



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**Análisis Aeromagnético del complejo dómico “Las  
Derrumbadas”, en el estado de Puebla.**

Tesis que presenta:

**José Mauricio España Bernardino**

Para obtener el grado de:

**Maestro en Geociencias Aplicadas**

Director de Tesis:

**Dr. Héctor López Loera**

San Luis Potosí, S.L.P., Diciembre de 2017



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Análisis Aeromagnético del complejo dómico "Las Derrumbadas", en el estado de Puebla**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **José Mauricio España Bernardino** y aprobada el veinte de diciembre del dos mil diecisiete 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 de la tesis

**Dr. Pablo Dávila Harris**  
Miembro del Comité Tutorial

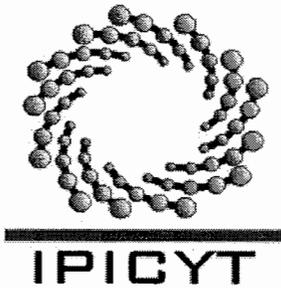
**Dr. Vsevolod Yutis**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

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

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (337070) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 033 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 20 días del mes de diciembre del año 2017, se reunió a las 12:05 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. Héctor López Loera</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Pablo Dávila Harris</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Vsevolod Yutsis</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**José Mauricio España Bernardino**

sobre la Tesis intitulada:

*Análisis Aeromagnético del complejo dómico "Las Derrumbadas", en el estado de Puebla*

que se desarrolló bajo la dirección de

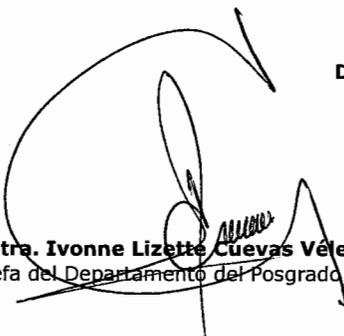
**Dr. Héctor López Loera**

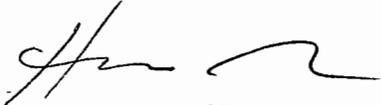
El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 13:31 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 20 días del mes de diciembre de 2017.

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado

  
**Dr. Horacio Flores Zúñiga**  
Secretario Académico



## Dedicatorias

*A mis padres, que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños y ser un gran ejemplo de vida.*

*A mis hermanos, por su apoyo incondicional y consejos.*

*Angeles y Mateo, por su paciencia, comprensión y que han sido parte de esta nueva y maravillosa etapa en mi vida.*

## **Agradecimientos**

Agradezco al IPICYT y CONACYT, por el apoyo económico y la estancia recibida durante mis estudios de maestría.

Un agradecimiento especial al Dr. Héctor López Loera, por su asesoría y apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

A mis revisores el Dr. Pablo Dávila Harris y al Dr. Vsevolod Yutsis, por sus comentarios y consejos para la mejora del presente trabajo.

Al técnico de la división de Geociencias Aplicadas M. en C. David Ernesto Torres, por su apoyo para la generación de los modelos presentados.

# Índice

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE LA TESIS.....	II
CRÉDITOS INSTITUCIONALES .....	III
ACTA DE EXAMEN .....	IV
DEDICATORIAS.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE.....	VII
LISTA DE TABLAS .....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 GEOTERMIA.....	2
1.2.1 Breve historia de la geotermia.....	2
1.2.2 Energía geotérmica.....	3
1.2.3 Clasificación de los sistemas geotérmicos.....	5
1.3 HIPÓTESIS.....	7
1.4 OBJETIVO .....	7
1.5 ANTECEDENTES.....	7
1.6 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	9
1.7 DISTRIBUCIÓN VOLCÁNICA .....	9
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>11</b>
<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL .....	11
2.2 GEOLOGÍA LOCAL.....	13
2.3 EVOLUCIÓN.....	15
2.4 ESTRATIGRAFÍA.....	19
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>23</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>23</b>
3.1 MÉTODO MAGNÉTICO .....	23
3.2 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE .....	23
3.2.1 Componentes del Campo Geomagnético.....	25
3.3 COMPONENTES BÁSICOS DE LA FUERZA MAGNÉTICA .....	26
3.3.1 Polos Magnéticos.....	26
3.3.2 Fuerza Magnética .....	26
3.3.3 Campo Magnético.....	26
3.3.4 Magnetización .....	26
3.3.5 Momento Magnético .....	26

3.3.6 Permeabilidad Magnética .....	27
3.4 MAGNETISMO DE LAS ROCAS .....	27
3.4.1 Susceptibilidad Magnética .....	27
3.5 TIPOS DE MAGNETIZACIÓN .....	29
3.5.1 Histéresis .....	30
3.5.2 Dominios Magnéticos .....	31
3.6 CORRECCIONES MAGNÉTICAS .....	32
3.6.1 Variaciones Diurnas .....	33
3.6.2 Micropulsaciones .....	33
3.6.3 Tormentas Magnéticas .....	34
3.6.4 Variaciones Seculares .....	35
3.6.5 Inversiones Geomagnéticas .....	35
3.7 CAMPO GEOMAGNÉTICO INTERNACIONAL DE REFERENCIA .....	35
3.1 ANOMALÍAS MAGNÉTICAS .....	37
3.2 ESTUDIOS MAGNÉTICOS .....	37
3.2.1 Estudios magnéticos terrestres .....	38
3.2.2 Estudios Aeromagnéticos .....	39
3.2.3 Diseño de los estudios aermagnéticos .....	39
3.2.4 Magnetómetros .....	41
3.2.5 Ruido de aviones .....	42
3.2.6 Efectos temporales .....	42
3.2.7 Visualización e interpretación de datos .....	43
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>44</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>44</b>
4.1 MAGNETOMETRÍA AÉREA .....	44
4.1.1 Características del equipo utilizado .....	44
4.2 FILTROS APLICADOS .....	45
4.2.1 Reducción al Polo .....	45
4.2.2 Primera Derivada en la Vertical .....	45
4.2.3 Segunda Derivada en la Vertical .....	46
4.2.4 Señal Analítica .....	46
4.2.5 Continuación Ascendente .....	46
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>47</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.3 PROCESADO E INTERPRETACIÓN REGIONAL .....	47
4.3.1 Campo Magnético Residual .....	47
4.3.2 Reducción al Polo .....	48
4.3.3 Dominios Aeromagnéticos .....	49
4.3.4 Primera Derivada en Z .....	50
4.4 PROCESADO E INTERPRETACIÓN LOCAL .....	52
4.5 MODELADO .....	58
4.5.1 Sección A-A' .....	60
4.5.2 Sección B-B' .....	61
4.5.3 Sección C-C' .....	61
4.6 MODELADO 3D .....	62
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>67</b>
<b>DISCUSIONES Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>70</b>
---------------------------	-----------

## Lista de tablas

TABLA 1. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LAS ROCAS MÁS COMUNES.....	28
TABLA 2. SUSCEPTIBILIDADES MAGNÉTICAS DE "LAS DERRUMBADAS". OBTENIDA DEL MODELO 2-D. .....	62
TABLA 3. SUSCEPTIBILIDADES MAGNÉTICAS DE LAS ISOSUPERFICIES OBTENIDA DEL MODELO 3-D. .....	66

## Lista de figuras

FIGURA 1. SISTEMA GEOTÉRMICO (DEPARTAMENT OF ENERGY, 2016) .....	2
FIGURA 2. LÍMITE DE PLACAS, VOLCANES ACTIVOS Y PRINCIPALES PLACAS. TOMADO DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS (UGSGS) .....	4
FIGURA 3. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO (RECTÁNGULO EN NEGRO) Y LOS PRINCIPALES CUERPOS VOLCÁNICOS .....	10
FIGURA 4. IMAGEN DELIMITANDO LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA Y LOS PRINCIPALES CUERPOS VOLCÁNICOS PRESENTES EN ELLA. MODIFICADA DE RODRÍGUEZ S. Y MORALES W., 2010. ....	11
FIGURA 5. DIVISIÓN DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA. MODIFICADA DE FERRARI ET AL., (2012). ....	12
FIGURA 6. GEOLOGÍA LOCAL REPORTADA POR EL SGM 2011. ....	15
FIGURA 7. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA CUENCA DE LIBRES-ORIENTAL, ZONA LAS DERRUMBADAS. TOMADA DE YAÑEZ-GARCÍA Y GARCÍA-DURAN, 1982.....	17
FIGURA 8. IMAGEN 3D DE LOS DOMOS LAS DERRUMBADAS, OBJETO DE NUESTRO ESTUDIO. ....	19
FIGURA 9. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO (MODIFICADA DEL SGM, 2011). ....	22
FIGURA 10. LÍNEAS DEL CAMPO MAGNÉTICO (TOMADA DE BURGER, 1992).....	24
FIGURA 11. COMPONENTES DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO (IMAGEN MODIFICADA DE REYNOLDS, J. M., 1997). ....	25
FIGURA 12. TIPOS DE FENÓMENOS MAGNÉTICOS QUE SE PRESENTAN EN LA MATERIA. LAS FLECHAS RELLENAS INDICAN EL CAMPO APLICADO Y LAS VACÍAS LA MAGNETIZACIÓN DEL MATERIAL BAJO EL CAMPO APLICADO. IMAGEN TOMADA DE SUSCEPTIBILIDADES (TOMADA DE CABALLERO., 2011). ....	30
FIGURA 13. CURVA DE MAGNETIZACIÓN DE UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO. (IMAGEN MODIFICADA DE GUBBINS Y HERRERO-BERVERA, 2007). ....	31
FIGURA 14. DOMINIOS MAGNÉTICOS Y PARED DE BLOCH. (MODIFICADA DE GUBBINS Y HERRERO- BERVERA, 2007). ....	32
FIGURA 15. VARIACIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO EN UN PUNTO FIJO, REGISTRADO DURANTE 32 DÍAS. (IMAGEN TOMADA DE REEVES, C. 2005).....	32
FIGURA 16. VARIACIÓN DIURNA A DIFERENTES LATITUDES. TOMADA DE (ROBINSON Y CORUH, 1998). ....	33
FIGURA 17. VARIACIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO REGISTRADAS A DECENAS DE KILÓMETROS, EN LA CUAL SE OBSERVAN LAS MICROPULSACIONES Y SU VARIACIÓN DE UN LUGAR A OTRO. (REEVES., 2005) .....	34
FIGURA 18. EJEMPLO DE TORMENTA MAGNÉTICA EN COLABA (BOMBAY) EN EL AÑO 1859, EN LA CUAL SE PUEDEN OBSERVAR LAS VARIACIONES VIOLENTAS EN EL CAMPO MAGNÉTICO EN 1-2 DE SEPTIEMBRE. IMAGEN TOMADA GUBBINS Y HERRERO-BERVERA, 2007. ....	34
FIGURA 19. MODELO MAGNÉTICO MUNDIAL (2015). DECLINACIÓN MAGNÉTICA (NOAA, 2014).....	36
FIGURA 20. MODELO MAGNÉTICO MUNDIAL (2015). INTENSIDAD MAGNÉTICA (NOAA, 2014). ....	36
FIGURA 21. EN UN LUGAR DADO, EL MAGNETÓMETRO AEROTRANSPORTADO REGISTRA LA SUMA VECTORIAL DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO AMBIENTAL Y LA CONTRIBUCIÓN ANÓMALA DE (UNA O MÁS) FUENTES LOCALES. (REEVES, C. 2005) .....	37
FIGURA 22. LÍNEAS DE MEDICIÓN PARALELAS Y LÍNEAS DE CRUCE.....	40
FIGURA 23. EN EL LEVANTAMIENTO MAGNÉTICO AEROTRANSPORTADO, LAS LÍNEAS DE VUELO PUEDEN VOLAR A (A) ALTITUD CONSTANTE SOBRE EL NIVEL DEL MAR, O (B) ALTURA CONSTANTE SOBRE EL NIVEL DEL SUELO. MODIFICADA DE (GUBBINS, 2007).....	41
FIGURA 24. MAPA DEL CAMPO MAGNÉTICO RESIDUAL. UBICANDO LOS DOMOS DE LAS DERRUMBADAS CON ASTERISCOS DE COLOR BLANCO.....	47

FIGURA 25. MAPA DEL CAMPO MAGNÉTICO REDUCIDO AL POLO CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 2500 M Y GEOLOGÍA DIGITALIZADA; LOS CÍRCULOS SEMI-RELLENOS REPRESENTAN A MANIFESTACIONES GEOTÉRMICAS Y LOS ASTERISCOS BLANCOS PERTENECEN A LOS DOMOS LAS DERRUMBADAS.....	48
FIGURA 26. DOMINIOS AEROMAGNÉTICOS IDENTIFICADOS A TRAVÉS DEL MAPA REDUCCIÓN AL POLO CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 2000 M.....	49
FIGURA 27. MAPA DE LA PRIMERA DERIVADA CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 250 M.....	51
FIGURA 28. ROSETA DE LINEAMIENTOS DEL MAPA DE LA PRIMERA DERIVADA CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 250 M. ....	51
FIGURA 29. MAPA DE LA PRIMERA DERIVADA CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE 1000 M. ....	52
FIGURA 30. MAPA DE LA PRIMERA DERIVADA CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE 1000 M Y ROSETA DE LINEAMIENTOS. ....	52
FIGURA 31. MAPA DEL CAMPO MAGNÉTICO RESIDUAL. ....	53
FIGURA 32. A) MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO CON ELEVACIONES, B) MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO CON GEOLOGÍA DIGITALIZADA Y C) MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO CON ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS Y FALLAS DIGITALIZADAS.....	54
FIGURA 33. MAPA DE PRIMERA DERIVADA EN Z CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 250 M. CON SU RESPECTIVA ROSETA DE LINEAMIENTOS. ....	55
FIGURA 34. MAPA DE PRIMERA DERIVADA EN Z CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 2000M. CON SU RESPECTIVA ROSETA DE LINEAMIENTOS. ....	56
FIGURA 35. A) MAPA DE SEÑAL ANALÍTICA CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 250 M, B) MAPA DE SEÑAL ANALÍTICA CON CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 2000 M. CADA MAPA CON LA IDENTIFICACIÓN DE LOS DOMINIOS AEROMAGNÉTICOS. ....	57
FIGURA 36. MAPA REDUCCIÓN AL POLO CON SECCIONES A-A', B-B' Y C-C'.....	59
FIGURA 37. SECCIÓN A-A', CON DIRECCIÓN SW-NE. ....	60
FIGURA 38. SECCIÓN B-B' CON DIRECCIÓN SW-NE .....	61
FIGURA 39. SECCIÓN C-C', CON DIRECCIÓN NW-SE.....	62
FIGURA 40. MODELO 3D CON CUERPOS DE ISOSUPERFICIES. A) MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO, B) MAPA TOPOGRÁFICO Y C) ISOSUPERFICIES.....	64
FIGURA 36. MODELO 3D CON DOS ISOSUPERFICIES. A) MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO, B) MAPA TOPOGRÁFICO Y C) ISOSUPERFICIES.....	64
FIGURA 41. MODELO 3D CON DOS ISOSUPERFICIES CON DIFERENTES VALORES DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA. A) MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO, B) MAPA TOPOGRÁFICO Y C) ISOSUPERFICIES. ....	65
FIGURA 42. MODELO 3D CON DOS ISOSUPERFICIES CON DIFERENTES VALORES DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA. A) MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO, B) MAPA TOPOGRÁFICO Y C) ISOSUPERFICIES. ....	65

## Resumen

### **Análisis Aeromagnético del complejo dómico “Las Derrumbadas”, en el estado de Puebla.**

**PALABRAS CLAVE:** Magnetometría, Aeromagnetometría, Estado de Puebla, Modelo 3-D, Modelo 2-D, Dominios Aeromagnéticos, Domos, Fuente Magnética y Geotermia.

La energía geotérmica ha ganado un fuerte impulso en el campo mundial en lo que a energéticos se refiere. A nivel global México ocupa el cuarto lugar en aprovechamiento de la energía geotérmica, solo por debajo de Estados Unidos, Filipinas e Indonesia. La República Mexicana es atravesada por un joven cinturón volcánico denominado Eje Neovolcánico o Cinturón Volcánico Mexicano, el cual cruza por el centro del país de Este a Oeste, para esta actividad volcánica joven se asocia un gran potencial geotérmico. Debido a este cinturón volcánico, México cuenta con las características ideales para desarrollar esta fuente de energía. Zonas donde ya se aprovecha la energía geotérmica son: la península de Baja California sobre el sistema de Fallas de San Andrés se localiza el campo geotérmico Cerro Prieto, en Baja California se localiza el campo Tres Vírgenes, el Domo San Pedro en Nayarit, Los Azufres en Michoacán, Los Humeros en Puebla y Cerritos Colorados en Jalisco que actualmente está en desarrollo.

Por lo que, en el presente estudio, mediante el análisis de la aeromagnetometría y geología se busca hacer una caracterización geofísica del complejo dómico Las Derrumbadas en el Estado de Puebla y poder determinar si la zona puede tener potencial geotérmico, esto debido a las evidencias que se tiene en superficie como son las manifestaciones geotérmicas y alteración de las rocas.

A la información aeromagnética se le aplicaron una serie de filtros, como son continuaciones ascendentes, primera y segunda derivada, señal analítica y reducción al polo. Todo esto para resaltar características específicas a cada uno de los mapas generados, con la finalidad de poder identificar dominios aeromagnéticos, lineamientos e información específica que nos ayudaría a tener un mejor conocimiento de nuestra zona de interés. Toda la información obtenida favoreció a la interpretación y generación de un modelo final, que fueron 3 perfiles 2-D y un modelo 3-D (los modelos 2-D y 3-D se obtuvieron con el software Oasis Montaj® de Geosoft). Se estimaron las profundidades de las fuentes magnéticas, causantes de las dos anomalías positivas ubicadas sobre los domos de Las Derrumbadas, para el domo Norte la fuente magnética se localiza a 2.5 km de profundidad y para el domo Sur a 3.5 km, asociando estas dos fuentes a la cima de un cuerpo intrusivo el cual se manejó como la fuente magnética y se asoció a una posible fuente calorífica para un sistema geotérmico.

## **Abstract**

# **Aeromagnetic analysis of the Dome Complex "Las Derrumbadas" in the state of Puebla.**

**KEY WORDS:** Magnetometry, Aeromagnetometry, State of Puebla, Model 3-D, Model 2-D, Aeromagnetic Domains, Domes, Magnetic Source, Geothermal Source.

Geothermal energy has gained a strong boost in the global field in terms of energy. Globally, Mexico ranks fourth in geothermal energy, only below the United States, the Philippines and Indonesia. The Mexican Republic is crossed by a young volcanic belt called Neovolcanic Axis or the Trans-Mexican Volcanic Belt, which crosses through the center of the country from East to West where great geothermal potential is associated to this young volcanic activity. Due to this volcanic belt, Mexico has the ideal characteristics to develop this energy source. Areas where geothermal energy is already used are: the Baja California peninsula on the San Andrés fault system where the Cerro Prieto geothermal field is located, in Baja California the Tres Vírgenes field can be found, the San Pedro Dome in Nayarit, Los Azufres in Michoacán, Los Humeros in Puebla and Cerritos Colorados in Jalisco which is currently under development.

Therefore, in the present study, through the analysis of aeromagnetometry and geology, we seek to make a geophysical characterization of the dome complex Las Derrumbadas in the State of Puebla and to determine if the area can have geothermal potential, due to the geothermal manifestations and rock alteration evidence found on the surface.

A series of filters were applied to the aeromagnetic information, such as ascending continuations, first and second derivatives, analytical signal and reduction to the pole. All this to highlight specific characteristics to each one of the generated maps, with the purpose of being able to identify aeromagnetic domains, guidelines and specific information that would help us to have a better knowledge of our area of interest. All the information obtained favored the interpretation and generation of a final model, which were 3 2-D profiles and a 3-D model (the 2-D and 3-D models were obtained with the Oasis Montaj® software from Geosoft). The depths of the magnetic sources were estimated, causing the two positive anomalies located on the domes of Las Derrumbadas, the North dome magnetic source is located at 2.5 km in depth and the South dome at 3.5 km, associating these two sources with the top of an intrusive body which was handled as the magnetic source and associated with a possible heat source for a geothermal system.

# Capítulo 1

## Generalidades

### 1.1 Introducción

De 1990 a la fecha el consumo mundial de energía se ha incrementado alrededor del 35%, de acuerdo a datos del Banco Mundial, esto indica que la demanda de energía irá en aumento, por esta situación se vuelve cada vez más necesario generar energía limpia y accesible para todas las personas. La madera, carbón, petróleo y gas son fuentes de energía que han ayudado a subsistir a la humanidad pero éstos son limitados y por lo tanto finitos, además de estar produciendo estragos en la salud y al medio ambiente.

Se han venido estudiando nuevas fuentes de energía amigables con el ambiente y que ayuden a abastecer las necesidades energéticas al ser humano, estas energías se conocen como energías renovables, y entre ellas destaca la energía Geotérmica. La palabra geotérmico viene del griego *geo* que significa “Tierra” y *thermos* que significa “Calor”, por lo tanto la palabra se refiere textualmente al calor de la tierra (González González, 2004). Por lo que la energía geotérmica es la que puede ser obtenida mediante el aprovechamiento del calor interno de la Tierra; este calor se debe a diversos factores entre los que destacan el gradiente geotérmico y el calor radiogénico.

México ha sido pionero en el desarrollo y aprovechamiento de la energía geotérmica y ocupa un lugar destacado en el ámbito mundial. En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es la empresa gubernamental que se encarga de producir energía eléctrica, por lo que ha incrementado fuertemente su capacidad generadora, lo cual ha provocado que se incremente la búsqueda de alternativas para producir energía, esta búsqueda ha iniciado una campaña de exploración del territorio nacional, con el fin de aumentar los recursos energéticos. La geotermia es una fuente de energía que se está fortaleciendo a nivel mundial en cuanto a producción de electricidad (Hiriart Urdanivia, 1982). México cuenta con un potencial estimado de 6 Gigawatts de generación energética basada en la geotermia, de la cual se explota sólo alrededor de una octava parte.

La energía geotérmica es utilizada principalmente para:

- Generar electricidad
- Aprovechamiento directo del calor
- Calefacción
- Refrigeración

Un sistema geotérmico está conformado principalmente por una fuente de calor, la cual es una cámara magmática en proceso de enfriamiento, un acuífero que es cualquier formación litológica con porosidad suficiente para almacenar agua meteórica percolada desde la superficie, así como una buena permeabilidad en la formación litológica y una capa sello con una menor permeabilidad cuya función es impedir que los fluidos geotérmicos se dispersen totalmente en la superficie (Geothermal Energy, 2012). La Figura 1 muestra un sistema geotérmico.

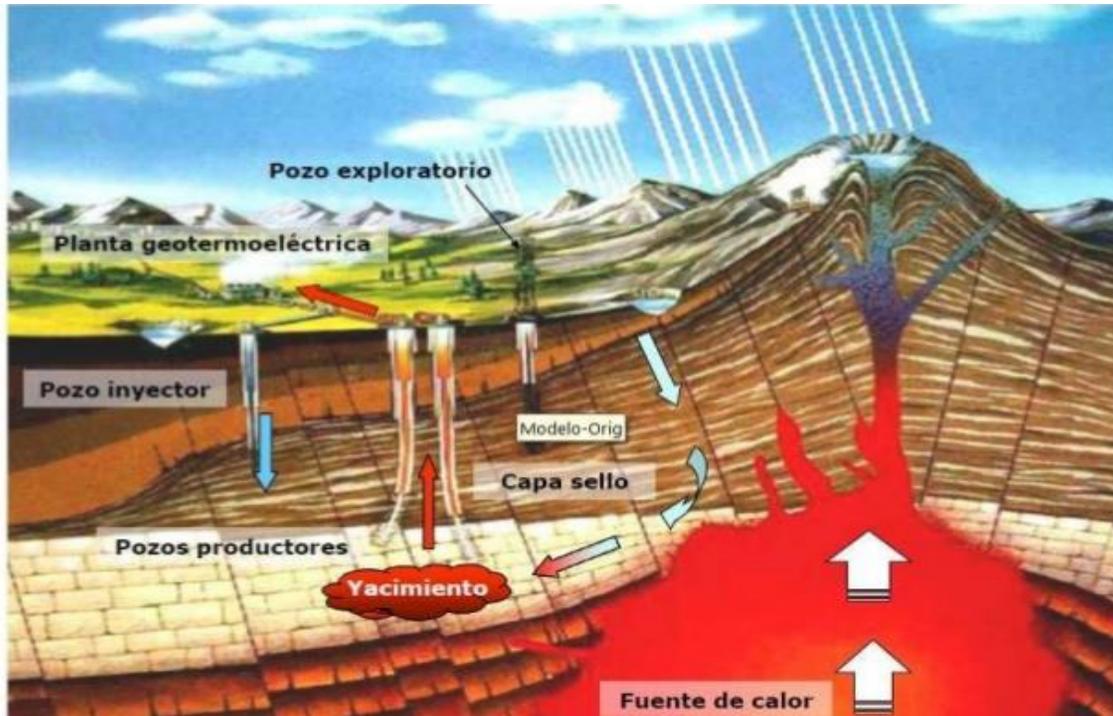


Figura 1. Sistema geotérmico (Department of Energy, 2016).

## 1.2 Geotermia

### 1.2.1 Breve historia de la geotermia.

La industria minera, se incrementó notablemente a partir de siglo XVI, sobre todo en el siglo XVIII con las minas de carbón, propició la perforación de galerías y lumbreras, de varios cientos de metros de profundidad. Estas excavaciones proporcionaron los primeros indicios directos de que la temperatura del subsuelo se incrementa con la profundidad. En 1740, De Gensanne realizó la primera medición del perfil de temperatura de una mina (Dickson, 2013).

El inicio de la industria geotérmica lo podemos situar a principios del siglo XIX en Larderello, Italia, donde se extraía ácido bórico evaporando el agua caliente de los manantiales. En 1827, Francesco Larderel inventó un proceso de evaporación, usando la energía de la misma agua caliente. Después, se transformó la energía

del vapor en energía mecánica, mediante un sistema rudimentario de bombeo del agua con inyección de vapor (Dickson, 2013).

La primera vez que se aprovechó la energía geotérmica para la producción de electricidad fue en Italia en la primera parte de la parte del siglo 20, utilizando vapor superficial de un área donde las descargas superficiales eran claramente evidentes. En 1904, Piero Ginori Conti construyó el primer generador eléctrico accionado por vapor geotérmico, transformando la energía del vapor en energía mecánica y está en energía eléctrica. En 1910 ya se usaba en Toscana, Italia, la energía geotérmica en invernaderos y, en 1928, Islandia empezó sus primeros proyectos de calefacción doméstica con geotermia. Los primeros pozos para aprovechar la energía geotérmica se perforaron en Beppu, Japón, en 1919 y en Los Geiser, California, EU, en 1921. En el año de 1958, Nueva Zelanda inaugura su planta geotérmica de Wairakei. Al año siguiente, inicia operación la planta de Pathé, México y, en 1960, se inicia la generación eléctrica con geotermia en Los Geysers, EU (Cataldi, 2006).

### **1.2.2 Energía geotérmica**

Al conjunto integrado por la fuente de calor, el fluido y la formación permeable donde se almacena el fluido se le llama sistema geotérmico. La mayor parte de este calor se genera a partir de roca fundida también llamado magma. La mayoría del magma producido en la Tierra no llega a la superficie, sino que tiende acumularse a profundidades entre 5 y 10 km, en donde suele calentar grandes regiones de roca o reservorios de fluidos confinados, los cuales dan origen a la formación de los sistemas geotérmicos (Armstead, 1983; Dickson & Fanelli, 2005).

Las fuentes generadoras de calor en el interior de la tierra se deben al decaimiento de minerales radioactivos, reacciones químicas, fricción, presión mecánica, tectónica de placas y ciertos procesos que dan lugar a la formación y flujo de magma hacia la superficie, creando volcanes y calentando formaciones geológicas, lo cual constituyen el mecanismo más importante en el cual se asocian genéticamente los yacimientos geotérmicos (Quijano, 2007).

Los mejores campos geotérmicos se encuentran por lo general alrededor de áreas volcánicamente activas que a menudo se encuentran cerca de los límites de las placas tectónicas. Figura 2.

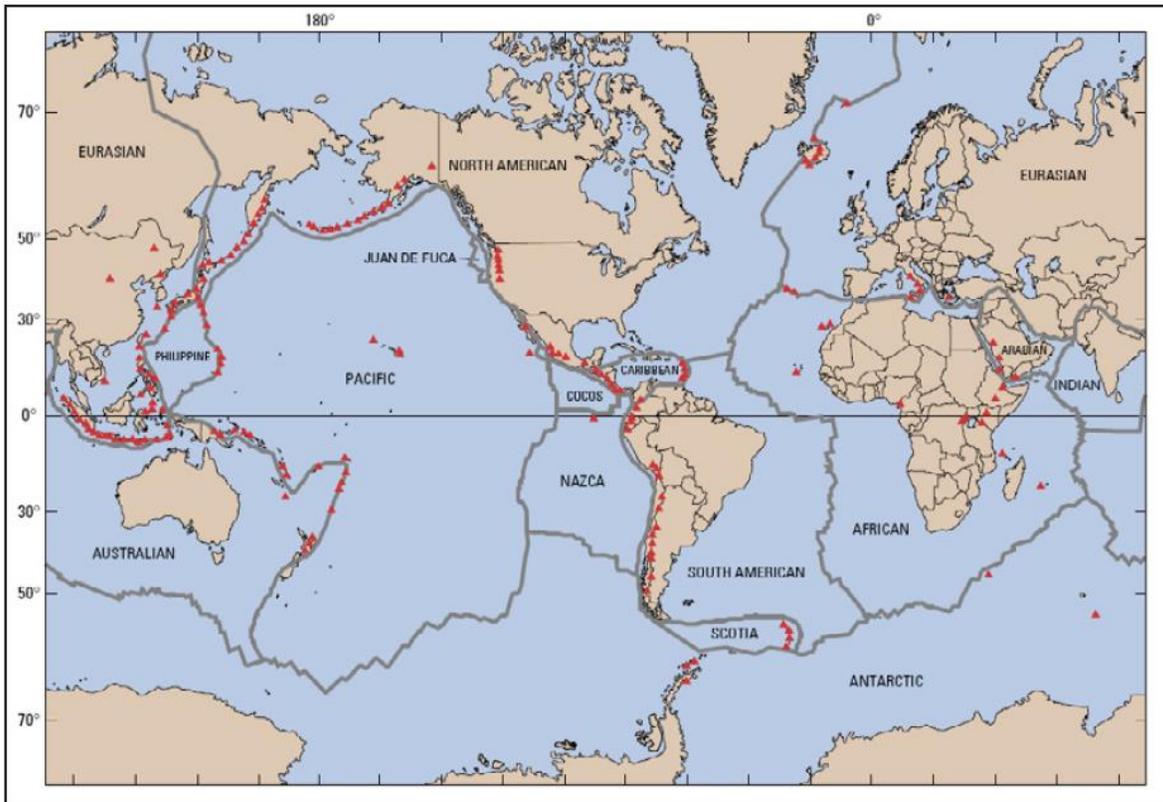


Figura 2. Límite de placas, volcanes activos y principales placas. Tomado del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

La figura 2 expresa la ubicación actual de volcanes activos en relación directa a las placas tectónicas donde se desarrollan campos geotérmicos. En los bordes de placas se originan fenómenos magmáticos importantes, los cuales constituyen la fuente de calor de estos sistemas geotérmicos. Aunque existen pocos casos, como, las islas de Hawai y el Parque de Yellowstone en EU, en que estos sistemas geotérmicos se encuentran al interior de una placa. A los que se les denominan 'puntos calientes o hotspot' (Lago et al., 2015).

Las cámaras magmáticas someras pueden estar asociadas a volcanes compuestos (estratovolcanes), como es el caso de los campos geotérmicos de Miravalles, Costa Rica, o Las Tres Vírgenes en México; o a estructuras de tipo caldera, como Cerritos Colorados (La Primavera), o Los Humeros, México. En otros casos, la relación entre la cámara magmática y la geología superficial puede ser compleja, por ejemplo, Los Azufres, México, donde se ha identificado una caldera antigua y, lo que parece ser el edificio de un volcán andesítico más joven (Quijano, 2007).

En Cerro Prieto, aunque existe un volcán de cuyo nombre deriva el del campo, éste es un fenómeno geológico marginal, que no guarda importancia con relación al recurso geotérmico. La fuente de calor, probablemente, esté constituida por cuerpos intrusivos de gabro; en algunos pozos se han cortado diques pequeños de esta roca (Herrera, 2005).

Por lo general, los reservorios geotérmicos se hospedan en rocas volcánicas. En México es el caso de Los Azufres, Los Humeros y Cerritos Colorados. Sin embargo, algunos reservorios se encuentran en rocas graníticas, por ejemplo, Las Tres Vírgenes, México, o Coso, EU. Por último, también hay reservorios albergados en rocas sedimentarias, Cerro Prieto, México, o metasedimentarias, Larderello, Italia, Los Geysers, EU (Quijano, 2007).

De acuerdo con el IGA (2013) un campo geotérmico si es aprovechado para generación de energía eléctrica o para fines de uso directo (baja entalpia), debe presentar ciertas características principales:

- Una anomalía térmica o fuente de calor: Puede ser suministrado por un magma de alta temperatura, situada en la corteza terrestre, como una intrusión en proceso de enfriamiento o como una cámara magmática que ha alimentado a un volcán o bien una caldera. Se deben considerar áreas donde permanecen localmente grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental como magmas ácidos diferenciados o donde existan manifestaciones volcánicas que indiquen la presencia de cámaras magmáticas, estas áreas son caracterizadas por presentar volcanes poligenéticos, es decir que han hecho erupción más de una vez, cuyos productos volcánicos sean magmas de composición básica-intermedia-acida, así como calderas y complejos dómicos, de composición acida.
- Un yacimiento conformado por rocas permeables, que permitan el ascenso de fluido desde el subsuelo a la superficie.
- Es importante una barrera impermeable en el yacimiento que impida la pérdida de calor por circulación del fluido geotérmico hacia la superficie, es decir una capa sello.

### **1.2.3 Clasificación de los sistemas geotérmicos**

Cuando se les define de acuerdo con la naturaleza del sistema geológico del que se originan, se categorizan de acuerdo a (Santoyo-Gutierrez et al., 2010) en nueve tipos de sistemas geotérmicos.

- Sistemas geotérmicos convectivos hidrotermales. Están constituidos por una fuente de calor, fluido (líquido y/o vapor) y roca, en donde se almacena el fluido geotérmico (yacimiento o reservorio). El fluido que existe en los sistemas hidrotermales tiene su origen como agua meteórica (agua de lluvia, hielo o de nieve). Esta agua se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando varios kilómetros de profundidad en donde es acumulada y calentada por la roca, interacción que puede alcanzar en ocasiones temperaturas de hasta 500 °C. Estos yacimientos pueden estar asociados con sistemas volcánicos o no-volcánicos dependiendo de la temperatura de sus recursos. Cuando las temperaturas son superiores a 200

°C, los yacimientos tienen correlación con sistemas volcánicos y la tectónica de placas, mientras que a temperaturas menores se relacionan generalmente con sistemas no-volcánicos.

- Sistemas geotérmicos mejorados o de roca seca caliente. Los sistemas geotérmicos mejorados, también conocidos como sistemas de roca seca caliente, son concebidos actualmente como una nueva generación de sistemas con un alto potencial térmico. Se caracterizan principalmente por la disponibilidad de una fuente de calor (roca caliente) y la ausencia de fluidos debido las características geológicas propias de estos sistemas, generalmente rocas cristalinas y no permeables (Tester et al., 2007). La explotación de este tipo de sistema geotérmico implica la creación artificial de un yacimiento fracturado mediante técnicas de fracturamiento hidráulico y acompañado por la inyección de agua a temperatura ambiente a través de un pozo inyector. Esta agua es calentada por conducción al entrar en contacto con la roca seca caliente y después de adquirir condiciones adecuadas de presión y temperatura, es extraída mediante un segundo pozo productor para su aprovechamiento en la superficie
- Sistemas geotérmicos geopresurizados. Contienen agua y metano disuelto a alta presión (~700 bar) y mediana temperatura (entre 90 y 200°C) y están generalmente confinados en yacimientos de roca sedimentaria (Sanyal, 2010). Este tipo de recursos de alta presión pueden ofrecer energías: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (energía cinética debido a que los fluidos con alta presión).
- Sistemas geotérmicos asociados con cuencas sedimentarias. Estos sistemas pueden producir recursos de baja y mediana temperatura (20 a 150°C) debido a su flujo de calor y a la baja conductividad térmica de las rocas con gradientes geotérmicos superiores a los normales >30°C/km (Lund et al., 2010).
- Sistemas geotérmicos radiogénicos. Sistemas asociados a intrusiones graníticas que con el calor generado por el decaimiento radioactivo de los isótopos de torio, potasio y uranio calientan el agua subterránea local. Este calentamiento incrementa los gradientes geotérmicos arriba del promedio global y provee un fluido factible de aprovecharse con la perforación de pozos profundos (Lund et al., 2010).
- Sistemas geotérmicos marinos. Recursos geotérmicos de alta entalpía existentes en el fondo del mar y manifestados como descargas hidrotermales, chimeneas o fumarolas. Los sistemas marinos han sido poco estudiados hasta ahora, aunque se han detectados ya algunos en México en el Golfo de California con temperaturas hasta de 350 °C y flujos de calor de hasta 0.34 W/m<sup>2</sup> (Mercado, 1988; Villanueva et al., 2006).

- Sistemas geotérmicos magmáticos. Sistemas de roca fundida asociados con aparatos volcánicos activos o detectados a gran profundidad en zonas de debilidad cortical (Wohletz y Heiken, 1992). El atractivo más importante de este tipo de recursos son las altas temperaturas disponibles >800 °C (Iglesias-Rodríguez et al., 2005).
- Sistemas geotérmicos de agua caliente asociados con yacimientos de petróleo y gas. Existen hoy en día, otro tipo de recursos geotérmicos disponibles para su posible explotación a partir del calor contenido en el agua producida en pozos profundos de petróleo o gas (Davis y Michaelides, 2009). Esta agua caliente puede ser co-producida ya sea con petróleo o extraída a partir de los pozos petroleros que han sido abandonados por no tener una producción rentable, o simplemente por agotamiento del yacimiento. Su explotación no se ha hecho aún atractiva debido a que no se tiene evaluado completamente el recurso térmico disponible, en términos de las temperaturas y la producción de agua en estos sistemas.
- Sistemas geotérmicos supercríticos. Son sistemas muy profundos caracterizados por disponer fluidos geotérmicos en estado supercrítico y con temperaturas de hasta 600 °C. El fluido supercrítico puede proveer hasta 10 veces más energía que la de un fluido almacenado en un sistema geotérmico convencional.

### **1.3 Hipótesis**

Por medio de magnetometría aérea es posible obtener un modelo geológico-geofísico de la zona de estudio. Dicho modelo nos permitirá identificar las dimensiones de las fuentes magnéticas asociadas a los domos de Las Derrumbadas y determinar si existe una relación entre la fuente magnética con la fuente calorífica, la cual ha provocado las manifestaciones termales y alteración de las rocas en superficie.

### **1.4 Objetivo**

El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización geofísica del complejo dómico de la zona denominada “Las Derrumbadas”, en el estado de Puebla a través del análisis de información aeromagnética e información geológica, realizando un modelado con el apoyo del software Oasis Montaj® de Geosof.

### **1.5 Antecedentes**

Las Derrumbadas han sido objeto de estudio por varios autores, la mayoría de ellos, han abarcando diferentes disciplinas y escalas.

Algunos de los estudios encontrados realizados en la zona de estudio son de carácter geológico, como el realizado por Siebe *et al.*, (1988) en el que mediante análisis de elementos por rayos X junto con espectrometría de fluorescencia y observaciones de campo se concluye que los domos, pertenecientes a las derrumbadas son más jóvenes a los 320 000 años, cifra estimada mediante el método de K-Ar reportada por Yañez-García y Casique, (1980).

Después Siebe *et al.*, (1995) mediante una guía de campo describen los depósitos piroclásticos del Pleistoceno Tardío erupcionados de los volcanes en la parte Este-Central de la Faja Volcánica Transmexicana, abarcando los domos de Las Derrumbadas y haciendo una descripción de los mismos enfocándose en los depósitos de avalanchas.

También se encontró una guía de campo de Carrasco-Núñez *et al.*, (2006) en el cual en un recorrido por la caldera de los Humeros y alrededores hablan de los diversos volcanes presentes en la zona de estudio, su evolución, historia eruptiva y frecuencia de las mismas; también se hace una descripción geológica de los domos de la zona incluido el de Las Derrumbadas, realizando varias columnas estratigráficas a detalle.

Hay otros artículos en donde Las Derrumbadas no son el objetivo, pero por su cercanía o relación se hace mención de los domos, tal es el caso del estudio realizado por Carrasco-Núñez y Riggs., (2007) en cual se enfocan en el domo Cerro Pizarro (al norte de Las Derrumbadas) haciendo una descripción de su evolución y su composición que es muy similar a varios domos de la región. Otro estudio es el de Carrasco-Núñez *et al.*, (2007) en el cual habla de la evolución del volcán tipo maar Atexcac (al NE de Las Derrumbadas). Austin-Erickson *et al.*, (2010) habla de la historia eruptiva del Tepexitl (al sur de Las Derrumbadas), haciendo observaciones de campo y estudios de granulometría.

Desde el punto de vista geofísico hay estudios que fueron realizados por la Comisión Federal de Electricidad de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, departamento de exploración (1982 y 1985). Estos estudios hablan sobre la geología de la zona haciendo una descripción de la estratigrafía y tectónica de la zona y con respecto a la geofísica, realizan sondeos eléctricos verticales determinando zonas de interés geotérmico y también hicieron levantamientos gravimétricos y magnéticos con el objetivo de poder determinar la profundidad del basamento. Existen otros estudios realizados por la CFE, a los cuales no se tuvo acceso debido a que se manejan como reportes internos.

Un estudio de Campos-Enriquez y Garduño-Monroy (1987), en el cual se trata de aclarar la relación que existe entre la caldera de Los Humeros y Las Derrumbadas, todo esto mediante datos gravimétricos y aeromagnéticos.

Estudios similares en el que manejan datos aeromagnéticos para la exploración geotérmica, está el estudio realizado por Quintanilla y Suarez, (1994) en el que con información de pozos y estudios magnéticos hacen una posible relación entre la

fuentes de calor en el campo geotérmico de Cerro Prieto y la anomalía magnética “Nuevo León”, basándose en un modelo ya existente propuesto por Goldstein et al., (1984). Otro estudio realizado por Soengkono, (2015), determina con información aeromagnética y estudios geológicos, la desmagnetización de las rocas asociando las anomalías magnéticas negativas con cuerpos volcánicos o posibles zonas geotérmicas.

Trabajos con enfoque geotérmico podemos mencionar un artículo realizado por Santoyo-Gutiérrez y Torres-Alvarado, (2010), mencionan a Las Derrumbadas como sitio con potencial geotérmico de acuerdo a las manifestaciones superficiales y algunos estudios geoquímicos realizados por la Comisión Federal de Electricidad.

La Revista Mexicana de Geoenergía “GEOTERMIA” de la CFE, se presentan artículos sobre los campos geotérmicos actuales que se encuentran en producción y los que cuentan con un potencial, haciendo estudios, geológicos, geofísicos, geoquímicos entre otros.

## **1.6 Ubicación del área de estudio**

La zona de estudio se localiza dentro de la cuenca Serdán-Oriental en los límites de los estados de Puebla y Veracruz, comprendida entre las coordenadas 19° 15' y 19° 20' de Latitud Norte, y 97° 25' y 97° 30' de Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich; la cual constituye una superficie casi rectangular de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>.

## **1.7 Distribución volcánica**

El área estudiada corresponde a la cuenca denominada Serdán-Oriental, con una altitud de 2400 msnm, cuyos límites son: al este la sierra formada por los volcanes Pico de Orizaba, Cofre de Perote y Las Cumbres; al oeste, se localiza el volcán de la Malinche y la ciudad de Huamantla siendo esta del estado de Tlaxcala; al norte se localiza Cerro Pinto, Cerro Pizarro y la laguna de Alchichica, teniendo también la ciudad de Libres perteneciente al estado de Puebla. La Figura 3 muestra la ubicación de Las Derrumbadas y los principales volcanes aledaños a la zona de estudio.

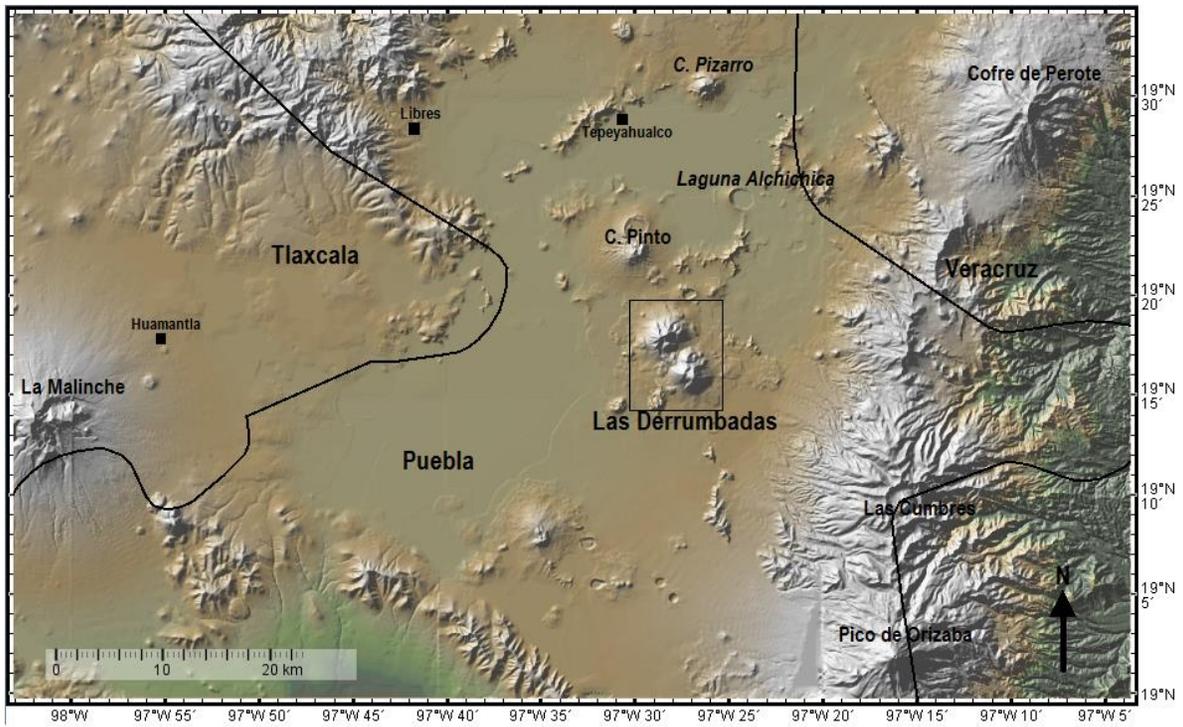


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio (rectángulo en negro) y los principales cuerpos volcánicos.

## Capítulo 2

# Geología

### 2.1 Geología regional

México es atravesado por un relativamente joven cinturón volcánico o también llamada Faja Volcánica Transmexicana. La literatura reporta que la actividad volcánica debe haber iniciado aproximadamente hace 4 millones de años (Venegas *et al.*, 1985). Siendo una provincia fisiográfica que se destaca por la concentración de volcanes, abarcando desde Veracruz hasta Nayarit (Verma, 1987; Ferrari *et al.*, 2012) (Figura 4).

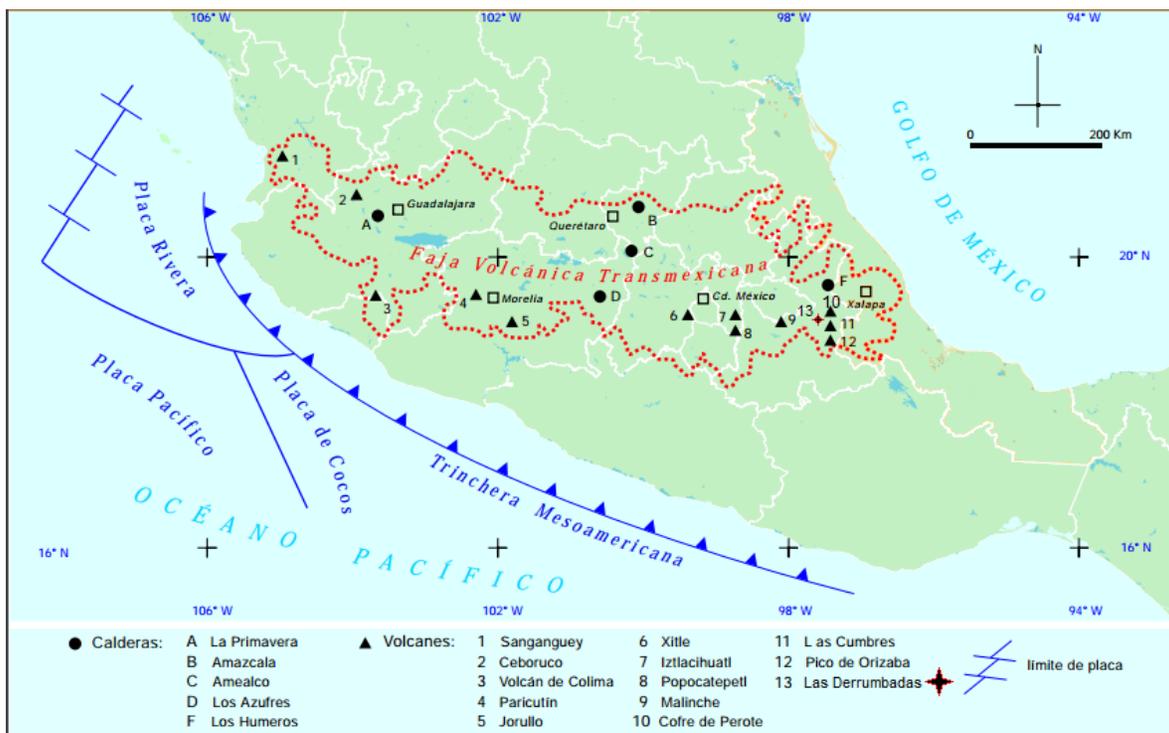


Figura 4. Imagen delimitando la faja volcánica transmexicana y los principales cuerpos volcánicos presentes en ella. Modificada de Rodríguez S. y Morales W., 2010.

De acuerdo a Ferrari *et al.*, (2000, 2012) menciona que esta provincia no es una franja uniforme, la parte más ancha mide 200 km en el estado de Michoacán, en la zona más delgada mide 65 km que es entre Chapala y Morelia.

Ferrari *et al.*, (2000, 2012) divide en tres sectores a la Faja Volcánica Transmexicana, que son el sector occidental sector central y sector oriental (Figura 5).

- 1) Sector occidental, limitado el este por el rift de Colima al norte con el bloque Jalisco y el límite meridional con la Sierra Madre Occidental.
- 2) Sector central ubicado entre el rift de Colima y el sistema de fallas de Taxco-San Miguel de Allende.
- 3) El sector oriental se extiende hasta las costas de Veracruz y es notable la ausencia de fallamiento en esta parte.

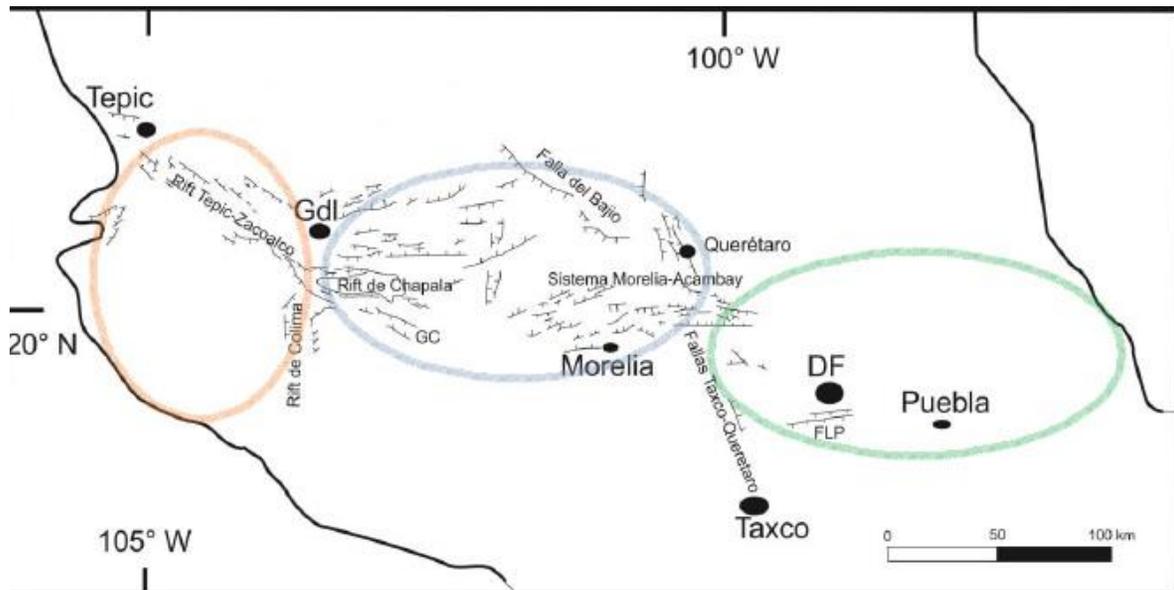


Figura 5. División de la Faja Volcánica Transmexicana. Modificada de Ferrari et al., (2012).

Demant (1978) se refiere a la faja volcánica transmexicana como un arco magmático continental, por aproximadamente 8000 estructuras volcánicas y unos cuantos cuerpos intrusivos.

La Faja Volcánica Transmexicana, sobreyace a provincias magmáticas cretácicas y cenozoicas, así como a un basamento heterogéneo de terrenos tecnoestratigráficos de diferentes edades y litologías (Ferrari et al., 2000 y 2012).

Las Derrumbadas se localizan dentro de la cuenca Serdán-Oriental en la zona oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, la cuenca Serdán-Oriental es una cuenca lacustre plana, relativamente ancha caracterizada por pequeños conos de escoria basálticos aislados del Pleistoceno, anillos de toba y volcanes tipo maar de composición basáltica y riolítica (Carrasco-Núñez, 2008). El volcanismo ha estado activo desde el Plioceno, pero en las áreas circundantes el volcanismo inició en el Mioceno (Carrasco-Núñez et al., 1997).

La actividad volcánica dentro de la cuenca Serdán-Oriental, particularmente la mitad norte, ha estado dominada por el depósito de material piroclástico derivado de la caldera de Los Humeros, situada a unos 40 km al Norte de Las Derrumbadas. Como consecuencia de toda esta actividad volcánica se presentan una gran variedad de estructuras volcánicas que incluyen estratovolcanes, volcanes monogenéticos,

conos cineríticos, axalapascos, xalapascos (Las estructuras tipo maar se conocen como axalapascos cuando existe agua en el cráter, que en Náhuatl significa “cuenco de tierra y arena con agua”) y numerosos domos. La composición de estos volcanes varía de riolita a basalto (Ferrari et al., 1999).

La actividad se inició con el emplazamiento de la ignimbrita Xaltipan (Ferriz y Mahood, 1985). Dos ignimbritas voluminosas emplazadas aproximadamente 0,46 Ma (Ferriz y Mahood, 1984) están ampliamente distribuidas y cubren la mayor parte de la parte norte de la cuenca Serdán-Oriental. Al Este, la sierra Negra-Citlaltépetl-Cofre de Perote de estratovolcanes andesíticos cuaternarios forma una marcada brecha topográfica que separa la llanura alta de la llanura costera del Golfo de México. Al Sur se encuentra una serie de rocas sedimentarias mesozoicas altamente plegadas y falladas. Al Oeste se encuentra el volcán andesítico Cerro Grande del Mioceno y el estratovolcán andesítico-dacítico del Pleistoceno La Malinche (Carrasco-Núñez et al., 2012).

Las rocas que afloran en la región son ígneas, sedimentarias y metamórficas con edades que varían desde el Pérmico Tardío al Reciente (Gómez-Valle, 1968). El basamento regional se compone principalmente de calizas cretácicas que están expuestas en algunos afloramientos aislados dentro de la cuenca, así como pequeñas intrusiones del Mioceno de composición granodiorítica, monzonítica y sienítica (Yañez y García, 1982; Viniegra, 1965).

Las rocas más antiguas que afloran en el área se originaron en el Paleozoico con el depósito de sedimentos clásticos. Estos sufrieron un metamorfismo regional de bajo grado, datado en 207 m.a., y están en la actualidad representados por esquistos de cuarzo y muscovita, íntimamente ligados a un batolito de composición granodiorítica y granítica de 246, 181 y 131 m.a., respectivamente; en conjunto, constituyen un núcleo de grandes dimensiones que, desde el punto de vista estructural, corresponde a un domo conocido como Macizo Teziutlán (Yañez y García, 1982).

Hubo una sucesión sedimentaria Mesozoica, de 3000 m de espesor aproximadamente, formada principalmente por calizas y lutitas, que fueron plegadas y afalladas durante la compresión Laramidica, e intrusionadas por cuerpos de granodiorita y sienita de edad Terciario Temprano (Viniegra 1965). Las Rocas sedimentarias del Mesozoico están cubiertas por lavas andesíticas y ferrobásalticas (Ferriz y Mahood, 1984).

## **2.2 Geología local**

Los domos riolíticos de Las Derrumbadas, con actividad fumarólica y alteración rocosa extensa, situadas en el centro de la cuenca cerrada Serdán-Oriental, son importantes debido a su potencial geotérmico (Yañez-García y Casique, 1980). Tienen una superficie de unos 15 mil km<sup>2</sup> y una altitud de aproximadamente 2300 m.s.n.m. Están rodeados de estrato-volcanes y calderas del Mioceno al Cuaternario

de composición principalmente andesítica a dacítica (Siebe, y Verma., 1988; Ferriz y Mahhod 1984).

Toda la zona está cubierta por calizas cretácicas que se plegaron durante la orogénesis Laramide y fueron intrusionadas por una monzonita de poca profundidad aproximadamente 32 m.a. atrás (Yañez-García y Cacique, 1980). Los sedimentos terrigenos y lacustres se depositaron después del terciario y se intercalaron con los productos de la actividad volcánica que inició en el Mioceno/Plioceno (Siebe, y Verma., 1988).

Una buena preservación morfológica de las estructuras volcánicas indica que la mayoría son de edad Cuaternaria. La geología superficial de la zona está dominada por los domos de Las Derrumbadas y sus extensas deposiciones de taludes. (Siebe C., Verma S.P. 1988).

Las unidades más jóvenes consisten en materiales fluídicos laharicos que son gruesos, sin clasificar y casi siempre no consolidados. Su génesis está fuertemente relacionada con la naturaleza inestable de las laderas de estos domos altamente degradados. Los domos deben haber sido extruidos en estado casi sólido en un periodo de tiempo relativamente corto (Yañez-García y Casique, 1980).

Los domos consisten en una riolita gris con biotita y fenocristales de plagioclasas, situados en una matriz vítrea punteada con cristales de feldespato. Además contiene fenocristales esporádicos de granate. Las fumarolas que se pueden observar en muchas partes de los domos al SW son indicativos de un sistema geotérmico todavía activo probablemente inducido por un depósito de magma de bajo nivel. Hay gran número de sitios en ambos domos que muestran una alteración intensa de la roca (principalmente caolinitización) revela que la actividad fumarólica debe haber sido mucho más intensa en el pasado. En la periferia de los domos se producen varias estructuras monogenéticas tales como los maars, los conos de ceniza y los flujos de lava (Siebe 1986).

El basamento local es ígneo y metamórfico, aflorando al N de la caldera de Los Humeros, cerca de la ciudad de Teziutlán. Estas rocas son principalmente graníticas y granodioríticas en composición, que fueron emplazados durante el Mesozoico. Los estudios geocronológicos de muestras pertenecientes a este complejo basal arrojaron edades de 246 + 7 m.a. (Pérmico tardío) y 181 + 5 Ma (Triásico Tardío y Jurásico Temprano), para una granodiorita con biotita y una granodiorita con biotita y hornblenda. Las rocas metamórficas están representadas por esquistos verdes (edad radiométrica de 207 + 7 Ma, Triásico Tardío) (Ruiz-Sainz, 1978).

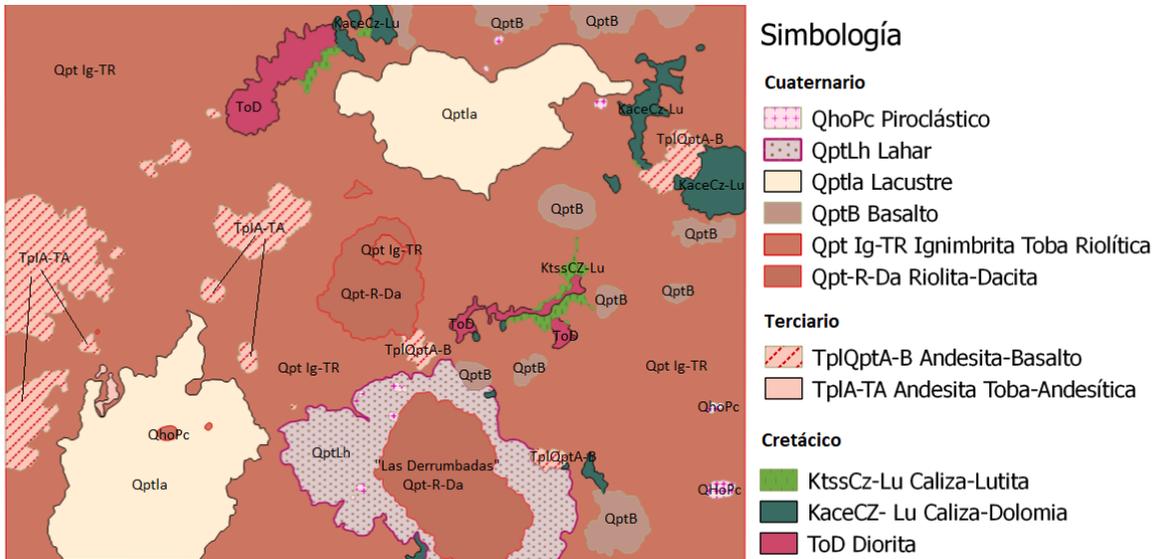


Figura 6. Geología local reportada por el SGM 2011.

### 2.3 Evolución

Hay discusión acerca de la edad de los domos ya que un estudio basado en el método K-Ar dice que la edad de los domos es de 320 000 años reportado por Yañez-García y Casique en 1980. De acuerdo a observaciones morfológicas la edad de los domos está en el rango de los 10 000 y 40 000 años (Siebe 1985). La intensa degradación de los domos aparentemente parece apoyar esta datación, pero varias líneas de evidencia de campo indican una edad mucho más joven. Además de la casi completa falta de suelo, el argumento más fuerte que apoya una edad mucho más joven es la superficie “moundy” de algunos de los depósitos más antiguos, una característica morfológica que debe haber sido adquirida por el drenaje directamente después de la deposición. Si los domos fueran tan antiguos como las indicadas por las mediciones de K-Ar, esta característica habría sido completamente erosionada ya que la cuenca del Serdan-Oriental contenía extensos lagos durante las épocas de hielo (Siebe et al., 1995).

Los domos de Las Derrumbadas se emplazaron sobre una sucesión sedimentaria Mesozoica, de aproximadamente 3000 m de espesor, principalmente formada por calizas y lutitas, que fueron plegadas y falladas durante la compresión Laramidica, e intrusionadas por cuerpos de granodiorita y sienita correspondientes al Terciario temprano. Esta sucesión se piensa que sobreyace al basamento cristalino metamórfico paleozoico e intrusivo, que aflora en el macizo Teziutlán, al noroeste de Las Derrumbadas (Viniegra, 1965).

Durante el Jurásico Tardío y el Cretácico, el área que ocupa actualmente la Cuenca de Libres-Oriental permaneció sumergida. En el Jurásico Tardío se encontraba entre la plataforma de Tamaulipas y la península de Oaxaca (Yañez-García y

García-Duran, 1982). Para finales del Jurásico los mares eran extensos y aumentaban la profundidad del piso marino, factor que reguló la precipitación de los carbonatos (SGM, 2011).

Durante todo el Cretácico permaneció en iguales condiciones como consecuencia de una gran transgresión que dio origen a una serie de cuencas, cuyo levantamiento se debió a los esfuerzos provenientes del Suroeste. Estos se iniciaron a fines del Cretácico y terminaron probablemente en el Eoceno durante la Orogenia Laramide, que causó fracturamientos y fallamientos en varias direcciones (YáñezGarcía y Casique-Vásquez. 1980).

Hacia el Albiano-Cenomaniano ocurre el máximo desarrollo de las plataformas y los cambios de facies, además de que las cuencas reciben un considerable aporte de sedimentos calcáreo-arcillosos. A finales del Cenomaniano y principios de Turoniano, se manifiestan las primeras pulsaciones de la Orogenia Laramide con el levantamiento de las regiones occidental y central de México, el consecuente plegamiento y los sistemas de fallas dúctiles que afectan las formaciones mesozoicas y del Terciario Inferior. De esta manera se depositan en la cuenca Tampico-Misantla, Calizas arcillosas de la Formación Agua Nueva con una sedimentación cada vez más arcillosa que alcanza niveles tobáceos en la Formación San Felipe (SGM, 2011).

Viniegra-Osorio, 1965, considera la actividad volcánica del Terciario Superior aprovechó las fracturas y fallas que se desarrollaron en las rocas calcáreas durante el levantamiento orogénico, dando origen a los macizos andesíticos que limitan la región, tanto al oriente como al occidente: volcanes Cofre de Perote, Pico de Orizaba, Sierra Negra, La Malinche y Sierra de Tlaxco, así como a los sistemas volcánicos de San Salvador El Seco, Las Derrumbadas y Los Humeros.

En la Figura 7, se puede observar la evolución geológica de los domos, a través de diferentes épocas en la escala geológica del tiempo.

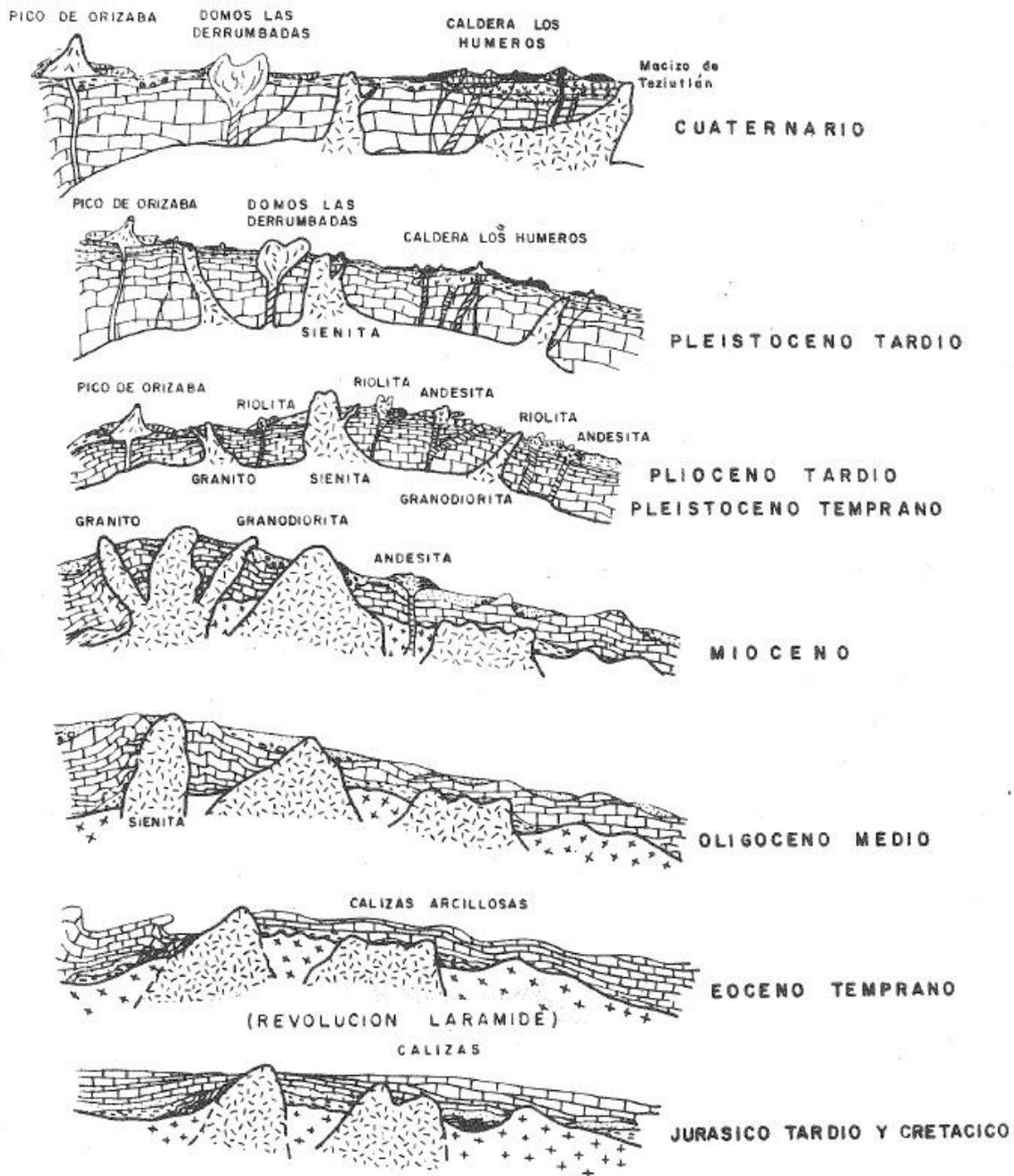


Figura 7. Evolución geológica de la Cuenca de Libres-Oriental, zona Las Derrumbadas. Tomada de Yañez-García y García-Duran, 1982.

Por otra parte, el Eje Neovolcánico Transmexicano se configuró de manera gradual desde el Mioceno Medio-Tardío como resultado de una rotación anti-horaria del arco que formó la Sierra Madre Occidental, por lo que durante el Oligoceno Medio se emplazaron rocas ígneas intrusivas de composición diorítica que afectaron a la secuencia sedimentaria. Para el Mioceno Medio existe actividad volcánica andesítica que se considera la base de la caldera de Los Humeros; posteriormente

se emplazan rocas ácidas a través de complejos dómicos de composición riolítico-dacítica como es el caso de la Riolita Oyameles. En el Mioceno tardío dio comienzo la actividad ígnea efusiva con derrames de composición andesítica que sirvieron de basamento a un grupo de rocas volcánicas posteriores, representadas por andesitas, andesitas basálticas, basaltos y dacitas, que corresponden al Plioceno medio. Los primeros derrames presentes en el área son de composición intermedia (andesitas y latitas), y están localizados sobre las grandes fracturas a ambos lados de la Cuenca de Libres-Oriental (Yañez-García y García-Duran, 1982).

Al centro del área, como consecuencia del fracturamiento de dirección NW-SE y en intersección con el fracturamiento más reciente de dirección NE-SW y N-S, emergieron Los Domos las Derrumbadas; que son de composición riodacítica (Romero, 1965).

El magma que originó los domos Las Derrumbadas ascendió hasta la superficie en forma muy lenta y casi en estado sólido, lo que produjo que emergiera con gran parte de los materiales preexistentes (Yañez-García y García-Duran, 1982).

Su origen puede explicarse por el ascenso, el rompimiento y el resquebrajamiento de los materiales preexistentes (calizas, andesitas, tobas y arenas volcánicas) debido a la presión que el avance de los domos ejerció sobre ellos durante su ascenso. La pérdida del estado de equilibrio aunada al efecto de las lluvias produjeron los deslizamientos y las avalanchas formando los lahares (Yañez-García y García-Duran, 1982).

Dado que muchos factores suelen influir en el estilo eruptivo del magma ascendente parecen ser casi idénticos para la formación de los distintos domos de la cuenca Serdán-Oriental. El domo NW de Las Derrumbadas se eleva a más de 1000 metros sobre las llanuras circundantes y tiene un volumen aproximado de 6-7 km<sup>3</sup>. El domo consiste principalmente de una riolita gris, microcristalina que ha sido alterada en muchas áreas debido a la actividad fumarólica. El domo está rodeado de extensos depósitos de avalanchas de escombros. Estos depósitos de avalancha de escombros contienen una mezcla caótica de bloques de todos tamaños incluyendo sedimentos lacustres, calizas y obsidiana de bandas grises en una matriz arcillosa blanquecina (Siebe et al., 1995).

El domo SE de Las Derrumbadas de la misma altura que el domo NW y muestra muchas de sus características. Estando rodeado por los depósitos de avalanchas de la primera generación, así como por depósitos de avalanchas de escombros de roca seca más recientes que cubren en parte a los más antiguos. Los recientes depósitos de avalanchas de escombros tienen características muy diferentes. No son tan extensas, forman lenguas morfológicamente alargadas con frentes escarpados y tienen superficies planas. Además, son menos gruesas y consisten casi en su totalidad de riolita gris microcristalina del núcleo del domo. Muestran áreas de alteración intensa en caolinita relacionadas con el debilitamiento del edificio después de una prolongada actividad fumarólica. Estas avalanchas fueron probablemente provocadas por terremotos y las fumarolas actualmente activas en

varios puntos sugieren posible ocurrencia de otras avalanchas en el futuro (Siebe et al., 1995).

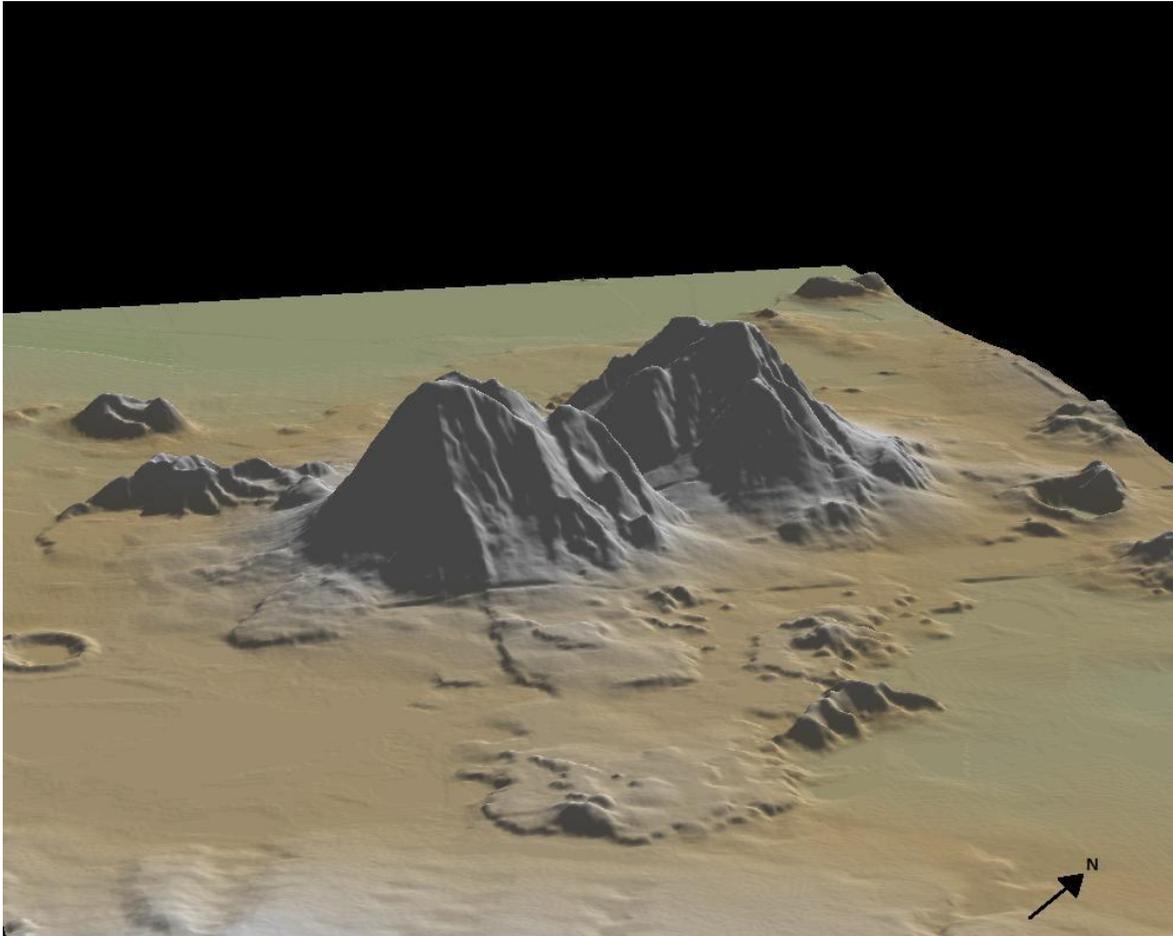


Figura 8. Imagen 3D de los domos Las Derrumbadas, objeto de nuestro estudio.

## 2.4 Estratigrafía

### Cretácico

#### Formación Orizaba

En el área de los Humeros-Las Derrumbadas, las rocas que constituyen la formación Orizaba (Viniestra-Osorio, 1965) son calizas de tipo arrecifal con abundante fauna betónica y corresponden a un cambio de facies con los sedimentos de cuenca de la Formación Tamaulipas Superior.

Por lo general la Formación Orizaba se presenta en forma masiva, y únicamente en las zonas de transición o cambio de facies se halla estratificada; forma grandes bancos con abundantes fragmentos de megafósiles tales como caprinidos,

gasterópodos (turritelas y nerineas), corales y fragmentos de pelecípodos (Yáñez-García y Casique-Vásquez, 1980).

La formación Orizaba aflora al pie suroriental de Las Derrumbadas, en las inmediaciones de los poblados de Tepetitlán y Paso Nacional donde es claro el contacto transicional con los sedimentos de la Formación Guzmantla (Fernández-Becerra, 1977).

### **Formación Guzmantla**

La Formación Guzmantla (Viniegra-Osorio, 1965) está bien representada en el área estudiada por una calcarenita biógena parda clara a crema en capas potentes, alteradas por disolución y cubiertas por gruesas capas de caliche que la enmascaran en superficie, y que se encuentran parcialmente recristalizadas. Su clasificación de campo varía de mudstone a capas de packstone y grainstone. El espesor de las capas es muy potente y varía de 0.4 a 2.2 m. En algunas localidades se aprecian capas de caliza clástica y conglomerática y algunos estratos con nódulos de pedernal.

Esta formación se encuentra distribuida en la parte central del área estudiada al pie suroriental de Las Derrumbadas. Al igual que la Formación Orizaba presenta buenas características de porosidad primaria y secundaria, lo que la hace importante como receptora de fluidos (Yáñez-García y García-Duran, 1982).

### **Formación Agua Nueva**

La Formación Agua Nueva en área está formada por calizas arcillosas de colores gris oscuro y claro y pardo claro, con texturas que varían entre mudstone, wackstone y packstone, en capas de 1 a 40 cm, con abundancia de lentes, bandas y nódulos de pedernal de varios tamaños. Contiene intercalaciones delgadas de arcilla bentonítica gris verdosa y pardo-crema oscuro (López-Ramos, 1979).

Las calizas de la Formación Agua Nueva se encuentran ampliamente distribuidas en el centro del área estudiada, aflorando también en la parte Sur de la Sierra de Yolotepec, en los pequeños lomeríos frente a la Laguna de Alchichica (Yáñez-García y García-Duran, 1982).

### **Formación San Felipe**

En el área, la Formación San Felipe (López-Ramos, 1979) está constituida por calizas arcillosas verdes y gris verdosas que, por intemperismo, adquieren una coloración parda clara y crema que generalmente forma una aureola. Presenta una textura fina de mudstone a wackstone con estratos muy locales con estratos muy locales de packstone y grainstone. La coloración verdosa característica se debe a la presencia de horizontes delgados de bentonita.

Los afloramientos de esta Formación se localizan casi al centro del área estudiada, siguiendo una franja alienada NW-SE y de forma muy local al sur del área, frente a la Laguna de Alchichica (Yañez-García y García-Duran, 1982).

## **Terciario**

### **Rocas ígneas intrusivas**

El emplazamiento de las rocas ígneas intrusivas ácidas a poca profundidad tuvo lugar al inicio del Terciario, aprovechando las zonas de debilidad que se produjeron durante el plegamiento, fracturamiento y fallamiento ocasionados por los grandes esfuerzos a que estuvo sometida la región durante la Revolución Laramide. Estas rocas están representadas por granitos, sienitas y granodioritas con estructuras de tronco y diques asociados (Yañez-García y Casique-Vásquez, 1980).

Los Granitos y Sienitas están alineados en dirección NE-SW, formando dos sistemas bien definidos: uno constituye la Sierra de Tepeyahualco en donde aflora el granito y el otro está representado por las Sienita, expuesta al en la punta norte y sur de la Sierra Techachalco. Las rocas del primer sistema, varía en composición entre una roca microgranítica. Los máficos principales son la augita y la hornblenda, acompañado en ocasiones por biotita. El segundo sistema esta formado por sienita alcalina, bajo microscopio, su textura es holocristalina, equigranular fina e hipidiomórfica, está compuesta por microclinina pestítica y escasa oligoclasa. Como minerales presenta granate, flogopita y apatita y como secundarios, epidota, sercita y calcita (Romero, 1985).

En las inmediaciones del intrusivo y cercanas al contacto con las rocas calcáreas se tienen rocas de color verde, textura porfídica en matriz microcristalina, con andesina y oligoclasa como minerales esenciales. Los máficos se encuentran alterados a calcita y clorita y magnetita (Yañez-García y Casique-Vásquez, 1980).

## **Cuaternario**

### **Riolita Oyameles**

Se dio el nombre de Riolita Oyameles a una serie de rocas de composición riolítica que están bien representadas en el área estudiada por domos riolíticos, derrames esferulíticos, vitrificados riolíticos, traquíticos y riodacíticos, así como por tobas riolíticas; se tomó como localidad típica al cerro del mismo nombre, que constituye al límite occidental de La Caldera los Humeros (Yañez-García y Casique-Vásquez, 1980).

Asociando a este evento magmático los domos de Las Derrumbadas, constituidos por rocas de color gris claro, holocristalinas porfídicas, con plagioclasas, cuarzo, hornblenda, hiperstena, augita y magnetita (Romero, 1985)

El domo Oyameles está constituido por una riolita porfídica con fenocristales de plagioclasa sódica, sanidino y cuarzo (Cepeda-Dávila, 1978).

### Formación Tenamastepec

Se da este nombre a una serie de basaltos escoriáceos de olivino, andesitas y dacitas, acompañados por emisiones de cenizas de composición basáltica. Las rocas de esta formación representan la última actividad ígnea volcánica de la región y cubre en forma discordante los derrames de la Formación San Antonio, los lahares y los sedimentos lacustres. Debido a sus características estructurales, texturales y mineralógicas, se distinguieron dos miembros: El Limón y el Arenas, siendo este último el más reciente. El espesor estimado de los derrames de la Formación Tenamastepec es de 20 a 50 m (Yáñez-García y García-Duran, 1982).

### Lahares de Las Derrumbadas

La serie de lahares presentes en la base de las estructuras domicas está constituida por bloques y fragmentos de diversos tamaños de calizas, andesitas y dacitas en una matriz areno-arcillosa, con un espesor estimado de 50 a 150 m. (Romero, 1985).

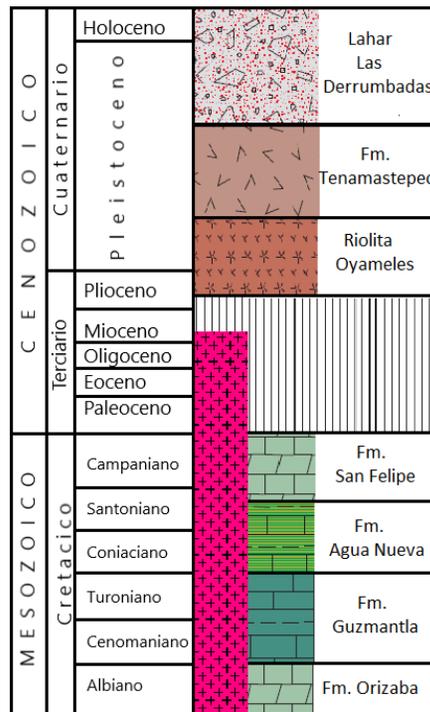


Figura 9. Columna estratigráfica del área de estudio (Modificada del SGM, 2011).

## Capítulo 3

### Marco Teórico

#### 3.1 Método Magnético

El método magnético es uno de los métodos geofísicos más antiguos y por tanto más utilizados para la exploración y caracterización de la dinámica terrestre y su interior; su grado de complejidad radica en que el campo magnético es dipolar, su dirección es variable y varía con el tiempo (Telford et al., 1990).

El campo magnético terrestre se conoce desde hace muchos años pues era utilizado para la navegación mediante la brújula, su aparición en Occidente se estima fue en el siglo XII, pero existe la posibilidad de que en China hubiera sido utilizada algunos siglos antes (Vallina y Rodríguez, 1997). No obstante fue hasta el año 1600 que la comunidad científica empieza a considerar al magnetismo como una propiedad fundamental de la Tierra cuando Sir William Gilbert realizó la primera investigación sobre el magnetismo terrestre a través de su obra "*de Magnete*". En su trabajo Gilbert propone a la Tierra como un gran magneto, explicando así el por qué la brújula apunta hacia el Norte. El método magnético, como todos los métodos geofísicos, es un método indirecto el cual mide las variaciones del campo magnético terrestre. La toma de datos magnéticos se realiza midiendo el campo magnético de la superficie terrestre sobre un perfil o línea en puntos equidistantes con instrumentos llamados magnetómetros. El método magnético es útil para definir rasgos estructurales en la superficie del basamento.

#### 3.2 Campo Magnético Terrestre

Desde el punto de vista del geomagnetismo, la tierra puede se considerar que está constituida por tres partes: núcleo, manto y corteza. Los procesos de convección en la parte líquida del núcleo de hierro dan lugar a un campo geomagnético dipolar que se asemeja al de un gran imán de barra alineado aproximadamente a lo largo del eje de rotación de la Tierra.

El manto desempeña una pequeña parte en el magnetismo terrestre, mientras que la interacción del campo geomagnético con las rocas de la corteza terrestre produce las anomalías magnéticas (Reeves, 2005)

La fuerza magnética terrestre es un campo potencial que provee información de la naturaleza de los materiales que componen la Tierra a través de sus propiedades físicas (Lillie, 1999). A partir de numerosos estudios se ha concluido que el campo magnético de la Tierra existe a raíz de corrientes de convección en el núcleo externo de la Tierra (Campbell, 1997). El campo magnético de la Tierra se asemeja a una barra de imán con una inclinación de  $11.5^\circ$  grados con respecto al eje de rotación de la Tierra, el campo se comporta como una esfera magnetizada cuyo polo norte

magnético se ubica en el Hemisferio Sur de la Tierra y el polo sur magnético en el Hemisferio Norte; la atracción generada entre ambos polos produce líneas de fuerza magnéticas imaginarias que se consideran como un flujo desde el Polo Sur hacia el polo norte, las líneas de campo magnético son usualmente representadas con un pequeño imán como muestra la Figura 10.

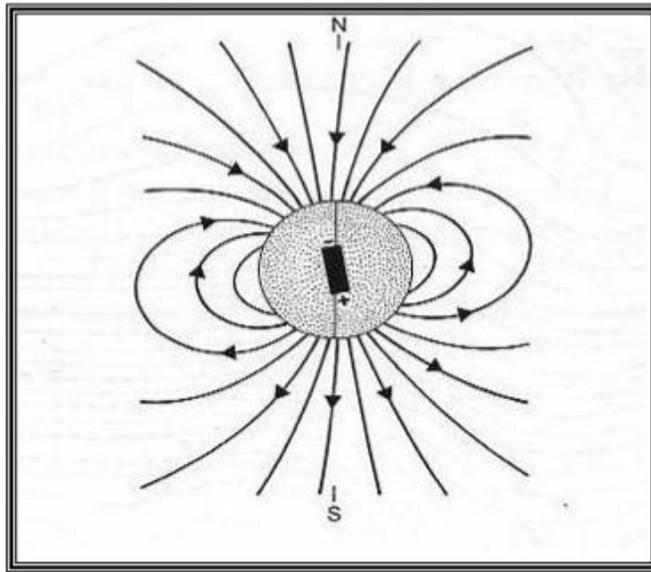


Figura 10. Líneas del campo magnético (Tomada de Burger, 1992)

El campo magnético en unidades del SI (Sistema Internacional) se define en términos del flujo de corriente eléctrica necesaria en una bobina para generar dicho campo. Como consecuencia, las unidades de medida son voltios-segundos por metro cuadrado o Weber/m<sup>2</sup> o Teslas (T). Se estima que el campo magnético de la Tierra tiene una intensidad de aproximadamente 50,000 nanoTeslas (*nT*) (Sheriff, 2002).

En magnetometría las unidades más usadas son:

1 Oersted = 1 Gauss = 10<sup>5</sup> gamma = 10<sup>5</sup> nT (T=Tesla), 1 gamma = 10<sup>-9</sup> T = 1nT.

El campo magnético terrestre se conforma por dos campos principales: el campo interno y el campo magnético externo. El campo magnético interno es el más importante pues constituye el 99% del campo magnético total, éste proviene del interior de la Tierra y teóricamente este campo puede representarse como el campo producido por una serie de dipolos magnéticos con diferente orientación situados en el centro de la Tierra (Robinson y Coruh, 1998).

El campo magnético externo es el que se produce por corrientes inducidas en la ionósfera al desplazarse esta respecto al campo terrestre, este desplazamiento se debe principalmente al movimiento ascendente de convección por el calentamiento diurno del sol y a las mareas atmosféricas que dependen de la posición de la luna y el sol (Robinson y Coruh, 1998).

### 3.2.1 Componentes del Campo Geomagnético

Para estudiar los componentes de la intensidad del campo magnético terrestre se toma como sistema de referencia, en un punto de la superficie de la Tierra, un sistema cartesiano de coordenadas **XYZ** en la dirección Norte, Este, Nadir, o sistema geográfico, en el que el Norte es el Norte Geográfico, o proyección sobre el plano horizontal de la dirección del eje de rotación de la Tierra y se elige positiva la dirección del eje **Z** hacia abajo por ser ésta la dirección del campo magnético en el Hemisferio Norte (Reeves, 2005).

La Figura 11 muestra geoméricamente que la intensidad del campo magnético es **F**, su proyección horizontal **H** señala el Norte Magnético y el ángulo que forma esta dirección con el Norte geográfico es **D**, la declinación magnética, positiva hacia el Este y negativa hacia el Oeste. El ángulo entre **F** y la horizontal es **I**, el ángulo de inclinación. Las relaciones entre los diversos componentes de **F** son:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$D = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

$$I = \tan^{-1} \frac{Z}{H}$$

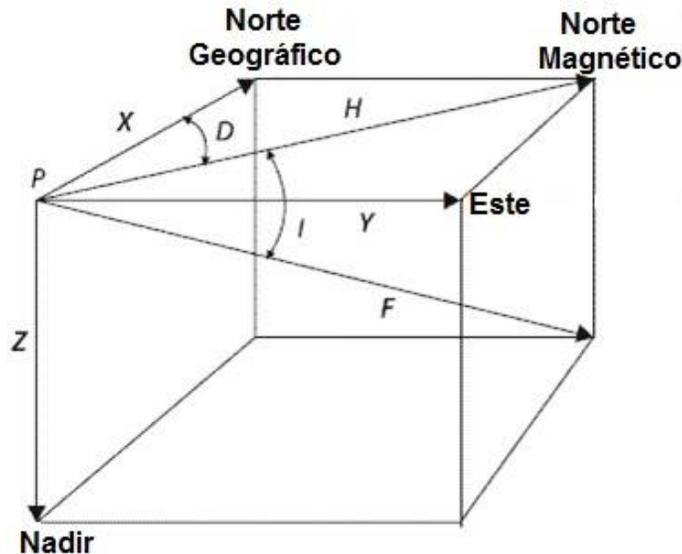


Figura 11. Componentes del campo geomagnético (Imagen modificada de Reynolds, J. M., 1997).

### 3.3 Componentes básicos de la fuerza magnética

#### 3.3.1 Polos Magnéticos

Son regiones cerca de los extremos de una barra magnética, donde sus propiedades están concentradas. Estas regiones son llamadas polos magnéticos (Serway, 1997).

#### 3.3.2 Fuerza Magnética

La fuerza magnética es definida por la Ley de Coulomb, representada por la formula:

$$F = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^2}$$

Donde  $F$  es la fuerza magnética, que actúa sobre los dos polos con valores de fuerza polar  $p_1$  y  $p_2$ , separados por una distancia  $r$  y la permeabilidad magnética  $\mu$  es una propiedad del medio en el cual se encuentran localizados los polos. En el vacío  $\mu = 1$  (Sheriff, 2002).

#### 3.3.3 Campo Magnético

Un campo magnético  $H$ , es la fuerza que experimenta un polo magnético positivo de intensidad unidad, debido a la presencia en el espacio del polo magnético considerado y queda definido como el cociente entre la intensidad  $P$  de un polo magnético aislado (Sheriff, 2002).

$$H = \frac{P}{r^2}$$

#### 3.3.4 Magnetización

Todos los materiales magnéticos al ser colocados en un campo magnético adquieren polos magnéticos en su superficie. La intensidad de magnetización ( $J$ ), puede ser considerada como la fuerza inducida por el polo y por unidad de superficie a lo largo de una superficie normal al campo inducido (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

$$J = \frac{d\bar{M}}{dv}$$

#### 3.3.5 Momento Magnético

El momento magnético es igual al producto de la intensidad de un polo por la distancia entre los dos, eso quiere decir que dos imanes son idénticos si sus momentos lo son. No importando sus dimensiones o intensidades de polo por separado (Sheriff, 2002).

$$\bar{M} = p\bar{r}$$

### 3.3.6 Permeabilidad Magnética

Cuando una sustancia o cuerpo es introducida en un campo magnético (**H**), se inducen polos y por lo tanto líneas de fuerza dentro de ella. La cantidad total de líneas por centímetro cuadrado es el flujo magnético (**B**), que podrá ser mayor o menor que las del campo (**H**) original, dependiendo de las propiedades magnéticas de la sustancia o cuerpo. Entonces la permeabilidad magnética (**μ**) es la facilidad con que un campo se puede establecer en una sustancia magnética y se representa por la siguiente fórmula (Sheriff, 2002).

$$\mu = B/H$$

La permeabilidad expresa la modificación de la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos en un medio magnético (Dobrin y Savit, 1988).

### 3.4 Magnetismo de las rocas

Cuando un material magnético se coloca en un campo magnético el material se magnetiza y el campo de magnetización externo es reforzado por el campo magnético inducido en el propio material, esto se conoce como magnetización inducida. Cuando se cierra el campo externo, la magnetización inducida desaparece de inmediato, pero algunos materiales retienen una magnetización permanente o remanente y su dirección se fijará dentro del espécimen en la dirección del campo inductor (ahora desaparecido). Las rocas de la corteza terrestre son, en general, sólo débilmente magnéticas, pero pueden exhibir tanto la magnetización inducida como la magnetización remanente. Las rocas se encuentran inevitablemente dentro de la influencia del campo geomagnético tal como es ahora y, en algunos casos, también registran indicaciones de cómo estaba el campo magnético en el pasado (Robinson y Coruh, 1998).

Las propiedades magnéticas sólo pueden existir a temperaturas por debajo del punto de Curie. La temperatura del punto de Curie se encuentra bastante variable dentro de las rocas, pero a menudo está en el rango de 550 a 600 grados centígrados. La investigación moderna indica que esta temperatura es probablemente alcanzada por el gradiente geotérmico normal a profundidades entre 30 y 40 km en la Tierra, no obstante, la llamada "isoterma de punto Curie" puede ocurrir mucho más cerca de la superficie de la Tierra en áreas de alto flujo de calor (Reeves, C. 2005)

#### 3.4.1 Susceptibilidad Magnética

La magnetización es una magnitud vectorial y viene dada como el momento magnético por unidad de volumen de materia. En el caso de las rocas la capacidad

de magnetizarse o intensidad de magnetización (**J**) y dependerá principalmente del campo magnético (**H**) así como del contenido de minerales susceptibles a magnetizarse, es decir la susceptibilidad magnética. Al someter un cuerpo o sustancia a un campo magnético (**H**), este se magnetiza. Adquiriendo una intensidad de magnetización (**J**) proporcional al campo exterior aplicado.

$$J = kH$$

La constante de proporcionalidad **k**, recibe el nombre de susceptibilidad magnética. Las rocas con alto contenido en minerales ferromagnesianos y ferromagnéticos tienen altos valores de (**k**). La susceptibilidad magnética en unidades SI es una relación adimensional que tiene una magnitud mucho menor que 1 para la mayoría de las rocas. Dicho lo anterior las rocas básicas y ultrabásicas, tienden a tener altos valores de susceptibilidades magnéticas mientras que las rocas ácidas y metamórficas presentan valores intermedios a bajos y las rocas sedimentarias tienen un valor muy bajo de susceptibilidad magnética (Telford, et al., 1990).

La Tabla 1 presenta con los valores de susceptibilidad magnética de algunas rocas pertenecientes a los tres grandes grupos de tipo de roca.

Tipo de roca	Susceptibilidad $\times 10^{-3}$ (SI)	
	Rango	Promedio
<b>Sedimentarias</b>		
Dolomita	0 – 0.9	0.1
Calcita	0 - 3	0.3
Arenisca	0 - 20	0.4
Lutitas	0.01 – 15	0.9
<b>Metamórficas</b>		
Anfibolita		0.7
Gneiss	0.1 - 25	
Cuarcita		4
Serpentina	3 - 17	
<b>Ígneas</b>		
Granito	0 – 50	2.5
Riolita	0.2 - 35	
Grabo	1 - 90	70
Basalto	0.2 -175	70
Diorita	0.6 - 120	85
Peridotita	90 - 200	150
Andesita		160

Tabla 1. Susceptibilidad magnética de las rocas más comunes (Tomada de: Telford, et al., 1990).

### 3.5 Tipos de Magnetización

Aunque el concepto de susceptibilidad es simple desde el punto de vista de su derivación matemática, la magnetización medida en el laboratorio es el resultado de la combinación de propiedades atómicas y macroscópicas. Al someter la materia a un campo exterior se presentan diferentes tipos de fenómenos magnéticos, de acuerdo a las descripciones dadas por (Caballero, 2011)(Figura 12):

**Diamagnetismo:** Consiste en una variación del radio y de la velocidad de giro de los átomos, con lo que varía el momento magnético de éstos, de forma que esta variación se opone al campo magnético exterior de acuerdo con la ley de Lenz. En otras palabras, en presencia de un campo magnético la magnetización inducida es en sentido opuesto a la dirección del campo. Las sustancias que presentan diamagnetismo son llamadas diamagnéticas como ejemplo la sal, el bismuto, la anhidrita, la halita, el yeso, cuarzo, grafito, calcita entre otros. El resultado de este diamagnetismo es que el campo magnético es menor en el interior de estos cuerpos y presentan una susceptibilidad  $<0$ .

**Paramagnetismo:** En espacio libre, los momentos están orientados de manera aleatoria, la suma de los momentos se cancela  $\mathbf{M} = \mathbf{0}$ . El campo magnético externo produce un momento que tiende a alinear los dipolos magnéticos en la dirección del campo. Pero en presencia de un campo exterior, se ordenan de forma que refuerzan la acción de éste y presentan susceptibilidad  $>0$ , al alcanzar la temperatura de Curie el paramagnetismo ya no se observa. Como ejemplo de sustancias paramagnéticas son arcilla, anfíboles, piroxenos, olivinos, micas, sulfato de hierro, platino, aluminio, etc.

**Ferromagnetismo:** Se presenta solo en el estado sólido en el que las fuerzas interatómicas son lo suficientemente grandes como para producir un paralelismo de los momentos atómicos de un conjunto de átomos próximos, que forman los llamados recintos de Weiss. Son estos recintos los que se ordenan al someterlos a un campo exterior, en un fenómeno similar al paramagnetismo.

El valor de la susceptibilidad de estos materiales es mucho más alto que los paramagnéticos, y además depende de la historia previa del material. Por ejemplo, se encuentra el hierro, el acero, el cobalto, el níquel, la magnetita, la ilmenita, entre otros.

**Antiferromagnetismo:** Aquí la magnetización está balanceada, es decir, los momentos magnéticos de la roca se encuentran ordenados por pares en sentidos inversos, así que no existe una magnetización externa por lo tanto no hay magnetización espontánea.

**Ferrimagnetismo:** En este tipo de fenómeno, se produce un ordenamiento de los momentos magnéticos, tal que no todos están alineados en una misma dirección y

sentido, por ello no se consigue anular completamente la magnetización espontánea.

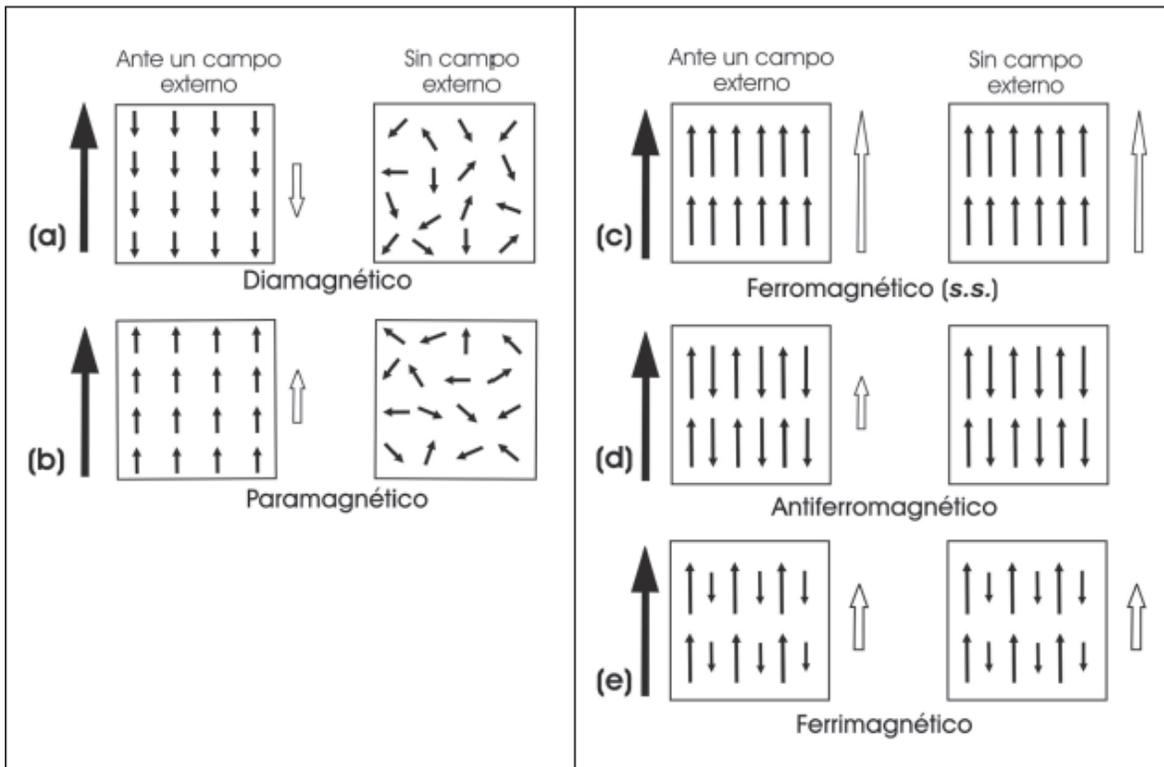


Figura 12. Tipos de fenómenos magnéticos que se presentan en la materia. Las flechas rellenas indican el campo aplicado y las vacías la magnetización del material bajo el campo aplicado. Imagen tomada de susceptibilidades (Tomada de Caballero., 2011).

### 3.5.1 Histéresis

Cuando un material Ferromagnético, sobre el cual ha estado actuando un campo magnético, cesa la aplicación de éste, el material no anula completamente su magnetismo, sino que permanece un cierto magnetismo residual; para desimantarlo será precisa la aplicación de un campo contrario a la inicial, si se aplica al material un campo magnético alterno, su magnetización trazará un bucle llamado ciclo de Histéresis. Se puede observar en la Figura 13 el comportamiento del ciclo de histéresis, partiendo del punto 0 (el origen) en donde el material no ha sido magnetizado nunca y en consecuencia la inducción magnética es nula. En el tramo (0-a) se aumenta la intensidad del campo magnético (H), lo que provoca valores crecientes de inducción hasta llegar a la magnetización de saturación (a). En el tramo (a-b) se va reduciendo la intensidad del campo, así como también la densidad de flujo hasta llegar al punto (b) en donde se ha anulado la intensidad del campo, sin embargo, se presenta un magnetismo remanente. En el tramo (b-c) se invierte el sentido del campo magnético, llegando al punto (c) en donde la inducción es cero y se ha conseguido eliminar por completo el magnetismo remanente. Para ello ha habido que aplicar una intensidad de campo conocida por el nombre de fuerza coercitiva. En el tramo (c-d) se sigue aplicando una intensidad de campo negativa,

con lo que se consiguen niveles de inducción negativas hasta alcanzar la saturación. En los tramos (d-e), (e-f) y (f-a) se completa el ciclo de histéresis. La curva no vuelve a pasar por el punto 0 (el origen) (Butler, 1998).

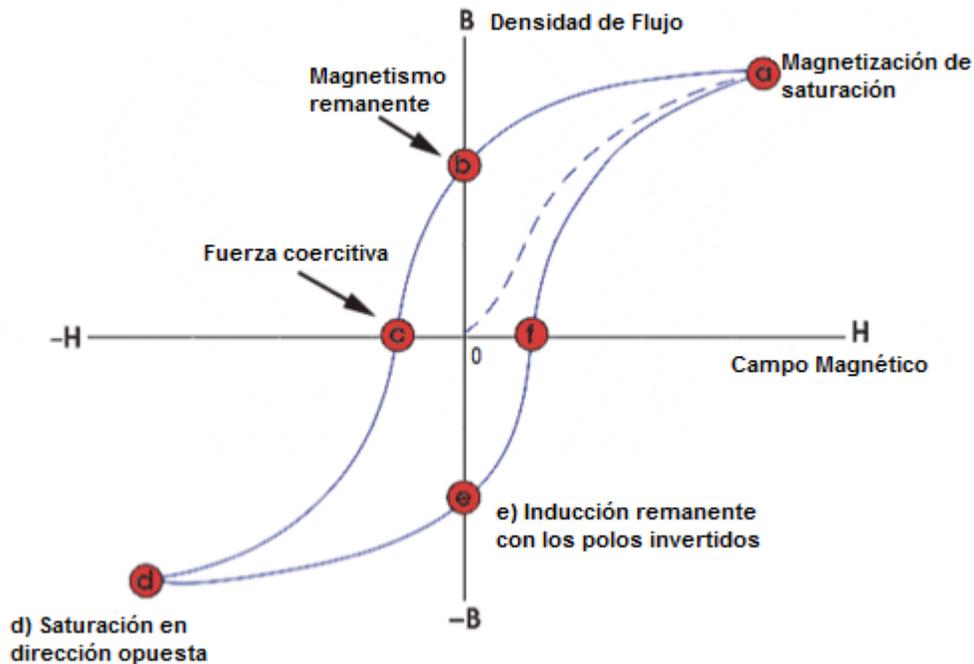


Figura 13. Curva de magnetización de un material ferromagnético. (Imagen modificada de Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

### 3.5.2 Dominios Magnéticos

Un dominio magnético es una región dentro de un material magnético que tiene magnetización uniforme. Esto significa que los momentos magnéticos de los átomos individuales están alineados uno con el otro y que apuntan en la misma dirección. Cuando se enfrían por debajo de la temperatura de Curie, la magnetización de un material ferromagnético divide espontáneamente en muchas regiones pequeñas denominadas dominios magnéticos, cada dominio se comporta como un pequeño imán permanente. En una pieza no magnetizada los dominios se encuentran orientados al azar, por lo que sus efectos se cancelan y no existe magnetización neta medible en el exterior (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007). Los dominios están separados por un borde o una pared conocidas como **paredes de Bloch** (Figura 14).

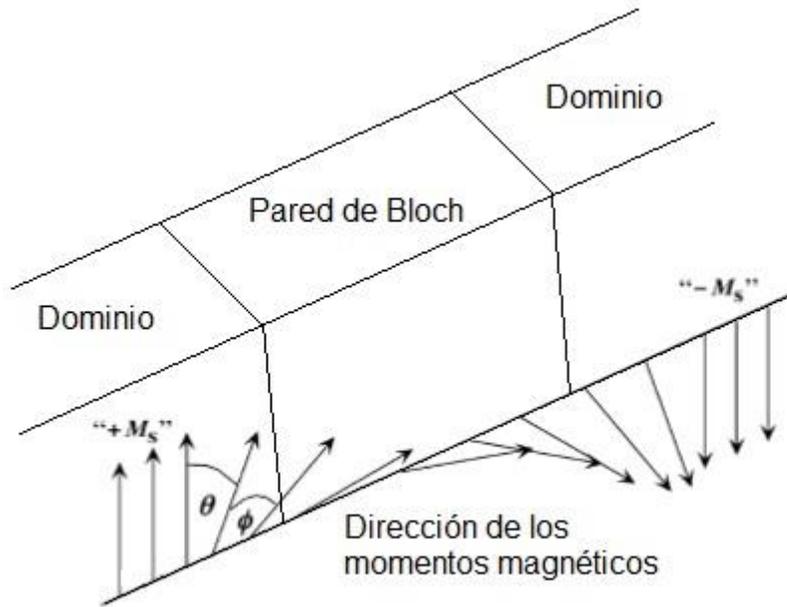


Figura 14. Dominios magnéticos y pared de Bloch. (Modificada de Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

### 3.6 Correcciones magnéticas

Los campos magnéticos externos a la Tierra tienen efecto en las mediciones magnéticas y deben ser eliminados en un proceso de datos, los efectos son producto de la interacción entre el campo de la Tierra y los campos asociados al viento solar (Campbell, 1997).

Las variaciones del campo con respecto al tiempo pueden ir en escalas que van desde segundos hasta millones de años, que tienen un impacto al momento de realizar los levantamientos magnéticos, en la sustracción del campo principal del campo medido para dejar la anomalía. A continuación, se presenta el registro de un magnetómetro que estuvo grabando durante varias semanas (Figura 15).

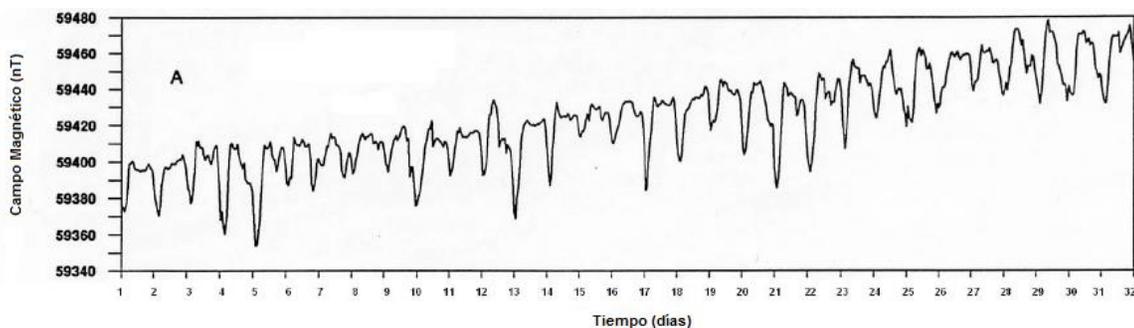


Figura 15. Variaciones del campo magnético en un punto fijo, registrado durante 32 días. (Imagen tomada de Reeves, C. 2005).

### 3.6.1 Variaciones Diurnas

Las variaciones diurnas surgen de la rotación de la Tierra con respecto al sol. El viento solar son las partículas cargadas que emanan del sol, el cual tienden a distorsionar las regiones externas del campo magnético terrestre como muestra la Figura 16. La rotación diaria de la tierra dentro de esta distorsión referenciada por el sol conduce a corrientes ionosféricas en el lado del día del planeta y un ciclo diario de la variación del campo magnético que usualmente tienen una amplitud de 50 nT aproximadamente. La principal variación ocurre hacia el mediodía cuando se observan picos en las latitudes medias y valles cerca del Ecuador (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

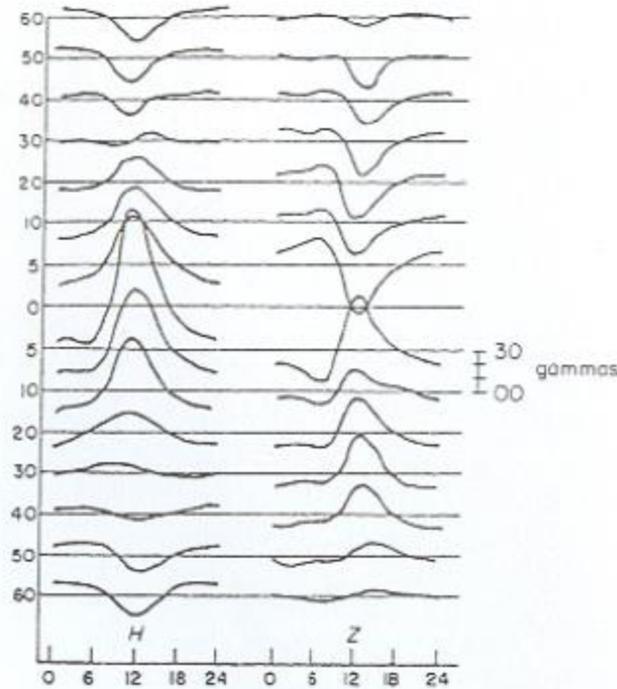


Figura 16. Variación diurna a diferentes latitudes. Tomada de (Robinson y Coruh, 1998).

### 3.6.2 Micropulsaciones

Las micropulsaciones ocurren en una escala de tiempo mucho más corta, comúnmente durante un período tan corto como unos pocos minutos. Si bien sus amplitudes pueden ser sólo unos pocos nT, sus efectos sobre los registros son significativos (Sheriff, 2002). Las micropulsaciones puede cambiar de lugar a lugar a lo largo de unas pocas decenas de kilómetros (Figura 17).

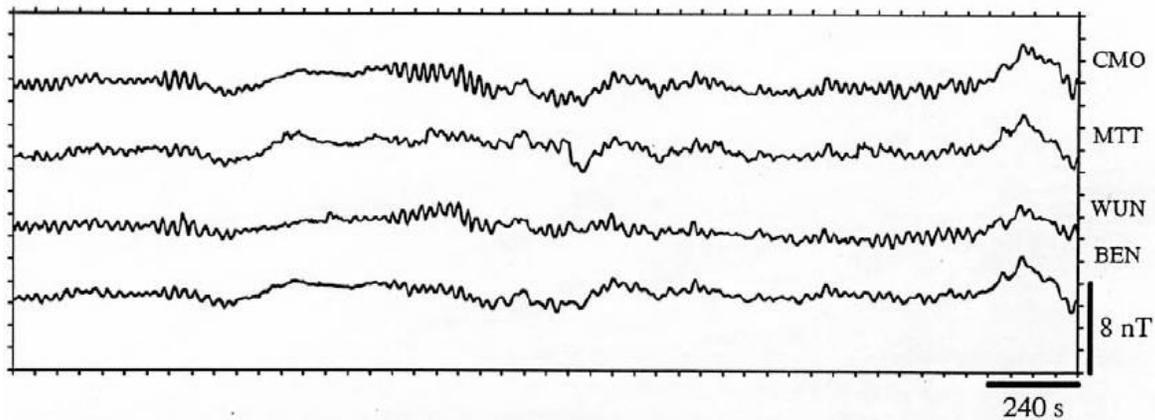


Figura 17. Variaciones del campo magnético registradas a decenas de kilómetros, en la cual se observan las micropulsaciones y su variación de un lugar a otro. (Reeves., 2005)

### 3.6.3 Tormentas Magnéticas

Se caracterizan por períodos aislados de niveles mucho más altos de variación magnética, generalmente correlacionados con la actividad de las manchas solares. Variaciones violentas de varios cientos de nT pueden comenzar repentinamente y continuar durante periodos de más de 24 horas. Su efecto se nota particularmente en las zonas aurorales alrededor de los polos magnéticos de la Tierra. La Figura 18 muestra las variaciones violentas del campo magnético (Robinson y Coruh, 1998).

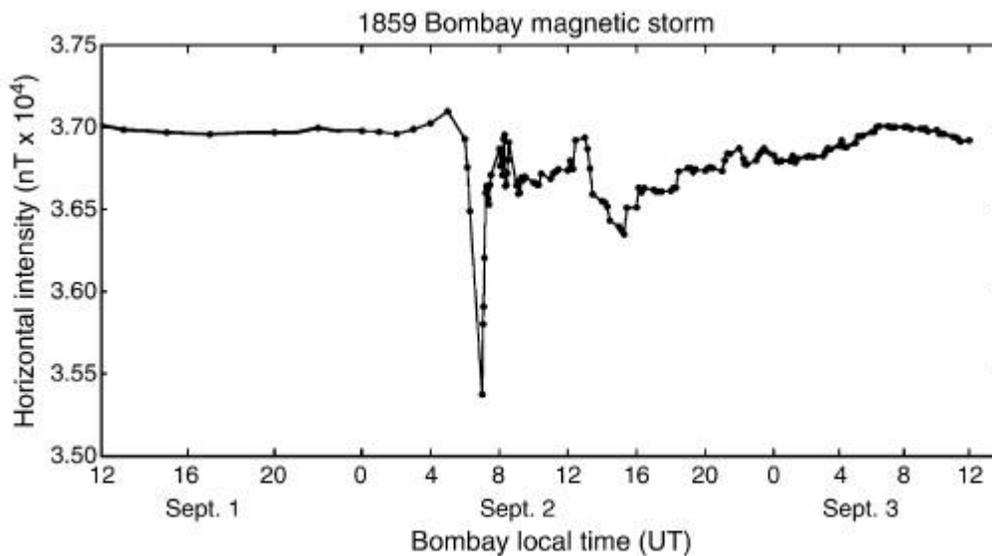


Figura 18. Ejemplo de tormenta magnética en Colaba (Bombay) en el año 1859, en la cual se pueden observar las variaciones violentas en el campo magnético en 1-2 de septiembre. Imagen tomada Gubbins y Herrero-Bervera, 2007.

### **3.6.4 Variaciones Seculares**

La principal manifestación de la variación secular a nivel mundial son los cambios de tamaño y posición de las desviaciones de un campo dipolar simple durante años y décadas. Los efectos de estos cambios en una localidad dada son predecibles con un grado razonable de exactitud durante periodos de cinco a diez años en el futuro, pero tales predicciones deben actualizarse a medida que se disponga de registros de observatorios magnéticos y de satélites terrestres más recientes (Vallina y Rodríguez, 1997).

### **3.6.5 Inversiones Geomagnéticas**

Las evidencias de la dirección del campo magnético terrestre en el pasado geológico se pueden encontrar en la magnetización remanente de las rocas recogidas de los pisos del lago, los flujos de lava, la propagación del fondo marino y otras fuentes. Tales estudios en todo el mundo muestran que todo el campo magnético de la Tierra ha invertido su polaridad repetidamente en intervalos irregulares de 10000 años a varios millones de años (Robinson y Coruh, 1998).

La concurrencia de todas estas observaciones permite determinar una escala de tiempo geomagnética. Una consecuencia de las inversiones repetidas es que, en un momento arbitrariamente elegido en el pasado geológico, el campo magnético de la tierra es igual de probable que haya sido normal (es decir, con la polaridad del campo actual) como invertido. La construcción de una escala de tiempo de inversión magnética global es de fundamental importancia para descifrar la historia de la Tierra. Entre otras cosas, las reversiones del campo se registran en la magnetización remanente de la corteza oceánica creada como continente separado permitiendo datar la edad del fondo oceánico y deducirse las posiciones anteriores de los continentes.

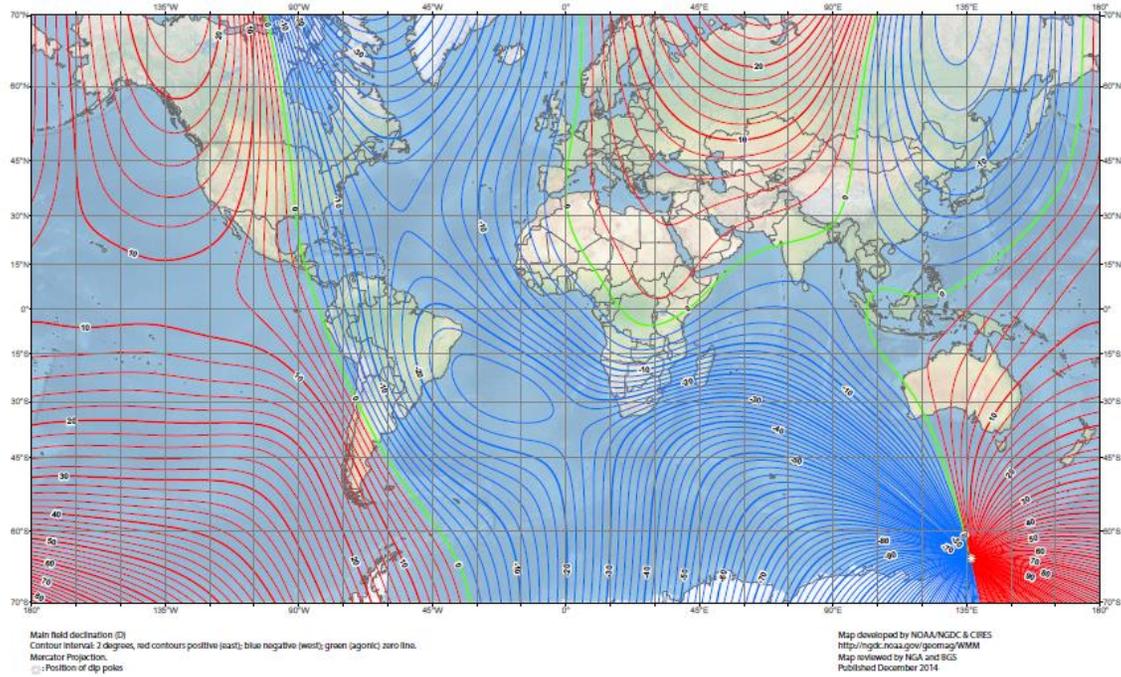
## **3.7 Campo Geomagnético internacional de referencia**

El campo Geomagnético Internacional de Referencia o IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) es el Nombre de un conjunto de modelos matemáticos utilizados para describir el campo geomagnético terrestre y su variación secular, es la referencia geomagnética, la cual, una vez restada, destaca las anomalías magnéticas en un punto medido. Debido a que la eliminación del IGRF implica la sustracción de alrededor del 99% del valor medido, el IGRF necesita ser definido con precisión (Blakely, 1996).

Aunque el IGRF es imperfecto al ser únicamente una aproximación basada en relativamente pocas y dispersas observaciones de campo se considera que el ajuste del modelo para el territorio mexicano en varios periodos es aceptable para estudios de anomalías corticales, así como de variaciones seculares (Urrutia-Fucugaucgi y Campos- Enríquez, 1993). El IGRF fue publicado por la Asociación Internacional del Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA), quienes recolectaron datos por un periodo de

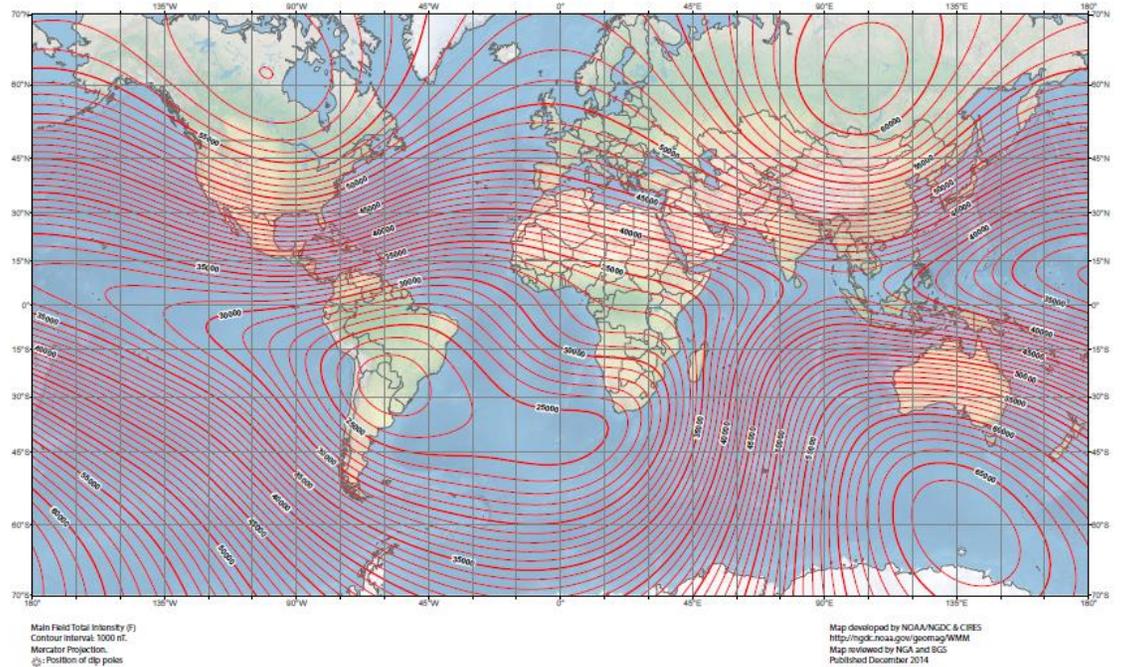
cinco años en diferentes observatorios geomagnéticos. Los resultados se modelaron mediante un modelo matemático. La Figura 19 y Figura 20.

**US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0  
Main Field Declination (D)**



**Figura 19. Modelo magnético mundial (2015). Declinación magnética (NOAA, 2014).**

**US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0  
Main Field Total Intensity (F)**



**Figura 20. Modelo magnético mundial (2015). Intensidad magnética (NOAA, 2014).**

### 3.1 Anomalías magnéticas

La Figura 21 muestra como la magnitud escalar del campo magnético  $F$ , registrada en un levantamiento aeromagnético en cualquier punto dado, no contiene información sobre la dirección del campo. Sin embargo, puede considerarse como la suma vectorial del IGRF en ese punto y un componente anómalo,  $\Delta F$ . El componente IGRF estará orientado en la dirección del campo principal de la Tierra en ese punto mientras que el campo magnético debido a una fuente local,  $\Delta F$ , puede tener en principio, cualquier orientación.

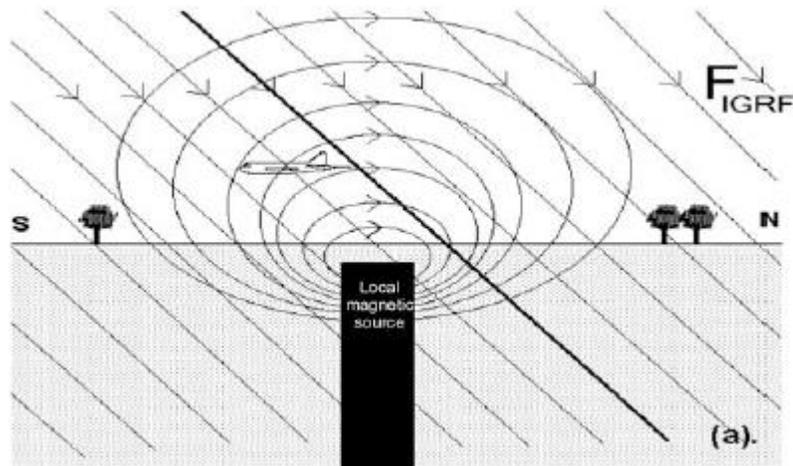


Figura 21. En un lugar dado, el magnetómetro aerotransportado registra la suma vectorial del campo geomagnético ambiental y la contribución anómala de (una o más) fuentes locales. (Reeves, C. 2005)

Cualquiera que sea la forma de observación del campo geomagnético sobre la superficie de la Tierra, sus valores reflejan, además de las características del campo interno y externo, la influencia de las propiedades magnéticas de la parte más superficial de la corteza terrestre (Reeves, 2005). Las anomalías magnéticas se pueden definir como sigue:

$$\Delta F = F - F_0$$

Donde  $F$  es la inducción del campo magnético observado en un punto, corregido por las variaciones del campo externo, y  $F_0$  la correspondiente al campo interno de la Tierra. Las anomalías  $\Delta F$  son una cantidad vectorial.

### 3.2 Estudios magnéticos

Un estudio magnético mide la variación de la intensidad del campo magnético de la tierra sobre un área de interés. Esta área puede ser tan pequeña, que cubre unos pocos miles de pies cuadrados, o tan grande como una nación entera. Dependiendo del área de interés los estudios pueden ser realizados con magnetómetros montados en aeronaves, en el caso de un estudio regional. Sin embargo, trabajos detallados sobre áreas pequeñas se utilizan instrumentos montados a mano o con

trípode. Los estudios en el mar se han llevado a cabo utilizando magnetómetros arrastrados desde buques, así como instrumentos de aire (Mariita, 2007).

El objetivo de un estudio magnético es investigar la geología del subsuelo basándose en las anomalías en el campo magnético de la tierra resultantes de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. En general, el contenido magnético (susceptibilidad) de las rocas es extremadamente variable según el tipo de roca y el entorno en que se encuentre. Las causas comunes de anomalías magnéticas incluyen diques, fallas y flujos de lava. Por lo general, no es posible identificar con certeza la litología causativa de cualquier anomalía solo de la información magnética. La forma, las dimensiones y la amplitud de una anomalía magnética inducida son una función de la orientación, la geometría, el tamaño, la profundidad y la susceptibilidad magnética del cuerpo, así como la intensidad e inclinación del campo magnético de la tierra en el área de estudio (Kearey et al., 2013).

Para la exploración de la energía geotérmica, los datos aeromagnéticos se han utilizado para investigar la presencia de un recurso geotérmico en combinación con la gravedad. A partir de los mapas aeromagnéticos, muchas de las anomalías se pueden correlacionar a menudo con expresiones superficiales de vulcanismo como cráteres, cúpulas o conos, lavas o tapones basálticos localizados. A partir de estos mapas, la mayoría de los centros volcánicos tienden a ubicarse en áreas con elevados magnéticos (positivos). A veces existe un bajo magnético (negativo) superpuesto; pero esto es generalmente débil o cero. En un entorno geotérmico, debido a las altas temperaturas, disminuye la susceptibilidad (Mariita, 2007).

### **3.2.1 Estudios magnéticos terrestres**

En la actualidad, los estudios magnéticos terrestres se utilizan principalmente para mapear anomalías demasiado pequeñas para una detección adecuada por medio de operaciones aéreas. El procedimiento de estos estudios, consiste en leer un magnetómetro en muchos sitios de observación. Además de las lecturas a lo largo de caminos de fácil acceso, la cobertura detallada de un estudio magnético terrestre típico requiere numerosos recorridos fuera de la carretera y/o camino. Mientras toma lecturas, el observador no debe usar objetos ferromagnéticos como cinturón, hebillas, botones y anteojos de metal; estos objetos perturbarán las lecturas del magnetómetro. Se deben hacer lecturas de prueba para encontrar un sitio de observación que esté a una distancia adecuada de automóviles, líneas eléctricas, cercas de alambre, puentes, alcantarillas de metal, tuberías, y vías de tren; la presencia de estos y otros objetos metálicos hace que sea casi imposible obtener datos confiables en áreas urbanas y en carreteras (Robinson y Coruh, 1998).

Los estudios magnetométricos deben incluir mediciones de la variación diurna y secular de la intensidad del campo. Para algunos estudios, un magnetómetro funciona en una estación base grabando información, mientras el estudio está en progreso. La práctica más común es volver a ocupar algunos de los sitios de

observación a intervalos de varias horas. En un estudio magnetométrico de exploración realizada mediante un magnetómetro de precesión de protones, es útil establecer una estación base con el fin de determinar las correcciones de tiempo. Aunque este magnetómetro lee un valor absoluto de la intensidad de campo total en cada sitio de observación, es necesario designar una base. Luego, las correcciones para la variación diurna y secular pueden aplicarse a las lecturas de todos los sitios de observación, y pueden ajustarse al mismo momento en el tiempo. Las diferencias entre las lecturas en los sitios de observación y la lectura de la estación base se utilizan para ajustar todos los valores relativos a un valor de estación base estándar (Mariita, 2007).

### **3.2.2 Estudios Aeromagnéticos**

La prospección aeromagnética es el proceso de llevar a cabo estudios magnéticos comparativamente rápidos a gran escala utilizando magnetómetros fijados o suspendidos de aeronaves. El levantamiento aeromagnético tiene varias aplicaciones, incluyendo como herramienta de reconocimiento antes de los levantamientos sísmicos 3D para estimar las profundidades del basamento, para informar a los mapas geológicos y para mapear los depósitos minerales (Reynolds, 1997).

El primer levantamiento magnético o aeromagnético aerotransportado para propósitos geológicos fue volado en 1945 en Alaska por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y la Marina de los Estados Unidos. A finales de la década de 1940, se realizaban inspecciones aeromagnéticas en todo el mundo (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

Las prospecciones aeromagnéticas se realizan por diversas razones: cartografía geológica, exploración de minerales y petróleo, e investigaciones ambientales y de aguas subterráneas. Dado que las variaciones en el campo magnético medido reflejan la distribución de minerales magnéticos (principalmente magnetita) en la corteza de la Tierra y objetos de fabricación humana, las prospecciones aeromagnéticas pueden ser utilizadas para detectar, localizar y caracterizar estas fuentes magnéticas (Gubbins, 2007).

### **3.2.3 Diseño de los estudios aeromagnéticos**

En un estudio aeromagnético regional ya sea terrestre o marino, las mediciones se realizan generalmente de acuerdo con un patrón regular de líneas paralelas equidistantes (líneas de vuelo). Una serie de líneas de control o de unión también se hace volar perpendicular a la dirección de la línea de vuelo para ayudar en el procesamiento del conjunto de datos de campo magnético. El espaciado de la línea de vuelo depende del objetivo primario de la prospección y regula la cantidad de detalle en el campo magnético medido (Figura 22). Las líneas de reconocimiento se orientan generalmente hacia el norte-sur o hacia el este-oeste (Reynolds, 1997).

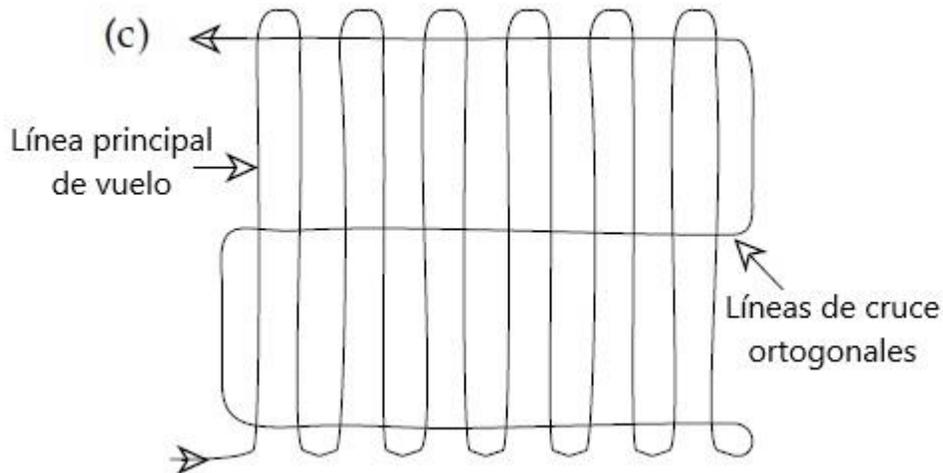


Figura 22. Líneas de medición paralelas y líneas de cruce.

La altura de vuelo de la prospección aeromagnética está íntimamente relacionada con el espaciamiento de la línea de vuelo con las alturas más bajas que son más apropiadas para espaciados de línea más cercanos. Esto se debe a la rápida disminución de la intensidad del campo magnético y al aumento de la longitud de onda en función de la distancia desde una fuente magnética. La altura mínima de vuelo está limitada por las restricciones gubernamentales, consideraciones de seguridad y robustez del terreno. Las variaciones topográficas también afectan el modo de vuelo utilizado en una prospección aeromagnética (Lowrie, 2007).

En las prospecciones realizadas con aviones de ala fija, se suele volar a una altura de vuelo constante por encima del nivel del mar (Figura 23a). Este procedimiento es utilizado para cubrir áreas de forma regionales o nacionales, o para la investigación de áreas con topografía exagerada. En las regiones que son planas o que no tienen topografía exagerada, puede ser posible hacer un levantamiento a baja altitud, lo más cerca posible de las fuentes magnéticas. Si se está utilizando un helicóptero, la distancia de las fuentes magnéticas puede mantenerse lo más pequeña posible volando a una altura constante por encima de la superficie del suelo (Figura 23b) (Gubbins, 2007).

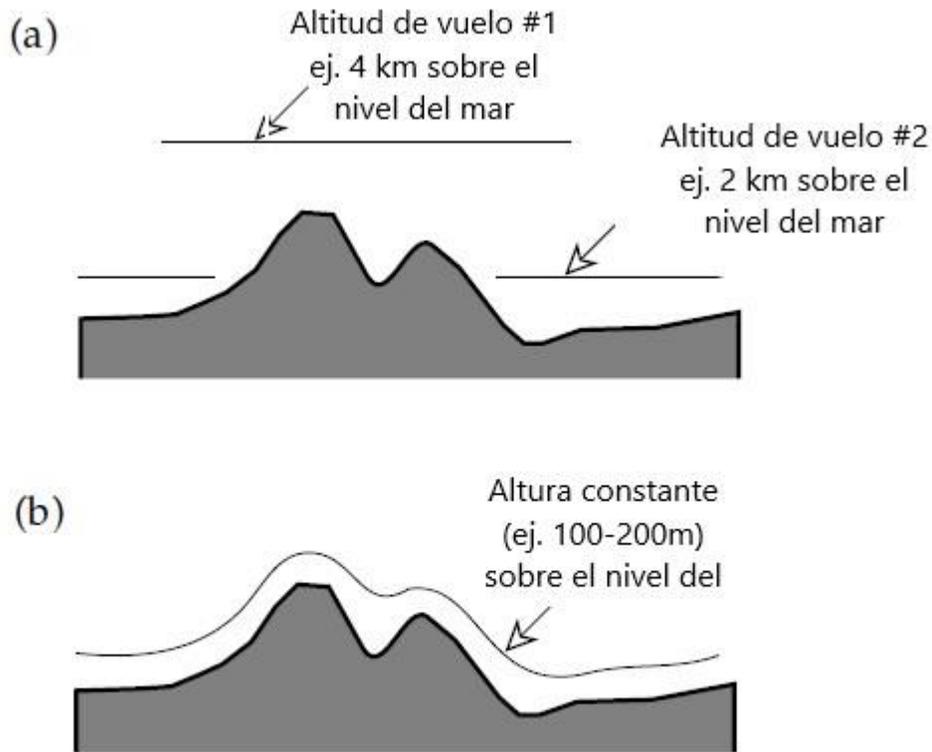


Figura 23. En el levantamiento magnético aerotransportado, las líneas de vuelo pueden volar a (a) altitud constante sobre el nivel del mar, o (b) altura constante sobre el nivel del suelo. Modificada de (Gubbins, 2007).

Junto con las mediciones del campo magnético, se recoge información relativa a la localización precisa y el tiempo de estos valores registrados. Un sistema moderno de adquisición de datos (generalmente basado en computadoras) registra y archiva datos magnéticos, de navegación, temporales y de altitud. Además, se realizan grabaciones de vídeo de la trayectoria de vuelo de la aeronave que se pueden utilizar más tarde para identificar los efectos magnéticos de las fuentes humanas y para proporcionar controles de navegación. Las tasas de medición del magnetómetro de 10 muestras por segundo y la información de navegación a una muestra por segundo son las normas vigentes (Lowrie, 2007).

### 3.2.4 Magnetómetros

En comparación con los primeros magnetómetros utilizados en la década de 1940, la resolución y la precisión de las mediciones de campo magnético han aumentado significativamente. Los primeros magnetómetros de fluxgate tenían resoluciones de alrededor de 1 nT y de ruido de 2 nT (Horsfall, 1997).

Los magnetómetros de precesión del protón siguieron con una resolución de 0,1 nT y una envolvente de ruido de 1 nT. Estos han sido reemplazados por los magnetómetros de vapor de cesio ópticamente bombeados, generalmente, que tienen una resolución de 0,001 nT y una envolvente de ruido de 0,005 nT. La

frecuencia de muestreo estándar es de 10 muestras por segundo, junto con las velocidades de los aviones de 220-280 km/h, resultan en mediciones a un intervalo de 6-8 metros. Las configuraciones de un solo magnetómetro de aeronave simplemente producen mediciones de la intensidad del campo magnético en la dirección del campo magnético de la Tierra (Hogg, 1989).

### **3.2.5 Ruido de aviones**

El ruido magnético causado por la aeronave de reconocimiento proviene de efectos de magnetización permanente e inducida y del flujo de corrientes eléctricas. La magnetización permanente de la aeronave produce un error de rumbo que es una función de la dirección de la línea de vuelo. Las magnetizaciones inducidas se producen debido al movimiento de la aeronave en el campo magnético de la Tierra. Estos efectos se reducen parcialmente al montar el magnetómetro lo más lejos posible de la fuente del ruido, ya sea en un brazo montado en la cola del avión o en un "pájaro" remolcado unido por un cable. Aunque el magnetómetro puede estar ubicado varias decenas de metros por debajo de la aeronave, esto puede introducir errores de orientación y posición si el sensor no mantiene un lugar fijo con relación a la aeronave. La información sobre la orientación y la dirección de la aeronave se utiliza para predecir el efecto magnético resultante, que luego se elimina a medida que se realiza la prospección. Una vez iniciada la prospección magnética, el nivel de ruido de la aeronave debe ser evaluado repetidamente para asegurar que se mantenga el mismo nivel de calidad de los datos (Gubbins, 2007).

No importa qué exactitud se alcancen en las mediciones del campo magnético, el valor de los datos finales de la prospección depende de la localización exacta de los puntos de la medida (Gubbins, 2007).

### **3.2.6 Efectos temporales**

Dado que el campo magnético de la Tierra varía temporalmente, así como espacialmente, las variaciones de tiempo que se producen durante el período de medición deben determinarse y eliminarse de las mediciones en bruto. El efecto dominante para las prospecciones aerotransportadas es la variación diurna, que generalmente tiene una amplitud de decenas de nanoteslas. Las variaciones más cortas del período de tiempo debido a las tormentas magnéticas pueden ser mucho más grandes (cientos de nanotesla). Los datos también pueden degradarse por micropulsaciones con períodos cortos y amplitudes de varias nanoteslas (Kearey et al., 2013).

El monitoreo del campo terrestre es un componente esencial de una prospección para mitigar estos efectos variables en el tiempo. Uno o más magnetómetros de estación base se utilizan para seguir cambios en el campo durante las operaciones de levantamiento. La variación diurna que cambia suavemente se elimina de los datos usando nivelación de línea de unión. Simplemente restando esta variación de

los datos medidos no es suficiente ya que los cambios diurnos pueden variar significativamente en el área. La nivelación de la línea de unión se basa en las diferencias en el campo medido en la intersección de líneas de vuelo y líneas de unión. Si la distancia y, por tanto, el tiempo que se tarda en volar entre estos puntos de intersección es suficientemente pequeño, entonces se puede suponer que el diurno varía aproximadamente linealmente y puede ser corregido (Luyendyk, 1997).

### **3.2.7 Visualización e interpretación de datos**

El producto final resultante de una prospección aeromagnética es un conjunto de datos nivelados de vuelo que se interpolan en una cuadrícula regular de valores de intensidad de campo magnético que cubre la región de la prospección. Estos valores pueden mostrarse de diversas formas, siendo el más común un mapa de color o una imagen, donde los valores del campo magnético, en función de su magnitud, se asignan a un color específico. De manera similar, los valores pueden representarse como un mapa de contorno de línea simple. Ambos tipos de representación pueden usarse de manera cualitativa para dividir el área de estudio en subregiones de magnetizaciones altas y bajas. Dado que los datos están disponibles digitalmente, es sencillo utilizar algoritmos basados en computadora para modificar y mejorar la imagen del campo magnético para el propósito específico del estudio. La transformación y el filtrado permiten mejorar ciertos atributos de los datos, como los efectos debidos a fuentes magnéticas en niveles superficiales o profundos. Métodos más sofisticados pueden estimar las profundidades, ubicaciones y las propiedades magnéticas de las fuentes magnéticas (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

## Capítulo 4

### Metodología

Para poder cubrir el objetivo de este estudio la metodología empleada se resume en 5 puntos, los cuales se describen a continuación:

- 1) Identificación de la zona de estudio, así como la búsqueda de información bibliográfica disponible de la zona de interés y zonas cercanas.
- 2) A la información aeromagnética se le aplicaron los filtros: Reducción al polo, primera y segunda derivada en Z, señal analítica, reducción al polo con continuaciones ascendentes.
- 3) Análisis y digitalización de mapas (geológicos, fallas, lineamientos, contactos geológicos, cuerpos volcánicos, continuo de elevaciones mexicano, etc.).
- 4) Integración de la información geofísica-geológica.
- 5) Modelado 2D y 3D e interpretación.

#### 4.1 Magnetometría Aérea

La información aeromagnética fue obtenida por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en el año 2004, se obtuvieron dos conjuntos de datos uno fue a escala regional 1:250 000 y otro a escala más local 1:50 000. Los parámetros del vuelo fueron líneas con dirección Norte-Sur, la distancia entre líneas de vuelo fue de 1 km. y la distancia entre líneas de control fue de 10 km., manteniendo una altura de vuelo sobre el nivel del terreno de 300 m. La navegación fue electrónica (GPS).

Los datos están en forma digital y corresponden a rejillas que representan las cartas magnéticas Veracruz E14-3 y Guadalupe Victoria E14-B35.

Los procesos realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) a la información digital fueron: corrección por movimiento del avión (compensación magnética), corrección por variación diurna, sustracción del campo geomagnético internacional de referencia (IGRF 2000 que va del año 2000 al 2005), nivelación usando líneas de control, micronivelación y los datos obtenidos del SGM corresponden a los valores de la anomalía del campo magnético residual (CMR) mismo que puede ser descrito a través de sus componentes:  $I=48^{\circ}09'$ ,  $D=05^{\circ}23'$  y  $H= 41897$  nT.

##### 4.1.1 Características del equipo utilizado

El equipo utilizado por el SGM para la adquisición de la información aeromagnética fue: un avión Islander BN2-B21, con un magnetómetro Scintrex CS-3, bombeo óptico del vapor de cesio con una sensibilidad de 0.001nT. Empleando un sistema de adquisición de datos Picodas P-101, el magnetómetro usado en la base fue un GEM-SYSTEMS GSM-19, OVERHAUSER, con sensibilidad de 0.01 nT. EL radar de altímetro es Terra TRA3000.

## 4.2 Filtros aplicados

Para realizar una adecuada interpretación de la información aeromagnética es necesario aplicar una serie de filtros a modo de resaltar atributos que nos ayuden a tener una mejor visualización de la información y como consecuencia una mejor interpretación, toda la información se trabajó con la ayuda del software Oasis Montaj de Geosof®.

Como se mencionó anteriormente uno de los procesos aplicados por el SGM a la información aeromagnética fue la sustracción del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) del año 2000 quedando así el Campo Magnético Residual (CMR).

### 4.2.1 Reducción al Polo

Basado en el algoritmo matemático de Baranov y Naudy (1964), en el cual se simula que el vector de inclinación magnética es de 90° y la declinación de 0°. De este modo las anomalías magnéticas dipolares son transformadas a anomalías monopolares centradas sobre sus respectivos cuerpos causales. Este filtro procesa los datos magnéticos de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L(\theta) = \frac{-\cos^2(D - \theta)}{(\sin(I_a + i \cos I \cos(D - \theta))^2}$$

Donde:

- $I$  es la inclinación magnética
- $I_a$  representa la inclinación por corrección de amplitud
- $D$  es la declinación magnética
- $\theta$  es la latitud

### 4.2.2 Primera Derivada en la Vertical

La primera derivada se puede tomar análogamente como la medición física simultánea del campo magnético en dos puntos de la misma vertical que se encuentran a diferente altura, encontrando el gradiente del campo magnético entre dichos puntos y dividiéndole entre la diferencia de altura de los mismos. El algoritmo matemático de la primera derivada en la vertical (1aDz) (Henderson y Zietz, 1949) realza la información relacionada a altas frecuencias que se encuentran enmascaradas por frecuencias bajas que están asociadas a fuentes profundas. Resaltando las anomalías de altas frecuencias ayudando a definir rasgos litológicos y estructurales (superficiales) y localizando contactos verticales.

### 4.2.3 Segunda Derivada en la Vertical

La segunda derivada en la vertical (2daDz) (Henderson y Zietz., 1949) es una transformación matemática que se basa en calcular el gradiente con respecto a la profundidad del valor de las primeras derivadas. En el caso del procesamiento de los datos de la segunda derivada consiste en la aplicación un filtro de convolución de la ecuación de Laplace. Dando como resultado la acentuación de las longitudes de onda menor, es decir las correspondientes a fuentes más superficiales, a expensas de los componentes de longitud de onda larga. Permitiendo resaltar las anomalías locales permite delinear los bordes de los cuerpos causales.

### 4.2.4 Señal Analítica

La señal analítica, permite resaltar las anomalías magnéticas producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda. Basado en el algoritmo de la señal analítica (Nabighian, 1972 y 1974) está basado en la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas parciales X, Y, Z, teniendo como consecuencia la obtención del valor absoluto de la señal magnética, lo que permite resaltar los bordes de las estructuras geológicas que causan las anomalías magnéticas. Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x} F(x, y)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} F(x, y)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} F(x, y)\right)^2}$$

Donde

A(x,y) es la señal analítica

F(x,y) es el campo magnético

### 4.2.5 Continuación Ascendente

El filtro de continuación ascendente (Henderson et al., 1970) se considera un filtro limpio, debido a que casi no produce efectos de distorsión, por ello es utilizado para eliminar o minimizar los efectos de las fuentes superficiales y también para reducir el ruido generado durante la aplicación de otros filtros. Ya que predice el efecto de los campos a una elevación mayor, es decir al alejarse de la fuente.

## Capítulo 5

# Resultados

### 4.3 Procesado e interpretación regional

#### 4.3.1 Campo Magnético Residual

El SGM, al hacer la adquisición aeromagnética, la información que obtuvo fue la del Campo Magnético Total (CMT) por lo que a la información adquirida le efectuó la resta del campo geomagnético producido por la Tierra (IGRF) quedando el Campo Magnético Residual (CMR), dicho campo ya se puede asociar directamente con el magnetismo producido por las estructuras y cuerpos geológicos de la zona. Entonces a partir de la información proporcionada por el SGM, que fue el grid del Campo Magnético Residual (CMR) se empezó a trabajar en nuestra zona de interés.

Teniendo así un primer acercamiento a nuestra zona de estudio; observando una zona con valores altos y partiendo de la parte NW en diagonal hacia la dirección SE de nuestro mapa se tiene un trend de valores altos, a manera de una franja que parece tener una inclinación de 45°. En la parte norte de dicha franja de valores altos, están los valores bajos lo que nos indica una dipolaridad magnética, los rangos de valores en los cuales oscila nuestro mapa están entre -168 nT hasta los 400 nT, con distancias polares variadas que van de los 5.5 km hasta los 11 km (Figura 24).

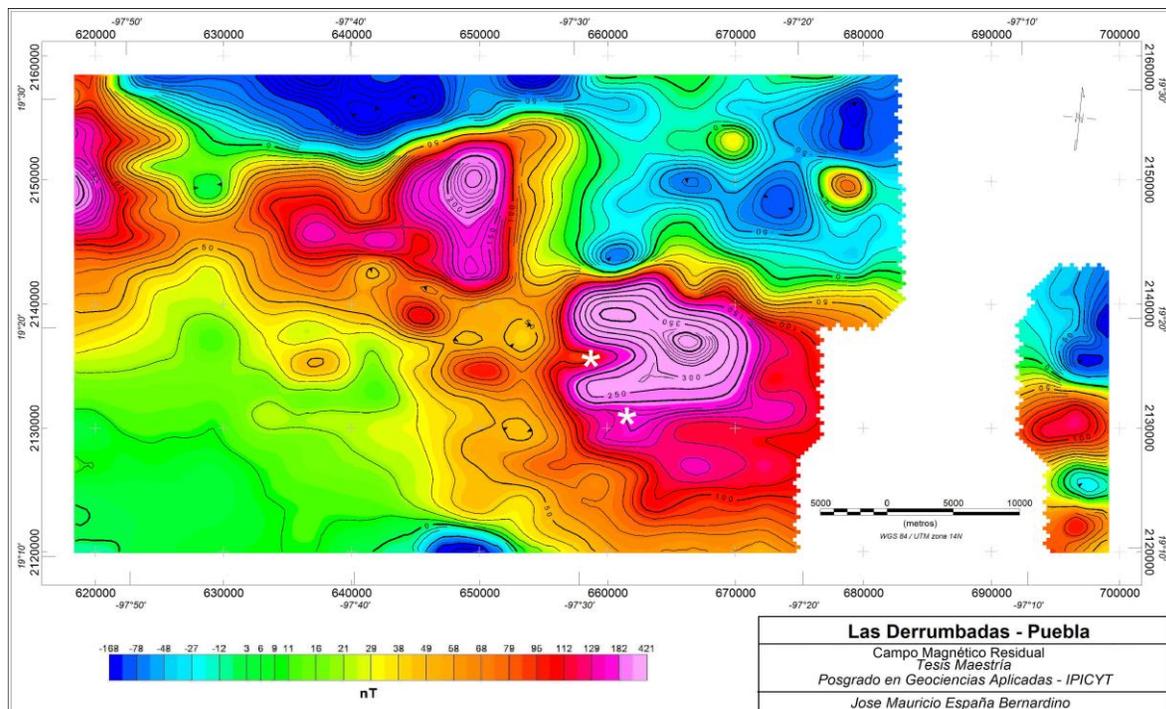


Figura 24. Mapa del campo magnético residual. Ubicando los domos de Las Derrumbadas con asteriscos de color blanco.

Es necesario destacar la ausencia de datos en la parte Este del mapa, esto es debido a la presencia de los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote. Los dos asteriscos blancos que aparecen en el mapa, corresponden a los domos de Las Derrumbadas, los cuales están ubicados dentro de la anomalía de mayor amplitud con un valor de 365 nT.

#### 4.3.2 Reducción al Polo

Al mapa del CMR se le realizó la reducción al polo, obteniendo así el mapa del Campo Magnético Reducido al Polo (CMRP), se hizo la reducción al polo debido que la distribución de las anomalías difiere, hay un desfase entre las fuentes y las anomalías. Al aplicar el filtro las anomalías magnéticas se sitúan sobre las fuentes que las causan, simulando del traslado de nuestra zona de trabajo al polo Norte en donde la inclinación del campo magnético es vertical.

En este siguiente mapa se sobrepuso la geología digitalizada de la zona, esto con la finalidad de ver el comportamiento de las anomalías con respecto a la geología superficial. De igual forma se colocaron asteriscos blancos pertenecientes a los domos de Las Derrumbadas y se agregaron círculos semi-rellenos, indicando zonas donde se tienen identificadas la presencia manifestaciones geotérmicas. Mapa (Figura 25).

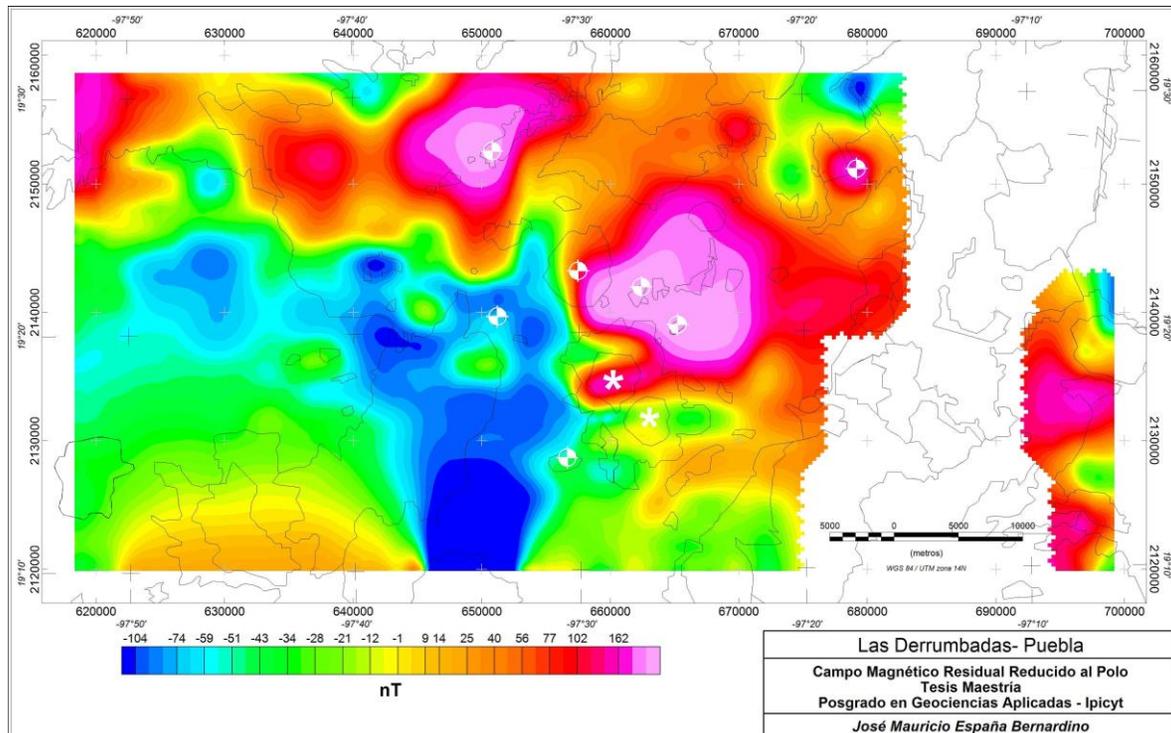


Figura 25. Mapa del Campo Magnético Reducido al Polo con Continuasión Ascendente a 2500 m y geología digitalizada; los círculos semi-rellenos representan a manifestaciones geotérmicas y los asteriscos blancos pertenecen a los domos Las Derrumbadas.

Analizando el mapa de la Figura 25, podemos observar que los domos Las Derrumbadas están a la orilla por la parte SW de la anomalía más grande presente en el mapa, dicha anomalía es de forma semicircular con un valor máximo de 225 nT, un valor mínimo de -18 nT y un promedio de 106 nT. De acuerdo a la información geológica la anomalía esta sobre una zona de rocas ígneas intrusiva, diorita, con afloramientos de rocas sedimentarias calizas; en esa zona se tiene la presencia de varias minas de origen epitermal que han sido explotadas, a la actualidad solo se encuentran operando algunas.

### 4.3.3 Dominios Aeromagnéticos

En el mapa del Campo Magnético Reducido al Polo con Continuación Ascendente a 2500 m se identificaron zonas que muestran valores de magnetismo asociados a susceptibilidades magnéticas similares, las cuales se asociaran con unidades geológicas. A estas zonas se les denominan Dominios Aeromagnéticos (DAM). Los sectores o dominios geofísicos se definen como zonas dentro de la configuración de los mapas de anomalías las cuales se identifican por presentar un comportamiento similar en cuanto a sus características de longitud de onda y amplitud (López-Loera et al., 2011).

Para la interpretación de los dominios se utilizó el mapa del Campo Magnético Reducido al Polo con Continuación Ascendente a 2000 m., esto para poder evaluar la continuidad de las zonas con propiedades magnéticas similares, alejándonos de la fuente causal de las anomalías y así determinar si se trata de uno o varios dominios. Se identificaron tres dominios aeromagnéticos I, II y III como se muestra en la Figura 26.

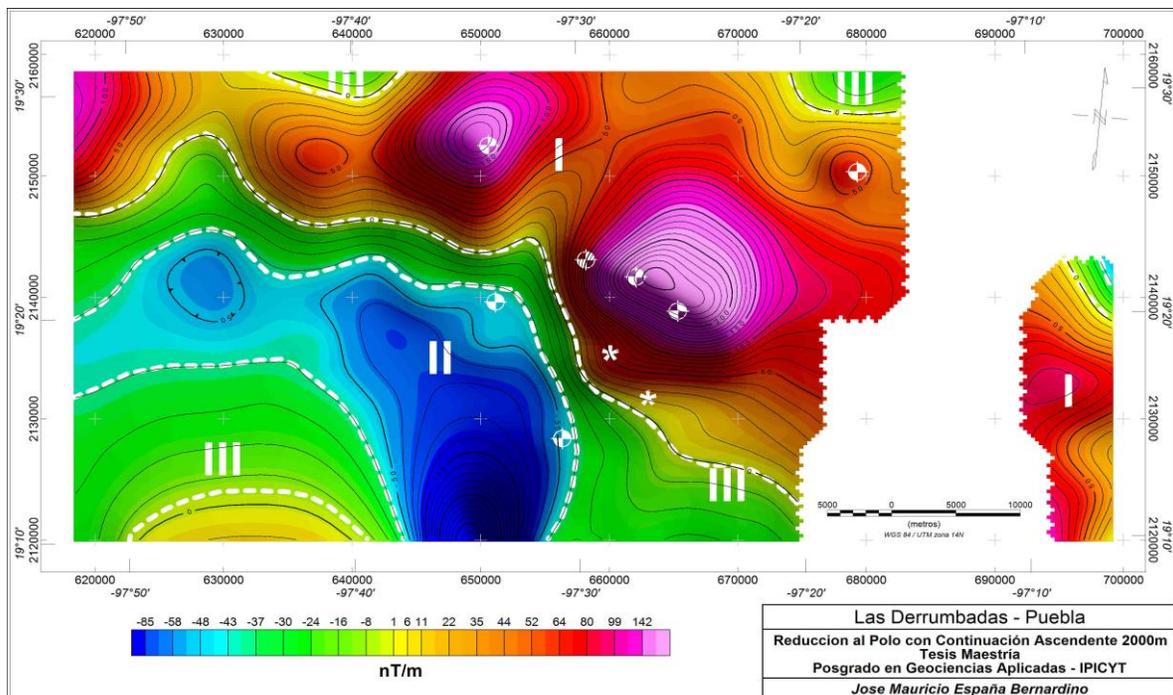


Figura 26. Dominios Aereomagnéticos identificados a través del mapa reducción al polo con continuación ascendente a 2000 m.

## **DAM I**

Este dominio está conformado por tres altos magnéticos, Las Derrumbadas se localizan dentro de este dominio. Geológicamente se asocian a dacitas, dioritas y riolitas siendo este último la composición de los domos objeto de este estudio. El dominio presenta distancias polares de 8 y 11 km aproximadamente con valores máximos de 255 nT y mínimos de 15 nT.

## **DAM II**

Ubicado en la parte SW de Las Derrumbadas este dominio se caracteriza por presentar los valores más bajos, con forma de media luna. Geológicamente se asocia a depósitos lacustres y aluviales, dentro de este dominio se localizan algunos lagos. El DAM II presenta valores máximos de -46 nT y mínimos de -158 nT.

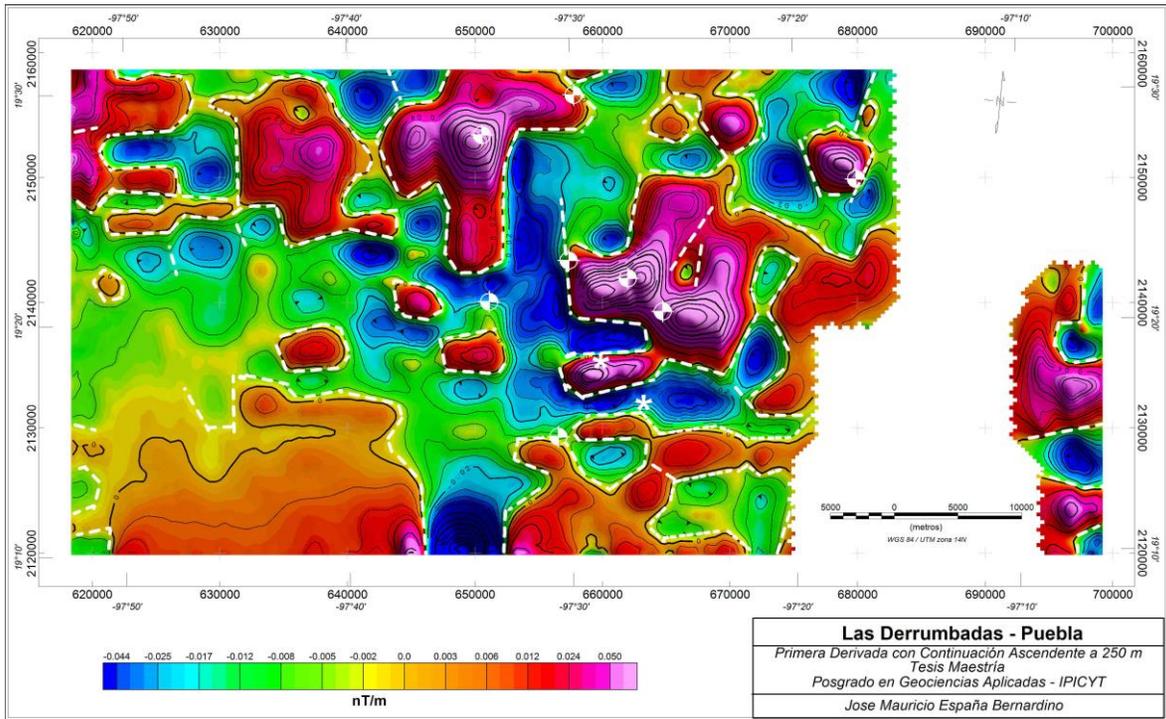
## **DAM III**

Con forma de medio círculo este dominio está representado por valores medios que van desde los 10 nT hasta -40 nT. Y ubicado en la esquina inferior con dirección SW de nuestro mapa. Geológicamente están representados por limo y arena.

### **4.3.4 Primera Derivada en Z**

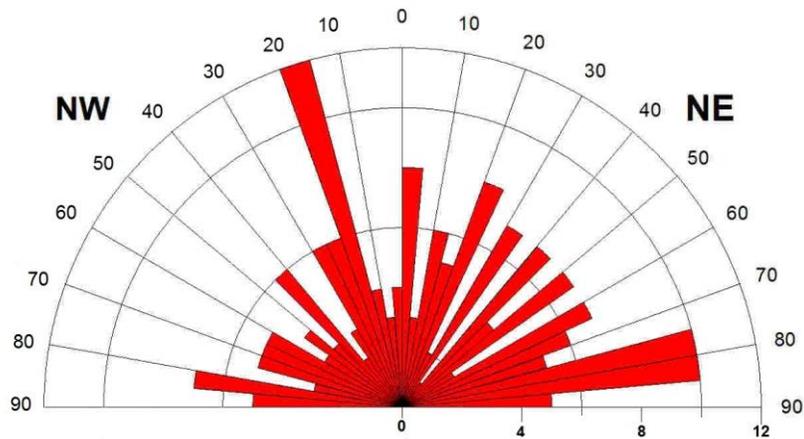
Partiendo del mapa CMRP se aplicó el filtro de primera derivada en dirección Z (1aDz), lo que nos ayudó a la identificación de lineamientos aeromagnéticos. Un lineamiento constituye una flexión o rasgo físico identificable en la superficie terrestre o en su caso en el subsuelo, a través de los patrones de anomalías geofísicas, el cual, como su nombre lo indica, tiene una forma lineal, rectilínea o suavemente curvilínea (O'Learly *et al.*, 1976). Los lineamientos aeromagnéticos se correlacionan a zonas de alto gradiente que pueden estar asociados a fallas geológicas, fracturas y/o contactos litológicos.

Se identificaron lineamientos magnéticos en dos mapas, en el primer mapa se aplicó el filtro de la primera derivada con otro filtro de continuación ascendente a 250 m. (Figura 27). Lo que ayudó a generar una roseta con los lineamientos y así identificar las direcciones preferenciales de los mismos (Figura 28).



**Figura 27. Mapa de la primera derivada con continuación ascendente a 250 m.**

**Roseta de lineamientos (Primera Derivada con Continuación Ascendente a 250 m.)**



**Figura 28. Roseta de lineamientos del mapa de la primera derivada con continuación ascendente a 250 m.**

Los lineamientos identificados fueron superficiales teniendo una dirección preferencial de 20° NW y otra de 75° a 85° NE. Algunas de las manifestaciones son cruzadas por algún lineamiento lo que nos puede indicar la presencia de fallas. El domo localizado al Norte se localiza muy cerca de otro lineamiento.

Otro mapa que se generó fue el de la primera derivada en Z con continuación ascendente a 1000 m. (Figura 29), con la finalidad de hacer una comparación de las estructuras superficiales y a profundidad, igualmente se hizo una roseta de lineamientos (Figura 30).

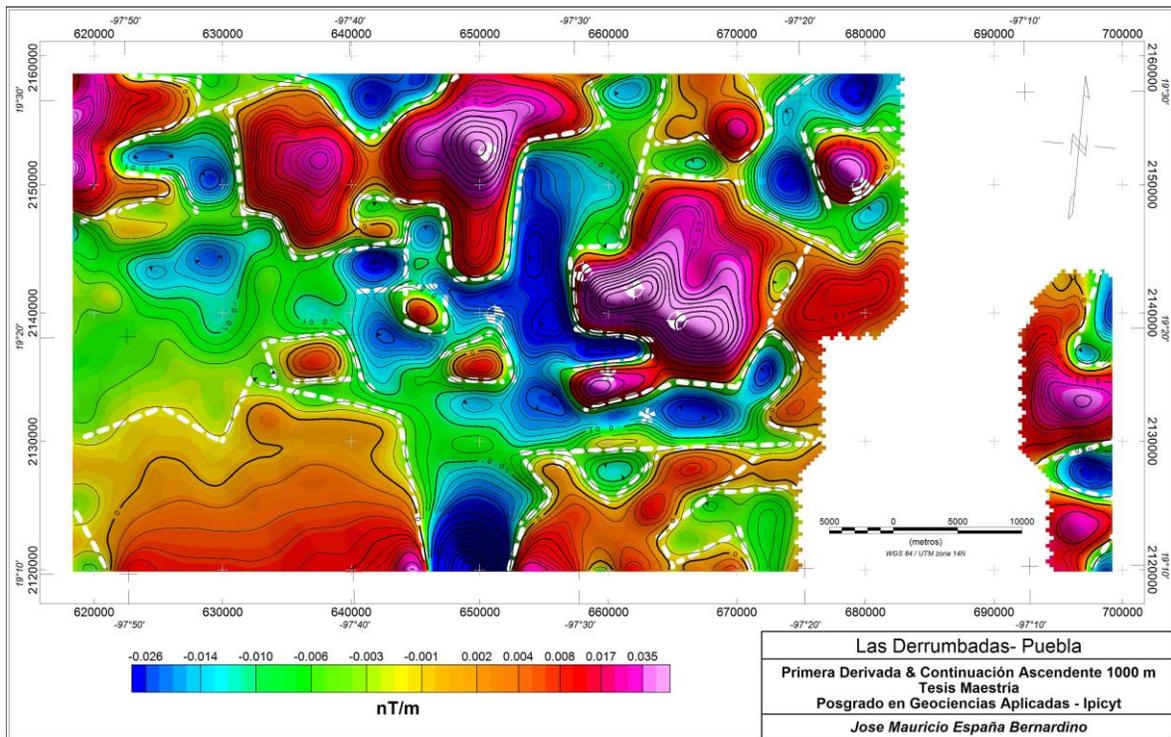


Figura 29. Mapa de la primera derivada con continuación ascendente 1000 m.

Roseta de lineamientos (1ra Derivada con Continuación Ascendente a 1000 m.)

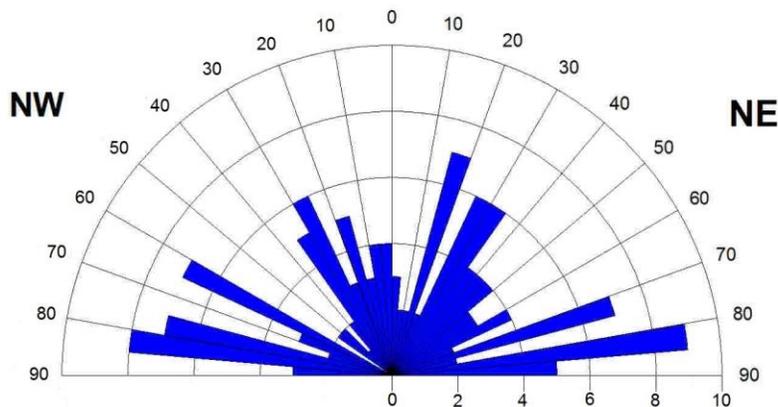


Figura 30. Mapa de la primera derivada con continuación ascendente 1000 m y roseta de lineamientos.

En este segundo mapa las preferencias de los lineamientos son varias en comparación del mapa anterior, teniendo direcciones preferenciales de 80° NE, 80° NW y por último de 20° NE.

#### 4.4 Procesado e interpretación local

Debido a que en nuestra zona de interés no se alcanzaba una resolución deseada se optó por adquirir información aeromagnética nueva en donde se pudieran apreciar mejor las anomalías del área de estudio.

El conjunto de datos que se obtuvo está a escala 1:50 000 y corresponden a la carta Guadalupe Victoria E14-B35, según la información proporcionada por el SGM. La

información fue procesada de manera similar a los datos anteriores de modo que solo se presentaran los mapas y una breve descripción de lo que se pudo observar.

Como en los mapas anteriores usaremos asteriscos de color blanco para identificar a los domos Las Derrumbadas y círculos semi-rellenos para las manifestaciones geotérmicas.

Partiendo del grid del CMR, se observan mejor las anomalías en nuestra zona de interés, aunque como se describió anteriormente las anomalías aún se encuentran desfasadas por lo que es necesario hacer la Reducción al Polo (Figura 31).

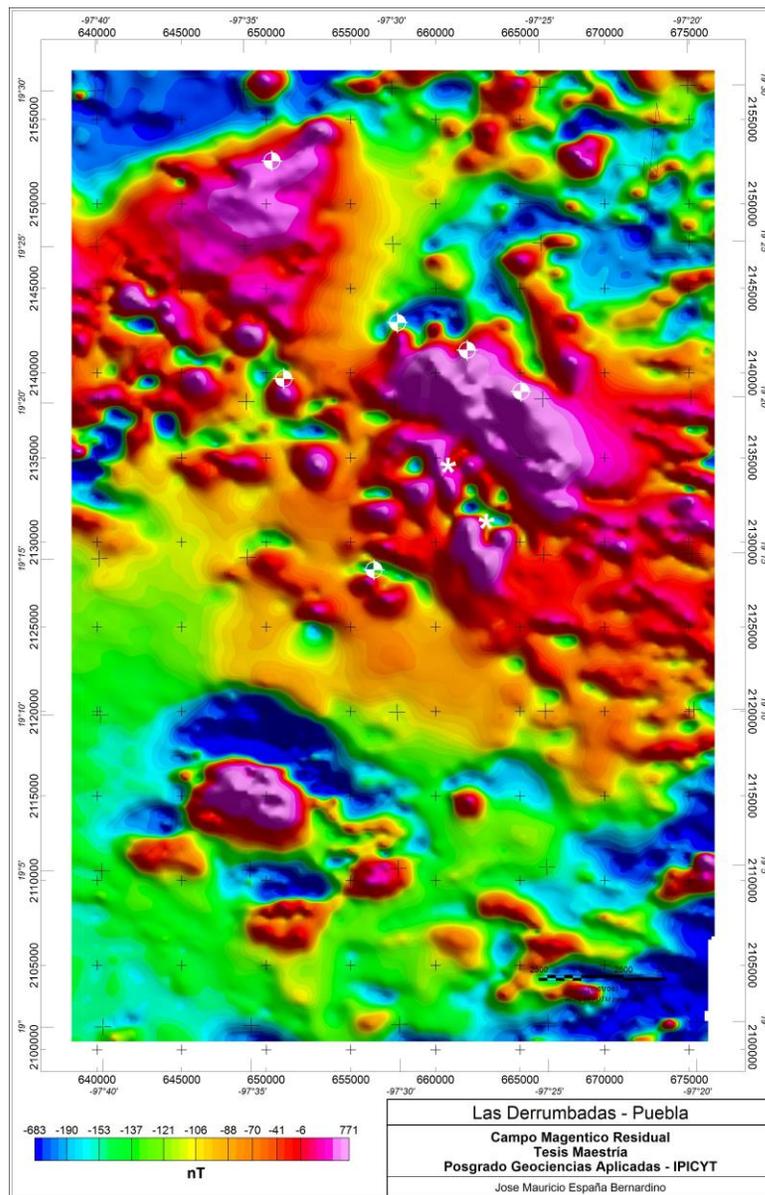
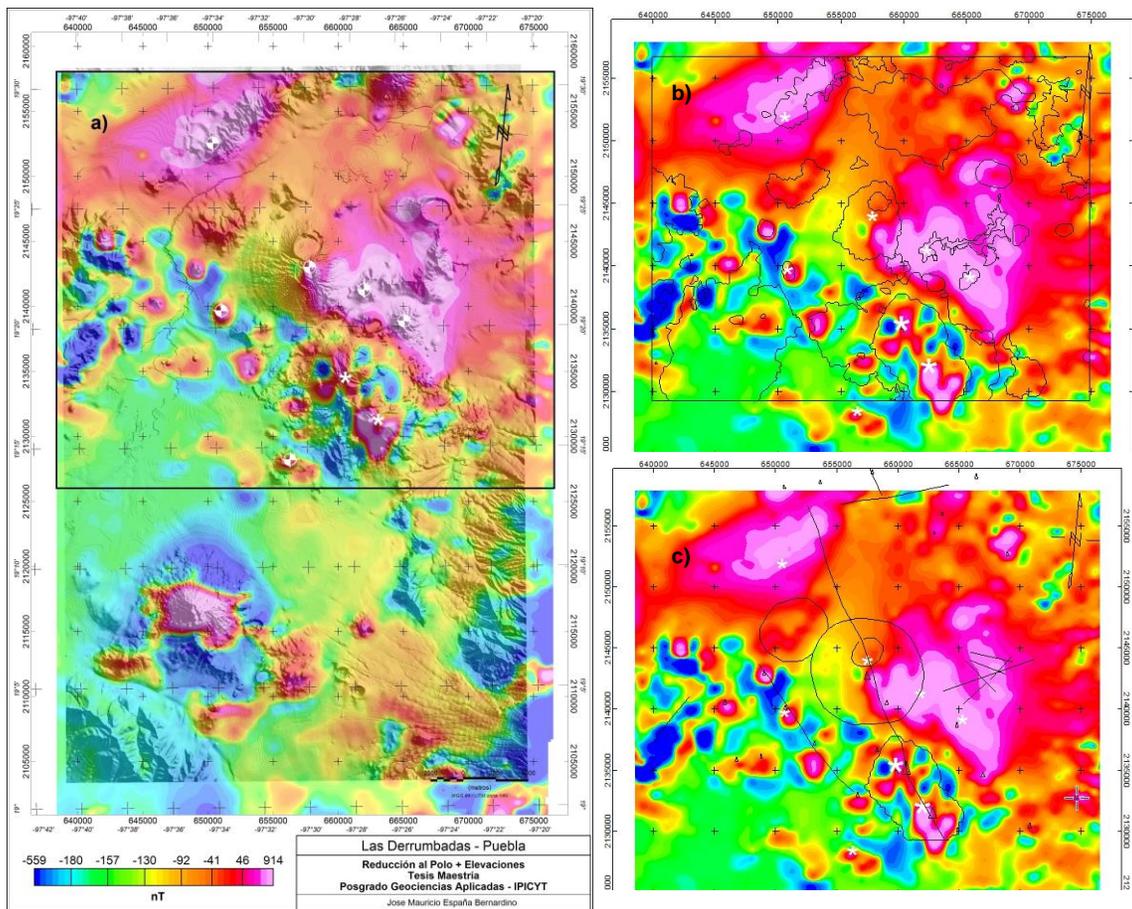


Figura 31. Mapa del campo magnético residual.

Los domos de Las Derrumbadas ya no se localizan sobre una misma anomalía, como se observaba en los mapas anteriores y junto con las manifestaciones se pueden asociar a diferentes anomalías.

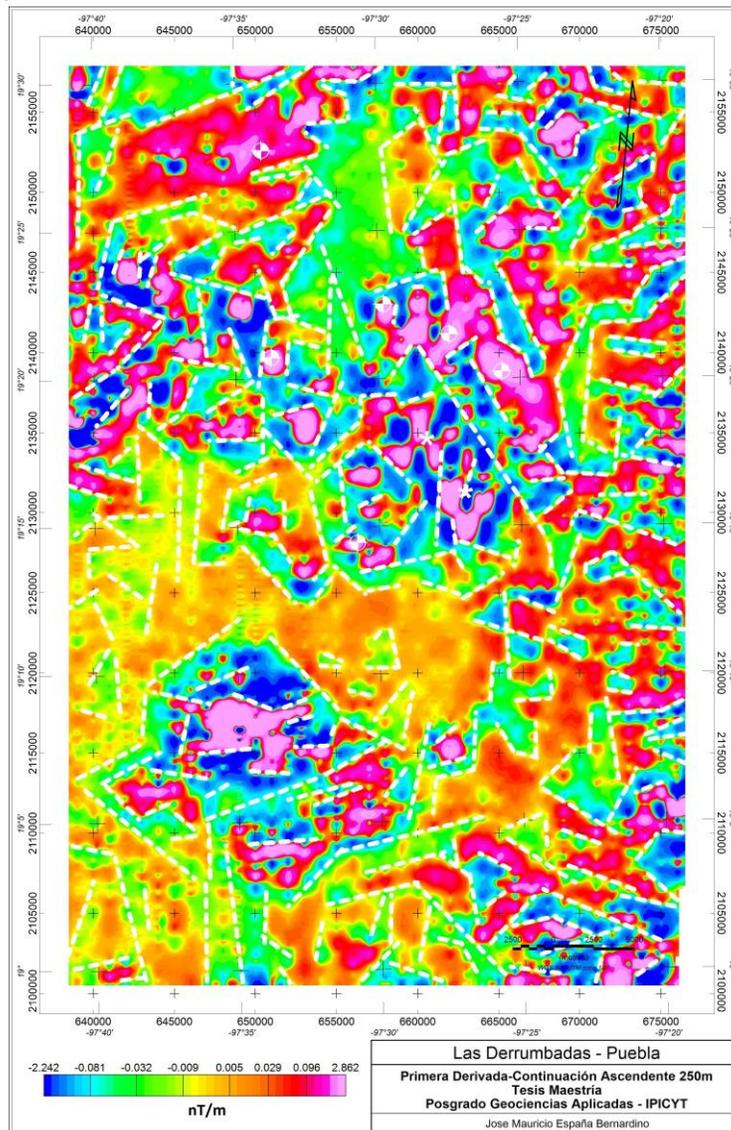
Aplicando la Reducción al Polo, nos ayuda a tener una mejor visión de las anomalías que afectan a los domos de Las Derrumbadas. La Figura 32 muestra más claramente las anomalías que se ubican en los domos y la anomalía que parecía ser una sola, aquí podemos ver que son anomalías diferentes, las correspondientes a los domos. Se digitalizó la carta geológica de escala 1:50 000 junto con las fallas y cuerpos volcánicos, enfocándonos en la parte superior del mapa debido a que es la zona de mayor interés (Figura 32b y Figura 32c), representado por el recuadro negro.



**Figura 32. a) Mapa de reducción al polo con elevaciones, b) Mapa de reducción al polo con geología digitalizada y c) Mapa de reducción al polo con estructuras volcánicas y fallas digitalizadas.**

De acuerdo a la geología superficial reportada por el (SGM, 2011) los domos están dentro de un mismo cuerpo, a diferencia del mapa de reducción al polo que se ven dos anomalías diferentes siendo la anomalía del domo Sur más grande que la del domo Norte, también hay un lineamiento que atraviesa a los domos con dirección NW-SE.

Ahora al mapa de Reducción al Polo se aplicaron los filtros de Primera Derivada con Continuación Ascendente para la identificación de lineamientos a diferentes profundidades, se realizaron dos mapas, cada uno con su roseta de lineamientos, uno con continuación ascendente a 250 m y otro a 2000 m como muestra (Figura 33 y Figura 34).



Roseta de lineamientos (1ra Derivada con Continuación Ascendente a 500 m.)

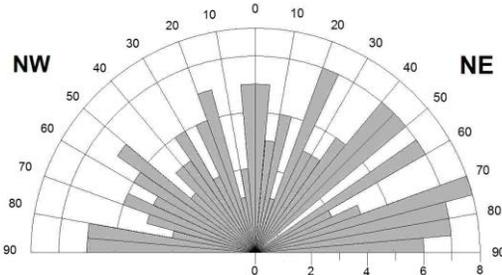
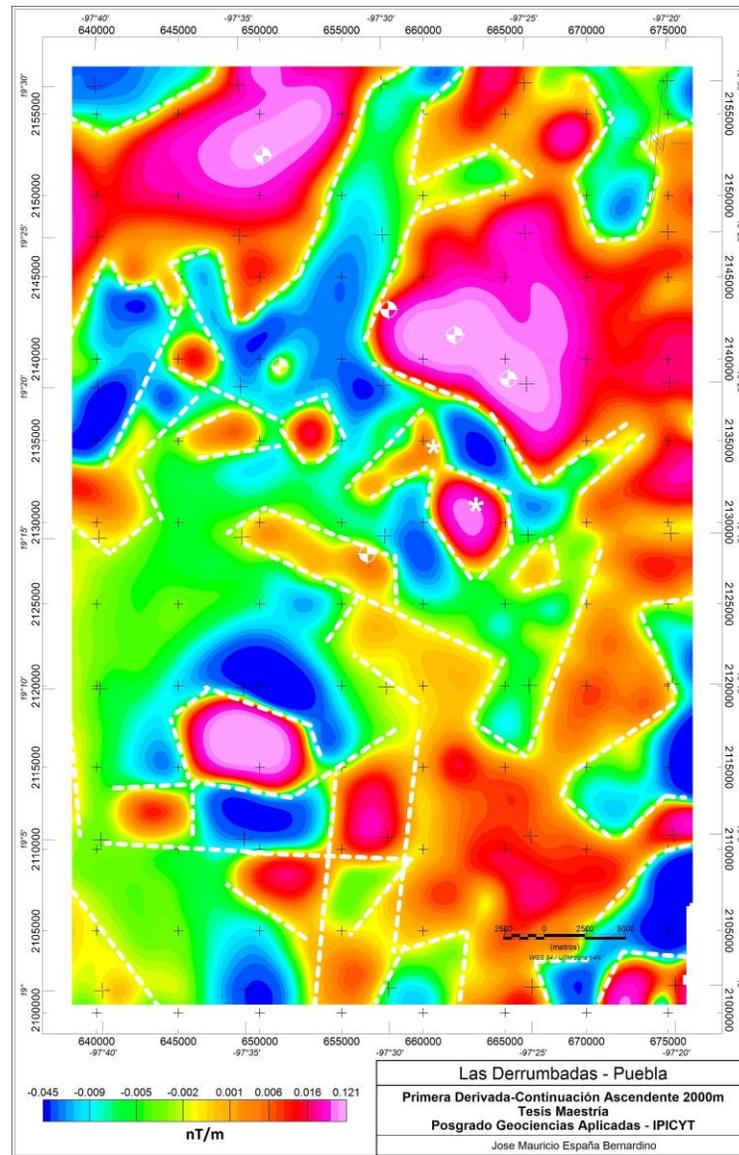
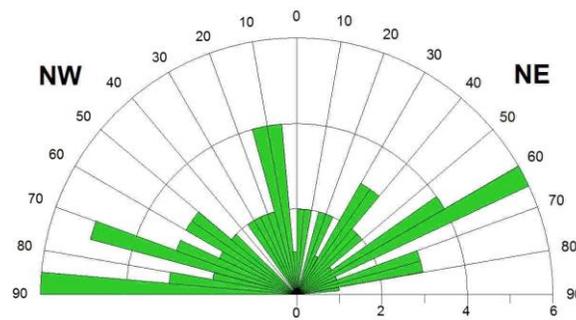


Figura 33. Mapa de primera derivada en z con continuación ascendente a 250 m. con su respectiva roseta de lineamientos.

Para el mapa de la Figura 33 lineamientos presentan direcciones preferenciales de 70° NE y otras direcciones preferenciales de 40° a 50° NE y 80° NE.



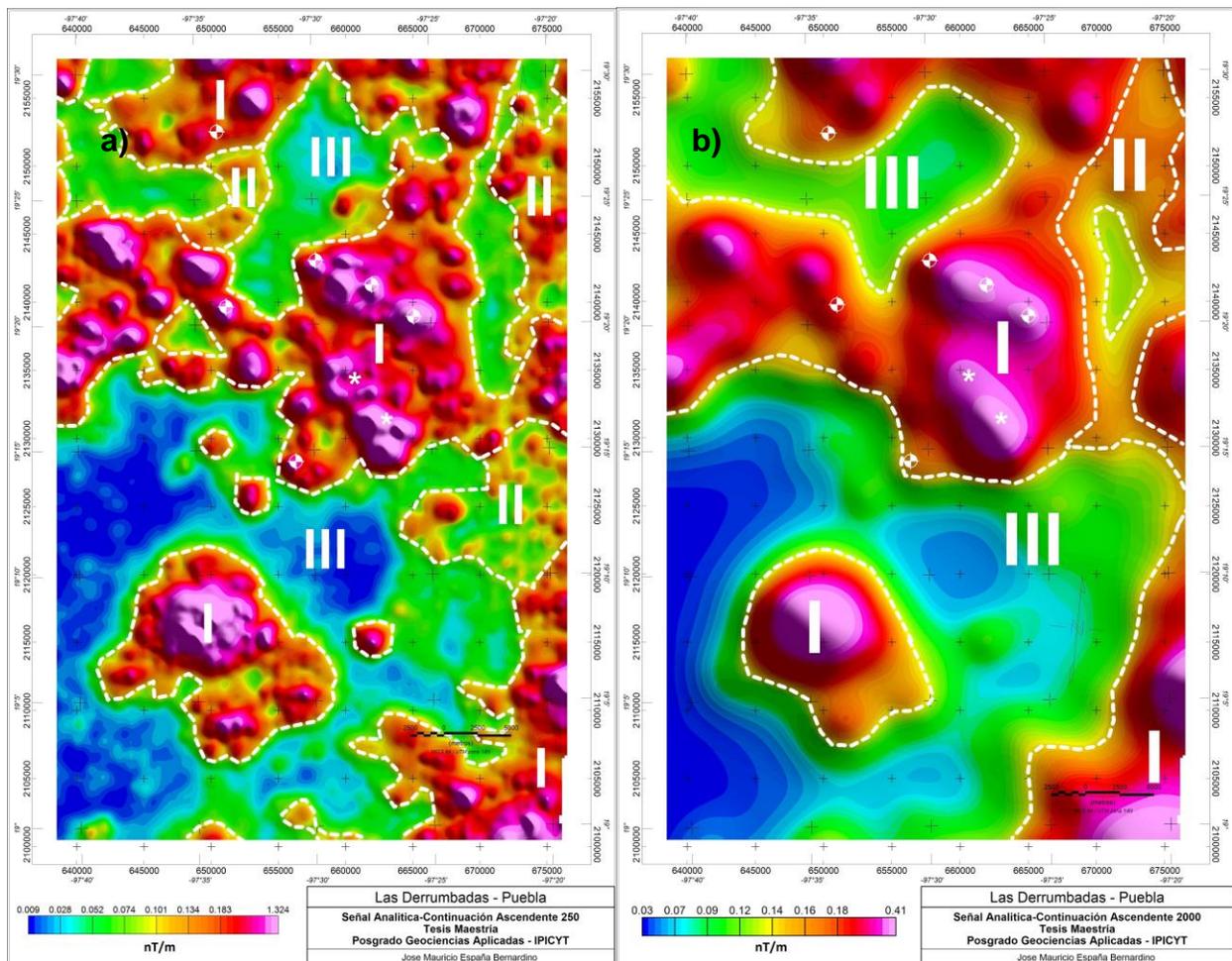
**Roseta de lineamientos (1ra Derivada con Continuación Ascendente a 2000 m.)**



**Figura 34. Mapa de primera derivada en Z con continuación ascendente a 2000m. con su respectiva roseta de lineamientos.**

En este siguiente mapa de la Figura 34 la dirección preferencial es de  $60^\circ$  NE y de  $90^\circ$  NW. La anomalía perteneciente al domo Norte es ya muy reducida.

Igualmente partiendo del mapa de Reducción al Polo se aplicó el filtro de señal analítica con continuación ascendente a 250 y 2000m. En la Figura 35 se seleccionaron los mapas de señal con continuación ascendente a 250 m y 2000 m para la identificación de dominios aeromagnéticos, ya que como recordamos la señal analítica nos proporciona la información relacionada con los límites de las fuentes. A partir del mapa a) de la Figura 35 se identificaron los dominios aeromagnéticos, fue posible identificar tres dominios aeromagnéticos, los cuales se describen a continuación.



**Figura 35. a) Mapa de Señal Analítica con Continuación Ascendente a 250 m, b) Mapa de Señal Analítica con Continuación Ascendente a 2000 m. Cada mapa con la identificación de los dominios aeromagnéticos.**

**DAM I:** Conformado por los valores altos magnéticos, ubicando a nuestro objeto de estudio los domos de Las Derrumbadas dentro del DAM I, partiendo de los domos hacia la dirección NE se localiza la anomalía que presenta el valor máximo de 500 nT aproximadamente. En general el DAM I tiene valores magnéticos máximos de 620 nT y mínimos de 80 nT. La anomalía de mayor tamaño corresponde a una zona mineralizada, en la cual las vetas se alojan en las rocas sedimentarias (calizas y lutitas) y un cuerpo intrusivo que igualmente aflora en superficie. La mayor parte del DAM I se asocia a tobas riolíticas. El DAM I cruza de E-W mostrando una forma de elipsiodes con un par de brazos extendiéndose al W y al N del mapa.

**DAM II:** Se ubica en la parte E del mapa en forma alargada, en dirección N-S, representando rocas sedimentarias calizas y lutitas. El DAM II se relaciona con valores magnéticos medios a bajos de 70 nT aproximadamente hasta -50 nT. El DAM II se ubica en la orilla del mapa abarcando la porción E y NE, una muy pequeña parte del DAM II se localiza en la dirección NW.

**DAM III:** Localizado en la parte S, SW y muy poco del SE de Las Derrumbadas, teniendo una forma circular con un cuerpo en la parte central perteneciente al DAM I. El DAM III representa los valores más bajos de nuestra zona de estudio, partiendo de los -70 nT y descendiendo. Geológicamente está representado en su mayoría por depósitos lacustres, aluvión, limo y arena. Dentro de este dominio se localiza la laguna de Totolcingo.

#### 4.5 Modelado

Para definir la geometría y profundidad de las fuentes asociados con los Domos se realizaron tres modelos 2D (sección A-A', sección B-B' y sección C-C'), la primera sección A-A' tiene una dirección SW-NE, dicha sección corta al domo Norte de nuestra zona de estudio; la sección tiene una longitud aproximada de 27 km. Estos modelados se hicieron a partir del Campo Magnético Reducido al Polo mostrado en el mapa de la (Figura 36). La sección B-B' es casi paralela a la sección A-A' solo que esta atraviesa al domo Sur con una dirección SW-NE y una longitud de 19 km aproximadamente. Por último, la sección C-C' que tiene una dirección SE-NW cortando a los domos y con una longitud de 18 km aproximadamente.

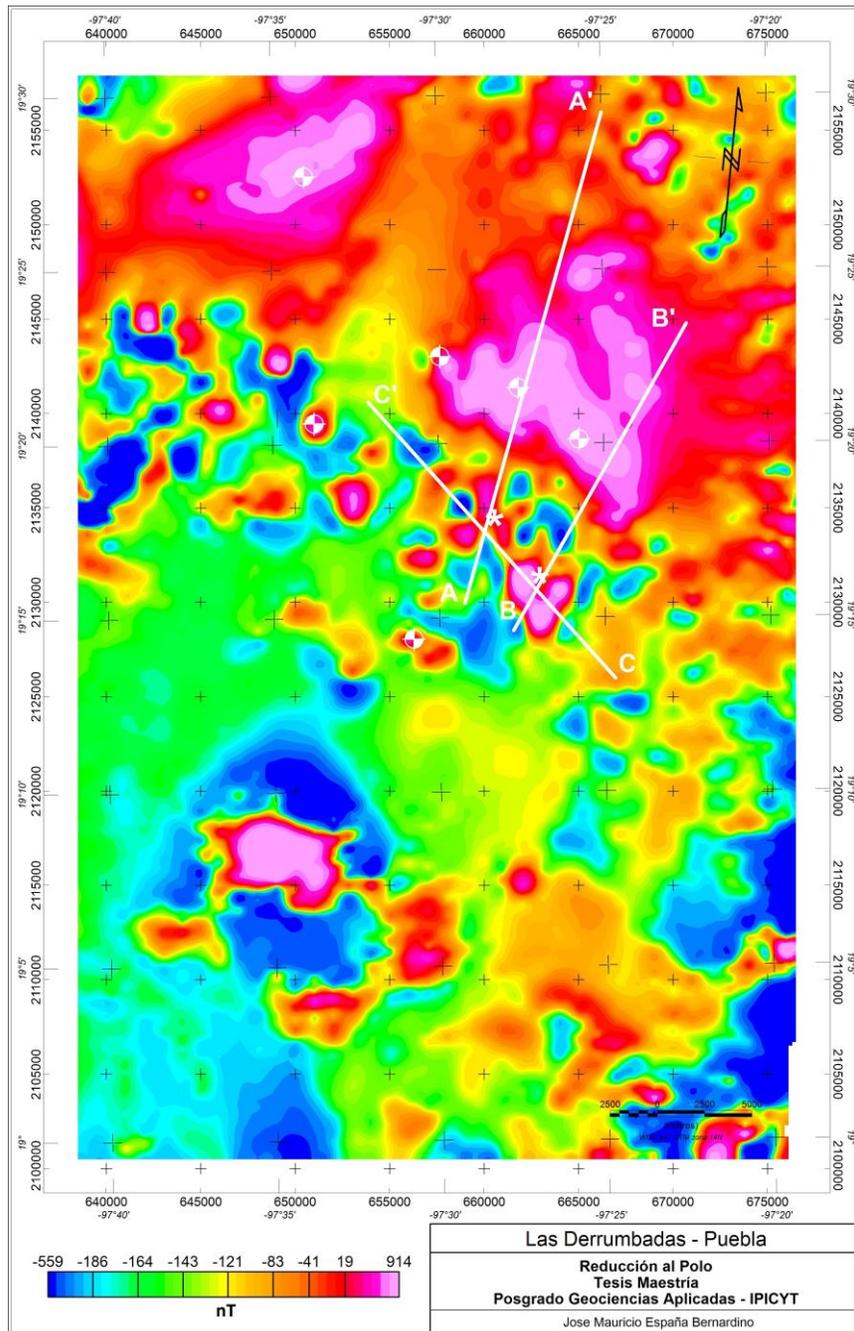


Figura 36. Mapa reducción al polo con secciones A-A', B-B' y C-C'.

Para la realización de nuestro modelo 2D nos apoyamos en el software GM-SYS.®, los métodos utilizados por el software para calcular la respuesta de un modelo magnético se basan en los métodos de Talwani et al., 1959 y Talwani y Heirtzler, 1964, y haciendo uso de los algoritmos descritos en Won y Bevis, 1978. La rutina de inversión en GM-SYS utiliza el algoritmo de inversión de (Marquardt, 1963), para linealizar e invertir los cálculos.

El modelado en GM-SYS es un método de interpretación indirecto, ya que las anomalías son calculadas a partir de un cuerpo de prueba que será comparado, de la anomalía calculada con respecto a la observada. El método consiste en calcular perfiles de los cuerpos, cuando conocemos la forma de la anomalía.

#### 4.5.1 Sección A-A'

El modelo de la sección A-A' que se muestra en la Figura 37, se pueden ver dos altos magnéticos principales, en la parte central de la sección y siendo la mayor anomalía está un alto magnético, que corresponde a un cuerpo intrusivo y a una zona de yacimientos epitermales, hacia la parte SW de nuestra sección se localiza el segundo alto magnético que corresponde al domo Norte de Las Derrumbadas. Como podemos ver en el modelo el alto magnético de la parte minera se asocia a un cuerpo intrusivo en este caso una diorita, que es producto del magmatismo del Oligoceno, afectando a las Formaciones Tamaulipas Superior, San Felipe y Agua Nueva reportado por el (SGM, 2011). Ubicando a nuestra fuente a una profundidad aproximada de 5 km. Dirigiéndonos a la parte SW, hay una falla que se encuentra afectando a las Formaciones Tamaulipas Superior, Agua Nueva y San Felipe, la profundidad de la falla no se puede determinar con exactitud. Siguiendo hacia el SW se encuentra el domo Norte que está rodeado por lahares, el domo está conformado por riolita-dacita y la fuente de esta anomalía se localiza aproximadamente a 2.5 km.

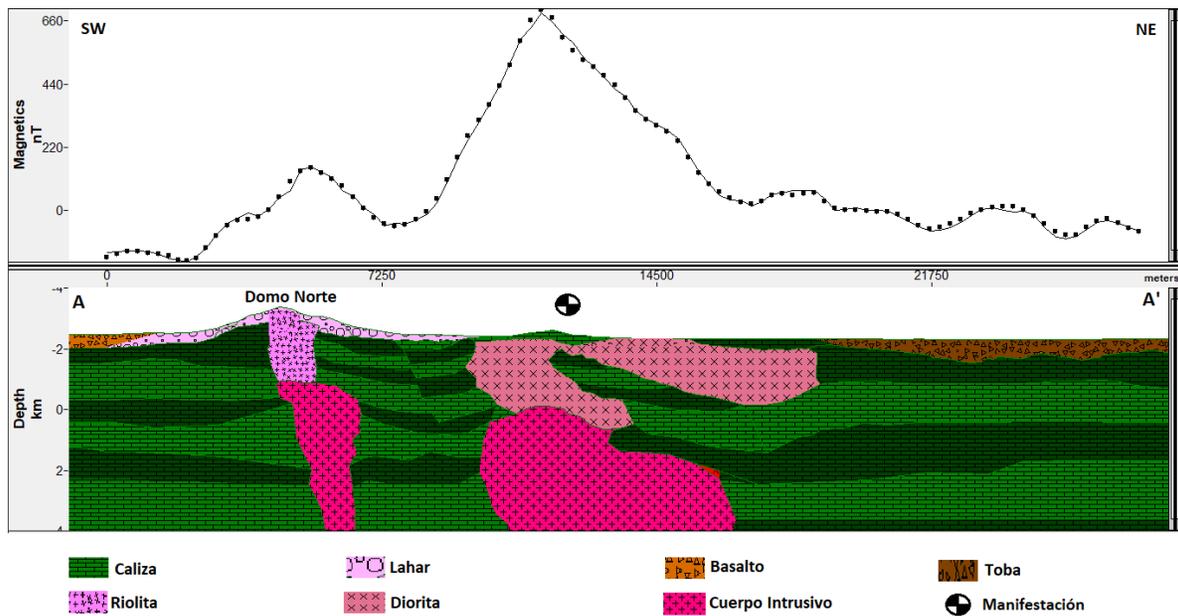


Figura 37. Sección A-A', con dirección SW-NE.

#### 4.5.2 Sección B-B'

La Figura 38 muestra el modelo de la sección B-B' donde se puede observar fácilmente la presencia de dos altos magnéticos, los cuales están asociados al domo Sur y al cuerpo intrusivo de diorita. El domo Sur tiene una respuesta magnética mayor con respecto al domo Norte, es por eso que se consideró que su fuente es diferente a la del domo Norte. Su fuente se estimó a una profundidad de 3.5 km aproximadamente. Formado de riolita-dacita que afloran y al pie del domo hay la presencia de lahares productos de la intensa erosión de lo domos. Siguiendo en dirección NE se tiene una falla que afecta las Formaciones Tamaulipas Superior, Agua Nueva y San Felipe; después sigue otro alto magnético, que pertenece al cuerpo intrusivo, teniendo su fuente a una profundidad estimada de 4 km. En esta zona la diorita si aflora. Ya casi al final de nuestra sección en la dirección NE se encuentran las formaciones de rocas sedimentarias afectadas por andesitas y basalto de edad del Plioceno tardío y Plioceno temprano (SGM, 2011).

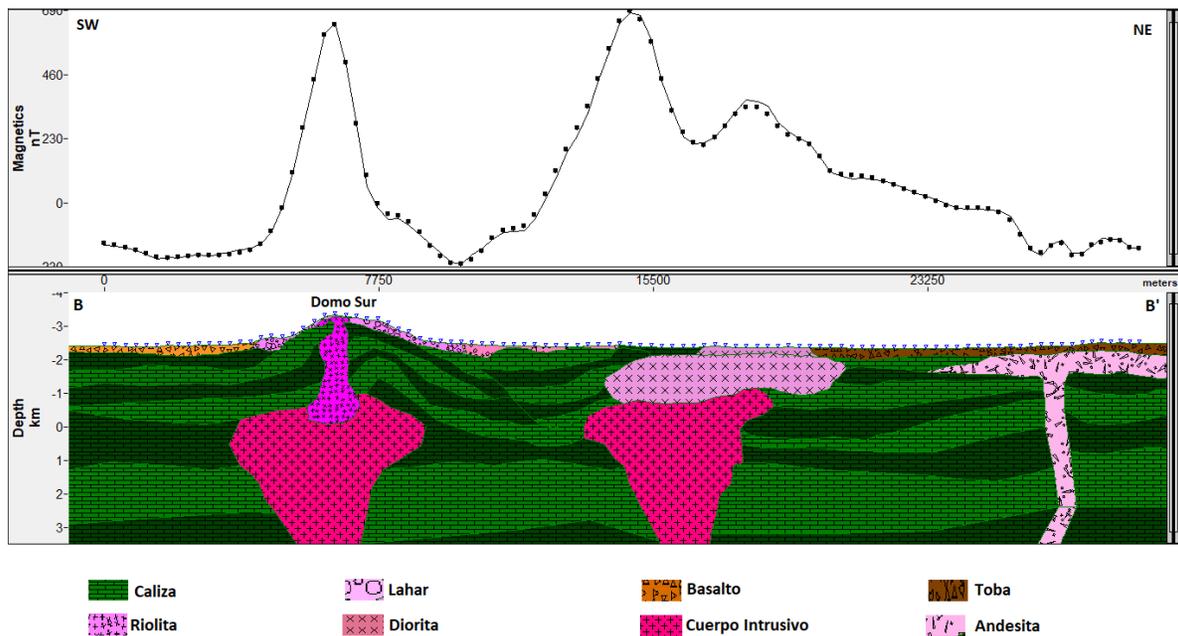


Figura 38. Sección B-B' con dirección SW-NE

#### 4.5.3 Sección C-C'

La Figura 39 muestra que la sección C-C' pasa por los domos de Las Derrumbadas con dirección SE-NW. Se identifican claramente la diferencia entre los dos altos magnéticos del domo Norte y del domo Sur, así mismo sus fuentes se encuentran a diferentes profundidades y de diferentes dimensiones. Teniendo el domo Sur una respuesta magnética mayor en comparación a la fuente que genera la anomalía del domo Norte. Entre los domos hay un gran depósito de lahares.

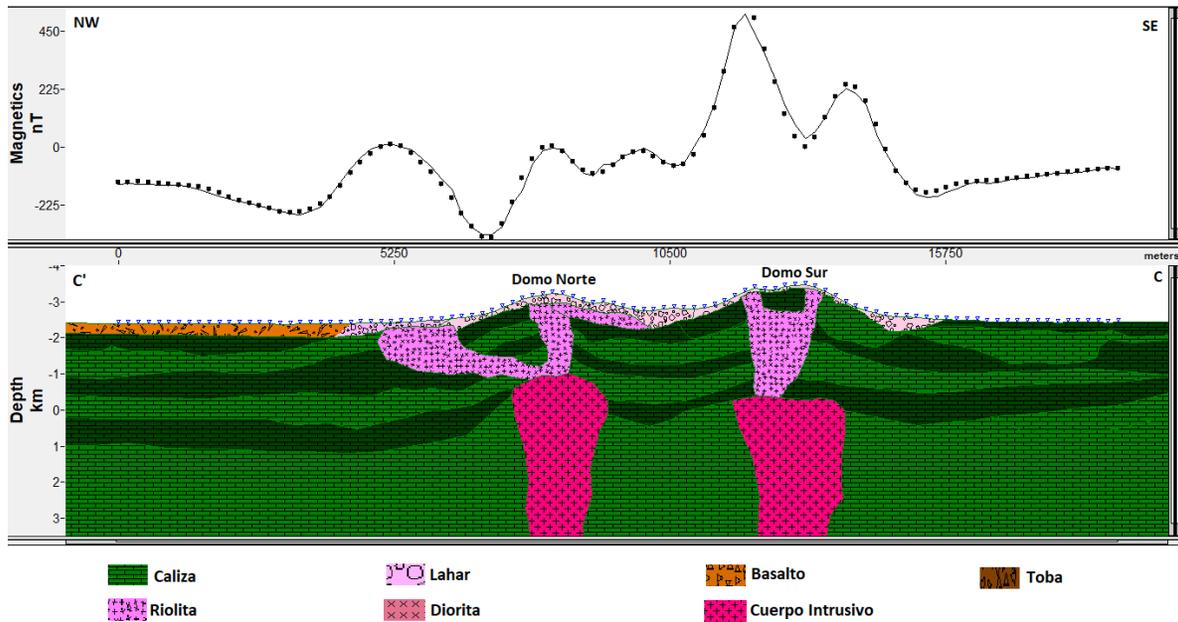


Figura 39. Sección C-C', con dirección NW-SE.

El resultado de los tres modelos, fueron las susceptibilidades de los diferentes cuerpos, la Tabla 2 muestra los valores de susceptibilidades magnéticas obtenidas a partir de los modelos 2D realizados.

Roca	Susceptibilidad Magnética. $1 \times 10^{-3}$ (SI)	Nomenclatura
Caliza	0.000377- 0.0000251	
Riolita	0.025	
Diorita	0.00804	
Lahar	0.00427	
Basalto	0.489	
Andesita	0.05027	
Toba	0.0607	
Intrusivo	0.000	

Tabla 2. Susceptibilidades magnéticas de "Las Derrumbadas". Obtenida del modelo 2-D.

#### 4.6 Modelado 3D

Para la realización del modelo 3D, se utilizó el software Oasis Montaj de Geosoft®. En las versiones más recientes del programa se tiene una extensión para modelado geofísico, llamada VOXI Earth Modelling, el cual es un software de inversión geofísica.

Para la generación del modelo se necesita tener trazado un polígono del área de interés, el modelo digital de elevaciones y un grid con la información que deseamos modelar que en nuestro caso fue un mapa de Reducción al Polo. Lo siguiente es

elegir la resolución y dependiendo de ella es que se van a generar un número determinado de celdas (volumen de celdas), después se necesitan los datos de intensidad, declinación e inclinación del campo magnético, como paso final se aplica la aproximación completa de inversión de voxel 3D de Ellis, que permite al vector de magnetización (MVI) varíe en cada celda del modelo y basándose en una restricción de suavizado para limitar la variación entre cada celda (MacLeod y Ellis, 2013).

Finalmente se aplica un algoritmo de regresión de cresta de mínimos cuadrados amortiguados utilizado para obtener la susceptibilidad magnética frente a la profundidad a partir de los datos magnéticos.

Para la generación de este modelo se seleccionó un área a modelar, a diferencia del software GM-SYS 2D que solo se interpreta una línea o sección de nuestro mapa. El área que seleccionamos fue un polígono que cubriera los domos de Las Derrumbadas.

La Figura 40, Figura 41 y Figura 42 muestran los resultados de este procesado fueron modelos 3D de isosuperficies con diferentes rangos de valores en la susceptibilidad magnética, lo que nos ayuda a tener una mejor visualización del comportamiento de los cuerpos conforme a la susceptibilidad magnética y a la profundidad.

Los modelos de las Figuras 40, 41 y 42 están divididos en tres partes a), b) y c); que se describen a continuación:

- a) Polígono obtenido del mapa de Reducción al Polo, de la Figura 32a.
- b) Polígono obtenido del modelo digital de elevaciones, de la misma zona del mapa de Reducción al Polo, ubicando a los domos.
- c) Modelos de isosuperficies, asignándole a cada isosuperficie un diferente rango de valores de susceptibilidad magnética y cada isosuperficie está representada por diferente color.

Todo el modelo está ubicado dentro de un cubo con coordenadas X, Y y Z.

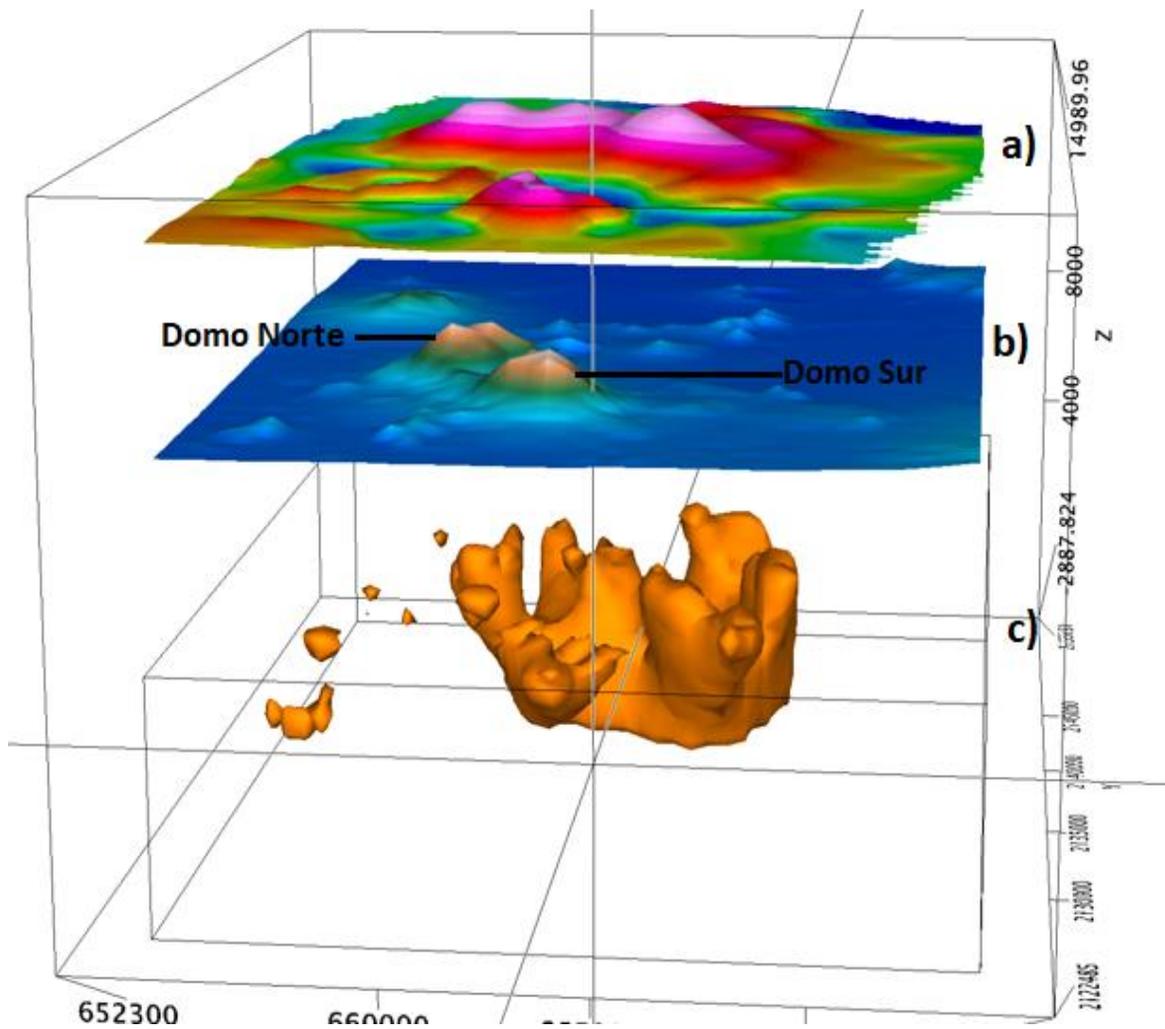


Figura 40. Modelo 3D con cuerpos de isosuperficies. a) Mapa de Reducción al Polo, b) Mapa topográfico y c) Isosuperficies.

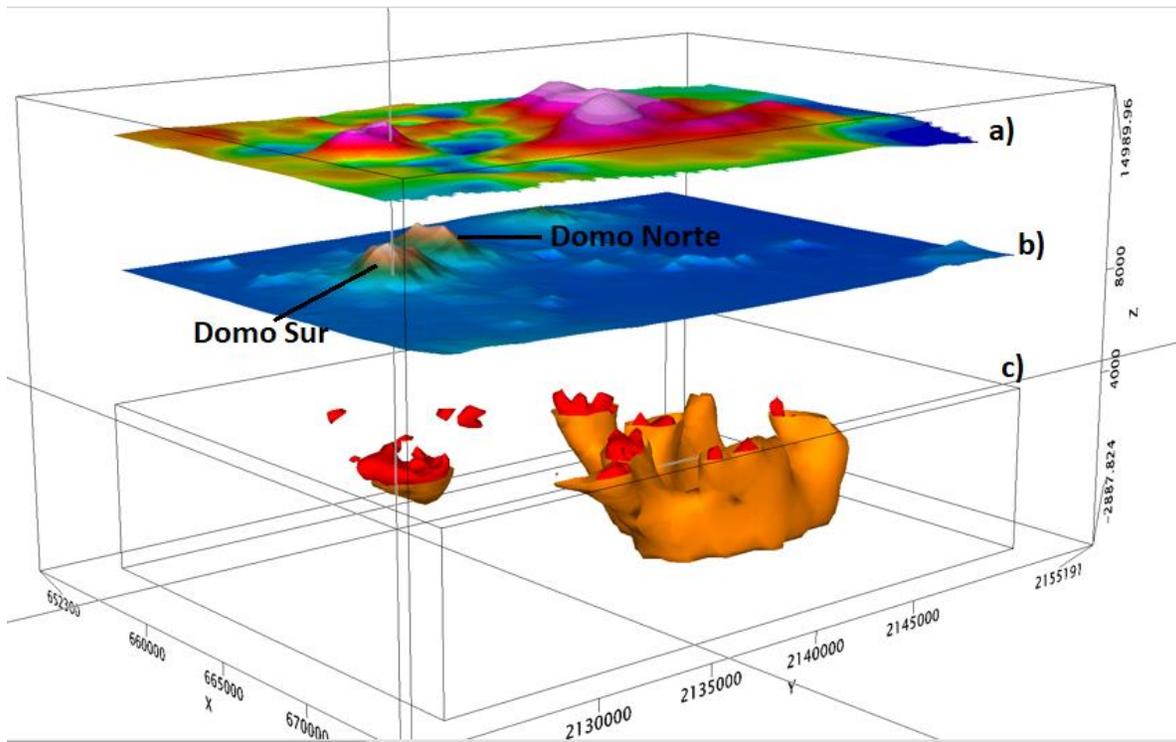


Figura 41. Modelo 3D con dos isosuperficies con diferentes valores de susceptibilidad magnética. a) Mapa de Reducción al Polo, b) Mapa topográfico y c) Isosuperficies.

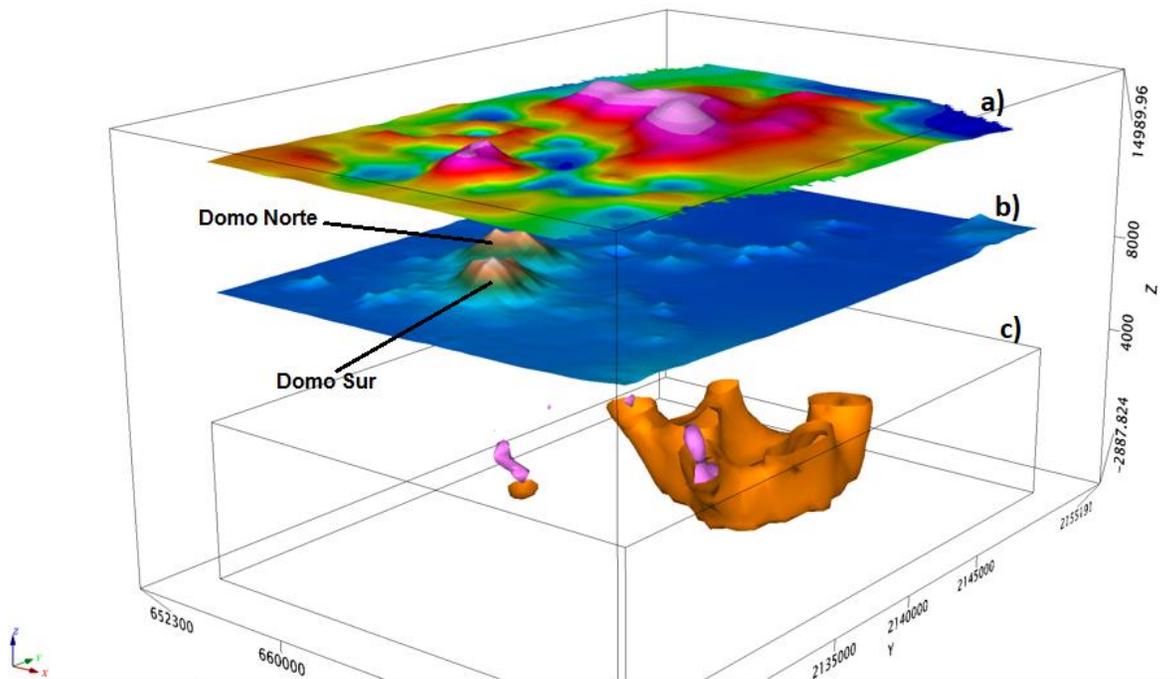


Figura 42. Modelo 3D con dos isosuperficies con diferentes valores de susceptibilidad magnética. a) Mapa de Reducción al Polo, b) Mapa topográfico y c) Isosuperficies.

Conforme se cambiaban los valores de susceptibilidad magnética de las isosuperficies, el volumen y forma de los cuerpos cambiaba, del modelo 3D se obtuvo la Tabla 3 con los diferentes rangos de susceptibilidad magnética para las diferentes isosuperficies.

Isosuperficie	Susceptibilidad Magnética. $1 \times 10^{-3}$ (SI)
	<0.0006
	0.0006 – 0.001
	0.0022 – 0.05
	0.05 – 0.16
	>0.16

**Tabla 3. Susceptibilidades magnéticas de las isosuperficies obtenida del modelo 3-D.**

Los modelos 3-D nos dieron una mejor visión del comportamiento en el subsuelo con respecto a la susceptibilidad magnética y en conjunto con nuestro modelo 2-D nos ayudaron a la caracterización geofísica de la estructura geotérmica de Las Derrumbadas.

De acuerdo a la geología reportada por (Yañes-García y Casique-Vásquez, 1980), menciona sobre cuerpos intrusivos que hay en la zona, que muy probablemente se podrían asociar en nuestro modelo 3-D a las diferentes isosuperficies, debido que los cuerpos intrusivos se encuentran encajonados dentro de rocas sedimentarias, cuya susceptibilidad magnética es muy baja en comparación con la de los intrusivos, lo que nos permite tener una mejor visualización de los cuerpos plutónicos o metamórficos.

## Capítulo 6

### Discusiones y Conclusiones

Para considerar una zona con potencial geotérmico, esta debe de cumplir con una principal característica y es la de contar con una fuente de calor, por lo que el objetivo original del presente trabajo es realizar una caracterización geofísica del complejo dómico “Las Derrumbadas”, y determinar si la zona cuenta con un potencial geotérmico, esto únicamente con información aeromagnética e información geológica obtenida de la literatura. Para tal fin se realizaron dos modelados de la información aeromagnética uno en 2-D y el otro en 3-D, así como algunos mapas que nos ayudaron a tener una mejor interpretación de la zona de estudio junto con la información geológica.

De acuerdo a observaciones de diversos autores entre ellos Siebe (1985), considera a Las Derrumbadas con potencial geotérmico mencionando que Las fumarolas que se observan al SW de los domos indican que probablemente un sistema geotérmico aún está activo, producido por un magma somero. La alteración de la roca principalmente caolinización revelan que las actividades de las fumarolas fueron más intensas en el pasado.

En nuestros mapas de anomalías magnéticas lo que podemos observar son valores altos y valores bajos de las susceptibilidades magnéticas de las rocas que hay en nuestra área de estudio, por lo que para poder asociar las anomalías magnéticas a alguna fuente de calorífica se deben de tomar en cuenta diferentes aspectos.

El primero es el tipo de fuente, ya que un sistema geotérmico puede tener una fuente de calor, que esta suministrada por un magma alojado en la corteza terrestre, una intrusión que está en proceso de enfriamiento o como una cámara magmática la cual alimenta a un volcán. Si la fuente de calor proviniera de una cámara magmática que ha alimentado a un volcán, lo que se espera como respuesta en nuestro mapa de anomalías magnéticas, son mínimos magnéticos causados por temperaturas las extremas en la cámara magmática, la susceptibilidad ferromagnética y la remanencia se eliminan cuando la roca se calienta por encima de 550 ° C debido a que por la temperatura las rocas van perdiendo sus propiedades magnéticas por lo tanto la susceptibilidad magnética tiende a cero, o es cero.

Ahora si la fuente se derivó de un magma de enfriamiento, la presencia de material ígneo provocaría una respuesta de máximos magnéticos resultantes por la presencia del material con susceptibilidades altas o también se podría esperar una respuesta de mínimos magnéticos causados por la temperatura extrema presente en la cámara magmática. Una intrusión como fuente calorífica, generaría un cambio en la susceptibilidad magnética debido al metamorfismo, depositando materiales de alta susceptibilidad y teniendo como respuesta valores magnéticos altos, esto porque los fluidos que ascienden provenientes de la fuente de calor alteran las regiones exteriores de la intrusión. Aunque en ocasiones el metamorfismo asociado

con la actividad geotérmica o patrones de alteración hidrotermal causan cambios en la mineralogía primaria de las rocas, como en el caso de Nueva Zelanda, que se reemplazó la magnetita por pirita, provocando así una respuesta de mínimos magnéticos en los mapas de anomalías magnéticas (Fonseca et al., 1981).

La presencia de fallas o fracturas se pueden asociar en los datos aeromagnéticos, por medio de lineamientos magnéticos, pero si las fallas actúan como conductos para la convección de fluidos, es posible que la alteración hidrotermal haya tenido lugar a lo largo de las fallas lo que provocara un trend de valores altos magnéticos. Como se discutió anteriormente, es posible que la alteración hidrotérmica asociada con la convección de fluidos geotérmicos haya destruido la magnetita a lo largo de las zonas de falla que actúan como conductos para los fluidos y/o manifestaciones. Esto puede reflejarse en los datos aeromagnéticos como mínimos magnéticos coincidentes con las zonas de fallas. De acuerdo a los mapas generados de primera derivada con continuaciones ascendentes y los lineamientos identificados de zona de Las Derrumbadas, algunas de las manifestaciones si coinciden con algún lineamiento o probablemente zona de falla y/o fractura. Aunque algunas de las manifestaciones identificadas se localizan sobre alguna de las anomalías positivas, y de acuerdo a la geología reportada por el SGM se asociaron algunas anomalías a cuerpos volcánicos.

De acuerdo a Quintanilla y Suárez (1994), en su trabajo mencionan sobre la relación que hay entre la anomalía magnética "Nuevo León" y su fuente de calor, esto en la zona geotérmica de Cerro Prieto, mencionando que probablemente la fuente es causa de un cuerpo plutónico de gabro-peridotitas ricas en magnetita el cual tiene una temperatura de Curie mayor de 350 °C y para la magnetita de 575 °C, el principal mineral presente en las rocas peridotítico-gabroicas.

En los domos de la cuenca de Serdán-Oriental las rocas son generalmente peraluminosas y contienen cristales de plagioclasa, sanidino, cuarzo, biotita, magnetita e ilmenita, y es notable que el domo de Las Derrumbadas presente también granate (Ferriz y Mahood, 1986). En la zona de Las Derrumbadas Yáñez-García (1982), menciona un cuerpo intrusivo detectado a profundidad en la parte oriental y aflorante al norte de los domos, provocando un metamorfismo en las calizas de la formación Orizaba y Guzman. Por lo que de acuerdo a nuestro modelado 2-D, la fuente magnética para las anomalías del domo Norte y Domo Sur son diferentes; para el domo Norte la fuente magnética, se ubicó la cima de la fuente aproximadamente a 2.5 km de profundidad, con 2 km de ancho y 1.5 km de largo, para el domo Sur la fuente magnética es más profunda teniendo la cima a 3.5 km de profundidad con 5 km de largo y 3 km de ancho. El modelo 2-D fue de acuerdo a un cuerpo intrusivo que afecta a ambos domos. La amplitud de la anomalía del domo Sur es mayor que la del domo Norte.

Para el modelo 3-D se manejan isosuperficies, con diferentes rangos de susceptibilidades magnéticas, ubicando dos cuerpos como fuentes magnéticas para los domos de las Derrumbadas, los cuerpos coinciden con las profundidades marcadas para las fuentes magnéticas en nuestro modelo 2-D; aunque en el modelo

3-D la base de estos cuerpos se localiza aproximadamente a 4 km de profundidad. Comparando con el modelo 2-D, la cima del cuerpo intrusivo para el domo Norte y Domo Sur si coinciden con el modelo 3-D, pero con respecto a la base, en el modelo 2-D el cuerpo intrusivo sigue hasta los 5 km de profundidad, es por esta razón que se asoció la fuente calorífica en esta zona, ya que en el modelo 3-D no hay cuerpo o isosuperficies, debido a que la temperatura afecta la susceptibilidad magnética del cuerpo intrusivo, entonces su susceptibilidad empieza a disminuir mientras que la temperatura aumenta.

Los cuerpos o isosuperficies con mayor susceptibilidad pueden ser consecuencia del metamorfismo de las rocas. Por lo que asociamos a la fuente calorífica con la fuente magnética y se manejó como un cuerpo intrusivo. Solo con métodos magnéticos no nos fue posible saber con exactitud el tipo de roca del cuerpo plutónico, posiblemente con las tablas obtenidas valores de susceptibilidad magnética se podrían asociar los valores a el tipo de rocas presentes en nuestra área de estudio.

Con los mapas de primera de derivada y la ubicación de las manifestaciones se puede inferir la presencia de fallas geológicas, asociadas a lineamientos aeromagnéticos.

El método aeromagnético es una excelente herramienta geofísica, para la exploración geotérmica.

Una combinación de métodos geofísicos debería proporcionar una mejor evaluación de la naturaleza de la fuente de calor geotérmica.

Los estudios aeromagnéticos parecen ser los más útiles para identificar áreas favorables que pueden explorarse mediante métodos que proporcionan mejor detalle.

Los resultados de este estudio indican que los levantamientos aeromagnéticos son capaces de proporcionar información útil para la exploración geotérmica sin determinar necesariamente la naturaleza de la fuente de calor.

Con este primer acercamiento a los domos de Las Derrumbadas, se cree que, si puede tener potencial geotérmico, por lo que es recomendable complementar con otras herramientas geofísicas como gravimetría, sondeos eléctricos e información sísmica y geológicas como información de pozos para respaldar lo dicho anteriormente.

## Bibliografía

- Armstead, H.C.H. (1983) *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contributions to the Energy Needs of Man*. Spon Press; 2nd edition, 448 p.
- Austin-Erickson, A., Ort, M. H., & Carrasco-Núñez, G. (2011). Rhyolitic phreatomagmatism explored: tepexitl tuff ring (Eastern Mexican Volcanic Belt). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1), 325-341.
- Baranov, V. and Naudy, H., (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole, *Geophysics*, 22: pp. 67-79.
- Blakely, R. J., 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*: Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 445 p.
- Burger, H.R., (1992). *Exploration using magnetic method in Exploration geophysics of the shallow subsurface*. Prentice Hall: p. 389-452.
- Butler, 1998. *Paleomagnetism. Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Electronic Edition: <http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/book/>
- Caballero Miranda, C, I.,(2011). La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS): sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes dinámicas y de flujo. Universidad Autónoma de México, Instituto de Geofísica.
- Campbell, W. H. (1997). *Introduction to geomagnetic fields*.
- Campos-Enriquez, Garduño-Monroy (1987). The shallow structure of Los Humeros and Las Derrumbadas geothermal fields, México.
- Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., Lozano, V., L., (1997). Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, Central Mexico. *Geol. Soc. Am. Map and Chart Series MCH*, vol. 081, p. 10.
- Carrasco-Núñez, G., Ort, M. H., & Romero, C. (2007). Evolution and hydrological conditions of a maar volcano (Atexcac crater, Eastern Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159(1), 179-197.
- Carrasco-Núñez and Riggs, (2007). Polygenetic nature of a rhyolitic dome and implications for hazard assessment: Cerro Pizarro volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 171, 307-315.
- Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Riggs, N. R., Ort, M. H., Zimmer, B. W., Willcox, C. P., & Branney, M. J. (2012). Recent explosive volcanism at the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Field Guides*, 25, 83-113.

- Carrillo-Bravo, José., 1961. Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Ciudad Victoria, Tamaulipas: Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros. V.3, p. 1-98.
- Cataldi, R. (2006). De la celebración del centenario de la industria geotermoeléctrica al desarrollo de la energía geotérmica en Italia en el siglo XXI. GEOTERMIA, 61.
- Cepeda-Dávila, Leovigildo, (1978). Informe de estudios petrográficos hechos a muestras de la Cuenca de Libres-Oriental, estados de Puebla y Veracruz: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad.
- Davis, A.P., Michaelides, E.E. (2009) Geothermal power production from abandoned oil wells. Energy, Vol. 34, 866-872.
- Demant, A., (1978). Características del eje neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Revista. V. , No. 2, p. 172-187.
- Department of Energy, U. S. (2016). <http://energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>.
- Dickson, M.H., Fanelli, M. (2005) Geothermal Energy: Utilization and Technology. Earthscan Publications Ltd., 226 p.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2013). Geothermal energy: utilization and technology. Routledge.
- Ellis, R. G., de Wet, B., & MacLeod, I. N. (2012). Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. In ASEG Extended Abstracts 2012. Australian Society of Exploration Geophysics (ASEG), 2012. p. 1-4.
- Fernández-Becerra, Salvador., (1977). Bosquejo geológico de la Sierra de Tecamachalco, Estado de Puebla: México, D.F., Instituto Politécnico Nacional., Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., (1999). Spacetime patterns of Cenozoic arc volcanism in Central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. Geology 27 (4), 303–306.
- Ferrari, L., (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. V. 53, p. 84-92.

- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V.C., Manea, M., (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, p. 122-149.
- Ferriz, H., Mahood, G., (1984). Eruption rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, Mexico. *J. Geophysics. Res.* 89(B-10), 8511–8524.
- Figuera, M. (2010). Métodos geofísicos aplicados en la exploración del agua subterránea, caso: acuífero de Villa Hidalgo, S.L.P. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. A.C.
- Fridleifsson, I. B. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3), 299–312.
- Geothermal Energy, A. (2012). *Geothermal Basics: Q&A*.
- González González, M. A. (2004). Geotermia como alternativa energética en México, ¿Es realmente viable?.
- Gubbins, D., & Herrero-Bervera, E., (2007). Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. Springer Science & Business Media.
- Gunn, P. J., (1997). Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *Journal of Australian Geology & Geophysics*. pp. 105-113.
- Henderson, R. G., (1970). On the validity of the upward continuation integral for total magnetic intensity data: *Geophysics* 35, 916-919.
- Henderson, R., y Zietz, I.(1949). The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity field. *Geophysics* 14: pp. 508-516.
- Henderson, R. G., Zietz, I., (1949). The computational of second vertical derivatives of geomagnetic fields: *Geophysics*, 14, 508-516.
- Herrera, H. L. (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC. *GEOTERMIA*, 37.
- Hiriart Urdanivia, H. (1982). Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas estados de Puebla y Veracruz. México, D.F.
- Hogg, R.L.S., 1989. Recent advances in high sensitivity and high resolution aeromagnetism. In Garland, G.D. (ed.), *Proceedings of Exploration '87, Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater*. Ontario Geological Survey, Special Volume 3, pp. 153–169.

- Horsfall, K.R., 1997. Airborne magnetic and gamma-ray data acquisition. Australian Geological Survey Organization Journal of Australian Geology and Geophysics, 17: 23–30.
- IGA, I. (2013). Handbook of Geothermal Exploration Best Practices: A Guide to Resource Data Collection, Analysis, and Presentation for Geothermal Projects.
- Iglesias-Rodríguez, E., Arellano-Gómez, V.M., Torres, R.J. (2005). Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la Geotermia en México. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reporte Interno Proyecto No. 3753, 63 p.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2013). An introduction to geophysical exploration. John Wiley & Sons.
- Lago, M., Sanz, T., & Majarena, U. (2015). El vulcanismo y su potencial geotérmico: perspectiva geológica. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 23(1), 80.
- Langel, R. A., & Hinze, W. J. (2011). *The magnetic field of the Earth's lithosphere: The satellite perspective*. Cambridge University press.
- Lillie, R. J. (1999). *Whole Earth Geophysics: an introductory textbook for geologists and geophysicists*. London: Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.
- López-Loera, H., Urrutia-Fucugauchi, J., Alva-Valdicia. L., (2011). Estudio aeromagnético del complejo volcánico de Colima, occidente de México – implicaciones tectónicas y estructurales: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 28, n. 3, p. 349-370.
- López-Ramos, E., (1979). Geología de México: México, D. F., 2da, ed. P. 453.
- Lowrie, W., (2007). Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press. Second Edition.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L. (2010) Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. Proc. of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 23 p.
- MacLeod, I. N. and Ellis, R.G., (2013). Quantitative Magnetization Vector Inversion. In SAGA Extended Abstracts 2015. South African Geophysical Association (SAGA), 2015. p. 1-5.
- Mariita, N. O. (2007). The Magnetic Method. Geothermal Training Programme, United Nations University.
- Marquardt, D. W., (1963). An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters: J. SIAM, v. 11:431-441.

- Mercado, S. (1988) High temperature marine hydrothermal vents (350 °C) located at 21 °N, a 2600 m depth on the East Pacific Rise. Geothermal Resources Council, Transactions, Vol. 12, 175-183.
- Nabiaghian, M.N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated interpretation. *Geophysics* 37: pp. 507-517.
- O'Learly, D. W., Friedman, J. D., Pohn, H. A., (1976). Lienament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms: *Geological Society of America Bull.*, v.87, p. 1463-1469.
- Olivas R., Moisés., (1953). Informe geológico de la provincia del Macizo de Teziutlán, Puebla; Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.
- Peredo, C. R. (2015). *Análisis geológico-estructural de la Zona del Silencio, noreste de México a través de métodos geofísicos potenciales*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. A. C.
- Pérez, C. Y. (2011). Caracterización geofísica de ambientes cársticos, caso: Polje de Joya de Luna, San Luis Potosí, México. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. A. C.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX)., (1988). Estratigrafía de la Republica Mexicana: Mesozoico, subdirección de Producción Primaria, Coordinación Ejecutiva de Exploración.
- Pettijohn, J. F., Potter-Edwin, P., (1964). Atlas and glossary of primary sedimentary structures: Alemania, Sringer-Verlag, 370 p.
- Quijano León José Luis, 2007, México. Manual de Geotermia, Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios.
- Quintanilla, A. L., & Suárez, F. (1994). Fuente de calor en el campo geotérmico de Cerro Prieto y su relación con la anomalía magnética Nuevo León, México. *Geofísica Internacional*, 33(4).
- Reeves, C., (2006). Aeromagnetic Surveys. *Earthworks*, 155.
- Reynolds, J. M., (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics: John Wiley and Sons, Reynolds Geo-Sciences Ltd., Reino Unido.
- Riggs, N., & Carrasco-Nunez, G. (2004). Evolution of a complex isolated dome system, Cerro Pizarro, central México. *Bulletin of Volcanology*, 66(4), 322-335.
- Robinson, S.E., & Coruh, C., (1998). Basic Exploration Geophysics. Virginia Polytechnic Institute and State University.

- Rodríguez, E.S., & Morales, B.W., (2010). Geología-México-Veracruz-Llave (Estado). Universidad Veracruzana, v. 1, p. 43-64.
- Rodríguez, S. R., (2005). Geology of Las Cumbres volcanic complex, Puebla and Veracruz states, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2).
- Rojas, O.E., (2016). Litoestratigrafía, petrografía, y geoquímica de la Toba Llano, y su relación con el cráter El Xalapazco, Caldera de Los Humeros, Puebla. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. A. C.
- Romero, F. (1985). Exploración en la zona Geotermica de Las Derrumbadas Puebla. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos.
- Salazar-Mandujano, Sergio., (1969). Estudio geológico regional del prospecto Zacatepec: México, D. F., Petróleos Mexicanos.
- Santoyo-Gutiérrez, E., y Torres-Alvarado, I. S. (2010). Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable. Centro de Investigación en Energía, UNAM.
- Sanyal, S.K. (2010) Future of geothermal energy. Proc. Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 6 p.
- Servicio Geológico Mexicano, (2011). Carta geológico-minera Guadalupe Victoria, E14-B35, Tlaxcala, Puebla y Veracruz. (1:250 000).
- Servicio Geológico Mexicano, (2011). Carta geológico-minera Veracruz, E14-3, Tlaxcala, Puebla y Veracruz. (1:50 000).
- Servicio Geológico Mexicano, (2011). Carta Magnética de Campo Total, E14-3, Estado de Veracruz. (1:250 000).
- Servicio Geológico Mexicano, (2011). Carta Magnética del Campo Total Reducido al Polo, Guadalupe Victoria, E14-B35, Estado de Puebla. (1:50 000).
- Serway, R. A., (1997). Física tomo II. Editorial McGraw-Hill, 906-917.
- Sheriff, R. E., (2002). Encyclopedic dictionary of applied geophysics. Society of exploration geophysicists.
- Siebe, C., Verma, S.P., (1988). Major Element Geochemistry and Tectonic Setting of Las Derrumbadas Rhyolitic Domes, Puebla, México.

- Siebe, C., (1986). On the possible use of maars and cinder cones as palaeoclimatic indicators in the closed basin of Serdán-Oriental, Puebla, México. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 28. P. 398-400.
- Siebe, C., Macias, J. L., Abrams, M., Rodriguez, S., Castro, R., & Delgado, H. (1995). Quaternary explosive volcanism and pyroclastic deposits in east central Mexico: implications for future hazards. In *Guidebook of geological excursions: in conjunction with the Annual Meeting of the Geological Society of America, New Orleans, Louisiana, November 6-9, 1995* (pp. 1-48). Louisiana State University. Basin Research Institute. Center for Coastal Energy & Environmental Resources, Baton Rouge, Louisiana, United States.
- Soengkono, S. (2015). The Relationship between Geological Structures and High Temperature Geothermal Systems in the Eastern Taupo Volcanic Zone (New Zealand) as Seen from High Resolution Airborne Magnetic Data. In *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia* (pp. 1-11).
- Talwani, M., (1965). Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. *Geophysics*, vol. 30, pp. 797-817.
- Talwani, M., & Heirtzler, J. R. (1964). Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structures of arbitrary shape.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (Vol. 1). Cambridge university press.
- Tester, J., Blackwell, D., Petty, S., Richards, M., Moore, M., Anderson, B., Livesay, B., Augustine, Ch., DiPippo, R., Nichols, K., Veatch, R., Drake, E., Toksoz, N., Baria, R., Batchelor, A.S., Garnish, J. (2007) The future of geothermal energy: an assessment of the energy supply potential of engineered geothermal systems (EGS) for the United States. *Proc. of the Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA*, 10 p.
- U.S. Geological Survey. U.S.G.S. Geomagnetism Program.  
<https://geomag.usgs.gov/>.
- Vallina, A. U., Udías, A., Mezcuca, J., & Rodríguez, J. M., (1997). *Fundamentos de Geofísica*. Alianza (Vol. 167). Alianza Editorial Sa.
- Verma, S.P., (1987). Mexican volcanit belt: Present state of knowledge and unsolved problems. *Geofísica Internacional, Special Volume. On MVB-part 3-b, V. 26*, p. 309-340.
- Venegas, S., Herrera, J.J., & Maciel, R. (1985). Algunas características de la faja volcánica mexicana y de sus recursos geotérmicos.

- Villanueva, R.E., Prol-Ledesma, R.M., Torres-Vera, M.A., Canet, C., Armienta, M.A., de Ronde, C.E.J. (2006) Comparative study of sampling methods and in situ and laboratory analysis for shallow-water submarine hydrothermal systems. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 89, 414-419.
- Viniegra-Osorio, Francisco., (1965). Geología del Macizo Teziutlán y la cuenca cenozoica de Veracruz: *Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros*, v. 17, p. 100-135.
- Wohletz, K., Heiken, G., (1992) *Volcanology and Geothermal Energy* (Los Alamos Series in Basic and Applied Sciences). University of California Press, 450 p.
- Yáñez-García, C., y Casique-Vásquez, J., (1980). Informe geológico del Proyecto Geotérmico Los Humeros-Las Derrumbadas; México, D.F., Comisión Federal de Electricidad.
- Yáñez-García, C., y García-Duran, S., (1982). Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz; México, D. F., Comisión Federal de Electricidad.