACIÓN EN LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS MODERNAS DE PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE MÉTODOS GEOLÓGICOS, GEOQUÍMICOS Y GEOFÍSICOS, CASO DE ESTUDIO DEL CAMPO VOLCÁNICO-GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS. CEMIE-GEO
- LERMO ET AL. (2018). DETECCIÓN DE FALLAS GEOLÓGICAS Y EXTENSIÓN HIDROTÉRMICA EN LA ZONA GEOTÉRMICA LA SOLEDAD: MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE METODOLOGÍAS COMPLEMENTARIAS: POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP), GAS DE SUELO (CO<sub>2</sub>), TÉRMICA Y TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y SÍSMICA. CFE, INFORME FINAL
- LERMO ET AL. (2018). DETECCIÓN DE FALLAS GEOLÓGICAS Y EXTENSIÓN HIDROTÉRMICA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE CERRITOS COLORADOS: MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE METODOLOGÍAS COMPLEMENTARIAS: POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP), GAS DE SUELO (CO<sub>2</sub>), TÉRMICA Y TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y SÍSMICA. CFE, INFORME FINAL
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, A., 1995. ESTUDIO REGIONAL VOLCÁNICO Y ESTRUCTURAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUE., MÉXICO. GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA 11 (1), 17–36.
- LORENZO, C. (2002). REPORTE DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA DURANTE EL PERIODO ENERO 2001-ABRIL 2002. INFORME INTERNO. GERENCIA DE PROYECTOS TERMOELÉCTRICOS-RESIDENCIA DE ESTUDIOS, C.F.E. 20P.
- LORENZO, C. (2004). REPORTE DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA REGISTRADA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA DURANTE EL PERIODO SEPTIEMBRE 2002-NOVIEMBRE 2003. INFORME INTERNO. GERENCIA DE PROYECTOS TERMOELÉCTRICOS-RESIDENCIA DE ESTUDIOS, C.F.E. 35P.
- MASSENET, F. AND PHAM, V. N.: 1985A, MAPPING AND SURVEILLANCE OF ACTIVE FISSURE ZONES ON A VOLCANO BY THE SELF-POTENTIAL METHOD, ETNA, SICILY, J. VOLC. GEOTHERM. RES. 24, 315.
- MORGAN, D. F.: 1988, 'FUNDAMENTALS OF STREAMING POTENTIALS IN GEOPHYSICS', PROC. OF INT. SYMP. DETECTION OF SUBSURFACE FLOW PHENOMENA BY SELF-POTENTIAL/GEOELECTRICAL AND THERMICAL METHOD, KARLSRUHE, 32.
- MORGAN, F. D., WILLIAMS, E. R., AND MADDEN, T. R.: 1989, STREAMING POTENTIAL OF WESTERLY GRANITE WITH APPLICATIONS', J. GEOPHYS. RES. 94, 12449. CORWIN, R. F.: 1990, 'THE SELF-POTENTIAL METHOD FOR ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING APPLICATIONS', IN S. H. WARD (ED.), GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENTAL GEOPHYS., VOL. 1, SOC. EXPLOR. GEOPHYS., TULSA, P. 127.
- NAKAGAWA, I., SASAI, Y., UTADA, H., ISHIKAWA, Y., KOYAMA, S., OHCHI, K., AND TOKUMOTO, T.: 1984, 'CHANGES IN TOTAL INTENSITY OF THE GEOMAGNETIC FIELD ASSOCIATED WITH THE 1983 ERUPTION OF MIYAKE-JIMA VOLCANO', BULL. VOLC. SOC. JAPAN, SER. 2 29, 101 (IN JAPANESE WITH ENGLISH ABSTRACT).
- NORINI, G. GROPELLI, R. Sulpizio, G. Carrasco-Núñez, P. Dávila-Harris, C. Pellicioli, F. Zucca, R. De Franco (2015). STRUCTURAL ANALYSIS AND THERMAL REMOTE SENSING OF THE LOS HUMEROS VOLCANIC COMPLEX: IMPLICATIONS FOR VOLCANO STRUCTURE AND GEOTHERMAL EXPLORATION. JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH 301, 221–237.
- NOURBEHECHT, B.: 1963, 'IRREVERSIBLE THERMODYNAMIC EFFECTS IN INHOMOGENEOUS MEDIA AND THEIR APPLICATION IN CERTAIN GEOELECTRIC PROBLEMS', PH.D. THESIS, MIT, CAMBRIDGE.
- OTTEMÖLLER, L., VOSS, P. AND HAVSKOV, J. (2015). SEISAN EARTHQUAKE ANALYSIS SOFTWARE, VERSION 10.0. 402 P.
- OVERBEEK, J. TH. G.: 1952, IRREVERSIBLE SYSTEMS, COLLOID SCIENCE, VOL. 1, IN H. R. KRUYT EDITION, ELSEVIER, NEW YORK, 389 PP.
- OZAWA, T., KAMADA, M., YOSHIDA, M., AND SANEMASA, I.: 1973, 'GENESIS OF HOT SPRING, PART 1. GENESIS OF ACID HOT SPRING, CHINETSU', J. JAPAN. GEOTHERM. ENERGY ASSOC. 10, 31. YAMASHITA, 1961;
- TORRES, R. & LERMO J. F. (2017) USO DE LA TÉCNICA DE VIBRACIÓN AMBIENTAL PARA CARACTERIZAR EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA, MÉXICO. (TESIS DE LICENCIATURA). UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. CIUDAD DE MÉXICO. MÉXICO.

- PIÑA-FLORES, J. ET AL. 2017. THE INVERSION OF SPECTRAL RATIO H/V IN A LAYERED SYSTEM USING THE DIFFUSE FIELD ASSUMPTION (DFA). *GEOPHYS. J. INT.* 208, 577–588.
- PONCE, L., Y RODRIGUEZ, C. (1977). MICROEARTHQUAKE ACTIVITY ASSOCIATED TO LOS HUMEROS CALDERA, MEXICO: PRELIMINARY SURVEY. *GEOFÍSICA INTERNACIONAL*. VOL. 17. Nº 4. PP. 461-478.
- PROL-LEDESMA, R.M., 1998. PRE- AND POST-EXPLOTATION VARIATIONS IN HYDROTHERMAL ACTIVITY IN LOS HUMEROS GEOTHERMAL FIELD, MEXICO. *J. VOLCANOL. GEOTHERM. RES.* 83, 313–333.
- PONCE, L., RODRÍGUEZ, C., 1977. MICROEARTHQUAKE ACTIVITY ASSOCIATED TO LOS HUMEROS CALDERA, MEXICO: PRELIMINARY SURVEY. *INT. GEOPHYS.* 17–4, 461–478.
- REVIL, A. AND PEZARD, P. A.: 1998, 'STREAMING ELECTRICAL POTENTIAL ALONG FAULTS IN GEOTHERMAL AREAS', *GEOPHYS. RES. LETT.* 25, 3197–3200.
- ROJAS, E., 2016. LITOESTRATIGRAFÍA, PETROGRAFÍA, Y GEOQUÍMICA DE LA TOBA LLANO, Y SURELACIÓN CON EL CRÁTER EL XALAPAZCO. CALDERA DE LOS HUMEROS, PUEBLA. MSc. THESIS. IPYCYT, MÉXICO.
- SATO AND MOONEY (1960). THE ELECTROCHEMICAL MECHANISM OF SULFIDE SELF-POTENTIAL GEOPHYSICS, 25 (1) (1960), PP. 226-249
- TANG, CH., RIAL J., LEES, J. AND THOMPSON (2005). THITIETH WORKSHOP ON GEOTHERMAL RESERVOIR ENGINEERING STANFORD UNIVERSITY, STANFORD, CALIFORNIA. JANUARY 31-FEBRUARY 2.
- WHITE, D. E.: 1957, 'THERMAL WATERS OF VOLCANIC ORIGIN', *BULL. GEOL. SOC. AMER.* 68, 1637.
- WILLCOX C. 2011. ERUPTIVE, MAGMATIC AND STRUCTURAL EVOLUTION OF A LARGE EXPLOSIVE CALDERA VOLCANO: LOS HÚMEROS, CENTRAL MÉXICO. UNIVERSITY OF LEICESTER. TESIS DE DOCTORADO.
- YAMASHITA, S.: 1961, 'THE ELECTROMOTIVE FORCE GENERATED WITHIN THE ORE BODY BY THE TEMPERATURE DIFFERENCE', *J. MIN. COLL., AKITA UNIV., SER. A* 1, 69.
- YÁÑEZ-GARCÍA, C., GARCÍA-DURÁN, S., AND CACIQUE-VÁSQUEZ, J. (1979). GEOTHERMIC EXPLORATION IN THE LOS HUMEROS-DERRUMBADAS AREA. *GEOTHERMIC RESEARCH COUNT. TRANS.* VOL. 3. PP. 801-803.
- YÁÑEZ, C., GARCÍA, S., 1980. EXPLORACIÓN DE LA REGIÓN GEOTÉRMICA LOS HUMEROS-LAS DERRUMBADAS, ESTADOS DE PUEBLA Y VERACRUZ. C.F.E, INTERNAL REPORT 96 PP.
- YASUKAWA, K. AND MOGI, T.: 1998, 'TOPOGRAPHIC EFFECTS ON SP ANOMALY CAUSED BY SUBSURFACE FLUID FLOW NUMERICAL APPROACH, BUTSURI-TANSA', *GEOPHYSICAL EXPLORATION* 51, 17 (IN JAPANESE WITH ENGLISH ABSTRACT).
- ZABLOCKI, C. J.: 1976, 'MAPPING THERMAL ANOMALIES ON AN ACTIVE VOLCANO BY THE SELF-POTENTIAL METHOD, KILAUEA, HAWAII', *PROC. 2ND U.N. SYMP. ON THE DEVELOPMENT AND USE OF GEOTHERMAL RESOURCES, SAN FRANCISCO*, 2, 1299.
- ZOHDY, A. A., ANDERSON, R. L. A., AND MUFFLER, L. J. P.: 1973, 'RESISTIVITY, SELF-POTENTIAL AND INDUCED POLARIZATION SURVEYS OF A VAPOR-DOMINATED GEOTHERMAL SYSTEM', *GEOPHYSICS* 38, 1130.

# ANEXOS

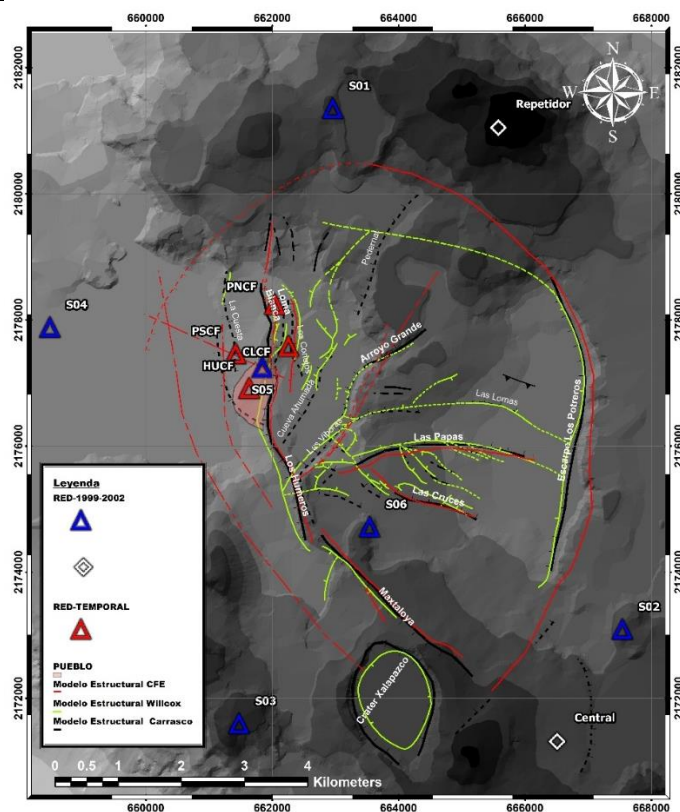
## Anexo A. Distribución espacial de la red sísmica permanente del Campo Geotérmico de los Humeros

**Periodo: Diciembre 1997- Febrero del 2002**

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	LOCALIDAD
S01	19.721 N	97.445 W	2975	Sotoltepec
S02	19.646 N	97.402 W	2925	Coamilacas
S03	19.633 N	97.460 W	3000	El Jaral
S04	19.690 N	97.488 W	2775	Los Coyotes
S05	19.684 N	97.456 W	2800	Loma Blanca
S06	19.661 N	97.440 W	2900	Las Papas
Repetidor	19.718 N	97.420 W	3110	San Antonio
Central	19.630 N	97.412 W	2970	Campamento

**En 1999 se coloca una red temporal con 4 aparatos: HUCF, CLHF, PSCF, PNCF  
Estaciones Temporales**

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	LOCALIDAD
HUCF	19.681 N	97.458 W	2840	C. Sotoltepec
CLCF	19.687 N	97.452 W	2885	C. Arenas
PSCF	19.686 N	97.460 W	2754	C. El Hilillo
PNCF	19.693 N	97.454 W	3030	Xalapasco





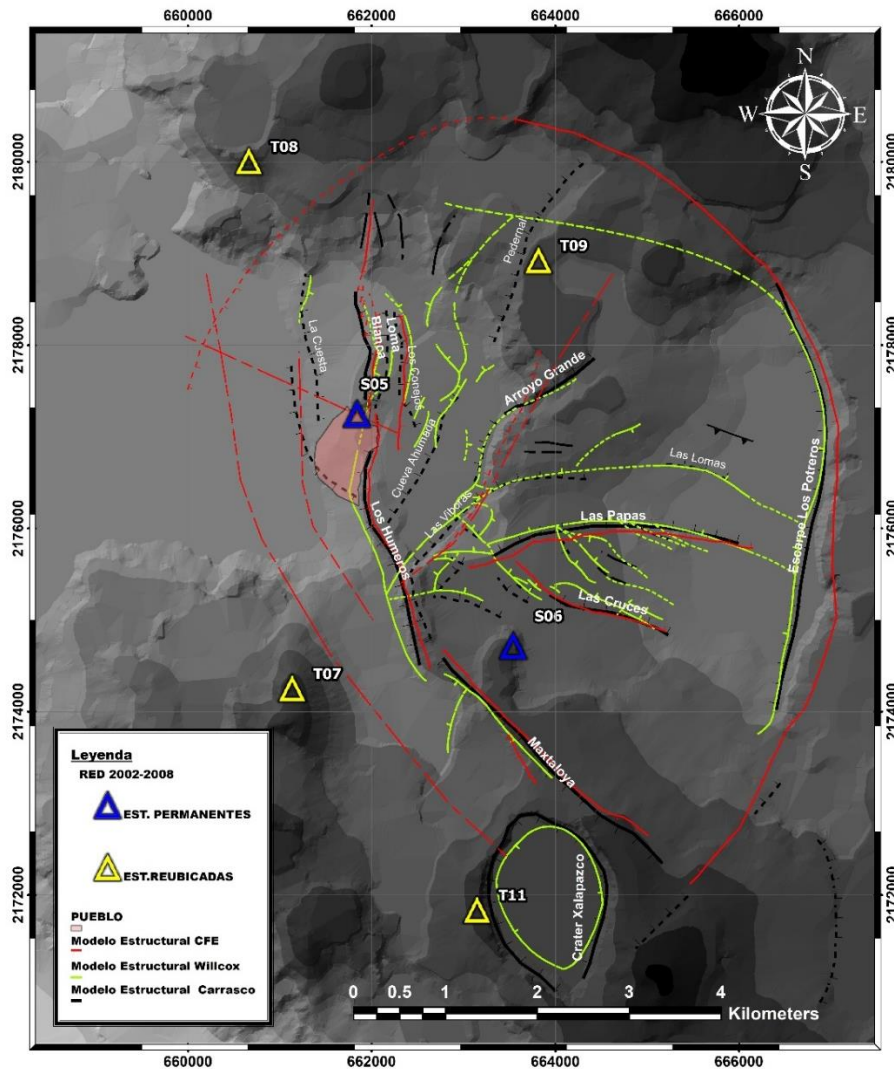
**Periodo: Septiembre 2002-Septiembre 2012**

En febrero del 2002 hubo robo de la estación S02, existieron problemas de ruido en las estaciones S01 y S02, y se realiza reubicación de estaciones (Lermo et al. (2003) realizó estudios de efectos de sitio utilizando la metodología de Nakamura (1989), seleccionando Cerro Sotoltepec, Cerro Arenas, Cerro Hilillo y la parte alta del cráter Xalapasco. S05 y S06 conservaron su ubicación.

**Estaciones Reubicadas**

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	LOCALIDAD
S05	19.684 N	97.456 W	2800	Loma Blanca
S06	19.661 N	97.440 W	2900	Las Papas
T07	19.657 N	97.463 W	3025	C. Sotoltepec
T08	19.709 N	97.467 W	2971	C. Arenas
T09	19.699 N	97.437 W	2962	C. El Hilillo
T11	19.635 N	97.444 W	3030	Xalapasco

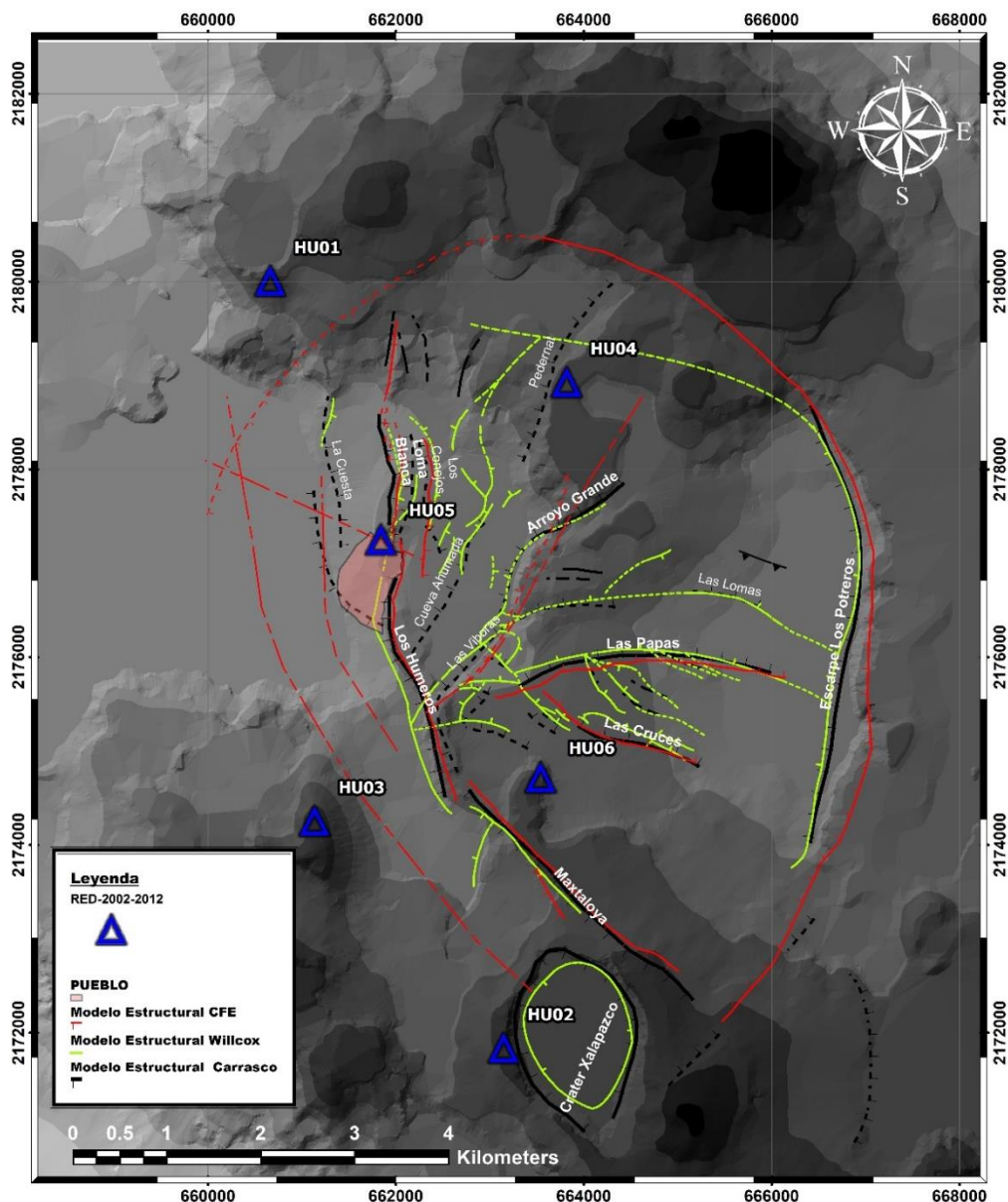
En diciembre del 2005, las estaciones fueron renombradas a HU01, HU02, HU03, HU04, HU05 Y HU06.



En 2008, se tuvieron problemas electrónicos, por la antigüedad de la red, por lo que se inició la renovación de estos equipos por sismógrafos de banda ancha marca Guralp, modelo 40TD. La primera estación que trabajo con este tipo de sismógrafos fue la HU05, después para fines del 2009 e inicios 2010, se renovaron las otras cinco estaciones

### Estaciones Renombradas

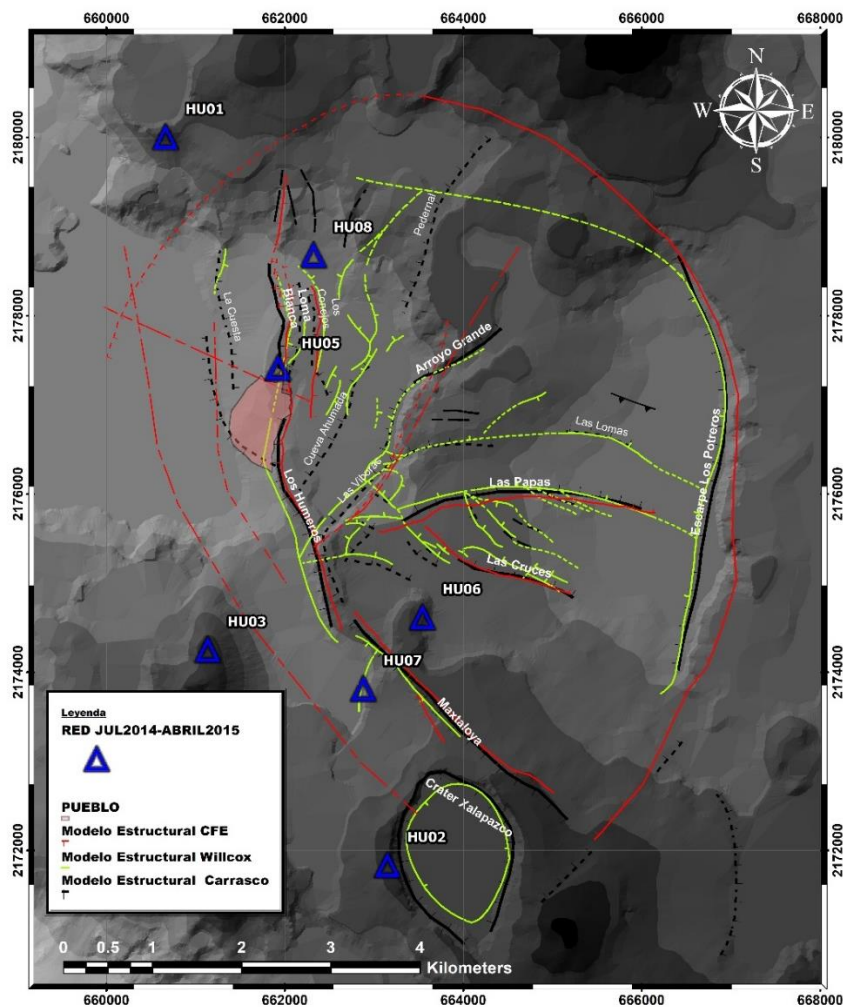
ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	LOCALIDAD	EQUIPO
HU01	19.7090 N	-97.4670 W	2923	Sotoltepec	Guralp 40TD serie:4T35/A2858
HU02	19.6350 N	-97.4440 W	2987	Xalapascos	Guralp 40TD serie:4T38/
HU03	19.6570 N	-97.4630 W	3006	Cerro Arenas	Guralp 40TD serie:4T41/A2917
HU04	19.6990 N	-97.4370 W	2934	El Hilillo	Guralp 40TD serie:4T36/A2932
HU05	19.6855 N	-97.4552 W	2820	Loma Blanca	Guralp 40TD serie:4T39/A2913
HU06	19.6601 N	-97.4400 W	2923	Las Papas	Guralp 40TD serie:4T40/



Esta nueva red no demoró mucho su reinstalación ya que, para septiembre del 2012, nuevamente una de las estaciones sufrió el robo total de la estación sísmica incluyendo su antena de 60 metros. Este lamentable hecho, motivo a la residencia del campo geotérmico de Los Humeros, en tomar la decisión en retirar de su funcionamiento a la red permanente sísmica de los Humeros (RSHU), por motivos de su seguridad. A principios del mes de julio del 2014 se inició la reinstalación de las estaciones HU01, HU03, HU05 y HU6 con la nueva caseta enterrada y dispositivos de seguridad en diferentes partes de cada caseta, se conservó la distribución anterior a excepción de la HU04, agregando la HU07 y HU08.

**Periodo: Julio 2014-Abril 2015**

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	LOCALIDAD	EQUIPO
HU01	19.7090 N	-97.4670 W	2923	Sotoltepec	Guralp 40TD serie:4T36/A2932
HU02	19.6350 N	-97.4440 W	2987	Xalapascos	Guralp 40TD serie:4T41/A2917
HU03	19.6570 N	-97.4630 W	3006	Cerro Arenas	Guralp 40T-DAS 324 serie: T4S31-2771/A2492
HU05	19.6855 N	-97.4552 W	2820	Loma Blanca	Guralp 40TD serie: 4T39/A2913
HU06	19.6601 N	-97.4400 W	2923	Las Papas	Guralp 40TD serie:4T38/
HU07	19.6529 N	-97.4464 W	2857	El Goterón	Guralp 40TD serie:4T41/A2917
HU08	19.6969 N	-97.4513 W	2811	HUU7- Unidad 07	Guralp 40T- DAS 324 serie: T4Q75- 2765/A2490

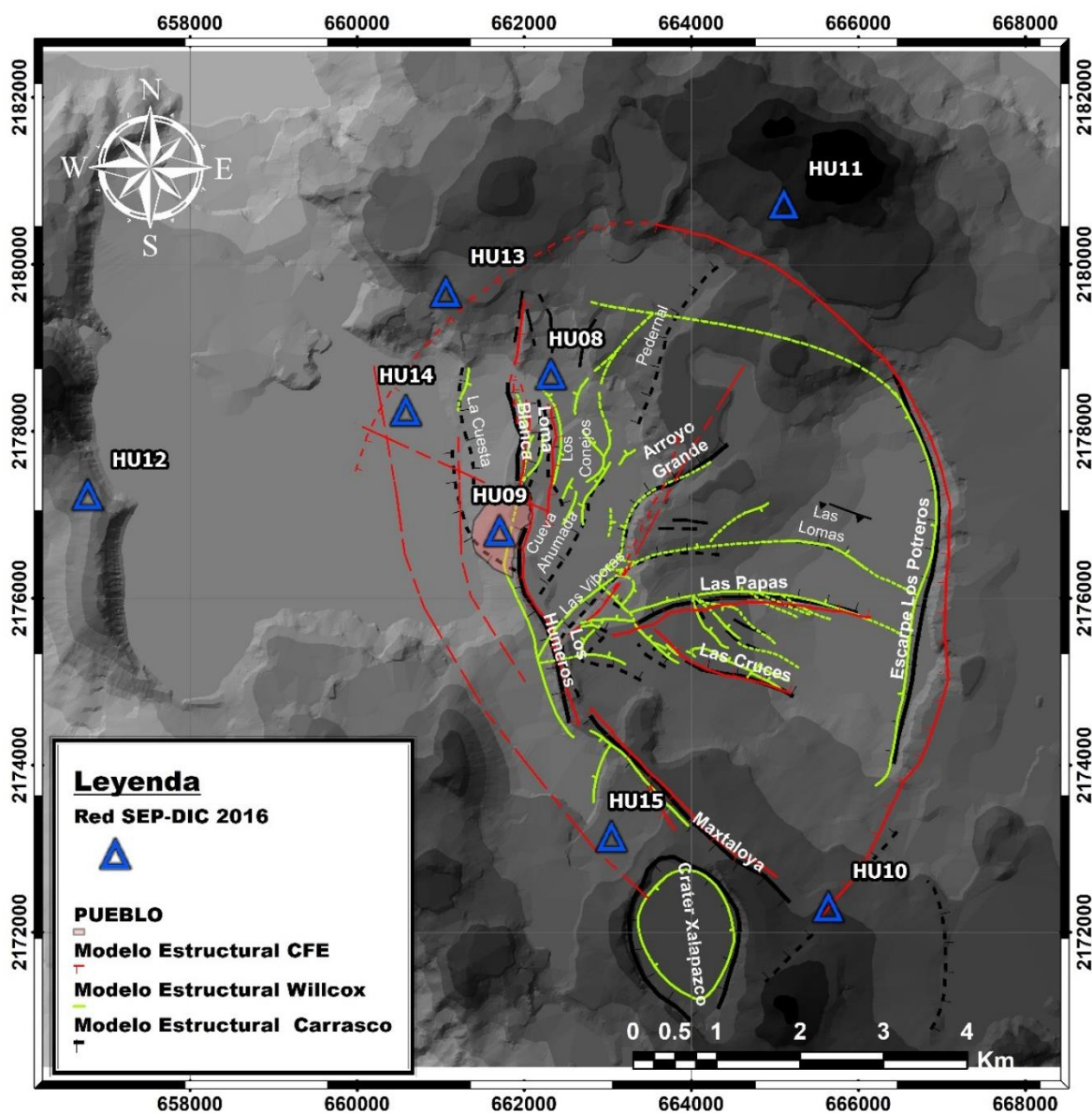






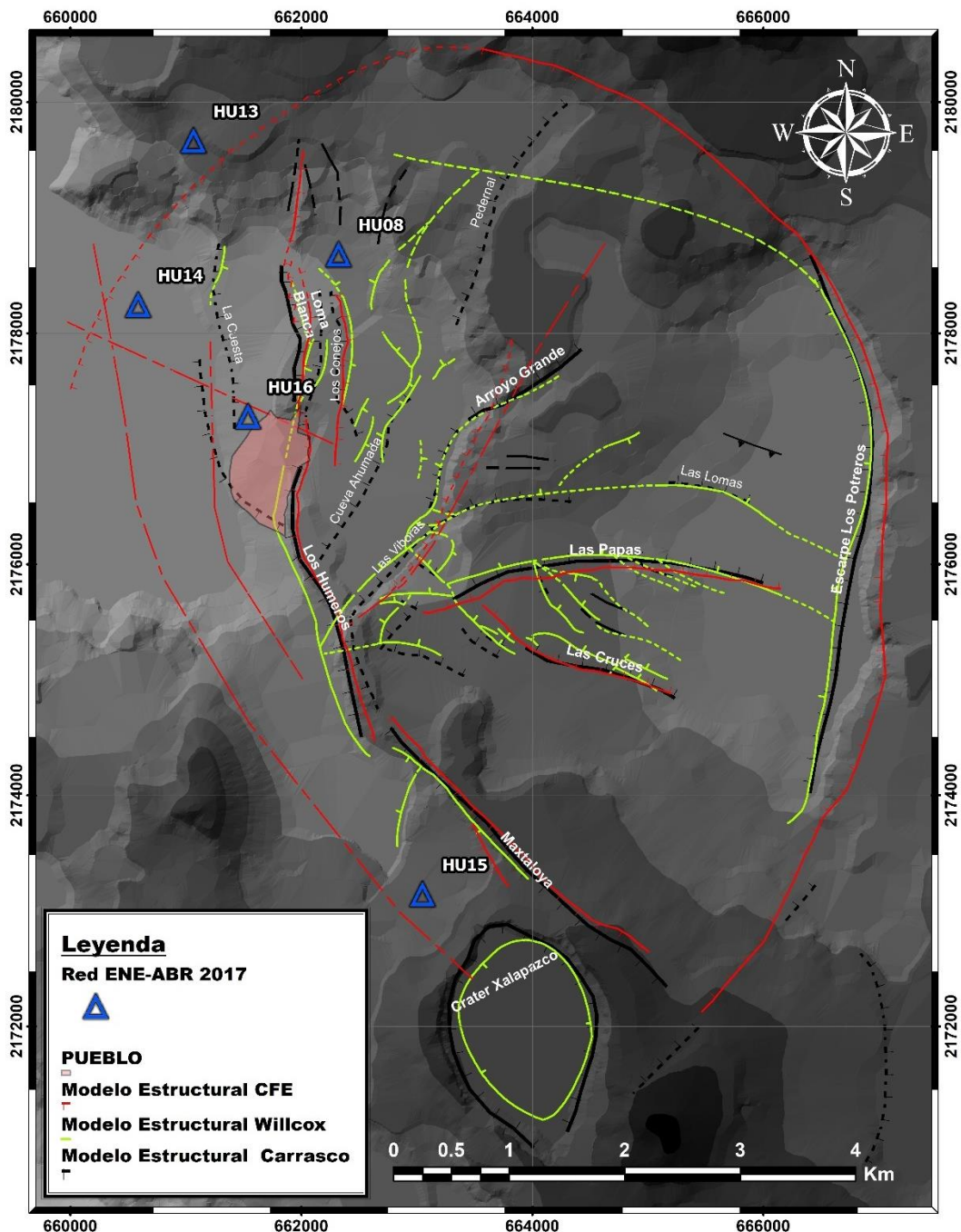
Periodo: Septiembre 2016-Diciembre 2016

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	LOCALIDAD	EQUIPO
HU08	19.6969 N	-97.4513 W	2811	HUU7-Unidad 07	Guralp 40T- DAS 324 serie: T4Q75-2765/A2490
HU09	19.6800 N	-97.4573 W	2804	Pblo-Los Humeros	Guralp 40TD serie: 4Z20/5880
HU10	19.6390 N	-97.4202 W	2989	Pblo-Xalapasco	Guralp 40TD serie:4T36/A2932
HU11	19.7151 N	-97.4245 W	3048	Rancho El Hilillo	Guralp 40TD serie:4T41/A2917
HU12	19.6843 N	-97.5043 W	2830	Pblo-La Venta	Guralp 40TD serie:4T35/A2858
HU13	19.7059 N	-97.4632 W	2880	HUSA-Sol Alta	Guralp 6TD serie: C2757/5153
HU14	19.6931N	-97.4679W	2769	HUU1-Unidad 01	Guralp 6TD serie: T6621/ B317
HU15	19.6468 N	-97.4486 W	2971	HUU3-Unidad 03	Guralp 40TD serie:4T36/A2932



Periodo: Enero2017-Abril2017

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	LOCALIDAD	EQUIPO
HU08	19.6969 N	-97.4513 W	2811	HUU7-Unidad 07	Guralp 40TD serie:4T41/A2917
HU13	19.7059 N	-97.4632 W	2880	HUSA-Sol Alta	Guralp 40TD serie: 4T39/A2913
HU14	19.6931 N	-97.4679 W	2762	HUU1-Unidad 01	Guralp 40TD serie:4T35/A2858
HU15	19.6468 N	-97.4486 W	2971	HUU3-Unidad 03	Guralp 40TD serie:4T36/A2932
HU16	19.6843 N	-97.4589 W	2796	HUHU-Los Humeros	Guralp 40TD serie: 4Z20/5880





## **Anexo B**

Tabla que muestra los eventos sísmicos seleccionados y relocalizados para la realización del presente trabajo.

<b>EVENTO</b>	<b>FECHA</b>	<b>HORA GTM HH:MM: SS</b>			<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>PROF. (M)</b>	<b>Z</b>	<b>MC</b>
<b>1</b>	25/11/1994				662058	2178001	3		4
<b>2</b>	13/12/1997	11	4	53	662008	2177672.35	4.156		1.3
<b>3</b>	30/12/1997	16	14	44	661926	2177371.616	3.261		1.2
<b>4</b>	30/12/1997	17	9	24	661934	2177352.865	3.923		1.7
<b>5</b>	30/12/1997	17	26	58	662190	2177139.341	2.912		1.6
<b>6</b>	30/12/1997	17	27	38	661950	2177339.726	3.543		0.9
<b>7</b>	30/12/1997	19	53	53	662075	2177378.503	3.109		2.1
<b>8</b>	30/12/1997	20	2	1	662025	2177320.488	3.081		1.6
<b>9</b>	31/12/1997	5	3	58	662057	2177419.295	3.358		1.7
<b>10</b>	14/2/1998	9	9	14	662133	2177664.63	3.237		1.6
<b>11</b>	19/2/1998	7	14	41	662064	2177699.421	3.081		1.8
<b>12</b>	21/2/1998	22	39	28	662092	2177467.215	2.733		1.6
<b>13</b>	23/2/1998	19	35	45	662001	2177712.131	3.603		1.7
<b>14</b>	1/3/1998	18	47	3	662305	2177663.981	2.762		1.4
<b>15</b>	7/3/1998	12	18	57	661884	2177490.787	3.728		1.7
<b>16</b>	13/3/1998	21	11	24	661945	2177666.235	3.382		1.7
<b>17</b>	21/3/1998	3	23	4	661740	2177904.589	3.452		1.4
<b>18</b>	22/3/1998	14	2	12	661983	2177666.587	3.265		1.8
<b>19</b>	26/3/1998	15	47	58	662275	2174169.017	4.236		1.7
<b>20</b>	29/3/1998	13	57	48	662140	2177702.33	2.939		1.9
<b>21</b>	16/4/1998	18	29	5	661618	2177659.954	3.444		1.6
<b>22</b>	8/5/1998	18	43	22	662083	2177691.844	3.351		1.7
<b>23</b>	12/5/1998	15	47	6	662109	2177684.334	2.816		1.7
<b>24</b>	13/7/1998	22	23	19	661773	2178109.675	2.655		1.6
<b>25</b>	26/7/1998	21	5	7	661991	2177730.862	2.944		1.5
<b>26</b>	6/8/1998	8	14	47	662253	2177250.611	2.664		1.8
<b>27</b>	7/8/1998	4	6	30	662060	2177139.266	3.387		1.8
<b>28</b>	12/8/1998	8	24	28	661957	2177676.311	3.158		1.8
<b>29</b>	3/9/1998	19	21	21	661697	2178318.208	3.152		1.7
<b>30</b>	3/9/1998	19	28	37	661789	2178416.45	3.049		1.8
<b>31</b>	4/9/1998	9	34	57	661791	2178321.269	3.162		1.7
<b>32</b>	10/9/1998	18	24	26	662111	2177851.501	3.717		1.7
<b>33</b>	12/9/1998	4	38	34	661705	2178390.231	2.532		1.9
<b>34</b>	20/9/1998	0	43	15	661802	2178051.267	3.971		1.7
<b>35</b>	23/9/1998	2	7	2	661914	2177902.849	3.306		1.7
<b>36</b>	28/9/1998	11	52	33	661641	2178346.473	3.649		1.8
<b>37</b>	28/9/1998	23	3	43	661966	2177812.552	4.605		1.7
<b>38</b>	2/10/1998	15	39	49	661937	2178061.351	3.905		1.3
<b>39</b>	6/10/1998	0	28	55	662275	2175604.746	2.5		1.7
<b>40</b>	8/10/1998	2	25	6	661725	2177781.583	3.286		1.6

41	13/10/1998	5	34	30	661795	2177814.32	3.45	1.7
42	18/10/1998	19	4	53	661994	2177758.563	2.888	1.6
43	30/10/1998	4	42	9	661855	2177984.224	3.393	1.8
44	31/10/1998	5	58	40	661828	2177837.86	3.804	1.7
45	1/11/1998	19	44	57	661790	2177949.321	3.097	1.5
46	4/11/1998	13	41	37	661897	2178038.851	3.732	1.9
47	14/11/1998	6	42	32	661999	2177702.15	2.723	1.5
48	3/12/1998	3	25	20	661517	2178251.257	3.485	1.6
49	4/12/1998	14	52	23	661712	2177965.22	3.497	1.6
50	10/12/1998	18	32	19	661769	2177807.441	3.19	1.4
51	23/12/1998	23	58	43	661953	2177650.815	2.575	1.8
52	29/12/1998	8	18	9	661867	2177764.051	3.667	1.8
53	4/1/1999	10	35	46	661945	2177876.56	3.899	1.7
54	6/1/1999	7	15	7	661875	2178180.341	3.061	1.6
55	9/1/1999	9	19	35	661856	2178013.022	4.045	1.9
56	23/1/1999	3	0	34	662081	2178022.809	2.533	1.3
57	27/1/1999	17	9	48	662025	2178105.329	3.216	1.6
58	30/1/1999	0	4	51	662471	2177920.091	2.735	1.8
59	2/2/1999	1	35	2	661964	2178010.682	3.337	1.2
60	2/2/1999	1	41	49	661908	2177952.61	3.147	1.5
61	3/2/1999	6	2	48	661938	2178189.767	3.633	1.5
62	11/2/1999	1	37	26	663594	2175151.865	3.694	1.2
63	10/3/1999	0	53	56	662143	2178293.478	4.212	1.3
64	26/4/1999	6	12	3	661929	2178075.674	2.63	2.63
65	11/5/1999	4	37	6	661232	2177916.594	3.405	1.9
66	28/5/1999	2	45	10	661755	2178173.721	3.44	1.8
67	28/5/1999	2	53	20	662107	2178104.966	3.015	1.3
68	28/5/1999	3	3	55	661748	2178203.54	3.678	1.6
69	28/5/1999	4	9	42	661788	2178179.551	4.283	1.8
70	11/6/1999	15	56	47	662010	2174540.759	0.817	1.6
71	18/6/1999	17	28	52	661621	2178259.956	5.019	1.6
72	18/6/1999	17	34	20	661949	2178188.765	3.189	1.9
73	17/9/1999	13	38	46	661720	2177628.778	2.464	1.3
74	23/9/1999	10	29	8	661524	2178211.476	0.924	1.5
75	28/3/2000	1	50	30	661876	2178123.9	3.248	1.4
76	3/4/2000	4	52	49	661707	2177355.237	2.443	1.5
77	7/4/2000	7	31	38	662025	2177889.469	3.173	1.7
78	11/4/2000	1	42	20	661949	2177728.267	2.821	1.4
79	17/5/2000	5	33	40	661957	2177701.769	2.769	1.6
80	27/5/2000	18	1	21	661990	2177881.397	1.802	1.6
81	13/6/2000	22	9	15	662185	2177768.046	3.119	1.3
82	16/6/2000	22	29	27	663045	2173675.684	0.461	1.6
83	19/6/2000	2	19	25	663455	2175440.617	3.908	1.8
84	19/6/2000	4	51	38	664382	2173030.397	0.902	1.2
85	25/6/2000	23	40	42	661800	2177222.133	3.162	1.3
86	28/6/2000	10	47	18	661864	2177614.585	3.299	1.3

87	28/7/2000	19	17	16	662416	2177473.485	3.383	1
88	6/8/2000	0	7	29	661784	2175667.818	2.428	1.7
89	8/8/2000	6	38	54	662077	2177986.244	3.126	1.4
90	17/8/2000	23	36	49	661894	2178033.288	2.466	1.9
91	17/8/2000	23	42	42	661754	2177492.927	2.482	1.2
92	22/8/2000	19	3	58	661709	2178312.778	2.626	1.3
93	25/3/2001	3	1	6	662194	2177945.242	3.523	1.6
94	25/3/2001	14	2	37	661702	2177466.993	2.541	1.5
95	26/3/2001	0	17	50	662176	2178044.708	3.081	1.6
96	21/4/2001	12	43	23	664178	2175988.564	4.085	1.5
97	7/7/2001	0	21	7	661790	2177496.571	1.045	1.8
98	24/11/2001	4	41	47	661966	2178233.193	2.426	1.7
99	11/12/2001	5	31	54	661660	2178102.006	3.123	1.9
100	21/1/2002	18	15	35	6618662	2175795	2.5	3.6
101	4/2/2002	12	26	26	661969	2178002.972	2.5	1.8
102	20/3/2002	1	13	21	661648	2178220.346	4.885	2
103	19/1/2006	13	36	7	662174	2177523.312	2.5	1.6
104	21/1/2006	16	15	38	661351	2178338.316	3.084	1.7
105	30/1/2006	1	8	60	661253	2178534.466	1.444	1
106	30/1/2006	1	9	15	661248	2178514.495	1.424	1.6
107	2/2/2006	2	53	9	661936	2177476.864	2.5	1.8
108	4/2/2006	9	1	42	661344	2177643.076	2.497	1.6
109	4/2/2006	19	21	10	662167	2177323.989	2.186	1.8
110	11/2/2006	21	5	38	661471	2178031.669	2.5	1.6
111	13/2/2006	7	0	23	661622	2178206.826	3.158	1.6
112	21/2/2006	7	37	32	662164	2177398.13	2.418	1.5
113	24/2/2006	8	50	13	661878	2177517.295	2.442	1.4
114	24/2/2006	20	57	41	661523	2177738.794	2.568	1.5
115	3/3/2006	15	37	12	661835	2178617.233	2.466	1.5
116	9/3/2006	17	44	16	662021	2177349.229	2.479	1.5
117	11/3/2006	11	9	10	661293	2177891.686	2.442	1.5
118	16/3/2006	20	18	21	662009	2177642.465	2.624	1.6
119	19/3/2006	12	26	39	661286	2177861.734	2.628	1.7
120	20/3/2006	16	29	21	661892	2177683.469	2.427	1.5
121	14/7/2007	7	21	10	661921	2177380.423	2.461	1.2
122	23/8/2008	7	50	37	662056	2177655.069	2.765	1.6
123	25/8/2008	17	47	40	661706	2177832.328	3.357	1.1
124	30/8/2008	2	33	27	661316	2177562.018	2.957	1.1
125	6/9/2008	19	48	13	661792	2178832.702	1.72	1.3
126	8/9/2008	16	31	22	663665	2176539.554	3.386	1.7
127	1/2/2009	21	16	40	660630	2176990.159	1.95	1.7
128	28/2/2009	4	10	24	661985	2177212.75	2.868	1.6
129	28/2/2009	5	40	37	662122	2177271.556	2.958	1.5
130	28/2/2009	7	27	7	662001	2177108.837	2.898	1.5
131	2/3/2009	21	55	42	661970	2177026.642	2.865	1.6
132	24/7/2009	21	1	12	662949	2177753.987	1.544	1.7

133	24/7/2009	21	5	4	662986	2177752.109	1.77	3
134	24/7/2009	21	41	59	662975	2177455.341	1.6	1.9
135	24/7/2009	21	46	54	662999	2177454.455	1.663	2.1
136	24/7/2009	21	49	21	662901	2177573.106	1.6	1.8
137	31/7/2009	11	34	20	663207	2177437.537	0.991	1.8
138	8/8/2009	4	34	38	662617	2175242.561	3.834	1.2
139	18/9/2009	15	21	32	661449	2179005.594	1.801	1.7
140	9/10/2009	14	50	30	661199	2177521.109	1.524	1.6
141	23/11/2009	3	59	8	661378	2178595.376	1.303	1.6
142	24/11/2009	19	31	25	661507	2178494.703	1.364	1.7
143	4/12/2009	10	6	57	663178	2175860.949	3.761	1.4
144	9/12/2009	11	2	51	661485	2177395.283	3.225	1.5
145	13/12/2009	16	28	22	663778	2176135.436	3.276	1.1
146	15/12/2009	21	31	14	664063	2176382.698	3.076	1.1
147	16/12/2009	13	41	1	662037	2175139.871	3.087	1.7
148	26/12/2009	3	12	7	663082	2176034.973	4.127	1.6
149	23/1/2010	13	48	49	662745	2175000.195	3.206	1.8
150	25/1/2010	5	46	33	663221	2176097.127	3.928	1.3
151	25/1/2010	9	36	45	661666	2177857.425	2.83	1.7
152	27/1/2010	22	11	59	661992	2177551.539	2.994	1.4
153	18/2/2010	22	22	46	661914	2177548.62	2.252	1.5
154	22/2/2010	2	38	14	661955	2177234.611	2.691	1.7
155	24/2/2010	8	51	25	661932	2177300.823	3.119	1.6
156	25/2/2010	10	54	46	663466	2176082.761	3.78	1.8
157	3/4/2010	6	31	3	661611	2177231.49	3.428	1.6
158	25/5/2010	5	26	6	661647	2177577.186	2.5	1.5
159	4/6/2010	3	5	19	662045	2177343.914	2.413	1.5
160	20/6/2010	22	34	32	663691	2176183.35	4	2
161	24/2/2011	2	35	22	664029	2175978.339	4.209	1.5
162	30/3/2011	17	4	19	663749	2176231.475	3.695	1.8
163	10/4/2011	2	17	23	661838	2177351.999	3.037	2
164	13/4/2011	8	53	52	662172	2177752.435	2.744	1.3
165	17/4/2011	13	3	47	661964	2177415.127	4.354	1.9
166	19/4/2011	3	4	22	663762	2176094.338	3.783	1.5
167	28/4/2011	16	32	16	662484	2174333.644	2.719	1.9
168	2/5/2011	15	4	0	663657	2176077.869	3.216	1.2
169	9/5/2011	4	41	32	663851	2176149.393	3.838	2
170	10/5/2011	1	2	54	661803	2177559.787	2.458	1.7
171	14/5/2011	6	37	32	661948	2177472.551	2.149	1.8
172	1/6/2011	3	41	57	661959	2177868.945	2.403	1.2
173	11/6/2011	20	5	41	663082	2176348.238	0.374	1.9
174	17/6/2011	20	1	34	662318	2178624.95	3.792	2.2
175	11/7/2011	11	13	29	661917	2177351.606	2.882	1.2
176	14/7/2011	3	22	50	663756	2176247.039	3.233	1.6
177	19/8/2011	16	19	54	661686	2177819.972	3.98	1.6
178	19/8/2011	16	21	22	661579	2177723.801	3.239	1.1

179	1/9/2011	10	9	18	663887	2176358.94	3.472	1.3
180	1/9/2011	10	9	55	664130	2176163.026	3.734	1.8
181	8/9/2011	12	45	13	661655	2177410.115	3.55	1.9
182	15/9/2011	18	46	48	661664	2177703.541	3.976	1.4
183	30/9/2011	10	52	58	661706	2179074.346	3.54	2.1
184	18/12/2011	2	14	30	663838	2176395.024	3.441	1.8
185	24/12/2011	20	12	40	661873	2177643.45	2.533	1.7
186	27/12/2011	1	20	43	663240	2176215.745	3.161	1.6
187	27/1/2012	21	27	8	661939	2177800.128	2.967	1.4
188	5/3/2012	9	34	58	662341	2179257.235	1.243	1.9
189	25/3/2012	14	19	33	662567	2178109.159	2.063	1.7
190	4/4/2012	2	3	44	662299	2177543.265	2.571	1.4
191	11/4/2012	13	25	48	664212	2176071.908	3.796	2
192	25/4/2012	15	33	31	661993	2177450.813	2.424	2.2
193	11/5/2012	23	50	37	664146	2176355.788	3.657	2
194	26/5/2012	21	19	34	661873	2175443.912	3.088	2
195	2/6/2012	7	48	11	664338	2174547.649	4.299	1.9
196	21/6/2012	19	20	20	662194	2177827.903	2.754	1.9
197	5/7/2012	3	19	58	664081	2176360.724	3.372	1.7
198	15/7/2012	3	43	36	662363	2179175.518	1.032	2.1
199	21/7/2012	5	18	3	664051	2176458.966	3.542	1.4
200	24/7/2012	23	57	31	662080	2177686.281	3.279	2.1
201	26/7/2012	16	32	25	662668	2178556.188	1.408	1.7
202	31/7/2012	12	54	60	663849	2176026.501	3.067	1.3
203	6/8/2012	23	53	17	663129	2176121.741	3.32	1
204	11/9/2014	17	17	29	661225	2177475.955	2.101	1
205	24/9/2014	19	9	15	661221	2177784.762	2.095	1.2
206	26/9/2014	0	55	39	661746	2177974.379	2.064	1.5
207	26/9/2014	23	14	46	663154	2176347.793	2.195	1.6
208	28/9/2014	12	35	7	661314	2177317.362	1.928	0.9
209	12/10/2014	7	34	30	661430	2177894.027	2.123	1.9
210	12/10/2014	20	34	12	661886	2177860.53	2.284	1.1
211	21/10/2014	8	21	7	663000	2176059.683	2.5	1.4
212	28/10/2014	3	54	45	661428	2177323.921	2.403	1.1
213	4/11/2014	12	37	57	663044	2176244.944	2.278	1.6
214	11/11/2014	21	31	1	661582	2177875.481	2.091	1.9
215	19/11/2014	13	7	11	661483	2177581.238	2.298	1.5
216	20/11/2014	7	15	3	661484	2177774.969	2.26	0.9
217	21/11/2014	2	3	35	661791	2177471.123	1.803	0.9
218	21/11/2014	13	57	48	661547	2177715.759	2.295	1.8
219	30/11/2014	3	18	38	663126	2176222.447	2.289	0.9
220	18/12/2014	3	40	8	663076	2176083.618	2.5	2
221	4/1/2015	21	13	10	661646	2177526.26	1.981	0.7
222	4/1/2015	21	14	47	662030	2177404.658	1.305	1.9
223	8/1/2015	1	43	44	663082	2176141.243	1.52	2
224	8/1/2015	18	4	7	661927	2175332.594	1.196	1.8

<b>225</b>	10/1/2015	7	31	19	661770	2177139.949	2.146	1.5
<b>226</b>	12/1/2015	7	44	16	661984	2177356.643	2.149	1.3
<b>227</b>	24/1/2015	11	21	49	661566	2177317.427	1.19	1.6
<b>228</b>	8/2/2015	1	52	32	662931	2176210.703	2.286	2
<b>229</b>	10/2/2015	5	39	11	661663	2177518.664	2.415	1.7
<b>230</b>	13/2/2015	4	11	30	663090	2176165.661	2.288	1.8
<b>231</b>	18/2/2015	14	16	42	662347	2178057.333	1.802	2
<b>232</b>	21/2/2015	22	12	49	663052	2176266.051	2.266	1.6
<b>233</b>	26/2/2015	23	41	54	661553	2178182.954	1.991	1.6
<b>234</b>	1/3/2015	4	10	15	663138	2175868.333	2.908	1.3
<b>235</b>	3/3/2015	22	12	44	661545	2177462.247	2.434	1.7
<b>236</b>	4/3/2015	0	38	23	661467	2177781.458	2.234	1.7
<b>237</b>	6/3/2015	6	59	7	663117	2176103.925	2.293	2
<b>238</b>	7/3/2015	16	29	9	662972	2176335.056	2.28	1.4
<b>239</b>	8/3/2015	11	42	51	661768	2177500.799	2.4	1.7
<b>240</b>	13/3/2015	11	48	40	661576	2177501.272	1.904	1.5
<b>241</b>	16/3/2015	11	3	27	661660	2177435.62	2.451	1.9
<b>242</b>	17/3/2015	18	9	48	663135	2175944.679	2.621	1.4
<b>243</b>	18/3/2015	3	21	19	663331	2176136.875	2.5	2.1
<b>244</b>	19/3/2015	18	6	24	663237	2175867.021	2.605	1.2
<b>245</b>	20/3/2015	0	33	5	662267	2177264.017	2.203	1.5
<b>246</b>	28/3/2015	11	22	35	661999	2177506.224	2.275	1.8
<b>247</b>	30/3/2015	21	53	5	662311	2177408.321	2.65	2
<b>248</b>	31/3/2015	22	8	40	662326	2177412.892	2.537	1.9
<b>249</b>	10/4/2015	13	26	46	662047	2177865.309	2.289	2.5
<b>250</b>	15/4/2015	9	44	35	662529	2177470.089	2.629	2
<b>251</b>	30/5/2015	8	41	25	662481	2177579.24	1.818	1.9
<b>252</b>	7/6/2015	7	4	27	663602	2176265.558	2.5	1.9
<b>253</b>	23/7/2015	21	15	48	661337	2177586.559	2.076	1.8
<b>254</b>	25/7/2015	21	37	20	661974	2177499.354	2.292	2.1
<b>255</b>	28/7/2015	5	57	56	662037	2177378.16	2.453	1.6
<b>256</b>	16/8/2015	14	29	16	662263	2177862.846	1.564	2.8
<b>257</b>	19/8/2015	7	9	9	663768	2175897.351	2.467	2.1
<b>258</b>	28/8/2015	9	12	46	661905	2177597.247	2.586	1.8
<b>259</b>	5/9/2015	14	58	10	661753	2177505.093	2.403	1.9
<b>260</b>	7/9/2015	21	58	1	661815	2174496.929	2.296	2.2
<b>261</b>	11/10/2015	6	22	21	663152	2176372.125	2.858	1.7
<b>262</b>	12/10/2015	6	7	31	661948	2177465.91	2.255	1.8
<b>263</b>	2/11/2015	7	5	33	661800	2177281.914	2.697	1.9
<b>264</b>	6/11/2015	18	37	46	663558	2176224.19	2.288	2.3
<b>265</b>	2/12/2015	16	52	5	662393	2177212.033	2.124	1.6
<b>266</b>	5/12/2015	10	31	32	662300	2177547.702	2.061	1.8
<b>267</b>	6/12/2015	10	27	3	662757	2175868.167	3.76	2
<b>268</b>	22/12/2015	0	17	50	661653	2177506.403	2.5	2.1
<b>269</b>	22/12/2015	5	25	3	663444	2176224.259	2.165	1.7
<b>270</b>	18/1/2016	10	29	29	661472	2177322.106	2.77	1.8

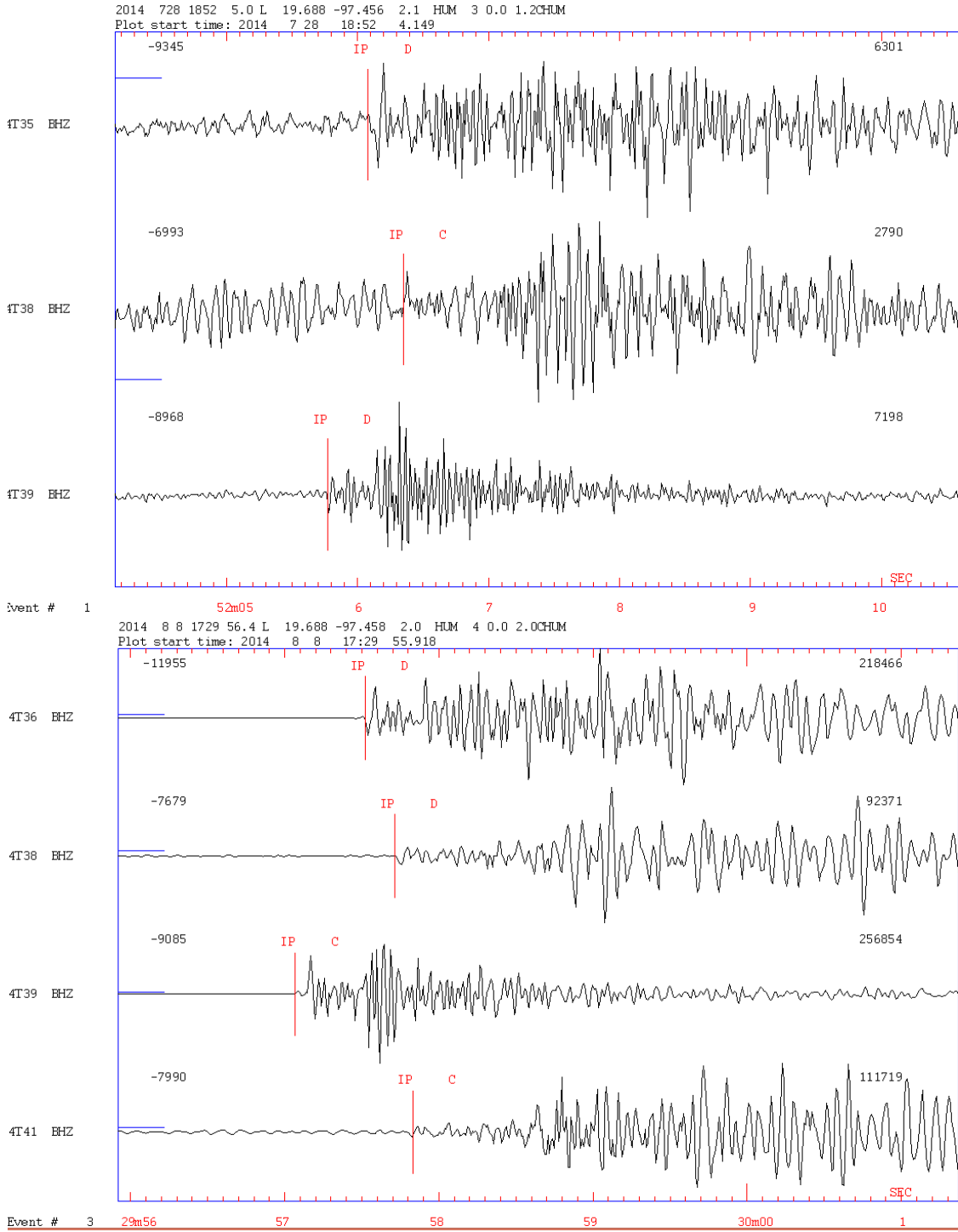


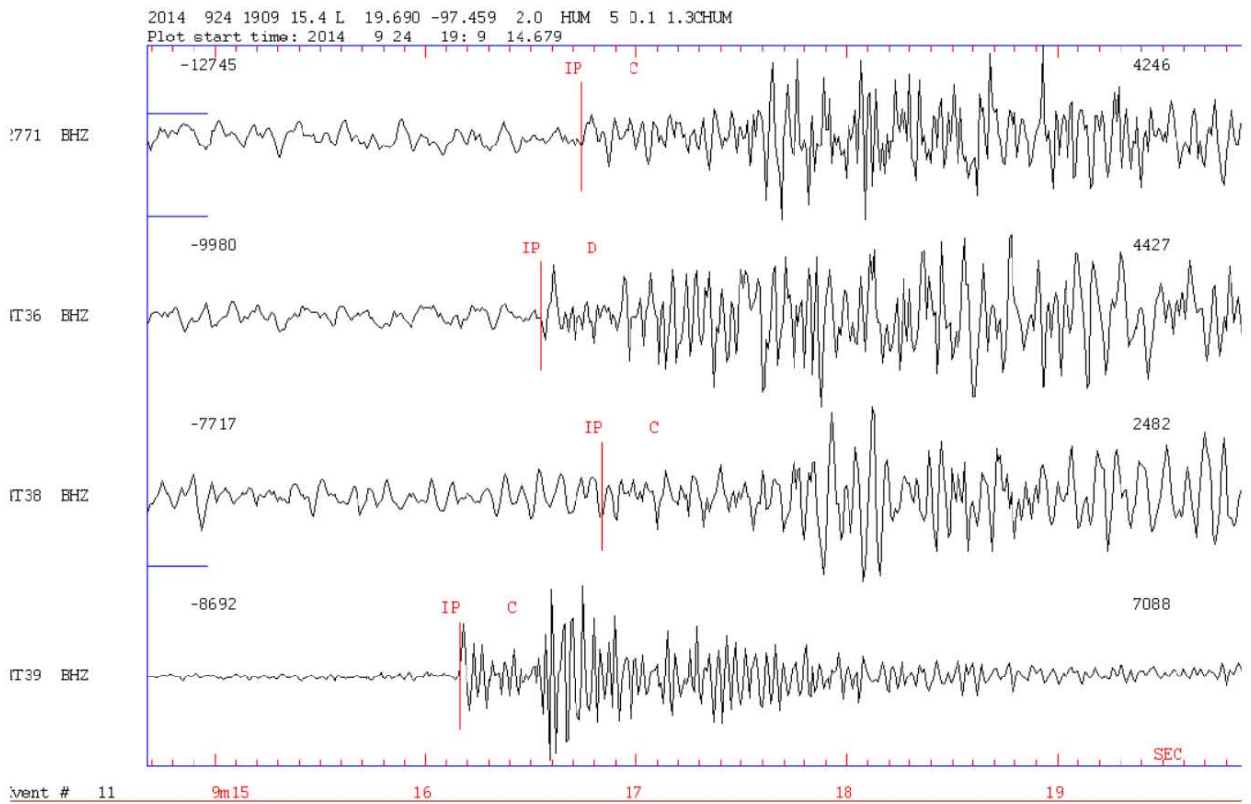
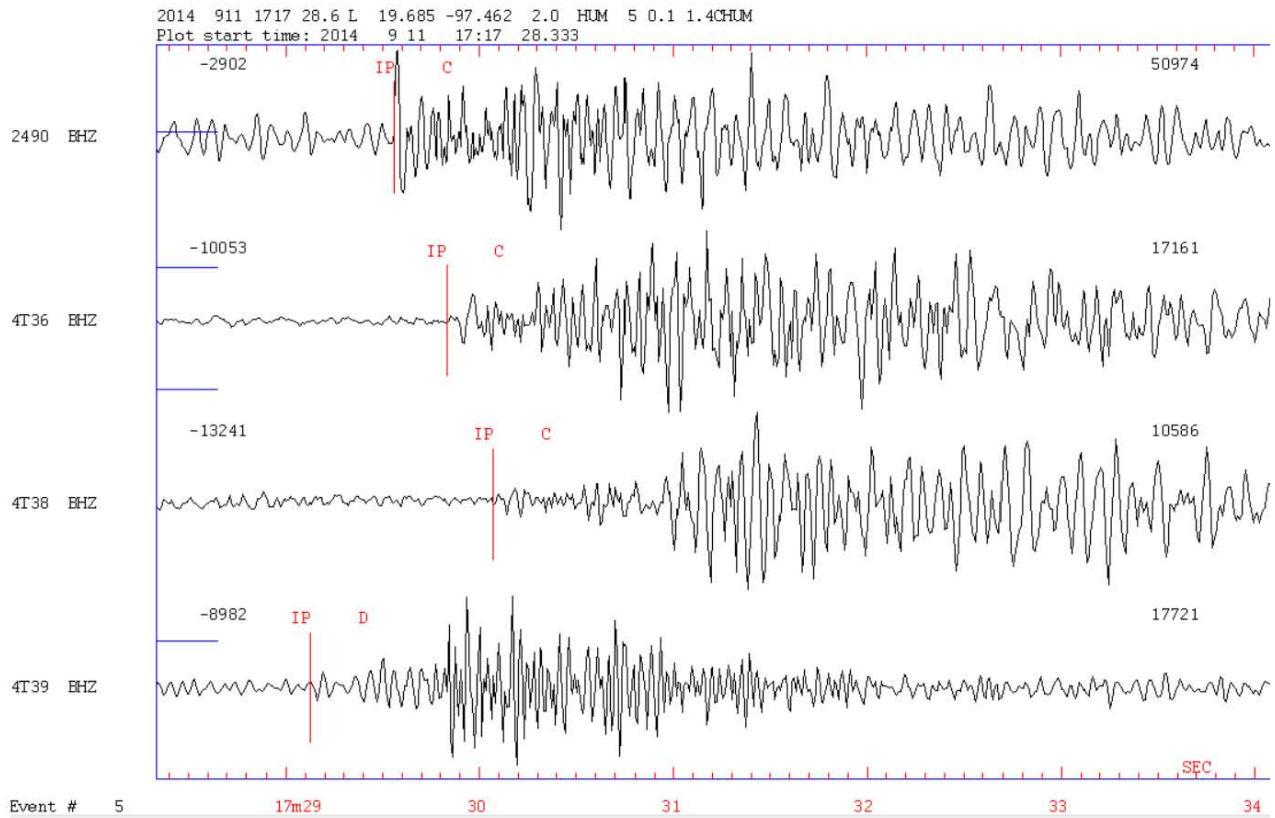
<b>271</b>	18/1/2016	10	29	36	661550	2177310.643	2.838	1
<b>272</b>	29/1/2016	22	49	45	661513	2177640.178	1.992	1.7
<b>273</b>	1/2/2016	13	36	30	661509	2177409.891	2.686	1.5
<b>274</b>	3/2/2016	21	22	45	661738	2177167.335	2.801	1.6
<b>275</b>	6/2/2016	10	31	46	662011	2177397.845	2.526	2
<b>276</b>	6/2/2016	11	51	11	661732	2178919.602	1.565	2.3
<b>277</b>	8/2/2016	21	16	3	662068	2175503.24	1.858	4.6
<b>278</b>	8/2/2016	21	17	29	662268	2174692.549	1.466	1.1
<b>279</b>	8/2/2016	21	18	3	662503	2174682.51	2.789	1
<b>280</b>	8/2/2016	21	29	42	661274	2176773.48	1.81	1.9
<b>281</b>	8/2/2016	21	31	31	661172	2176834.545	1.695	1.7
<b>282</b>	8/2/2016	21	32	47	661162	2176838.887	1.8	1.9
<b>283</b>	8/2/2016	21	33	35	661335	2176933.429	1.801	1.5
<b>284</b>	8/2/2016	21	37	5	661254	2177139.703	1.946	1.6
<b>285</b>	8/2/2016	21	48	24	661104	2176898.137	1.809	2
<b>286</b>	8/2/2016	21	49	57	661301	2177157.839	1.663	1.6
<b>287</b>	8/2/2016	21	52	6	661274	2176898.566	1.804	2.6
<b>288</b>	8/2/2016	21	56	3	661255	2177082.145	1.683	1.7
<b>289</b>	8/2/2016	21	56	29	661479	2176910.378	1.815	2.1
<b>290</b>	8/2/2016	21	57	6	661086	2176957.747	1.802	1.3
<b>291</b>	8/2/2016	21	57	23	661086	2176968.816	1.82	1.6
<b>292</b>	8/2/2016	22	1	23	661073	2177001.908	1.811	1.4
<b>293</b>	8/2/2016	22	3	26	661160	2176864.327	1.947	1.9
<b>294</b>	8/2/2016	22	16	56	661307	2176544.633	1.8	2.2
<b>295</b>	8/2/2016	22	24	25	661119	2177275.741	1.641	1.8
<b>296</b>	9/2/2016	6	36	2	661511	2177706.581	1.496	1.9
<b>297</b>	3/6/2016	9	35	27	663407	2176005.838	2.58	2.5
<b>298</b>	20/6/2016	12	56	1	661854	2177546.971	2.744	1.9

## Anexo C

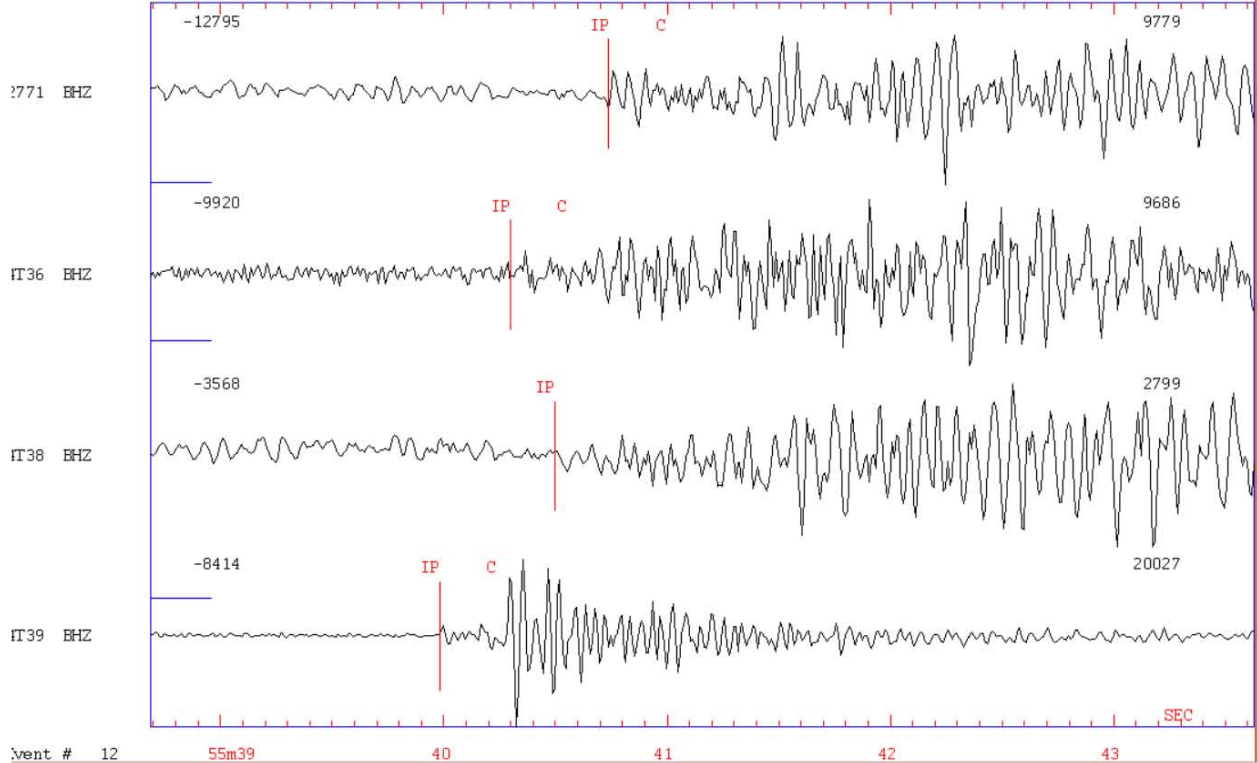
Polaridades de los mecanismos compuestos dentro del campo Geotérmico Los Humeros.

➤ *Mecanismo Compuesto en la ZNW (círculo rojo), Figura 27*

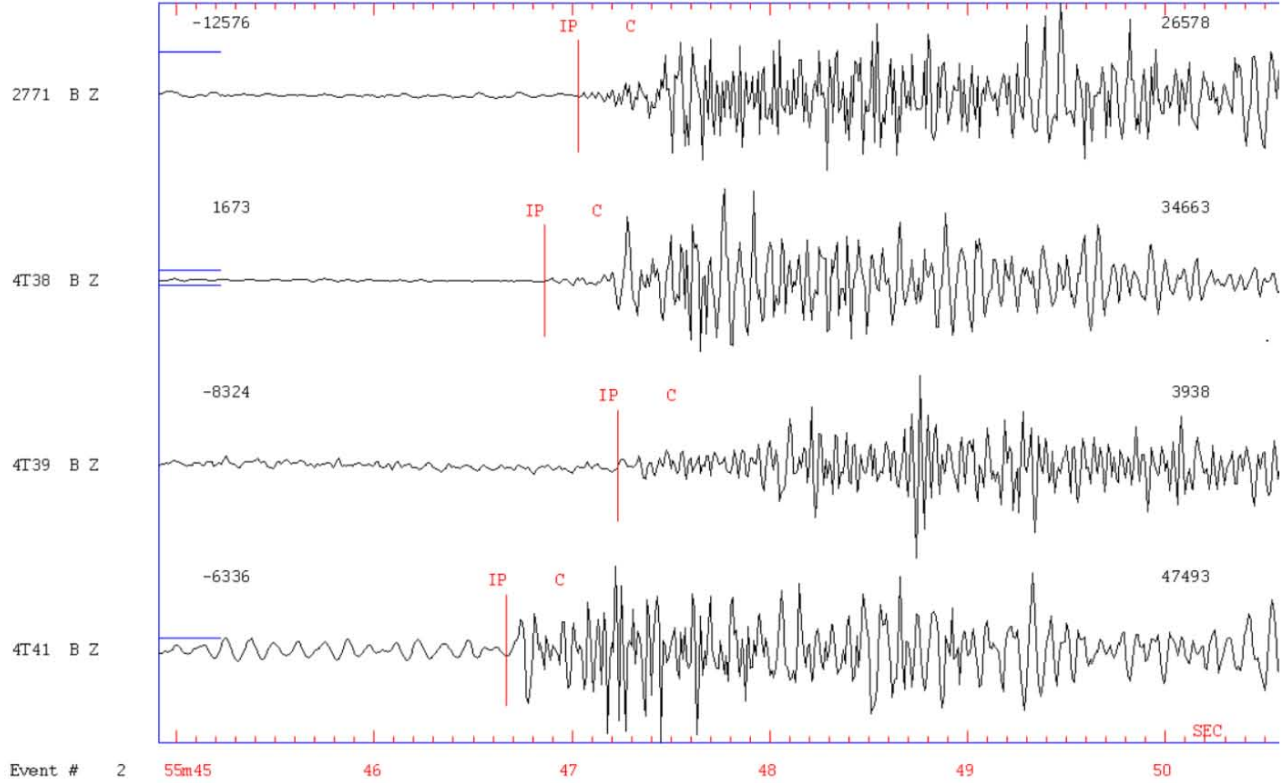




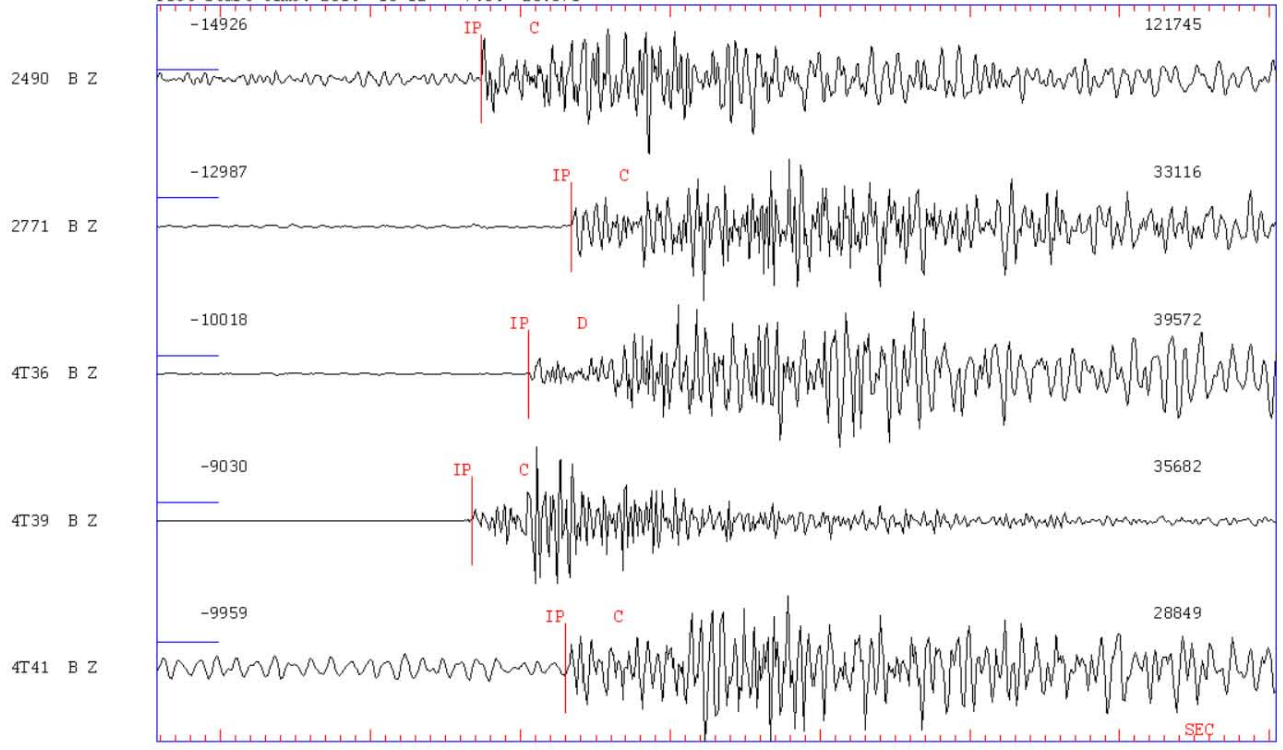
2014 09 26 00:55 39.5 L 19.689 -97.454 1.3 HUM 5 0.1 1.5CHUM  
Plot start time: 2014 9 26 0:55 38.686



2014 10 5 21:55 46.2 L 19.660 -97.450 1.2 HUM 4 0.0 1.7CHUM  
Plot start time: 2014 10 5 21:55 44.910

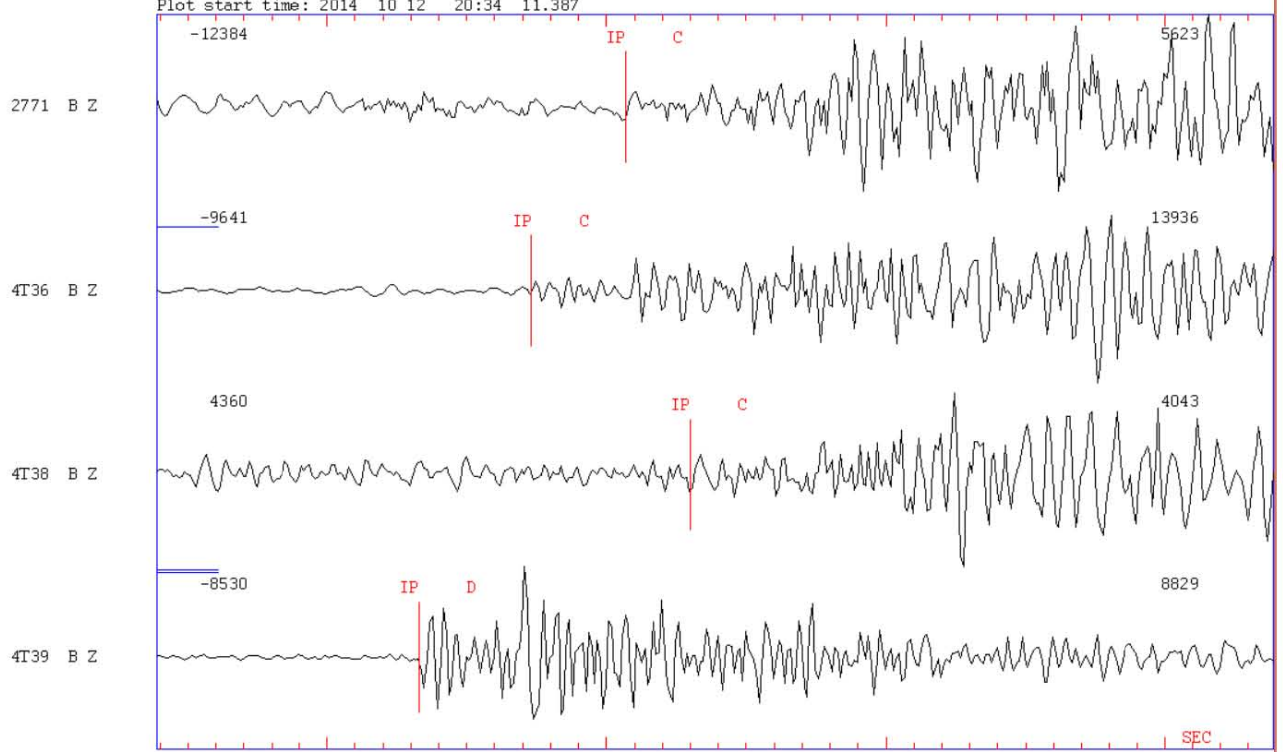


2014 1012 0734 29.9 L 19.689 -97.460 2.1 HUM 5 0.1 1.8CHUM  
Plot start time: 2014 10 12 7:34 28.571



Event # 3 34m29 30 31 32 33 34 35 36

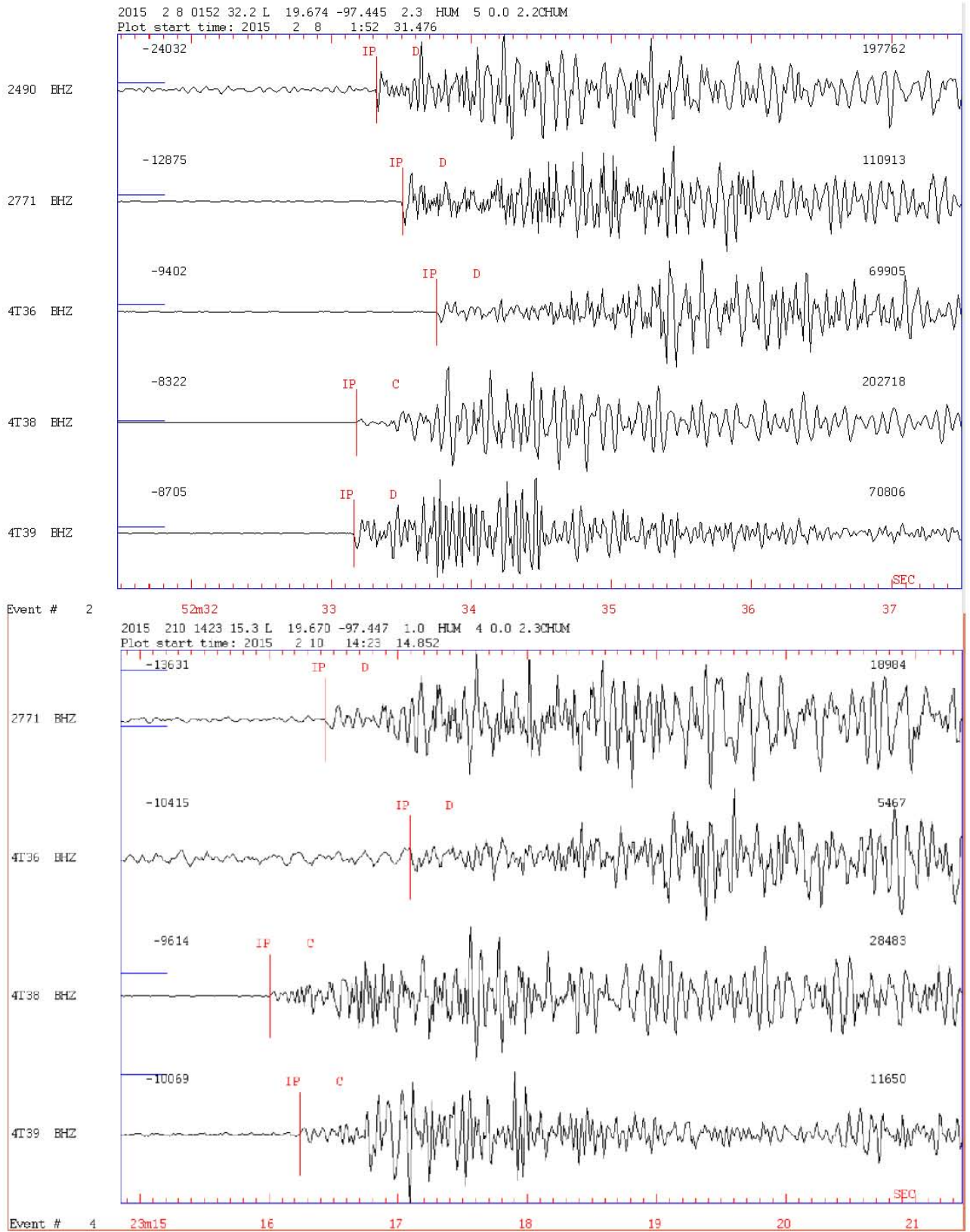
2014 1012 2034 11.7 L 19.690 -97.461 1.6 HUM 5 0.1 1.1CHUM  
Plot start time: 2014 10 12 20:34 11.387



Event # 4 34m12 13 14 15

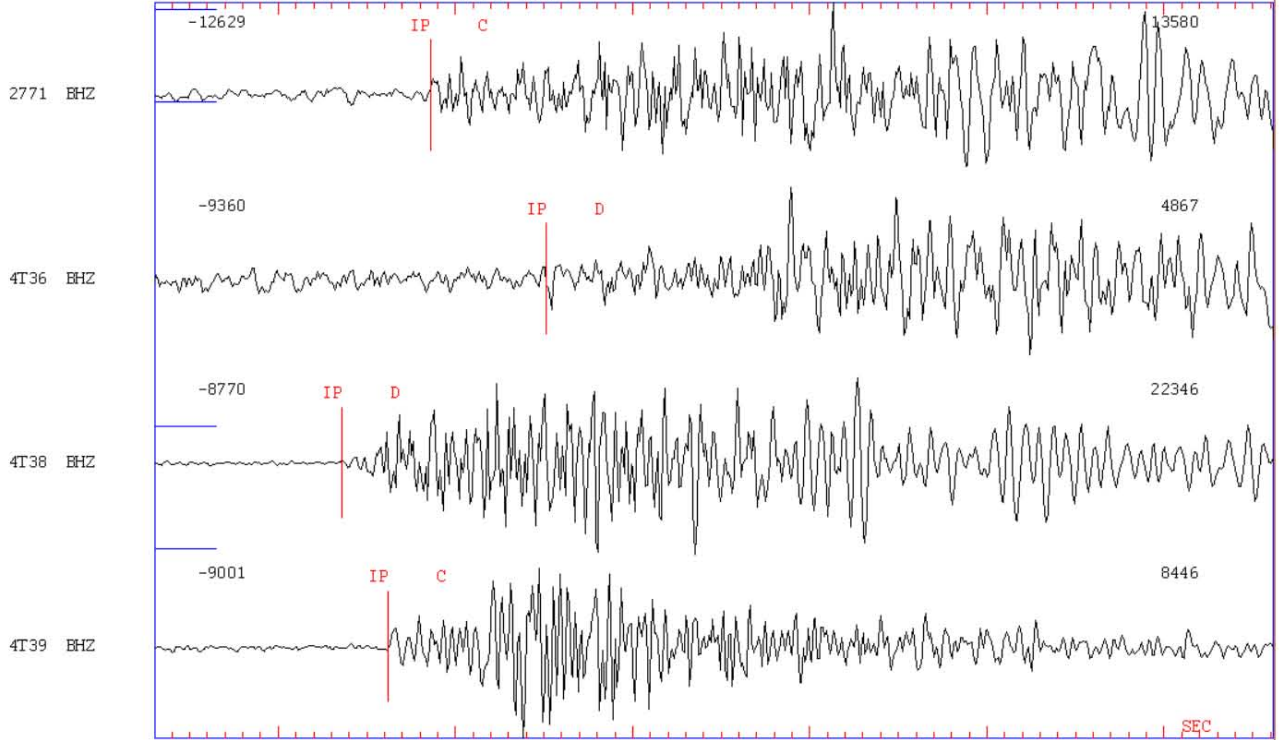


➤ Mecanismo Compuesto en la ZE (círculo verde), Figura 27



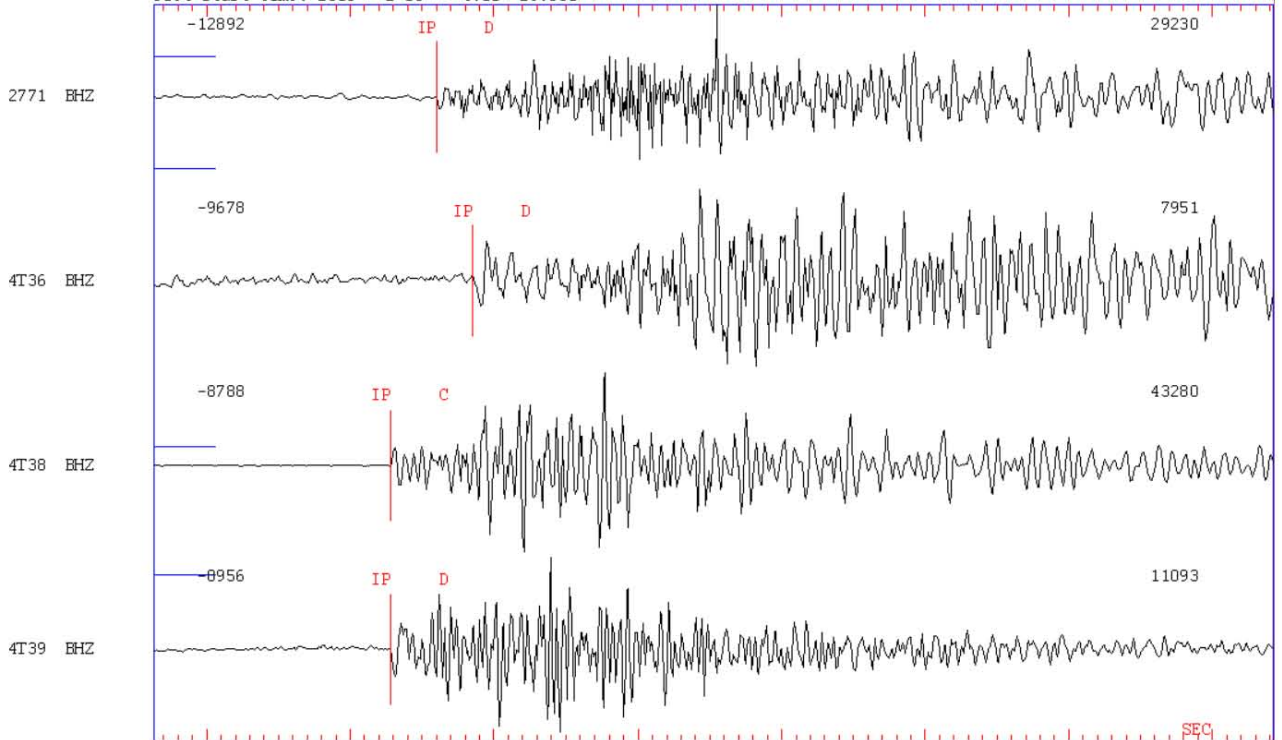


2015 210 1945 46.6 L 19.670 -97.443 1.4 HUM 4 0.0 1.9CHUM  
Plot start time: 2015 2 10 19:45 46.303



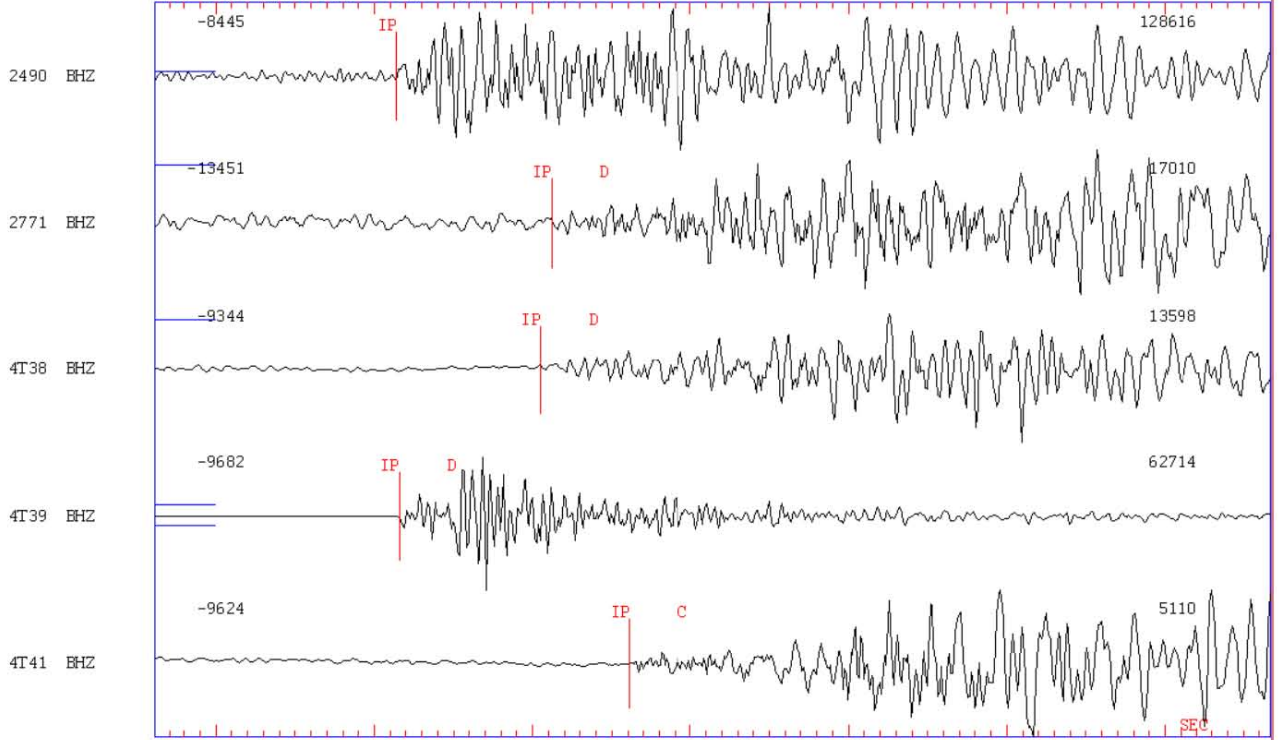
Event # 5

2015 213 0411 30.3 L 19.675 -97.443 2.1 HUM 5 0.0 2.1CHUM  
Plot start time: 2015 2 13 4:11 29.631



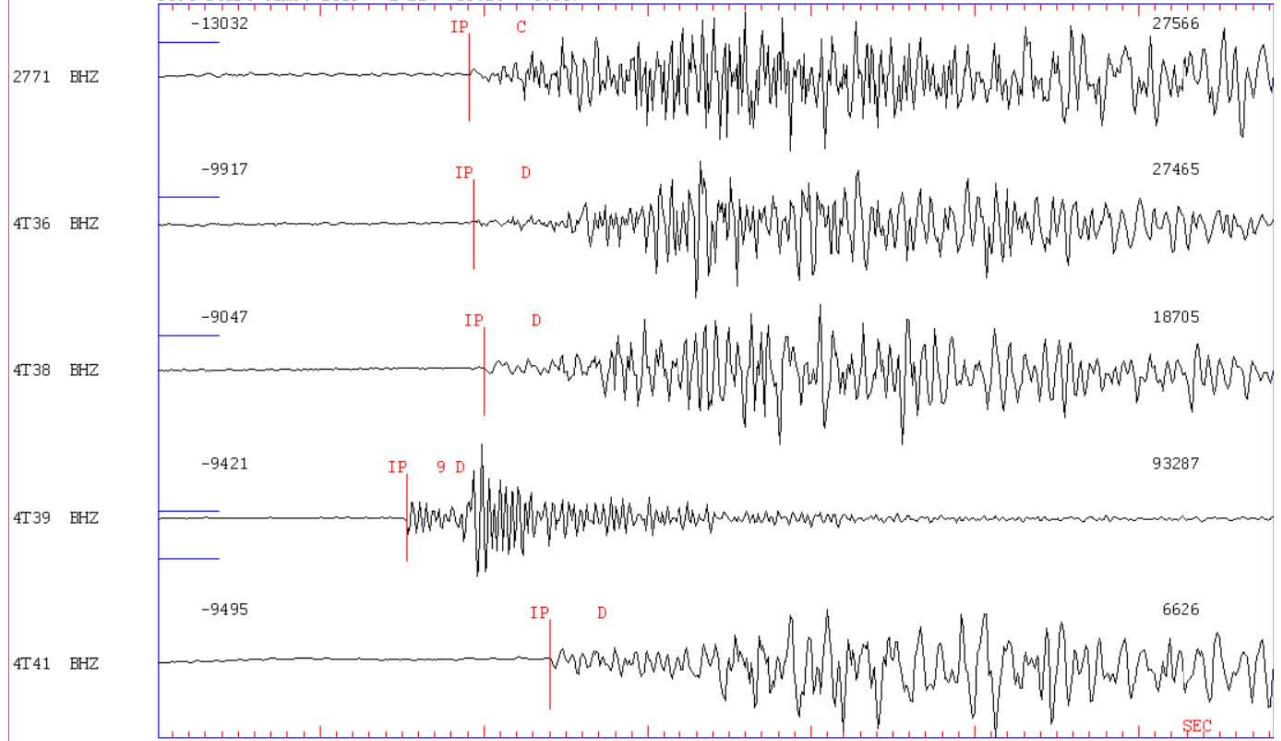
Event # 6

2015 218 1416 42.6 L 19.691 -97.452 1.6 HUM 6 0.1 2.1CHUM  
Plot start time: 2015 2 18 14:16 41.606



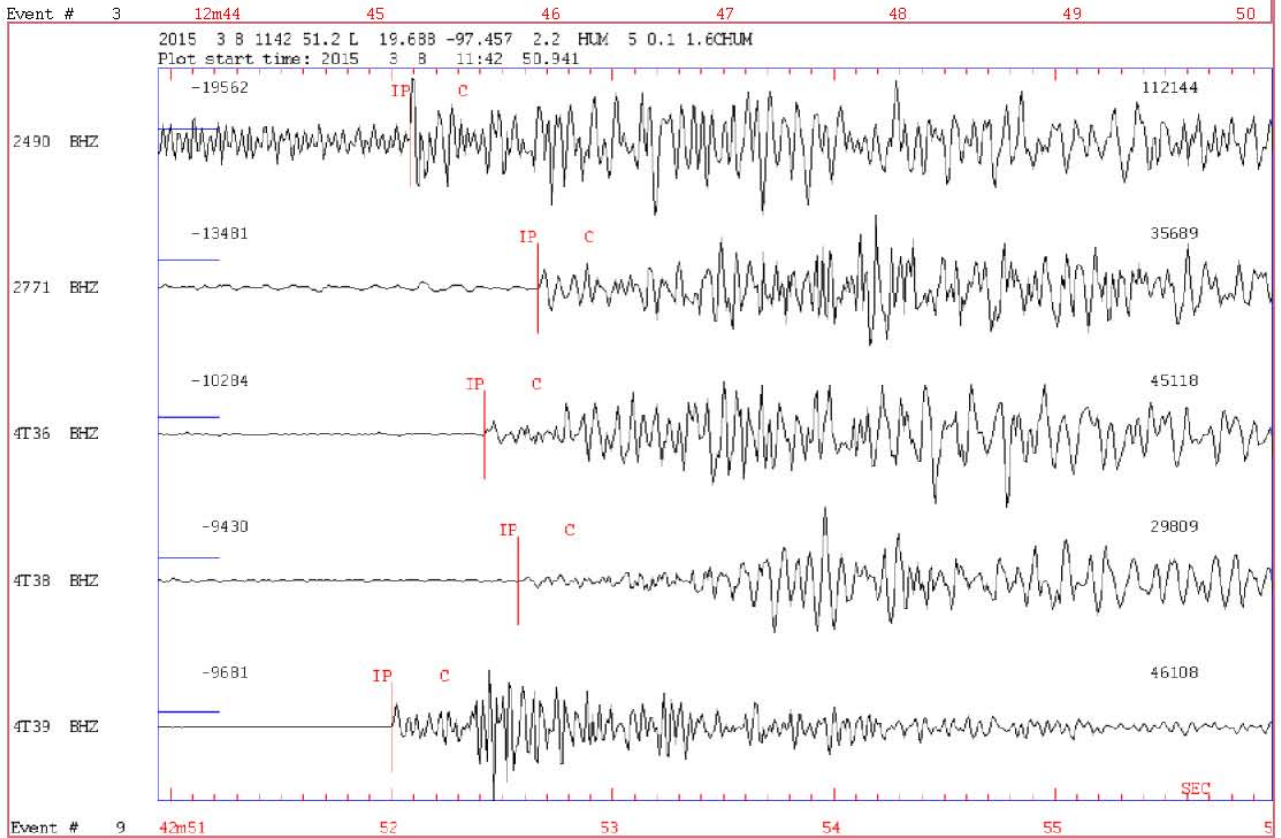
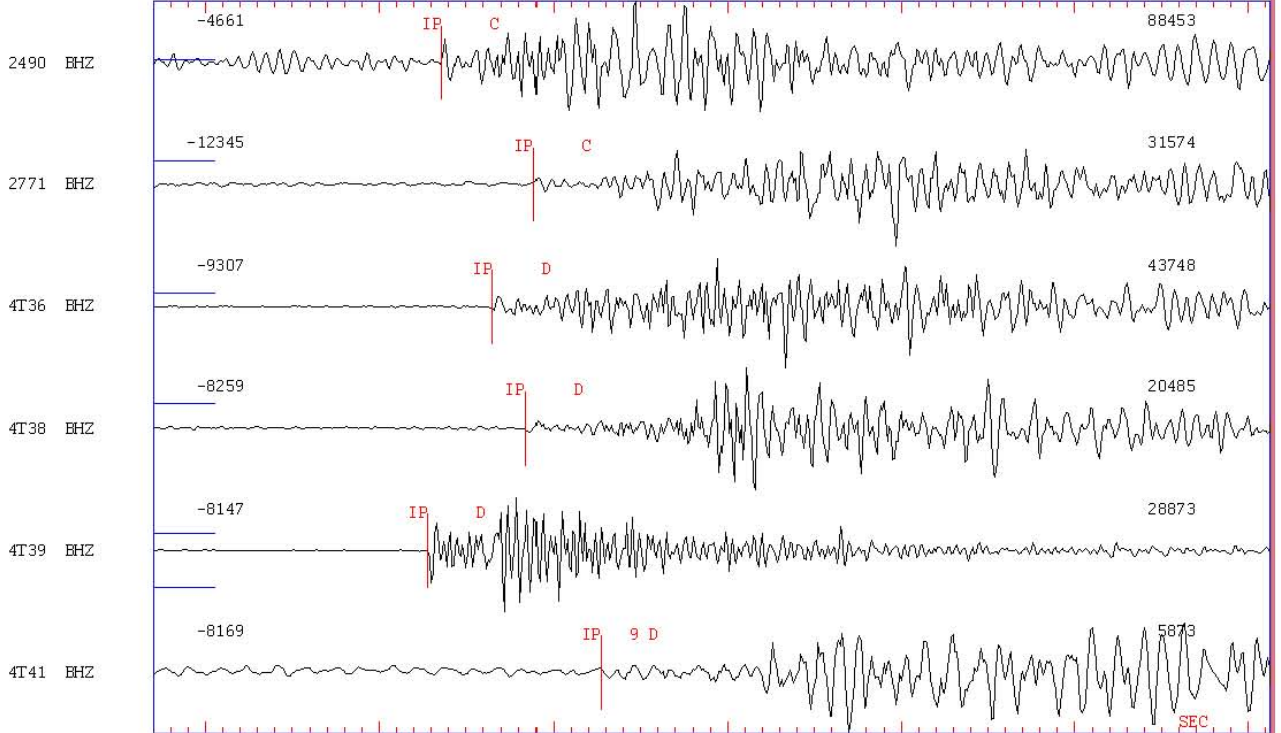
Event # 7

2015 222 1524 8.7 L 19.681 -97.464 2.1 HUM 6 0.1 2.1CHUM  
Plot start time: 2015 2 22 15:24 8.007

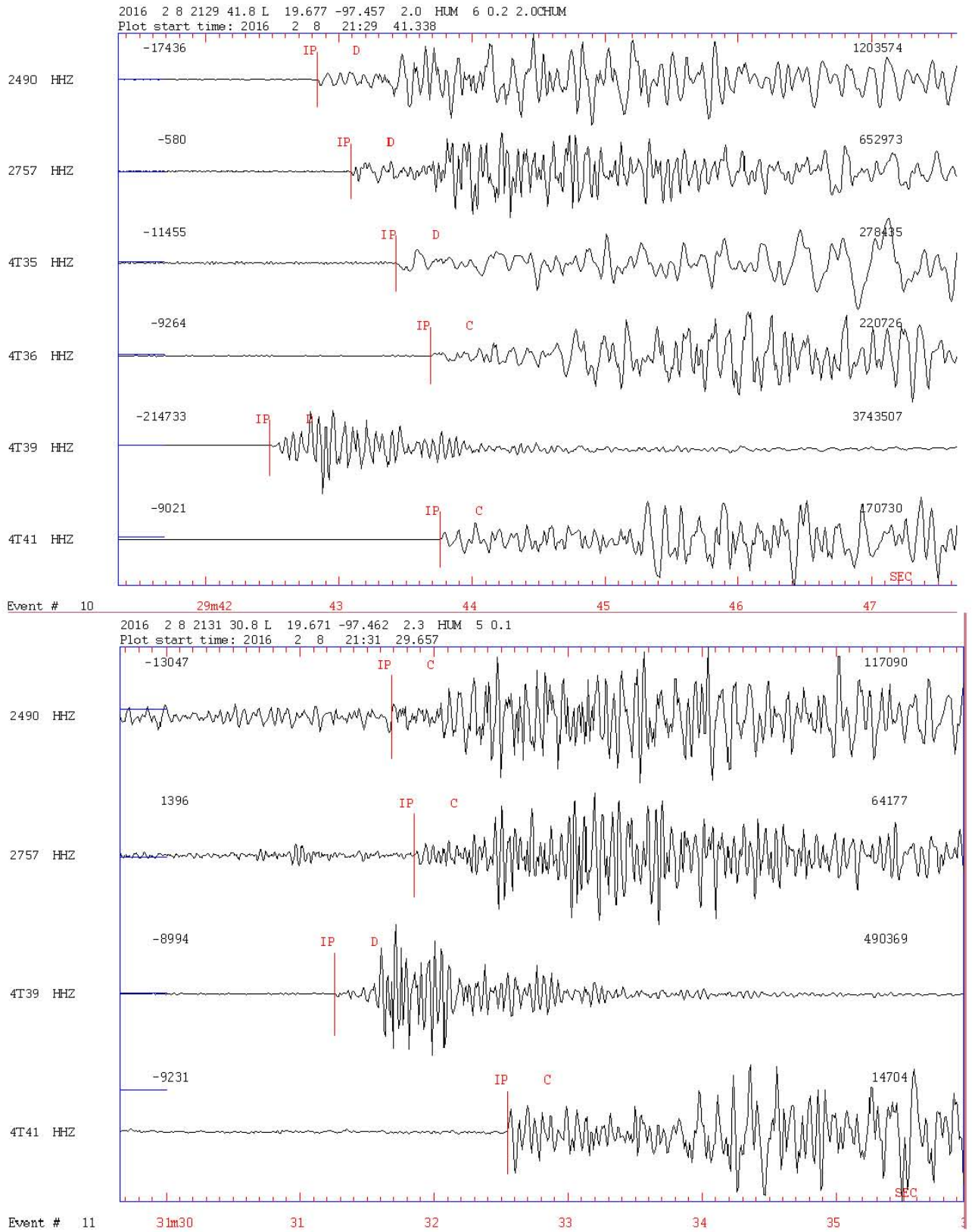


Event # 8

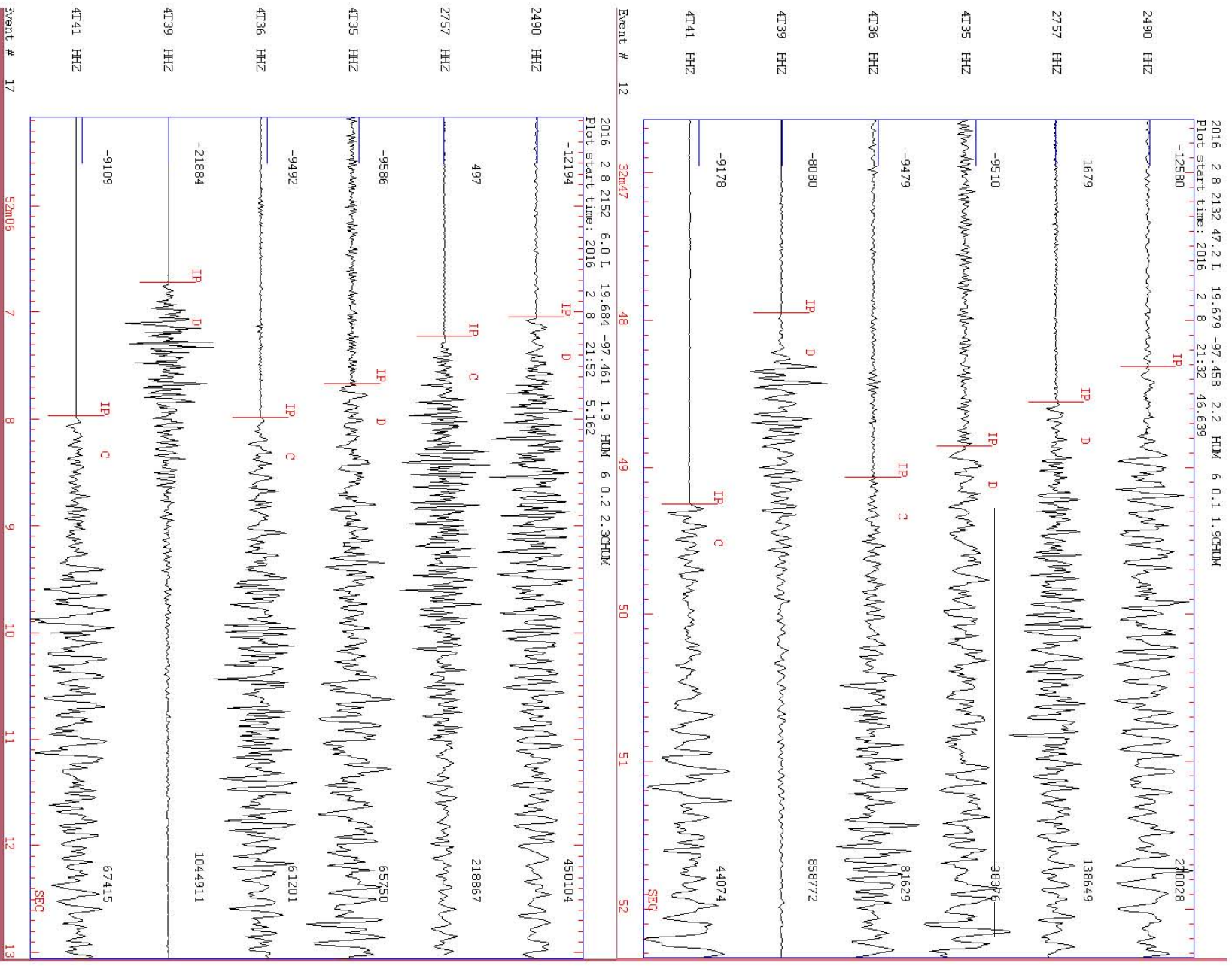
2015 3 3 22:12 44.5 L 19.688 -97.458 2.2 HUM 6 0.0 1.6CHUM  
Plot start time: 2015 3 3 22:12 43.700



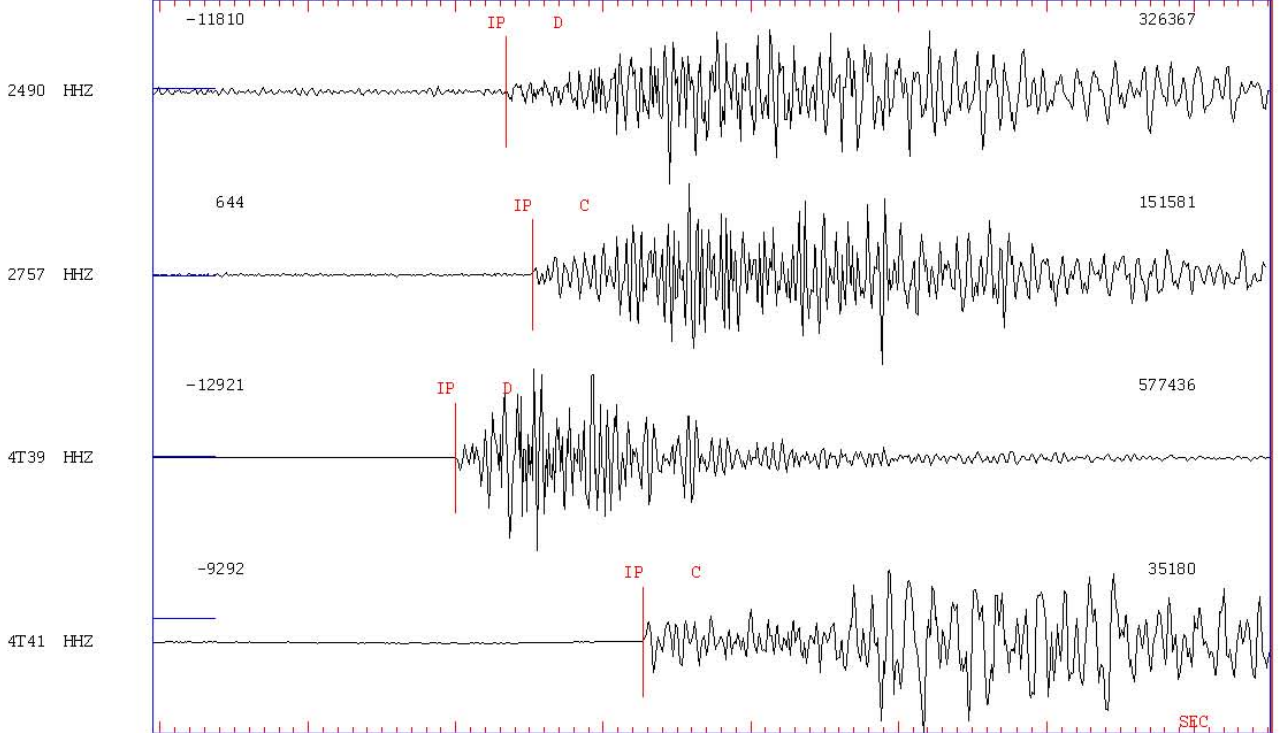
➤ Mecanismo Compuesto en la ZW del Pueblo (círculo morado), Figura 27



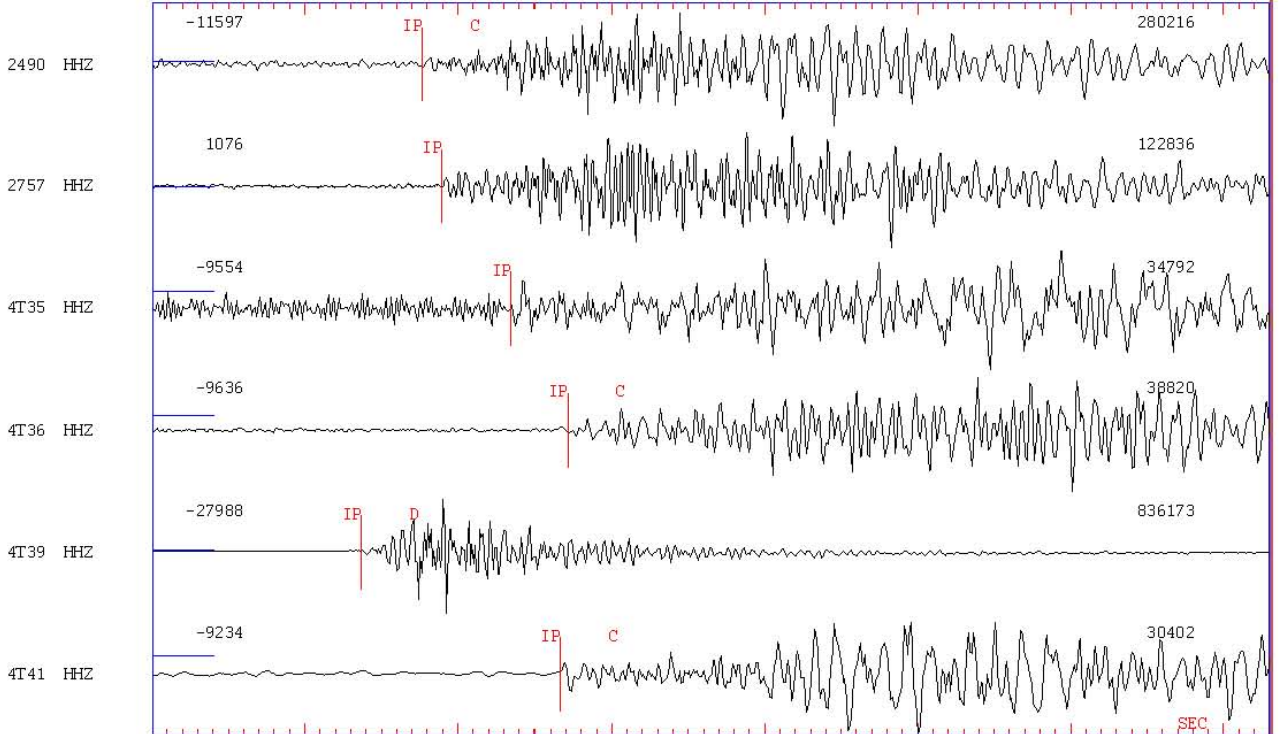




2016 2 8 2156 3.3 L 19.683 -97.459 1.9 HUM 6 0.2 1.7CHUM  
Plot start time: 2016 2 8 21:56 1.951



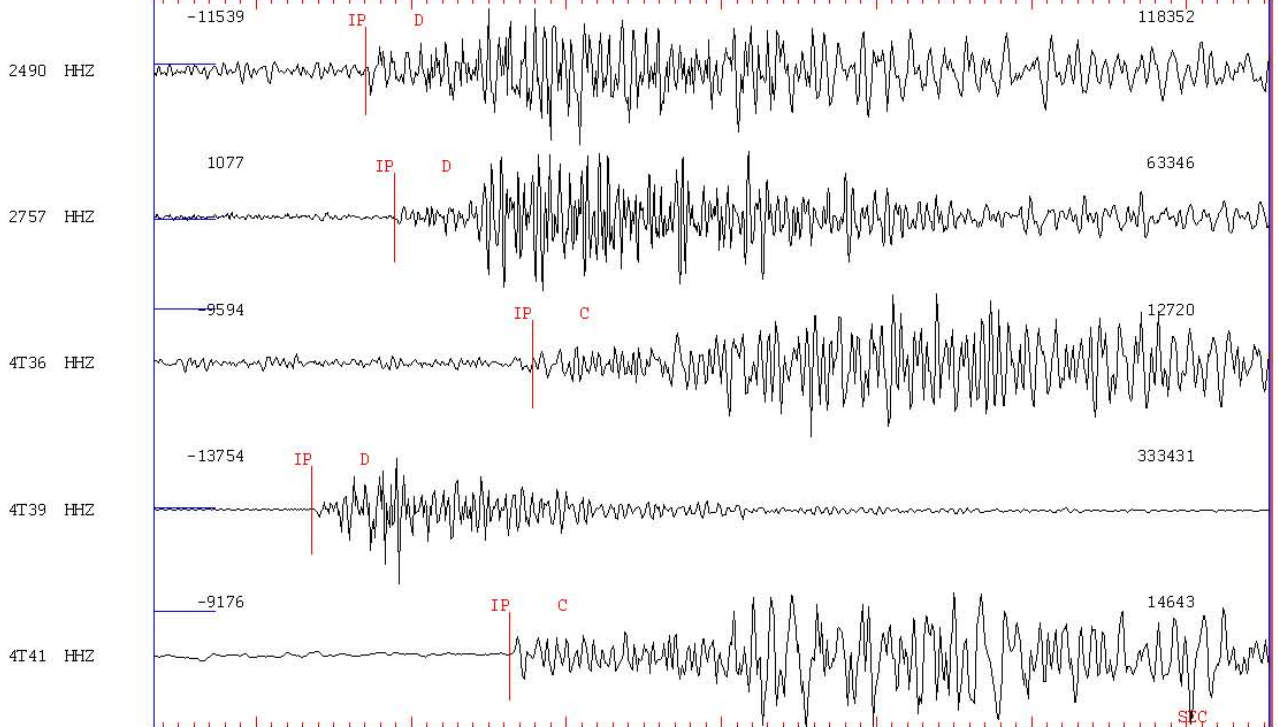
Event # 19 56m02 3 4 5 6 7 8 9  
2016 2 8 2156 28.7 L 19.683 -97.460 2.0 HUM 6 0.2 2.0CHUM  
Plot start time: 2016 2 8 21:56 28.004



Event # 20 56m29 30 31 32 33 34 35

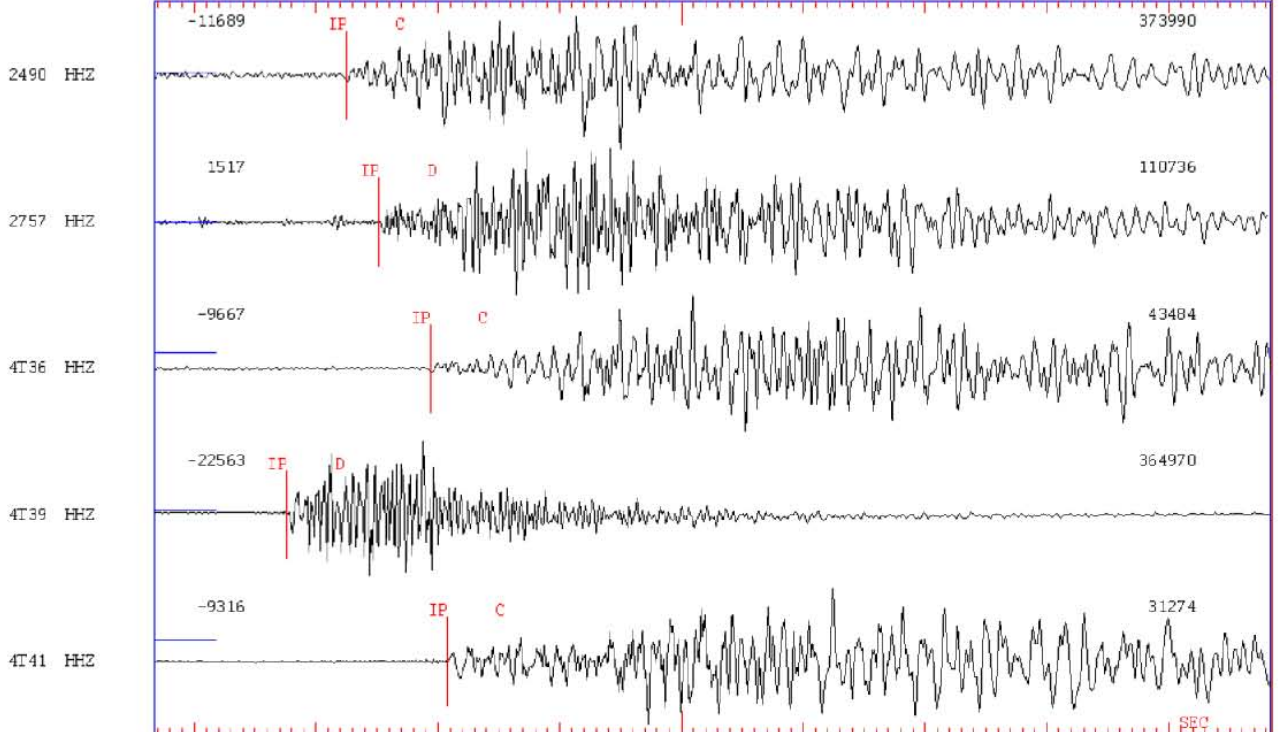


2016 2 8 21:57 6.1 L 19.684 -97.464 1.8 HUM 6 0.1  
Plot start time: 2016 2 8 21:57 5.339



Event # 21

2016 2 8 22:16 56.4 L 19.675 -97.467 1.8 HUM 5 0.1  
Plot start time: 2016 2 8 22:16 55.671



Event # 25