



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería

Colegio de Geofísica

Identificación de alteraciones hidrotermales en el municipio de Compostela, Nayarit, utilizando el método Magnetotelúrico, como propuesta para explotación geotérmica en el área.

TESIS

Para obtener el grado de

INGENIERO GEOFÍSICO

Presenta

ALFREDO YAEL COBA BÁEZ

Director de tesis:

M.C. Julio Cesar González Hernández

Director externo:

Dr. Fernando Corbo Camargo

Codirector de tesis:

M.I. José Luis González Guevara

México, Puebla, Pue.

Diciembre, 2021



BUAP

Oficio No. SAC/1597/2021

C. ALFREDO Yael COBA BAEZ
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA
Presente.

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“IDENTIFICACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES EN EL MUNICIPIO DE COMPOSTELA, NAYARIT, UTILIZANDO EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO, COMO PROPUESTA PARA LA EXPLOTACIÓN GEOTÉRMICA EN EL ÁREA.”

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor de tema al Mtro. Julio César González Hernández y como Co Asesor al Mtro. José Luis González Guevara.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 01 de septiembre de 2021

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director

M'ACGZ /barv
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



Facultad
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: Mtro. Julio César González Hernández, asesor del tema de tesis:

“IDENTIFICACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES EN EL MUNICIPIO DE COMPOSTELA, NAYARIT, UTILIZANDO EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO, COMO PROPUESTA PARA LA EXPLOTACIÓN GEOTÉRMICA EN EL ÁREA.”

Presentada por el C. Alfredo Yael Coba Báez, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/1597/2021 con fecha de emisión 01 de septiembre de 2021, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 02 de septiembre de 2021


Mtro. Julio César González Hernández
Asesor de Tema

M'JCGH/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Dedicatoria

A mis padres, por su respaldo incondicional y por enseñarme a nunca darme por vencido.

A mis hermanos, por su compañía y paciencia en este largo periodo.

A Isa, por siempre estar ahí cuando lo he necesitado.

A Nadx, porque aún en mis peores momentos, nunca dejó de creer en mí.

A mis abuelos, por su sabiduría y experiencia transmitida en todo este tiempo, especialmente a mi abuela Laura, quien ya no tuvo la oportunidad de ver la conclusión de esta etapa.

*A toda mi familia, porque nunca dudaron en mostrarme su apoyo y cariño incondicional,
gracias a todos ustedes hoy soy quien soy.*

Gracias por todo.

Agradecimientos

Al Dr. Fernando Corbo por proporcionar los datos con los que se realizó esta tesis y especialmente por su paciencia e invaluable ayuda a lo largo de su desarrollo.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación tecnológica (PAPIIT) por la beca otorgada para el desarrollo de esta tesis, a través del proyecto IA103221: *Evaluación geotérmica y determinación de la fuente magmática en el graben San Pedro – Ceboruco*.

A mis maestros y en especial a mis directores internos, por transmitirme sus consejos y experiencia durante toda la carrera y su ayuda en los trámites necesarios para la aprobación de este trabajo.

Al comité y jurado, por darse el tiempo de realizar los comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo.

A los mejores amigos que me pudo dar la carrera, Perla, Julia y Oscar, en especial a este último, quien me mostró que se puede querer a un amigo como a un hermano y estuvo conmigo siempre. Oscar, gracias por tu invaluable ayuda para este trabajo.

Por las clases, los proyectos, los exámenes, los días sin dormir, los enojos, las alegrías, el estrés; y a todas las personas con las que coincidí, muchas gracias... Hoy sé que todo eso ha valido la pena.

ÍNDICE

RESUMEN.	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	3
1.1. Planteamiento del Problema.	4
1.2. Justificación.	4
1.3. Objetivo General.	5
1.3.1. Objetivos Específicos.	5
1.4. Alcances.	5
1.5. Limitaciones.	5
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES GEOTÉRMICOS	6
2.1. Geotermia	6
2.2. Contexto Geotérmico en México	7
2.3. Estudios previos en la zona	9
CAPITULO 3. MARCO GEOLOGICO.	11
3.1. Ubicación de la Zona de Estudio	11
3.2. Faja Volcánica Trans-Mexicana	12
3.3. Sierra Madre Occidental	14
3.4. Geología Regional y Local	17
3.4.1. Geología Estructural del Área de Estudio	17
3.4.2. Estratigrafía del Área de Estudio	20
3.5. Campo Geotérmico Domo San Pedro	23
3.6. Hidrogeología del Área de Estudio	25
CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO.	27
4.1. Teoría Electromagnética	27
4.2. Ecuaciones de Maxwell	28
4.2.1. Relaciones Constitutivas	30
4.3. Método Magnetotelúrico	30
4.4. Fuente del método	32

4.5. Profundidad de Investigación	33
4.6. Tensor de impedancias	34
4.7. Dimensionalidad	35
4.8. Modos de polarización	37
4.8.1. Modo Invariante	38
4.9. Distorsión Galvánica	38
CAPÍTULO 5. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.	39
5.1. Adquisición de Datos.	39
5.2. Metodología	41
5.3. Procesamiento de Datos.	42
5.3.1. Corrección de Distorsión Galvánica	43
5.4. Inversión 1D	44
5.5. Inversión 2D	45
CAPÍTULO 6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.	47
6.1. Discusión de Resultados	47
6.2. Interpretación de resultados	49
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	52
REFERENCIAS.	54
ANEXOS	58
I. Datos filtrados previo a realizar la inversión 1D	58
II. Curvas de ajuste para los modelos 1D.	60
III. Ajuste de curvas para Modelo 2D.	63

RESUMEN.

Dentro de los métodos de exploración en la rama de geofísica de fuente natural se encuentra el Magnetotelúrico (MT), el cual se basa en la medición de los campos electromagnéticos que circulan naturalmente en el subsuelo, permitiendo medir las variaciones de resistividad que existe en el medio.

Debido a la profundidad que alcanza este método es que se vuelve relevante, ya que se pueden realizar desde estudios someros hasta de cientos de kilómetros, por ejemplo, para yacimientos petroleros, de CO₂ o geotérmicos, e incluso análisis del mismo manto terrestre. Especialmente para yacimientos geotérmicos es que ha presentado grandes resultados, debido a que los contrastes de resistividades son evidentes entre los cuerpos ígneos y el material o estrato alterado por soluciones hidrotermales, ya que, la gran cantidad de iones que contienen estos fluidos, mismos que usualmente quedan como remanentes al cristalizar la roca, causan que se eleven los valores de conductividad eléctrica del medio. Es en esta zona donde también tienden a estar presentes sistemas de fisuras y fracturas por donde circuló el flujo de agua que causó las alteraciones, estas fallas poseen especial importancia, ya que influyen en la cantidad de calor que pueda proveer el medio para hacer circular el agua.

Dentro de la presente tesis se estudiará a profundidad el método mencionado y su aplicación para la exploración geotérmica, realizando un análisis de datos en dos zonas del municipio de Compostela, en el estado de Nayarit. Esta área es característica por poseer una gran red de volcanes pertenecientes al Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, siendo en teoría, una zona con potencial para la explotación geotérmica, hipótesis que se buscará apoyar o refutar con los resultados obtenidos en este trabajo.

ABSTRACT

Among the methods of exploration in the geophysics, there is one of natural source named Magnetotelluric (MT), which is based on the measurement of the electromagnetic fields which circulates naturally in the subsoil, allowing to measure the resistivity variations that exist on the field.

Due to the depth that this method reaches it becomes relevant, because it can be carried out from shallow studies up to hundreds of kilometers, i.e., for oil, CO₂ or geothermal fields, and even analysis of the Earth's mantle itself. Making emphasis on the feasibility of exploration for geothermal reservoirs is that this method has presented great results, because the resistivity contrasts are evident between igneous bodies and the material or stratum altered by hydrothermal solutions, due to the huge quantity of ions that these fluids contain, which usually stay as remnants when the rock crystallizes, causing the electrical conductivity values of the medium to rise. It is in this area where systems of fissures and fractures also tend to be present where the flow of the fluids circulated and caused the alterations, these fowls have a special importance since they influence the amount of heat that the medium can provide to circulate the fluids.

Within this thesis, the method and its application for geothermal exploration will be deeply studied, performing a data analysis in two areas of the municipality of Compostela, in the state of Nayarit. This area is characterized by the large network of volcanoes belonging to the Trans-Mexican Volcanic Belt, being in theory, an area with potential for geothermal exploitation, a hypothesis that will be sought to support or refute with the results obtained in this work.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

Desde el descubrimiento de la energía eléctrica, y su inclusión en la vida diaria del ser humano, este recurso ha sido de gran ayuda para el desarrollo de la humanidad, por tal motivo es que constantemente se buscan nuevas fuentes de energía. Originalmente se obtenía de recursos fósiles como petróleo y carbón, sin embargo, la situación del planeta en la actualidad ha propiciado que se desarrollen fuentes de energía que causen un menor impacto al medio ambiente. Algunas de estas son la energía solar, eólica, nuclear, entre otras, no obstante, una fuente de energía que se ha desarrollado y explotado en menor medida es la geotermia, la cual aprovecha el calor interno de la tierra para convertirlo en electricidad.

Una de las principales causas de la poca importancia que se le da a la energía geotérmica es a causa de los altos costos que conlleva la planeación y establecimiento de una central eléctrica con esta fuente, especialmente porque la fuente para aprovechar usualmente se encuentra a varios kilómetros bajo la superficie terrestre, elevando en gran manera los costes de producción, lo que causa que el capital se distribuya a otro tipo de producción más económico, a pesar de que los resultados que ha mostrado con centrales ya establecidas reflejan que la producción es más que rentable (SEMARNAT, 2015).

Para el caso de México, la presencia del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) ha permitido la formación de lugares idóneos para reservorios geotérmicos a lo largo del territorio nacional, dado que la presencia volcánica implica una alta temperatura en el subsuelo, provocando que se puedan dar movimientos de fluidos hidrotermales y se formen estos yacimientos. Algunos de los casos ya explotados son Los Humeros, Cerro Prieto, Los Azufres, entre otros.

Para este estudio fueron obtenidos 7 sondeos de MT con el equipo Phoenix, mismo que permite medir en todas las frecuencias de este método (10^{-4} - 10^4 Hz). Estas mediciones fueron hechas en puntos cercanos al poblado de Compostela, Nayarit, área que se encuentra dentro del Bloque de Jalisco, y es característica por su complejidad geológica causada por los diversos eventos volcánicos que se han dado a lo largo de la evolución del planeta.

Los sondeos tienen el objetivo de permitir observar zonas donde puedan presentarse alteraciones hidrotermales, mismas que pudieran servir para determinar si existen o no áreas, o puntos, de interés en la zona que pudieran dar pie a exploraciones más completas y detalladas en búsqueda de zonas explotables.

1.1. Planteamiento del Problema.

Diversos estudios realizados en zonas cercanas al municipio de Compostela, entre los que destacan los de la Secretaría de Energía (SENER, 2016), muestran que la geología del lugar posee características idóneas para la formación de yacimientos geotérmicos, sin embargo, no se le ha dado la relevancia necesaria para continuar con las investigaciones de exploración. Para incentivar la exploración en dicha zona se propone utilizar el método magnetotelúrico, buscando determinar alteraciones hidrotermales en el lugar de estudio.

1.2. Justificación.

La energía geotérmica es considerada una de las fuentes de energía las más limpias y ecológicas dada su poca o nula emisión de elementos dañinos al ambiente, línea que, por las circunstancias globales, es muy importante que se priorice en los gobiernos de cada nación. A pesar de su poca explotación, se han realizado estimaciones del potencial geotérmico del graven de Compostela, y en el artículo *Update of the Geothermal Electric Potential in Mexico* (Gutierrez-Negrin, 2012) destaca que se pueden tener temperaturas alrededor de 180°C, y una generación de energía aproximada de 110MW.

Con este trabajo se busca determinar principalmente si las dos zonas de las que se poseen datos cuentan con características de sitios geotérmicos, esto mediante el procesamiento y comparación de la información que se posee, siendo un estudio complementario para los objetivos de la exploración geotérmica en el área del bloque de Jalisco.

1.3. Objetivo General.

Realizar un análisis de la resistividad del subsuelo a partir del procesamiento de datos magnetotelúricos (MT) en la zona al norte del Bloque de Jalisco, municipio de Compostela, Nayarit, para identificar áreas con potencial geotérmico.

1.3.1. Objetivos Específicos.

- Procesar y filtrar datos de MT obtenidos en el municipio de Compostela, mediante el programa WinGLink®, para su posterior interpretación y análisis.
- Generar modelos e inversiones 1D y 2D (en caso de ser posible) utilizando software especializado e información referente a la geología de la zona, para obtener resultados más precisos.
- Identificar la posible presencia de alteraciones hidrotermales en el medio prospectado con base en la interpretación de los modelos finales, para determinar si existen zonas con potencial geotérmico.

1.4. Alcances.

Se proponen dos principales líneas como alcances de la presente tesis. La primera refiere a reafirmar el método magnetotelúrico como principal herramienta para identificar alteraciones o yacimientos hidrotermales, especialmente por la profundidad de investigación que se obtiene. Por otra parte, se busca determinar si es posible la existencia de más zonas con potencial de explotación geotérmica en la zona de Compostela, mediante la comparación de los resultados entre los sondeos en el campo geotérmico “Domo de San Pedro” y los del área de investigación.

1.5. Limitaciones.

Existe la posibilidad de que los resultados pudieran verse limitados por la baja densidad de datos obtenidos en campo, lo que podría conducir a que se generen vacíos de información entre algunos puntos de los sondeos y no se presente una correcta correlación en algunas zonas de los modelos finales.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES GEOTÉRMICOS

2.1. Geotermia

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2017), la energía geotérmica proviene del calor interno de la Tierra, principalmente de dos fuentes, la primera causada por el calor remanente de la formación de la tierra, especialmente asociado a volcanes, aguas termales y géiseres. Por otro lado, el calor generado por el decaimiento de isótopos radiactivos que se almacena esencialmente en rocas de la litósfera. En otras palabras, la geotermia o energía geotérmica es la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más superficial de la corteza terrestre.

Las fuentes geotérmicas se pueden clasificar en sistemas hidrotermales, sistemas conductivos y acuíferos profundos. Los sistemas hidrotermales suelen tener fuentes principalmente de vapor o de líquidos. Los sistemas conductivos abarcan las rocas calientes y cuerpos magmáticos en un amplio rango de temperaturas. Por último, los acuíferos profundos contienen fluidos circulando en medios porosos o en zonas de fracturas a profundidades generalmente mayores de 3 Km (CeMIGeo, 2019).

Cuando el agua de un acuífero profundo se mezcla con los fluidos magmáticos y se calienta, forma un yacimiento geotérmico de tipo hidrotermal, el cual se compone fundamentalmente de:

- Una fuente de calor, la cual puede ser una cámara magmática o intrusiones de roca fundida relativamente cercanas a la superficie (usualmente en los bordes de las placas tectónicas).
- Un acuífero, el cual debe poseer la capacidad de almacenar y recuperar el volumen de líquido perdido, ya sea de agua infiltrada o de otros acuíferos.
- Una capa sello, usualmente causada por alguna formación con menor permeabilidad que la del acuífero y limite su flujo a la superficie.

La alteración hidrotermal es un tipo de metamorfismo que produce cambios en las propiedades de las rocas alterando su densidad, porosidad, permeabilidad,

susceptibilidad magnética y resistividad. Simultáneamente con esos cambios físicos pueden ocurrir eventos relacionados o sin relación como fallamientos y formaciones de diaclasas o fracturas que afectan el proceso de alteración.

Este tipo de cambios se ven causados por grandes volúmenes de fluidos calientes que atraviesan las áreas “débiles”, es decir, rocas permeables por fisuras o poros interconectados. A causa de las altas temperaturas respecto a las rocas adyacentes en las que circulan estos fluidos es que se generan las modificaciones geológicas que se presentan en el medio descrito (Rodríguez R., 2001).

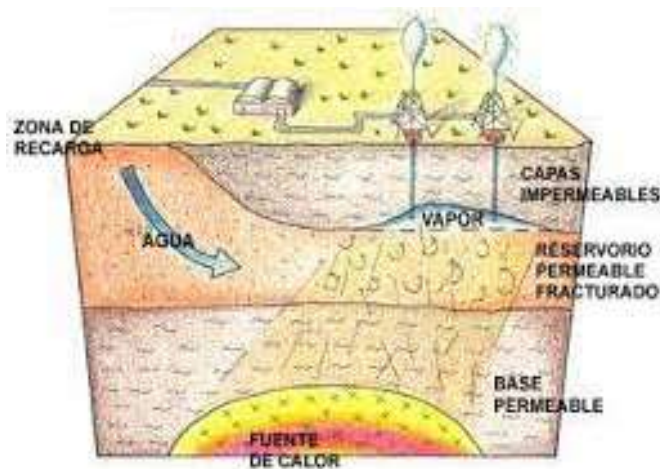


Figura 2.1: Diagrama simplificado de un yacimiento geotérmico. Tomado de Pesce A., 1998.

2.2. Contexto Geotérmico en México

La mayor parte del territorio mexicano (excepto la Península de Yucatán) está caracterizado por una gran actividad tectónica y volcánica que ha tenido lugar desde hace varias decenas de millones de años hasta el presente. Esta actividad invariablemente ha dejado su huella a lo largo de todo el país en forma de sistemas volcánicos y sistemas hidrotermales, tanto fósiles como activos.

La actividad tectono-volcánica, aunque tiene resultados catastróficos en muchos de los fenómenos que genera, como sismos y erupciones volcánicas, también ha sido la fuente de una gran riqueza como lo son los recursos minerales y geotérmicos. (Prol-Ledesma, 1988).

En la actualidad existe una gran cantidad de manifestaciones geotérmicas y termales dentro del país, y aunque existen más de mil puntos en los que se tiene potencial geotérmico no todos poseen la capacidad de generar energía eléctrica, pero pueden aprovecharse como balnearios termales. Además de los balnearios también es importante destacar la contribución mineral que genera la actividad hidrotermal dentro del país, pues a lo largo de todo el Eje Neovolcánico se extraen toneladas y toneladas de minerales metálicos y no metálicos producto del hidrotermalismo que abunda en toda la República Mexicana con excepción de la Península de Yucatán.

México es uno de los países que tiene un gran potencial geotérmico desaprovechado, según Peláez Zapata:

México cuenta con los recursos geotérmicos suficientes para producir toda la energía eléctrica del país; por ello resulta lamentable que no se le haya dado la debida atención en el pasado, tal vez por intereses políticos, la relativa “abundancia” de petróleo “barato” en su momento o, aún más importante, la falta de visión para invertir en energías limpias. La geotermia es prácticamente una fuente “inagotable” de energía y México es un país beneficiado con muchas manifestaciones térmicas a lo largo y ancho del territorio nacional. (2017)

Los campos geotérmicos en explotación en México son: Cerro Prieto con 570 megavatios (MW) de capacidad instalada; Los Azufres con 247.8 MW; Los Hornos con 120.4 MW; Las Tres Vírgenes con 10 MW y el Domo de San Pedro con 35.5 MW. La capacidad total de producción instalada de energía eléctrica basada en fuentes geotérmicas en nuestro país es de 983.7 MW (SENER, 2016).



Figura 2.2: Distribución de los principales campos geotérmicos activos en México. Tomado de LCAGN, 2017.

México ocupa el 13º lugar en aprovechamiento de usos directos de la energía geotérmica, los primeros lugares los tienen China, EU y Suecia; sin embargo, el potencial teórico que hay en nuestro país para producir energía eléctrica basado en fuentes geotérmicas, es de casi 13 mil millones MW (Peláez Z., 2017).

Aunque el aprovechamiento aún es muy poco, en la actualidad se están desarrollando nuevas tecnologías para la exploración de yacimientos geotérmicos, por ejemplo, los Sistemas de Información Geográfica ayudan al análisis de imágenes satelitales mediante infrarrojo, que permite encontrar fuentes de calor en la superficie terrestre, por lo que se espera que en próximos años la geotermia tome auge en nuestro país y se convierta en una de las principales fuentes de energía y, que además, su uso se amplíe a distintos sectores industriales, generando así empleos abundantes y costos menores de producción de energía que fortifiquen la economía nacional.

2.3. Estudios previos en la zona

Entre 1986 y 1988 Castillo y De la Cruz realizaron un estudio geológico del Domo San Pedro, para evaluar y relacionar las estructuras y el vulcanismo con la presencia de fuentes hidrotermales en la zona. La motivación de estos estudios se

debió a la presencia de una gran cantidad de manantiales termales con fines de evaluación geotérmica.

El estudio estructural se llevó a cabo en el sector E-SE del Domo San Pedro por considerarse que era la zona más atractiva geotérmicamente, dada la concentración del termalismo de mayor temperatura y el control estructural limitante. En esta zona se realizaron 30 estaciones estructurales, 29 de ellas en la zona estudiada y la restante fuera de ella, en rocas propias de la Sierra Madre Occidental. En total se midieron 405 y solamente una falla la cual presenta un rumbo NW40°SE con buzamiento de 66° al SW, que afecta a piroclásticos cuaternarios del Domo San Pedro (Castillo & De La Cruz, 1989).

En cuanto a la secuencia volcánica, los autores antes mencionados, describen que se compone de una gran cantidad de rocas ácidas a intermedias que corresponden a muchos eventos volcánicos que se han desarrollado a lo largo de la historia y han provocado la formación de otras estructuras volcánicas más pequeñas alrededor del Domo San Pedro. A partir de esto, concluyen que la presencia de manantiales termales, un gradiente de temperatura considerable y la gran cantidad de rocas ácidas antiguas y recientes, son indicios de que en la zona existe una cámara magmática con el calor necesario para generar un fuerte termalismo.

En el 2003 Ferrari et al., realizaron un trabajo para determinar la geología del Graben San Pedro-Ceboruco. Según los autores, dicho Graben es una estructura muy singular en términos geodinámicos pues se encuentra entre el Bloque de Jalisco y la Sierra Madre Occidental, donde se produjo un tectonismo extensional complejo asociado con el vulcanismo tanto alcalino como calco alcalino desde finales del Mioceno.

También detallan que en esta zona se han encontrado flujos de lava máficos que corresponden al vulcanismo más antiguo asociado al Cinturón Volcánico Mexicano, que son encontrados solamente en zonas cercanas al volcán Ceboruco mediante perforaciones. Así mismo, mencionan la formación de otras estructuras como conos cineríticos y domos alrededor del Graben San Pedro-Ceboruco, y de la caldera San Pedro en la cual se encuentra el Domo San Pedro.

El origen de estas estructuras se debe a flujos de magma riolítica, que generan hidrotermalismo. El volcanismo más reciente está representado por domos silíceos intra-caldera, un alineamiento WNW–ESE de volcanes monogenéticos, y el estratovolcán activo Ceboruco. Del Mioceno tardío al presente, la extensión acumulativa en el área es de un modesto 10%. Un periodo de muy baja actividad volcánica en el Plioceno tardío coincide con una baja tasa de convergencia entre las placas de Rivera y Norteamérica, confirmando una fuerte relación entre el régimen de subducción y el volcanismo en la placa sobre yacente (Ferrari et al., 2003).

CAPITULO 3. MARCO GEOLOGICO.

3.1. Ubicación de la Zona de Estudio

Nayarit presenta en la mayor parte de su territorio terrenos con relieve muy accidentado de origen volcánico en etapa geomorfológica juvenil, como la Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico; y madura, como la Sierra Madre del Sur; sin embargo, a diferencia de estos grandes rasgos topográficos, en la porción oeste del estado se localiza parte de la provincia Llanura Costera del Pacífico (Conagua, 2020).

Los datos para este trabajo fueron obtenidos dentro de los municipios de Compostela y San Pedro Lagunillas, en el estado de Nayarit, México; donde fueron realizados 7 sondeos magnetotelúricos que se muestran en la *Figura 3.1*. Dicha zona se caracteriza por su complejidad geológica, en la que se pueden destacar dos unidades geológicas de gran importancia, como lo son el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) y la Sierra Madre Occidental.

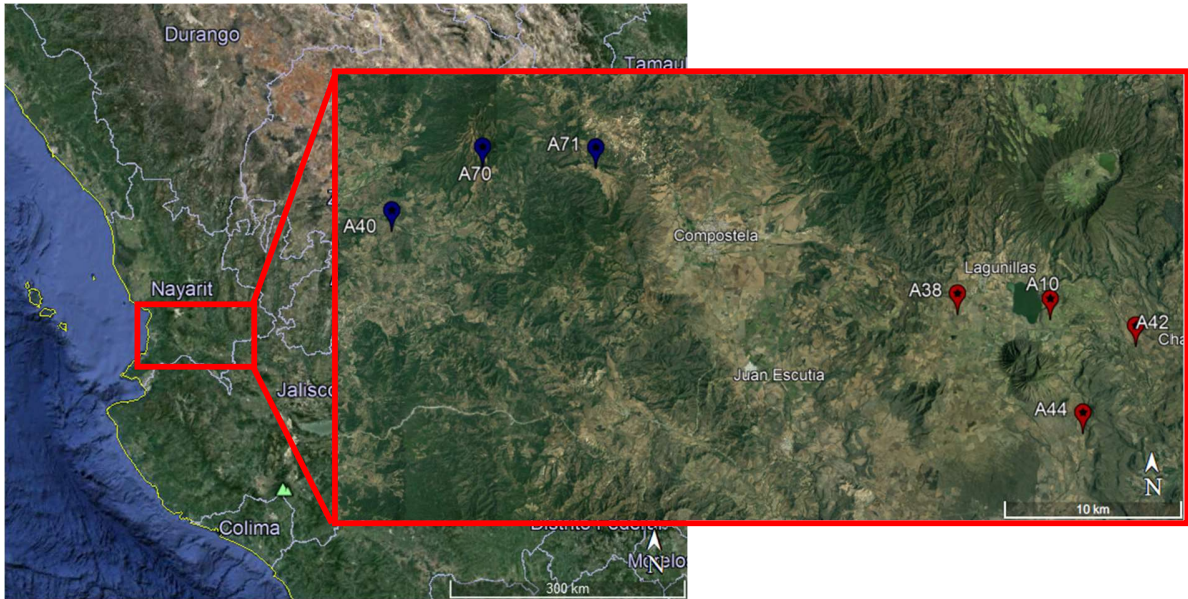


Figura 3.1: Delimitación del área de estudio. Elaboración propia.

Cercano al sondeo **A10** se encuentra la central geotérmica “Domo de San Pedro”, que comenzó sus operaciones a partir del 2016, por lo que se espera encontrar información relevante en esa área con respecto a los objetivos planteados.

3.2. Faja Volcánica Trans-Mexicana

El CVTM, también conocido como *Eje Neovolcánico Transversal*, o *Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM)*, es el arco volcánico que se desarrolla sobre el margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco (Ferrari, 2000).

De acuerdo con Ruíz Martínez (2004), El Eje Neovolcánico Transversal tiene alrededor de 1,000 km de longitud, y se encuentra activo desde el Mioceno Superior (~10 Ma) debido a la subducción de las placas de Rivera y Cocos. Está caracterizado por varias erupciones volcánicas históricas, fallas tectónicas y un elevado flujo térmico, que para nuestro caso de estudio es el principal responsable de los mayores campos geotérmicos dentro del país.

La Sierra Volcánica atraviesa los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Jalisco,

de Colima, el arco volcánico se sobrepone a la parte norte del Bloque Jalisco (BJ) y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental (SMO).

El volcanismo emplazado en el límite sur de la SMO es claramente bimodal, formado tanto por estratovolcanes y complejos de domos dacíticos-riolíticos como por centros monogenéticos basálticos. En cambio, el volcanismo emplazado dentro del BJ es casi exclusivamente monogenético y de composición basáltico-andesítica (Ferrari, 2000). Esto es de gran interés para el presente trabajo pues la zona de estudio se encuentra dentro de la parte occidental de la FVTM, y también limita con el bloque de Jalisco por lo que se podrían encontrar ambos tipos de vulcanismo que podrían asociarse a la presencia de actividad geotérmica.

3.3. Sierra Madre Occidental

La Sierra Madre Occidental (SMO) es una gran meseta volcánica silícica que se extiende por más de 2,000 km desde la frontera entre Estados Unidos y México hasta la parte occidental (Ferrari et al, 2003).

De acuerdo con los reportes del INEGI (2000), debido a su magnitud es una de las provincias de mayor relevancia del país. Está formada principalmente por rocas ígneas extrusivas y tiene una superficie aproximada de 250 000 km² con una orientación es NO-SE. Predominan en las partes más elevadas rocas como tobas, ignimbritas, vulcanoclásticas y algunos derrames riolíticos, cuya actitud es pseudo-horizontal, lo cual le confiere a esta Sierra la apariencia de una gran meseta y se le denomina también *plateau*.

Esta sierra, cuyas elevaciones llegan hasta los 3000 m.s.n.m., tiene un ancho promedio de 250 km. Sus límites son:

- Al Norte: La frontera con los Estados Unidos de América.
- Al Sur: La provincia Eje Neovolcánico.
- Al Oriente: Las provincias Sierras y Llanuras del Norte y Mesa del Centro.
- Al Occidente: Las provincias Llanura Sonorense y Llanura Costera del Pacífico.



Figura 3.3: Mapa donde se puede observar el territorio ocupado por la SMO y la FVTM. Tomado de Ferrari (2003).

La sucesión SMO, expuesta en el área de Santa Fe, a unos 10 km al norte del volcán Ceboruco, está compuesta por aproximadamente 800 m de flujos de ceniza riolítica y lavas menores basálticas a andesíticas, que cubren stocks subvolcánicos y plutones con composiciones de diorita a granito. Toda la sucesión tiene edades comprendidas entre el Oligoceno y el Mioceno temprano y las rocas subvolcánicas afloran a 500 m.s.n.m. como máximo. Esto implica que el Bloque Jalisco se ha elevado considerablemente con respecto a la SMO y que están separados por una gran discontinuidad tectónica, ahora cubierta por el vulcanismo de la FVTM (Ferrari et al., 2003).

Este gran sistema consta en su base de sedimentos y meta sedimentos, en algunos sitios muy plegados y de expresión morfológica abrupta. Dichos materiales geológicos están cubiertos en gran medida por las dos secuencias volcánicas que

conforman el complejo montañoso de la Sierra Madre Occidental. La primera, de composición intermedia, consiste en lomeríos y cerros escarpados, que están expuestos en la zona de transición entre la propia Sierra Madre Occidental y la provincia Llanura Costera del Pacífico. En la segunda, de composición ácida predominante, el relieve es de cadenas montañosas de formas volcánicas escarpadas, valles inter montañosos y cañones, producto de fuertes emisiones piroclásticas provenientes de numerosas calderas; esta secuencia volcánica en algunos sitios alcanza espesores superiores a los 1000 m (INEGI, 2000).

Estos aspectos son de gran importancia para el trabajo pues nos presentan características geológicas de la zona de estudio y de sus alrededores. Complementario a esto, Ferrari et al., mencionan que:

La geología de la SMO está dominada por conjuntos de rocas ígneas asociados a diferentes episodios magmáticos, que resultaron de la subducción de la placa *Farallón* debajo de la placa de Norteamérica: 1) rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico Superior-Paleoceno; 2) rocas volcánicas andesíticas y, en menor medida, dacítico-riolíticas del Eoceno; 3) ignimbritas silíceas emplazadas en dos pulsos principales en el Oligoceno temprano y el Mioceno temprano; 4) coladas basáltico-andesíticas extravasadas después de cada pulso ignimbrítico; 5) coladas de basaltos e ignimbritas alcalinos emplazados generalmente en la periferia de la SMO en diferentes episodios del Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario. Los conjuntos 1 y 2, y el conjunto 3, han sido definidos como el Complejo Volcánico Inferior (CVI) y el Supergrupo Volcánico Superior (SVS), respectivamente. El conjunto 4, en la parte norte de la SMO, ha sido definido como una extensión del cinturón de “Basalto-Andesitas del Sur de la Cordillera”. Finalmente, los basaltos del conjunto 5 han sido interpretados como testigos de varios episodios de extensión relacionados con la apertura del Golfo de California. Los productos de todos estos episodios magmáticos, parcialmente superpuestos entre sí, cubren a su vez un basamento heterogéneo pobremente expuesto del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico. (2005)

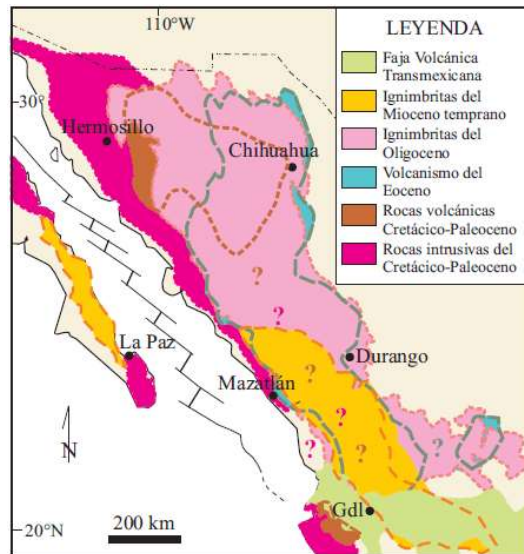


Figura 3.4: Extensión geográfica de los conjuntos ígneos que conforman la SMO. Tomado de Ferrari et al., 2005.

3.4. Geología Regional y Local

Una vez abordadas las dos provincias fisiográficas más importantes que tienen presencia en el área de interés, es importante analizar la geología regional y local para tener un panorama más específico con respecto a las propiedades geológicas de la zona de estudio.

3.4.1. Geología Estructural del Área de Estudio

Regionalmente el área de estudio queda definida por estructuras geológicas pertenecientes a los estados de Nayarit y Jalisco, las cuales, como se mencionó anteriormente, quedan influenciadas por la SMO y la FVTM. Sin embargo, también es importante tomar en cuenta la influencia del Bloque Jalisco.

De acuerdo con Stock (1993), el Bloque Jalisco representa lo que se conoce como un bloque tectónico, o microplaca, más o menos rígido. Se sabe que se mueve de manera independiente con respecto a las placas circundantes (Rivera y Norte América), así como a través de dos zonas de deformación continental (el rift o graben de Tepic-Zacoalco y el rift o graben de Colima) y a lo largo de una zona de subducción en su límite costero con la placa oceánica de Rivera. Los rifts de Tepic-Zacoalco y de Colima se unen con el rift de Chapala en el límite NE del bloque Jalisco, dando lugar a lo que es esencialmente un punto triple continental, cerca de

Guadalajara, formado por la unión del Bloque Jalisco, el Bloque Michoacán y la placa de Norte América.

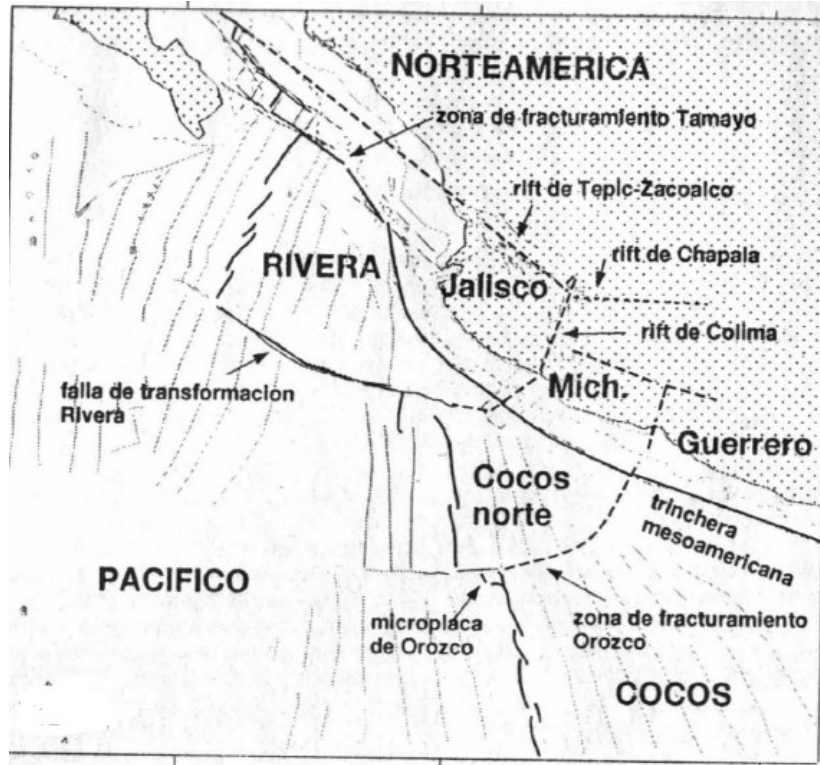


Figura 3.5: Esquema regional tectónico donde se puede observar el Bloque de Jalisco y los rifts antes mencionados. Tomado de Stock (1993).

El rift de Tepic es una estructura de extrema importancia, pues su ubicación es bastante cercana a la del área de estudio. Se encuentra a una altitud media de 1300 m.s.n.m. y posee una orientación NW-SE, sus fronteras son discontinuas y poco precisas, particularmente para el área de Jalisco. Constituye un conjunto de fosas y semi fosas asimétricas de diferentes edades, en las cuales se elevan las estructuras volcánicas del Ceboruco y Tequila, además de otros complejos volcánicos más jóvenes (UDG, 2001).

En el documento titulado *Síntesis de información geográfica del estado de Nayarit* el INEGI (2000) menciona los rasgos geológicos estructurales, separando la región en las provincias geológicas antes mencionadas, como se enuncia a continuación:

En la provincia “Eje Neovolcánico”, ampliamente expuesta en el estado, se desarrolló vulcanismo calco alcalino a finales del Plioceno y durante el Cuaternario; dicho vulcanismo originó rocas de composición basáltica y andesítica, así como piroclásticos. El eje se encuentra fragmentado en tres sistemas de fosas tectónicas, las cuales convergen en el estado de Jalisco y cuyas direcciones son: N-S, O-E y NO-SE; la última dirección corresponde a la fosa de Tepic denominada también *rift de Tepic*, localizada parcialmente dentro de Nayarit. En este se sitúan tres centros eruptivos principales (Estratovolcanes): San Juan, Sangangüey y Ceboruco, con numerosas asociaciones de conos cineríticos.

En cuanto a la Sierra Madre Occidental, estructuralmente se desarrollaron dos secuencias volcánicas durante el Terciario, con amplia representación dentro del estado de Nayarit. La primera formada por rocas de composición intermedia del Terciario Inferior, que muestra fracturas y fallas normales, así como deformación y alteración hidrotermal, producto de intrusiones diabásicas y ácidas, lo que provocó la formación de yacimientos minerales. En la segunda secuencia, de edad Terciario Oligoceno-Mioceno, el vulcanismo se manifiesta con una composición ácida, de carácter ignimbrítico, causando un sistema de fallas y fracturas, que originaron mesetas escalonadas. El contacto con la secuencia del Terciario Inferior es de tipo discordante, lo que marca un lapso de calma volcánica.

Localmente la zona donde se encuentra Compostela y el Domo San Pedro se ve altamente influenciada por dos estructuras con diferentes orientaciones, la primera corresponde al rift de Tepic con orientación NW-SE, del cual ya se ha hecho mención, y la segunda corresponde a una serie de fracturas corticales que se dirige a los principales edificios volcánicos de la zona con orientación NE-SW.

Para analizar esto más a fondo e identificar las características estructurales del Domo San Pedro, los investigadores Castillo y De La Cruz (1992) realizaron un estudio abarcando el sector E-SE, ya que ellos consideraban que ahí se encontraba una fuente de recursos geotérmicos con gran atractivo, para el cual establecieron 30 estaciones estructurales, de las cuales solo una estaba fuera de la zona estudiada y correspondía a rocas de la Sierra Madre Occidental. En su trabajo lograron

medir 405 fracturas y una falla con rumbo NW40°SE y buzamiento de 66°SW, que afecta al Domo San Pedro (mostrada en la *Figura 3.6*). A partir de ello lograron establecer que “[...] el sistema NW-SE es el dominante; el sistema E-W le sigue en importancia y finalmente el sistema NE-SW [...]”.

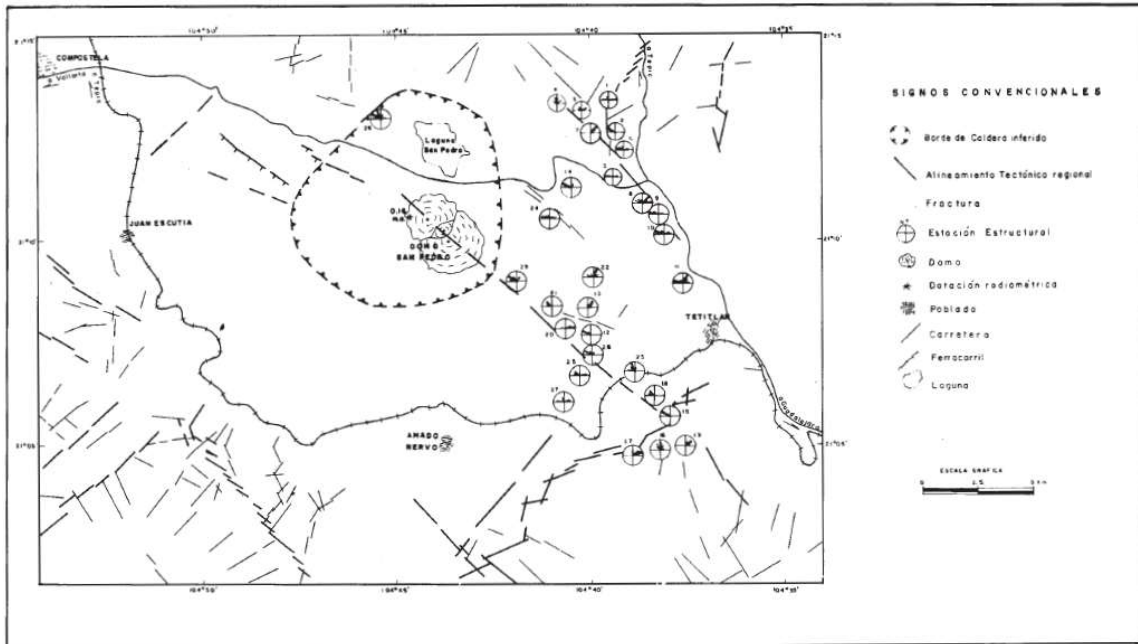


Figura 3.6: Ubicación de la zona de estudio y de las estaciones estructurales analizadas por Castillo y de la Cruz en 1987. Tomado de Castillo & de la Cruz (1992).

3.4.2. Estratigrafía del Área de Estudio

Regionalmente la estratigrafía abarca varias eras que cambian dependiendo del autor que se cite. El INEGI (2000) establece que las distintas unidades estratigráficas quedan englobadas entre el Mesozoico y el Cenozoico de la siguiente manera:

Las rocas de mayor antigüedad corresponden al Mesozoico, y quedan comprendidas en el sistema Cretácico. Consisten en secuencias sedimentarias, volcánicas, vulcanosedimentarios y rocas ígneas intrusivas.

Al suroeste del estado se tienen rocas de origen volcánico reconocidas como andesitas, con estructura masiva, vesicular y pequeños rastros de calcita y metamorfismo, que se asocian a procesos vulcanoclásticas, del Cretácico inferior. Posterior a esto se tiene una secuencia vulcanosedimentarios, que consiste en

intercalaciones de lutitas, areniscas, tobas, calizas y derrames de composición dací-ticos, contienen fragmentos de andesitas, y se cree que corresponden al cinturón volcánico desarrollado en el México occidental durante el Mesozoico; estas unidades estratigráficas presentan una alteración por granito (INEGI, 2000).

Por encima de las unidades antes mencionadas se encuentran las rocas correspondientes al Cenozoico, las cuales abundan sobre la superficie y son muy variadas, teniendo rocas ígneas extrusivas, sedimentarias, vulcanoclásticas y suelos que se componen de estas rocas preexistentes.

En el Terciario Inferior tiene presencias de andesitas, andesitas porfídicas, brechas volcánicas y horizontes tobáceos, que presentan fracturamientos intensos. Algunos afloramientos de esta unidad poseen alteraciones hidrotermales que han provocado mineralizaciones de metales como el oro y plata, así como sulfuros de plomo y zinc.

En el Terciario Oligoceno-Mioceno se tiene una unidad conformada por tobas de carácter ignimbrítico. Esta unidad es de gran importancia pues cubre el oriente de la SMO y ha sido denominada "*Faja Ignimbrítica Mexicana*". Durante este mismo periodo se tiene otra secuencia de caliza con una base vulcanosedimentarios, horizontes de pedernal y una cima de arenisca calcárea, la cual posee un origen lacustre.

El Terciario Superior se conforma de tres unidades de carácter sedimentario. La primera corresponde a areniscas de grano fino y fragmentos de roca volcánica, tienen intercalaciones de conglomerados con fragmentos de granitos, andesitas, tobas ácidas y basaltos. La segunda unidad está constituida por limolitas y areniscas. Esta unidad presenta estratos con espesores muy variados que van desde los 20 cm hasta los 2 metros. La tercera unidad se compone únicamente de conglomerados que presentan estratificación gruesa y en algunos casos cruzada, sus clastos son de andesita, ignimbrita y toba ácida en una matriz areno-arcillosa y cementada con hematita y arcilla.

Por encima de estas rocas se hace presente el Plio-Cuaternario, el cual posee afloramientos de dos unidades de rocas volcánicas extrusivas, principalmente

basaltos; esta unidad forma parte de la FVTM y su vulcanismo calco-alcalino. La segunda unidad de este periodo consiste en rocas vulcanoclásticas formadas de ceniza, lapilli y bloques volcánicos, que en ocasiones tienden a bombas, estas rocas poseen una composición básica intermedia y afloran principalmente al sur de Nayarit.

Finalmente, el Cuaternario está representado por conglomerados de ignimbrita, dacita y basaltos en una matriz areno-arcillosa; una secuencia vulcanosedimentaria integrada por fragmentos de pómez, toba, obsidiana y basalto; y suelos de distinta composición y 4 tipos diferentes que son aluviales, residuales, litorales y palustres (INEGI, 2000).

Localmente, y según lo indica la Conagua:

El marco geológico de la zona de Compostela está compuesto por 6 unidades litoestratigráficas. [...] Las rocas ígneas extrusivas están representadas por andesitas, las cuales únicamente afloran en el Cerro Grande de San Pedro, que se localiza al sur de San Pedro Lagunillas; por su posición estratigráfica se le considera del Eoceno (Paleógeno). Así como por rocas riolíticas, las cuales se puede decir que ocupan el segundo lugar en extensión de los afloramientos del área, se encuentran representadas por tobas e ignimbritas, su edad de acuerdo con su posición estratigráfica es del Mioceno (Neógeno). (2020)

Por último, tenemos las rocas basálticas, siendo éstas las más abundantes de la zona, las cuales se encuentran representadas por lavas, brechas, escorias y tezontle. Dentro del área existen algunos lomeríos de topografía suave, los cuales son afloramientos de conglomerados, que están formados por fragmentos andesíticos y riolíticos, los cuales se consideran del Plioceno (Conagua, 2020).

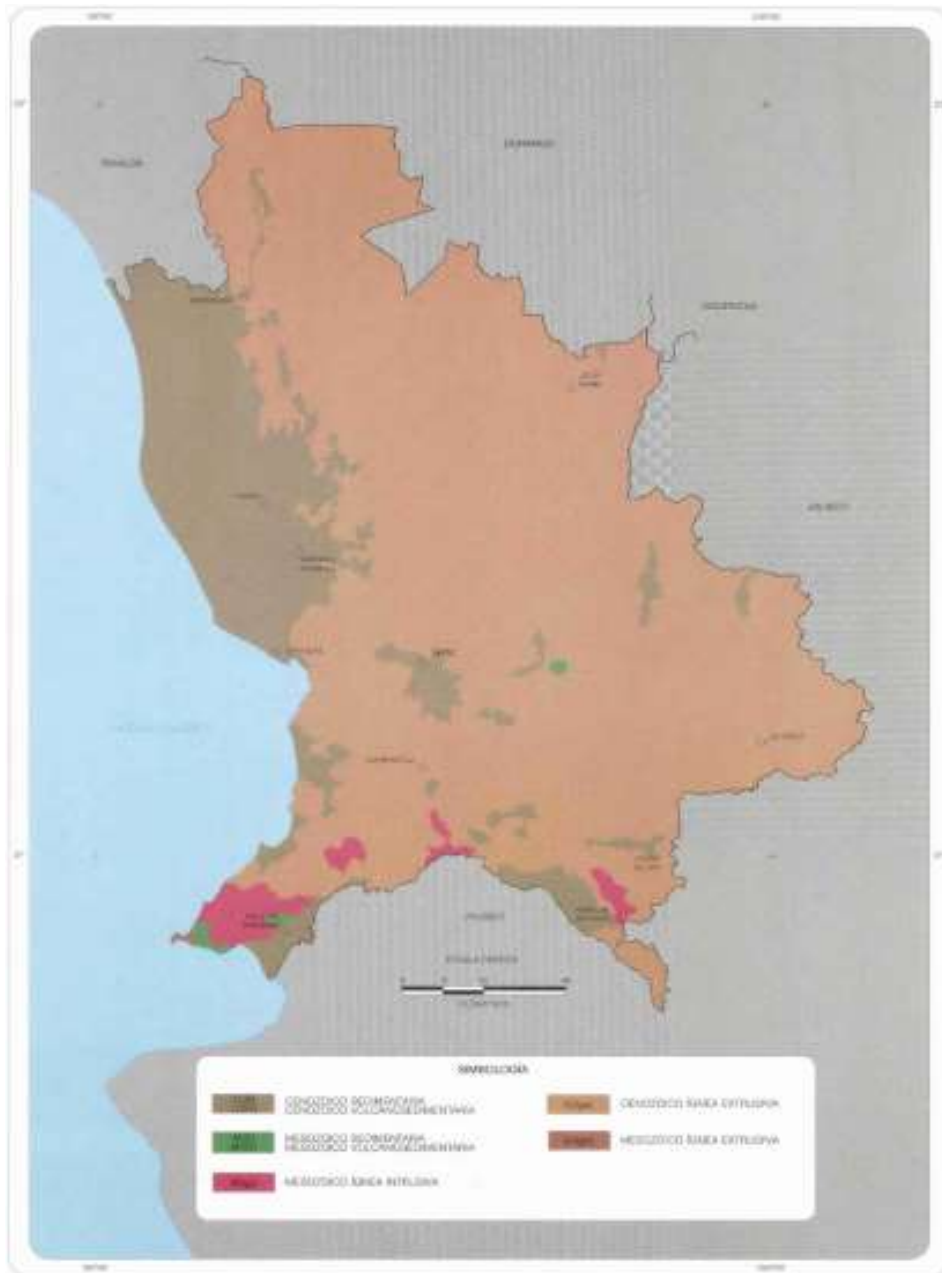


Figura 3.7: Mapa geológico del estado de Nayarit. Tomado de INEGI (2000).

3.5. Campo Geotérmico Domo San Pedro

El Domo San Pedro también conocido como Complejo Volcánico San Pedro-Cerro Grande es una zona de gran importancia, pues dentro del área de estudio analizada en este trabajo es el campo geotérmico con mayor cantidad de estudios realizados y cuyo recurso está siendo explotado en la actualidad.

Como se mencionó en apartados anteriores, el sur del estado de Nayarit posee una gran cantidad de edificios volcánicos pertenecientes al CVTM y entre ellos se encuentra el Domo de San Pedro. Este se ubica a 20 km al oeste del Volcán Ceboruco y es un edificio volcánico de composición ácida con 700 metros de altura, cuya base se extiende por 4 Km con una ligera dirección preferencial NW-SE. Según los estudios se encuentra desarrollado dentro de una caldera de edad Plio-Cuaternaria (Castillo & De La Cruz, 1992).

De la misma manera, mencionan que en esta región las rocas más antiguas corresponden a una intercalación de rocas volcánicas con rocas sedimentarias intrusionadas por plutones y batolitos de composición granítica y tonalítica, con una edad que comprende entre el Cretácico Inferior y el Terciario inferior, las cuales corresponden a las unidades estratigráficas más antiguas descritas por el INEGI. Además de esto, complementan la información que ya se tenía mencionando que:

La actividad volcánica más intensa en la zona se manifestó durante el Cuaternario, donde el Domo San Pedro es el aparato más representativo. [...] La emisión volcánica más reciente dentro de la zona estudiada constituye el Domo de riolita vítrea 'Los Ocotes' con 200m de altura, 5 km de la largo y 4 km de ancho, ubicado a 4 km al NE del Domo San Pedro, cuyo emplazamiento obturó el drenaje natural del pequeño Valle de San Pedro Lagunillas y dio lugar a la Laguna de San Pedro. (2000)

Dentro de la zona de estudio hay una gran cantidad de manantiales termales que, según detallan Castillo y De la Cruz (1992), se creía provenían del flujo termal del Ceboruco, sin embargo, después de varios estudios geológicos, esta idea fue descartada, dando como resultado la definición de que el Domo San Pedro representa un campo geotérmico independiente. Durante los estudios realizados en este campo geotérmico fueron identificadas algunas zonas termales cuyas temperaturas para uso geotérmico son frías (25-26°C), mientras que otras se encontraban entre los 28 y 48 °C. A partir de esto concluyeron que dichos manantiales termales junto con su carácter químico, el gradiente de temperatura registrada y la existencia de rocas con composición ácida, constituyen argumentos para suponer una fuente de

calor en el subsuelo representada por una cámara magmática aún caliente, que es generadora del calor necesario para la existencia de una fuente geotermal en la zona.

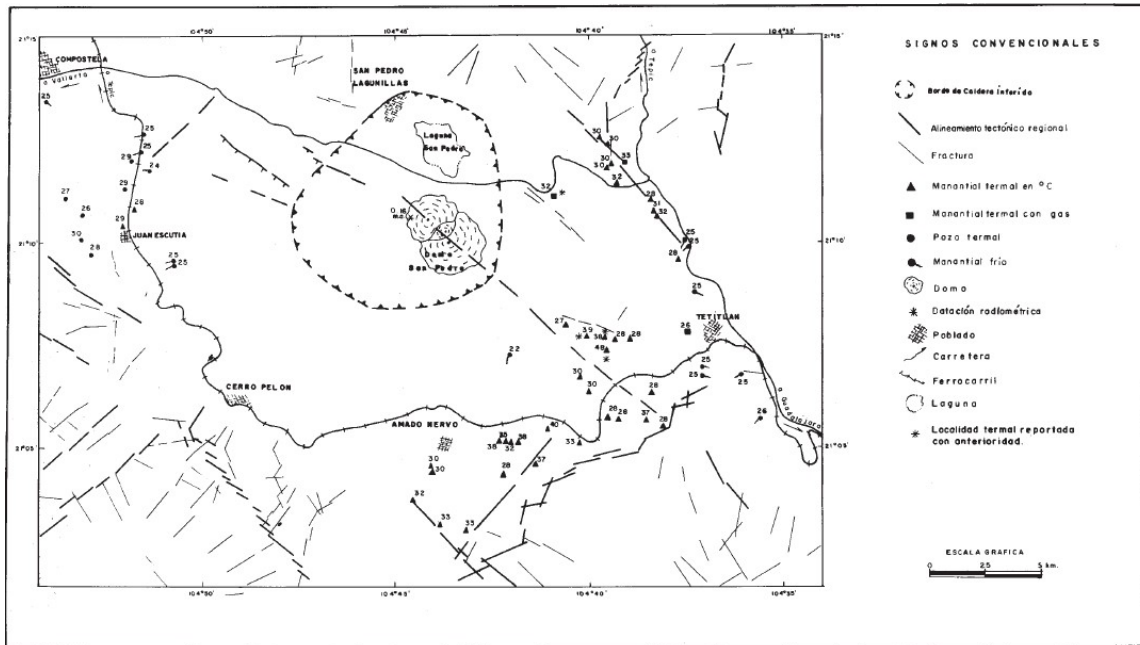


Figura 3.8: Distribución del termalismo en la zona de Domo San Pedro. Tomado de Castillo & De la Cruz (1992).

3.6. Hidrogeología del Área de Estudio

Debido a las características topográficas y climáticas de la zona de estudio, se tiene un enorme potencial hidrológico de carácter superficial y subterráneo. En el apartado superficial podemos hablar de la gran cantidad de ríos y arroyos que se forman dentro de los estados de Nayarit y Jalisco debido a la escorrentía de las estructuras de gran altura que ya han sido mencionadas en apartados anteriores y que desembocan hacia el océano Pacífico. La zona de estudio superficialmente se encuentra en una de las cuatro regiones hidrológicas del estado de Nayarit, denominada como la región hidrológica Huicicila, y subterráneamente pertenece al acuífero de Compostela.

Según el INEGI (2000) la región Hidrológica de Huicicila se encuentra ubicada al suroeste del estado de Nayarit y noroeste del estado de Jalisco, se dividen

en dos cuencas, la de Río Huicicila-San Blas y la del Río Cuale-Pitillal, la cual abarca la mayor extensión de la bahía de Banderas.

Para el caso de la zona de estudio, esta se encuentra dentro de la cuenca Río Huicicila-San Blas. En ella escurren una serie de ríos secundarios que desembocan al Pacífico, al norte se encuentra una zona de esteros y marismas. Esta cuenca es de vital importancia puesto que en ella se encuentra el lago San Pedro, así como todos los manantiales termales que afloran a superficie debido a la geotermia de la zona.

Subterráneamente la región queda enmarcada por el acuífero de Compostela, el cual corresponde a un acuífero de tipo libre que se encuentra conformado por brechas volcánicas, tobas y basaltos de permeabilidad media-alta por fracturamientos, igualmente por aluviones y conglomerados que forman horizontes intercalados con materiales volcánicos (INEGI, 2000).

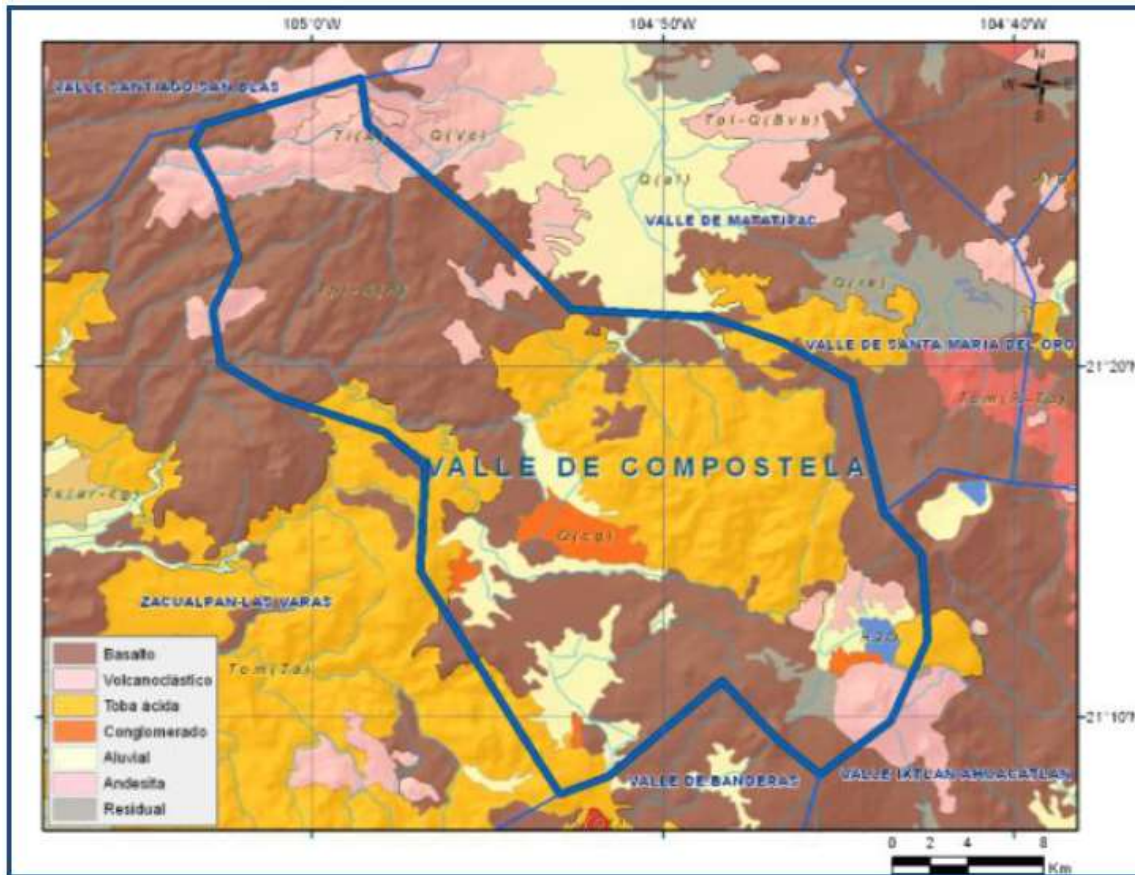


Figura 3.9: Geología general del acuífero de Compostela. Tomado de Conagua (2020).

De acuerdo con la Conagua, la profundidad del nivel estático varía entre 10 y 35 metros, un dato importante para este trabajo es que las mayores profundidades se encuentran en torno a la Laguna de San Pedro.

CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO.

4.1. Teoría Electromagnética

Los métodos geofísicos electromagnéticos son un grupo de técnicas en las que se analizan los campos eléctricos o magnéticos, ya sean naturales o artificiales, en la superficie terrestre, con el objetivo de mapear las variaciones de las propiedades eléctricas del subsuelo, es decir, la resistividad eléctrica, permeabilidad magnética o permitividad eléctrica (Schlumberger, 2021).

Estas técnicas se rigen por las leyes físicas de la Teoría Electromagnética, en especial por las Leyes y Ecuaciones de Maxwell, las cuales describen el comportamiento e interacción que tienen entre sí los campos eléctricos y magnéticos, por lo que son indispensables para entender el funcionamiento de los métodos electromagnéticos.

4.2. Ecuaciones de Maxwell

Para mediados del siglo XIX, el científico James Clerk Maxwell realizó una de sus publicaciones más famosas y que mayor impacto ha tenido en el mundo de la física, en esta englobaba los estudios que había desarrollado en el campo de la electricidad y magnetismo y en los que logró demostrar la unión de los campos Eléctricos (\mathbf{E}) y Magnéticos (\mathbf{H}) como un solo fenómeno, así como describir cualquier tipo de actividad electromagnética, casi sin excepciones (Fujimoto, 2007).

Maxwell se basó principalmente en 4 Leyes de la física clásica para desarrollar sus ecuaciones, la Ley de Gauss para campo eléctrico y magnético, la Ley de Ampere y la Ley de Inducción de Faraday; las cuales son comúnmente expresadas como sistemas de ecuaciones diferenciales, como se presenta a continuación:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (4.4)$$

Siendo \mathbf{E} la Intensidad del campo Eléctrico (V/m), \mathbf{B} la Inducción Magnética (T), \mathbf{H} la Intensidad del campo Magnético (A/m), \mathbf{D} el Desplazamiento Eléctrico (C/m^2), \mathbf{J} la Densidad de Corriente (A/m^2) y \mathbf{q} la Densidad de la carga Eléctrica (C/m^3).

La ecuación 4.1 se basa en la Ley de Faraday, y establece que una fuente rotacional de campo eléctrico produce una variación de densidad de flujo magnético cambiante en el tiempo.

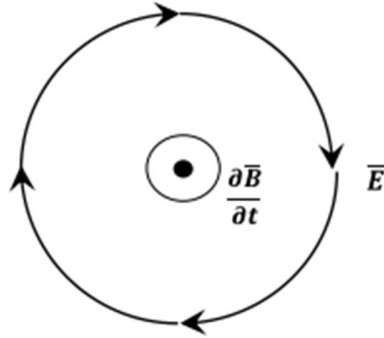


Figura 4.1: Representación de la circulación del campo eléctrico alrededor de la densidad de flujo magnético (Ley de Faraday). Tomado de Ortiz, 2010.

Mientras que la ecuación 4.2 proviene de la Ley de Ampere, la cual señala que una fuente rotacional de campo magnético produce una variación de densidad de flujo eléctrico y de corriente.

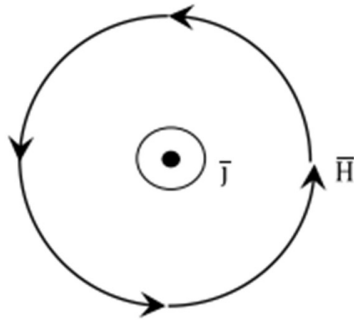


Figura 4.2: Representación de la circulación del campo magnético alrededor de la corriente de conducción (Ley de Ampere). Tomado de Ortiz, 2010.

Por otro lado, la ecuación 4.3 corresponde a la Ley de Gauss para H y menciona que no pueden existir monopolos magnéticos.

Por último, la ecuación 4.4 se basa igualmente en la Ley de Gauss, pero para E , la cual estipula que las cargas eléctricas son la fuente de un campo Eléctrico. Representa también que el número de líneas de densidad de flujo eléctrico es proporcional a la carga total encerrada por una superficie "S"

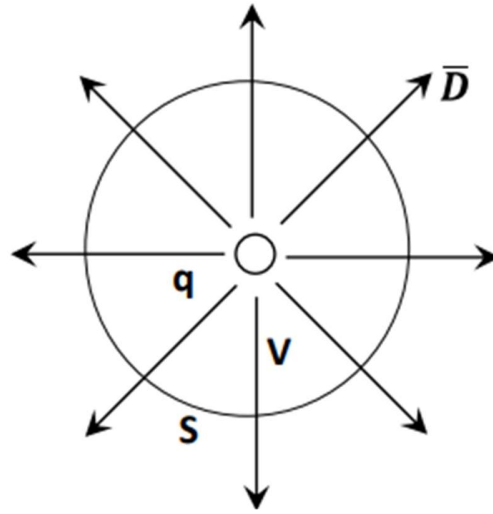


Figura 4.3: Relación de las líneas de flujo eléctrico que atraviesan la superficie (S) que encierra la carga (q) en el volumen (V). Tomado de Ortiz, 2010.

4.2.1. Relaciones Constitutivas

Maxwell logró desarrollar la teoría que permite describir los campos electromagnéticos en el vacío, no obstante, si se desea desarrollarlos en otro tipo de entorno es necesario considerar las propiedades físicas del medio en el que se propagan, para incluir estas características es que se incluyen las Relaciones Constitutivas (Ortiz, 2010).

Estas Relaciones consideran las propiedades eléctricas y magnéticas del medio físico que se desea describir, incluyendo variables como la Conductividad Eléctrica (σ), la Permitividad Eléctrica (ϵ) y la Permeabilidad Magnética (μ). A continuación, se presentan las ecuaciones que las describen.

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (4.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (4.6)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (4.7)$$

4.3. Método Magnetotelúrico

El método Magnetotelúrico (MT) es un estudio de fuente natural, es decir, utiliza campos electromagnéticos no inducidos, para determinar la conductividad o su inverso, la resistividad, de los grandes cuerpos rocosos que se encuentren a

grandes profundidades por debajo del suelo. Se centra en la relación que se da entre los campos eléctricos y magnéticos, conocida como impedancia (Cagniard, 1953).

Ya que el planeta Tierra no es un medio isotrópico ni homogéneo, la propagación de los campos electromagnéticos se vuelve compleja. Por esto, se propusieron las siguientes condiciones buscando poder aplicar las ecuaciones de Maxwell y las relaciones constitutivas como herramienta que describa el comportamiento de los campos estudiados (Simpson y Bahr, 2005).

- ⇒ Las ecuaciones para campos electromagnéticos propuestas por Maxwell son siempre válidas.
- ⇒ El planeta Tierra no es capaz de generar energía electromagnética, solo la absorbe o la disipa.
- ⇒ Todos los campos deben ser tratados como analíticos y conservativos cuando se encuentren lejos de sus fuentes.
- ⇒ Los campos electromagnéticos de fuente natural que se utilizan se generan en extensos sistemas de corrientes ionosféricas relativamente lejos de la superficie terrestre, por lo que pueden ser tratadas como ondas electromagnéticas polarizadas que inciden en la Tierra de forma casi vertical. Esta condición se omite en los polos y el área ecuatorial.
- ⇒ No se da la acumulación de cargas libres en las capas de la Tierra. Mientras que, en una superficie multidimensional, las cargas se pueden acumular en las discontinuidades, causando un fenómeno conocido como *Corrimiento Estático*.
- ⇒ Las cargas se conservan y la Tierra funciona como un conductor óhmico, es decir, obedece a la ley de Ohm.
- ⇒ Los desplazamientos del campo eléctrico, así como la variación en los tiempos del periodo de las corrientes son prácticamente despreciables, por lo que el procesado de la inducción electromagnética en el planeta se maneja netamente como un proceso de difusión.

⇒ Cualquier variación en la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica de la roca se asume despreciable considerando las variaciones conductivas de la mayoría de las rocas.

Por lo que, con dichas consideraciones, las ecuaciones de Maxwell incorporando las relaciones constitutivas se expresarían de acuerdo con lo que presenta Zhdanov (2009):

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4.8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (4.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (4.11)$$

4.4. Fuente del método

Como su nombre lo indica, las principales mediciones del método provienen de las corrientes telúricas (fuentes naturales) que se propagan por la Tierra con diferentes rangos de frecuencias, lo que permite que el sondeo obtenga una gran cantidad de información dependiendo del rango de frecuencias que se midan (Chave y Jones, 2012).

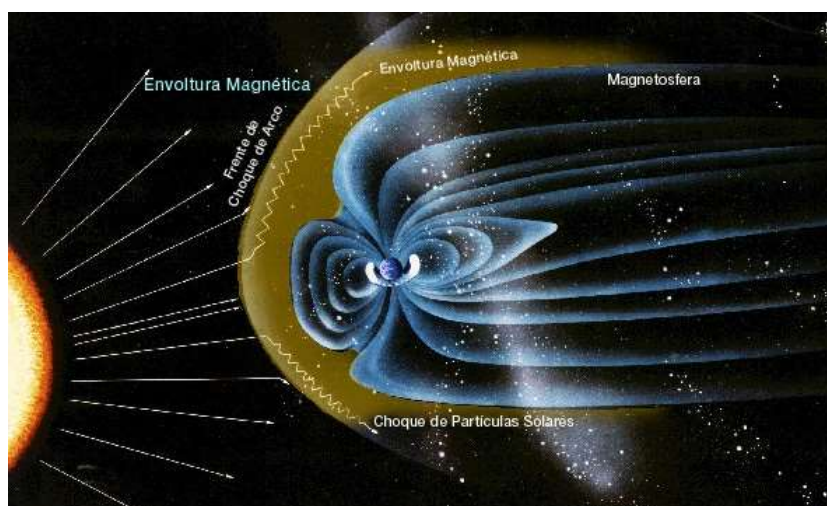


Figura 4.4: Interacción del viento solar con la atmósfera terrestre. Tomado de *Windows to the Universe* (2012).

Los rangos de frecuencias más bajos, que van de 10^{-4} a 1 Hz, se originan principalmente en la interacción que tienen la magnetósfera y los vientos solares, este rango de frecuencias pertenece al MT.

Por otro lado, las frecuencias más altas, de 1 a 10^4 Hz, que pueden tener su origen en tormentas eléctricas, pertenecen a los sondeos Audio-Magnetotelúricos (AMT), dado que en su rango de frecuencias se encuentra el espectro audible para el ser humano (Avila, 2019).

4.5. Profundidad de Investigación

La profundidad que logre penetrar una onda electromagnética en el subsuelo está relacionada estrechamente con la frecuencia de la onda y con la propiedad de resistividad de las rocas, puesto que, a menor frecuencia y resistividad del medio, mayor profundidad alcanzará la onda, y viceversa.

Para esto, Cagniard (1935) da una primera postura acerca del potencial en profundidad del MT, idea que posteriormente retoma Vozoff (1972), quien menciona el concepto de *Skin Depth* (δ), el cual resulta ser la distancia que tarda una onda electromagnética en decaer a razón de e^{-1} ($\sim 37\%$) respecto al valor que posea en superficie. La distancia que tarde en decaer la onda a este factor será la capacidad de penetración que pueda alcanzar el método.

El Skin Depth se puede estimar a partir de las expresiones:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ [m]} \quad (4.12)$$

Siendo σ la Conductividad del medio, μ la Permeabilidad magnética del medio, ω la Frecuencia angular ($2\pi f$), ρ la Resistividad del medio y f la Frecuencia de la onda.

Con estas fórmulas se ha determinado que los sondeos AMT y MT pueden abarcar profundidades someras (de algunos metros) hasta muy profundas (cientos de kilómetros) (Corbo,2006). Para ejemplificar, se presenta la siguiente *Tabla 1* que

representa los cálculos teóricos para profundidades con diferentes valores de resistividades (ρ) y periodos (T).

Tabla 1: Profundidades de penetración en Km. Modificado de Cagniard, 1953.

$\rho \setminus T$	1 seg.	3 seg.	10 seg.	30 seg.	1 min.	2 min.	5 min.	10 min.	30 min.
0.2	0.225	0.39	0.712	1.23	1.74	2.47	3.9	5.5	9.54
1	0.503	0.872	1.59	2.76	3.9	5.51	8.72	12.3	21.4
5	1.13	1.95	3.56	6.16	8.72	12.3	19.5	27.6	47.7
10	1.59	2.76	5.03	8.72	12.3	17.4	27.6	39	67.5
50	3.56	3.16	11.3	19.5	27.6	39	61.6	87.2	151
250	7.95	13.8	25.2	43.6	61.6	87.2	138	195	338
1,000	15.9	27.6	50.3	87.2	123	174	276	390	675
5,000	35.6	61.6	113	195	276	390	616	872	1510

4.6. Tensor de impedancias

En un sistema coordenado (X, Y) por el que fluye un campo electromagnético, la Impedancia (Z) es la razón entre el campo Eléctrico en dirección X (E_x) y el campo Magnético en dirección Y (H_y), esta razón se encuentra en función de la frecuencia de ambos campos y resulta en una variable compleja (Avilés, 2016).

$$Z_{xy}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \quad [\Omega] \quad (4.13)$$

Por otro lado, el tensor de impedancias representa matricialmente el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos horizontales en cada uno de sus segmentos, por medio de la siguiente relación

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Dadas las propiedades de relaciones ortogonales entre los campos E y H , al desarrollar el tensor de impedancias, este resulta con valores complejos, es decir, con números reales e imaginarios, al igual que los valores de fase. Los valores de resistividad aparente (ρ_a) y fase (ϕ) para cada uno de los elementos del tensor se pueden determinar por medio de las siguientes expresiones. (Vozoff, 1972)

$$\rho_{a\ i,j} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{i,j}|^2 \quad (4.15)$$

$$\phi_{i,j} = \arctan\left(\frac{\text{Im}(Z_{i,j})}{\text{Re}(Z_{i,j})}\right) \quad (4.16)$$

Es importante destacar que la resistividad aparente no es la resistividad absoluta del medio, sino una representación de esta obtenida a partir del tensor de impedancias.

4.7. Dimensionalidad

Otro uso que se le da al tensor de impedancias es el cálculo de la dimensionalidad del medio prospectado, ya que, dependiendo de la complejidad que vaya presentando este, también se podrá determinar la cantidad de direcciones en las que varían los valores, es decir, la dimensionalidad del medio.

Un medio unidimensional es aquel que solo presenta variaciones de resistividades en profundidad, sin embargo, horizontalmente permanece constante. Esto permite que la diagonal principal del tensor sea nula, mientras que los valores de la anti-diagonal tendrán la misma amplitud, pero serán opuestos entre sí (Uribe, 2015).

$$Z_{1D} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ -Z_{xy} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

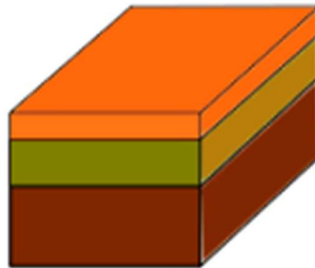


Figura 4.5: Diagrama de un medio unidimensional. Tomado de Uribe, 2015.

Los medios bidimensionales presentan cambios en resistividades a lo largo de dos planos, uno en profundidad igual que el unidimensional, además de en una de las componentes horizontales. La componente restante que se mantiene constante se le denomina **strike**, y geográficamente se orienta hacia la dirección por la que se presenta el mayor flujo electromagnético (Martí, 2006).

$$\mathbf{Z}_{2D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{Z}_{xy} \\ \mathbf{Z}_{yx} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Al orientar la componente constante hacia el strike, vemos que en la ecuación 4.18 se logra anular la diagonal principal. Para la anti diagonal se obtienen valores de resistividades aparentes con magnitudes diferentes y valores opuestos, los cuales, por su composición se les considera como datos en las componentes **XY** y **YX**.

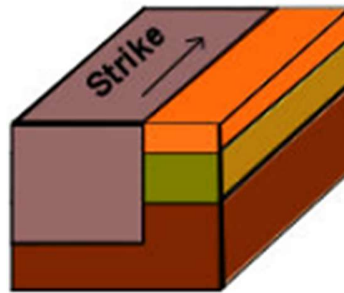


Figura 4.6: Diagrama de un medio bidimensional orientado al strike. Tomado de Uribe, 2015.

Por último, en un medio que se tengan 3 dimensiones, implica que no existe una sola componente que mantenga un valor constante, por lo que todas las componentes del tensor de impedancias poseerán un valor diferente. La matriz de este tipo de medios resulta de la siguiente forma:

$$\mathbf{Z}_{3D} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{xx} & \mathbf{Z}_{xy} \\ \mathbf{Z}_{yx} & \mathbf{Z}_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

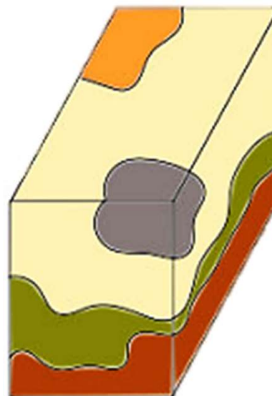


Figura 4.7: Diagrama de un medio tridimensional. Tomado de Uribe, 2015.

4.8. Modos de polarización

Volviendo al strike, cuando se tienen los datos de un medio bidimensional orientados hacia este, los cuadrantes XY y YX pasan a ser los modos TE (Transverso Eléctrico) y TM (Transverso Magnético) respectivamente. La orientación debe ser de forma tal que el modo TE resulte en dirección paralela al strike y, por ende, el modo TM resulte perpendicular al mismo, esto permite que el modo TE indique los valores donde el flujo de corriente sea máximo y el TM donde sea mínimo (Corbo, 2006).

La aplicación de estos modos de polarización permite, además de simplificar la matriz del tensor de impedancias, reescribir la ecuación 4.18 como:

$$Z_{2D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & Z_{TE} \\ Z_{TM} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Por lo general, cuando se realiza el estudio en campo no es posible identificar tan fácilmente la orientación del strike, por lo que este usualmente se determina por medio de otros métodos durante el procesamiento.

Para corregir la dirección en la que se tiene el strike, y obtener los modos de polarización, es necesario realizar una rotación de los ejes, como se muestra en la *Figura 4.8*. Para esta rotación se utilizan las ecuaciones 4.21 y 4.22.

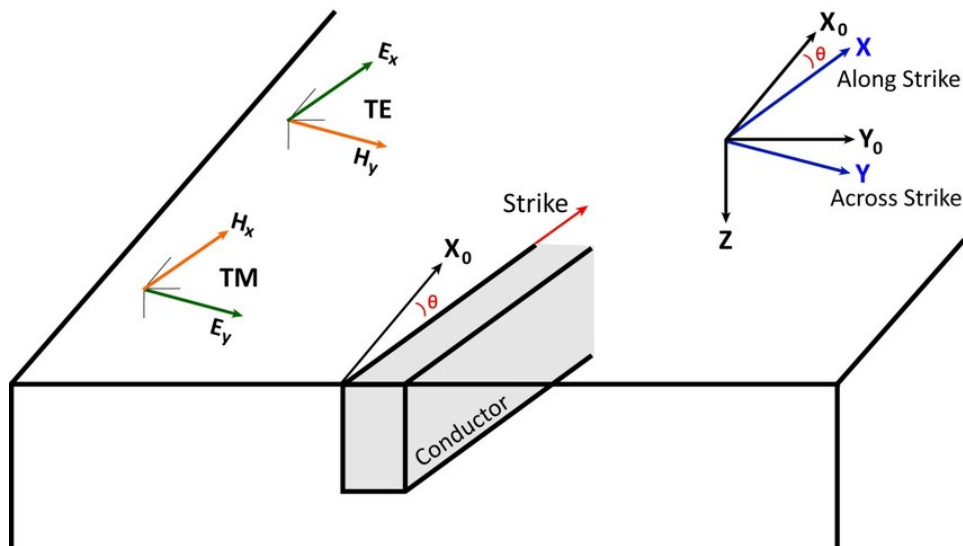


Figura 4.8: Ejemplificación del concepto de “Rotación al Strike”. Tomado de Comeau, 2015.

$$\mathbf{Z}_{2D} = \mathbf{R}_\theta \mathbf{Z}_m \mathbf{R}_\theta^T \quad (4.21)$$

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \mathbf{Cos}(\theta) & \mathbf{Sen}(\theta) \\ -\mathbf{Sen}(\theta) & \mathbf{Cos}(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Siendo θ el Ángulo en el que se encuentra el Strike \mathbf{R}_θ la Matriz de Rotación, \mathbf{R}_θ^T la Transpuesta de la Matriz de Rotación y \mathbf{Z}_m la Impedancia medida sin Rotación.

4.8.1. Modo Invariante

Para entornos más simples, en los que no se requiera un minucioso detalle en los resultados o que por alguna razón no sea posible determinar el strike, es posible utilizar el Modo Invariante (o Determinante), el cual es una relación, usualmente aritmética, entre los modos TE y TM.

Esta relación se puede obtener de diferentes maneras, ya sea un promedio entre los modos, una relación geoespacial, por raíz cuadrada de las diagonales principales, entre otros. El objetivo es poder obtener un valor promedio de la variación de resistividades aparentes en todas las direcciones, lo que permite volverlo independiente del strike. Una de las formas de obtener el determinante por medio del tensor de impedancias es:

$$\mathbf{Z}_{Inv} = \sqrt{\mathbf{Z}_{xx}\mathbf{Z}_{yy} - \mathbf{Z}_{xy}\mathbf{Z}_{yx}} \quad (4.23)$$

4.9. Distorsión Galvánica

Es causado principalmente por cargas acumuladas en los cuerpos más superficiales, mismas que ocasionan que uno o ambos modos del MT posean valores de resistividades aparentes diferentes a los reales, siendo representado gráficamente como un desplazamiento en las curvas de o de los modos afectados, provocando un fenómeno conocido como *Static Shift (S.S.)*.

Una de las formas para solucionarlo puede ser el uso de otros métodos más superficiales que permitan ver las resistividades someras reales, esto para ajustar las curvas TE y TM a los valores correctos.

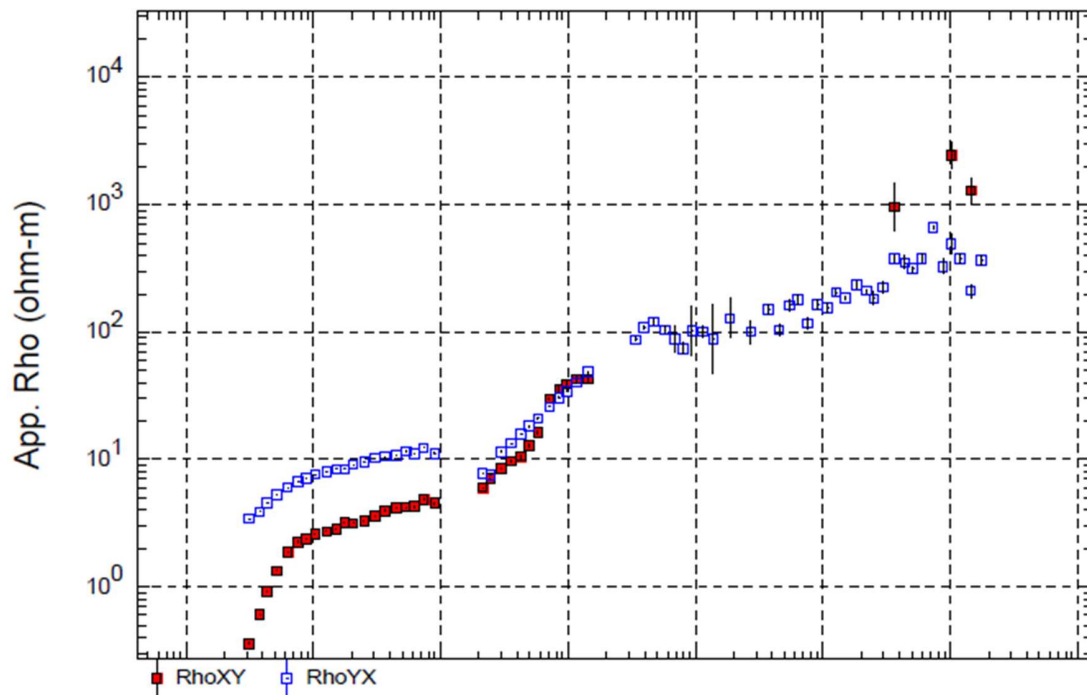


Figura 4.9: Ejemplo del efecto S.S., en el que se observa el desfase en resistividad de las curvas. *Elaboración propia.*

CAPÍTULO 5. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.

5.1. Adquisición de Datos.

Los datos fueron adquiridos en el año 2013 utilizando el equipo MTU-2000 de la marca PHOENIX, que cuenta con la unidad de adquisición, módulo de almacenamiento de información, batería, GPS, 3 sensores magnéticos y 5 electrodos, fungiendo 4 como dipolos eléctricos y uno de tierra.

La instalación en campo se realiza primeramente identificando el área óptima para realizar el levantamiento, usualmente mediante herramientas satelitales. Ya en el área de interés, se debe establecer el punto central del sondeo, a partir del cual se orientan e instalan los electrodos en dirección N-S (dipolo E_x) y E-W (dipolo E_y) aproximadamente a unos 25 m de la consola central cada uno. Así mismo, es utilizado un electrodo extra como conexión a tierra, el cual usualmente se instala cerca de la consola central.

Para el caso de los sensores o bobinas magnéticas, su instalación se realiza en los cuadrantes delimitados por los electrodos. Como el campo magnético posee 3 componentes, se realiza la instalación de las bobinas en 3 direcciones, las dos primeras en dirección N-S y E-W (H_x y H_y respectivamente), la tercera se instala de forma vertical para medir la componente H_z . En la *Figura 5.1* se observa un diagrama de la instalación descrita anteriormente.

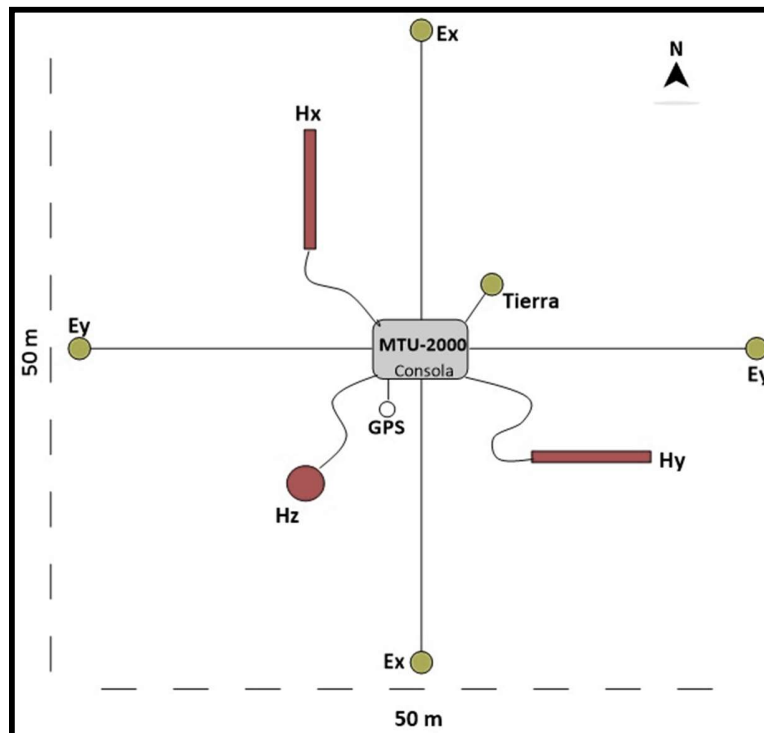


Figura 5.1: Diagrama de la instalación del equipo MT. Elaboración propia.

Como se mencionó en el apartado 2.1, se utilizaron 7 sondeos Magnetotelúricos para desarrollar el análisis en esta tesis, mismos que, por su distribución geográfica, se agruparon en 2 zonas, la primera denominada como “Domo de San Pedro” y la segunda “Compostela”. La información espacial de dichos sondeos se desglosa en la Tabla 2.

Tabla 2: Información Espacial de los Sondeos.

ESTACIÓN	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)
A10	2343761.307	529323.311	1310
A38	2344054.069	524072.625	1311
A40	2348689.817	492056.857	91
A42	2342258.078	534170.189	1015
A44	2337367.024	531186.420	990
A70	2352276.001	497196.001	586
A71	2352245.000	503606.999	767

5.2. Metodología

El procesado de los datos se realizó con base en las dos zonas propuestas, esto a causa de la separación geográfica que existe entre ellas. Por esta razón, y por requerimientos del programa utilizado para el procesado, se generó 1 perfil (**P1**) que engloba los 7 sondeos realizados, como se muestra en la *Figura 5.2*.

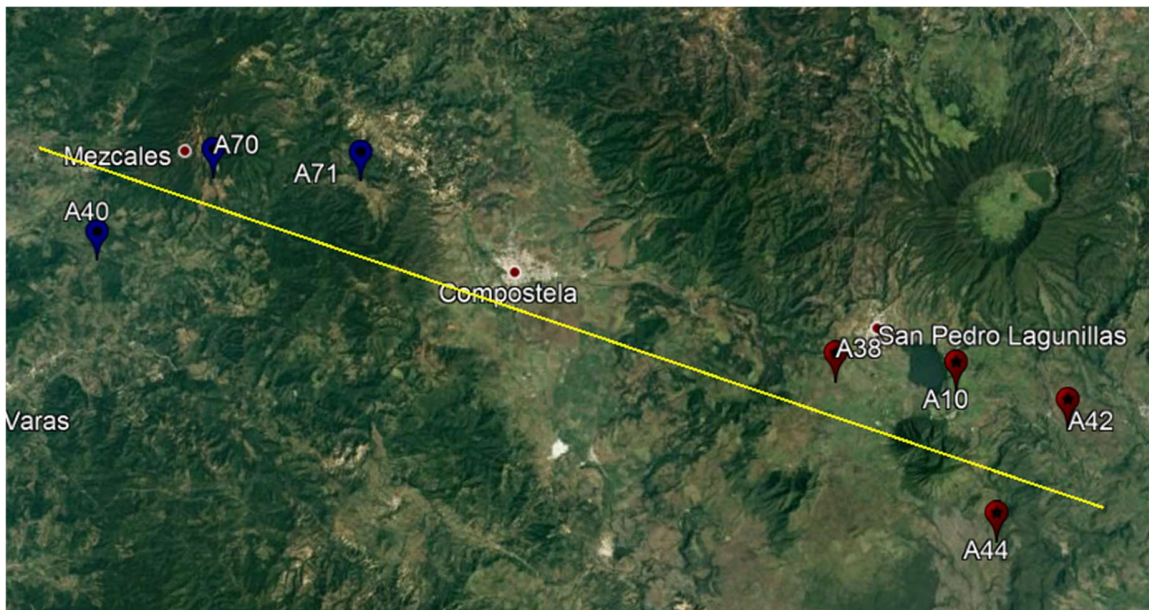


Figura 5.2: Perfil utilizado para el procesado de datos, se observan los datos en la zona de Compostela (Azul) y el Domo de San Pedro (Rojo). Elaboración propia.

El primer procesado para los datos consistió en realizar un modelo unidimensional. Al exceder los límites de este trabajo, no fue realizado un cálculo matemático

para realizar una rotación hacia el strike de los modos TE y TM, por lo que el proceso de inversión se realizó mediante el Modo Invariante (Apartado 4.8.1). Con los resultados de estas inversiones se realizó una interpolación entre las estaciones de cada uno de los perfiles.

Para simular un cálculo hacia el strike (Apartado 4.8), se hizo un análisis de las principales fallas geológicas en el área y su dirección respecto al norte, la cual se utilizó como valor para realizar una rotación de los datos, buscando tener datos más cercanos a la realidad y, por ende, también modelos más exactos.

Posterior a la rotación, se realizó nuevamente la inversión de los datos 1D, no obstante, principalmente se buscaba obtener los modos TE y TM para poder realizar una inversión bidimensional de los datos sobre el mismo perfil propuesto.

El objetivo de realizar los modelos e interpolaciones es poder determinar el método que presenta el mejor resultado respecto a la teoría, en otras palabras, si los modelos unidimensionales y bidimensionales son diferentes, y cuál muestra más información acorde a la geología local; así mismo, se compara el cambio entre los modelos rotados y sin rotar. Toda vez que se determine qué método y modelo presenta los mejores resultados, este será el utilizado para realizar el análisis de los resultados y conclusiones del trabajo.

5.3. Procesamiento de Datos.

Para realizar la inversión de los datos fue utilizado el software WinGLink®, sin embargo, previamente a utilizar estos datos, deben ser preprocesados utilizando diferentes herramientas, especialmente para transformar series de tiempo en datos de resistividad aparente. Para este proceso se utilizaron los softwares SSMT-2000 y MTedit, de la misma marca que el equipo de medición, sin embargo, este proceso previo no será tocado profundamente debido a que no fue realizado a detalle en los datos de este trabajo.

El resultado del preprocesado de los datos es un archivo de formato “.EDI”, mismo que es utilizado para realizar el proceso de inversión y modelado 1D y 2D.

Los archivos *EDI* son lo que se cargan en WinGLink y mediante los cuales se realiza la inversión de los datos para las diferentes dimensionalidades que presenten.

5.3.1. Corrección de Distorsión Galvánica

Como se mencionó en el Apartado 4.9, el fenómeno de distorsión galvánica causa un corrimiento en los datos para una o ambas componentes, por lo que, antes de realizar la inversión, es importante solucionar este problema.

Aunque el método más efectivo para solucionarlo es con ayuda de otro método que no se vea afectado por estas anomalías, en este caso no fue posible obtener información de sondeos auxiliares, razón por la cual se realizó un análisis para correlacionar los sondeos con la información geológica somera que se tiene, permitiendo así ajustar la información de las curvas de resistividad aparente a valores conocidos y eliminar lo más posible el Static Shift presente.

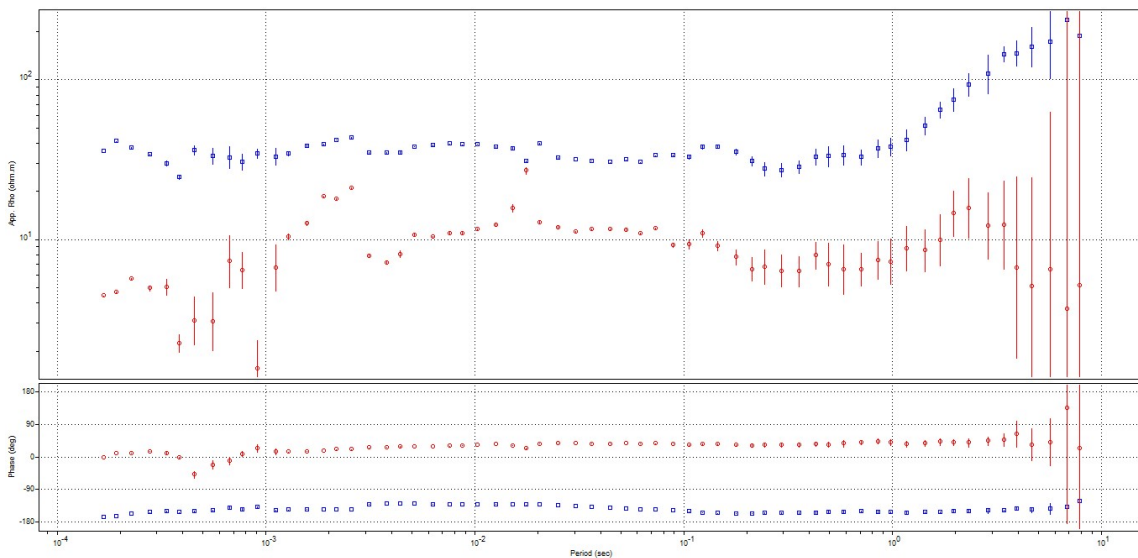


Figura 5.3: Sondeo antes de realizar la corrección de S.S. Elaboración propia.

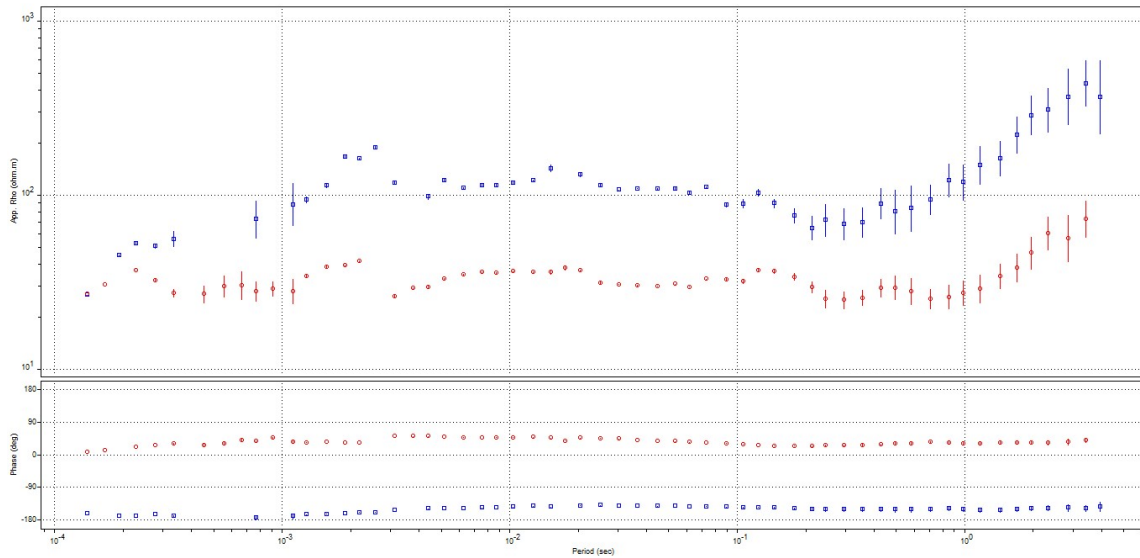


Figura 5.4: Sondeo corregido por S.S. Elaboración propia.

5.4. Inversión 1D

Para realizar la inversión unidimensional de los sondeos, es necesario eliminar los puntos anómalos de las curvas, es decir, algunos puntos que pudieran tener lecturas que no corresponden con la realidad y que pudieran causar alteraciones en los datos. Esto se realiza principalmente analizando las curvas de resistividad aparente y fase, debido a que, si alguna presenta un comportamiento fuera de la tendencia general, es probable que se trate de un dato anómalo y deba ser eliminado. Para apoyar esto, se suele generar una línea de tendencia de los datos, misma que posteriormente sirve para la inversión.

El software empleado para el procesamiento de los datos utiliza el método de *Occam* para la inversión unidimensional. Este procesamiento, o algoritmo, de inversión se basa en lograr el modelo más “suavizado” con respecto a los datos, esto mediante el uso de curvas que simulan capas de diferentes resistividades conforme varía la profundidad, es decir, se busca determinar qué valor de resistividad y a qué profundidades se obtiene el mejor resultado para los datos de resistividades aparentes que se obtuvieron de las mediciones.

Como se mencionó en el Apartado 4.2, se utilizó el modo invariante para realizar el ajustado de las curvas en una dimensión, por lo que se obtuvieron modelos de resistividades como el que se presenta en la *Figura 5.5*.

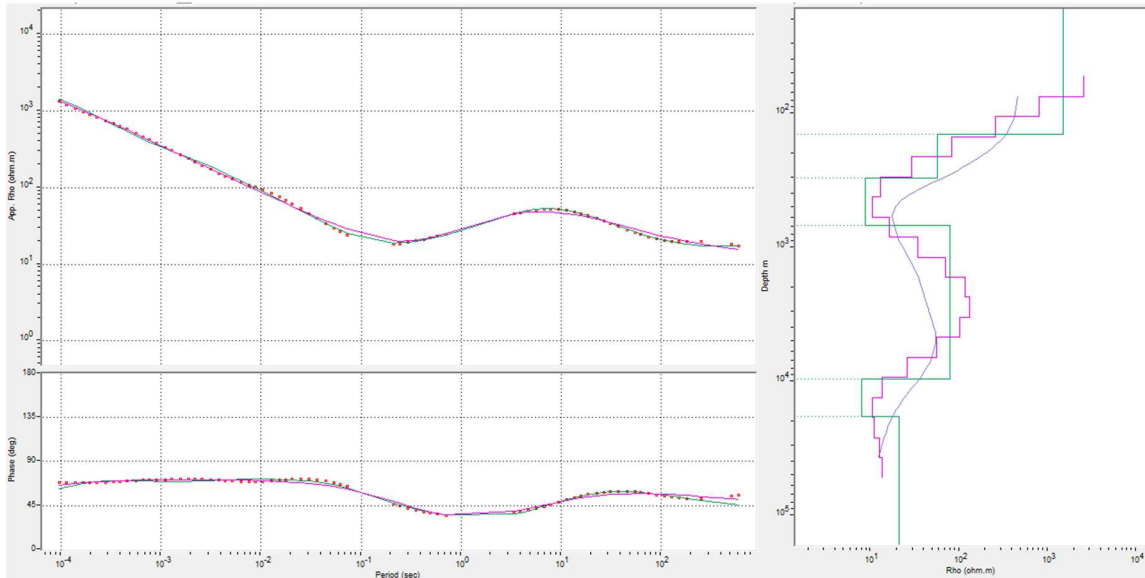


Figura 5.5: Modelo 1D resultante del sondeo A10 (el resto de los sondeos se presentan en el Anexo II). Elaboración propia.

Posterior a realizar la inversión de todos los modelos 1D, se generó una interpolación entre estos para lograr observar el medio a lo largo del perfil propuesto, esto mediante el menú “X-Sections” del programa WinGLink.

5.5. Inversión 2D

Previo a comenzar el proceso de inversión bidimensional, se analizaron las gráficas de resistividades y la geología local para determinar si se contaban con las características pertinentes de un medio 2D, situación que resultó positiva, por lo que se procedió al proceso de rotación de los sondeos hacia el strike.

Como se mencionó, es necesario rotar los modos TE y TM rumbo al strike para obtener los resultados más exactos posibles en los modelos, sin embargo, al no realizarse un análisis matemático respecto a su direccionalidad real, se procedió a examinar la geología estructural local para determinar una ubicación y dirección de las principales fallas a lo largo del perfil analizado, para así poder rotar los sondeos en función de los que se considera la dirección preferencial del flujo eléctrico,

de este proceso se determinó un ángulo de rotación de 45° respecto al N. Posteriormente se repite el proceso de inversión unidimensional, mencionado en el apartado anterior.

Para la inversión 2D, el software utiliza un algoritmo basado en el método iterativo de los Gradientes Conjugados No Lineales (GCNL), en el cual se busca la solución regularizada para el problema inverso, mediante la minimización de la función objetivo (Rodi y Mackie, 2001). La inversión fue realizada sobre un mallado definido con aproximadamente 7 y 8 columnas entre cada sondeo, mientras que en las filas varía la distancia entre estas conforme aumenta la profundidad. Por último, la topografía fue obtenida a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) descargado de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El modelo inicial se propuso como una capa uniforme de resistividad igual a $111 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, como se observa en la *Figura 5.6*.

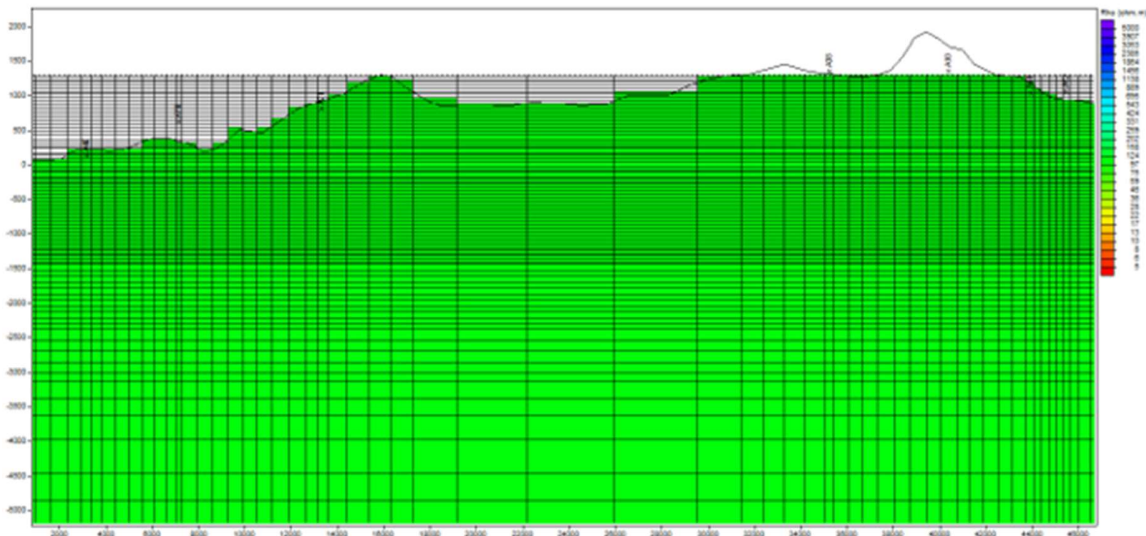


Figura 5.6: Mallado propuesto para la inversión 2D. Elaboración propia.

El algoritmo de inversión fue corrido con 60 iteraciones, cantidad que mostró ser suficiente para el modelado, ya que no genera artificios por sobre iteración, así mismo se determinó un valor de τ de 3.00, finalmente, el modelo resultante de la inversión tuvo un error final general (RMS) de 2.339. El ajuste y error de cada uno de los sondeos se muestran en el *Anexo III*.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.

6.1. Discusión de Resultados

Para este capítulo se presentan los resultados, tanto de la interpolación unidimensional, como de la inversión bidimensional, se compararán ambos resultados para determinar qué procesado muestra los mejores resultados. Este será utilizado para el proceso de interpretación del medio, así como para establecer las conclusiones que resulten de este trabajo.

El resultado del procedimiento mencionado en el Apartado 4.4 se muestran en la *Figura 6.1*. Por otra parte, el resultado de la inversión 2D, descrita en el Apartado 4.5, se muestra en la *Figura 6.2*.

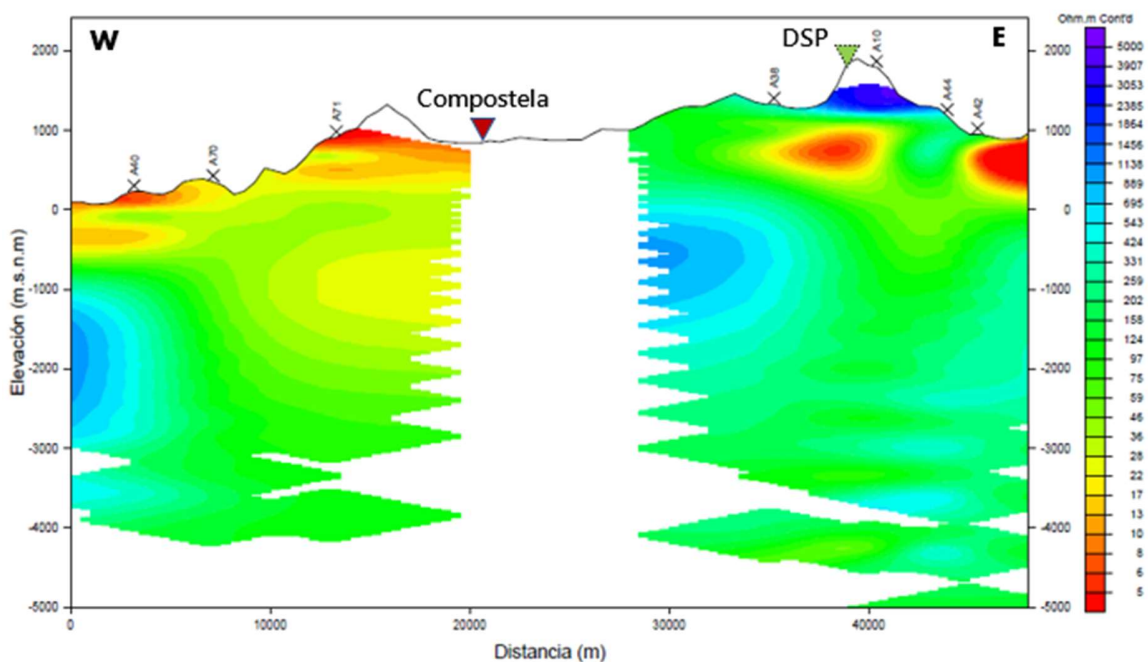


Figura 6.1: Resultado de la interpolación de las inversiones unidimensionales (Modo INV).
Elaboración propia.

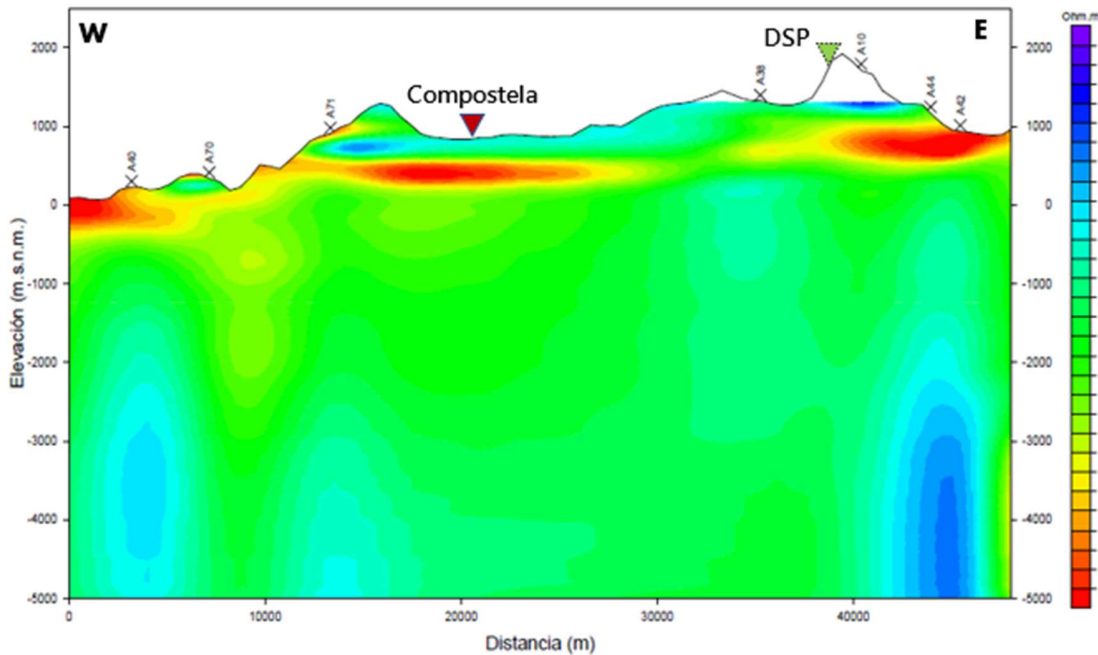


Figura 6.2: Resultado de la inversión bidimensional (Modos TE y TM). Elaboración propia.

De manera general, se podría decir que ambos modelos poseen un comportamiento un tanto similar para la parte más somera, debido a que en ambos se muestran cuerpos con bajas resistividades. No obstante, en cuanto a información en profundidad, claramente el modelo 2D muestra información mucho más considerable.

En cuanto a detalles, el modelo 1D muestra estructuras conductoras muy aisladas, especialmente en la zona del Domo de San Pedro, así como manchas de cuerpos resistivos en profundidades cercanas a los -3,000 m, mismas que serían muy complicadas de interpretar por la poca información que se posee, del mismo modo, el área de Compostela se muestra casi por completo como un medio con muy bajas resistividades (no mayor a 50 Ohm*m), situación que no se correlaciona con la geología local.

Por otra parte, el comportamiento de la inversión 2D muestra cuerpos conductoras mejor definidos en la superficie, también se observa en profundidad cuerpos resistivos, pero mucho mejor definidos. Por último, el medio en general correlaciona de mejor manera con la teoría, y permite un mejor análisis del comportamiento

de los flujos hidrotermales en el subsuelo. Por estas razones es que este modelo será utilizado para analizar los resultados en la zona de estudio.

Antes de continuar es importante señalar que, como se puede observar en el medio interpolado, existe un área sin información entre ambas zonas de análisis, esto evidentemente causado por la ausencia de información, por lo que, aunque en el modelo bidimensional se observe dicha área con información, esta no debe ser tomada como real, ya que es un artificio generado por el software al no tener datos reales con los cuales trabajar.

6.2. Interpretación de resultados

Para apoyar la interpretación y el análisis de los resultados, se realizó un mapa basado en la información recopilada de las cartas del Servicio Geológico Mexicano (*Figura 6.3*), en este se presenta la geología, así como las fallas estructurales que se tienen contempladas y que son incluidas en el modelo a analizar.

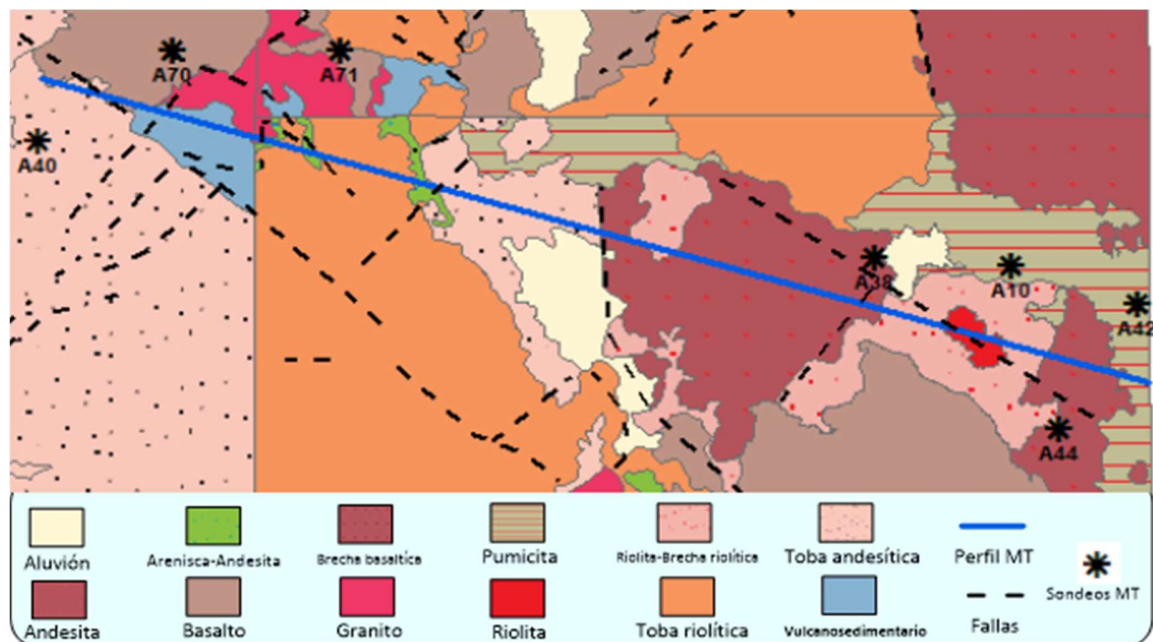


Figura 6.3: Mapa geológico del área de estudio. Elaboración propia, modificado de SGM 2007.

En cuanto al análisis del modelo, la parte al E, es decir, en la zona del Domo de San Pedro, se observa entre los 1,000 y 500 m.s.n.m. resalta un cuerpo bastante resistivo y de gran longitud, para los sondeos **A10** y **A44** este cuerpo se observa

bajo la superficie, sin embargo, en el sondeo **A42** aflora en la superficie debido a la topografía.

Dadas sus características y posición, dicho cuerpo podría tratarse de un reservorio geotérmico, acuíferos o rocas alteradas por los flujos hidrotermales. Esta propuesta se apoya especialmente en las fallas que se presentan entre los sondeos **A10** y **A44**, las cuales forman parte del graben de Compostela. Aunado a esto, se observa un fenómeno característico del hidrotermalismo, el cual se trata de las zonas por donde circulan los flujos y, en este caso, se perciben como forma de “chimenea”.

Esta chimenea se aprecia claramente bajo el reservorio, entre los -500 y -1,000 m.s.n.m., ya que hay un claro contraste entre un cuerpo resistivo (~600 Ohm*m), que pudiera tratarse de un basamento levemente alterado, y la zona con una gran alteración, la cual muestra resistividades cercanas a los 100 Ohm*m.

Se debe recordar que en esta zona ya existe el campo geotérmico “Domo de San Pedro” (DSP), el cual se encuentra actualmente en funcionamiento, por lo que se tiene la certeza de que el área mostrada se encuentra alterada por hidrotermalismo. Dichas características lograron ser observadas de manera general en el modelo, por lo que servirán de guía para explicar el comportamiento en el área de Compostela.

El área correspondiente a la orientación W pertenece a la zona de Compostela. En ésta se observan características similares al DSP, ya que cercano al sondeo **A40** también se tienen zonas con una alta conductividad, aunque de menor dimensión que las previamente analizadas. Así mismo, se observan pequeñas áreas alteradas muy cercanas a la superficie.

Haciendo especial énfasis en el sondeo **A71**, se sabe que cerca de este se encuentra otra falla, y el modelo muestra características poco resistivas y con un abrupto cambio a causa de un pequeño cuerpo intrusivo cercano. Aunque está cercano a la zona de incertidumbre, si se tienen indicios de que pudiera existir un cuerpo con valores de resistividad considerables, que posea mayores dimensiones y se encuentre relativamente cerca del sondeo. Un caso similar ocurre cerca del

sondeo **A70**, donde igualmente se observa un cuerpo menos conductivo que su entorno.

Sin embargo, el punto que más resalta de esta zona es que nuevamente se observa la presencia de una “chimenea” con características similares a la del DSP, enmarcada por cuerpos resistivos levemente alterados, con valores de resistividad un tanto menores ($\sim 400 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$), y que permiten observar el comportamiento de los fluidos hidrotermales. Aunado a esto, se tiene la presencia de las fallas reportadas por el SGM, que correlacionan de buena manera con el modelo y la presencia de esta chimenea.

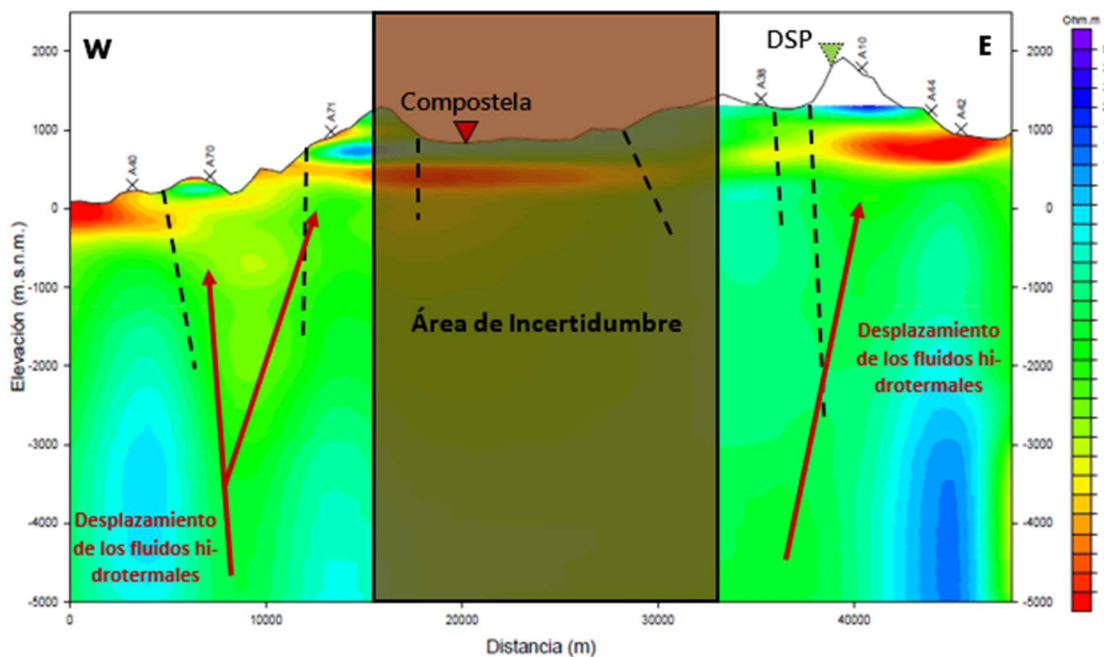


Figura 6.4: Descripción del comportamiento de los flujos hidrotermales y las fallas reportadas por el SGM (líneas punteadas). Elaboración propia.

Como se observa en la *Figura 6.4*, la cual muestra gráficamente los elementos y fenómenos anteriormente redactados, en ambas zonas se tienen indicios de posible hidrotermalismo, especialmente por las alteraciones en forma de chimeneas comentadas, así como los cuerpos poco resistivos que se muestran cercanos a la superficie.

Del mismo modo, y como también ya fue mencionado, las fallas mostradas correlacionan de buena manera con el modelo, aunque es importante mencionar

que la dirección y profundidad de estas no está reportada por el SGM, por lo que esa información fue estimada con base en el modelo presentado, y no deben darse por definitivas.

Por último, y solo a modo de complemento para la interpretación, en la *Figura 6.5* se presenta un modelo que muestra de manera un poco más gráfica las explicaciones dadas en este apartado, basados en el modelo analizado.

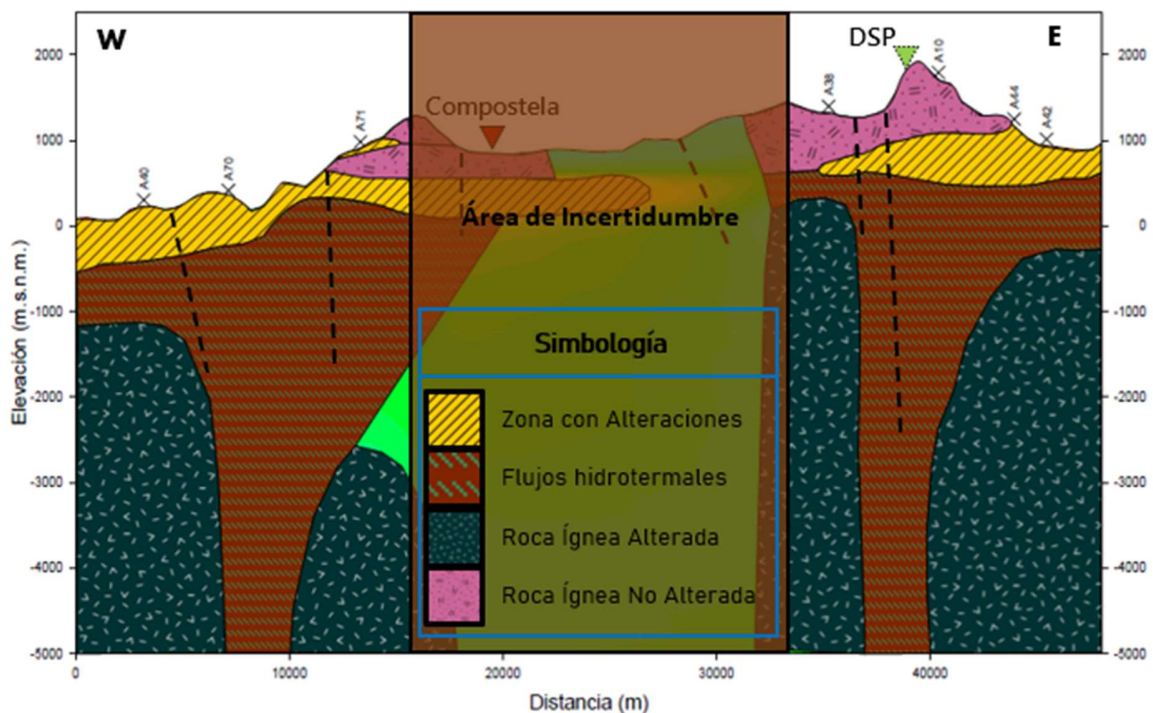


Figura 6.5: Modelo geológico inferido de la zona de estudio. Elaboración propia.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La información proporcionada por este método, tanto vertical como horizontalmente, permiten analizar grandes áreas de estudio con pocos sondeos, ya que se obtienen modelos consistentes que permiten un análisis coherente respecto a los parámetros conocidos del medio, como la geología y la topografía.

El determinar la dirección del strike para rotar los sondeos es vital para un correcto procesado y análisis de los datos Magnetoteléuricos, esto se puede corroborar comparando la información obtenida entre el modelo interpolado y la inversión bidimensional, el primero fue sin considerar el strike y el segundo con una

aproximación a este, obteniendo un resultado mucho más claro con el modelo 2D, mismo que se puede mejorar aún más realizando un cálculo más preciso del ángulo al cual se debe realizar la rotación.

Como se propuso en los objetivos de esta tesis, fue posible obtener información muy útil de los sondeos analizados, a pesar de las correcciones y filtrado de los mismos, se lograron obtener modelos 1D y 2D coherentes con la geología.

Del mismo modo, los modelos resultantes mostraron información contundente de flujos y alteraciones hidrotermales, por lo que, basados en los resultados obtenidos y la geología estudiada, es posible determinar que en el área existen otras zonas cercanas con potencial geotérmico además de la del DSP, especialmente gracias a la presencia del CVTM.

Las formaciones tipo chimenea que presenta el área de Compostela presentan características similares a las de la zona del DSP, por lo que una nueva línea de investigación podría consistir en determinar si provienen de la misma fuente de calor y/o yacimiento geotérmico.

Por otra parte, como recomendaciones se sugiere intensificar la densidad de sondeos para obtener un modelo mucho más detallado, así como considerar realizar perfiles en diferentes direcciones para complementar los resultados.

Así mismo, y debido a la gran cantidad de fallas y fracturas en diferentes direcciones que se presentan en el área, se sugiere considerar un medio tridimensional para futuras investigaciones, esperando que este método refleje aún mejores resultados que los presentados en este trabajo.

REFERENCIAS.

- Aguilera Torres Guillermo. (2012). INVENTARIO FÍSICO DE LOS RECURSOS MINERALES CARTA XALISCO F13 – D31, MUNICIPIOS: XALISCO, TEPIC, SANTA MARÍA DEL ORO, COMPOSTELA Y SAN PEDRO LAGUNILLAS, ESTADO DE NAYARIT. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Avila Vargas O. (2019). MODELO DEL GRABEN DE JUCHIPILA A PARTIR DE DATOS MAGNETOTELÚRICOS. Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Avilés Esquivel T. A. (2016). Estudio magnetotelúrico en el norte del Golfo de California. Ensenada, B.C., México: CICESE.
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18(3), 605-635.
- Calkin, M. G. (1965). An invariance property of the free electromagnetic field. *American Journal of Physics*, 33(11), 958-960.
- Camacho Peñalosa, Carlos. (1987). ECUACIONES Y RELACIONES ENERGÉTICAS DE LA ELECTRODINÁMICA. Madrid, España: E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación.
- Castillo, H., & De la Cruz, M. (1992). Reconocimiento estructural y vulcanológico en la zona termal del Domo San Pedro Lagunillas, Nayarit, México. *Geofísica Internacional*. V. 31, pp. 407–415.
- Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. (2019). ¿Qué es la geotermia? 2021, de CeMIEGeo Sitio web: <http://www.cemiegeo.org/index.php/que-es-la-geotermia>
- Chave, A. y Jones, A. 2012. *The magnetotelluric method: theory and practice*. Cambridge University Press.
- Comeau, Matthew. (2015). Electrical Resistivity Structure of the Altiplano-Puna Magma Body and Volcan Uturuncu from Magnetotelluric Data. 10.13140/RG.2.2.10150.32329.

- Conagua. (2020). ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE COMPOSTELA (1805), ESTADO DE NAYARIT. Ciudad de México.
- Corbo-Camargo F. (2006). Modelo Geofísico del acuífero Guaraní: zona comprendida entre Uruguay y Argentina. Tesis Maestría, Posgrado en ciencias de la Tierra, UNAM.
- INEGI. (2000). Síntesis de información geográfica del Estado de Nayarit. Aguascalientes, Ags: INEGI.
- Ferrari et al. (2003). Geology of the San Pedro Ceboruco Graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. V.20, pp. 165–181.
- Ferrari et al. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. V.57, pp. 343–378.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. V.53, pp. 84–92.
- Ferrari, Luca; Petrone, Chiara; Francalanci, Lorella; Tagami, T.; Eguchi, M.; Conticelli, Sandro; Piero, Manetti & Venegas-Salgado, S. (2003). Geology of the San Pedro - Ceboruco Graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 20. 165-181.
- Ferrari, Luca & Rosas-Elguera, J. (2000). Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: the Tepic-Zacoalco rift revised. *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*. 334. 42-64.
- Fleisch, D. (2008). *A student's guide to Maxwell's equations*. Cambridge, UK New York: Cambridge University Press.
- Fujimoto, M. (2007). *Physics of classical electromagnetism*. New York: Springer.

- Martí i Castells, A. (2006). Magnetotelluric investigation of geoelectrical dimensionality and study of the central Betic Crustal Structure, A. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. Department de Geodinamica i Geofísica.
- Ortiz Fuentes J. A. (2010). ESTUDIO SOBRE LA INVARIANCIA ELECTROMAGNÉTICA ANTE LA REVERSIÓN TEMPORAL (TIME REVERSAL) MEDIANTE EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (FDTD). D.F., México: UNAM.
- Peláez Zapara Rubén. (2017). Geotermia en México, Un Potencial de Energía “Inagotable”. PetroQuiMex. México.
- Prol-Ledesma Rosa María. (1988). El Calor de la Tierra. Fondo De Cultura Económica. México, D.F.
- Rodríguez Álvarez Rafael. (2001). ALTERACION HIDROTERMAL. 2021, de Unalminas Sitio web: <https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/vmakshev/ALTERACION.pdf>
- Ruíz Martínez, V. (2004). Estudio Paleomagnético del Cinturón Volcánico Transmexicano: Implicaciones tectónicas. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Secretaría de Energía (SENER). (2016). Balance Nacional de Energía 2015. México, Ciudad de México.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Geotermia. 2021, de SGM Sitio web: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Geotermia.html
- Simpson, F. y Bahr, K. (2005). Practical Magnetotellurics. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Stock, J. (1993). TECTONICA DE PLACAS Y LA EVOLUCION DEL BLOQUE JALISCO, MEXICO. Boletín de la Unión Geofísica Mexicana. V. 13, pp. 3–9.
- Subdirección General Técnica, Gerencia De Aguas Subterráneas. (2020). ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL

ACUÍFERO VALLE DE COMPOSTELA (1805), ESTADO DE NAYARIT. Ciudad de México: CONAGUA.

Teklesenbet, A.B. (2012). Multidimensional inversion of MT data from Alid Geothermal area, Eritrea. Comparison with geological structures and identification of a geothermal reservoir. Tesis Doctoral. Faculty of Earth Sciences, University of Iceland.

Universidad de Guadalajara (UDG). (2001). Las regiones geomorfológicas del estado de Jalisco (Geocalli Cuadernos de Geografía) Vol. 3. Jalisco, México: Departamento de Geografía y Ordenación Territorial.

Uribe Marín María De Los Ángeles. (2015). Aplicación del método Magnetotelúrico (MT) en dos zonas con posible potencial geotérmico ubicadas en la xi región de Aysen, Chile. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

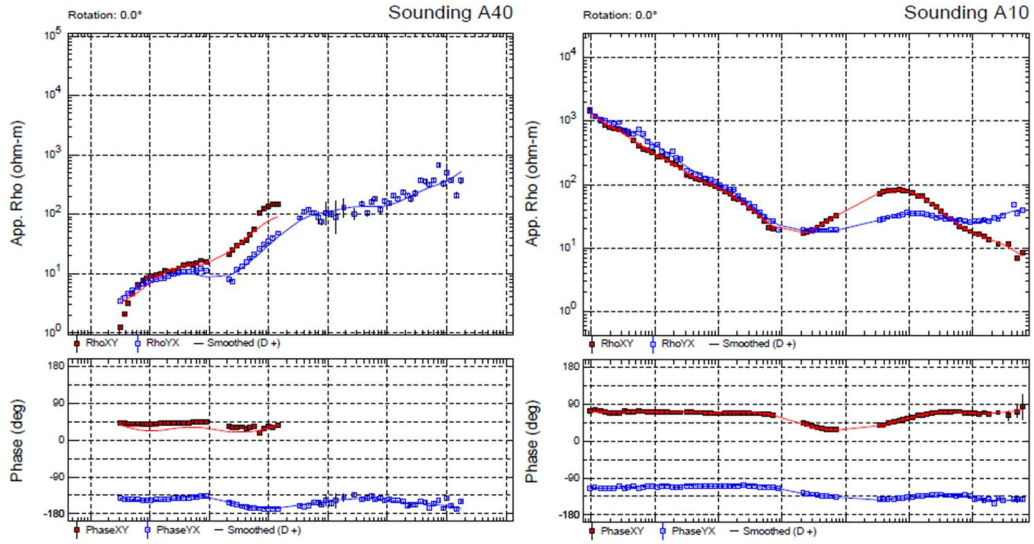
Vozoff, K. (1972). The Magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. Geophysics.

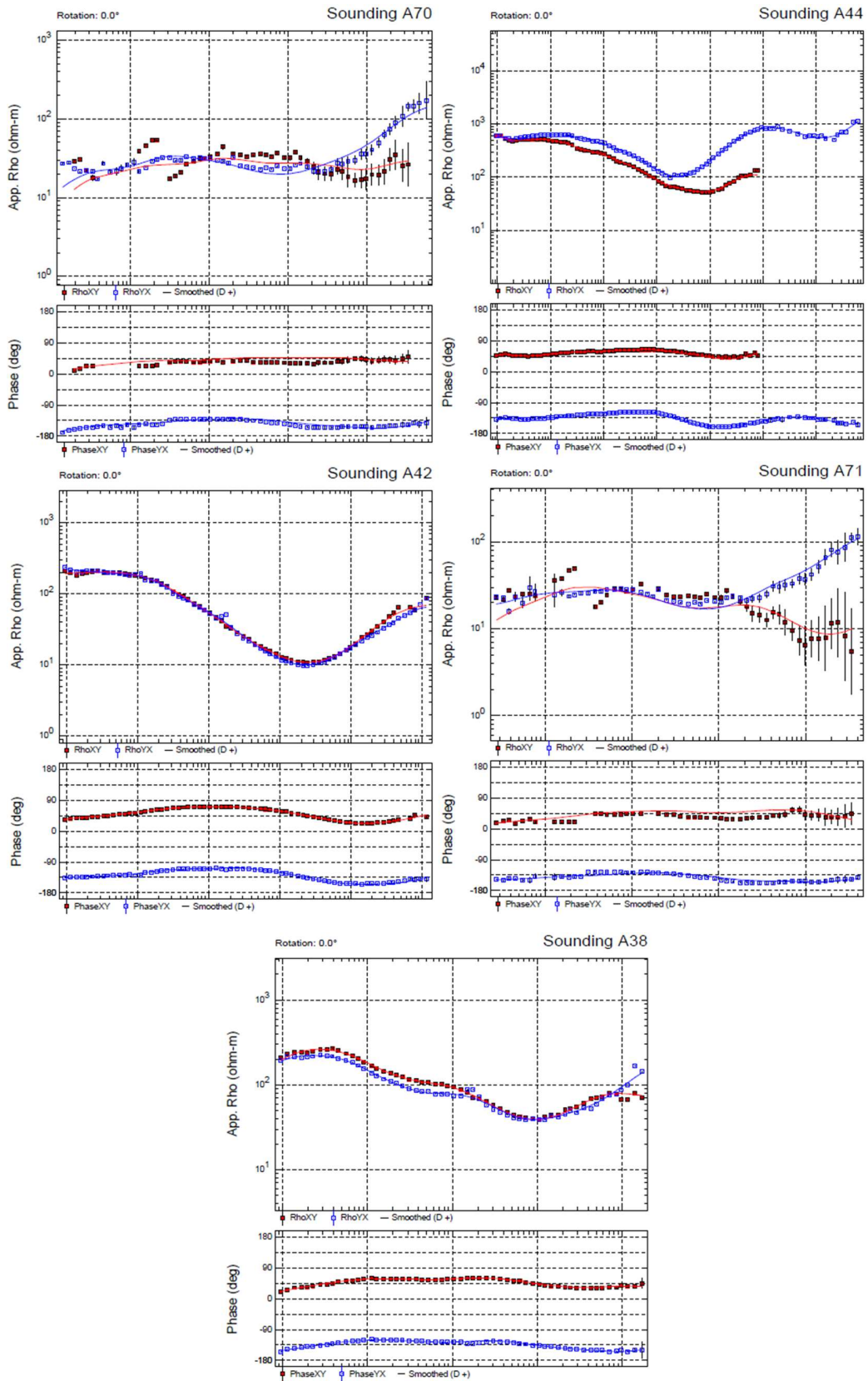
Yarza De la Torre E. (2003). Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM. V. 50, pp. 220-224.

Zhdanov, M.S. (2009). Geophysical Electromagnetic Theory and Methods. Vol. 43, Elsevier.

ANEXOS

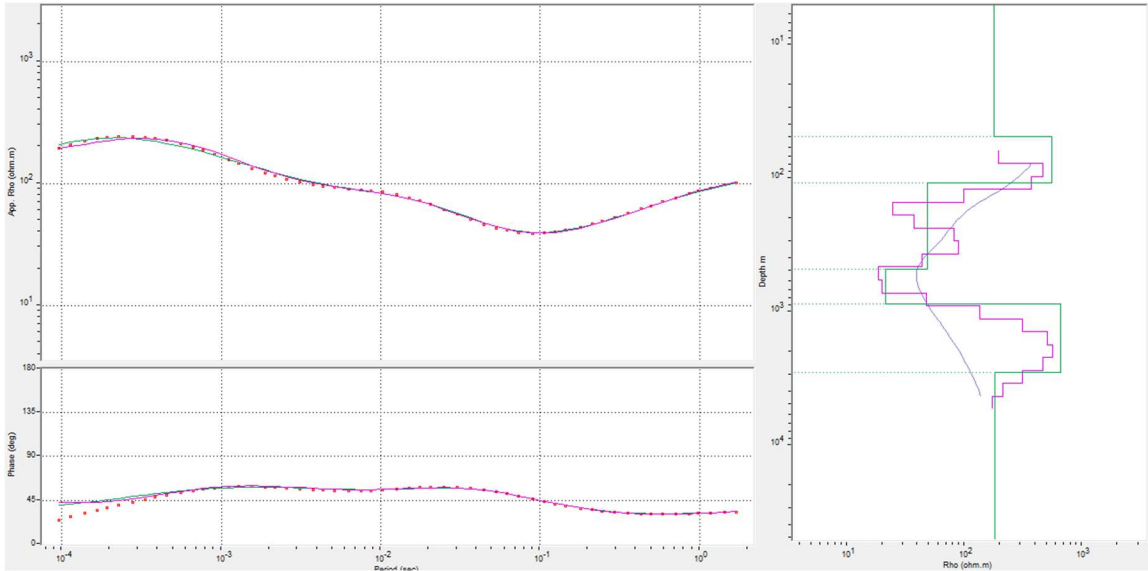
I. Datos filtrados previo a realizar la inversión 1D



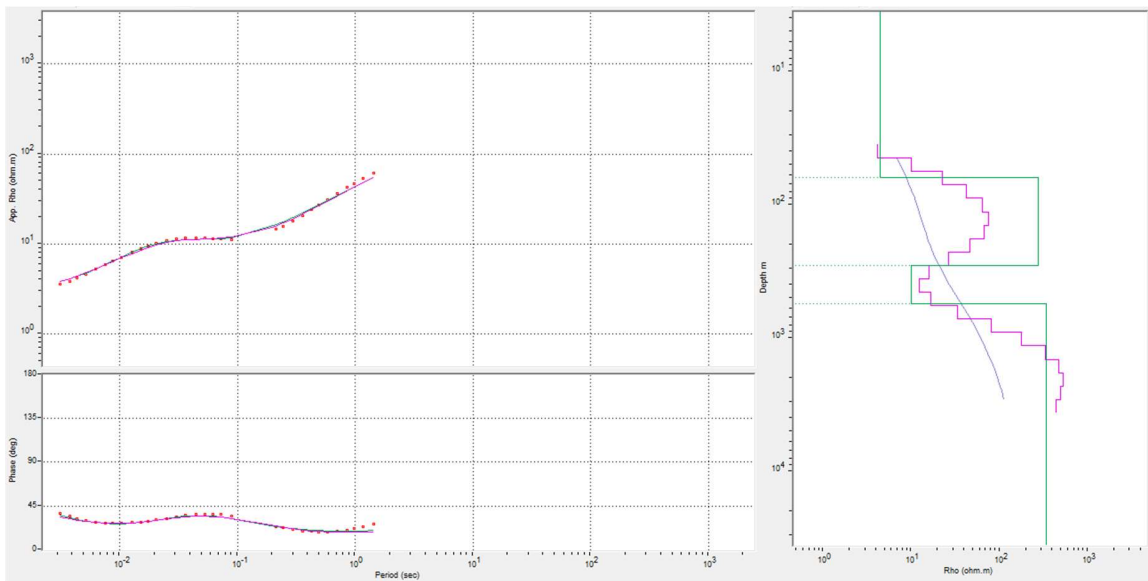


II. Curvas de ajuste para los modelos 1D.

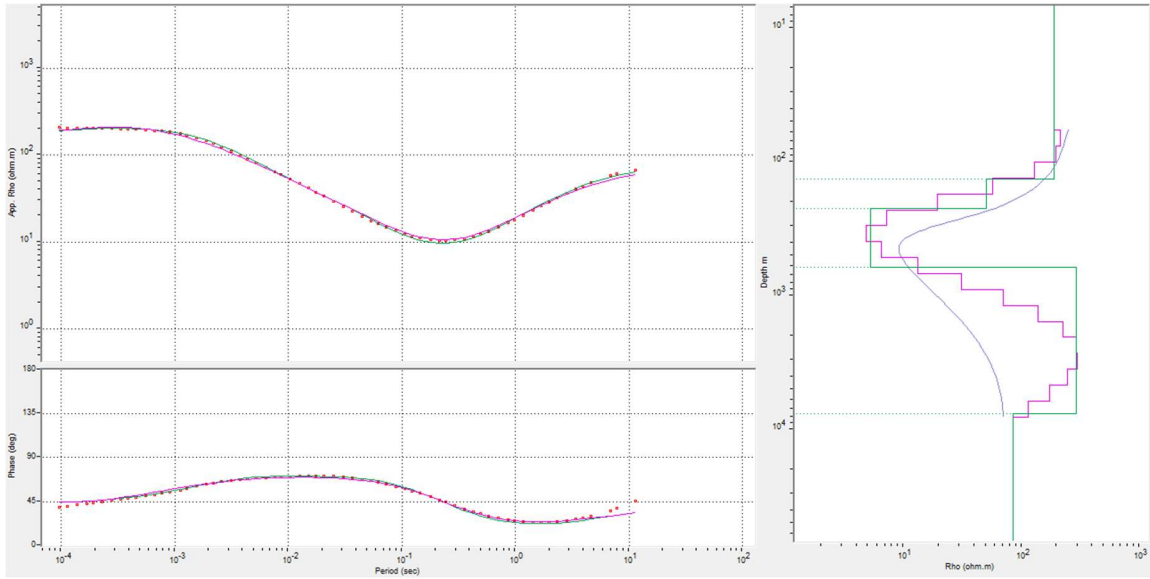
Sondeo A38.



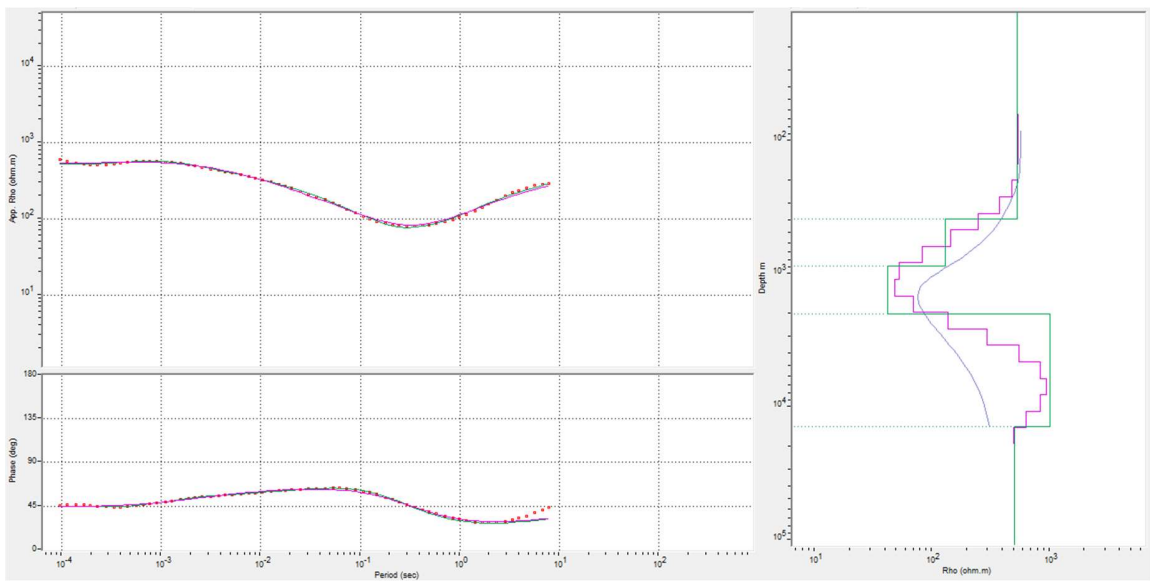
Sondeo A40



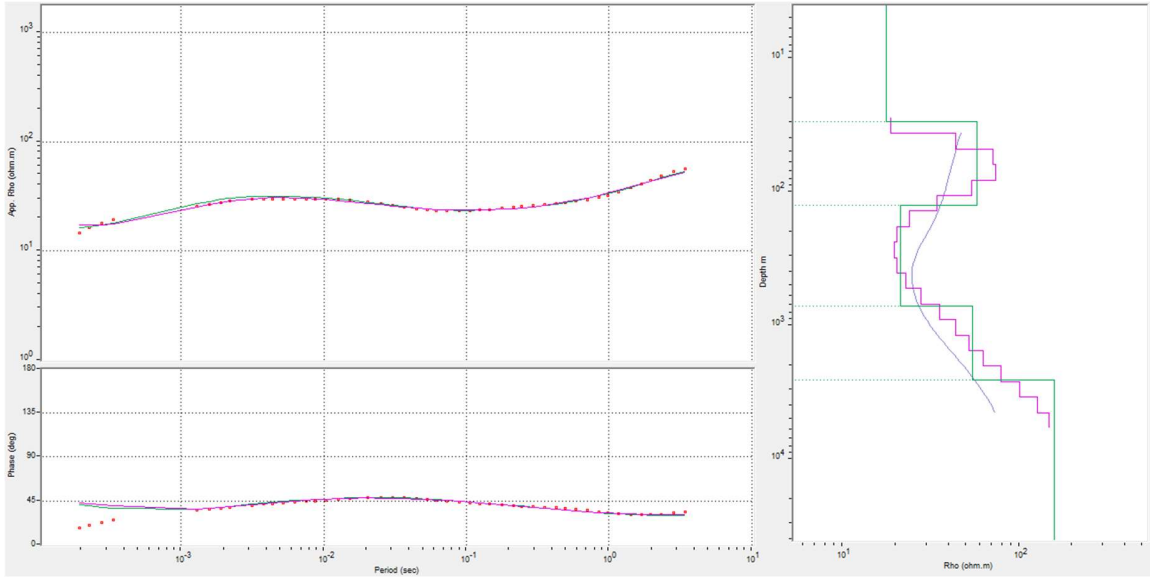
Sondeo A42



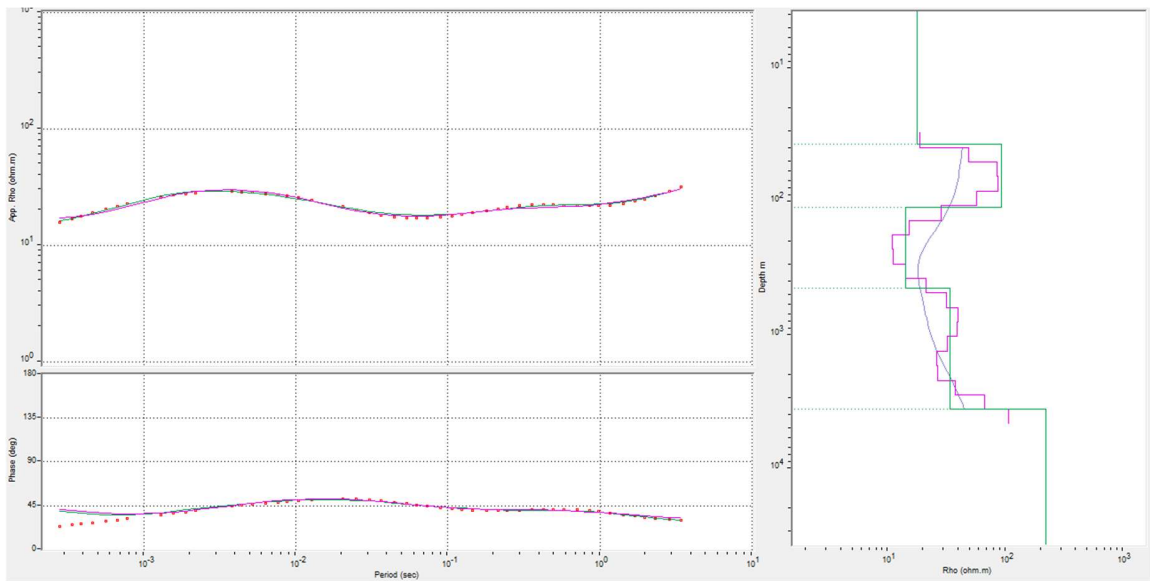
Sondeo A44



Sondeo A70



Sondéo A71



III. Ajuste de curvas para Modelo 2D.

