



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y
TECNOLÓGICA**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**“APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA LA
PROSPECCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA: CASO GRABEN
VILLA DE REYES, S.L.P.”**

Tesis que presenta

Alexa Sofía Sánchez Barrientos

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

Director de la tesis

Dr. Héctor López Loera

San Luis Potosí, S.L.P., septiembre, 2023



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Aplicación de métodos geofísicos para la prospección de agua subterránea: caso graben Villa de Reyes, S.L.P.**” presentada para obtener el grado de maestra en geociencias aplicadas fue elaborada por **Alexa Sofía Sánchez Barrientos** y aprobada el **28 de septiembre de 2018** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Héctor López Loera

Director/Codirectores de la tesis

Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino

Miembro del Comité Tutorial

Dr. Joselin de Lourdes Almaguer Rodríguez

Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en las instalaciones de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Doctor Héctor López Loera.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (1142926) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Página en Blanco que se va a utilizar para colocar la copia del acta de examen.

A mis padres, quienes siempre han sido mi fuente inagotable de apoyo y amor.
Gracias por estar a mi lado en este viaje.

A Oliver, mi compañero de vida y mi pilar inquebrantable, gracias por todo.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento al Dr. Héctor, quien siempre estuvo dispuesto a resolver mis dudas, compartir su conocimiento. Su amabilidad y amistad fueron un pilar fundamental en este camino.

Agradezco de manera especial a mis asesoras, las Dras. Ana y Joselin, quienes estuvieron siempre disponibles para ayudarme en todo momento. Sus valiosos comentarios y observaciones sobre mi trabajo contribuyeron significativamente a su mejora.

No puedo pasar por alto el apoyo fundamental del Maestro David, así como de mis compañeros Emanuel, Rodrigo, Ulises, Lesly y Daniel. Su colaboración en la obtención de los datos de campo fue esencial y permitió que este proyecto avanzara de manera eficiente.

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) por abrir sus puertas para realizar mi maestría y proporcionarme invaluable experiencias y oportunidades de crecimiento.

Al CONAHCYT, mi gratitud por la beca que me otorgaron, la cual hizo posible cumplir este sueño académico.

A mi madre, mi mejor amiga y mayor apoyo, y a mi padre, por enseñarme a superar todos los obstáculos que la vida presenta. A mis hermanos, Vic y Pau, por su cariño y por ser ejemplos a seguir en mi vida.

A Oliver, por su apoyo incondicional y amor que me han sostenido en durante este viaje.

A mis amigos de la maestría, que llegaron a convertirse en una parte fundamental de esta etapa. Daisy, Bere, Betty, Karla, Pavel, Ana, Cristy, Jorge, les agradezco enormemente por su apoyo, por todas las risas compartidas y por hacer esta travesía académica aún más memorable.

CONTENIDO

Constancia de aprobación de tesis.....	ii
Créditos institucionales.....	iii
Acta de examen.....	iv
Dedicatorias.....	v
Agradecimientos.....	vi
Lista de tablas.....	x
Lista de figuras.....	xi
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	2
1.3 Antecedentes	2
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 General	5
1.4.2 Particulares.....	5
1.5 Localización de la zona de estudio.....	6

CAPÍTULO 2: ENTORNO GEOLÓGICO

2.1 Geología regional.....	7
2.1.2 Estratigrafía	8
2.2 Geología Local	12
2.2.1 Estratigrafía	13

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Método magnético	16
3.1.1 El método magnético como herramienta de exploración	16
3.1.2 Conceptos básicos de magnetismo	16
3.1.2.1 Ley de Coulumb	16
3.1.2.2 Campo magnético.....	17
3.1.2.3 Flujo e inducción magnética	18
3.1.2.4 Magnetización y susceptibilidad magnética	18
3.1.2.5 Relación entre B y H.....	19
3.1.3 El campo magnético de la Tierra	19
3.1.4 Elementos del campo magnético terrestre	20
3.1.5 Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)	21

3.1.6 Variaciones temporales del campo magnético terrestre.....	22
3.1.7 Remanencia magnética.....	23
3.1.8 Adquisición de los datos de magnetometría aérea	26
3.1.9 Adquisición de datos de magnetometría terrestre.....	26
3.1.10 Filtros matemáticos para procesado de la información.....	27
3.1.11 Dominios magnéticos	28
3.1.12 Propiedades magnéticas de rocas y su composición mineralógica.....	29
3.1.13 Modelado magnético 3D	29
3.2 Método geoelectrico	30
3.2.1 Introducción	30
3.2.2 Resistividad eléctrica	31
3.2.3 Ley de Ohm.....	32
3.2.4 Resistividad de las rocas	33
3.2.5 Resistividad aparente	34
3.2.6 Dispositivos electródicos	35
3.2.7 Tipos de dispositivos electródicos	35
3.2.7.1 Schlumberger.....	36
3.2.7.1 Wenner.....	37
3.2.8 Sondeo Eléctrico Vertical:.....	38
3.2.9 Tipos de curvas	38
3.2.10 Interpretación de las curvas de resistividad aparente:	40
3.2.11 Dominios eléctricos	40
3.3 Análisis estadístico multivariado.....	41
3.3.1 Pretratamiento de la base de datos.....	41
3.3.2 Análisis de correlación	42
3.3.3 Análisis de componentes principales.....	43
3.3.4 Análisis de clúster	43

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1 Método magnético	45
4.1.1 Magnetometría aérea.....	45
4.1.2 Magnetometría 3D	47
4.1.3 Magnetometría terrestre.....	48
4.2 Método geoelectrico	52
4.2.1 Sondeos Eléctricos Verticales	52
4.2.2 Características de los sondeos eléctricos verticales	53

4.3 Análisis estadístico multivariado.....	55
4.4 Integración de la información geofísica.....	58

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Magnetometría aérea.....	60
5.1.1 Dominios aeromagnéticos	61
5.1.2 Magnetometría 3D	67
5.2 Magnetometría terrestre.....	71
5.2.1 Dominios magnéticos	72
5.2.2 Señal analítica	75
5.3 Método geoelectrico	76
5.3.1 Sondeos eléctricos verticales.....	76
5.3.2 Tipos de curvas	77
5.4 Análisis estadístico multivariado.....	78
5.4.1 Pretratamiento de la base de datos.....	78
5.4.2 Análisis de correlación	79
5.4.3 Análisis de componentes principales.....	81
5.4.4 Análisis de clúster	82
5.5 Integración de la información geofísica	84
SECCIÓN A-A'	86
SECCIÓN B-B'	87
SECCIÓN C-C'	88
Descripción sección A-A'	89
Descripción sección B-B'	90
Descripción sección C-C'	92
6. Conclusiones	94
7. Referencias bibliográficas.....	95

Lista de tablas

Tabla 1: Susceptibilidad magnética de algunas rocas.....	29
Tabla 2: Resistividad de varias rocas y sedimentos.....	33
Tabla 3: Localización y abertura máxima de cada SEV.....	53
Tabla 4: Variables utilizadas para el análisis estadístico.....	56
Tabla 5: Características principales de los DAM's.....	65
Tabla 6: Características principales de los DM's.....	75
Tabla 7: Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk.....	79
Tabla 8: Resultados del análisis de componentes principales.....	81
Tabla 9: Resultados estadísticos del análisis de clúster.....	82

Lista de figuras

Figura 1: Localización de la zona de estudio.....	6
Figura 2: Mapa de la geología de la zona de estudio.....	12
Figura 3: Columna estratigráfica del área de estudio.....	13
Figura 4: Campo Magnético de la Tierra.....	20
Figura 5: Componentes del Campo Magnético.....	20
Figura 6: Modelo de Campo Magnético Total del 2020	22
Figura 7: Diferentes tipos de magnetización.....	24
Figura 8: Arreglo atómico de los distintos materiales ferrosos.....	25
Figura 9: Dispositivo electródico Polo-Dipolo.....	29
Figura 10: Diferentes configuraciones de arreglos electródicos.....	36
Figura 11: Configuración electródica Schlumberger.....	37
Figura 12: Configuración electródica Wenner.....	38
Figura 13: Diferentes tipos de curvas para tres capas con diferentes resistividades.....	39
Figura 14: Metodología para interpretar curvas de resistividad aparente.....	40
Figura 15: Voxels que componen el área de estudio.....	47
Figura 16: Modelo 3D del área de estudio.....	48
Figura 17: Magnetómetros utilizados en el estudio.....	49
Figura 18: Levantamiento magnético terrestre que se realizó.....	50
Figura 19 Levantamiento magnético realizado en 2006.....	52
Figura 20: Distribución de los sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio.....	53
Figura 21: Mapa de señal analítica que muestra los perfiles geoelectricos definidos en líneas rojas.....	58
Figura 22: A) Mapa del campo aeromagnético residual. B) Mapa del campo aeromagnético reducido al polo.....	60
Figura 23: Dominios aeromagnéticos en la configuración de la reducción al polo.....	61
Figura 24: Perfiles trazados para describir cada DAM.....	62
Figura 25: Perfil trazado sobre el DAM I con dirección SE-NW.....	63
Figura 26: Perfil trazado sobre el DAM II con dirección SE-NW.....	63
Figura 27: Perfil trazado sobre el DAM III con dirección NE-SW.....	64
Figura 28: Perfil trazado sobre el DAM IV con dirección NE-SW.....	64
Figura 29: Perfil trazado sobre el DAM V con dirección NW-SE.....	65
Figura 30: En líneas punteadas se muestran los lineamientos encontrados.....	66
Figura 31: Diagrama de esfuerzos que muestra las direcciones preferenciales de los lineamientos.....	66
Figura 32: Modelo 3D del Graben Villa de Reyes.....	67
Figura 33: Mapa utilizado para realizar el modelo 3D y los perfiles trazados para describir la anomalía provocada por los distintos cuerpos mostrados en el modelo 3D.....	68
Figura 34: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 1.....	69
Figura 35: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 2.....	69
Figura 36: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 3.....	70
Figura 37: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 4.....	70

Figura 38: A) Mapa de campo magnético residual terrestre. B) Mapa de campo magnético terrestre reducido al polo.....	71
Figura 39: Mapa de dominios magnéticos terrestres.....	72
Figura 40: Perfil trazado sobre el DAM I con dirección SW-NE.....	73
Figura 41: Perfil trazado sobre el DAM II con dirección SE-NW.....	74
Figura 42: Perfil trazado sobre el DAM III-A con dirección SE-NW.....	74
Figura 43: Perfil trazado sobre el DAM III-B con dirección SW-NE.....	75
Figura 44: Mapa de señal analítica y lineamientos magnéticos.....	75
Figura 45: Diagrama de rosa de esfuerzos	76
Figura 46: Ejemplo de SEV procesado en IPI2WIN y tabla que muestra las características de cada capa.....	76
Figura 47: Histograma de tipos de curvas.....	77
Figura 48: Mapa de dominios geoelectricos.....	78
Figura 49: Matriz de correlación.....	80
Figura 50: Se muestran con diferentes círculos de colores la distribución de los SEVs agrupados en tres clúster.....	83
Figura 51: Sección A-A'.....	86
Figura 52: Sección B-B'.....	87
Figura 53: Sección C-C'.....	88

Resumen

El acceso al agua es esencial para el desarrollo sostenible y el bienestar humano, por lo tanto, la ubicación precisa de fuentes de recursos hídricos, en específico del agua subterránea desempeña un papel crucial.

La prospección tradicional de agua subterránea ha involucrado perforaciones aleatorias y costosas, por lo que la aplicación previa de métodos geofísicos resulta ser una alternativa más eficaz. Por consiguiente, el objetivo principal de esta investigación es localizar zonas con posibilidades acuíferas en el graben Villa de Reyes, S.L.P., mediante una combinación de técnicas geofísicas, que incluye magnetometría aérea y terrestre, así como sondeos eléctricos verticales (SEV's). Además, se realizó un análisis estadístico multivariado incluyendo metodologías como análisis de componentes principales (PCA) y análisis de clúster (CA) a los SEV's. Finalmente, se generaron tres perfiles geológicos mediante la integración las metodologías mencionadas anteriormente.

Los resultados revelaron que los métodos geofísicos son capaces de proporcionar información valiosa sobre la ubicación y distribución de los acuíferos subterráneos. La magnetometría aérea y terrestre demostraron ser efectivas en la identificación de fallas y/o fracturas. En estas estructuras se identificaron zonas de alta conductividad eléctrica, que a menudo corresponden a zonas saturadas. La correlación geofísica-geológica permitió determinar cinco unidades geoeléctricas: unidad I (6-20 $\Omega.m$), unidad II (21-30 $\Omega.m$), unidad III (31-70 $\Omega.m$), unidad IV (71-120 $\Omega.m$) y unidad V (>120 $\Omega.m$). La unidad II fue asociada a una capa de arenas y presentó las características con mayores posibilidades acuíferas.

Los resultados estadísticos mostraron el clúster dos como el grupo que contiene los SEV's que más probabilidad presentan de asociarse a agua subterránea.

En conclusión, con la integración de métodos geofísicos y estadísticos se identificó que las zonas que presentan características hídricas más favorables corresponden a la unidad II (arenas) y a las zonas de fracturas dentro del graben Villa de Reyes.

Abstract

Access to water is essential for sustainable development and human well-being; therefore, the precise location of water resources, specifically groundwater, plays a crucial role.

Traditional groundwater prospecting has involved random and costly drilling, making the prior application of geophysical methods a more effective alternative. Consequently, the main objective of this research is to locate potential aquifer zones in the Villa de Reyes graben, S.L.P., through a combination of geophysical techniques, including aerial and terrestrial magnetometry, as well as vertical electrical soundings (VES). In addition, a multivariate statistical analysis was conducted, including methodologies such as Principal Component Analysis (PCA) and Cluster Analysis (CA) on the VES data. Finally, three geological profiles were generated by integrating the methodologies.

The results revealed that geophysical methods can provide valuable information about the location and distribution of underground aquifers. Aerial and terrestrial magnetometry proved effective in identifying faults and/or fractures. In these structures, zones of high electrical conductivity were identified, which often correspond to saturated areas. The geophysical-geological correlation allowed for the determination of five geo-electric units: Unit I (6-20 Ω .m), Unit II (21-30 Ω .m), Unit III (31-70 Ω .m), Unit IV (71-120 Ω .m), and Unit V (>120 Ω .m). Unit II was associated with a layer of sand and exhibited the most favorable aquifer characteristics.

Statistical results showed cluster two as the group containing VES data that are most likely to be associated with groundwater.

In conclusion, through the integration of geophysical and statistical methods, it was identified that Unit II exhibits the most favorable hydrological characteristics, corresponding to sand layers and fracture zones within the Villa de Reyes graben.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 Introducción

El acceso a recursos hídricos es esencial para la supervivencia y el desarrollo humano, así como para el crecimiento de las actividades económicas y sociales. En este contexto, el agua subterránea desempeña un papel crucial al proporcionar una fuente de abastecimiento, especialmente en regiones áridas donde la disponibilidad de agua superficial es limitada o variable, como lo es San Luis Potosí. La prospección efectiva de agua subterránea se ha convertido en un tema de gran relevancia debido a la creciente demanda del vital líquido.

Los métodos geofísicos como son los métodos eléctricos y magnéticos han demostrado ser herramientas eficientes para conocer la ubicación y la distribución de los acuíferos subterráneos. Estos métodos permiten obtener información no invasiva y detallada sobre la estructura geológica y las propiedades hidrogeológicas del subsuelo que permiten identificar zonas con prospección de agua subterránea

El propósito de esta tesis es delimitar aquellas zonas de interés en donde pudiera existir agua subterránea a través de métodos geofísicos (magnetometría aérea, terrestres y sondeos eléctricos verticales) en el área del graben Villa de Reyes. Además, se realizará un análisis multivariado que incluye los análisis de correlación, de componentes principales (PCA), y de clúster (CA), que ayuda a hacer un análisis más detallada y precisa de los datos geoelectricos, enfocado también a la delimitación de zonas con potencial de agua subterránea. Asimismo, permite validar los resultados obtenidos.

1.2 Justificación

Actualmente, existe una gran crisis hídrica, resultado del aumento exponencial de la población, la contaminación y sobreexplotación de acuíferos, que ha provocado el abatimiento en sus niveles de agua, y deterioro de su calidad. Además, se tiene previsto que la demanda del agua aumentará exponencialmente con el crecimiento poblacional, lo cual ampliará la brecha entre disponibilidad y demanda actual y futura del agua.

El problema se intensifica aún más en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua es limitada, y se depende en su mayoría del agua subterránea. Uno de los estados que presentan este problema es San Luis Potosí, específicamente el área donde se localiza el graben Villa de Reyes, ya que además de ser una zona árida es una zona volcánica que presenta una gran cubierta aluvial lo que dificulta visualizar fallas y fracturas que pudieran estar albergando agua subterránea.

Debido a lo anterior resulta relevante implementar métodos geofísicos que nos ayuden a identificar zonas con potencial de agua subterránea.

Dentro de los métodos utilizados para este fin podemos mencionar la tomografía de resistividad eléctrica, el transitorio electromagnético, los sondeos eléctricos verticales, además de métodos potenciales como lo son el método magnético y gravimétrico.

1.3 Antecedentes

La disponibilidad de agua subterránea es esencial para el consumo humano y para el desarrollo de las actividades económico-sociales en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua se ha convertido en un desafío creciente.

Debido a lo anterior, la búsqueda y localización de fuentes de agua subterránea es imprescindible para garantizar el adecuado abastecimiento a la población.

Los métodos geofísicos son herramientas efectivas en la exploración de agua subterránea. Estos métodos se basan en la detección de cambios en las

propiedades físicas del subsuelo, como son la conductividad eléctrica, la velocidad de propagación de ondas, la susceptibilidad magnética, etc. Algunas de estas propiedades varían en función de la presencia de agua subterránea, lo que permite detectar y mapear los acuíferos (Bustamante-Orozco et al., 2021).

La magnetometría en la exploración de agua subterránea es considerada un método versátil, de bajo costo y fácil operación. Aunque es una metodología alterna, la aplicación de la prospección magnética a la hidrología no es reciente.

En 2017 Muthamilselvan et al., (2017) realizó un estudio utilizando el método magnético para mapear una falla principal que atraviesa el bloque de Mecheri, distrito de Salem (India), con el objetivo de localizar posibles zonas con potencial de agua subterránea. En este trabajo se basaron en la detección de lineamientos magnéticos, principalmente en aquellos en donde existe una intersección entre ellos, pues esto resulta interesante para la exploración de aguas subterráneas, porque en esa zona en particular la porosidad y permeabilidad estructural serán muy altas, lo que puede actuar como un acuífero confinado en fallas.

De igual manera, esta metodología ha sido utilizada por Martínez (2010), con el objetivo de buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua en un acuífero localizado al noreste de la ciudad de San Luis Potosí, comenzando con magnetometría aérea y terrestre para identificar fracturas y fallas, seguido de la aplicación de sondeos eléctricos verticales y sondeos audiomagnetotélúricos de fuente controlada. Se lograron determinar dos acuíferos en la zona de estudio.

Otros autores que han trabajado en esta área son López Loera (2014), quién a través de la metodología mencionada en el anterior párrafo localizó una zona que contenía agua subterránea dando solución al gran problema de desabasto que se tenía en un poblado cercano a Villa de Ramos, San Luis Potosí, ya que anteriormente la Comisión Estatal de Agua había perforado tres pozos que resultaron secos.

De igual manera Escudero-Durán et al. (2021) describen un caso en el que usaron la magnetometría como alternativa para localizar zonas que puedan contener agua, esto fue cercano al río Grijalva y se hizo mediante la identificación de unidades de rocas con potencial acuífero.

Asimismo, se han elaborado diversos trabajos en la zona de estudio, estos incluyen trabajos geológicos de gran detalle como son los folletos técnicos y diversos artículos de Labarthe et al., (1982) y trabajos geofísicos como el Ramos-Leal et al., (2007) y el de López-Loera y Tristán-González (2013), solo por mencionar algunos, pues a la fecha es una zona muy estudiada.

Sin embargo, las metodologías geofísicas utilizadas en la búsqueda de agua subterránea en el área del graben Villa de Reyes han sido elaboradas a escala local, y por lo general de manera aislada, por ejemplo, aplicando únicamente métodos eléctricos y/o electromagnéticos.

En este trabajo se emplea una metodología que integra el método magnético aéreo y posteriormente terrestre, con la intención de detectar estructuras geológicas que pueden actuar como reservorios de agua, como fracturas y/o fallas, posteriormente se corrobora o descarta la presencia de humedad mediante el método eléctrico.

Además, de manera complementaria y aprovechando la información geofísica del área, se elabora un modelo aeromagnético 3D que nos brinda información sobre los principales cuerpos geológicos que causan las anomalías magnéticas más importantes, orientándonos sobre lo que existe en el subsuelo.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Localizar zonas con posibilidades acuíferas aplicando métodos geofísicos (magnetometría aérea y terrestre, SEV's y análisis estadístico multivariado) en el graben de Villa de Reyes, S.L.P.

1.4.2 Particulares

1. Definir la asociación de lineamientos magnéticos aéreos y terrestres con zonas de debilidad correlacionadas con permeabilidades primarias y secundarias.
2. Determinar con SEV's zonas con presencia de humedad localizadas en las fallas y/o fracturas definidas anteriormente
3. Realizar un análisis estadístico multivariado a los datos obtenidos de los sondeos eléctricos verticales realizados.
4. Caracterizar los cuerpos causantes de las principales anomalías magnéticas en el graben Villa de Reyes mediante magnetometría aérea 3D.

1.5 Localización de la zona de estudio

El estado de San Luis Potosí se localiza en la porción centro-norte de la República Mexicana. Limita al norte con Nuevo León y Tamaulipas, al este con Veracruz, al sur con Guanajuato, Hidalgo y Querétaro y al oeste con Zacatecas. El estado abarca una extensión territorial aproximada de 61, 138 km² (INEGI, 2020).

Al sur del estado de San Luis Potosí se localiza el graben Villa de Reyes, una fosa tectónica semiárida con extensión total aproximada de 200 km de longitud y 14 km de ancho, comprendido, dentro de la provincia fisiográfica llamada Mesa Central (López-Loera, Tristán-González, 2013).

La zona de estudio en donde se analizaron datos aeromagnéticos comprende la porción delimitada en un rectángulo color rojo con dimensiones de 80 km de largo por 54 km de ancho (figura 1).

Por otro lado, la información de magnetometría terrestre y los SEV's se distribuyen en un área menor, indicada con el mapa magnético en la figura 1, esta tiene dimensiones aproximadas de 42 km de largo por 15 km de largo.

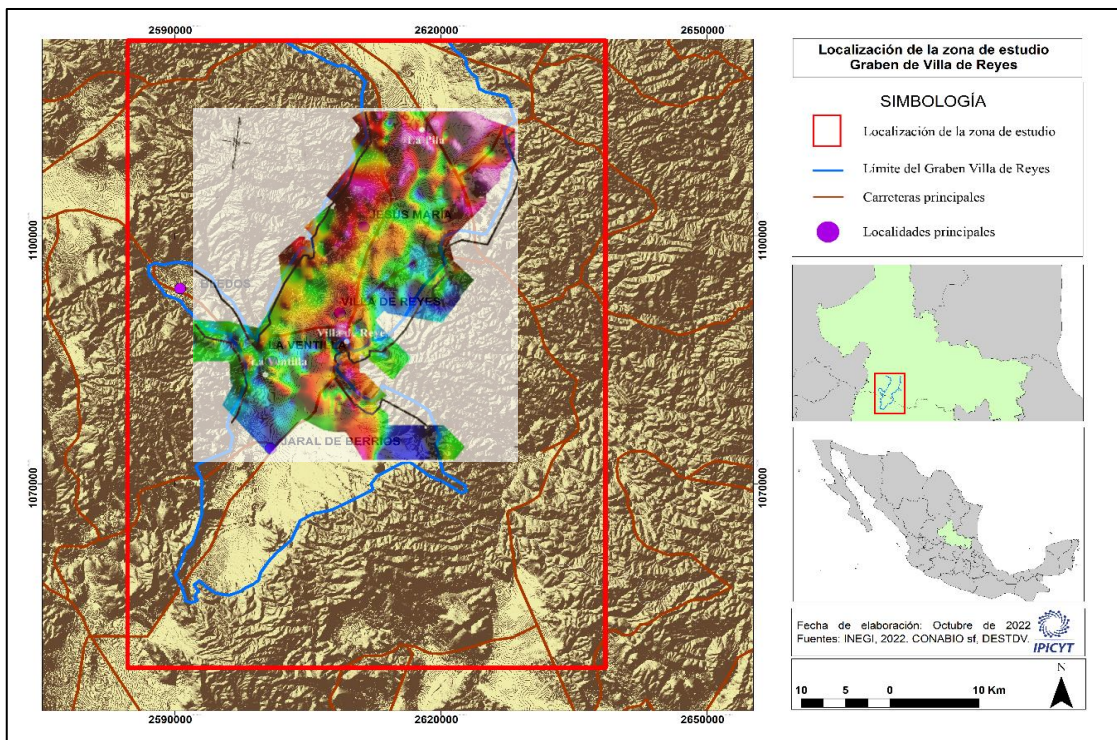


Figura 1: Localización de la zona de estudio.

CAPÍTULO 2: ENTORNO GEOLÓGICO

2.1 Geología regional

El estado de San Luis Potosí exhibe una amplia variedad de características litológicas, esto como resultado de diversos eventos orogénicos que ocurrieron en el pasado, dando origen a un interesante relieve.

De igual forma, la estratigrafía del estado es muy extensa, por lo que existe una importante cantidad de unidades litológicas que abarcan desde el Triásico hasta el Cuaternario (INEGI, 2002).

De acuerdo con la carta geológica F14-4, proporcionada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1998), que corresponde a la porción central del estado de San Luis Potosí, en el área de estudio se localizan dos grandes unidades: la Plataforma Valles-San Luis Potosí y la Cuenca Mesozoica del centro de México, ambas correspondientes al Mesozoico.

En específico, el campo volcánico de San Luis Potosí alcanza aproximadamente un espesor de 1,000 metros, con una composición variada que va desde rocas volcánicas félsicas (correspondientes al Oligoceno) hasta algunas zonas en donde existen derrames andesíticos (correspondientes al Eoceno). (Labarthe et al., 1982).

En el estado de San Luis Potosí se localizan parte de tres grandes provincias fisiográficas; Provincia de la Mesa Central, Provincia de la Sierra Madre Oriental y Provincia Llanura Costera del Golfo Norte. Si bien, cada una merece una amplia descripción geológica, en el caso de este trabajo nos enfocaremos en la Provincia de la Mesa Central, pues es donde se localiza la zona de estudio.

Provincia de la Mesa Central

La Mesa Central (MC) se ubica al norte de México, en la parte central. La MC se puede clasificar en dos zonas. En la zona sur encontramos las cotas más elevadas (encima de 2,000 msnm), tratándose de una región montañosa y cubierta por rocas que pertenecen al Cenozoico. Por otro lado, la zona norte presenta las cotas más bajas, esa zona se muestra mucho más erosionada, además tiene grandes cuencas

delimitadas por diversas fallas, estas se encuentran rellenas de sedimentos de tipo aluvial (Nieto-Samaniego et al., 2005).

De acuerdo con el INEGI (2002), los rasgos estructurales de la MC son clara evidencia de la ocurrencia de tres episodios tectónicos: Por ejemplo, en la localidad de El Barril existen afloramientos de esquistos (rocas metamórficas), lo cual es evidencia del metamorfismo regional ocurrido en rocas pertenecientes al Triásico. La segunda etapa (finales del Cretácico) se mostró con esfuerzos compresivos resultantes de la Orogenia Laramide, generando pliegues de todo tipo. El tercer y último episodio sucedió en el Plioceno, se caracterizó por esfuerzos de tensión, dando origen a diversos sistemas de fracturas y fallas normales.

A manera de conclusión, podemos decir que la provincia de la MC presenta grandes deformaciones ocurridas en el Cenozoico y corresponde a una deformación extensional. Las grandes y numerosas fallas características de esta provincia están estrechamente relacionadas con su evolución geológica.

2.1.2 Estratigrafía regional

Labarthe et al., (1982) elaboraron uno de los documentos más detallados de la estratigrafía de la zona central del estado de San Luis Potosí, en el cual nos basaremos para describir la estratigrafía y las principales formaciones de la zona de estudio.

CRETÁCICO

Formación Guaxcama

Es una secuencia evaporítica que aflora al centro de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. De manera general, se conforma por anhidritas oscuras que en ocasiones presentan intercalaciones con calizas dolomíticas. No se conoce con exactitud su edad ni su espesor, pero Bravo (1971) mencionado en Labarthe et al., (1982) realizó estudios y perforaciones en donde encontró al menos 3,009 metros de profundidad y aproximó una edad del Neocomiano.

Formación Soyatal

Consiste en una secuencia de calizas de tonalidades oscuras, en algunas zonas se encuentra con intercalaciones de lutitas calcáreas. Aflora en la parte oriental de las sierras de Álvarez y Del Coro, y al suroeste de Villa de Arista. Para un mejor entendimiento se dividió en dos unidades litológicas. La unidad inferior está conformada por estratos delgados de calizas arcillosas y limolitas oscuras. La unidad superior se compone de lutitas grises verdosas con presencia de calizas arcillosas de colores oscuros. No fue posible medir su espesor ya que se encuentra intensamente plegada.

TERCIARIO

Formación Cenicera

Labarthe y Tristán (1978) fueron los primeros en describirla y proponer el nombre. Se localiza cerca del poblado de Villa de Reyes, en donde se encuentra bien expuesta. Se compone de una secuencia de conglomerados y areniscas no consolidadas, limos y arcillas. El espesor de la parte que aflora es de 160 metros aproximadamente. El espesor de esta formación va de los 20 a los 100 metros y se le asignó una edad del Paleoceno-Eoceno.

ROCAS VOLCÁNICAS

Andesita Casita Blanca

Labarthe y Tristán (1978) fueron los primeros en describirla formalmente y en proponer su nombre. Se localiza aproximadamente 700 metros al oeste del km 24 de la carretera a Charcas. Aflora de manera irregular en forma de zonas aisladas. Consiste en andesitas de color gris oscuro, las cuales se han analizado encontrando fenocristales de biotita y plagioclasas en proporciones pequeñas, con una matriz compuesta por un agregado de microlitos de los mismos minerales mencionados anteriormente. Se han calculado espesores de hasta 120 metros. Se ha determinado su edad por método de K/Ar, estimándola en 44.1 ± 2.2 millones de años.

Dacita Javacaquero

Se localiza 1 km al este del km 24 de la carretera a Charcas. Aflora en las cercanías de la comunidad de Villa de Hidalgo, S.L.P. De manera general se compone por un flujo de lava color gris claro con textura porfírica, con presencia de fenocristales de plagioclasa, hornblenda, biotita, magnetita, apatito y zircón. También se observa una ignimbrita con la misma composición del flujo de lava, pero con ciertas características piroclásticas, como pómez y fenocristales rotos. Finalmente, se aprecia una brecha explosiva del tipo freatomagmática que consiste en fragmentos de la formación Caracol y de andesita, sobre los cuales aparece una toba fina de 10 metros de espesor y posteriormente 4 metros de una escoria brechosa. Se le asigna una edad del Oligoceno medio.

Riolita Quelital

Aflora en la Sierra de San Miguelito, de manera específica en el flanco NO del graben de Villa de Reyes. Se conforma de ignimbrita de color rojizo de textura porfírica, con gran cantidad de pómez que tiende a envolver a los fenocristales de cuarzo, sanidino, plagioclasa, magnetita. Es rica en potasio. Presenta una estructura columnar y su cima se compone por una toba. Se han encontrado espesores de 93 metros. Para esta formación no se han realizado análisis de datación absoluta, pero se le estima una edad del Oligoceno medio.

Traquita Ojo Caliente

Descrita por primera vez por Labarthe et al., (1982), quienes también propusieron su nombre. Aflora al SE del graben de Villa de Reyes. Se compone de un derrame de lava color gris y café, de textura holocristalina. Presenta fenocristales de entre 1 y 2 mm de sanidino. También se pueden observar plagioclasas y clinopiroxeno alterados a serpentina y óxidos de fierro, respectivamente. Se considera rica en potasio. No se ha establecido una edad absoluta, pero por su posición estratigráfica se le ha asignado el Oligoceno Medio como su edad.

Riolita San Miguelito

Se le asignó este nombre debido a que su localidad tipo se encuentra en las sierras de San Miguelito y Carranco. Está compuesta por un derrame lávico gris. Presenta textura porfirítica y fenocristales de sanidino y cuarzo en un 20% aproximadamente. De igual forma y en la misma proporción encontramos magnetita en la matriz y alteraciones de esta a hematita. Existen gran cantidad de fuentes de esta formación, sobre todo a lo largo de la Sierra de San Miguelito, estas se clasifican de acuerdo a su tamaño en pequeñas, medianas y grandes. Su espesor varía dependiendo de la zona, pero se tienen registrados espesores de entre 82 y 500 metros. Presenta una edad de 10 ± 1.5 millones de años.

Andesita Calderón

Aflora en el margen SW del graben de Villa de Reyes, cercano al ejido Calderón. Se compone de una roca gris verdosa, con textura porfirítica y con presencia de fenocristales de sanidino y plagioclasas de entre 1 y 2 mm. Se la ha calculado un espesor máximo de 59 metros. Es una formación rica en potasio. Sobreyace a la Riolita San Miguelito. No se realizó análisis para determinar su edad absoluta, pero se conoce una aproximación de su edad de manera relativa, asignándola al Oligoceno Medio.

Ignimbrita Ahualulco

Se localiza hacia el oeste de la población Ahualulco. Se conforma por tres miembros de rocas volcánicas. El primero (inferior) está compuesto por una ignimbrita color gris presenta pómez y fragmentos de cristales. La matriz posee fenocristales de cuarzo, sanidino, andesita, biotita y óxidos de hierro, al igual que algunos minerales de zircón, magnetita y apatito. El miembro que le sigue (descansando sobre el primero) se presenta como un flujo de cenizas blanco, con un 20% de fenocristales de sanidino y cuarzo. Encima de esto se encuentra un toba color blanca y con fragmentos de pómez. Finalmente, encontramos el miembro superior que presenta una base vitrificada con presencia de fenocristales de cuarzo, sanidino y biotita en una proporción de 50%. Sobre esta base existe una ignimbrita café con textura

merocristalina. La edad determinada para esta formación es de 30.6 millones de años, colocándola en el Oligoceno Medio.

2.2 Geología Local

El graben de Villa de Reyes se localiza en el centro de México, entre los estados de San Luis Potosí y Guanajuato. De acuerdo con Tristán (1986), tiene una longitud total aproximada de 200 km y el ancho varía entre 10 y 20 km. El relleno del graben consiste en sedimentos de tipo lacustre, aluvión y cenizas (figura 2).

Existen varias formaciones marinas que afloran en la parte norte del graben, entre ellas la formación El Doctor, La Peña, Indidura y Cuesta del Cura, las cuales fueron descritas por Labarthe et al., (1982).

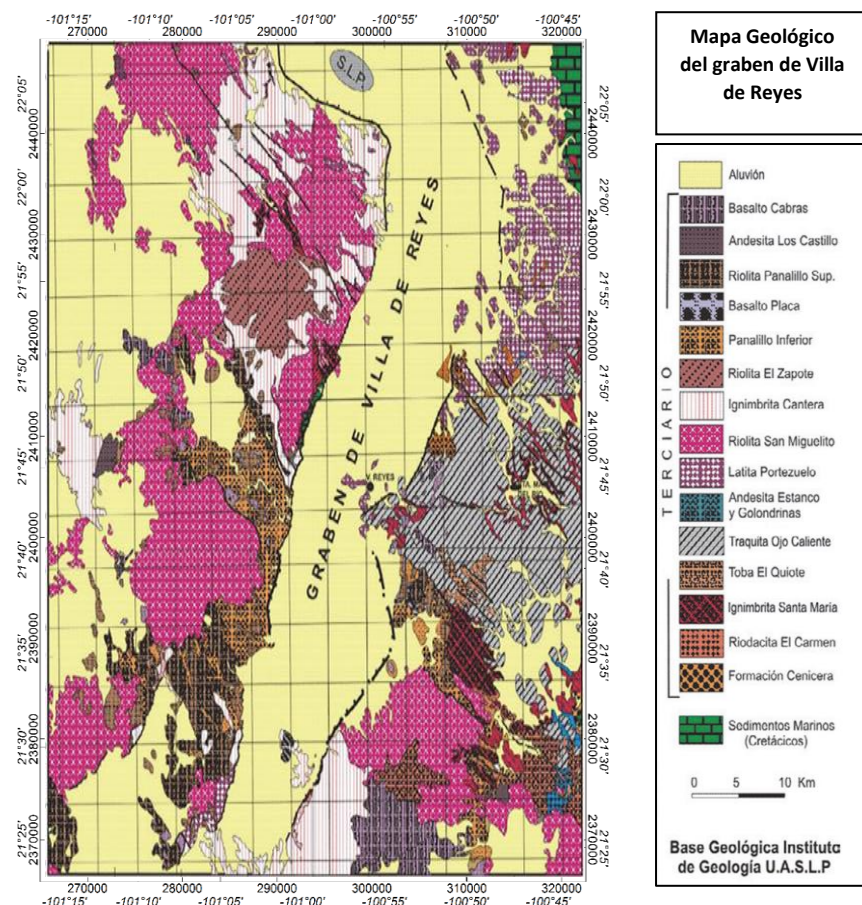


Figura 2: Mapa de la geología de la zona de estudio (modificado de Labarthe-Hernández, 1982).

SIMBOLOGÍA

CUATERNARIO

- Qr Aluvión
- Qal Conglomerado Polimíctico

TERCIARIO

- Caps Conglomerado Polimíctico Sup
- Tbs Basalto Cabras
- Topp Conglomerado Polimíctico Inf
- Trs Riolita Panalillo
- Iap Ignimbrita Panalillo
- Trz Riolita El Zapote
- Tic Ignimbrita Cantera
- Tsm Riolita San Miguelito
- Tlp Latita Portezuelo
- Ta Andesita
- Toc Traquita Ojo Caliente
- Tie Ignimbrita Santa María
- Tob Andesita Casita Blanca
- Tog Formación Cenicera

CRETÁCICO

- Kos Formación Caracol
- Kss Formación Soyatal
- Ksi Formación Indidura
- Kcc Formación Cuesta del Cura
- Kp Formación La Peña

ROCAS INTRUSIVAS

- Tr Intrusivo Rodrigo

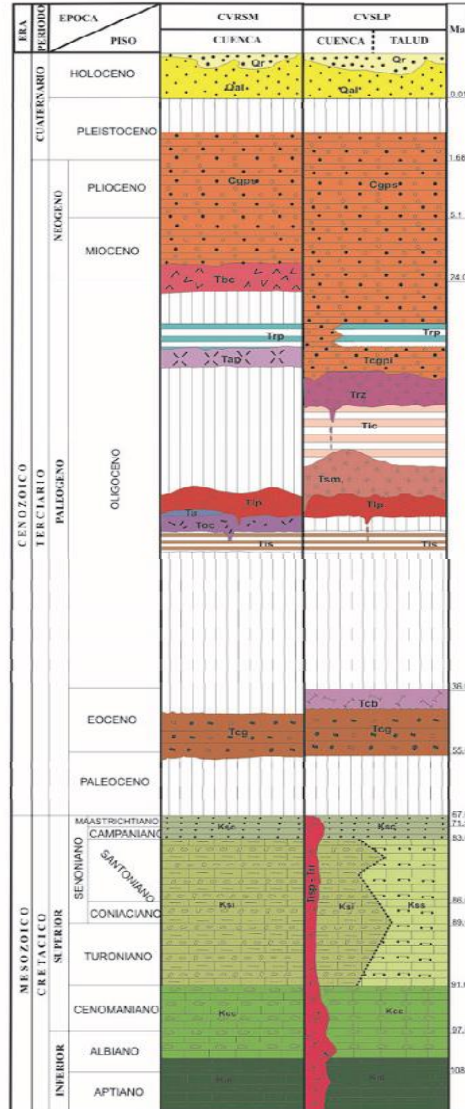


Figura 3: Columna estratigráfica de los Campos Volcánicos de San Luis Potosí y del Río Santa María (Tristán-González, 2008).

2.2.1 Estratigrafía local

Formación Doctor

Consiste en caliza color gris y café con estratificaciones entre mediana y gruesa de hasta 4 metros. Aflora en Villa de Arista, las Hojas Santa Catarina y Peotillos. Carrillo Bravo (1971) determinó un espesor de 1,800 metros para esta formación. Sobreyace concordantemente a la formación Guaxcamá y a la formación La Peña.

Formación La Peña

Está conformada por dos miembros, uno inferior y otro superior, el primero se compone de caliza de tonalidades grisáceas, en algunas zonas hay presencia de lutita. Se encuentra en estratos que varían su grosor desde medianos a gruesos. Por otro lado, el miembro superior se compone de calizas, pero estas se encuentran estratificadas en delgadas capas. Se localiza en el Oriente de la ciudad de San Luis Potosí. El espesor de esta formación no es conocido, ya que su base no aflora.

Formación Indidura

El primero en describirla fue Kelly (1936), en Coahuila. Aflora en la Sierra de Álvarez, en los flancos del anticlinal de la Parada, al SW de Aqualulco. Para un mejor análisis se ha dividido en dos miembros litológicamente diferentes:

Miembro inferior: Se conforma de calizas arcillosas, gris oscuro, en estratos delgados a medianos con vetillas de calcita. Su espesor es de 130 metros.

Miembro superior: Está compuesto por una alternancia de lutitas de color gris, con calizas arcillosas grises a negras, también posee algunos estratos de areniscas. Este miembro representa la transición entre el miembro inferior de la formación Indidura y la formación Caracol. Su espesor es de alrededor 90 metros.

Formación Cuesta del Cura

El primero en describirla fue Imlay (1936) mencionado en Labarthe et al., (1982). Está conformada por calizas oscuras, con estratificaciones de medianas a delgadas. En algunas zonas se puede apreciar con intercalaciones de lutitas. Aflora al oriente de la ciudad de San Luis Potosí. Aunque no se sabe con exactitud su espesor, se han encontrado zonas con espesores de 80 a 200 metros.

Por otra parte, tenemos las formaciones conformadas por rocas volcánicas, entre ellas la Ignimbrita Santa María, Latita Portezuelo, Riolita Panalillo y Riolita el Zapote. Ambos tipos se describen de manera resumida en los siguientes párrafos.

Ignimbrita Santa María

Labarthe et al., (1982) le asignan este nombre debido a que su localidad tipo está en los cerros ubicados al norte de la ciudad de Santa María del Río, S.L.P. También se puede observar al SE del graben de Villa de Reyes y al oriente de la ciudad de

San Luis Potosí. Se conforma de una roca gris rosáceo con presencia (30-40%) de fenocristales de cuarzo y sanidino, con magnetita y hematita. Se ha medido su espesor en diferentes afloramientos, encontrando desde 30 a 130 metros de espesor. Se le asigna una edad de 29.5 ± 1.5 millones de años.

Latita Portezuelo

Es una de las formaciones más ampliamente distribuidas en el área de estudio, aflorando en la parte central y en el noroeste. La latita Portezuelo es un derrame lávico color café y con textura holocristalina y porfirítica. Presenta fenocristales de sanidino y andesida. Los minerales accesorios que presenta son magnetita (abundante), zircón y apatito. Se han trazado diferentes secciones que se describen a detalle en Labarthe et al., (1982). Se ha estimado su edad por el método K/Ar y se encontró que pertenece al Oligoceno Medio, con una edad de 30.6 ± 1.5 millones de años.

Riolita Panalillo

Aflora de forma aislada en casi toda el área de la provincia de la MC, siendo más notoria en las fosas tectónicas. Se conforma de un paquete de rocas volcánicas que se ha dividido en dos miembros: el miembro inferior, el cual es un toba color crema, depositada en estratos bien definidos de entre 5 y 30 cm. Contiene fenocristales de sanidino, cuarzo y plagioclasas. A su vez, el miembro superior se conforma de dos unidades, la inferior corresponde a una ignimbrita café, con contenido de sanidino, cuarzo, pómez. La unidad superior consiste en una ignimbrita color gris, de igual forma con contenido de sanidino y plagioclasas.

Riolita Zapote

El nombre se le dio debido a que su localidad tipo se encuentra entre los arroyos de La Laja y El Zapote, a 10 km al NE de la población de Bledos. Aflora al sur de la Sierra de San Miguelito. Es un flujo de lava de aproximadamente 45 metros de espesor de riolita que se localizan en la base, lo demás corresponde a roca color gris con contenido de fenocristales de sanidino y cuarzo y en algunas partes óxidos de hierro. Su edad se calculó de manera relativa asignándola al Oligoceno Medio.

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Método magnético

3.1.1 El método magnético como herramienta de exploración

Hablando de magnetismo, se considera que la Tierra se comporta como un enorme imán, esto debido a las corrientes de convección que existen en el núcleo externo (Reeves, 2005).

A través de los años se han desarrollado instrumentos y técnicas que nos permiten estudiar las anomalías magnéticas producidas por los procesos de convección, estos métodos tienen variadas aplicaciones (minería, riesgos naturales, tectónica, arqueología, hidrogeología, etc.), por lo que resulta de gran utilidad en la prospección geofísica.

Además de las múltiples aplicaciones que ofrece el método magnético, ha cobrado gran relevancia debido a la rapidez de adquisición, al bajo costo (metros cuadrados cubiertos) y a la accesibilidad, pues es un método que se puede realizar de manera terrestre y aérea, en este último se pueden cubrir grandes extensiones en un corto periodo.

3.1.2 Conceptos básicos de magnetismo

Para comprender el magnetismo es necesario introducirnos a ciertos conocimientos, por lo que este apartado se enfoca en la descripción de aquellos conceptos magnéticos básicos pero necesarios para un óptimo entendimiento.

3.1.2.1 Ley de Coulomb

La Ley de Coulomb, también conocida como la Ley de la Fuerza Electroestática, es una de las leyes fundamentales de la electrostática que describe la interacción entre dos cargas eléctricas estacionarias. Fue formulada por el físico francés Charles-Augustin de Coulomb en el siglo XVIII (Zemansky et al., 2018)..

La Ley de Coulomb establece que la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las magnitudes de las cargas e

inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Matemáticamente, se expresa en la ecuación 1:

$$F = \frac{k (q_1 \cdot q_2)}{r^2} \quad (1)$$

Donde:

- F es la fuerza eléctrica entre las dos cargas (medida en newtons, N).
- k es la constante de Coulomb, que depende del medio en el que se encuentran las cargas y de la unidad de medida utilizada
- q1 y q2 son las magnitudes de las dos cargas (medidas en culombios, C).
- r es la distancia entre las cargas (medida en metros, m).

La Ley de Coulomb es fundamental en la comprensión del comportamiento eléctrico de las partículas cargadas y es una base crucial para el estudio de la electrostática y la teoría electromagnética en general.

El magnetismo está relacionado con la Ley de Coulomb a través de la teoría electromagnética de Maxwell, que unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en un solo marco teórico. Las ecuaciones de Maxwell combinan las leyes de Gauss para el campo eléctrico y el campo magnético, mostrando cómo los campos eléctricos y magnéticos se generan y se comportan debido a las cargas eléctricas y las corrientes (Zemansky et al., 2018).

3.1.2.2 Campo magnético

A diferencia del campo gravimétrico, el campo magnético no puede sentirse, o al menos de forma directa. Sin embargo, se sabe de la existencia de este campo por la manera en que interactúa con cuerpos magnetizados Tauxe, (2005), ejemplifica de forma sencilla lo que es un campo magnético: si imaginamos una hoja perforada por un cable que lleva una corriente I , y sobre la hoja se dejan caer limaduras de hierro, entonces estas se van a alinear con el campo magnético producido por la corriente.

Es importante mencionar que el campo magnético es un campo vectorial, es decir, posee magnitud, dirección y sentido.

3.1.2.3 Flujo e inducción magnética

Anteriormente se ha mencionado que el campo magnético es un campo vectorial, este campo posee líneas de campo, la fuerza magnética dependerá de qué tan cercanas se encuentren estas líneas entre sí. En pocas palabras, el flujo magnético es la cantidad de líneas de campo magnético (B), que atraviesan cierta área A .

La densidad de las líneas de flujo representa una medida de la fuerza del campo magnético y se le conoce como inducción magnética (B). La inducción magnética es un fenómeno en el que campos magnéticos generan campos eléctricos (Tauxe, 2005).

3.1.2.4 Magnetización y susceptibilidad magnética

De manera general, la susceptibilidad magnética es la capacidad que tiene un objeto para adquirir magnetización. Se considera el parámetro más importante del magnetismo (Tauxe, 2005).

Los diferentes materiales responden a campos magnéticos externos y esto da lugar a una magnetización inducida.

La relación entre la intensidad magnética (H), la susceptibilidad magnética y la magnetización (I) está dada por la ecuación 2:

$$I = k H \quad (2)$$

Lo que implica esta ecuación es que para cierto lugar en donde se tiene una misma intensidad magnética, se esperaría tener la misma magnetización, pero esta va a variar dependiendo de la susceptibilidad magnética del cuerpo.

Los valores de susceptibilidad k son muy pequeños para la mayoría de los materiales, incluso para ciertos materiales pueden ser valores negativos es el caso de los materiales diamagnéticos (Milsom, 2003).

3.1.2.5 Relación entre B y H

En la práctica es común referirnos a B y a H como el “campo magnético” y, aunque ambos representan un campo magnético y están estrechamente relacionados, son parámetros diferentes.

Cualquier material reacciona de diferente manera en presencia de un campo magnético H, ya sea que el material sea atraído o bien, repelido por éste. Esto quiere decir que en dicho material se está induciendo un campo magnético B, llamado inducción magnética y esté interactúa con el campo externo H.

Entonces, de manera estricta, B es la inducción magnética y H es la intensidad del campo magnético. La relación entre ambos está dada por la siguiente ecuación:

$$B = \mu (H + M) \quad (3)$$

En donde μ representa un parámetro llamado permeabilidad magnética y su valor dependerá del tipo de material.

3.1.3 El campo magnético de la Tierra

Ahora que se han explicado algunos conceptos básicos sobre el magnetismo, hablaremos sobre el campo magnético de la Tierra.

Para un fácil entendimiento algunos autores, por ejemplo, Reeves (2005), optan por explicar el campo magnético de la Tierra como si fuera producido por un enorme imán que se alinea aproximadamente con el eje de rotación (figura 4). Sin embargo, actualmente la orientación de este campo es contraria a la orientación geográfica, es decir, el polo norte magnético se localiza aproximadamente en el polo sur geográfico y viceversa.

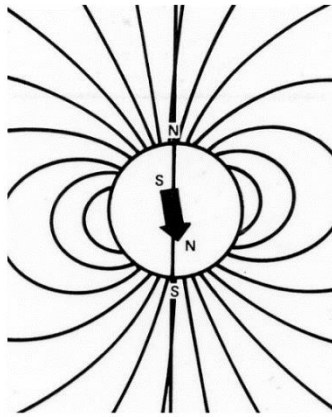


Figura 4: Campo magnético de la Tierra (Reeves, 2005).

Aunque lo anterior funciona para explicar cómo se comporta el campo magnético de nuestro planeta, éste realmente se origina en la interfase de los núcleos interno y externo de la Tierra, debido a los procesos de convección (Reeves, 2005).

3.1.4 Elementos del campo magnético terrestre

En párrafos anteriores se explicó que el campo magnético es un vector, en este caso, se puede definir como la magnitud escalar del campo total (F) y dos ángulos: (Reeves, 2005, figura 5).

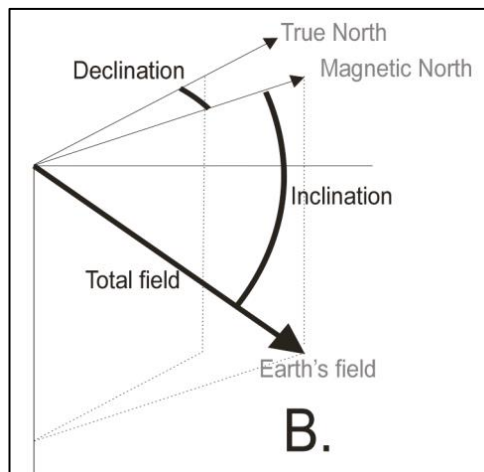


Figura 5: Componentes del campo magnético.

1. Declinación (D): Es el ángulo que se forma entre el norte geográfico y el norte magnético.
2. Inclinación (I): Es el ángulo que forma el campo magnético con el plano horizontal tangente a la superficie terrestre, este varía dependiendo la localización.
3. Intensidad del campo total (F): Se describe mediante la componente horizontal (H), la componente vertical (Z) y las componentes norte (X) y este (Y) de la intensidad horizontal. Estas componentes se miden generalmente en nanoTeslas. La intensidad del campo magnético de la Tierra oscila aproximadamente entre 25,000 y 65,000 nT.

3.1.5 Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)

Lo que se busca en un levantamiento magnético es registrar las variaciones del campo en un punto dado, dependiendo del lugar de la Tierra en donde nos situemos, este podrá variar entre 22,000 nT (SE de Brasil) y 70,000 nT (Antártica) (Reeves, 2005).

De igual forma, es común encontrar anomalías locales, sin embargo, los valores de estas anomalías son mucho más pequeños que el valor del campo total y estas son debidas a los efectos de la magnetización dependiendo de la geología de la zona (Reeves, 2005).

Entonces, el IGRF (International Geomagnetic Reference Field, por sus siglas en inglés) nos ayuda a sustraer de forma racional la variación del campo principal para dejar las anomalías de interés y poder compararlas entre sí. El IGRF es un modelo matemático que estima de manera muy aproximada el campo geomagnético para una época dada (figura 6).

El IGRF debe calcularse con precisión, pues corresponde aproximadamente al 99% del valor medido. Debido a lo anterior, se calcula cada cinco años por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (Reeves, 2005).

Campo magnético total en nT del año 2020

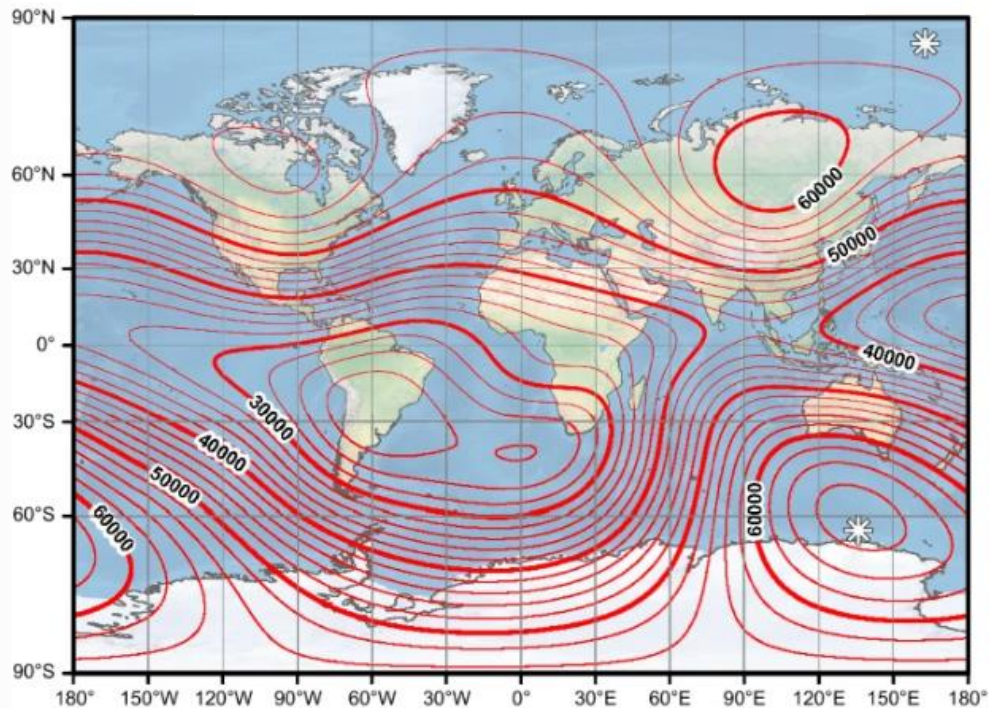


Figura 6: Modelo de campo magnético total del 2020 (Alken et al., 2021).

3.1.6 Variaciones temporales del campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre se caracteriza por presentar distintas variaciones temporales. Estas se pueden clasificar de acuerdo con su origen; las que provienen del interior de la Tierra y las de origen externo (Lenadro y Azpilicueta, 2017).

En los siguientes renglones se explicarán de manera breve las variaciones magnéticas más comunes.

1. Variaciones seculares: Se consideran variaciones seculares aquellas que ocurren en un periodo mayor a cinco años, este tipo de variaciones tan largas tienen origen en el interior de la Tierra. Son de fácil reconocimiento en los observatorios, sin embargo, para una óptima visualización los datos a analizar deben recolectarse en grandes periodos de tiempo.
2. Variaciones debidas al viento solar: Este tipo de variaciones ocurren en lapsos menores a cinco años y se considera que tienen un origen externo. La mayoría están relacionadas con la actividad solar.

De manera general, el viento solar está compuesto por partículas cargadas, estas, al intentar llegar a la Tierra se encuentran con la magnetósfera e interactúan con ella, dando como resultado variaciones en el campo magnético (Lanza y Antonio, 2006).

3. Variación diurna: La variación diurna magnética se refiere a los cambios regulares en la intensidad y la dirección del campo magnético de la Tierra que ocurren a lo largo del día. Estos cambios son causados principalmente por la interacción entre el campo magnético de la Tierra y las partículas cargadas, principalmente electrones y protones, que provienen del Sol y forman parte del viento solar.

3.1.7 Remanencia magnética

Anteriormente se explicó que cada material tiene diferente capacidad de magnetización, de igual manera, cada material tiene una distinta capacidad para retener ese magnetismo, es decir, la magnetización que prevalece en un material una vez que el campo magnético que lo afectaba se ha retirado.

La magnetización remanente puede ser adquirida de diversas formas, entre las comunes están:

- 1) Magnetización termorremanente: Ocurre cuando una roca ígnea se enfría y pasa por la temperatura de Curie (esta temperatura varía para cada material), entonces esta roca adquiere una magnetización paralela al campo de la Tierra (Tauxe, 2005).
- 2) Magnetización remanente detrítica: Se refiere al magnetismo adquirido por las partículas de sedimentos debido a la presencia de minerales magnéticos durante su formación. Esta magnetización puede persistir incluso después de que las partículas se hayan depositado y compactado en una roca o sedimento. En esencia, es una "huella magnética" dejada en los materiales sedimentarios por el campo magnético de la Tierra en el momento de su formación (Tauxe, 2005).

3) Magnetización químico-remanente: Esta ocurre a través de procesos químicos, cuando iones son precipitados en soluciones, formando minerales ferromagnéticos, en la formación de rocas sedimentarias y en dorsales oceánicas, en este caso la magnetización es en dirección del campo magnético de la Tierra existente al momento de su formación (Tauxe, 2005).

De igual forma, todos los materiales se pueden clasificar de acuerdo con sus propiedades magnéticas en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos (figura 7).

De manera general, los materiales diamagnéticos tienen una capacidad muy baja de magnetizarse, es decir, en presencia de un campo magnético, este tipo de materiales generan un campo en sentido contrario al campo aplicado, por lo que la intensidad de respuesta es muy pequeña. En estos casos la susceptibilidad magnética es negativa

Los materiales paramagnéticos tienen la característica de que cuando son sometidos bajo un campo magnético, sus átomos se alinean en la misma dirección que este, pero se magnetizan débilmente, por lo que suelen tener un efecto poco percibido.

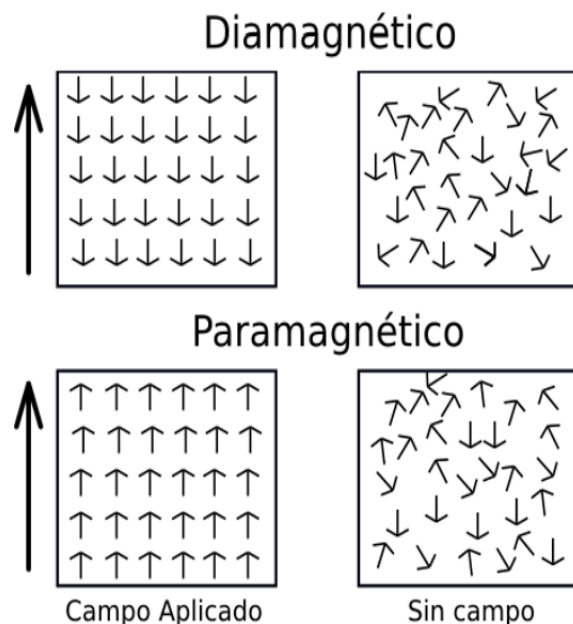


Figura 7: Diferentes formas de magnetización (Galván, 2016).

Finalmente, se encuentran los materiales ferromagnéticos, son los de mayor interés pues en general producen un fuerte campo magnético debido a su capacidad de imanarse mucho más fácil con respecto a otro tipo de materiales. En este tipo de materiales, los átomos se ordenan en la misma dirección y sentido y una vez que el campo se retira de estos cuerpos, la imanación permanece (Tauxe, 2005).

Del tipo de alineación de los átomos en los elementos ferrosos dependerá la respuesta magnética (figura 8), estos elementos se clasifican en ferromagnéticos (los espines de su estructura atómica están alineados en la misma dirección, por lo que se produce un campo fuerte), antiferromagnéticos (su arreglo atómico es antiparalelo, el campo magnético en este caso está balanceado) y ferrimagnéticos (los momentos magnéticos se alinean en la misma dirección pero en sentido diferente, pero alguno de los dos predomina).

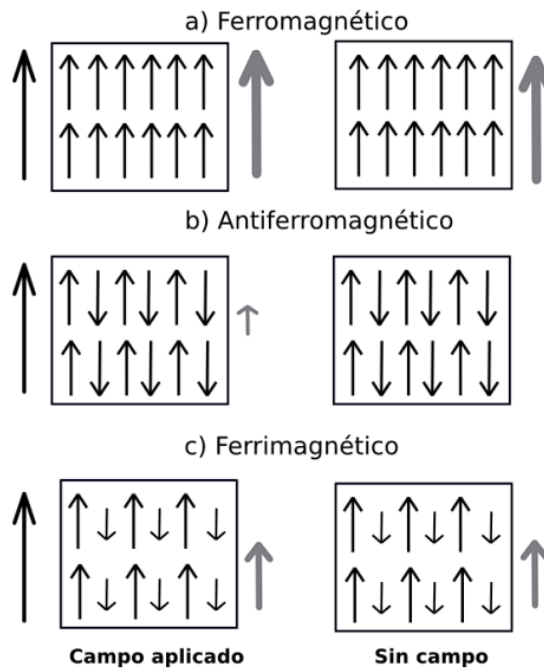


Figura 8: Arreglo atómico de los distintos materiales ferrosos. a) Material ferromagnético (retiene su magnetización aún después de remover el campo inductor. b) Material antiferromagnético (su arreglo atómico es antiparalelo, el campo magnético en este caso está balanceado). c) Material ferrimagnético (sus átomos se alinean en la misma dirección, pero en sentido diferente y con diferente magnitud. (Galván, 2016).

3.1.8 Adquisición de los datos de magnetometría aérea

Existen varias maneras de adquirir datos aeromagnéticos, por lo general se utilizan dos sistemas, uno flexible que consiste en un magnetómetro suspendido en un helicóptero y el otro es un sistema rígido, en este el sensor va fijo a la aeronave y se ubica en la cola o el ala del avión. De esta forma, mientras la aeronave se mueve a lo largo del terreno, el sensor va tomando lecturas.

Los parámetros por considerar, como la altura de vuelo, el espaciamiento entre líneas de vuelo y la dirección del vuelo, se determinarán a partir del objetivo del estudio.

Aunque existen empresas privadas que realizan este tipo de estudios, en México, quien se encarga de mapear por completo el país es el Servicio Geológico Mexicano (SGM). Estas cartas aeromagnéticas se pueden encontrar fácilmente en la página de dicho organismo y por lo general se usan los mismos parámetros de vuelo, los cuales suelen ser distancias entre líneas de vuelo a cada 1,000 m y líneas de control a cada 10,000 m, a una altura de 300 m, sin embargo, cada carta tiene sus especificaciones correspondientes.

De igual forma, el SGM posee las cartas aeromagnéticas para que uno mismo pueda procesarlas, esto es de gran ayuda cuando se requiere realizar un estudio en grandes áreas y también funciona con un método preliminar, ayudándonos a delimitar zonas de interés.

3.1.9 Adquisición de datos de magnetometría terrestre

De forma similar a la magnetometría aérea, la magnetometría terrestre consiste en la toma de datos a través de un magnetómetro, pero en esta ocasión es una persona quien lleva el instrumento.

Una vez definido el objetivo y el área de estudio, se procede a calibrar el equipo (o equipos) y a verificar que todo funcione correctamente, se establece una base en un lugar alejado de ruido magnético y se programa para que tome lecturas cada

determinado tiempo, dicha información nos servirá en un futuro para hacer correcciones necesarias.

Una vez establecida la base se procede a tomar las lecturas en la zona de interés, estas podrán adquirirse de manera equiespaciada o bien en una forma continua. La separación entre cada lectura y la orientación de los perfiles dependerá del objetivo de estudio. Es indispensable llevar una bitácora de campo, pues usualmente hay puntos en donde existe ruido magnético que se puede mostrar como falsas anomalías o puede enmascarar datos importantes.

Es importante mencionar que a los datos tomados se les deben aplicar ciertas correcciones, como la eliminación de puntos ruidosos y la corrección por variación diurna, todo lo anterior corresponde a trabajo de gabinete, así como el procesado.

3.1.10 Filtros matemáticos para procesado de la información

Una vez obtenidos los datos en campo, eliminado datos que presentan ruido, corregido por variación diurna y extraído el IGRF para trabajar únicamente con el campo magnético residual (CMR), es posible aplicar diversos filtros matemáticos que nos ayudan a resaltar o enmascarar cierta información, dependiendo de lo que necesitemos visualizar.

A continuación, se describen de manera breve los más utilizados.

- Reducción al polo: Este filtro se aplica antes de utilizar cualquier otro algoritmo matemático. De acuerdo con Baranov y Naudy (1964), este filtro hace que cualquier anomalía se situó debajo de la fuente que la está causando, así que sin importar la latitud en la que se tomen los datos, al realizar esta corrección se simula que la medición está ocurriendo en el polo, en donde la inclinación magnética es de 90° y la declinación es de 0° .
- Señal analítica: Esta técnica fue propuesta en 1972 por Nabighian pero fue en 1992 cuando Roest y Pilkington la mejoraron. De manera general, nos ayuda a delinear los límites de las fuentes magnéticas. Es de gran utilidad ya que tiene en cuenta las variaciones magnéticas verticales, dándonos información sobre la profundidad del cuerpo, así como su geometría y

ubicación. Matemáticamente se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas en las tres direcciones (X, Y, Z).

- Derivadas verticales: Dado que el método magnético nos ayuda a delimitar fracturas, fallas y contactos geológicos, el aplicar este filtro facilitará la visualización de dichas estructuras, ya que estas están relacionadas con las zonas de alto gradiente y es justamente la característica que una derivada vertical resaltan. Este filtro fue implementado en 1949 por Henderson y Zietz.
- Continuación ascendente: Este filtro resulta de gran utilidad, pues nos permite visualizar el área de estudio simulando una mayor altitud, de esta manera se puede obtener nueva información. Por otra parte, aquellas pequeñas anomalías pueden perderse debido a que funciona como un filtro que “suaviza” la información. Fue desarrollado en 1970 por Henderson.

3.1.11 Dominios magnéticos

La descripción y análisis de la información es indispensable en cualquier método geofísico. En el método magnético, una manera de realizar este análisis es mediante la delimitación de dominios aeromagnéticos (DAMs) o dominios magnéticos (DMs).

De manera preliminar, estos dominios se definen visualmente, aquellas zonas en donde existan susceptibilidades magnéticas similares, es decir, una geología similar, corresponderán a un dominio, de esta forma en nuestra carta magnética se agruparán diferentes dominios.

Como segundo paso, se debe realizar una descripción cualitativa de cada dominio, esta descripción nos ayuda a confirmar que lo que antes se ha delimitado como un dominio, realmente corresponde a él.

Para realizar lo anterior se trazan perfiles a lo largo y ancho del dominio, estos perfiles nos muestran ciertas longitudes de onda, amplitudes, máximos y mínimos magnéticos, intensidades magnéticas, etc.... para un mismo dominio, por lo general no existe gran variación entre estos datos, pero al comparar con otros dominios se notarán las diferencias.

3.1.12 Propiedades magnéticas de rocas y su composición mineralógica

Anteriormente se explicó que una vez que se elimina el magnetismo proveniente del interior de la Tierra, lo restante corresponde a las anomalías magnéticas producto de las rocas que se encuentran en el subsuelo.

Se habló también de la susceptibilidad magnética, pues de este parámetro dependerá la cantidad de magnetización en la roca.

Como sabemos, existe una gran variedad de rocas que varían en su composición mineralógica, dependiendo de esta, el magnetismo será más o menos intenso. Aquellas que tienen un mayor contenido de ferromagnesianos son más magnéticas y viceversa.

A continuación, se muestra la tabla 1 que muestra las susceptibilidades magnéticas de algunas rocas principales.

Tabla 1: Susceptibilidad magnética de algunas rocas (Modificado de Gaytán, 2013).

Roca	J.J Milson (2003)	E. S. Robinson (1991)	D.S. Parasnis (1973)	W. M. Telford (1976)
Basalto	0.001-0.1	0.00002-0.0145	0.0015-0.025	0.00002-0.0145
Riolita	0.00025-0.01	0.00002-0.003		0.00002-0.003
Gabro	0.001-0.1	0.00008-0.0072	0.0038-0.09	0.00008-0.0072
Granito s/m*	0.00001-0.000065			
Granito c/m**	0.000025-0.05	0-0.004		0-0.004
Pórfido		0.00002-0.0167		0.00002-0.0167
Diorita		0.00005-0.01		0.00005-0.01
Andesita		0.0135		0.0135
Sienita				0.0027-0.0036

3.1.13 Modelado magnético 3D

La inversión de datos geofísicos 3D ha resultado de gran importancia, pues a través de información geofísica (en este caso datos magnéticos), podemos obtener

representaciones o modelos que nos muestran la distribución de diferentes propiedades físicas en el subsuelo, por lo que la interpretación se facilita.

En este trabajo se utilizó el algoritmo VOXI Earth Modelling, un software de computación incluido en el programa Oasis Montaj versión 8.3.3, de Geosoft, este permite la inversión de datos geofísicos dando como resultado modelos 3D.

De manera general, el algoritmo utiliza voxels (pequeñas unidades cúbicas que conforman objetos 3D), estos los realiza a partir de información que el software necesita, como son el modelo digital de elevación, el grid del campo magnético residual de la zona a estudiar y el polígono que definirá la extensión del área a modelar, además de ciertos parámetros como la altura a la que los datos se tomaron, así como la fecha para obtener el campo reducido al polo.

El algoritmo permite definir el número y tamaño de voxels. Voxels más pequeños nos brindan mayor resolución en el modelo final.

A partir de los datos observados, el software realiza un modelo del subsuelo mostrando un cuerpo o cuerpos con diferentes susceptibilidades magnéticas, también nos brinda la respuesta magnética que este modelo daría, la cual es muy parecida al grid original. Realizar este procedimiento nos brinda la oportunidad de hacer una interpretación más acertada.

3.2 Método geoelectrico

3.2.1 Introducción

Anteriormente mencionamos la gran aplicación que tiene la prospección geofísica, donde existen numerosas técnicas que permiten conocer ciertas características del subsuelo, con el objetivo de explorar para encontrar recursos hídricos, yacimientos minerales, oquedades, petróleo, para conocer la estabilidad del suelo antes de alguna construcción, etc... Dependiendo del objetivo del estudio se elegirá la técnica o técnicas más adecuadas (Zemansky et al., 2018).

Adentrándonos en el método geoelectrico, es importante mencionar que éste engloba varias técnicas, de las cuales, dos son las más comunes, el primero

clasifica los métodos de acuerdo con su origen, ya sea natural o artificial. El segundo los clasifica dependiendo si el método utiliza corriente continua o alterna.

Algunos métodos de campo natural son el método de potencial espontáneo y el de corrientes telúricas. Hablando de campo artificial y de corriente continua podemos mencionar la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) y los sondeos eléctricos verticales (SEV). Finalmente, algunos métodos de campo artificial y de corriente alterna son las calicatas electromagnéticas (Turam, Slingram) y el método transitorio electromagnético (TEM).

En este apartado nos enfocaremos en describir el método geoelectrico, haciendo énfasis en el método de SEV, pues fue la técnica utilizada en esta tesis, más adelante hablaremos de ella de manera más detallada.

3.2.2 Resistividad eléctrica

Uno de los parámetros más importantes del método geoelectrico es la resistividad eléctrica ρ (su inverso es la conductividad), este parámetro mide que tanto un material determinado resiste el flujo de corriente. Su unidad es el ohm.m ($\Omega.m$).

De igual forma, la resistencia R mide que tanto un cuerpo resiste el flujo de corriente, pero este parámetro depende de ciertas características del objeto, como el tipo de material y su longitud. Su unidad es el ohm (Ω).

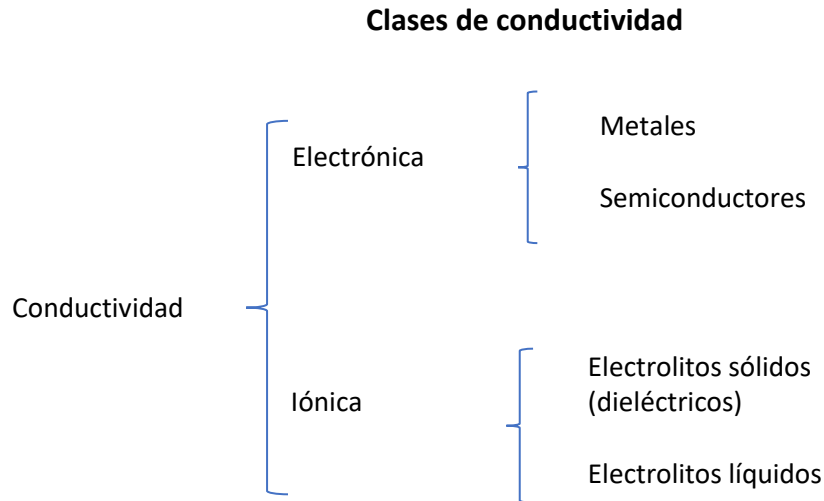
La resistencia está dada por:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (4)$$

en donde ρ es la resistividad, l es la longitud del cuerpo y A es el área de la sección transversal (Orellana, 1972).

Aquellos cuerpos que tienen la característica de ser conductores lo hacen porque permiten el paso de cargas eléctricas a través de sus electrones o iones, por lo que se pueden encontrar dos tipos de conductividad: electrolítica e iónica y estos a su

vez se clasifican en más grupos. Con el objetivo de una visualización más clara de su clasificación, se muestra el siguiente diagrama obtenido de Orellana (1972).



3.2.3 Ley de Ohm

La ley de Ohm establece que el voltaje que atraviesa un conductor es directamente proporcional a la corriente que fluye a través de él, siempre que todas las condiciones físicas permanezcan constantes (Orellana, 1972).

La ley de Ohm se encuentra estrechamente relacionada con la resistencia, ya que las principales maneras de incrementar la corriente en un circuito eléctrico son aumentando el voltaje o disminuyendo la resistencia.

La ley de Ohm se expresa como:

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (5)$$

En donde I es igual a la intensidad de corriente, ΔV representa la diferencia de potencial y R es la resistencia.

En pocas palabras, la fórmula anterior quiere decir que, si en algún material la resistividad es alta, la intensidad de corriente va a disminuir de manera proporcional (Kip, 1967).

3.2.4 Resistividad de las rocas

El subsuelo al poseer una composición tan variada se considera un medio heterogéneo. Cada tipo de roca varía en propiedades físicas y en composición, incluso el medio en el que se encuentren, ya que puede existir un mismo tipo de roca en diferentes lugares con diferente resistividad, tal vez porque una se encuentra saturada y/o alterada y la otra no, por lo que resulta difícil asignar resistividades específicas a cada tipo de roca.

La resistividad de las rocas depende de varios factores, entre ellos la composición mineralógica, si es un medio que se encuentra saturado o no, la salinidad e incluso la temperatura.

Sin embargo, a través de los años y por medio de experimentación, se han establecido rangos de resistividades para diversas rocas, sirviéndonos como una buena orientación a la hora de realizar interpretaciones.

A continuación, se muestra una tabla que muestra los valores de resistividad para algunas de las rocas más comunes:

Tabla 2: Resistividad de varias rocas y sedimentos. (Modificada de Telford et al., 1990).

Tipo de roca	Rango de resistividad (<i>Ohm.m</i>)
Granito	4.5×10^3 (húmedo) – 1.3×10^6 (seco)
Diorita	1.9×10^3 (húmedo) – 2.8×10^4 (seco)
Cuarzo diorita	2×10^4 (húmedo) – 2×10^6 (seco)
Dacita	2×10^4 (húmedo)
Andesita	4.5×10^4 (húmedo) – 1.7×10^2 (seco)

Gabro	$10^3 - 10^6$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$ (seco)
Arenisca	$1 - 6.4 \times 10^8$
Caliza	$50 - 10^6$
Dolomita	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Arcilla	20 (húmeda)

3.2.5 Resistividad aparente

El concepto de resistividad aparente es uno de los más importantes en la prospección eléctrica, para explicarlo, primeramente, vamos a considerar un dispositivo electródico AMN, en donde el electrodo A se encuentra conectado a una fuente y los electrodos MN a un voltímetro, midiendo la diferencia de potencial entre ellos, en este caso el electrodo B, que cierra el circuito del electrodo A, se ha mandado al “infinito” para que no influya en las observaciones.



Figura 9: Dispositivo electródico Polo-Dipolo.

Entonces, para calcular la resistividad de un medio homogéneo se utiliza la siguiente fórmula:

$$R = 2\pi \frac{r(r + a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

En donde:

$$AM = r$$

$$MN = a$$

Diferencia de potencial = ΔV

Corriente = I

Anteriormente se explicó que los suelos son un medio heterogéneo, por lo que al medir la resistividad con un dispositivo electródico como el de la imagen anterior, la resistividad obtenida no corresponde como tal a la resistividad de cada capa o estrato, entonces estaríamos hablando de una resistividad ficticia, a esto se le conoce como resistividad aparente (Orellana, 1972).

3.2.6 Dispositivos electródicos

Un conjunto de electrodos recibe el nombre de dispositivo electródico. Por lo general, estos dispositivos se componen de cuatro electrodos; dos de corriente (AB), unidos mediante cables aislados a una fuente de corriente y dos que miden la diferencia de potencial entre ellos (MN).

Estos cuatro electrodos podrían adoptar cualquier disposición en el terreno y a esto es a lo que se le conoce como dispositivo electródico, sin embargo, para obtener la resistividad aparente hay que conocer ciertos parámetros, como son la distancia entre electrodos, la intensidad de corriente I y la diferencia de potencial, usando la siguiente fórmula:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (7)$$

En donde K es un coeficiente que recibe el nombre de factor geométrico y depende, como su nombre lo dice, de la geometría del arreglo electródico. Este se expresa como se muestra en la ecuación 8:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (8)$$

3.2.7 Tipos de dispositivos electródicos

Existen diferentes tipos de dispositivos electródicos, los más utilizados son aquellos llamados tetraelectródicos, en los que se emplean cuatro electrodos (A M N B) y se colocan sobre la misma recta. Cada dispositivo o arreglo electródico presenta

ventajas y desventajas y dependiendo del objetivo del estudio se elegirá el más adecuado (figura 10).

Por ejemplo, está el llamado dipolo-dipolo, el polo-dipolo y polo-polo, todos para diferentes propósitos. Sin embargo, en temas de prospección de agua subterránea los más utilizados son el Wenner y el Schlumberger, ya que los datos que nos arrojan nos ayudan a identificar con facilidad zonas con posibilidades acuíferas.

Debido a lo anterior, en este trabajo únicamente describiremos la técnica Wenner y Schlumberger, pues fueron los métodos utilizados.

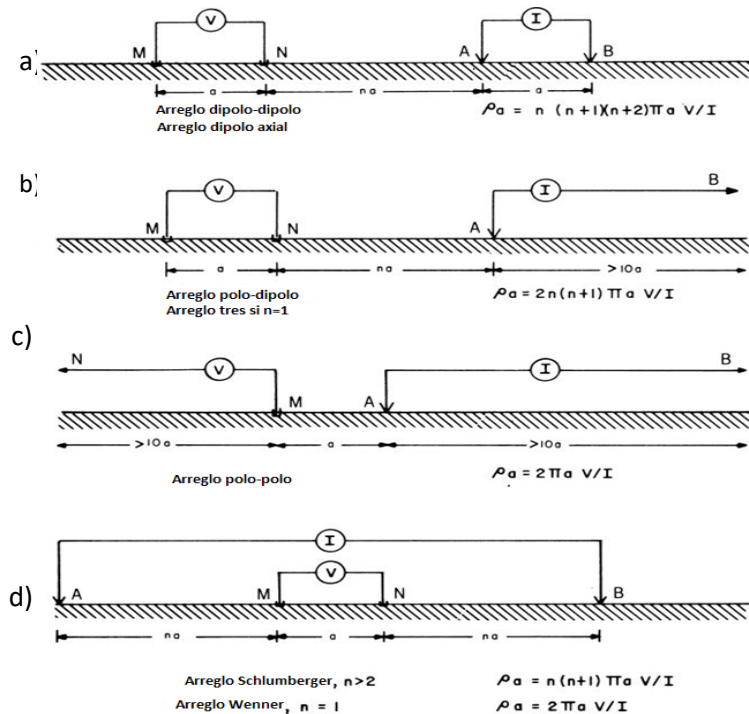


Figura 10: Diferentes configuraciones de arreglos eléctricos: a) dipolo-dipolo, b) polo-dipolo, c) polo-polo, d) Schlumberger y Wenner (dependiendo el valor de n).

3.2.7.1 Schlumberger

Actualmente es uno de los más utilizados a nivel mundial. Este arreglo se caracteriza por alcanzar mayores profundidades de estudio que el arreglo Wenner,

sin embargo, puede existir cierta pérdida de resolución, por lo que si el objetivo del estudio es analizar el subsuelo somero a gran detalle podría no ser el método más adecuado (Orellana, 1972).

El dispositivo Schlumberger consiste en cuatro electrodos, dos de corriente (AB) y dos de potencial (MN). La distancia entre M y N deberá ser al menos cinco veces menor que la distancia entre A y B. Para incrementar la profundidad de estudio, los electrodos de corriente deberán moverse o “abrirse” en cada lectura, de esta manera la corriente eléctrica se ve obligada a atravesar el subsuelo cada vez a mayor profundidad. Los electrodos de potencial se van espaciando ocasionalmente, esto se hace cuando el voltaje resulta muy pequeño y difícil de medir por los electrodos M y N (figura 11).

Es una técnica muy popular debido a que, al moverse la mayoría de las veces únicamente dos electrodos en cada lectura, resulta bastante rápida y no requiere grandes recursos humanos.

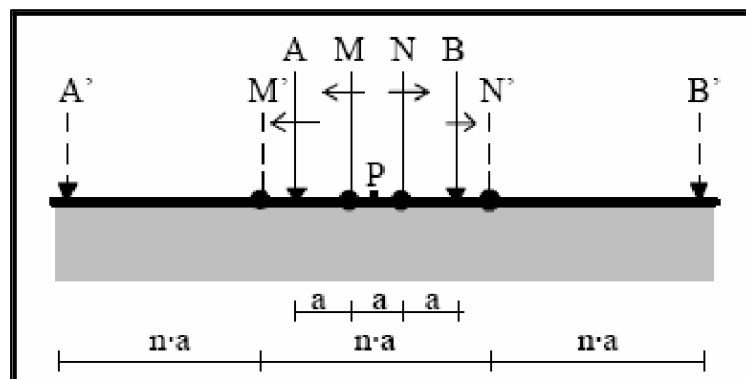


Figura 11: Configuración electródica Schlumberger (Garsulla, 1999).

3.2.7.2 Wenner

El método Wenner (figura 12) es otro de los dispositivos electródicos más utilizados, en este el espaciamiento entre electrodos es equidistante, de manera que, si movemos A y B con el objetivo de lograr una mayor profundidad de estudio, será necesario también mover M y N.

Una desventaja de este método es que requiere mayor tiempo y esfuerzo, pero tiene una mayor resolución que el arreglo Schlumberger.

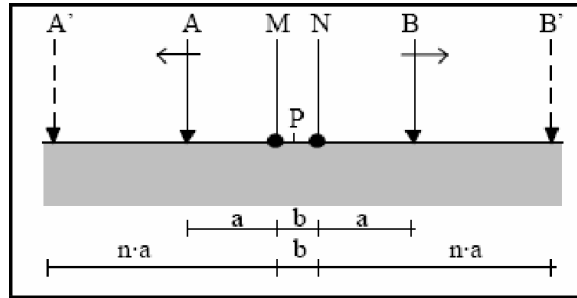


Figura 12: Configuración eléctrica Wenner (Garsulla, 1999).

3.2.8 Sondeo Eléctrico Vertical

El sondeo eléctrico vertical (SEV) es un método que consiste en un arreglo eléctrico (como los mostrados anteriormente) con el cual se busca determinar la resistividad aparente de un punto único llamado punto de atribución, este se localiza justo a la mitad del segmento MN (Orellana, 1972).

El objetivo de un SEV es conocer la distribución vertical de la resistividad del punto de atribución. Esta técnica tiene muchas aplicaciones, por ejemplo, para estudios de geotecnia, para estudios hidrogeológicos, para delimitar plumas de contaminación, para caracterizar la estructura del subsuelo, etc.

Debido a su simpleza a la hora de operar en campo, a su rapidez y a lo relativamente económico que resulta el equipo, suele ser una de las técnicas más utilizadas.

Los datos que se obtienen en cada SEV se representan mediante una curva trazada en una gráfica bilogarítmica, en el eje de las ordenadas se localiza la resistividad aparente de cada punto y en el eje de las abscisas encontramos el valor de $AB/2$. La curva de resistividad aparente obtenida es la que se interpreta para conocer las profundidades, espesores y resistividad de los estratos en el subsuelo.

3.2.9 Tipos de curvas

De acuerdo con Orellana (1972), los SEVs se deben interpretar cualitativa y cuantitativamente. Para poder interpretar de forma cualitativa, debemos primero definir los tipos de curva, para eso nos apoyaremos de la siguiente figura:

Cuando en el subsuelo existen tres capas con diferentes resistividades, existen cuatro posibilidades de combinaciones, estas dependen de la resistividad de cada capa (figura 13).

La primera es la curva tipo H (a), en este trabajo resulta de interés ya que es la que se asocia con zonas de humedad. La curva tipo H se forma cuando las resistividades cumplen con $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$.

El siguiente tipo de curva es la K, esta se da cuando se cumple que $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$.

El tercer tipo de curva es la A, esta se forma cuando las resistividades cumplen $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.

Finalmente encontramos la curva tipo Q, este tipo de curva se origina cuando las resistividades cumplen $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$.

Para un corte geoelectrico que contenga cuatro capas o más, se utiliza la misma clasificación; se tomarán las primeras tres capas, posteriormente ya no se toma en cuenta la primera capa, sino que las siguientes tres, (la ahora tercera capa anteriormente era la cuarta), y así sucesivamente.

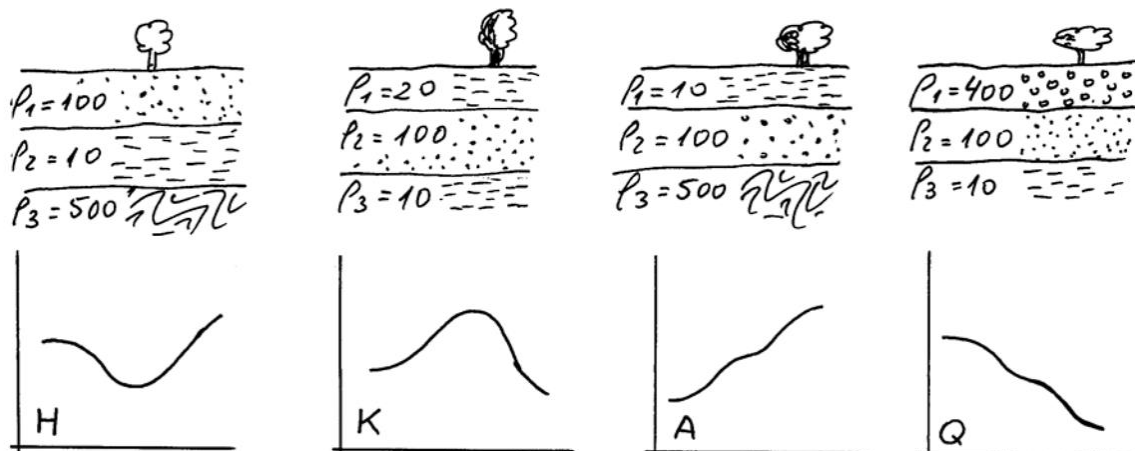


Figura 13: Diferentes tipos de curvas para tres capas con diferentes resistividades.

3.2.10 Interpretación de las curvas de resistividad aparente:

Una curva de resistividad nos indica cómo se encuentra la distribución de la resistividad horizontal en un determinado lugar. Sin embargo, es necesario realizar la inversión de datos (descripción cuantitativa) en algún software como IPI2WIN. Posteriormente obtendremos un corte geoelectrico que nos indica las distintas capas y los espesores del subsuelo en donde fueron tomadas las mediciones (figura 14). Finalmente, habrá que asociarlo a la geología del lugar. Sobra decir que para esta etapa final es necesario tener conocimiento de geología de la zona, pues, aunque obtenemos ciertos rangos de resistividad para cada capa, por lo general se pueden asociar a más de un tipo de roca.

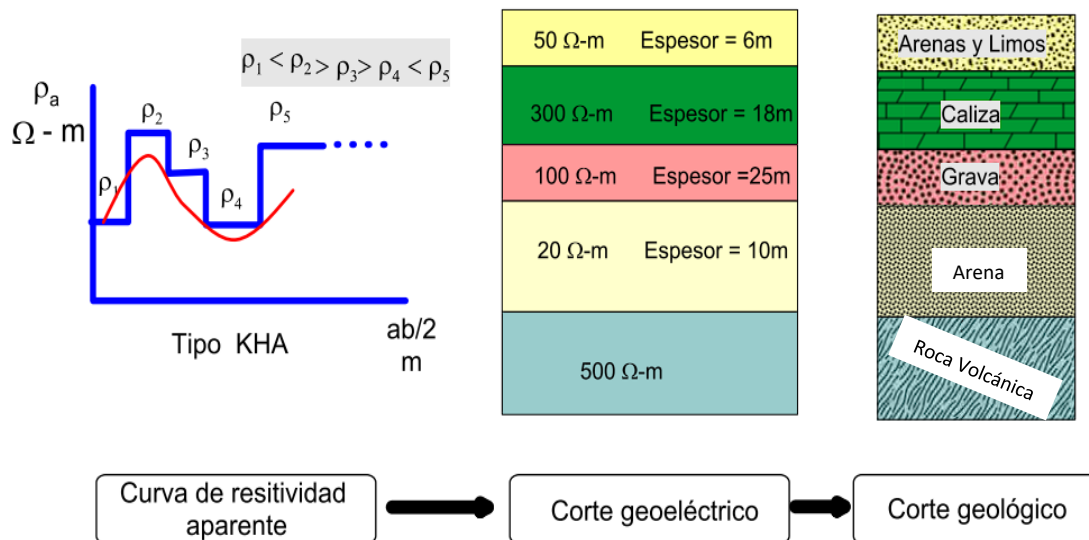


Figura 14: Metodología para interpretar curvas de resistividad aparente. (Modificada de Gaytán, 2013).

3.2.11 Dominios eléctricos

Para una descripción más amplia de alguna zona de estudio, es posible realizar un análisis de dominios eléctricos. Este consiste en el agrupamiento de familias de curvas de resistividad que sean similares. Lo anterior se realiza con la finalidad de caracterizar la zona de estudio y que nos sea más fácil localizar zonas con ciertos tipos de curvas de interés.

Por ejemplo, se mencionó anteriormente que en la localización de zonas con humedad resultan relevantes las curvas tipo H, por lo que al definir dominios eléctricos con este tipo de curva podríamos estar hablando de una zona con potencial acuífero.

3.3 Análisis estadístico multivariado

El análisis multivariado es la parte de la estadística y del análisis de datos que estudia, analiza, representa e interpreta los datos procedentes de la observación de más de una variable estadística sobre una muestra de individuos. Comprende un conjunto de técnicas enfocadas al análisis de conjunto de datos de más de una variable (Cuadras, 2018).

La aplicación de las técnicas estadísticas multivariadas se extiende a diversas áreas, como la investigación científica, la medicina, la economía, la psicología, la sociología, etc. El uso combinado de técnicas multivariadas como el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el Análisis de Clúster (AC) permite clasificar muestras en diferentes grupos y con base a sus características, así como identificar la variación espacial.

El análisis estadístico multivariado se divide en dos categorías: métodos de ordenación y métodos de clasificación.

Los métodos estadísticos de ordenación como el PCA, permiten organizar entidades (a menudo, sitios de muestreo) a lo largo de ejes cuantitativos con base a sus atributos, tales como la composición de especies.

Los métodos de clasificación como CA, también se conocen como de agrupamiento, estas técnicas son capaces de generar diferentes clases, cuyos elementos son comunes dentro de cada una de ellas.

3.3.1 Pretratamiento de la base de datos

La mayoría de las técnicas estadísticas multivariadas requieren una distribución log-normal. Por lo tanto, la normalidad univariante y multivariante se verificó con la prueba de Shapiro-Wilk.

La prueba de Shapiro-Wilk (1965) es una prueba estadística utilizada para determinar si un conjunto de datos sigue una distribución normal.

Esta prueba se utiliza comúnmente en análisis estadísticos para determinar si los datos pueden ser analizados mediante técnicas paramétricas, que asumen normalidad en los datos, o si se necesitan técnicas no paramétricas, que no asumen normalidad.

3.3.2 Análisis de correlación

El análisis de correlación es una técnica estadística que se utiliza para medir la relación entre dos variables. (Castillo et al., 2021).

Se pueden identificar la correlación de Pearson y la correlación de Spearman. La correlación de Pearson se utiliza para medir la relación lineal entre dos variables, es decir, si la relación entre ellas puede ser descrita mediante una línea recta. Por otro lado, la correlación de Spearman se utiliza cuando no se puede asumir una relación lineal entre las variables.

El resultado del análisis de correlación se representa mediante un coeficiente de correlación que oscila entre -1 y 1. Un coeficiente de correlación de 1 indica una correlación positiva perfecta, lo que significa que cuando una variable aumenta, la otra también lo hace en la misma proporción. Un coeficiente de correlación de -1 indica una correlación negativa perfecta, lo que implica que cuando una variable aumenta, la otra disminuye en la misma proporción. Un coeficiente de correlación de 0 indica que no existe una correlación significativa entre las dos variables.

El análisis de correlación es ampliamente utilizado en la investigación y el análisis de datos para comprender la relación entre dos variables y predecir el valor de una variable en función del valor de otra (Hair et al., 2014).

3.3.3 Análisis de componentes principales

Otra técnica analítica ampliamente utilizada en el análisis estadístico es el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), esta técnica se utiliza para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos.

De manera general, el objetivo principal del PCA es localizar un conjunto de variables no correlacionadas, llamadas componentes principales, que expliquen la mayor parte de la variabilidad presente en los datos originales (Vanhatalo, 2016).

El PCA se aplica para los siguientes propósitos:

- Resumir de forma efectiva un conjunto de datos y estudiar las relaciones entre variables.
- Proporcionar una reducción de datos y facilitar la interpretación.
- Entender la estructura de la comunidad.
- Interpretar cada muestra en relación con las otras de acuerdo con similitudes y diferencias.
- Generar hipótesis para posteriormente ponerse a prueba.

3.3.4 Análisis de clúster

El análisis de clúster es un método estadístico utilizado para identificar grupos o clústeres naturales en un conjunto de datos basándose en similitudes y diferencias entre estos. El objetivo principal del análisis de clúster es agrupar objetos o casos similares en categorías, de modo que los objetos dentro de cada clúster sean más similares entre sí que con los objetos de otros clústeres.

Para estimar la similitud entre cada dato y poder agruparlos se utilizan diversos métodos, como la distancia euclidiana, la distancia de Manhattan o la correlación. Los algoritmos de clúster más comunes incluyen el método de k-medias, el análisis de conglomerados jerárquicos y el algoritmo de densidad basado en clústeres (Hair et al., 2014).

- El Análisis de Clúster tiene los siguientes propósitos (Jain, 2010):
Establecer una división de los conjuntos iniciales de datos de forma más objetiva y menos intuitiva.
- Agrupar unidades muestrales similares en tipos.
- Formar grupos de similar entidad, basados en atributos.
- Subdividir la realidad en compartimentos separados.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

Este trabajo comenzó con la recopilación de información (geológica, magnética y eléctrica) y de trabajos previos de la zona de estudio.

Posteriormente se realizó un análisis aeromagnético a partir de una carta obtenida del Servicio Geológico Mexicano, esto con la intención de tener una visión regional de la zona de estudio e identificar lineamientos magnéticos que pudieran estar asociados a fallas y/o fracturas, pues anteriormente se explicó que este tipo de estructuras pueden contener agua subterránea. De igual forma se hizo una descripción de los dominios magnéticos encontrados en la zona de estudio.

También se procesaron e interpretaron sondeos eléctricos verticales proporcionados por el IPICYT, dando una mayor importancia a aquellos ubicados en zonas donde se definieron lineamientos magnéticos para poder correlacionarlos y prospeccionar zonas con potencial acuífero.

Como parte de la caracterización de la estructura geológica asociada al graben Villa de Reyes, se adquirieron y procesaron alrededor de 30 km de datos de magnetometría terrestre en la porción centro-este del graben, cerca de la población La Ventilla, esto con el objetivo de complementar información adquirida en años anteriores en la zona norte del graben, la cual fue proporcionada por el IPICYT.

4.1 Método magnético

4.1.1 Magnetometría aérea

Se ha explicado anteriormente que el método magnético se conformó de dos partes, la primera fue la magnetometría aérea y posteriormente la terrestre. En este apartado se describe el trabajo que se realizó con la magnetometría aérea.

Como primera parte describiremos las características del equipo utilizado y los parámetros de vuelo. Se utilizó un avión Islander BN2-B27, dos magnetómetros móviles marca Geometrics G-803 y Scintrex G-714 con una sensibilidad de 0.25 y 0.001 nT respectivamente. También utilizaron dos magnetómetros como estaciones

base, uno marca Geometrics G-714 y uno GEM-SYSTEM GSM-19 con sensibilidad de 1 nT y 0.01 nT respectivamente. Los datos fueron tomados de un vuelo de contorno realizado en 1985.

Los parámetros de vuelo consistieron en una distancia entre líneas de vuelo de 1,000 m y una altura de vuelo de 300 m, con líneas de control cada 10,000 m.

La información anterior se puede consultar en las cartas magnéticas de campo residual reducidas al polo proporcionadas por el Servicio Geológico Mexicano (F14-4 y F14-7), correspondientes a los estados de San Luis Potosí y Guanajuato.

4.1.1.1 Procesamiento

Los procesos que realizó el Servicio Geológico Mexicano a la carta aeromagnética fueron la corrección por movimiento del avión, la corrección por variación diurna y la sustracción del Campo Magnético Internacional de Referencia (IGRF 1985).

Posteriormente esta carta se procesó en el Software Oasis Montaj, de Geosoft versión 8.3.3. Una vez teniendo el grid (matriz de datos) del campo magnético residual (CMR), se aplicó el filtro de Baranov y Naudy (1964), mejor conocido como reducción al polo, el cual sitúa la anomalía sobre la fuente que la produce, simulando que los datos fueron tomados en el polo norte magnético, en donde la declinación es igual a 0 y la inclinación es de 90°.

Sobre ese procesamiento (Reducción al polo), se aplicó el filtro de señal analítica (Nabighian, 1972) en donde se identificaron los lineamientos magnéticos y se definieron y describieron los dominios magnéticos.

Finalmente, a partir de la configuración de reducción al polo se realizó un modelado magnético 3D en el mismo software con la ayuda de la herramienta VOXI, esta inversión de datos magnéticos nos brinda un modelo de la estructura geológica muy apegado a la realidad.

4.1.2 Magnetometría 3D

Un método ampliamente utilizado en geofísica para conocer de manera aproximada los cuerpos que existen en el subsuelo es el modelado 3D.

En este trabajo se utilizó la carta aeromagnética para generar un modelo 3D del subsuelo en el área del graben Villa de Reyes, lo anterior se hizo en el software Oasis Montaj de Geosoft.

Como primera parte se delimitó el polígono del área de estudio, este se hizo en el grid de campo magnético residual. Posteriormente el algoritmo realiza un cálculo por medio de vóxeles, a los que asigna distintos valores de susceptibilidad magnética (figura 15).

Ya que se trata de un área con extensión considerable, el tamaño de cada voxel fue de 2000 x 2000 x 300 metros.

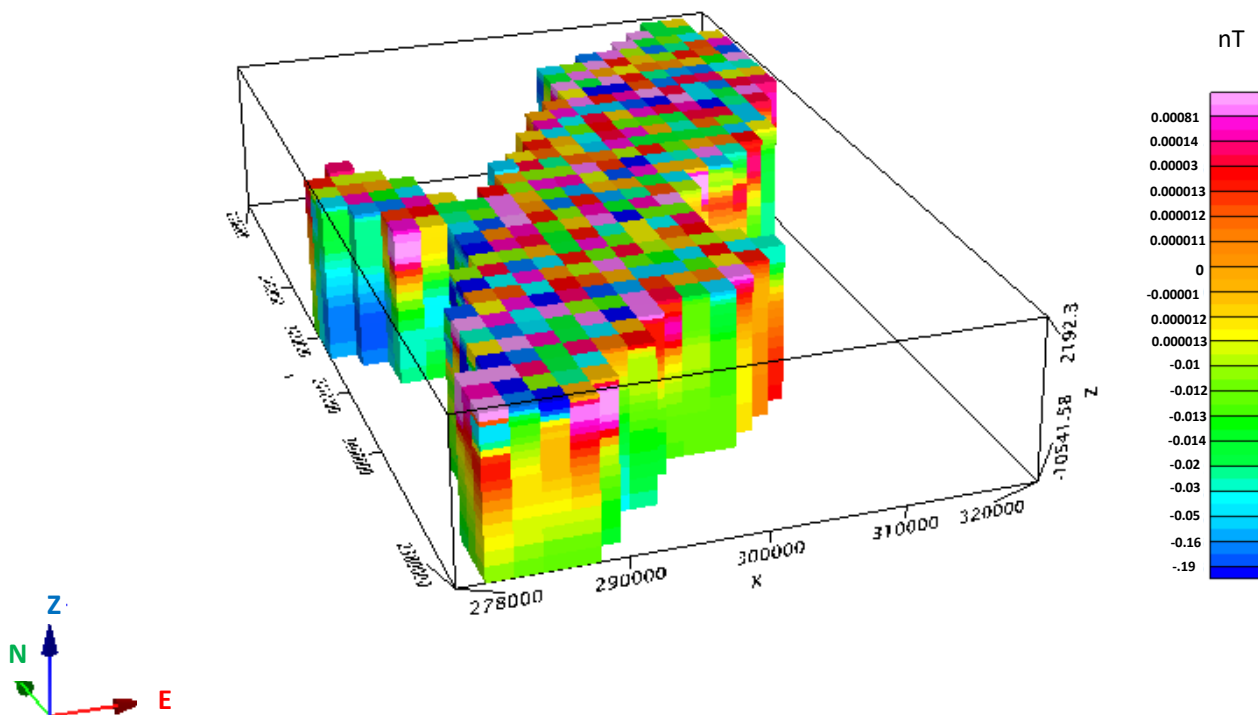


Figura 15: Voxels que componen el área de estudio.

Posteriormente, a partir de los datos observados el software realiza un modelo 3D del subsuelo mostrando distintos cuerpos que son responsables de las principales anomalías magnéticas (figura 16).

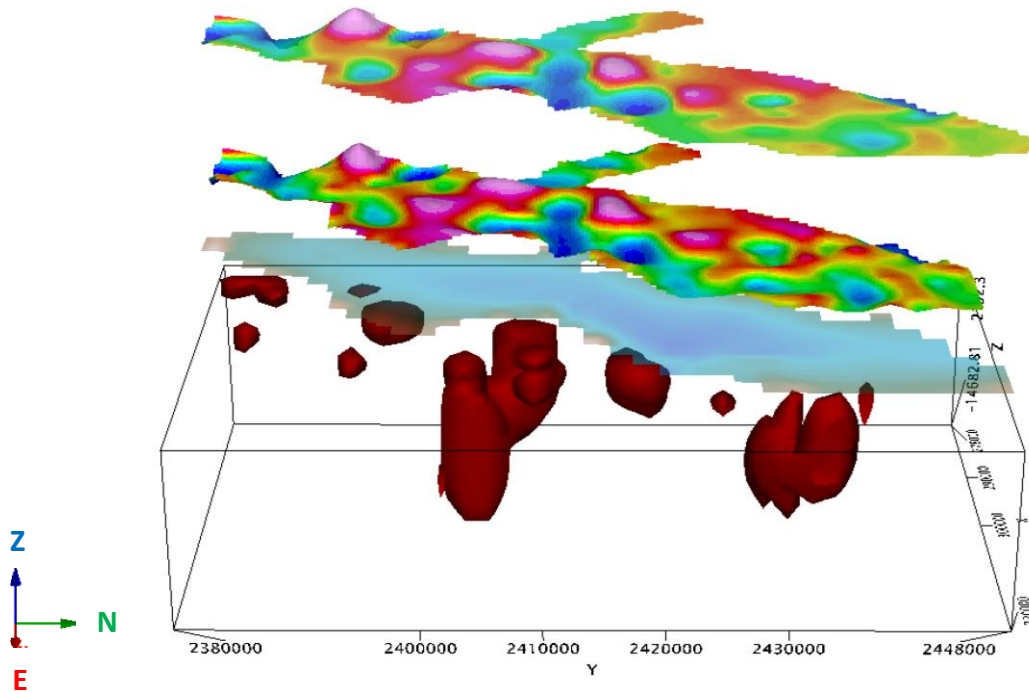


Figura 16: Modelo 3D del área de estudio.

4.1.3 Magnetometría terrestre

Para lograr uno de los objetivos (caracterizar la estructura geológica que se asocia con el graben de Villa de Reyes) fue necesario adquirir, procesar e interpretar datos magnéticos terrestres en la porción central-este de la zona de estudio (cerca de la población La Ventilla. De igual forma, se procesó e interpretó información que fue adquirida en años anteriores.

Equipo utilizado

Para el levantamiento de la información terrestre se utilizaron tres magnetómetros. La función de dos de ellos fue medir el campo magnético total, el tercero se utilizó como estación base.

Los magnetómetros móviles fueron de la marca GEM, MODELO GSM-19, tipo Overhouser. El magnetómetro que fungió como estación base fue de la marca Geometrics modelo G-857 (figura 17).

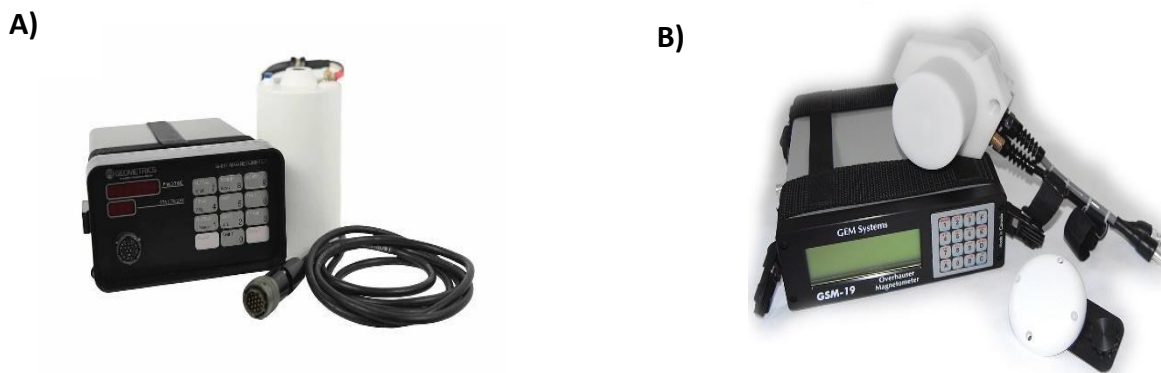


Figura 17: A) Magnetómetro Geometrics-857 utilizado como estación base. B) Magnetómetro GEM-GSM 19 utilizado como estación móvil.

El procesamiento de los datos se realizó en el software Oasis Montaj versión 8.3.3 de Geosoft.

Características del levantamiento magnético

Para cubrir la zona centro-este del graben de Villa de Reyes, cercana a la población La Ventilla, se obtuvieron alrededor de 28 km de datos magnéticos, repartidos en 4 perfiles (2 N-S y 2 E-O) que cruzan una gran anomalía (figura 18). Las lecturas se tomaron de manera equiespaciada cada 25 metros. Para cada perfil se llevó un control utilizando una bitácora de campo, esta nos sirvió en un futuro para realizar correcciones.

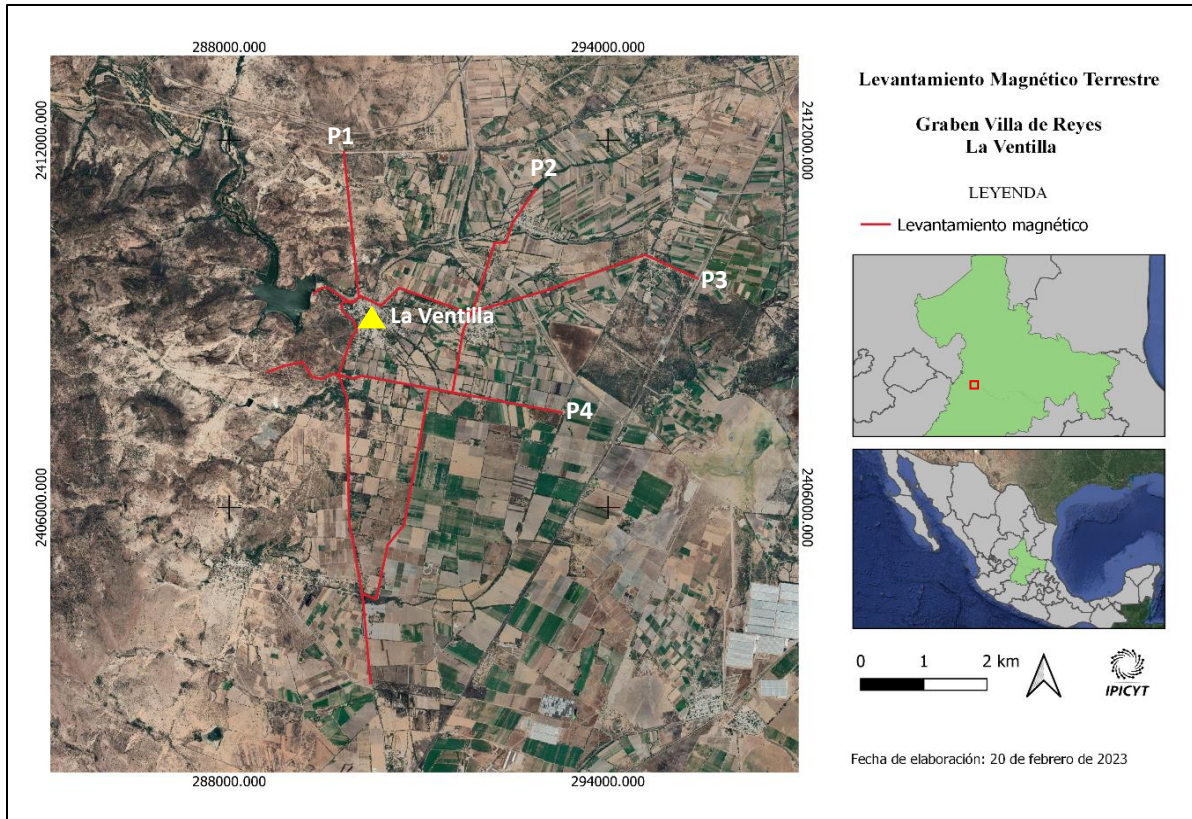


Figura 18: En líneas rojas se muestra el levantamiento magnético terrestre que se realizó. Se indica cada perfil con una línea roja.

De igual manera, para cada perfil se instaló una estación base, esta se colocó en el mismo lugar, alejada de cualquier objeto que pudiera introducir ruido en las lecturas, este magnetómetro tomaba lecturas cada 5 minutos y posteriormente esta información se utilizaba para realizar la corrección por variación diurna, de la cual se habló en el capítulo III.

Procesamiento

Como primera parte se realizó una corrección por variación diurna, esta se hizo en el software GEMLink versión 5.4. Para llevarla a cabo correctamente es necesario ingresar los valores de campo magnético medido en la zona de estudio, así como aquellos tomados por la estación base, de igual forma se ingresa la fecha en la que se realizó el levantamiento. En automático el programa suma o resta la variación

del campo magnético durante el tiempo medido a los datos tomados con el magnetómetro móvil.

Posteriormente, se grafican los valores de campo magnético total y se analizan visualmente los datos, se verifican con la bitácora de campo aquellos puntos en donde hubo presencia de objetos que pudieran ocasionar datos ruidosos como cables de alta tensión u objetos metálicos grandes, si se observa que es un valor fuera de lo normal se elimina.

Al igual que con los datos de magnetometría aérea, es necesario eliminar el campo magnético de la Tierra, quedándonos así con el campo de interés, el cual recibe el nombre de campo magnético residual.

Otros de los procesos aplicados fueron el de reducción al polo, primera derivada vertical y continuación ascendente, de los cuales se habló en el capítulo III.

Por otra parte, el resto de los datos magnéticos terrestres fueron proporcionados por el IPICYT y cubren la mayor parte del área de estudio dentro del estado de San Luis Potosí. En este caso se realizaron tres perfiles con dirección N-S con una longitud de entre 38 y 44 km. En dirección E-O se hicieron siete perfiles, la longitud varía entre 8 y 17 km. También se realizaron dos perfiles de menor longitud con dirección NO-SE (figura 19).

A estos datos les fueron aplicados los mismos filtros matemáticos. Todo este procesamiento se llevó a cabo en el software Oasis Montaj de Geosoft, versión 8.3.

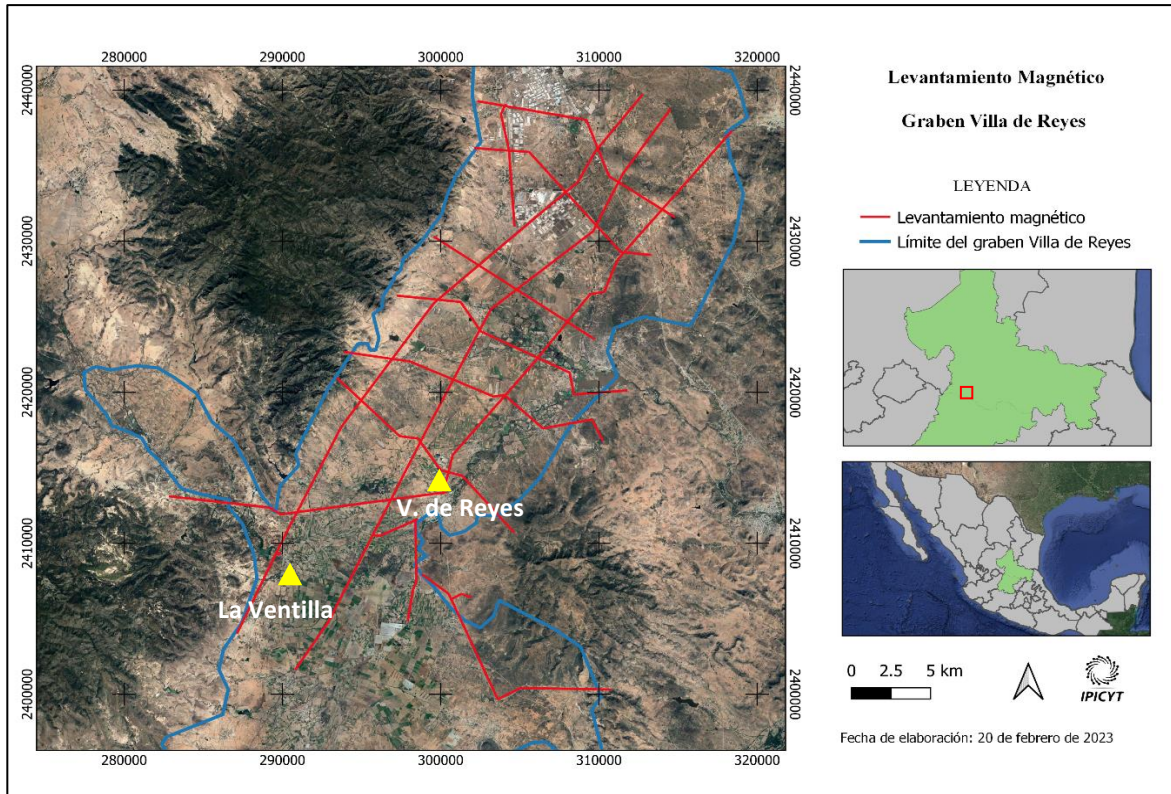


Figura 19: En líneas rojas se muestran los diferentes perfiles magnéticos realizados en 2006.

4.2 Método geoelectrico

4.2.1 Sondeos Eléctricos Verticales

El objetivo de los SEV's es conocer la geología y estructura del subsuelo basándose en el contraste resistivo. De igual forma, facilita la localización de zonas en donde exista humedad, ya que estas zonas tienden a tener bajos valores de resistividad y se puede relacionar con existencia de agua subterránea.

En 2006 se realizaron 55 sondeos eléctricos verticales (SEV's) dentro de la zona de estudio por parte del IPICYT (figura 20). Aunque los 55 SEV's resultan relevantes para el estudio de la zona, de acuerdo con la metodología utilizada, resultan de mayor interés los que se localizan sobre fallas y/o fracturas, pues estas podrían contener agua y el uso de esta metodología nos ayuda a corroborar o descartar esta posibilidad.

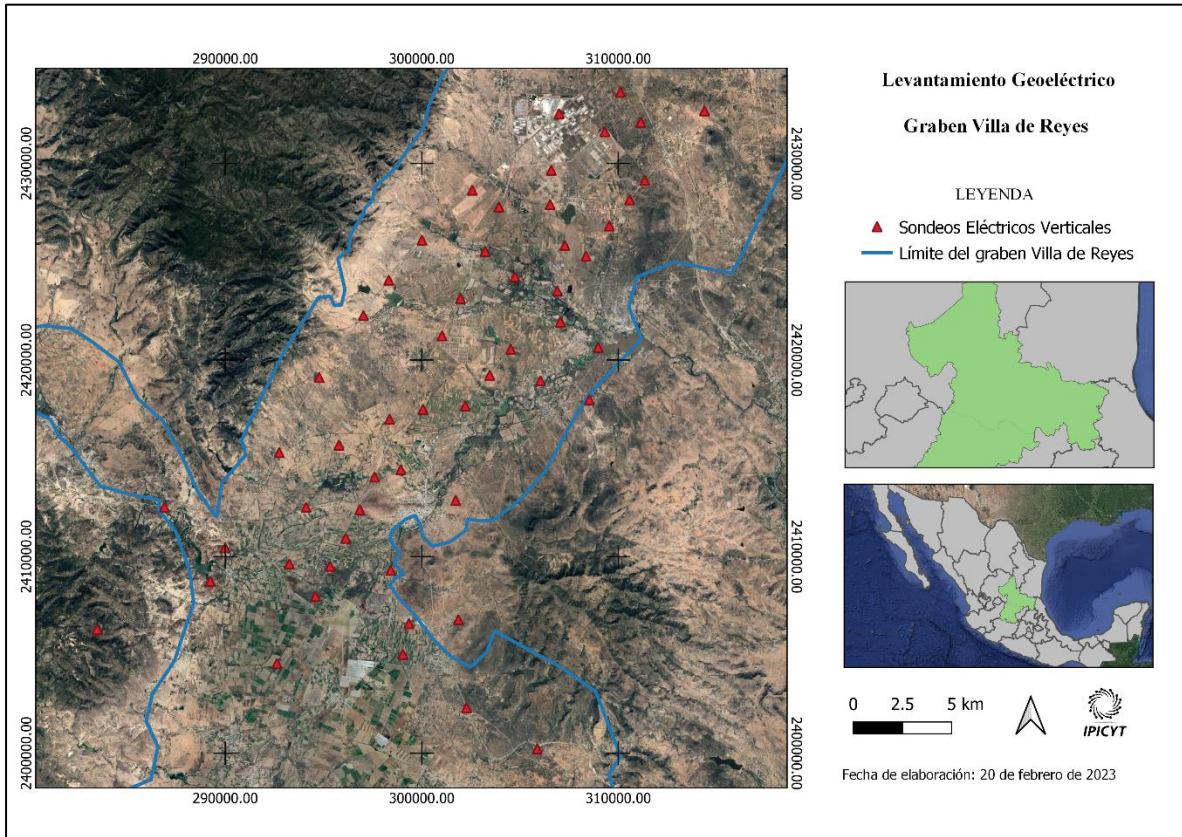


Figura 20: Distribución de los sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio.

4.2.2 Características de los sondeos eléctricos verticales

La configuración electródica utilizada fue Schlumberger, este arreglo es uno de los más utilizados debido a que resulta más práctico en comparación con otros arreglos, además suele alcanzar una mayor profundidad.

Tabla 3: Localización y abertura máxima de cada SEV.

SEV	X	Y	Abertura máxima
1	305876	2400230	1000
2	302281	2402324	1000
3	299041	2405025	1000
4	292631	2404569	1000
5	301871	2406788	1000
6	299347	2406600	1000
7	294595	2407984	1400
8	289991	2410459	1100
9	298419	2409311	1700

10	296129	2410936	1550
11	293256	2409630	1000
12	294115	2412518	1700
13	286908	2412516	1000
14	301725	2412863	1000
15	298930	2414431	1000
16	297599	2414055	1500
17	295785	2415673	1500
18	292745	2415301	2000
19	302214	2417676	1700
20	298362	2416996	2000
21	294777	2419118	2000
22	308527	2417988	1000
23	306039	2418950	1000
24	304528	2420558	1500
25	301968	2423142	2000
26	297031	2422273	1000
27	308974	2420651	1500
28	307048	2421940	1000
29	301030	2421236	1000
30	300010	2426107	2000
31	308359	2425287	2000
32	303928	2427786	2000
33	302569	2428645	2000
34	309541	2426827	1950
35	307283	2425828	1950
36	306592	2429659	1950
37	311354	2429144	1500
38	309320	2431622	2000
39	306990	2432541	1500
40	305669	2435947	1500
41	314386	2432680	2000
42	311146	2432102	2000
43	309114	2435098	1000
44	316927	2435520	1500
45	310112	2433632	2000
46	298319	2424067	1500
47	295334	2409516	2000
48	289239	2408753	1500
49	283480	2406309	2000
50	296849	2412394	2000

51	303224	2425534	1000
52	306530	2427909	1000
53	310572	2428160	1500
54	306900	2423516	1500
55	303458	2419230	2000
56	304745	2424238	2000

Además, se elaboró un mapa que nos muestra la distribución de la resistividad aparente a diferentes aberturas, es decir, nos da una idea de cómo se comporta la corriente eléctrica en el subsuelo a diferentes profundidades.

4.2.1.3 Procesamiento

Para el procesamiento se utilizó el software IPI2WIN versión 3.1.2, una vez que se ingresan los valores de $AB/2$, MN y resistividad aparente tomados en campo, el programa realiza la inversión de datos mediante una variante del algoritmo de Newton para el número mínimo de capas. Para resolver el problema de la ambigüedad geofísica utiliza el algoritmo de Tikhonov, este ayuda a reducir el error de ajuste. Posteriormente el programa nos muestra una curva de resistividad aparente y una curva que se ajustará a esta de forma manual con el objetivo de obtener un modelo de capas.

4.3 Análisis estadístico

Como parte del procesamiento de la información, se realizó un análisis estadístico multivariado a los datos geoelectrónicos esto con la finalidad de comprender y analizar la información recopilada.

Se realizó un pretratamiento de la base de datos geoelectrónicos que consistió en definir las variables involucradas en los datos de los 56 sondeos eléctricos verticales (SEV's), en este caso fueron siete (resistividad aparente a las aberturas de 1, 10, 100, 500 y 1,000 metros, profundidad máxima y el tipo de curvas), estas se acomodaron en columnas en una tabla de Excel como se muestra en la tabla 4.

Es importante mencionar que para un óptimo análisis los valores de cada variable deben ser numéricos, en este caso todos cumplen esa condición excepto las curvas obtenidas en cada SEV, debido a esto fue necesario codificar esta información, asignando a cada combinación de curvas un número del 1 al 18, pues fueron las combinaciones encontradas para estos datos.

Tabla 4: Variables utilizadas para el análisis estadístico

AB/2= 10	AB/2=100	AB/2=100	AB/2=500	AB/2=1000	Tipo de curva	Profundidad_máx (m)
214.2	73.6	36.2	35.1	43.4	HKHKH	153
100.3	45.3	22.6	25.2	766.2	AKQHA	336
26.1	14.2	32.5	23.0	32.9	HKH	401
61.9	25.2	242.0	196.2	415.2	QH	56.5
90.5	64.6	23.6	42.0	40.8	QHA	343
39.2	61.7	25.9	23.1	27.1	KHKH	17.7
239.8	420.7	33.5	31.1	28.6	KQHK	455
40.2	36.6	24.2	256.3	30.9	KH	300
77.5	36.1	22.0	25.5	34.7	HKHKH	249
83.7	46.3	58.5	280.9	164.9	QHA	438
21.6	19.5	21.0	13.5	18.2	KQH	265
49.6	83.7	21.9	25.7	30.8	KHKH	248
38.7	23.4	24.9	37.8	59.6	HKH	292
245.3	102.4	22.0	52.1	79.6	HAH	109
71.6	49.6	19.8	30.0	42.2	KQH	175
217.3	19.0	18.3	38.8	47.9	QH	430
135.9	73.0	13.8	19.1	28.7	QH	282
76.2	40.4	22.8	11.1	35.0	HKH	120
37.7	31.5	14.4	31.9	38.7	KHA	445

Posteriormente, para conocer la distribución de los datos, se realizó la prueba de normalidad denominada Shapiro-Wilk a cada variable.

Después se realizó el escalado de características en la base de datos, mediante estandarización (o normalización Z-score) para aproximarse a las condiciones óptimas del análisis multivariante. La estandarización reduce la varianza entre las variables y previene la disimilitud como la distancia euclidiana. Cada variable fue estandarizada con su correspondiente puntuación Z, mediante la siguiente ecuación.

$$Z_i = \frac{X_i - \text{media}}{S} \quad (9)$$

Donde Z_i es la puntuación Z estandarizada, X_i es el valor de cada variable, y media y S son el valor medio y la desviación estándar de cada variable, respectivamente.

Con base en los resultados obtenidos, se aplicó un análisis de correlación de Spearman y se obtuvo una matriz que nos muestra que tan relacionadas están las diferentes variables entre sí.

Esta matriz nos brindó información importante, sin embargo, para hacer una interpretación más profunda se hizo el análisis de componentes principales. El PCA ayudó a explicar la varianza dentro del conjunto de datos reduciendo la dimensionalidad de la estructura de datos. El ACP se llevó a cabo para transformar las variables correlacionadas originales en un conjunto más pequeño de variables no correlacionadas denominadas componentes principales (CP). Los CP son las variables no correlacionadas calculadas multiplicando las variables correlacionadas por el vector propio, y se expresan como cargas (ecuación . Las cargas muestran la contribución de una variable determinada a cada una de las PC extraídas.

$$Z_{ij} = a_{i1}x_{1j} + a_{i2}x_{2j} + a_{i3}x_{3j} + \dots + a_{ir}x_{rj} \quad (10)$$

El análisis de clúster se realizó mediante el algoritmo K-means que utiliza criterios para segmentar los datos basándose en características intrínsecas, proximidad o grado de similitud. El objetivo principal del algoritmo de agrupación de K-means es dividir un conjunto de datos sin etiquetar en K clúster (grupos o categorías), representados por centroides, mediante la siguiente ecuación:

$$d(Z_p, Z_q) = \|Z_p - Z_q\|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^D (Z_{pj} - Z_{qj})^2} \quad (11)$$

Todo el procesamiento anterior se llevó a cabo en el lenguaje de programación RStudio Vs. 4.1.2.

4.4 Integración de la información geofísica

Una vez que se obtuvieron los resultados del procesamiento geofísico de datos geoelectricos y magnetometría terrestre, se determinaron las secciones geoelectricas que eran de mayor interés, para lograr esto fue necesario integrar toda la información recabada y correlacionarla.

Como primera parte, se definieron las secciones geoelectricas con apoyo de la magnetometria terrestre, pues para conocer aquellas zonas en donde existe mayor probabilidad de encontrar agua subterranea era necesario conocer aquellos SEV's localizados sobre o muy cerca de lineamientos (figura 21).

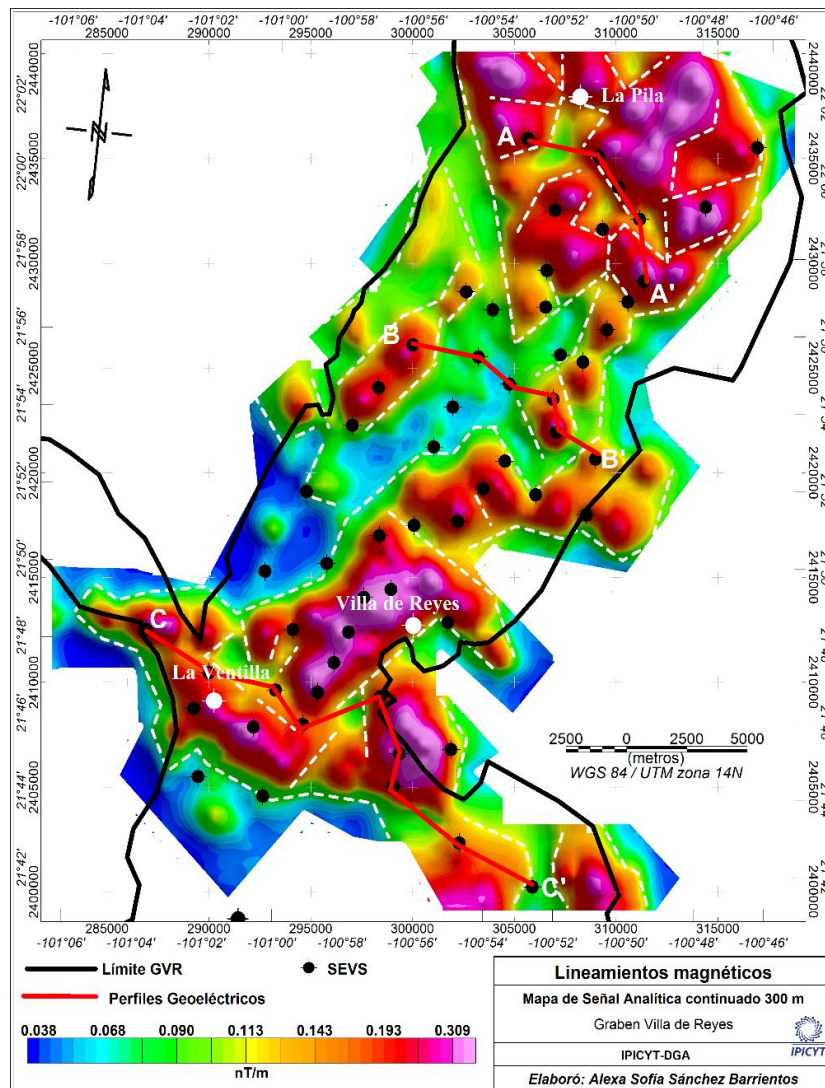


Figura 21: Mapa de señal analítica que muestra los perfiles geoelectricos definidos en líneas rojas (A-A', B-B', C-C').

Una vez definidas las secciones de interés en el mapa magnético, se procedió a realizar las secciones geoelectricas utilizando los SEVs, esto se hizo con el software IPI2WIN versión 3.1.2. Posteriormente, estos resultados se exportaron al software SURFER para realizar las secciones geoelectricas a mayor detalle.

Es importante mencionar que los softwares no siempre nos brindan las mejores soluciones, tal fue el caso, pues al comenzar a analizar las secciones geoelectricas elaboradas en Surfer fue notorio que las interpolaciones que hacía el programa no eran coherentes con la información obtenida en campo (resistividad aparente y magnetometría terrestre).

Debido a lo anterior, fue necesario realizar las secciones geoelectricas de forma manual. Basándonos en la inversión de datos que se obtienen del software IPI2WIN y en los datos de resistividad aparente obtenidos en campo se llegó a perfiles geoelectricos más coherentes.

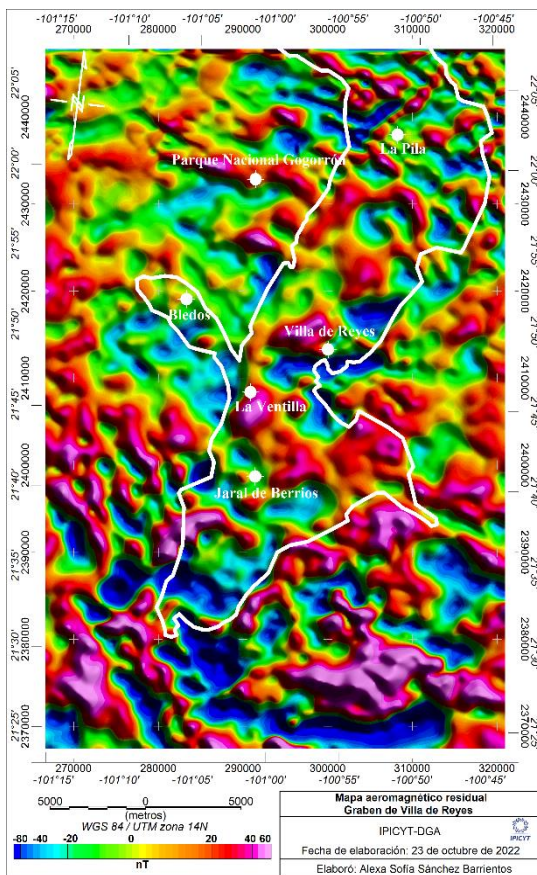
De igual manera se elaboraron secciones geológicas, esto se hizo con base en las secciones geoelectricas y en perfiles magnéticos que se trazaron de manera idéntica a los perfiles geoelectricos. Además se tuvo apoyo de las cartas geológicas F14-4 y F14-7 proporcionadas por el servicio geológico mexicano y de los perfiles geológicos realizados por Aguirre (1992).

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Magnetometría aérea

Antes de realizar cualquier proceso a los datos aeromagnéticos es necesario obtener el campo magnético residual y a ese mismo aplicar el proceso de reducción al polo (figura 22).

A) CMR



B) RP

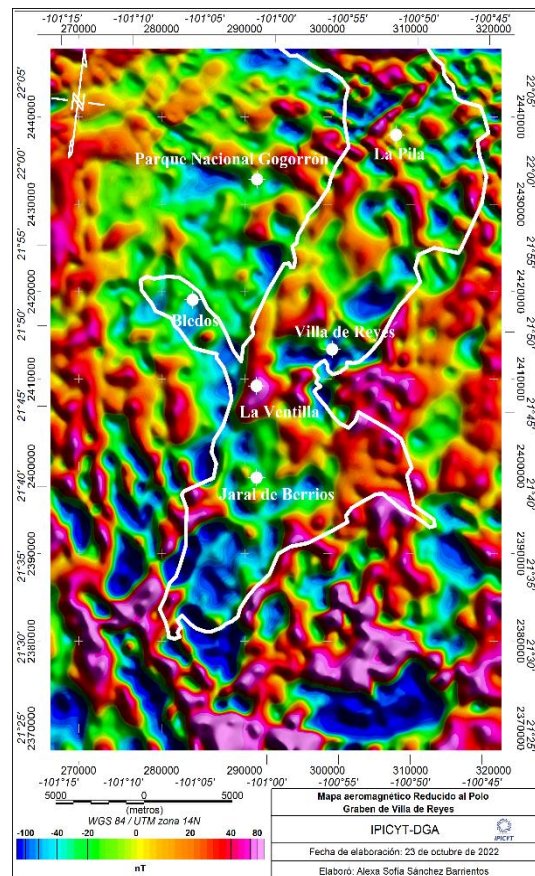


Figura 22: A) Mapa del campo magnético residual de la zona de estudio. B) Mapa del campo magnético reducido al polo.

5.1.1 Dominios aeromagnéticos

Posteriormente, se delimitaron los dominios aeromagnéticos (DAM's), esto se realizó en la configuración de reducción al polo (figura 23). En este caso se encontraron cuatro DAM's principales. Se consideró que el DAM II se localiza en tres diferentes porciones del mapa.

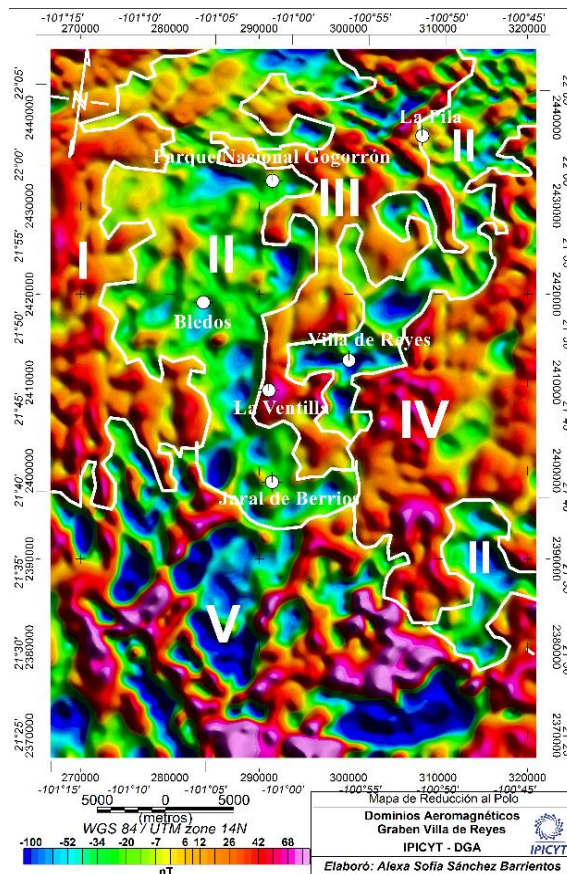


Figura 23: Dominios aeromagnéticos en la configuración de la reducción al polo.

Para conocer las características de estos dominios aeromagnéticos es necesario trazar perfiles que nos ayuden a describirlos (figura 24). Se muestran los perfiles trazados y las características de cada DAM en la figura 22.

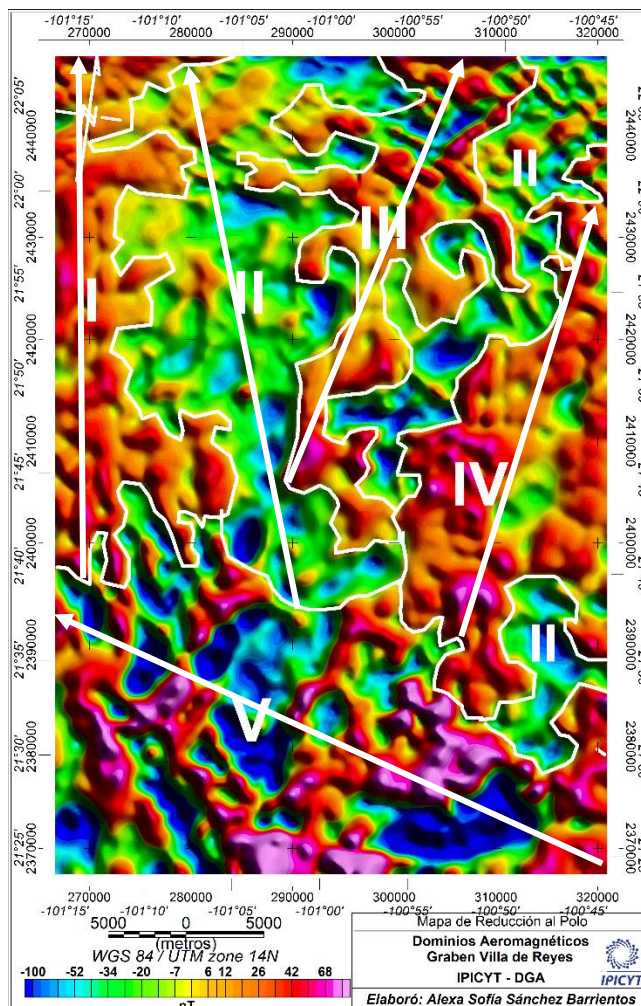


Figura 24: Perfiles trazados para describir cada DAM.

DAM I

El DAM I se localiza en la porción NW de la zona de estudio, presenta una forma alargada en dirección N-S con longitud aproximada de 48 km y cuatro brazos sin forma definida. Se muestra indefinido hacia el norte y hacia el oeste. En general, se caracteriza por presentar anomalías magnéticas positivas, que van desde los -18 hasta los 60 nT.

Para su descripción se trazó un perfil con dirección SE-NW (figura 25). Se encontró que este dominio presenta longitudes de onda de entre 1400 y 3600 metros, amplitudes que van de 5 a 36 nT y distancias polares que se encuentran en un rango de 10,20 a 3,060 metros.

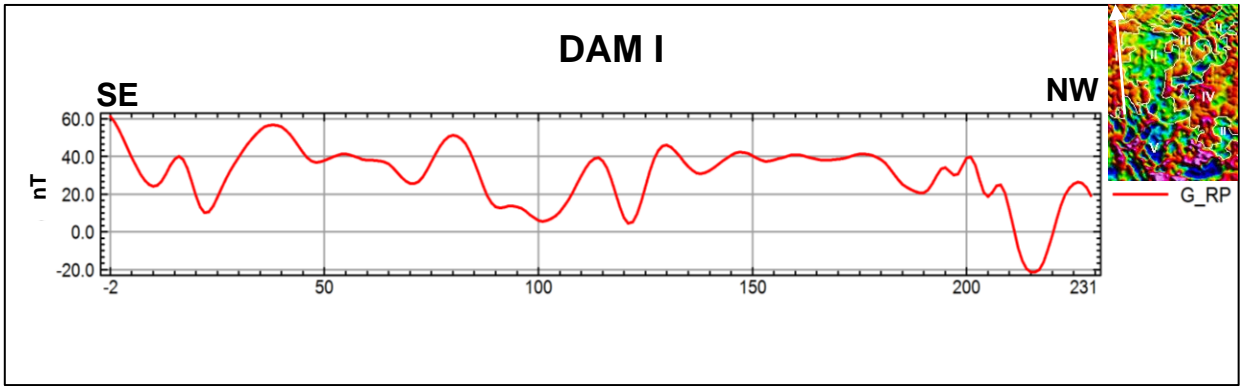


Figura 25: Perfil trazado sobre el DAM I.

DAM II

El DAM II se localiza en la porción N y centro de la zona de estudio. No presenta una forma en particular. Se encuentra indefinido al N. Además, se definieron otras dos zonas que se considera que pertenecen al DAM II, la primera se localiza al NE de la zona de estudio, entre los DAM's III y IV, la segunda es una pequeña porción al SE. En general, este dominio se caracteriza por presentar valores magnéticos bajos a intermedios.

Para su descripción se trazó un perfil con dirección SE-NW (figura 26). Se encontró que este dominio presenta longitudes de onda de entre 2000 y 6900 metros, amplitudes que van de 7 a 70 nT y distancias polares que se encuentran en un rango de 900 a 2100 metros. Las intensidades magnéticas para este dominio oscilan entre -76 y 16 nT.

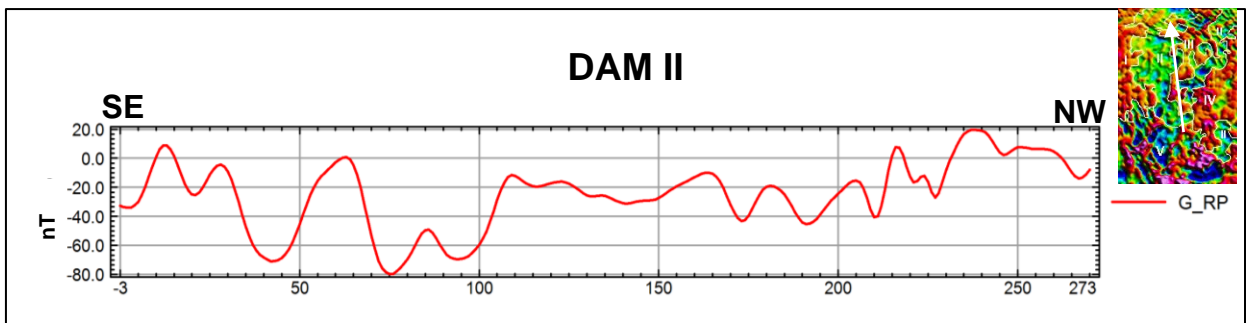


Figura 26: Perfil trazado sobre el DAM II.

DAM III

El DAM III se localiza al centro en el N de la zona de estudio, presenta 6 brazos y se extiende en forma alargada hacia el SW. Presenta una longitud aproximada de 46 km y se muestra indefinido hacia el N. Se caracteriza por presentar valores magnéticos altos que se encuentran en un rango de -61 a 55 nT.

Para su descripción se trazó un perfil en dirección SW-NE (figura 27). Este DAM presenta longitudes de onda de entre 2000 y 3300 metros, amplitudes que van de 14 a 42 nT y distancias polares que se encuentran en un rango de 1000 a 2200 metros.

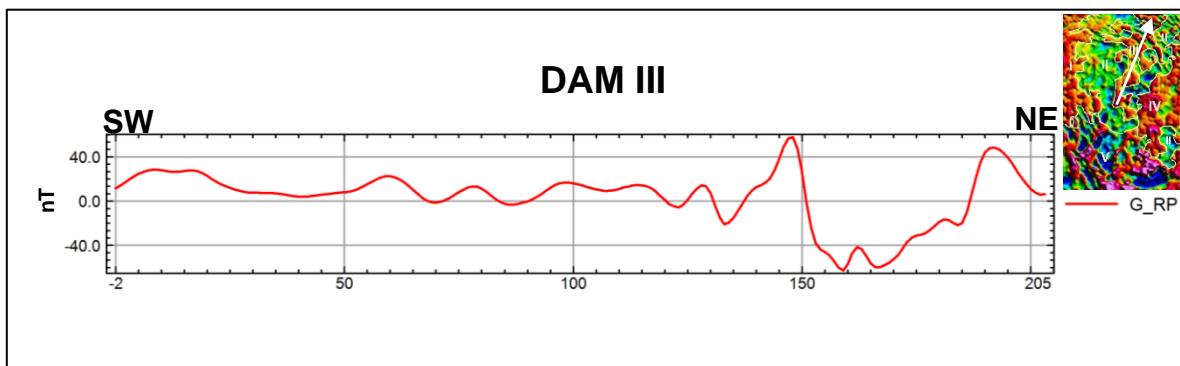


Figura 27: Perfil trazado sobre el DAM III

DAM IV

El DAM IV se localiza en el este de la zona de estudio, se considera amorfo. Se muestra indefinido hacia el este y se caracteriza por presentar valores magnéticos que van de -60 a 50 nT.

Para su descripción se trazó un perfil en dirección SW-NE (figura 28). Se encontró que este dominio presenta longitudes de onda de entre 2000 Y 4400 metros, amplitudes que van de 13 a 60 nT y distancias polares que se encuentran en un rango de 1,100 a 2300 metros.

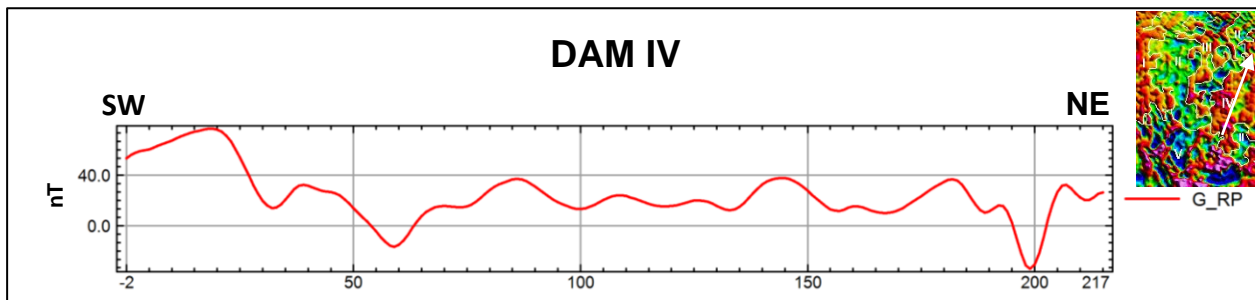


Figura 28: Perfil trazado sobre el DAM IV con dirección NE-SW.

DAM V

Finalmente, el DAM V es el más grande de la zona de estudio y se localiza al sur de esta. Presenta una forma más o menos rectangular, teniendo un ancho aproximado de 53 km, sin embargo, es probable que éste DAM tenga una mayor extensión ya que se encuentra indefinido hacia el este, oeste y sur.

Para su descripción se trazó un perfil en dirección SE-NW (figura 29). Se encontró que este DAM presenta grandes longitudes de onda de entre 3500 y 5900 metros, amplitudes que van de 55 a 240 nT, distancias polares de entre 1800 y 4400 metros. Presenta valores magnéticos que van desde -194 a 165 nT.

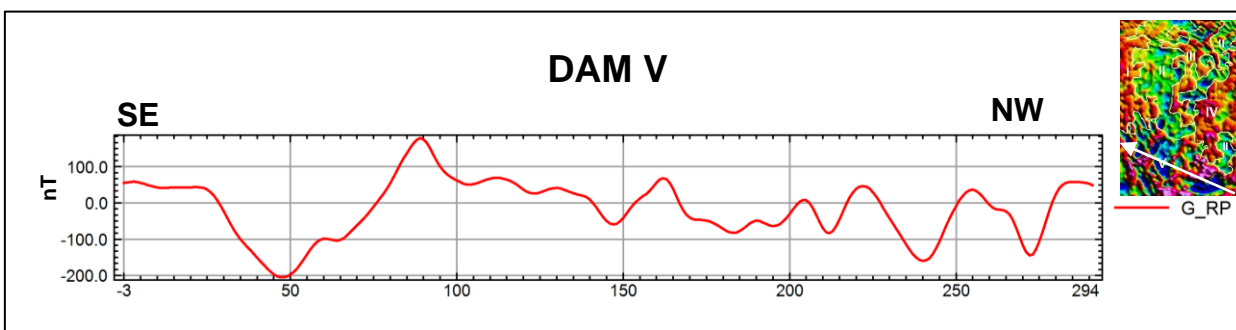


Figura 29: Perfil trazado sobre el DAM V con dirección NW-SE.

Tabla 5: Características principales de los DAM's.

DAM	Longitud de onda (m)	Distancia polar (m)	Amplitud (nT)	Valores magnéticos (nT)
I	1400-3600	1020 a 3060	5 a 36	-18 a 60
II	2000-6900	900 a 2100	7 a 70	-76 a 16
III	2000 - 3300	1000 a 2200	14 a 42	-61 a 55
IV	2000 - 4400	1100-2300	13 a 60	-50 a 50
V	3500 - 5900	1800 a 4400	55 a 240	-194 a 165

Como segunda parte se definieron los lineamientos magnéticos en la configuración de reducción al polo (figura 30) y se obtuvo el diagrama de esfuerzos de estos, los cuales se muestran a continuación.

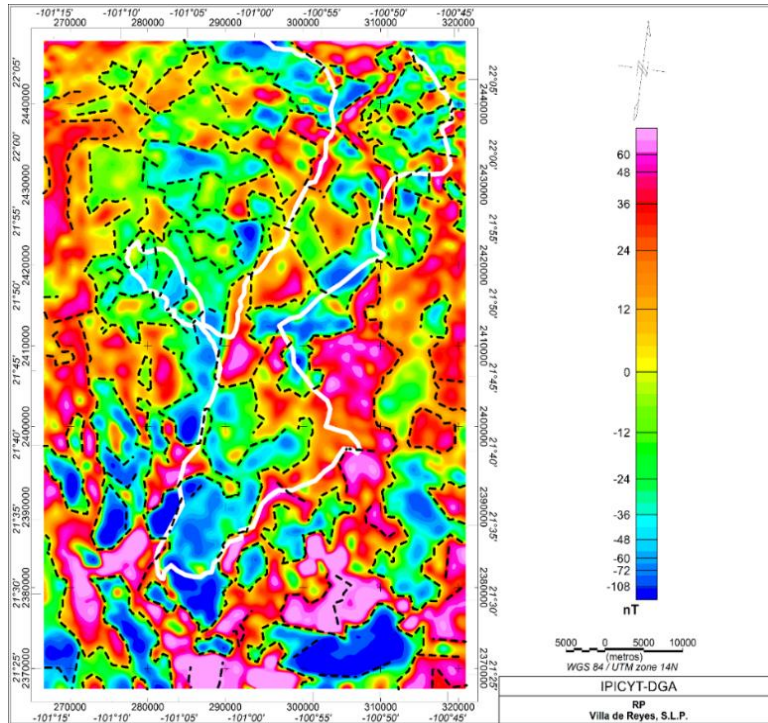


Figura 30: En líneas punteadas se muestran los lineamientos encontrados.

Diagrama de esfuerzos

En este caso existen dos direcciones preferenciales, la primera en dirección NW y la secundaria en dirección NW (figura 31).

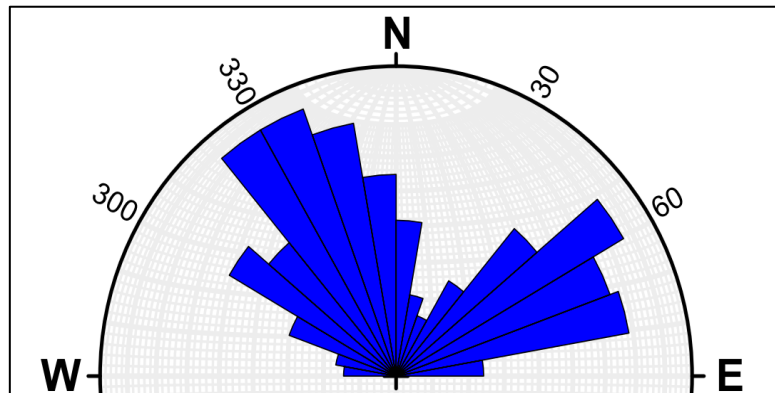


Figura 31: Diagrama de esfuerzos que muestra las direcciones preferenciales de los lineamientos.

5.1.2 Magnetometría 3D

Con esta metodología se reconocieron cuatro cuerpos causantes de las anomalías principales (figura 32, se muestran dos vistas). Para su descripción se trazaron perfiles sobre cada anomalía principal, además, para estimar el tamaño de cada cuerpo se midieron las dimensiones de estos en dirección E-W y en la vertical. La susceptibilidad utilizada fue de 0.0005 SI.

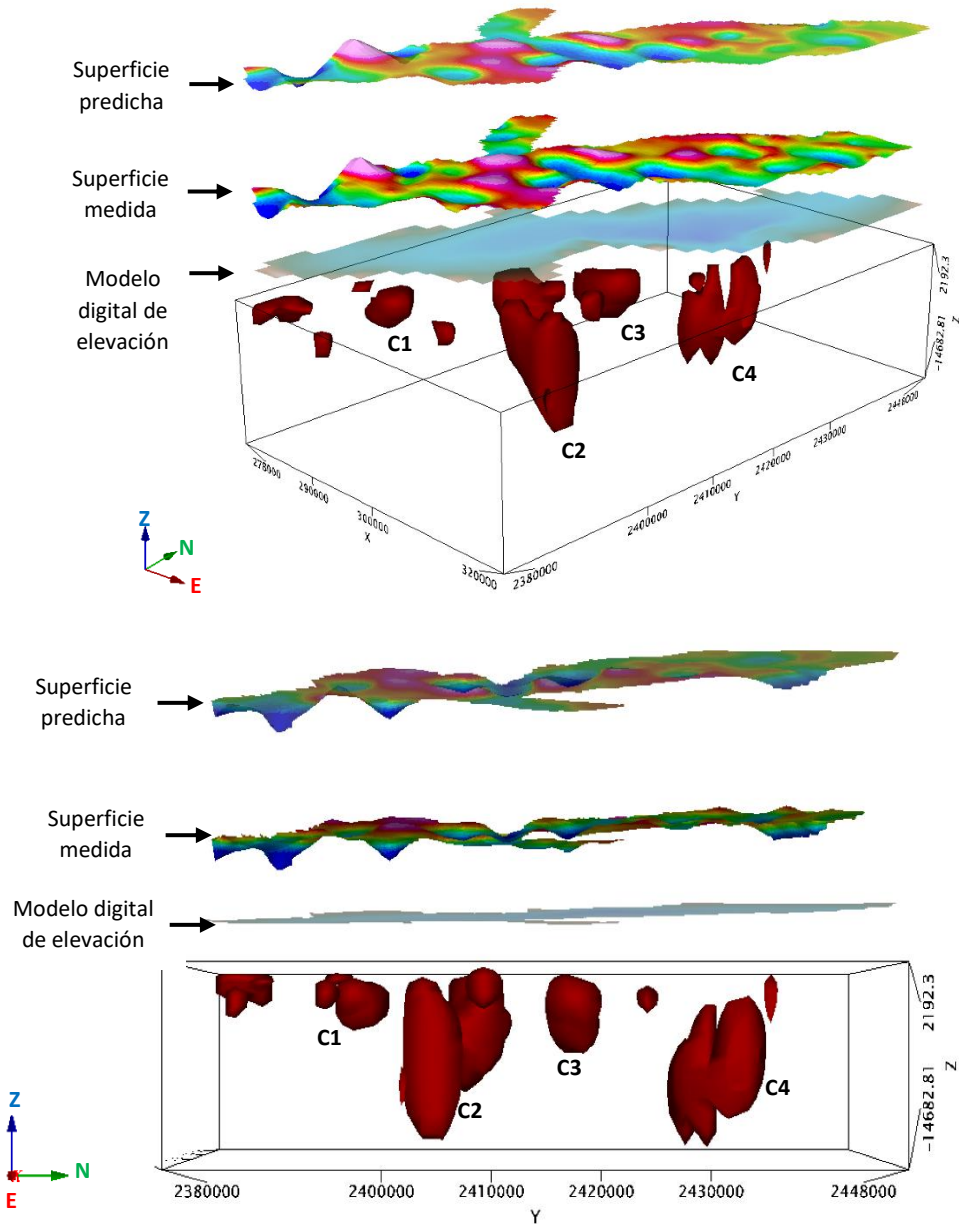


Figura 32: Modelo 3D del Graben Villa de Reyes.

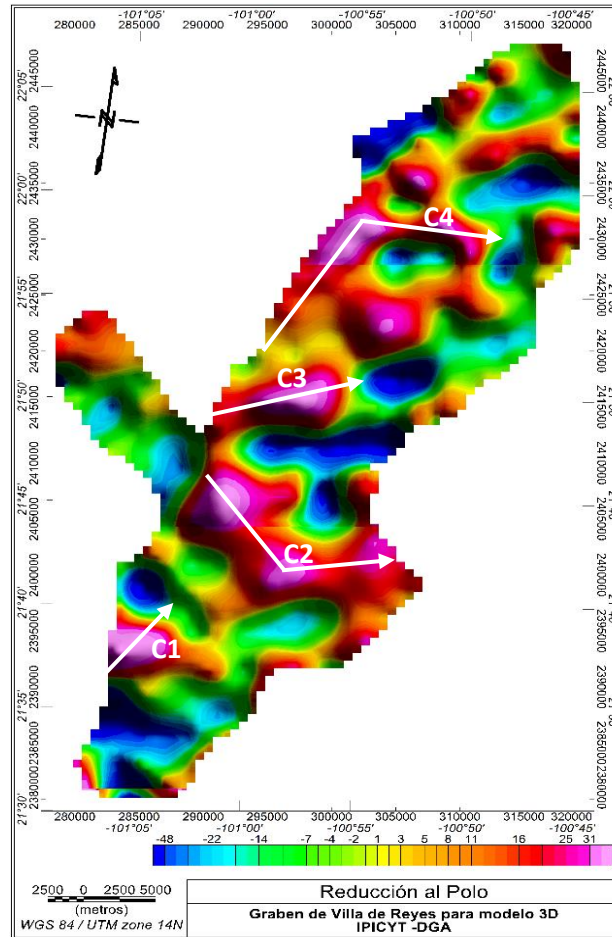


Figura 33: Mapa utilizado para realizar el modelo 3D y los perfiles trazados para describir la anomalía provocada por los distintos cuerpos mostrados en el modelo 3D.

Cuerpo 1

El cuerpo 1 (C1 en figura 32) se asocia a una anomalía que presenta una longitud de 3.7 x 2.5 km. Corresponde a una anomalía positiva con valores que van de 8 a 90 nT.

Para una descripción más detallada se trazó un perfil que atraviesa la anomalía en dirección S-N (figura 33, marcado con una flecha blanca) . La amplitud es de 1 km, la longitud de onda de 4.5 km.

De acuerdo con el modelo 3D, el cuerpo causante de esta anomalía tiene una longitud de 2,500 metros y un ancho aproximado de 6,500 metros.

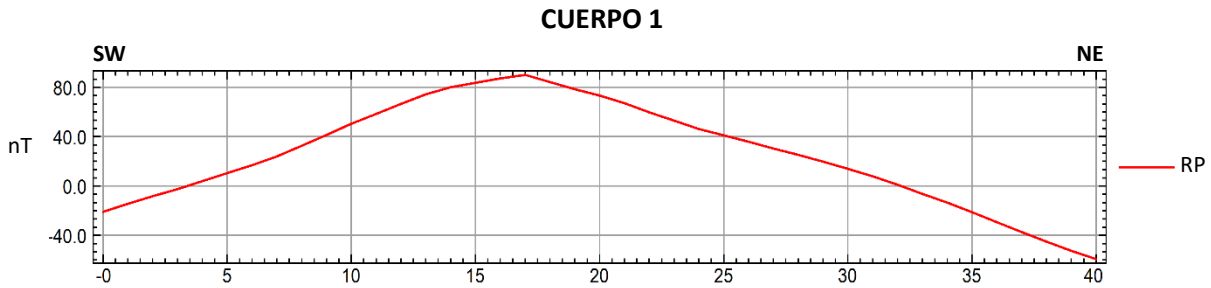


Figura 34: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 1.

Cuerpo 2

El cuerpo 2 se asocia una anomalía que presenta una longitud de aproximadamente 20 km de longitud y 8 km en su parte más ancha. Esta anomalía presenta intensidades magnéticas de entre 0 y 54 nT.

Para una descripción más detallada se trazó un perfil que atraviesa la anomalía en dirección E-O (C2 en figura 33). Esta anomalía presenta amplitudes de entre 2,100 y 2,200 metros y longitud de onda de 4.2 km.

De acuerdo con el modelo 3D, el cuerpo causante de esta anomalía tiene una longitud de 9,230 metros y un ancho aproximado de 12,100 metros.

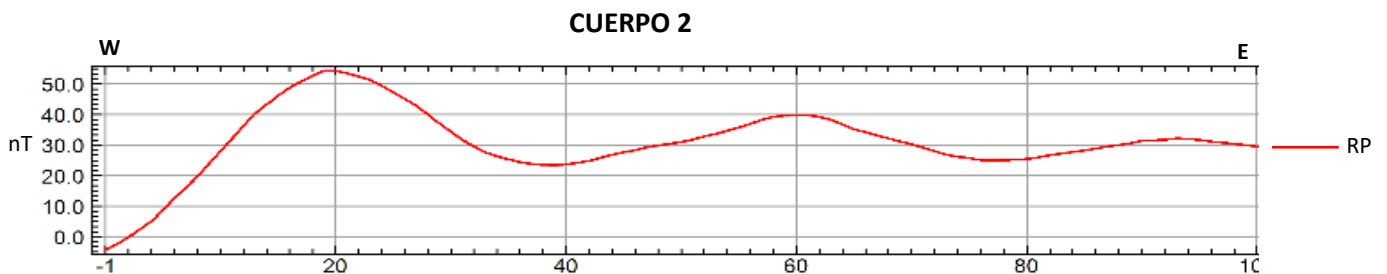


Figura 35: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 2.

Cuerpo 3

El cuerpo 3 genera una anomalía que presenta una longitud de aproximadamente 11.2 km de longitud y 6 km en su parte más ancha. Esta anomalía presenta intensidades magnéticas de entre 0 y 51 nT.

Para una descripción más detallada se trazó un perfil que atraviesa la anomalía en dirección SW-NE (C3 en figura 33). Esta anomalía presenta una amplitud de 6.2 km y longitud de onda de 10.8 km.

De acuerdo con el modelo 3D, el cuerpo causante de esta anomalía tiene una longitud de 4,430 metros y un ancho aproximado de 6,218 metros.

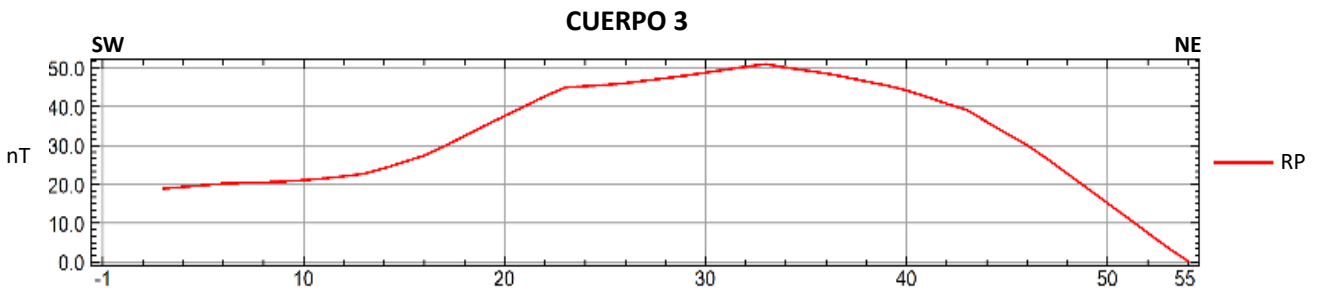


Figura 36: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 3.

Cuerpo 4

El cuerpo 4 se correlaciona con una anomalía que presenta una longitud de aproximadamente 20 km de longitud y 4 km en su parte más ancha. Esta anomalía presenta intensidades magnéticas de entre 3 y 29 nT.

Para una descripción más detallada se trazó un perfil que atraviesa la anomalía en dirección SW-NE (C4 en figura 33). Esta anomalía presenta amplitudes de entre de 2 y 2.8 km y longitudes de onda de entre 2 y 6 km.

De acuerdo con el modelo 3D, el cuerpo causante de esta anomalía tiene una longitud de 7,938 metros y un ancho aproximado de 10,800 metros.

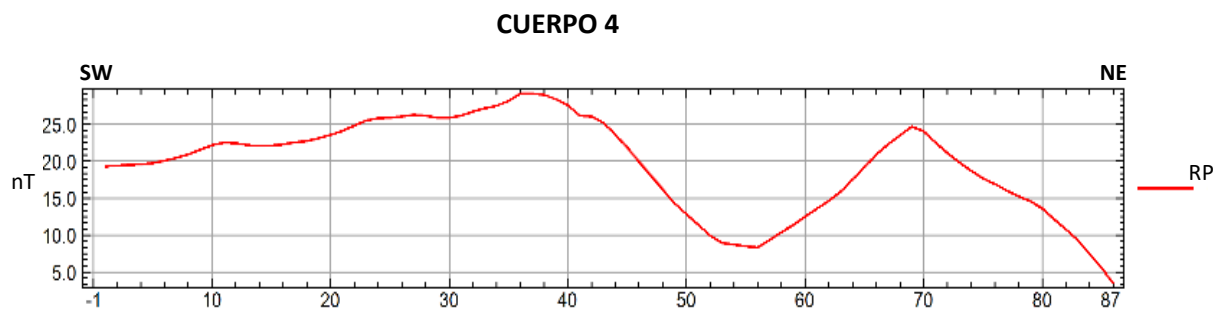


Figura 37: Perfil magnético asociado a la anomalía que genera el cuerpo 4.

5.2 Magnetometría terrestre

Como segunda parte se presentan los resultados de la magnetometría terrestre. Al igual que con la magnetometría aérea, a partir del campo magnético total se obtuvo el campo magnético residual (CMR) y posteriormente se aplicó el filtro de reducción al polo (RP). Se obtuvieron los mapas de ambas configuraciones (figura 38).

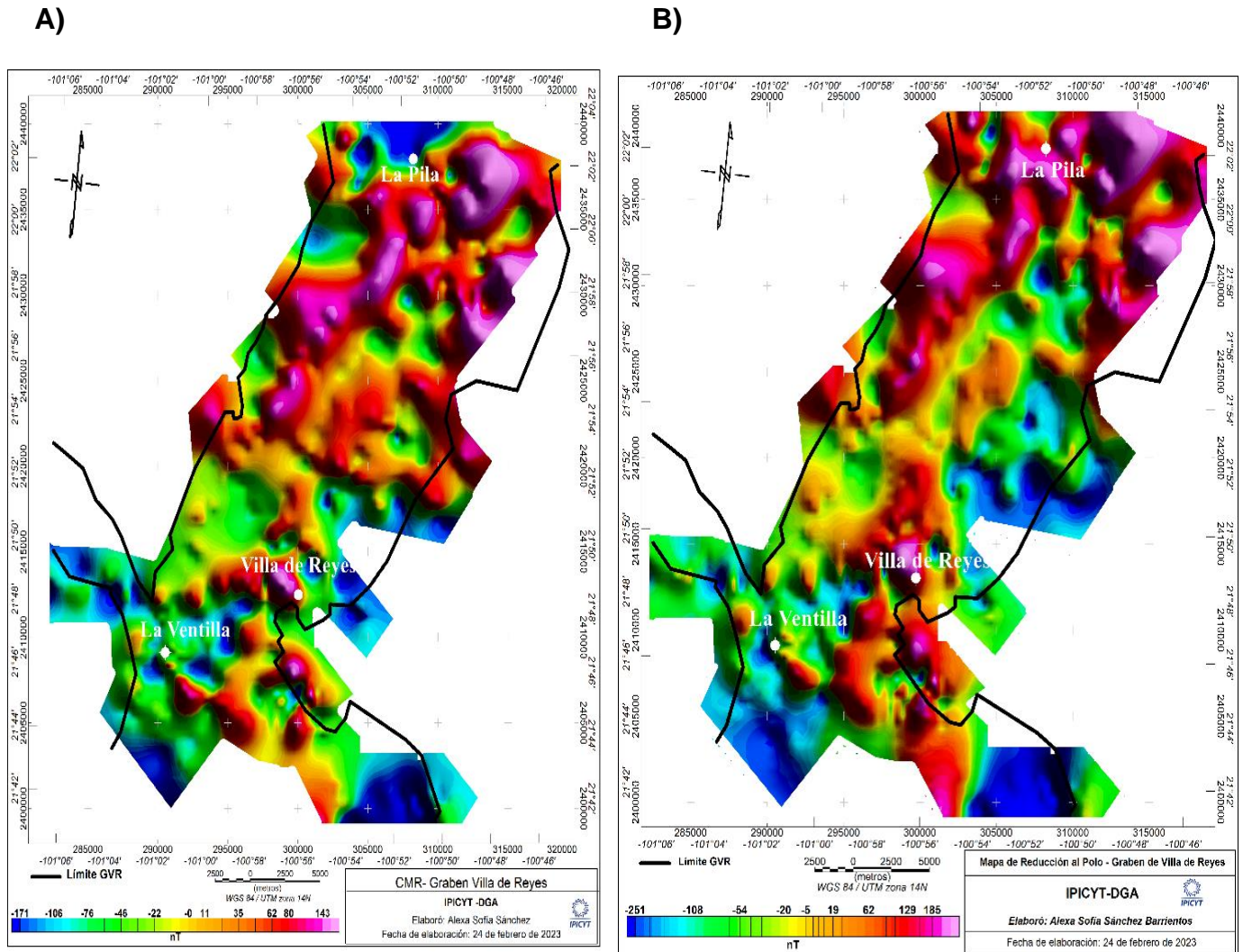


Figura 38: A) Mapa de campo magnético residual. B): Mapa de campo magnético reducido al polo.

5.2.1 Dominios magnéticos

De igual forma se delimitaron los dominios magnéticos (DM's), esto se realizó en la configuración de la reducción al polo con una continuación ascendente de 300 m (figura 39). Se localizaron tres DM's los cuales se describen a continuación:

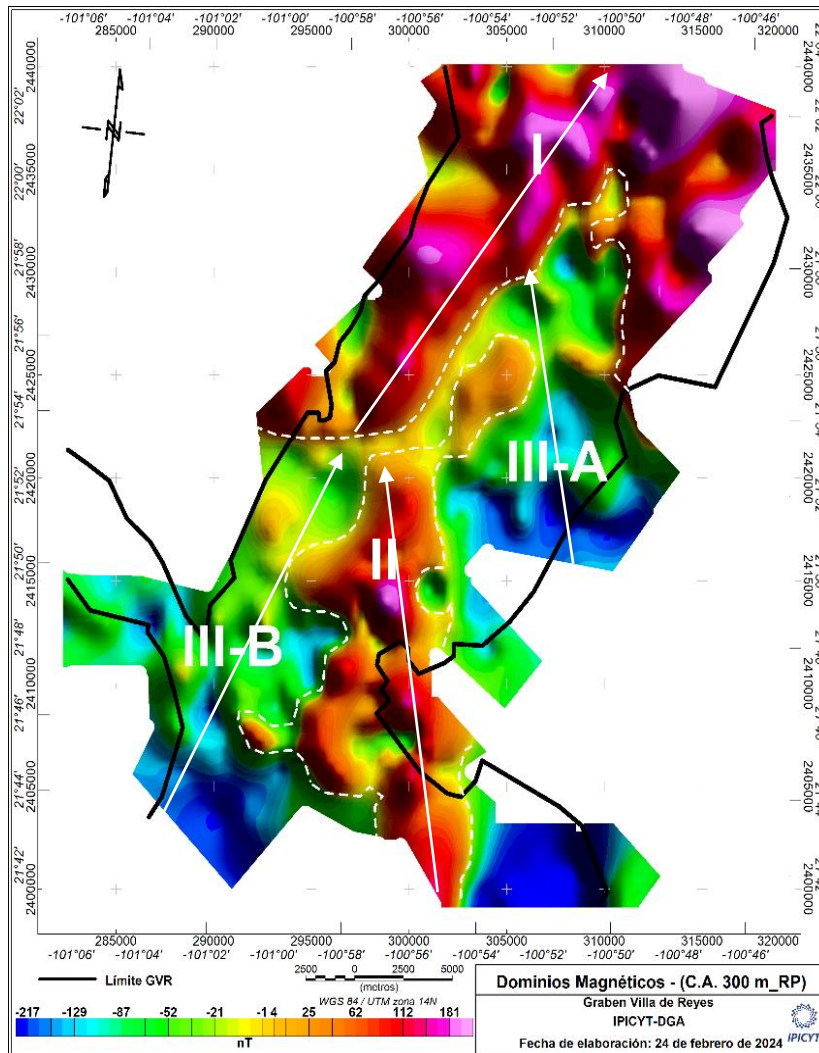


Figura 39: Se muestran los dominios magnéticos encontrados. Con flechas color blanco se muestran los perfiles trazados en cada dominio para describirlos.

DM I

El DM I se localiza en la parte norte de la zona de estudio y presenta forma de U invertida. Se encuentra indefinido hacia el norte, este y oeste. Es un dominio que se caracteriza por presentar valores magnéticos positivos.

Para su descripción se trazó un perfil que atraviesa el dominio en dirección SW-NE (figura 40). Se encontró que este dominio presenta longitudes de onda de entre 1600 a 3200 metros, amplitudes de 30 a 170 nT, distancias polares de 1,000 a 3,200 metros y valores magnéticos de 43 a 238 nT.

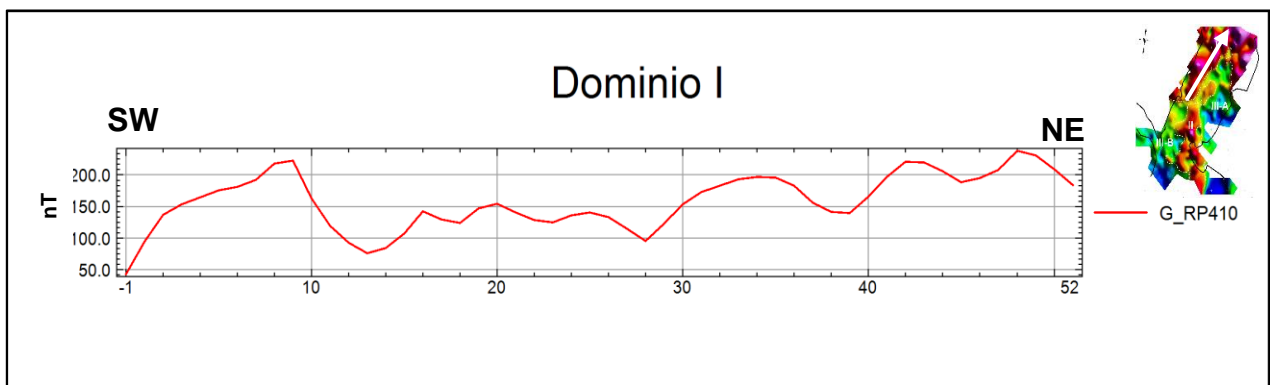


Figura 40: Perfil trazado sobre el DAM I con dirección SW-NE.

DM II

El DM II se localiza en la parte sur de la zona de estudio. Presenta una forma alargada en dirección N-S. Se muestra indefinido hacia el sur y se caracteriza por presentar anomalías magnéticas positivas.

Para su descripción se trazó un perfil en dirección SE-NW (figura 41). Se encontró que presenta longitudes de onda de entre 3,200 y 3,600 metros, distancias polares de 1,600 a 2,800 metros, amplitudes de 148 a 324 nT y valores magnéticos que van de -113 a 258 nT.

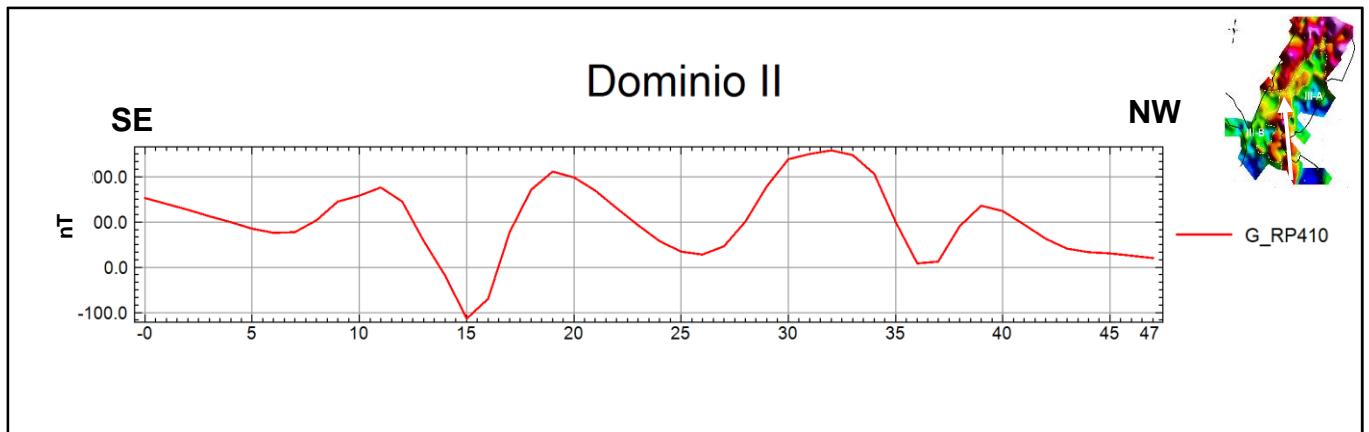


Figura 41: Perfil trazado sobre el DAM II con dirección SE-NW.

DM III

El DM III se encuentra ampliamente distribuido en la zona de estudio, lo podemos observar en la parte este de la zona central y también al SW. En la zona sur se encuentra indefinido al oeste y al sur, en la parte central se muestra indefinido hacia el este y hacia el sur. No presenta una forma definida. Se caracteriza por presentar anomalías asociadas a valores magnéticos negativos.

Para su descripción se trazaron dos perfiles que atraviesan este dominio; uno al sur en dirección SE-NW y otro al centro en dirección SW-NE (figuras 42 y 43). Se encontró que presenta longitudes de onda de entre 3,600 y 5,600 metros, distancias polares de 2,800 a 4,000 metros, amplitudes de 128 a 183 nT y valores magnéticos que van de -219 a 22 nT.

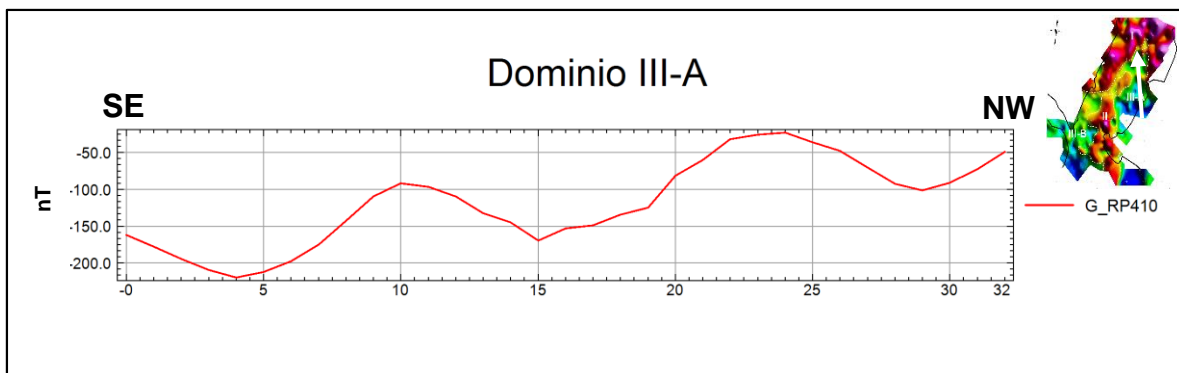


Figura 42: Perfil trazado sobre el DAM III-A con dirección SE-NW.

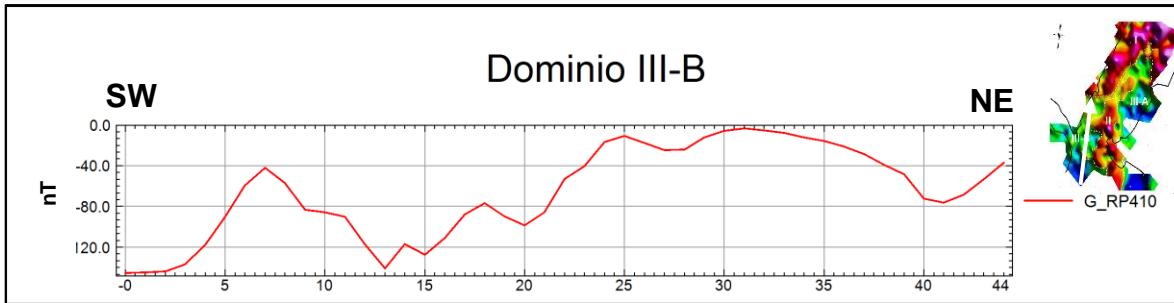


Figura 43: Perfil trazado sobre el DAM III-B con dirección SW-NE.

Tabla 6: Características principales de los dominios magnéticos.

DM	Longitud de onda (m)	Distancia polar (m)	Amplitud (nT)	Valores magnéticos (nT)
I	1600 - 3200	1000 a 3200	30 a 170	43 a 238
II	3200 - 3600	1600 a 2800	148 a 324	-113 a 258
III	3600- 5600	2800 a 4000	128 a 183	-219 a 22

5.2.2 Señal analítica

Con el objetivo de identificar los lineamientos magnéticos se aplicó el filtro de señal analítica (figura 44), este algoritmo matemático nos ayuda a definir los límites de los cuerpos, por eso resulta un filtro adecuado para esta finalidad.

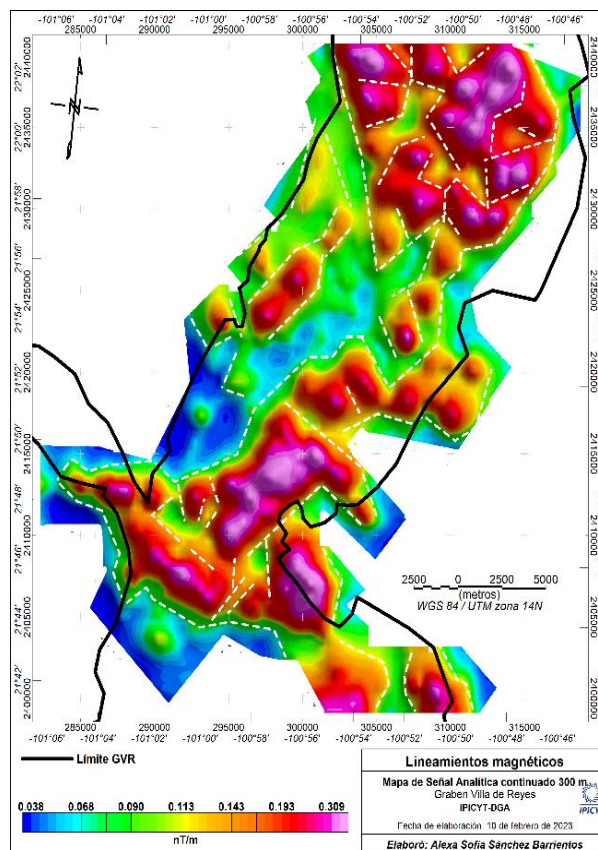


Figura 44: Mapa de señal analítica y lineamientos magnéticos.

Una vez que se delimitaron los lineamientos en el filtro de señal analítica, se midió el ángulo de cada uno para realizar un diagrama de esfuerzos que nos muestre las direcciones preferenciales. En este caso se observan dos direcciones preferenciales, la primera en dirección NW y la segunda NE (figura 45).

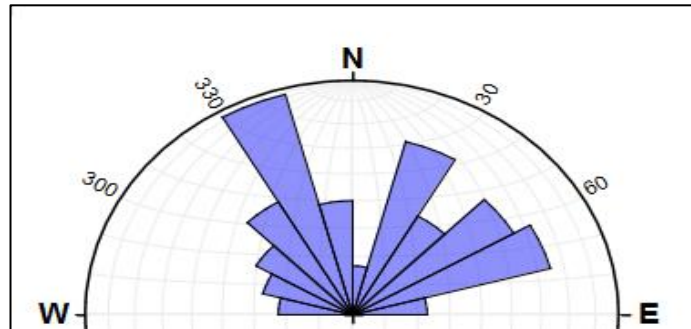


Figura 45: Diagrama de rosa de esfuerzos que nos muestra las direcciones preferenciales de los lineamientos. En este caso se observa una tendencia en dirección NW.

5.3 Método geoelectrico

5.3.1 Sondeos eléctricos verticales

Como segunda parte del trabajo de investigación, se procesaron 56 sondeos eléctricos verticales (SEVs) obteniendo así la curva de resistividad real (figura 46). De igual forma se definieron las capas de cada de cada SEV, así como el espesor, la profundidad y los valores de resistividad.

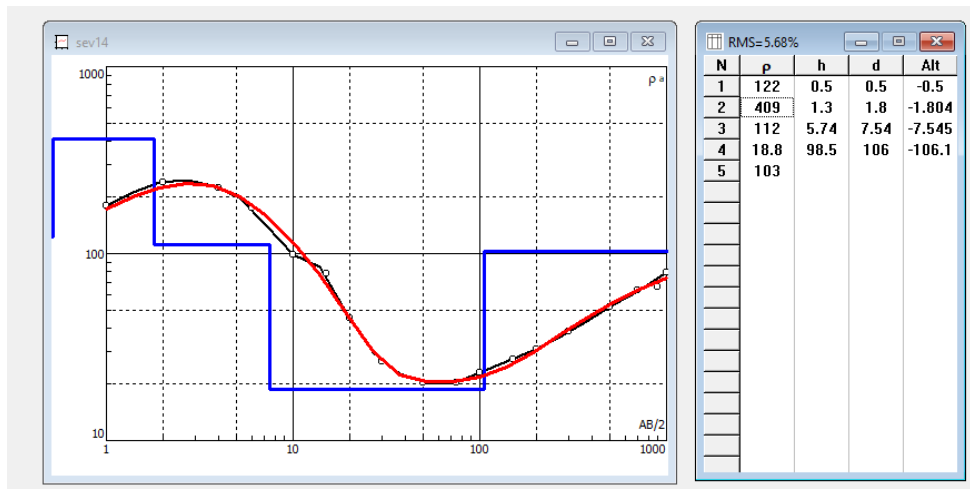


Figura 46: Ejemplo de SEV procesado en IPI2WIN y tabla que muestra las características de cada capa.

5.3.2 Tipos de curvas

Con el objetivo de realizar una descripción cualitativa, se definieron las curvas para cada SEV y posteriormente se elaboró un histograma para conocer cómo es la distribución de frecuencias de éstas (figura 47).

Se encontraron 18 diferentes combinaciones, sin embargo, existen algunas que son repetitivas, por lo que se decidió agruparlas, por ejemplo: si se encontró un sondeo con una combinación de curvas HKH y otro con una combinación HKHK, se definieron como iguales.

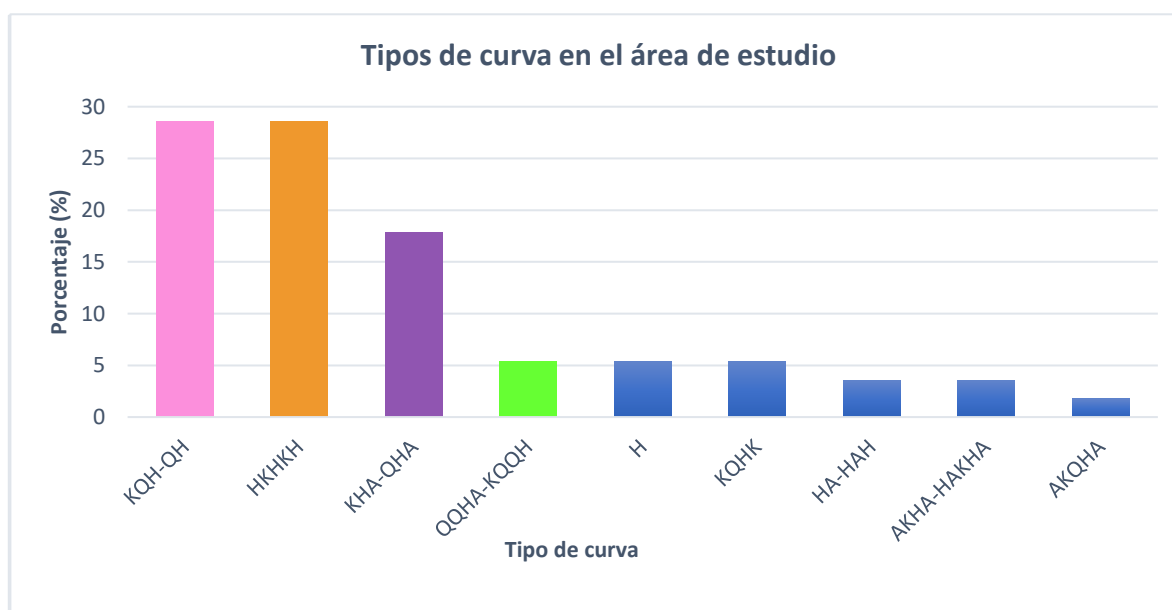


Figura 47: Histograma de tipos de curvas.

Posteriormente a partir de la clasificación anterior de las curvas, se definieron los dominios eléctricos, es decir, aquellas zonas en donde las curvas tienen un comportamiento igual o muy similar, diciéndonos que probablemente se trata de lugares con una litología parecida.

Se agruparon aquellas curvas similares (figura 48), el 32% corresponde a las curvas tipo KQH y QH (en color rosa) y al tipo HKHKH (color naranja), el 10% corresponde a las curvas tipo KHA y QHA (color morado) y el 3.5% representa las curvas tipo QQHA-KQQH (color verde). Aunque existen más tipos de curvas, solo

se definieron dominios eléctricos en donde existen dos curvas iguales o similares y son cercanas entre sí.

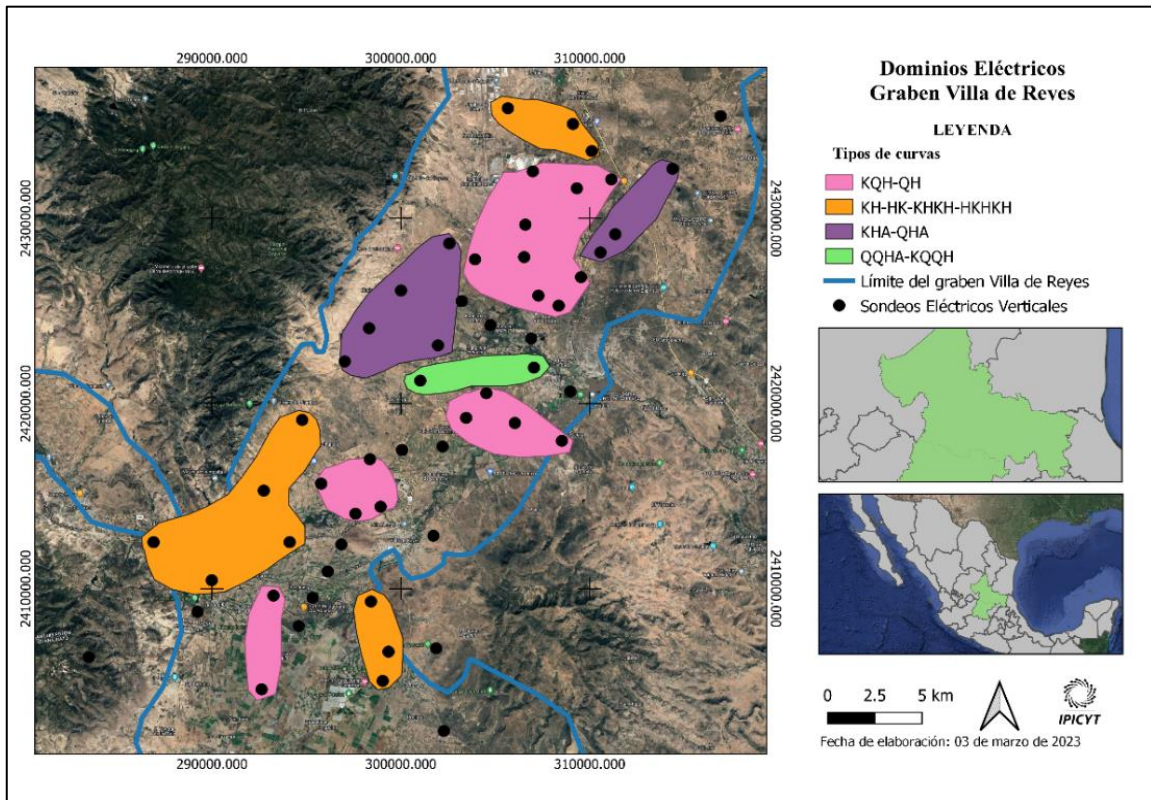


Figura 48: Se muestran los principales dominios geoelectricos.

5.4 Análisis estadístico multivariado

5.4.1 Pretratamiento de datos

Como primera parte del análisis estadístico, a los datos del estudio geoelectrico se les aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, esta nos sirvió para conocer la distribución de los datos, pues a partir de esta información se decide que método estadístico utilizar. Los resultados de las pruebas de Shapiro Wilk son mostrados en la tabla 7.

En este caso, a excepción de la variable “profundidad máxima” todos los datos nos mostraron un resultado $p < 0.05$, esto nos indica que los datos tienen una distribución no normal.

Tabla 7: Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk, cuando $p < 0.05$ significa que los datos presentan una distribución no normal.

VARIABLE	PRUEBA DE SHAPIRO-WILK	
	<i>W</i>	<i>P-VALOR</i>
Resistividad aparente a abertura $ab/2= 1$	0.91245	0.0006171
Resistividad aparente a abertura $ab/2= 10$	0.65262	3.014e-10
Resistividad aparente a abertura $ab/2= 100$	0.45436	4.061e-13
Resistividad aparente a abertura $ab/2= 500$	0.57786	1.946e-11
Resistividad aparente a abertura $ab/2= 1000$	0.30798	8.648e-15
Profundidad Máxima	0.97955	0.4565
Tipo de curvas	0.91516	0.00078

5.4.2 Análisis de correlación

Como segunda parte se aplicó un análisis de correlación, este nos sirve para medir la relación entre dos variables. Como anteriormente se demostró que los datos a analizar son no normales, la prueba aplicada fue la correlación de Spearman.

Se muestran los resultados obtenidos en la figura 49, las variables que tienen el coeficiente de correlación más alto (0.73) es la resistividad aparente obtenida en la abertura $ab/2=500$ con la abertura $ab/2= 1,000$. Lo anterior nos dice que las litologías encontradas a mayores profundidades son más similares que aquellas que se encuentran a menor profundidad. Este análisis también puede indicarnos que entre las aberturas de 500 m y de 1,000 m, la resistividad varía muy poco,

tratándose probablemente de roca volcánica, pues es el tipo de roca que encontramos a mayor profundidad en la zona de estudio.

En segundo lugar, se encuentran las variables de resistividad aparente con una abertura $ab/2=500$ y $ab/2=100$, con un coeficiente de correlación de 0.51. En este caso la abertura $ab/2=100$ representa los primeros metros del subsuelo, al estar correlacionada con la abertura $ab/2=500$ m quiere decir que las resistividades son similares. Aunque se esperaría una resistividad menor en $ab/2=100$ que en $ab/2=500$, en este caso coincide con lo reportado por Ramos et. al. (2007), correspondiendo con una capa superficial de caliche de hasta 100 metros de espesor. Si bien no es el mismo material que lo que podemos encontrar a mayor profundidad, ambas variables presentan altas resistividades, de ahí la correlación que encontramos en la matriz.

Aquellos coeficientes más cercanos a 0 indican que no existe una correlación significativa entre las dos variables.

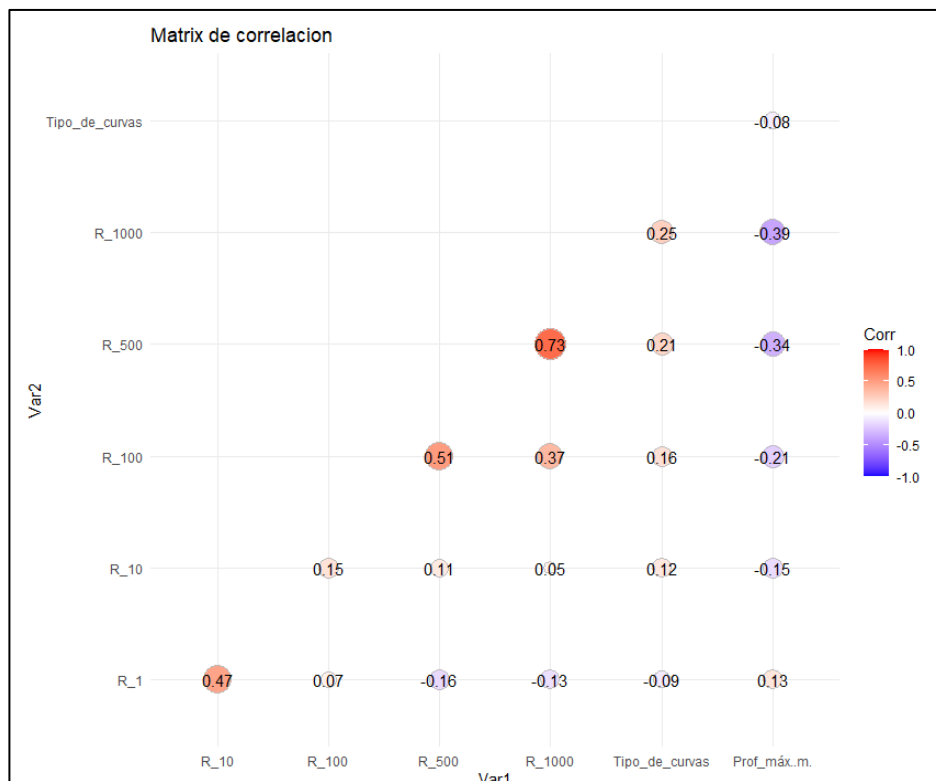


Figura 49: Matriz de correlación.

5.4.3 Análisis de componentes principales

Aunque el análisis de correlación nos brinda información importante, para un análisis más profundo se decidió emplear el PCA (análisis de componentes principales, por sus siglas en inglés).

Se encontró que dos componentes explican el 93.6% de la varianza total, (PC1 y PC2). Los resultados del PCA se muestran en la tabla 8.

Tabla 8: Resultados del análisis de componentes principales

Variables	PC1	PC2	PC3
AB/2=1	-0,0312	0,0986	0,5922
AB/2=10	-0,0073	-0,0053	0,7989
AB/2=100	0,0052	-0,0827	-0,0007
AB/2=500	0,0128	-0,0853	-0,0803
AB/2=1000	0,9974	0,0653	0,0215
Profundidad Max	-0,0614	0,9858	-0,0634
	PC1	PC2	PC3
Desviación estándar	448,5449	128,4873	87,4633
Proporción de la varianza	0,8658	0,071	0,0329
Varianza acumulada	0,8658	0,9368	0,9697

PC 1

El primer componente explica el 86.5% de la varianza total. La variable con mayor peso corresponde a la abertura $ab/2=1000$, esto puede indicar que no todos los sondeos profundizaron lo suficiente para alcanzar la roca volcánica, teniendo así una variación importante en la resistividad encontrada a la mayor profundidad.

PC2

El segundo componente explica el 7.1 % de la varianza total. En este caso la variable con mayor peso corresponde a la profundidad máxima que alcanzó cada SEV, esta información nos indica que, aunque para cada SEV las aberturas máximas fueron iguales, no todos profundizaron de igual manera, atribuyéndose a diferencias entre espesores de los estratos.

5.4.4 Análisis de clúster

Finalmente, con el objetivo de agrupar los SEV's de acuerdo con sus características, se realizó un análisis de clúster. Este método se hizo en el lenguaje de programación RStudio y el algoritmo utilizado fue el de *k-means*.

Este es un algoritmo de agrupamiento que nos permite dividir un conjunto de datos en *k* clústeres distintos. En este caso se obtuvieron tres clústeres y los SEV'S que presentan mayor similitud entre sí se agruparon en el mismo clúster.

En la tabla 9 se muestran los tres clústeres con sus respectivas características y las diferentes variables consideradas y el valor mínimo y máximo de resistividad aparente para cada abertura, el promedio y la desviación estándar.

Cada clúster se representa con un color en la tabla 8, mismos que coinciden en el mapa.

Tabla 9: Resultados estadísticos del análisis de clúster

Parámetro	Clúster 1 (n=21)				Clúster 2 (n= 30)				Clúster 3 (n=5)			
	Mín.	Máx.	Prom.	S.D.	Mín.	Máx.	Prom.	S.D.	Mín.	Máx.	Prom.	S.D.
AB/2=1	105.9	296.3	178.5	51.5	9.86	101.4	52.7	26.7	40.2	83.7	67.7	17.3
AB/2=10	19	420.7	121.5	107.7	14.2	119.4	45.8	27.4	25.2	140.9	65.1	46.5
AB/2=100	12	58.1	25.4	11.8	10.69	71.3	22.9	12.4	24.2	27.78	98.0	92.5
AB/2=500	16.2	68.32	32.2	14.8	10.04	83.9	36.1	19.4	59.8	280.85	193.4	86.4
AB/2=1000	25	400.45	78.5	101.4	18.2	379.4	232.4	599.7	30.9	415.23	168.2	147.9
Prof. Máx.	109	520	343.0	117.1	17.7	555.0	275.9	128.8	56.5	438	222.7	148.8

De igual forma se realizó el mapa para poder observar cómo se agrupan estos SEVS espacialmente (figura 50).

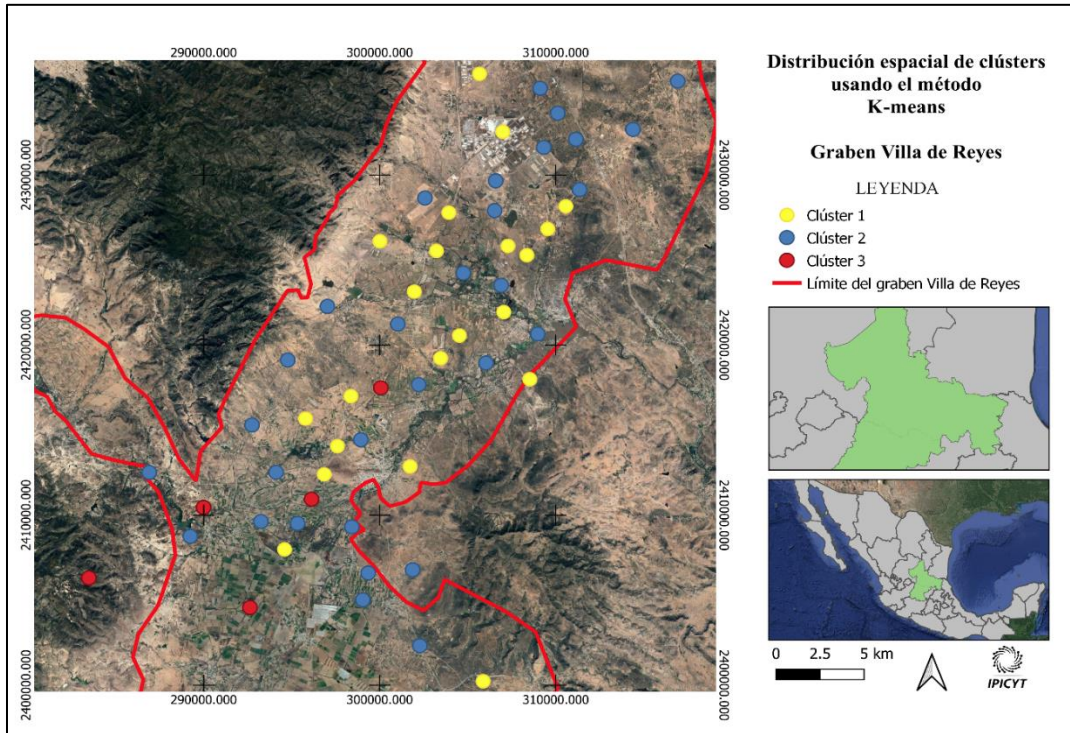


Figura 50: Se muestran con diferentes círculos de colores la distribución de los SEVS agrupados en tres clúster.

Clúster 1

Está conformado por 21 SEVs (38.2% del total de las muestras), representado con círculos amarillos en la figura 44. Se distribuye principalmente hacia la parte interna del graben, con una dirección aproximada NE-SW.

A partir de la información arrojada por el análisis, se puede inferir que la litología sobre la que se encuentran estos SEVs es similar al igual que los espesores y profundidades que se alcanzaron. Por ejemplo, estos sondeos se caracterizan por presentar la resistividades más altas en las las zonas más someras, atribuyéndolo a la capa de caliche reportada por (Ramos et. al, 2007).

Otro aspecto destacable es que en los SEV's que pertenecen a este clúster predomina la combinación de curvas tipo QHA.

Clúster 2

Es el grupo que mayor cantidad de SEV's posee, representando el 54.6% del total de las muestras (30 SEV's) se muestra en la figura 44 mediante círculos azules. Se caracteriza por una distribución uniforme dentro de la zona de estudio.

A partir del análisis estadístico se puede inferir que este clúster contiene los SEV's que presentan las resistividades más bajas, probablemente se deba a la presencia de estructuras geológicas más conductoras y/o con presencia de humedad, por lo que resulta el grupo de interés para la exploración de agua subterránea.

De igual forma, estos SEV's son los que alcanzaron las profundidades menores, relacionado también a las bajas resistividades, pues cuando una estructura geológica es poco resistiva la corriente eléctrica tiende a disiparse más fácil sin necesidad de profundizar.

Predomina la combinación de curvas tipo KHKH.

Clúster 3

Finalmente, el clúster 3 se conforma por 4 SEV's, representando el 7.2 % del total, se muestra en la figura 44 mediante círculos rojos. Se distribuye de manera aleatoria en la zona centro-sur del área de estudio.

De manera general, este clúster presenta resistividades intermedias (en comparación con los clúster 1 y 2), atribuidas a relleno sedimentario sin presencia de humedad.

Los SEV's de este clúster presentan una combinación de una o dos curvas (H yQH), interpretándose como sondeos que no profundizaron demasiado o que no hubo gran variación litológica.

5.5 Integración de la información geofísica

Si bien cada metodología nos brinda información y resultados relevantes, la integración, correlación y comparación entre estos métodos nos ofrece resultados más completos y certeros.

En este caso, se trabajó primero con la magnetometría aérea, la cual nos sirvió para localizar zonas de interés, en donde pudieran existir lineamientos (fallas, fracturas contactos geológicos). Posteriormente, la magnetometría terrestre nos ayudó a corroborar o en su caso, descartar estas zonas de interés, pues es un método que cuenta con mayor resolución.

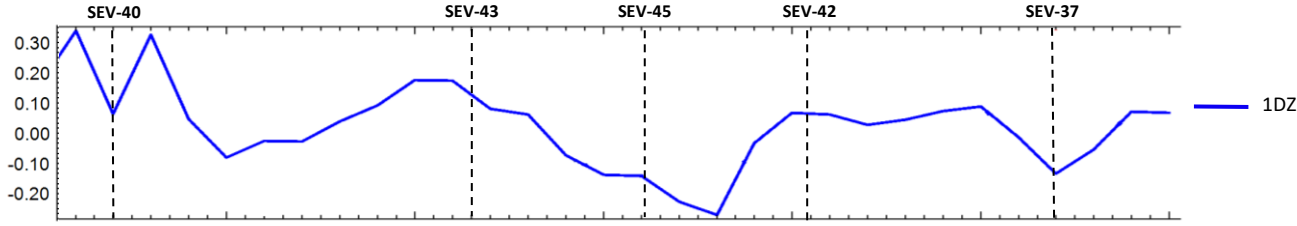
Una vez identificados los lineamientos magnéticos, se procedió a procesar los sondeos eléctricos verticales, aunque se procesaron los 56 SEVS, debido a su localización no todos presentan la misma relevancia, pues para cumplir con los objetivos de este trabajo se necesitaba que estos sondeos se ubicaran en zonas que se identificaron como posibles fallas y/o fracturas, además el graben es una estructura geológica con orientación N-S, por lo que era necesario trazar las secciones en dirección perpendicular. Debido a lo anterior, se trazaron las secciones utilizando los SEVs que cumplieran con las características mencionadas.

De igual manera se trazaron los mismos perfiles magnéticos en la configuración de señal analítica y de primera derivada vertical, el analizar el comportamiento de estos perfiles nos ayuda a definir zonas de fallas y fracturas, cuerpos con alto o bajo contenido de ferromagnesianos y zonas con poca alteración, por lo que resulta de gran apoyo al método eléctrico y al mismo tiempo las secciones geológicas tendrán menos incertidumbre.

1)

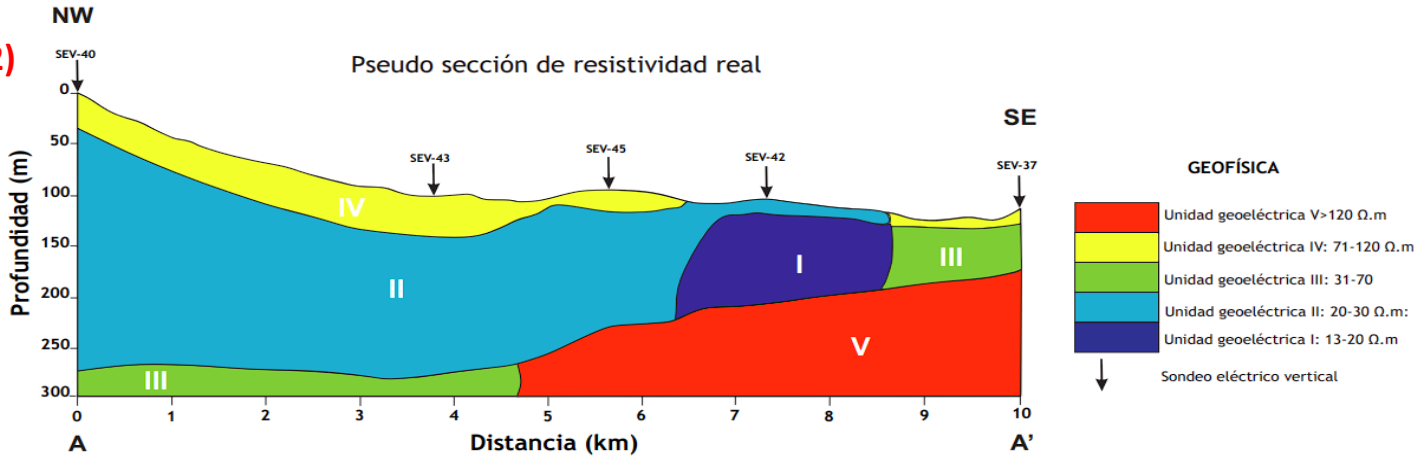
SECCIÓN A-A'

Perfil magnético

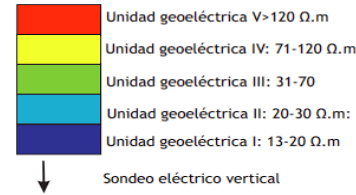


2)

Pseudo sección de resistividad real

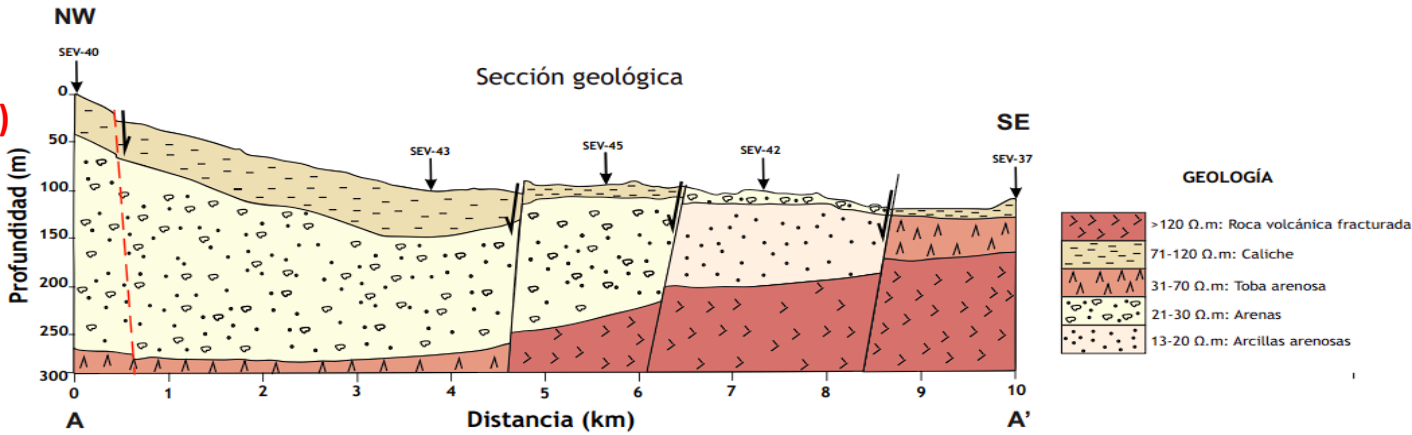


GEOFÍSICA



3)

Sección geológica



GEOLOGÍA

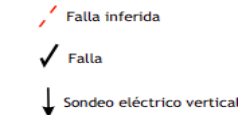
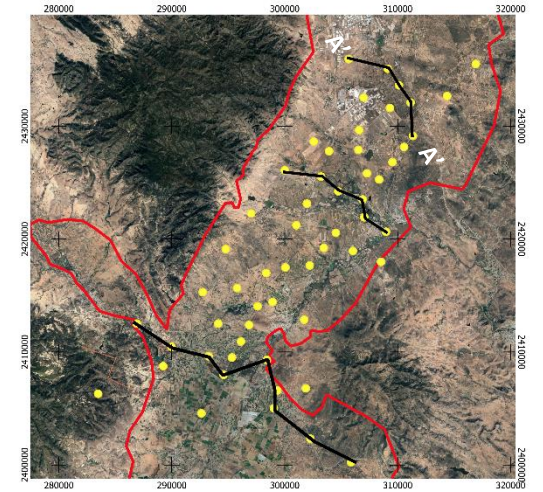
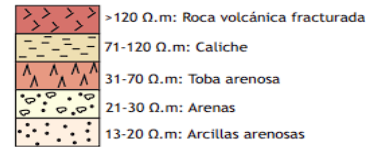
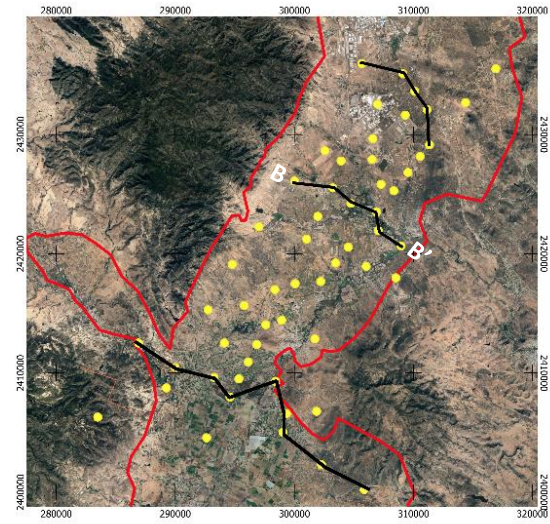
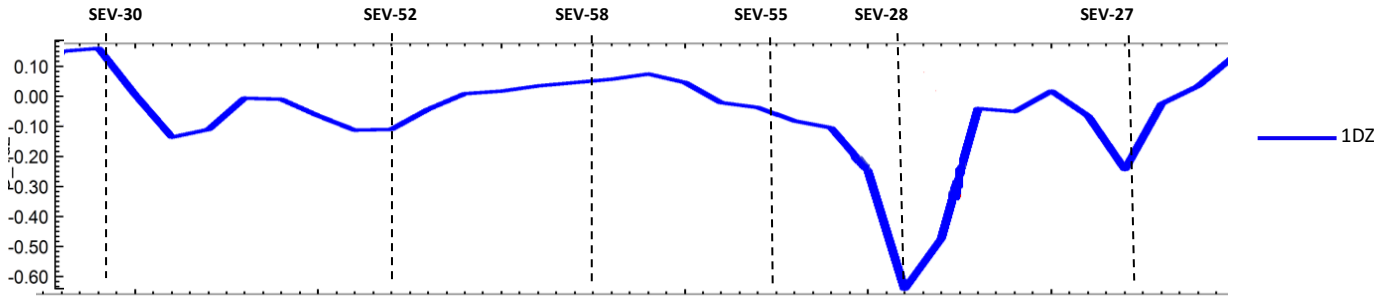


Figura 51: Sección A-A': 1) Perfil magnético. 2) Sección de resistividad real. 3) Sección geológica

SECCIÓN B-B'

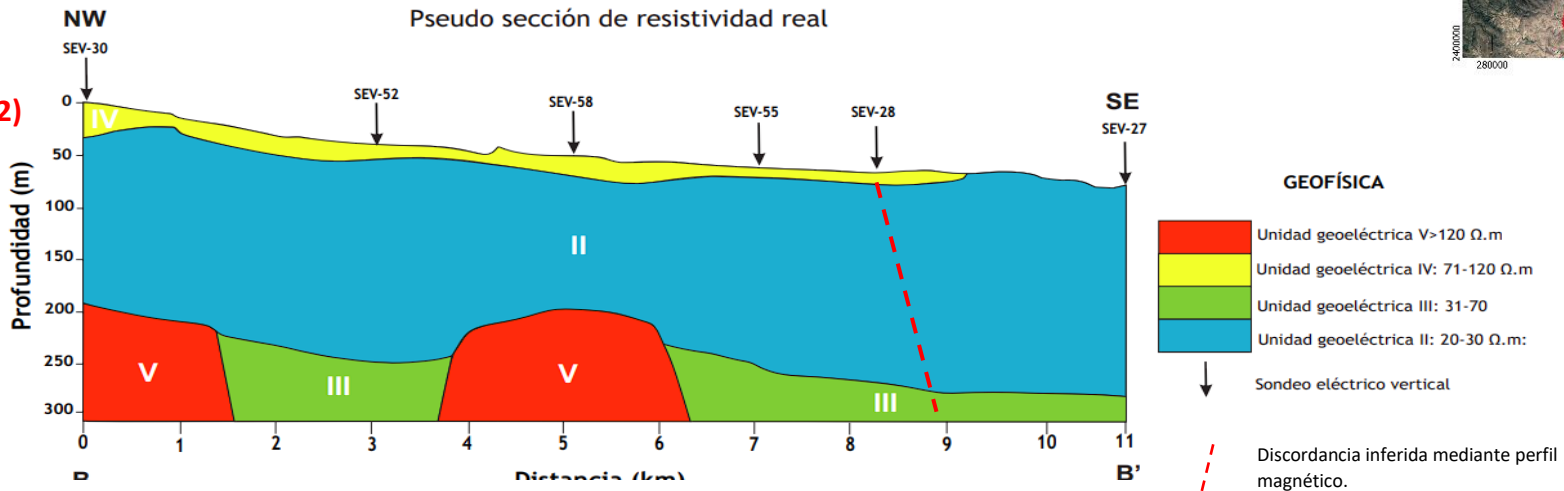
1)

Perfil magnético



2)

Pseudo sección de resistividad real



3)

Sección geológica

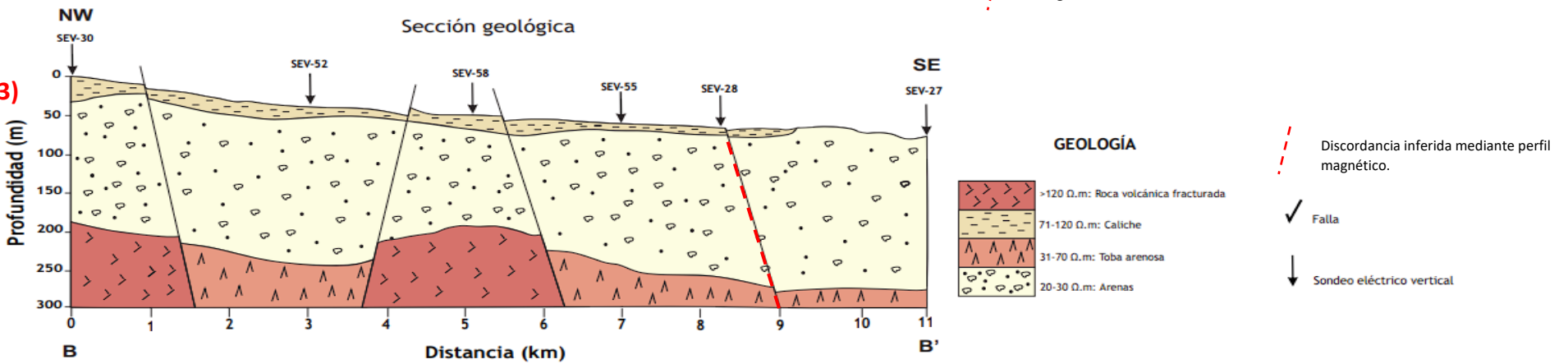
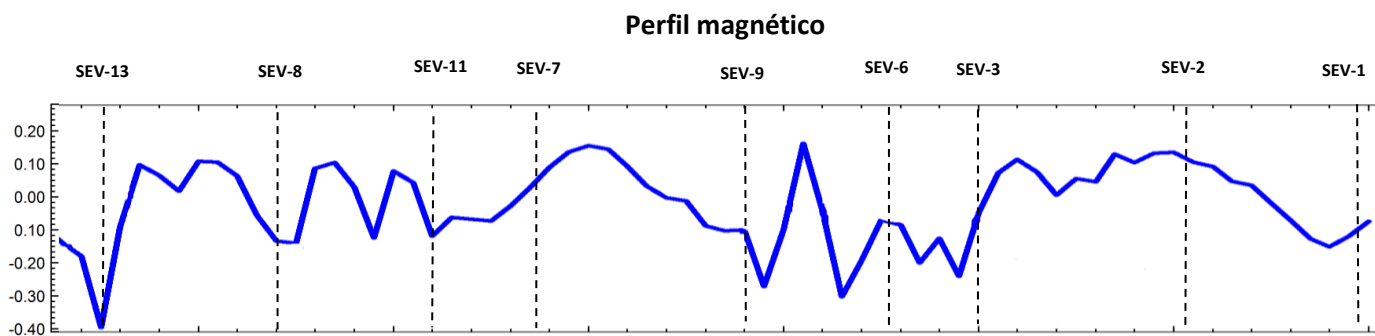


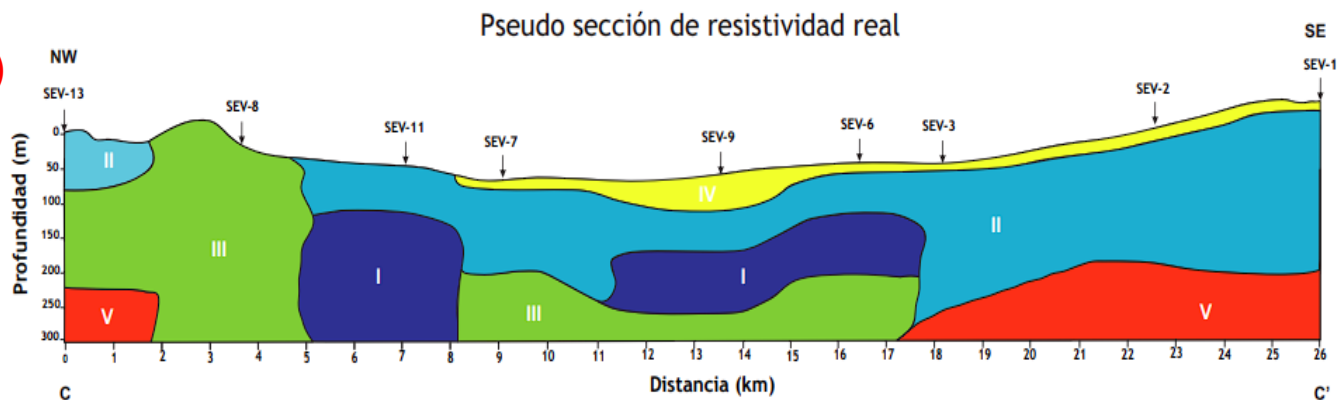
Figura 52: Sección B-B': 1) Perfil magnético. 2) Sección de resistividad real. 3) Sección geológica.

SECCIÓN C-C'

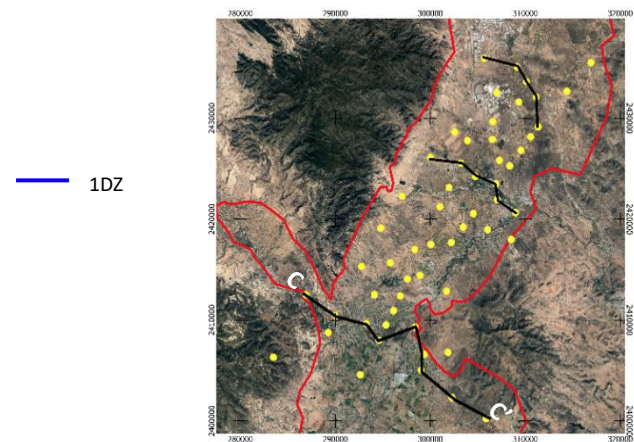
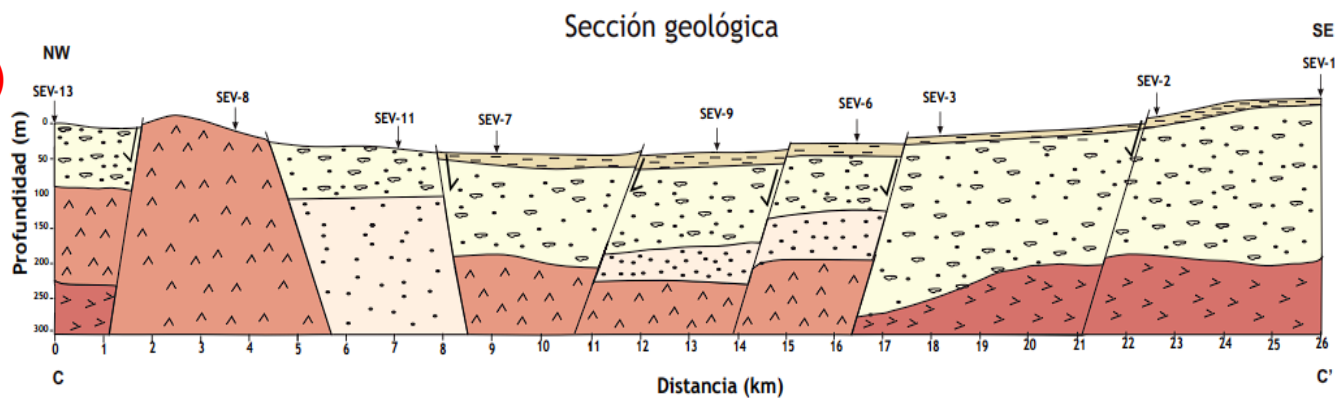
1)



2)

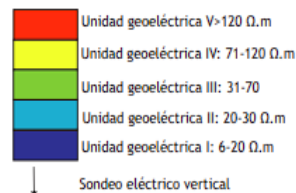


3)



— 1DZ

GEOFÍSICA



GEOLOGÍA

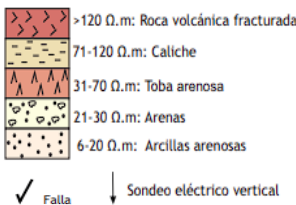


Figura 53: Sección C-C': 1) Perfil magnético. 2) Sección de resistividad real. 3) Sección geológica

Descripción sección A-A'

Esta sección se localiza al N de la zona de estudio. Se compone de 5 sondeos eléctricos verticales (SEV 40, 43, 45, 42, y 37), separados entre sí por 2 a 3 km. Su longitud aproximada es de 10 km y su dirección es Noroeste a Sureste, localizado entre las coordenadas NW(305669, 2435947) y SE (311354, 2429144). La abertura máxima para cada sondeo fue de $AB/2=1,000$ metros y la profundidad aproximada de 300 metros. Los SEV se asocian principalmente con curvas tipo QH, KQH y QHA. En la sección se aprecian contrastes horizontales y verticales.

Con la interpretación cuantativa se infirieron cinco unidades geoelectricas, esto se hizo en función de la resistividad eléctrica y de la litología existente en la zona de estudio.

La primera unidad geoelectrica (I) se localiza al SE de la sección, a la altura del SEV-42, a una profundidad aproximada de 125 m y hasta los 200 m. Esta representada por el color azul oscuro y el rango de resistividades que se manejan para esta unidad va de 13-20 Ω m. Litológicamente se representó como parte del relleno sedimentario (material arcillo-arenoso).

La segunda unidad geoelectrica (II) se presenta desde el km 0 y hasta el km 8.5. Se encuentra a una profundidad aproximada de 40 metros y hacia el km 7 se puede visualizar en la superficie. Está representada por el color azul cielo y el rango de resistividades para esta unidad es de 21-30 Ω m. Litológicamente se asocia a relleno de tipo arenoso, probablemente con presencia de humedad.

La tercera unidad geoelectrica (III) la podemos encontrar en pequeñas proporciones desde el km 0 y hasta el km 4.5, posteriormente reaparece entre el km 9 y el km 10. La primera parte se presenta a una profundidad de casi 300 metros y se desconoce su espesor, la segunda parte se encuentra a una profundidad de alrededor 140 m y presenta un espesor aproximado de 40 m. Está representada por el color verde y el rango de resistividades para esta unidad es de 31 A 70 Ω m. Litológicamente se asoció a toba arenosa.

La cuarta unidad geoelectrica (IV) se presenta en su mayor parte en la zona más superficial y hasta una profundidad máxima de 45 m. Está representada por el color amarillo y se le asignaron resistividades en un rango de 71-120 Ω m. Litológicamente se le asoció con una capa de caliche, coincidiendo por lo reportado por Ramos et. al. (2007) con apoyo de perforaciones cercanas.

Finalmente, la unidad geoelectrica cinco (V) se presenta aproximadamente desde los 200 m y se desconoce su espesor. Se localiza desde el km 5 y hasta el km 10. Se representa con el color rojo. La resistividad asignada a esta unidad es arriba de 120 Ω m. Litológicamente se asocia con roca volcánica y/o roca volcánica fracturada, ya que presenta las resistividades más altas.

Respecto al perfil magnético se observa un bajo en el km 0, coincidiendo con el SEV-40, indicando alguna discontinuidad/fractura, sin embargo, se necesita más información hacia el NW para poder realizar una interpretación. Posteriormente se muestra más o menos estable, con pocas variaciones abruptas, se observan de nuevo dos bajos, el primero en el km 6.5 aproximadamente, coincidiendo con una discontinuidad en los datos eléctricos, se interpretó como una falla en el perfil geológico. El segundo bajo magnético coincide con el SEV-37, justo al final de la sección, por lo que resulta difícil hacer una interpretación, se necesitarían más datos.

Descripción sección B-B'

Esta sección se localiza en la parte central de la zona de estudio. Se compone de 6 sondeos eléctricos verticales (SEV 30, 52, 56, 55, 28 y 27), separados entre sí por 2.5 a 3 km. Su longitud aproximada es de 11 km y su dirección es Noroeste a Sureste, localizado entre las coordenadas NW(30010, 2426107) y SE (308974, 2420651). La abertura máxima para cada sondeo fue de $AB/2=1000$ metros y la profundidad aproximada que alcanzaron fue de 300 metros. Los SEV se asocian principalmente con curvas tipo QQHA, KQH Y KH. En la sección se aprecian contrastes horizontales y verticales.

Con la interpretación cuantitativa se infirieron cuatro unidades geoelectricas, esto se hizo en función de la resistividad eléctrica y de la litología existente en la zona de estudio.

La primera unidad geoelectrica (II) es la que predomina, se puede encontrar desde el km 0 y hasta el km 11, a una profundidad de 40 m y hasta los 200 m aproximadamente. Esta representada por el color azul cielo y el rango de resistividades que se manejan para esta unidad va de 21 a 30 Ω m. Litológicamente se le asocia con el relleno sedimentario del graben, compuesto por arenas.

La segunda unidad geoelectrica (III) se puede encuentra en dos porciones, la primera desde el km 1.5 y hasta el km 3.5, la segunda entre el km 6.5 y el km 11 aproximadamente. Ambas se ubican a una profundidad de 220 metros y no se conoce su espesor. Se encuentra representada por el color verde y se le asignó un rango de resistividades de entre 31 y 70 Ω m. Litológicamente se le asocia con toba arenosa.

La tercera unidad geoelectrica (IV) se localiza en la superficie de casi toda la sección, desde el km 0 y hasta el km 9.5 aproximadamente. Se trata de una capa de poco espesor (>50 m) con un rango de resistividades que va de 71 – 120 Ω m, está representada por el color amarillo y litológicamente se asocia con una capa de caliche.

Finalmente, la cuarta unidad (V) se encuentra a una profundidad aproximada de 200 m y se desconoce su espesor. Se presenta en dos zonas, la primera parte desde el km 0 y hasta el km 1.5, la segunda parte desde el km 3.5 y hasta el km 6.5 aproximadamente. A esta unidad se le asignaron aquellas resistividades mayores a 120 Ω m. Litológicamente se asocia con rocas volcánicas y/o rocas volcánicas fracturadas.

El perfil magnético comienza con un pequeño alto coincidiendo con el SEV-30, posteriormente presenta un comportamiento sin cambios significativos hasta llegar al km 9, en donde se observa un bajo magnético importante, asociado

probablemente a una falla o fractura, por lo que en el perfil geoelectrico y en el geológico se marcó como una discontinuidad.

Si bien en el perfil eléctrico no se observa esta discontinuidad, podría tratarse de una falla que se localiza a una profundidad mayor a 300 m, por lo que no se alcanzó a manifestar en el perfil de resistividad real.

Descripción sección C-C'

La última sección se localiza en el sur de la zona de estudio. Se compone de 9 sondeos eléctricos verticales (SEV 13,8,11,7,9,6,3,2,1), separados entre sí por 2 km a 4 km. Su longitud aproximada es de 26 km y su dirección es Noroeste a Sureste, localizado entre las coordenadas NW (286908, 2412516) y SE (305876,2400230). La abertura máxima para cada sondeo fue de $AB/2=1,000$ metros y la profundidad aproximada que alcanzaron fue de 300 metros. Los SEV se asocian principalmente con curvas tipo HKHK, KQH,KQHK, . En la sección se aprecian contrastes horizontales y verticales.

Con la interpretación cuantativa se infirieron cinco unidades geoelectricas, esto se hizo en función de la resistividad eléctrica y de la litología existente en la zona de estudio.

La primera unidad geoelectrica (I) se localiza en dos zonas, la primera entre el km 5 y el km 8, a una profundidad de 110, su espesor es desconocido. La segunda se encuentra entre el km 11.5 y 17.5, a una profundidad de 120 m aproximadamente y hasta los 260 m. Esta representada por el color azul oscuro y se le asignó un rango de resistividades de 6-20 Ω m. Litológicamente se le asocia con material arcillo-arenoso.

La segunda unidad geoelectrica (II) se presenta en casi toda la sección pero a distintas profundidades. Se observa primeramente (km 0) una pequeña porción comenzando en la superficie y hasta los 80 metros con casi 2 km de longitud. Posteriormente en el km 5 y hasta el 26 se vuelve a hacer presente, variando en espesores y profundidades a las que se presenta. Se representó con el color azul

cielo y tiene un rango de resistividades de 21-30 Ωm . Litológicamente se le considero como relleno sedimentario, compuesto principalmente por arenas.

La tercera unidad geoelectrica (III) se presenta en dos porciones de la sección. La primera desde el km 0 y hasta el 5, abarcando en su mayoría desde la superficie y se desconoce su espesor. La segunda parte se ubica a mayor profundidad (200 m), abarca desde el km 8 y hasta el 17, aproximadamente. Se representa con el color verde y se le asignaron resistividades en un rango de 31-70 Ωm . Litológicamente se le asocia con roca volcánica, específicamente toba arenosa.

La cuarta unidad geoelectrica (IV) es la que menor proporción tiene. Se localiza entre el km 8 y hasta el 26, desde la superficie y a una profundidad máxima de 75 m. Está representada por el color amarillo y el rango de resistividad va de 71-120 Ωm . Al igual que en las anteriores secciones, esta delgada capa superficial se interpretó litológicamente con material de tipo caliche.

La quinta unidad geoelectrica (V) se presenta en dos porciones de la sección. La primera se encuentra desde el km 0 y hasta el 2, a una profundidad de 225 m, se desconoce su espesor, pero probablemente sea continua a mayor profundidad. La segunda porción va desde el km 21 y hasta el 26, a una profundidad de 250 m y con un espesor desconocido. Está representada con el color rojo y se le asignaron todas las resistividades mayores a 120 Ωm . Litológicamente se interpretó como roca volcánica y/o roca volcánica fracturada.

El perfil magnético de esta sección es el más complejo, ya que presenta una gran cantidad de altos y bajos magnéticos, indicando una zona de fracturamiento. Comenzando con un pronunciado bajo en el km 0, aunque debido a la falta de información en dirección NW no se puede realizar una interpretación certera. Posteriormente se observa un alto magnético entre el km 0 y el 4, asociado probablemente a un cuerpo volcánico que se observa en el perfil eléctrico también. Desde el km 4 y hasta el km 18 se observa una serie de altos y bajos magnéticos, la mayoría coincidiendo con discontinuidades que se encontraron en el perfil eléctrico. A partir del km 18 y hasta el 25 se observa que la señal del perfil magnético crece, coincidiendo con un cuerpo volcánico encontrado en el perfil de resistividad.

6. CONCLUSIONES

- Los estudios de magnetometría aérea demuestran que existe una cantidad importante de fallas y/o fracturas en el área de estudio, estas presentan dos direcciones principales NW y NE resultando de interés en la prospección de agua subterránea.
- La magnetometría terrestre indicó las zonas de mayor fracturamiento en los perfiles geológicos, estas áreas son las que podrían ser más exitosas si se realizan perforaciones.
- Con los perfiles magnéticos terrestres se identificaron diversas fallas que en superficie no son visibles ya que se encuentran cubiertas por sedimentos. Por lo anterior, estas fallas no están reportadas en los mapas del Servicio Geológico Mexicano.
- El modelado aeromagnético 3D muestra la presencia de cuatro cuerpos asociados a las anomalías magnéticas de mayor intensidad. Conocer la ubicación y dimensiones de estos cuerpos nos indica aquellas zonas a evitar para realizar perforaciones en búsqueda de agua.
- Los SEV's permitieron identificar cinco unidades geoelectricas y con apoyo de la geología del área se asociaron litológicamente a cinco unidades; unidad 1, con resistividades entre 6 y 20 ohm.m, asociada a arcillas arenosas con diferentes grados de humedad. Unidad 2, con resistividades entre 21 y 30 ohm.m, asociada a material arenoso con probable presencia de humedad, siendo la unidad de interés para la exploración de agua subterránea, dando prioridad a las zonas que presentan mayor fracturación (indicadas por la magnetometría terrestre). 3. Unidad con resistividades de 31 a 70 ohm.m, asociada a toba arenosa. Unidad 4, con resistividades entre 71 y 120 ohm.m, localizada en la superficie y asociada a caliche. Unidad 5, con resistividades arriba de 120 ohm.m, asociada a rocas volcánicas.
- El análisis de clúster indicó el grupo 2 como el de mayor interés para la exploración de agua subterránea, agrupando aquí el 54.6% de los SEV's, destacando el tipo de curva KHKH coincidiendo con el mapa de dominios geoelectricos.

7. Referencias bibliográficas

- Alken, P., Thébault, E., Beggan, C., et al., e. (2021). *International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation*. Earth Planets Space 73, 49.
- Aguirre-Hernández, M.A. (1992). Geología del Subsuelo de las cuencas geohidrológicas del valle de San Luis Potosí y de Villa de Reyes, en el estado de San Luis Potosí.
- Baranov, V., Naudy, H. (1964). *Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole: Geophysics, 29, 67-79.*
- Bravo, J. C. (1971). *La Plataforma Valles-San Luís Potosí*. Boletín de la Asociación Mexicana de Geología.
- Bustamante-Orozco, M.R., Medrano-Pérez, O.R., Neri-Flores, I., Ángeles-Cordero, E. (2021). Interpretación de datos aeromagnéticos y gravimétricos satelitales para la identificación de zonas con potencial acuífero en la porción oeste de la cuenca Grijalva, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 75, núm. 1, A031122, 2023
- Carta Geológica-Minera San Luis Potosí F14-4. (1998) Servicio Geológico Mexicano.
- Castillo, J., Ramos Leal, J., Martínez Cruz, D., Cervantes Martínez, A., Marín Celestino, A. (2021). Identification of the Dominant Factors in Groundwater Recharge Process, Using Multivariate Statistical Approaches in a Semi-Arid Region. *Sustainability*.
- Cuadras, C.M. (2018). Nuevos métodos de análisis multivariante. CMC EDITIONS. Barcelona, España.
- Domínguez-Domínguez, O., Pérez-Ponce de León, G. (2009). ¿La mesa central de México es una provincia biogeográfica? Análisis descriptivo basado en componentes bióticos dulceacuícolas? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Rev. Mex. Biodiv. vol.80 no.3 México dic. 2009.

- Escudero-Durán, R., Bustamante-Orozco, M., Ángeles Cordero, E., Neri Flores, I., Medrano Pérez, O. (2021). La magnetometría como alternativa para identificar áreas con potencial acuífero. El caso de la cuenca del río Grijalva. *Geofísica Internacional*.
- Galván Pineda, J. (2016). Métodos Potenciales y electromagnéticos aplicados a la modelación bidimensional del volcán tipo maar "La Joyuela", San Luis Potosí, México. *Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica*.
- Gaytán, D. E. (2013). *Estudio Geofísico aplicado a la exploración minera en el Milagro de Guadalupe, municipio de Guadalcázar, Estado de San Luis Potosí*. San Luis Potosí.
- González, M. T. (1986). *Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes, en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México*. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología .
- Hair, J., Black, W., Babin, B., Anderson, R. (2014). *Multivariate Data Analysis*. Pearson Education.
- Henderson, R.G. and Zietz, I. (1949) *The Upward Continuation of Anomalies in Total Magnetic Intensity Fields. Geophysics*, 14, 517-534. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1437560>
- Imlay, R.W., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico. *Part IV Geology of the Western part of the Sierra de Parras: Geological Society of America Bulletin*, 47(4), 1091-1152.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2002). *Síntesis de información geográfica del estado de San Luis Potosí*.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2020). *Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda del estado de San Luis Potosí*

- Jain, A.K. Data clustering: 50 years beyond k-means. *Pattern Recognit. Lett.* 2010, 31, 651–666.
- Kip, A. F. (1967). *Fundamentos de electricidad y magnetismo*. Madrid: Ediciones del Castillo S.A.
- L. Myers, J., D. Well, A., F. Lorch, R. (2010). *Research Design and Statistical Analysis*. Gran Bretaña: Routledge.
- Labarthe , G., Tristán, M., Aranda, J. (1982). *Revisión estratigráfica del cenozoico de la parte central del edo. de San Luis Potosí*. San Luis Potosí: Universidad autonoma de San Luis Potosí.
- Labarthe-Hernández, G., y Tristán-González, M., (1978). *Cartografía Geológica Hoja San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia, U.A.S.L.P.*, Folleto Técnico No. 59, 41 p.
- Lanza, R., Antonio, M. (2006). *The Earth's magnetism an introduction for geologist*. Italia: Springer.
- Lenadro, F., Azpilicueta, F. (2017). *Variación de 27 días en la actividad magnética terrestre: Características globales y un nuevo enfoque basado en el origen de las señales*. La Plata, Argentina: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata.
- López-Loera, H., Tristán-González, M. (2013). *Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 65 p. 137-156.
- Lozares Colina, C., López, R. P. (1991). El análisis de componentes principales: Aplicación al análisis de datos secundarios . *Papers: Revista de Sociología* , 31-63.
- Martínez, M. F. (2010). Métodos geofísicos aplicados en la exploración del agua subterránea: caso acuífero de Villa de Hidalgo, San Luis Potosí. *Tesis de Maestría*.

- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics, The geological field guide series*. University College London: Wiley.
- Muthamilselvan, A., Srimadh, K., Nandhin, R., Pavithra, P., Balamurugan, T., & Vasuk, V. (2017). Spatial Confirmation of Major Lineament and Groundwater Exploration. *Journal of Geology & Geophysics*, 6:1.
- Nabighian, M. (1972). *The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation*. *Geophysics*, 37, 507-517.
- Nieto-Samaniego, Á., Alaniz-Álvarez, S., & Camprubí í Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. LVII, núm. 3, pp. 285-318.
- Orellana, E. (1972). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Madrid, España: Paraninfo.
- Ramos-Leal, J.A., López-Loera, H., Martínez-Ruíz, V.J., Aranda-Gómez, J.J., (2007) *Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, México) inferida a partir de datos geoeléctricos*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. v. 24, núm. 1. p. 31-46
- Reeves, C. (2005). *Aeromagnetic Surveys*. Netherlands: Earthworks.
- Román, F. J. (s.f.). *Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales*. Salamanca: Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.
- Sanz A., J. H., Duque C., E., Gómez Estrada, S. (2010). La resistividad del suelo en función de la frecuencia. *Scientia et Technica Año XVI, No 44, Universidad Tecnológica de Pereira*.
- SGM. (1998). *Carta geologico-minera de San Luis Potosí*.

- Shapiro, S., Wilk, M. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 1965, 52, 591–611.
- Tauxe, L. (2005). *Lectures in Paleomagnetism*.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Universidad de Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Tristán-González. M. (1986). *Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes, en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México*. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología .
- Tristán-Gonzalez, M. (2008). Evolución tectono-volcánica durante el paleógeno en la porción Suroriental de la Mesa Central. Tesis de doctorado.
- Vanhatalo, E.; Kulahci, M. Impact of autocorrelation on principal components and their use in statistical process control. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 2016, 32, 1483–1500.
- Zemansky, S., Young, H., Freedman, R., & Ford, L. (2018). *Física Universitaria*. Madrid: Pearson.