



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
COLEGIO DE GEOFÍSICA**

**INTERPRETACIÓN DE LA GRAVIMETRÍA DEL
COMPLEJO VOLCÁNICO TULANCINGO – ACOCCULCO
ESTADOS DE HIDALGO Y PUEBLA Y SU
RELACION CON EL SISTEMA GEOTÉRMICO**

T E S I S

Que para obtener el título de:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA GEOFÍSICA

Presenta:

KARLA KRYSTEL ANDRADE ENRÍQUEZ

Director interno de Tesis:

M. C. JOSÉ SERRANO ORTÍZ

Director externo de Tesis:

DR. GERARDO DE JESÚS AGUIRRE DÍAZ

PUEBLA, PUE.

FECHA ENERO 2020

Dedicatoria

A la memoria de aquellas personas que ya no están físicamente, pero permanecerán en mi corazón por siempre.

A mi abuelita Meche.

A mi abuelito Lupe.

A mi abuelito Juan.

A Chubeto.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a Dios por permitirme alcanzar cada una de las metas que me he propuesto y por dejarme disfrutar de las experiencias universitarias.

Agradezco enormemente a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por ser el medio de mi formación tanto académica como profesional.

A mi director de tesis externo el Doctor Gerardo Aguirre, quien desde el comienzo de la investigación me apoyó incondicionalmente, por sus enseñanzas, valiosas aportaciones y por su calidez humana. Le agradezco además por su ayuda con el apoyo para los trámites del proyecto 4.6 de GEMex, quienes fueron sumamente importantes en el desarrollo de mi trabajo y a quienes también agradezco sinceramente.

A mi director interno el M.C José Serrano, por su increíble ayuda y paciencia durante todo el proceso, sus enseñanzas, y sus atinadas observaciones. Le agradezco no solo por haber sido un excelente profesor durante toda mi formación académica, sino por considerarlo un amigo en quién confiar.

A todos mis profesores del colegio de geofísica, en especial a mis sinodales el M.C. Julio González y al Ing. Melesio Reynoso por corregirme y complementar mi trabajo, por ser unas personas sinceras y amables a lo largo de todos los años de mi formación. También al profesor Marco Vera Zeller por sus aportaciones y su apoyo.

A mi madre, a quien no solo le debo la vida, sino todos mis logros. Gracias por enseñarme a ser fuerte, a amarme, a no temerle a mis propias decisiones; por los sacrificios que has pasado para que terminara mis estudios, por apoyarme incondicionalmente y por ser la primera persona en creer en mí. Eres mi motivación, te amo mami.

A mi padre, por mostrarme el verdadero valor de la vida, por enseñarme a luchar a pesar de todos los obstáculos que se han presentado y por amarme. Me inspiras, te amo pa.

A mis hermanas Stephany y Beatriz, por acompañarme durante toda mi vida, por ser mis mejores amigas y por estar siempre para mí. Las amo.

Un profundo agradecimiento a todos mis amigos de la universidad: Alexa, Jacqueline, Mirna, Rafael, Oliver, Alejandro, Jacob, Eliseo, César y Marco. Sin ustedes mi vida universitaria no hubiera sido tan legendaria como lo es ahora, gracias por la música compartida, por las pláticas, por los consejos, las reuniones de estudio y las que no precisamente eran para estudiar, por regalarme un poquito de ustedes y por poder sentirlos como familia.

A mis amigos Lisbeth, Enrique, Mariana, Sandy, Carolina y Daniela, por las risas, aventuras, experiencias y por su valiosa amistad que a pesar de los años no se ha desgastado ni un poco.

Y finalmente quiero agradecer a Alan, por soportar todas mis crisis durante el desarrollo de esta tesis, por apoyar cada decisión que he tomado, por ser mi equilibrio, por contagiarme tu alegría, por ser además de todo, mi mejor amigo. You & me. Te amo.

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos	ii
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	ix
Resumen	x
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos.	3
1.4.1 General.....	3
1.4.2 Particulares.....	3
1.5 Hipótesis.....	3
1.6 Antecedentes.....	3
CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉRMICAS.....	5
2.1 Localización del área de estudio.....	5
2.2 Geología.....	6
2.2.1 Fisiografía.....	6
2.2.2 Litología.....	7
2.2.2.1 Historia volcánica del Complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco.....	9
2.2.2.1.1 Primer evento (2.7 Ma)	9
2.2.2.1.2 Segundo evento (1.4 a 1.3 Ma)	10
2.2.2.1.3 Tercer evento (1.1 Ma)	11
2.2.2.1.4 Cuarto evento (0.8 Ma).....	11
2.2.2.2 Unidades litológicas del complejo Tulancingo – Acocolco	12
2.2.2.2.1 Ignimbrita Alcholoya	13
2.2.2.2.2 Andesitas Apan	13
2.2.2.2.3 Riodacita Las Minas	13
2.2.2.2.4 Domos riolíticos-dacíticos.....	14
2.2.2.2.5 Lavas riolíticas pre-caldera.....	14

2.2.2.2.6 Dacita Cruz Colorada	14
2.2.2.2.7 Basalto Potrerillos	14
2.2.2.2.8 Riolita de Acoculco	15
2.2.2.2.9 Ignimbrita Atexca.....	15
2.2.2.2.10 Domos intracaldera.....	15
2.2.2.2.11 Conos de escoria.....	15
2.2.2.2.12 Ignimbrita Acoculco	16
2.2.2.2.13 Ignimbrita Tecoloquillo.....	16
2.2.2.2.14 Ignimbrita Piedras Encimadas	16
2.2.2.2.15 Formación Atotonilco	17
2.3 Principios y fundamentos geotérmicos.....	19
2.3.1 Características geotérmicas.....	19
2.3.1.1 Porosidad	19
2.3.1.2 Permeabilidad	20
2.3.1.3 Fluido conductor.....	20
2.3.2 Sistemas geotérmicos.....	20
2.3.2.1 Sistemas hidrotermales convectivos	21
2.3.2.2 Sistemas geotérmicos mejorados	21
2.3.2.3 Sistemas geotérmicos geo presurizados.....	21
2.3.2.4 Sistemas geotérmicos marinos	21
2.3.2.5 Sistemas geotérmicos magmáticos.....	21
2.3.2.6 Sistemas geotérmicos supercríticos.....	21
2.3.3 Calderas volcánicas.....	21
2.3.3.1 Morfología y estructura geométrica	22
2.3.3.2 Tipos de calderas colapso	22
2.3.3.2.1 Cumbre de caldera	22
2.3.3.2.2 Calderas clásicas.....	22
2.3.3.2.3 Calderas tipo graben.....	23
2.3.3.3 Estilos de colapso	23
2.3.3.3.1 Tipo 'pistón' (Plate):	23
2.3.3.3.2 Tipo 'por partes' (Piecemeal):	23
2.3.3.3.3 Tipo 'escotilla' (Trapdoor):.....	23

2.3.3.3.4 Tipo ‘depresión incipiente’ (Downsag):.....	23
2.3.3.3.5 Tipo ‘embudo’ (Funnel):	24
2.3.4 Caldera volcánica Tulancingo-Acoculco.....	24
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	26
3.1 Principios del Método Gravimétrico.	26
3.1.1 Forma de la Tierra: El geoide y elipsoide.	27
3.1.2 Fundamento físico.	28
3.1.2.1 Ley de la Gravitación Universal.	28
3.1.3 Correcciones gravimétricas.....	28
3.1.3.1 Corrección por mareas	29
3.1.3.2 Corrección de latitud.....	29
3.1.3.3 Corrección por deriva instrumental	29
3.1.3.4 Corrección al aire libre.....	30
3.1.3.5 Corrección de Bouguer.....	30
3.1.3.6 Corrección topográfica	31
3.1.4 Anomalías gravimétricas.....	33
3.1.4.1 Anomalía de aire libre.....	33
3.1.4.2 Anomalía de Bouguer	33
3.1.4.3 Anomalía de Bouguer Completa.....	34
3.1.5 Anomalías Regional y Residual	34
3.1.6 Análisis radial espectral	35
3.1.7 Densidad de las rocas.	37
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO	39
4.1 Adquisición de datos	39
4.1.1 Instrumentación	39
4.1.2 Características del levantamiento	40
4.2 Procesamiento y análisis de información	41
4.2.1 Separación de las anomalías regional y residual	44
4.2.2 Filtros.....	47
4.2.2.1 Derivada vertical de primer grado	47
4.2.2.2 Derivada vertical de segundo grado	47
4.2.2.3 Continuación analítica ascendente.....	47

4.2.3 Análisis espectral.....	51
4.2.4 Modelado gravimétrico	52
CAPÍTULO V. RESULTADOS.....	54
5.1 Descripción e interpretación.....	54
5.1.1 Mapa de anomalía de Bouguer Completa	54
5.1.2 Relación entre mapas resultantes	55
5.1.3 Perfiles gravimétricos.....	58
5.1.3.1 Perfil 1	58
5.1.3.2 Perfil 2	59
5.1.3.3 Perfiles 3 y 4	59
5.1.4 Modelado geológico	60
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
6.1 Conclusiones	66
6.2 Recomendaciones	67
Referencias.....	68

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.....	5
Figura 2. Mapa índice regional de México.....	6
Figura 3. Columna litológica del pozo EAC-1.....	7
Figura 4. Mapa geológico del Complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco.....	8
Figura 5. Primer evento de colapso calderico de la Caldera de Tulancingo (>2.7 Ma)..	10
Figura 6. Segundo evento de colapso calderico de formación de la caldera de Tulancingo (1.4 a 1.3 Ma).	11
Figura 7. Cuarto evento de colapso calderico de la formación de la Caldera de Tulancingo (0.8 Ma)..	12
Figura 8. Columna estratigráfica de la Ignimbrita Acocolco en el Arrollo Potrerillos..	17
Figura 9. Columnas estratigráficas de la ignimbrita Piedras Encimadas y la ignimbrita Tecoloquillo.....	18
Figura 10. Elementos estructurales y morfológicos de una caldera.....	22
Figura 11. Representación de los tres tipos de calderas de colapso.....	23
Figura 12. Modelos de geometrías alternativas de acuerdo al tipo de origen de las calderas según Lipman (1997).	24
Figura 13. Representación del geoide, elipsoide y el terreno de la Tierra.	27
Figura 14. Curva de la deriva del gravímetro construida por lecturas en una localización corregida. La corrección por deriva a ser sustraída por una lectura en el tiempo t es d	30
Figura 15. (a) Corrección al aire libre para un observador a una altura h sobre la referencia. (b) Corrección de Bouguer. La zona sombreada corresponde al bloque de roca de grosor h y se extiende al infinito en ambas direcciones horizontales. (c) Corrección topográfica.	31
Figura 16. Retícula de Hammer utilizada para la realización de la corrección topográfica.	32
Figura 17. Anomalías regional y residual.	35
Figura 18. Logaritmo natural del espectro de potencia de la transformada de Fourier de la anomalía de Bouguer en función con el número de onda.....	36

Figura 19. Gravímetro SCINTREX CG5 usualmente utilizado en levantamientos gravimétricos.....	39
Figura 20. Distribución de las estaciones gravimétricas dentro del área de toma de datos.....	40
Figura 21. Mapa de Anomalía de Bouguer Completa.....	42
Figura 22. Mapa de elevación digital.....	43
Figura 23. Especificaciones del filtro Butterworth indicando número de onda empleado y grado del filtro.....	44
Figura 24. Mapa de Anomalía Regional obtenido como resultado de la aplicación del filtro Butterworth a la Anomalía de Bouguer Completa.....	45
Figura 25. Mapa de Anomalía por efecto residual.....	46
Figura 26. Mapa de primera derivada vertical aplicada a la ABC.....	48
Figura 27. Mapa de segunda derivada vertical aplicada a la ABC.....	49
Figura 28. Mapa de continuación ascendente aplicada a la ABC.....	50
Figura 29. Espectro de frecuencia radial obtenido con MAGMAP.....	51
Figura 30. Gráfica de espectro de potencias indicando las tendencias de las pendientes de las anomalías.....	51
Figura 31. Trazo del perfil gravimétrico empleado para la creación del modelo geológico.....	53
Figura 32. Mapa de ABC señalando los dominios gravimétricos.....	54
Figura 33. Comparación entre la anomalía regional mediante el empleo del filtro Butterworth y el filtro de continuación ascendente a 1900.....	56
Figura 34. Comparación entre primera y segunda derivada vertical.....	57
Figura 35. Mapa de localización de perfiles gravimétricos.....	58
Figura 36. Mapa de correlación de los perfiles gravimétricos con las unidades litológicas que atraviesan.....	60
Figura 37. Ajuste de la curva de gravedad observada con gravedad real.....	61
Figura 38. Modelado geológico del perfil 1.....	62
Figura 39. Acercamiento a la zona superficial del modelo geológico del perfil 1.....	63
Figura 40. . Propuesta de bordes para la Caldera de Tulancingo. En color purpura se identifica la forma actual, en color negro la propuesta tomando en cuenta los sectores de altos gravimétricos mostrados en el mapa inferior.....	65

Índice de tablas.

Tabla 1. Densidad de rocas y minerales..	38
Tabla 2. Procesos realizados a los datos obtenidos en campo.	40
Tabla 3. Capas del modelado geológico con su respectivo valor de densidad.	61

Resumen

El presente trabajo de tesis es el resultado de la aplicación del método de exploración geofísica conocido como gravimétrico que ha sido empleado con la finalidad de proveer información importante acerca del Complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco (CVTA) localizado entre los límites de los estados de Puebla e Hidalgo. La estructura denominada 'Caldera de Tulancingo' se identifica como la más importante dentro del CVTA debido a su interés en los aspectos vulcanológico y geotérmico. Por lo anterior, este estudio está enfocado a definir mediante los datos gravimétricos de la zona, las estructuras a profundidad para identificar los límites estructurales de dicha caldera.

Para obtener los modelos de anomalía gravimétrica regional y local, los datos fueron previamente recabados de la Comisión Nacional de Hidrocarburos mediante convenio con el Proyecto 4.6 del consorcio GEMex-SENER-CONACYT. Sin embargo, dicha información solo abarca una porción del polígono propuesto como caldera de Tulancingo. Una vez obtenidos los datos, éstos fueron procesados con el software *Oasis Montaj* de Geosoft®, dentro de sus múltiples funciones de las cuales se eligieron diversos filtros y aplicaciones para generar los mapas que resaltan las características de la estructura de caldera para su interpretación gravimétrica, así como el análisis espectral para estimar profundidades de las capas litológicas en el subsuelo. La información geológica del lugar se recabó por medio de documentos de tesis y diversos artículos de investigación geológica y geofísica, así como de Revistas Mexicanas de Geoenergía producidas por la Comisión Federal de Electricidad.

Se integró la información obtenida para el análisis de los mapas gravimétricos resultantes con los geológicos, y así, se elaboró el modelo geológico para la comprensión e interpretación de la zona geotérmica localizada dentro del CVTA.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

El Complejo Volcánico de Tulancingo-Acocolco (CVTA) se encuentra localizado entre los límites de los estados de Hidalgo y Puebla. En él se han identificado dos estructuras volcánicas caldéricas; la de mayor tamaño conocida como la caldera de Tulancingo y la menor como la caldera de Acocolco (López-Hernández, 2009). La caldera de Tulancingo fue identificada por Gutiérrez-Negrín *et al.* (1989) como una de las zonas geotérmicas de interés en México y ha presentado indicios de una posible fuente para la explotación geotérmica. Con ayuda de la exploración geológica, posteriormente López-Hernández (2009) señaló una geometría semicircular para la caldera de Tulancingo; sin embargo, esta interpretación se encuentra actualmente en discusión, por considerarse una caldera rectangular tipo *graben* (Aguirre-Díaz *et al.*, 2018).

Para resolver este debate sobre el tipo de caldera que es Tulancingo se han empleado métodos geofísicos que permiten medir de manera indirecta las distintas variaciones de las propiedades físicas de los materiales a profundidad, como son: densidad, resistividad eléctrica, radioactividad de rocas, susceptibilidad magnética, entre otras. Estas técnicas han sido utilizadas en el mundo desde hace varios años para identificar las características estructurales del subsuelo, incluyendo la exploración y/o monitoreo de campos geotérmicos con la finalidad de registrar cambios físicos en el subsuelo.

Puesto que la caldera de Tulancingo es una zona potencialmente explotable para recursos geotérmicos y no se tienen datos precisos de los límites estructurales de la caldera, se decidió iniciar el presente estudio con la finalidad de elaborar una interpretación geofísica de la zona y así confirmar si la geometría de la caldera es circular, como la definió originalmente López-Hernández (2009), o rectangular tipo *graben*, como se considera actualmente, no solo para contribuir académicamente sino para beneficios económicos y estratégicos, como lo es la generación de energía eléctrica mediante la geotermia.

En este caso particular, se utilizó el método gravimétrico para medir las variaciones entre gravedad a profundidad de la zona ocupada por la caldera de Tulancingo. La interpretación gravimétrica contribuirá con una nueva perspectiva para determinar los límites y forma de la caldera, puesto que estos extiendan el área susceptible para una futura explotación geotérmica, además de proveer información relevante en cuanto a la profundidad de la estructura de colapso caldérico, condición fundamental para decisiones de perforación.

1.2 Planteamiento del problema

La Caldera de Tulancingo dentro del Complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco es una zona potencialmente explotable para recursos geotérmicos, sin embargo, no se tienen datos precisos de sus bordes y por lo tanto, de su valoración geotérmica total.

1.3 Justificación

La caldera de Tulancingo se encuentra dentro del Complejo Volcánico Tulancingo – Acocolco y ha sido considerada como una fuente de interés geotérmico explotable en México, por lo que para una evaluación completa de su potencial, es necesario obtener imágenes que muestren la dimensión aproximada de la caldera, así como identificar los fallamientos que la formaron.

El empleo del método gravimétrico descrito en el marco del presente estudio, se reconocerá como una disciplina de notable importancia para el reconocimiento y desarrollo de investigaciones de zonas geotérmicas. Esta investigación contribuirá como referencia para futuros análisis de la zona, e incluso para toma de decisiones dentro del proyecto 4.6 del consorcio GEMex.

1.4 Objetivos.

1.4.1 General

Elaborar una interpretación geofísica de una porción de la estructura llamada 'Complejo Volcánico Tulancingo – Acoculco' mediante la implementación del método gravimétrico con la finalidad de definir adecuadamente los límites estructurales formadores de la caldera, así como verificar dicha estructura sea de tipo *graben*.

1.4.2 Particulares

- Obtener datos gravimétricos de la zona de estudio a partir de los convenios del proyecto 4.6 del consorcio GEMex para su procesamiento geofísico.
- Procesar los datos de gravimetría para identificar correctamente las regiones anómalas destacables mediante el manejo del software determinado.
- Generar una interpretación geofísica completa mediante la correlación de los resultados del procesamiento gravimétrico y la información geológica existente sobre el área de estudio y con ello sustentar el cambio de geometría de la caldera Tulancingo-Acoculco.

1.5 Hipótesis.

El Complejo Volcánico Tulancingo – Acoculco es una caldera tipo *graben* con forma poligonal rectangular, controlada por fallamientos regionales cuya orientación es Norponiente y Nororiente.

1.6 Antecedentes.

La zona que comprende el Complejo Volcánico Tulancingo – Acoculco (CVTA) ha sido estudiada desde la década de los ochentas por diversos institutos de investigación incluyendo en México a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Petróleos Mexicanos (PEMEX). Los objetivos de estos estudios han sido variados, sin embargo, la principal

razón de investigación subyace en la valoración de la región como posible recurso geotérmico explotable.

En el año 1989 Gutiérrez., *et al* hacen el reconocimiento de 18 zonas termales de interés distribuidas en los estados de Nayarit, Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Zacatecas, Puebla, Hidalgo, México, Colima, Oaxaca y Sonora; dentro de estas se menciona a la zona geotérmica de la caldera de Acoculco, Puebla y en la cual se han encontrado manifestaciones termales tanto dentro de la caldera como en los manantiales adyacentes. Existen registros que muestran temperaturas superiores a los 300 °C, confirmando con ello la presencia de una fuente de calor asociada al episodio magmático más reciente de la zona (Gama *et al.*, 1995).

En los márgenes del complejo Tulancingo- Acoculco, varias decenas de kilómetros al Sur oriente, en Chignahuapan, Quetzalapa y Jicolapa, Puebla, se localizan manantiales termales de temperatura moderada, posiblemente relacionados con el sistema hidrotermal de Acoculco (De la Cruz y Castillo-Hernández, 1986).

Posteriormente, López-Hernández (2009) identificó la geología de la caldera definiendo diversas unidades que la conforman, así como la cartografía a detalle de la zona, para posteriormente hacer el mapa geológico más completo de la zona de estudio. Asimismo, señala los resultados geofísicos de García-Estrada (2000), donde se analizó la existencia de evidencias que indican presencia de colapso calderico anidado de Acoculco y Tulancingo. Es notable mencionar que los resultados geológicos y geofísicos en conjunto han demostrado que la geometría del CVTA es distinta a la planteada en estudios anteriores, por lo que para el desarrollo de esta investigación, el área de estudio se ha modificado de acuerdo a los nuevos límites definidos.

Por otra parte, Viggiano-Guerra (2011), indicó que

Los fluidos ubicados dentro de la zona son de tipo sulfatado-ácido y se originan por la mezcla de H_2S de origen geotérmico con agua superficial y además estos fluidos cuando reaccionan con la roca circundante a temperaturas cercanas al punto de ebullición originan que se altere a caolinita, sílice residual, sulfuros, azufre nativo, entre otros. (p.15)

CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉRMICAS

2.1 Localización del área de estudio.

La zona de estudio se encuentra entre los límites de los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala (Figura 1). Localizada a 130 km al noreste de la Ciudad de México. Se pueden identificar áreas urbanas en los alrededores como Chignahuapan, Zacatlán, Tlaxco y Tulancingo. Pertenece a la región oriental de la provincia de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

Se puede acceder a la zona por las carreteras federales 119 y 132 además de caminos y terracerías que ayudan al acercamiento hacia esta región.

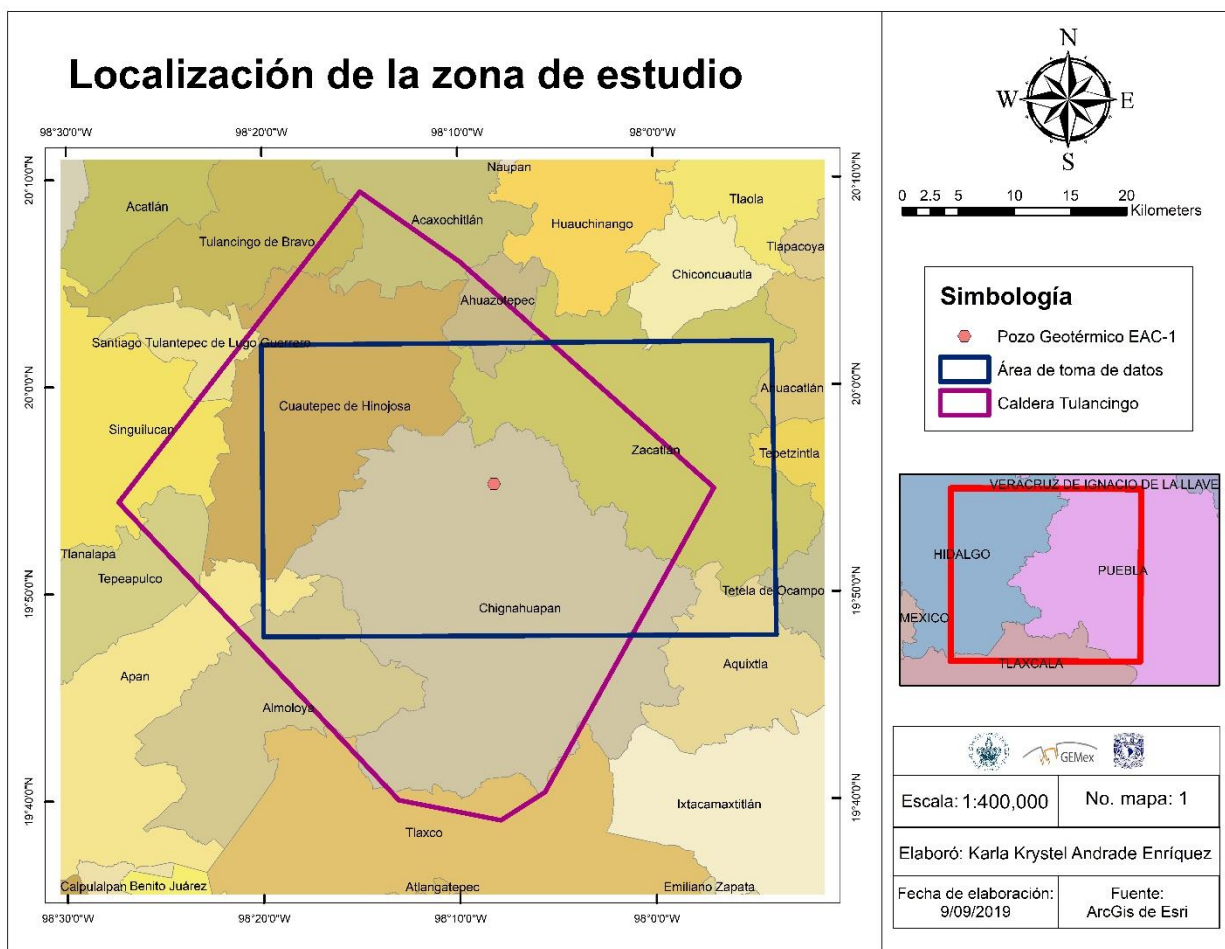


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Elaboración propia.

2.2 Geología

2.2.1 Fisiografía

El Complejo Volcánico Tulancingo – Acoculco forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Esta provincia se define como un “arco magmático continental, constituido por cerca de 8 000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos que se extienden desde las costas del Pacífico en Nayarit y Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Veracruz” (Demant, 1978). La FVTM suele dividirse en tres sectores principales: occidental, central y oriental que presentan peculiares características volcánicas, estructurales y petrológicas (Aguirre-Díaz *et al.*, 1998).

En la porción oriental de la FVTM dentro de la que se encuentra el área de estudio, se observa que la mayor parte del volcanismo está representado con grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos volcánicos de composición andesítica a riolítica alineados a lo largo de estructuras corticales, y también por vulcanismo monogenético representado por conos de escoria y lavas máficas asociadas, igualmente alineados con las fallas principales de la región (López-Hernández *et al.*, 2009; García-Palomo *et al.*, 2018).

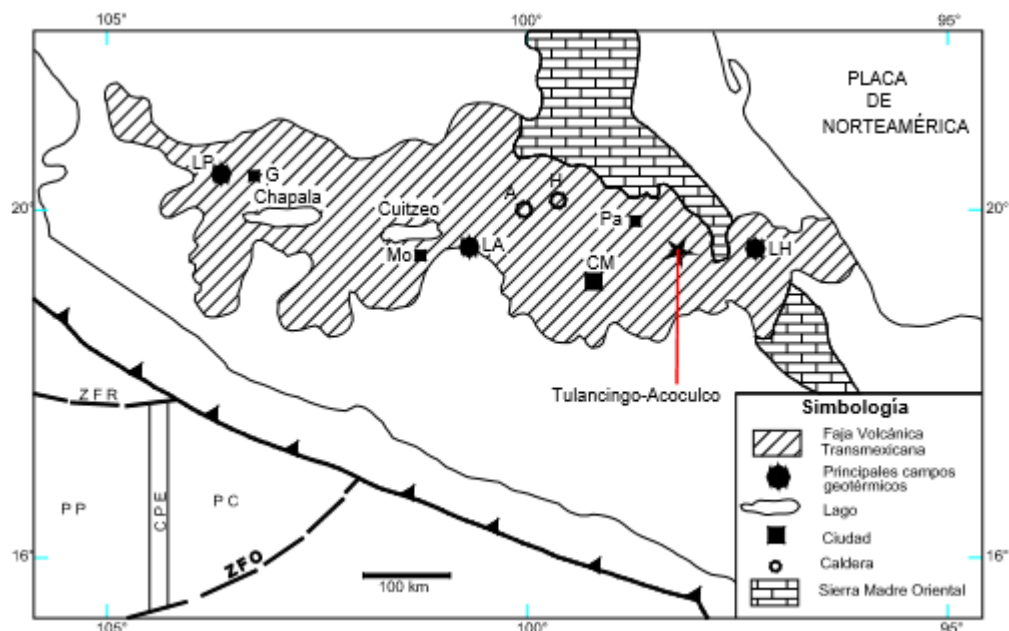


Figura 2. Mapa índice regional de México, se muestra la Faja Volcánica Transmexicana, principales campos geotérmicos y zona de estudio. Donde: A-Amealco, H-Huichapan, LP-La Primavera, LA-Los Azufres, LH-Los Hornos, G-Guadalajara, CM-Ciudad de México, Mo-Morelia, Pa-Pachuca, ZFO-Zona de fractura Orozco, ZFR-Zona de fractura Rivera, CPE-Cordillera del Pacífico Este, PP-Placa del Pacífico, PC-Placa de Cocos. Recuperado de López-Hernández (2009).

2.2.2 Litología

Considerando los datos obtenidos por el pozo exploratorio EAC-1 con 2000 metros de profundidad, el cual fue perforado por la CFE en la porción centro del CVTA, lugar donde se encuentra la zona de Los Azufres, cuya alteración hidrotermal se denota como intensa y de mayor desprendimiento de gases; López Hernández (2009) describió la secuencia estratigráfica del Complejo Volcánico Tulancingo Acoculco (Figura 3), la cual comprende las siguientes litologías: “340 m de un cuerpo intrusivo responsable del metamorfismo de la roca encajonante, 870 m de espesor de una secuencia sedimentaria intensamente metamorfizada, y 790 m de una secuencia volcánica relacionada con la actividad del CVTA” (p.9).

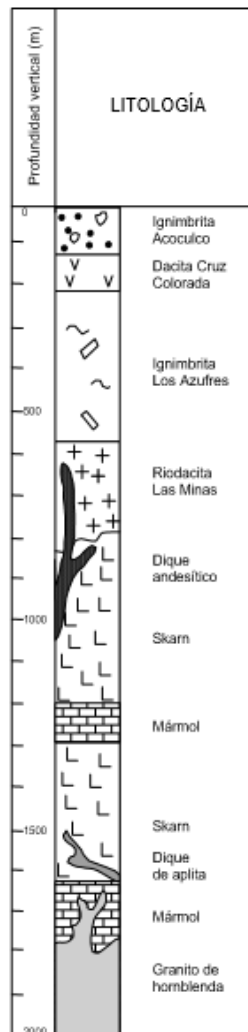


Figura 3. Columna litológica del pozo EAC-1. Recuperado de López-Hernández (2009).

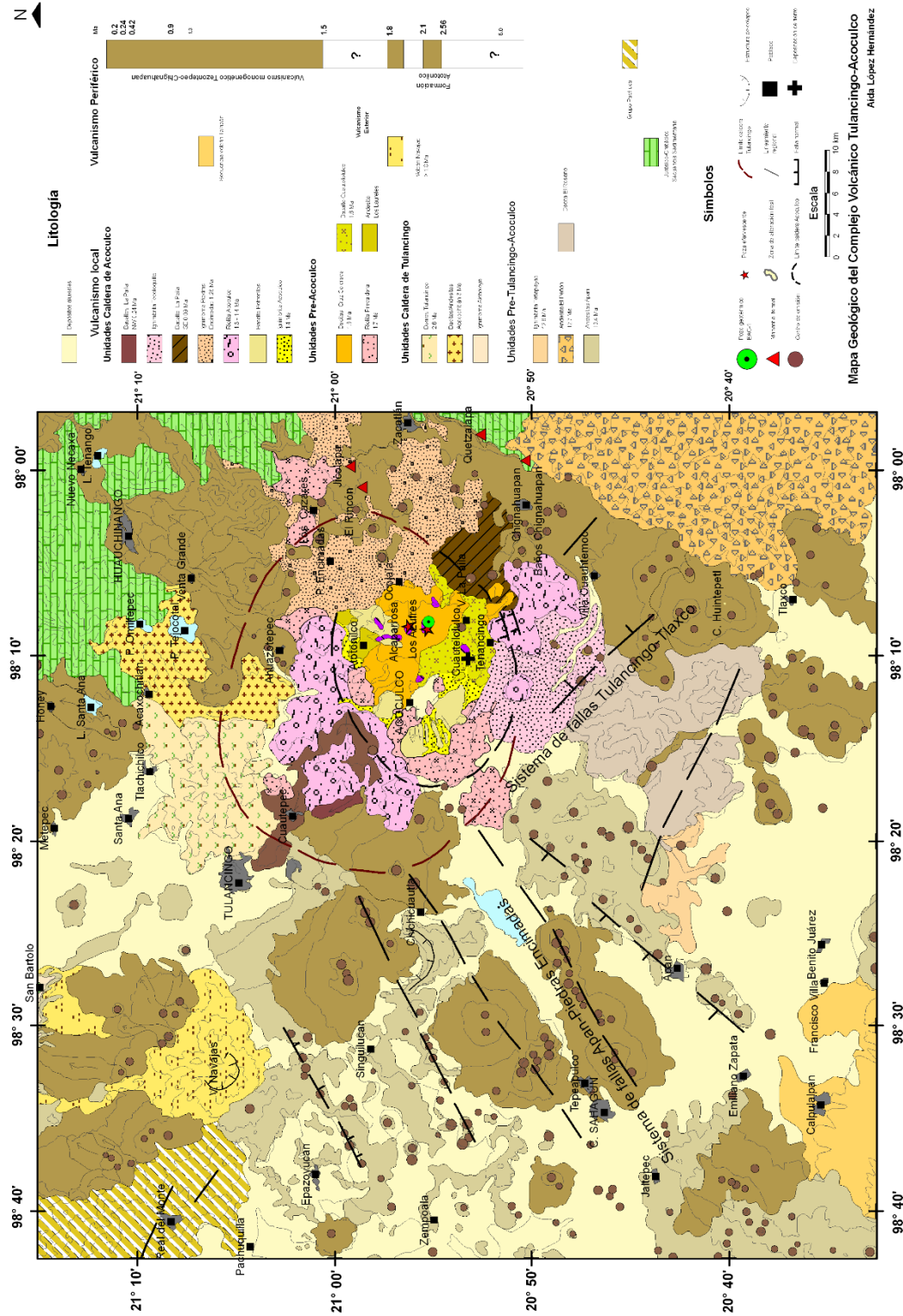


Figura 4. Mapa geológico del Complejo Volcánico Tulancingo-Acoaculco. Recuperado de López-Hernández (2009).

El Complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco lo describe López-Hernández (2009) como (figura 4):

Un complejo del Plioceno-Cuaternario, conformado por las acumulaciones de derrames de lava, domos y productos piroclásticos, dentro de los que se encuentran ignimbritas y depósitos de oleadas y caída, además se eleva 800 metros sobre sus alrededores y está rodeado por depósitos volcánicos de diferentes edades. (p.9)

Por otra parte, siguiendo la información consultada de López-Hernández (2009) y de López-Hernández *et al* (2009), se precisan las unidades litológicas principales dentro del CVTA que sirven para el interés de este documento; así mismo se muestran las principales fases volcánicas de la caldera de Tulancingo, que incluyen los eventos formadores del CVTA.

2.2.2.1 Historia volcánica del Complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco

El complejo volcánico consiste de una sola estructura caldérica, denominada como la caldera de Tulancingo y un grupo de domos centrales conocidos como domos de Acocolco (Aguirre-Díaz *et al*, 2018). Por lo que para la descripción de la caldera se nombran cuatro eventos de colapso para la formación de la caldera principal de Tulancingo, cada una con diferente composición.

2.2.2.1.1 Primer evento (2.7 Ma¹)

Primer colapso caldérico, y formación de la Ignimbrita Alcholoya. Fue el mayor evento de la caldera en cuanto a magnitud e intensidad. Inició con una columna eruptiva conformada por depósitos de caída y pómez asociados, seguidos de tres pulsos de flujos piroclásticos que formaron la unidad volcánica Ignimbrita Alcholoya.

¹ Millones de años

2.2.2.1.2 Segundo evento (1.4 a 1.3 Ma)

Segundo colapso de la caldera y formación de la Ignimbrita Piedras Encimadas. Principalmente acumulándose en el interior de la caldera y en zona externa al este de la caldera (localidad tipo Piedras Encimadas). La ignimbrita originalmente definida como Ignimbrita Aocolulco, perteneció al evento de colapso, por lo que, Aguirre-Díaz *et al.* (2018), sugieren que el depósito perteneció a la Ignimbrita Piedras Encimadas en sus facies intracaldera.

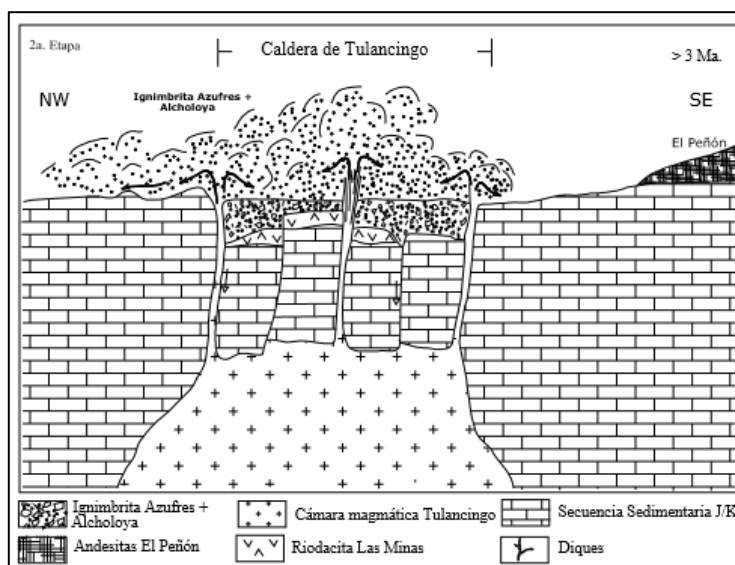


Figura 5. Primer evento de colapso calderico de la Caldera de Tulancingo (>2.7 Ma). Recuperado de López-Hernández (2009).

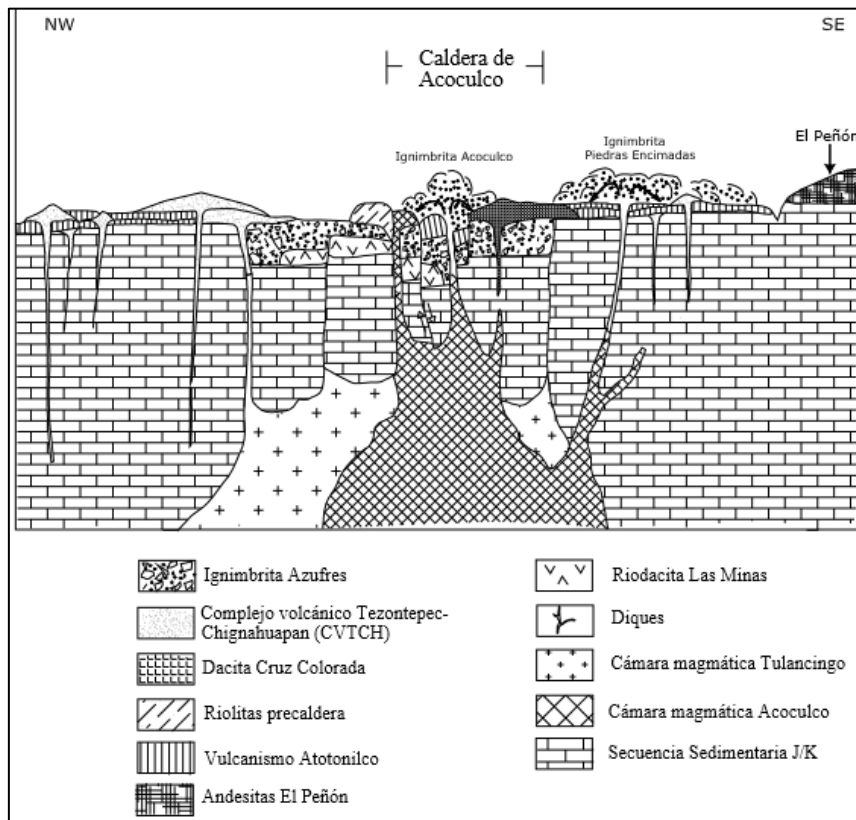


Figura 6. Segundo evento de colapso calderico de formación de la caldera de Tulancingo (1.4 a 1.3 Ma). Recuperado de López-Hernández (2009).

2.2.2.1.3 Tercer evento (1.1 Ma)

Tercer colapso de caldera y formación de la Ignimbrita Ateca de 1.1 Ma, encontrándose los depósitos de este evento sobre todo junto a los bordes externos oriente y poniente de la caldera.

2.2.2.1.4 Cuarto evento (0.8 Ma)

Cuarto colapso de la caldera y emplazamiento de la Ignimbrita La Gloria, anteriormente definida como Ignimbrita Tecoloquillo. Este fue el último evento caldérico de Tulancingo. A partir de entonces, el vulcanismo cambia eventos menores de tipo monogenético, y formación de conos de escoria y lavas asociadas abarcando desde el Plioceno al Holoceno.

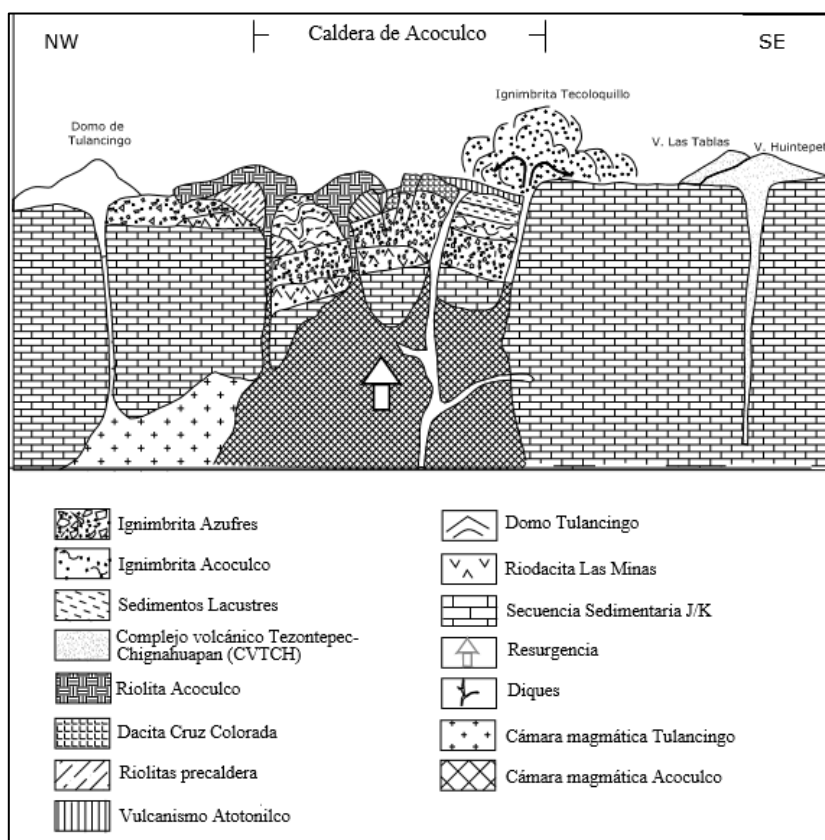


Figura 7. Cuarto evento de colapso calderico de la formación de la Caldera de Tulancingo (0.8 Ma). Recuperado de López-Hernández (2009).

2.2.2.2 Unidades litológicas del complejo Tulancingo – Acozulco

Se ha documentado previamente por Aguirre-Díaz *et al.* (2018) la existencia de cuatro periodos de actividad volcánica que dieron lugar al CVTA. La primera fase, sucedió hace 2.7 Ma con el primer colapso de caldera que formó la caldera tipo *graben* de Tulancingo. La segunda fase ocurrió inmediatamente después de la primera, con el emplazamiento de los domos post-colapso de Tulancingo. La tercer fase tuvo lugar hace 1.7 a 1.6 Ma y formó el complejo de domos intracaldera de Acozulco. La cuarta fase está representada por un segundo colapso calderico hace 1.4 Ma que dio lugar a la ignimbrita Piedras Encimadas. La quinta fase sucedió hace 1.1 Ma con un tercer colapso caldérico y la erupción de la ignimbrita Atexca. Una sexta fase sucedió hace 0.8 Ma con el último colapso de la caldera y la formación de la ignimbrita La Gloria anteriormente denominada como Tecoloquillo. Posteriormente, como séptima fase se emplazaron varios domos post-colapso intracaldera. Finalmente, el último evento volcánico está representado por

varios conos de escoria y lavas máficas asociadas del Plioceno al Holoceno, los cuales están preferentemente alineados siguiendo la orientación de las fallas regionales NE y NW.

A continuación se detallan las unidades litológicas principales que se relacionan con los principales eventos de colapso que dieron origen al CVTA mencionados anteriormente. Estas fueron previamente descritas por López - Hernández (2009) y Aguirre-Díaz *et al.*, (2018).

2.2.2.2.1 Ignimbrita Alcholoya

Se refiere a un paquete de depósitos piroclásticos que descansan discordantemente sobre la secuencia sedimentaria Mesozoica al NE de Tulancingo y que se ven expuestos en la barranca de Alcholoya. A dicho paquete lo conforman 3 ignimbritas que en su totalidad alcanzan un espesor de hasta 60 m. Su grado de soldamiento es nulo y todo el paquete tiene un color gris verdoso. Los depósitos acumulados en la cima de las tres ignimbritas podrían corresponder a depósitos de oleadas piroclásticas. Esta secuencia se originó durante la primer fase de colapso caldérico. (López – Hernández, 2009, p.19)

2.2.2.2.2 Andesitas Apan

Son un grupo de conos y derrames de composición andesítica constituidos por varios flujos de lava con base autobrecha de color gris oscuro. El espesor observado en superficie varía de 300 a 500 metros. Su textura varía de afanítica a porfídica. Al microscopio se observa una matriz vítrea y cristales de plagioclasa, hornblenda y augita. (López – Hernández, 2009, p.16)

2.2.2.2.3 Riodacita Las Minas

Es una unidad observada exclusivamente en el pozo EAC-1 perforado por la CFE en la zona centro de la caldera de Acoculco. La unidad está constituida por un paquete de 230 m de una roca intensamente silicificada

donde no se observa su textura original. Se observa la matriz micro granular, constituida por cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. Su color es gris-blanco debido a la silicificación producida por alteración hidrotermal. (López – Hernández, 2009, p.21)

2.2.2.2.4 Domos riolíticos-dacíticos

Son estructuras formadas principalmente por el “domo riolítico denominado Yolo, el cual está intensamente disectado y alcanza un espesor máximo de 400 m. Se encuentran en la porción NW domos de menor tamaño y menos erosionado pero de la misma composición” (López – Hernández, 2009, p.24).

2.2.2.2.5 Lavas riolíticas pre-caldera

En esta unidad se incluyen cuerpos de composición riolítica en forma de domos. “Están constituidas por lavas riolíticas de textura vitrofídica con esferulitas producidas por desvitrificación. La matriz es un vidrio ácido. Al microscopio se observan cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, biotita y hornblenda” (López – Hernández, 2009, p.26).

2.2.2.2.6 Dacita Cruz Colorada

Se encuentran gruesos derrames de dacita formando las zonas más elevadas de la región. Se eleva a más de 3000 msnm² y cubre el sector centro-noreste de la caldera de Acoculco Su textura es porfídica con cristales de plagioclasa hasta de 1 cm contenidos en una matriz afanítica. Su base no se observa en la superficie, pero en el pozo EAC-1 se encontró que sobreyacen a la ignimbrita de Los Azufres. Algunas zonas se encuentran intensamente alteradas por hidrotermalismo. Su espesor cortado por el pozo fue de 80 m. (López – Hernández, 2009, p.26)

2.2.2.2.7 Basalto Potrerillos

Está formada por derrames de lava de color gris oscuro de grano fino. Aflora principalmente al Oeste de Acoculco. Su espesor variable, de 5 a 80 metros

² Metros sobre el nivel del mar.

(...). A su vez, estos derrames están cubiertos por un espesor de 2 a 3 metros de una ceniza de composición riolítica relacionada con la actividad explosiva de los domos riolíticos más recientes. El basalto es de textura afanítica, holocristalina y su mesostasis es intergranular con mineralogía de plagioclasa, augita, óxido y olivino. (López – Hernández, 2009, p.38)

2.2.2.2.8 Riolita de Acoculco

Referida a un conjunto de siete domos de composición riolítica que se emplazaron siguiendo una traza anular en forma de semicorona. El emplazamiento de los domos riolíticos que forman parte de esta unidad en forma anular es una de las evidencias que sugiere la presencia de una zona de debilidad relacionada con el colapso caldérico de Acoculco (De la Cruz y Castillo-Hernández, 1986).

2.2.2.2.9 Ignimbrita Atexca

Sucedió hace 1.1 Ma y se asocia a la quinta fase del CVTA formada durante el tercer colapso de la caldera. “Consiste en una ignimbrita blanca muy rica en cristales con zonas alteradas hidrotermalmente, convirtiendo la ignimbrita en zonas ricas en arcilla con abundantes cristales” (Aguirre-Díaz *et al*, 2018).

2.2.2.2.10 Domos intracaldera

De acuerdo con Aguirre-Díaz *et al* (2018), posterior a la ignimbrita Tecoloquillo se emplazaron varios domos intracaldera dacíticos y riolíticos sobre todo en el centro de la caldera. Se interpretan como domos post-colapso y como los últimos eventos silícicos del CVTA.

2.2.2.2.11 Conos de escoria

Como última fase volcánica se formaron varias decenas de conos de escoria y lavas máficas asociadas que siguen las fallas principales, sobre todo el sistema NE. Este sistema de fallas NE fue llamado sistema Apan por Garcia-Palomo *et al* (2002). Las lavas máficas incluyen andesitas basálticas y basaltos.

2.2.2.2.12 Ignimbrita Acoculco

Consiste en una unidad piroclástica que se observa al interior de lo que originalmente se denominó la caldera de Acoculco (...). Está formada por siete unidades de flujos principales, separadas por depósitos de caída y/o de oleadas piroclásticas (...). En general las siete unidades se constituyen por depósitos masivos de flujos de ceniza con diferentes contenidos de pómez y de líticos, principalmente de andesita-basáltica (característico en estos depósitos) (...). En un núcleo recuperado del pozo EAC-1, a 100 metros de profundidad, se observó que en la base de esta ignimbrita incluye fragmentos de *skarn*, lo que confirma que este depósito es producto de la apertura del conducto. Tiene una edad de entre 1.3-1.4 *Ma*. (López – Hernández, 2009, p.27)

2.2.2.2.13 Ignimbrita Tecoloquillo

Se constituye por depósitos de flujo piroclástico de color gris blanco, con un porcentaje muy elevado de cristales y un soldamiento muy bajo, que forma depósitos fácilmente deleznableles (...). Se distribuye tanto dentro como fuera de la Caldera de Acoculco, con una distribución corta cubriendo un área de 117 km^2 y se calcula que su espesor es máximo 0.08 km. (López – Hernández, 2009, p.48)

Se fechó en 0.8 *Ma* y corresponde al último colapso del CVTA y a la vez a la séptima fase.

2.2.2.2.14 Ignimbrita Piedras Encimadas

Se indicó por López-Hernández (2009) que esta unidad se trata de ignimbritas de gran volumen de muy alta densidad y alto grado de soldamiento, por lo que tienen aspecto de lavas de color café o gris oscuro con lajeamiento delgado. Se caracteriza por el alto contenido de cristales de cuarzo y feldespato. Tiene una edad de 1.4 *Ma*. En la interpretación de Aguirre-Díaz *et al* (2008) las ignimbritas Acoculco y Piedras Encimadas corresponden a la misma fase volcánica durante el segundo colapso de la caldera de Tulancingo.

2.2.2.2.15 Formación Atotonilco

Previamente Segerstrom (1961) describió a la Formación Atotonilco como una unidad litoestratigráfica que aflora en los dos lados del río Venados porque sus rocas rellenan los paleovalles preexistentes. Su gran contenido de lava es un rasgo de distinción entre la zona. El pueblo de Atotonilco el Grande se encuentra localizado en una llanura parcialmente rellena por aglomerados de basalto así como basalto intercalado con depósitos clásticos no consolidados.

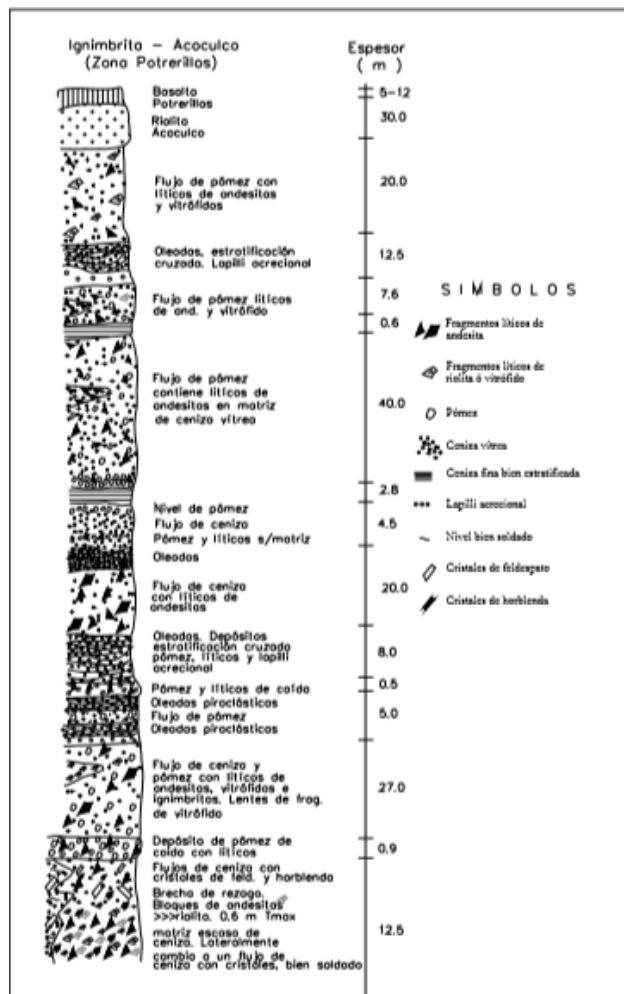


Figura 8. Columna estratigráfica de la Ignimbrita Acoculco en el Arrollo Potrerillos. Recuperado de López-Hernández (2009).

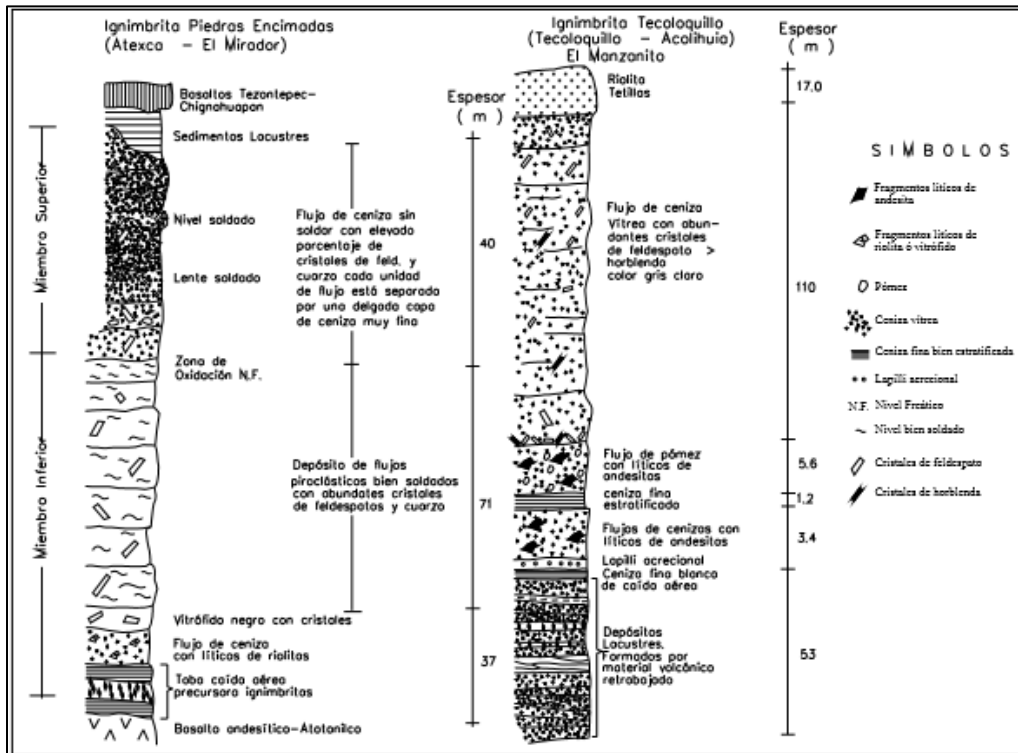


Figura 9. Columnas estratigráficas de la ignimbrita Piedras Encimadas y la ignimbrita Tecoloquillo. Recuperado de López-Hernández (2009).

2.3 Principios y fundamentos geotérmicos

La palabra 'geotermia' proviene de los vocablos griegos *geo* que significa Tierra y *termos* calor; por lo que se define como el calor que proviene de la Tierra. Este tipo de energía se almacena bajo la superficie terrestre y su fuente de calor se asocia a la actividad de los volcanes, fumarolas, aguas termales y géiseres. Se cataloga como una energía limpia, y útil para generar electricidad debido a la gran cantidad de calor contenido al interior del planeta

De acuerdo con Torres *et al.* (1993) “existe un flujo de calor desde el interior de la Tierra cuya trayectoria hacia la superficie terrestre hace que se produzcan cambios de temperatura a distintas profundidades, conocidos como gradientes geotérmicos” (p. 161). Este flujo de calor usualmente calienta grandes extensiones de roca a distintas profundidades donde se llegan a formar depósitos de dichos fluidos calientes y se conocen como yacimientos hidrotermales.

2.3.1 Características geotérmicas

Para que exista un reservorio de energía geotérmica entonces, es necesario contar con la fuente de calor, además de una permeabilidad buena en las rocas incluyendo la porosidad, fracturamiento y finalmente un fluido que se considere como transmisor del calor.

2.3.1.1 Porosidad

Se le define como el espacio que no está ocupado por sólidos o que está siendo ocupado por algún fluido y para expresarlo se utiliza el porcentaje. Aquellos poros que constituyen el vacío entre la roca se dividen en dos tipos de acuerdo con Donoso (1992): “los *macroporos*, que facilitan el movimiento del aire pero permiten el paso del agua, y los *microporos* que dificultan el paso del aire sin embargo retienen gran cantidad de agua”.

2.3.1.2 Permeabilidad

Se define como la capacidad de un cuerpo (suelo compuesto por roca) para permitir el paso de un fluido a través de él. Así mismo, cabe destacar los factores que determinan el nivel de permeabilidad en el suelo, ellos son: granulometría: tamaño del grano y distribución granulométrica, grado de saturación, estructura del suelo, la relación de vacíos, tamaño de las partículas, la densidad del suelo y la composición química del material, es decir, su naturaleza mineralógica. Debido a esto, se puede determinar que si el suelo posee granos de materia de tamaño pequeño, la permeabilidad será menor; y viceversa. Cabe destacar que los granos deberán estar interconectados entre sí para que esta permeabilidad sea potencialmente positiva y por lo tanto, el fluido presente sea considerablemente explotable.

2.3.1.3 Fluido conductor

Se incluyen los diversos tipos de materiales líquidos o gaseosos que se encuentran de cierta forma atrapados en los poros del suelo y los cuales pueden ser extraídos a la superficie dependiendo de las necesidades de su explotación. Por lo que los factores que intervienen para que éstos se desplacen correctamente, son: la porosidad del material, la densidad de dicho flujo y la presión a la que está sometido.

2.3.2 Sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos están constituidos por “una fuente de calor, fluidos de trabajo (acuífero termal y acuífero de recarga) y una capa de roca sello que facilite la presurización del sistema e impida fugas excesivas de energía” (Santoyo *et al.*, 1993, p 5).

De acuerdo con Santoyo *et al* (2010), se clasifican en forma general con base en la temperatura del fluido que se extrae o del fluido que se inyecta para la extracción del calor de la roca, es decir:

2.3.2.1 Sistemas hidrotermales convectivos. Constituidos por una fuente de calor, fluidos que constituyen el medio de transporte del calor, roca permeable donde se almacenan los fluidos y una capa de ‘roca sello’. Su existencia se manifiesta en la superficie por la presencia de manantiales calientes, fumarolas, géiseres, lagunas de lodo hirviente o suelos calientes. Pueden variar de alta – intermedia o baja temperatura.

2.3.2.2 Sistemas geotérmicos mejorados. Consisten en roca seca a muy alta temperatura (aproximadamente 650°C) localizada entre 2 y 4 km de profundidad. No cuenta con fluidos suficientes en el fondo para transportar el calor hacia la superficie, por lo que su explotación requiere de la creación de una red de fracturas en la roca y la inyección de fluidos para su aprovechamiento.

2.3.2.3 Sistemas geotérmicos geo presurizados. Contienen agua y metano disuelto a alta presión y mediana temperatura.

2.3.2.4 Sistemas geotérmicos marinos. Se localizan en el fondo del mar, y se manifiestan como descargas, fumarolas o chimeneas hidrotermales.

2.3.2.5 Sistemas geotérmicos magmáticos. Consisten de roca fundida (800°C) y se asocian a aparatos volcánicos activos.

2.3.2.6 Sistemas geotérmicos supercríticos. Se ubican a grandes profundidades (5-6 km) y contienen fluidos en estado supercrítico, es decir, a presión y temperatura tal que adopta un estado intermedio entre líquido y gas. Este tipo de sistema puede proveer hasta diez veces más energía que los sistemas geotérmicos convencionales.

2.3.3 Calderas volcánicas

Las calderas volcánicas fueron definidas por Lipman (2000) como “grandes depresiones volcánicas en forma más o menos circular cuyo diámetro es mucho mayor que el de sus respiraderos” (p. 643). Además señaló que la formación de éstas podría asociarse a alguna forma de colapso del techo sobre un reservorio de magma poco profundo subyacente, donde las diversas subsidencias geométricas y procesos de colapso debido

al flujo de ceniza en las calderas ayudan a inferir los varios tamaños, geometrías del techo y la profundidad de la cámara magmática.

2.3.3.1 Morfología y estructura geométrica

Los principales elementos estructurales y morfológicos de las calderas según Lipman (2000), abarcan: el borde topográfico, muro topográfico interno, fallas delimitadoras, piso de la caldera estructural, relleno intracaldera y magma de la cámara subyacente como se muestra en seguida (Figura 10).

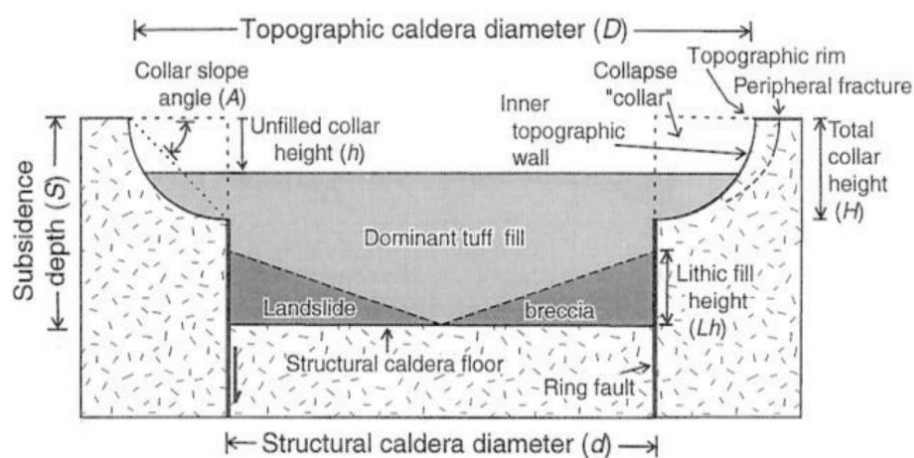


Figura 10. Elementos estructurales y morfológicos de una caldera. Recuperado de Lipman (2000).

2.3.3.2 Tipos de calderas colapso

Se pueden definir de acuerdo a Aguirre-Díaz (2008) tres tipos principales de calderas:

2.3.3.2.1 Cumbre de caldera. Referidas a aquellas que se forman en la cima de los grandes volcanes y se relacionan a un volumen relativamente pequeño de productos piroclásticos que incluyen secuencias plinianas e ignimbritas.

2.3.3.2.2 Calderas clásicas. Varían de forma semi circular a estructuras grandes irregulares, poseen diámetros de considerables kilómetros que están relacionales a relativos grandes volúmenes de productos piroclásticos que comienzan generalmente con secuencias de piedra pómez y continúan con la erupción de grandes flujos piroclásticos que formó ignimbritas amplias.

2.3.3.2.3 Calderas tipo graben. Son estructuras explosivas volcano-tectónicas de colapso a partir de los cuales se producen erupciones formadoras de ignimbritas de gran volumen que ocurrieron a través de diversos conductos de fisión a lo largo de las fallas maestras *graben* y fallas del bloque intra-*graben*, causando el colapso de todo el *graben* o de un sector de la misma. Los productos principales de calderas *graben* son depósitos de sobretensión y láminas de ignimbritas generalizadas de gran volumen.

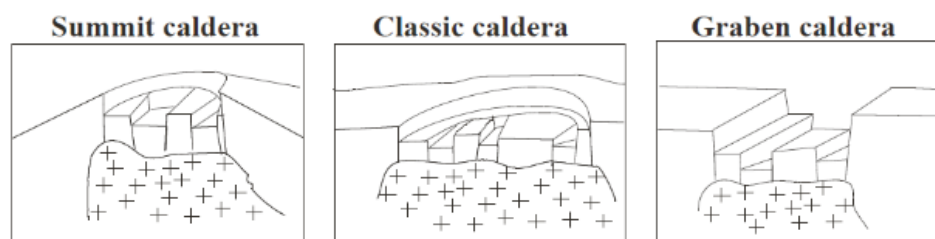


Figura 11. Representación de los tres tipos de calderas de colapso. Recuperado de Aguirre-Díaz (2008).

2.3.3.3 Estilos de colapso

De acuerdo con Lipman (1997), al momento de clasificar los tipos de caldera (Figura 12), se necesita información acerca del estilo de la erupción que dio lugar a la formación de la misma. Se identifican así, las siguientes:

2.3.3.3.1 Tipo ‘pistón’ (Plate): Este tipo de calderas se refieren a la subsidencia de un bloque de roca en una cámara de evacuación bordeada por fallas.

2.3.3.3.2 Tipo ‘por partes’ (Piecemeal): En este tipo de calderas, la subsidencia ocurre en numerosos bloques y/o múltiples centros de colapso.

2.3.3.3.3 Tipo ‘escotilla’ (Trapdoor): Este tipo de calderas se caracteriza por el colapso y subsidencia asimétrica debido a que la cámara magmática colapsa parcialmente.

2.3.3.3.4 Tipo ‘depresión incipiente’ (Downsag): Este tipo de calderas se forman cuando el talud que rodea la caldera no es una estructura que la influencia el colapso. Hay deformación existente por actividad en la cámara magmática pero no hay fracturamiento, por lo tanto, “solamente se presenta una suave deformación hacia el

centro de la depresión sin la configuración de un cráter con paredes o taludes” (Walker, 1984).

2.3.3.3.5 Tipo ‘embudo’ (Funnel): Este tipo de calderas generan una respuesta geofísica con una forma tipo ‘v’. “Esta morfología se asocia al colapso en partes, sin embargo, aquí cada porción subsede independientemente con un centro de colapso común” (Scandone, 1990).

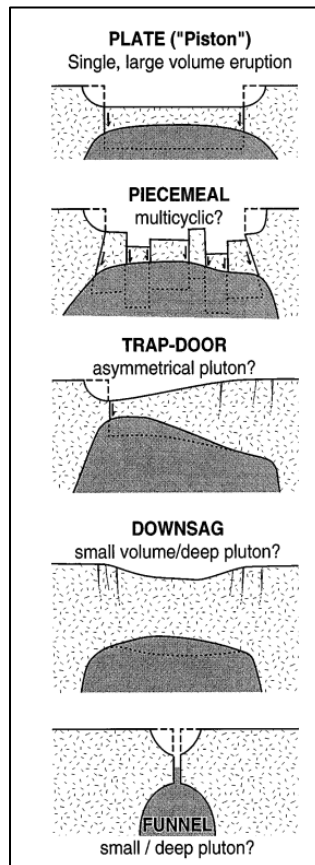


Figura 12. Modelos de geometrías alternativas de acuerdo al tipo de origen de las calderas según Lipman (1997).

2.3.4 Caldera volcánica Tulancingo-Acocolco

La Caldera de Acocolco fue identificada por Gutierrez-Nerin *et al.* (1989) dentro de 18 zonas geotérmicas de interés en México, así mismo, mencionan que las manifestaciones termales en la caldera y sus alrededores son manantiales calientes y de agua ‘agria’, mofetas con temperaturas bajas asociadas con zonas de alteración hidrotermal, aguas sulfatadas ácidas y bicarbonatas sódicas con temperaturas de fondo de 239°C según el

geotermómetro de potasio-sodio. Por lo que la caldera Tulancingo-Acocolco se ha identificado como un sistema hidrotermal cuyo origen fue en las últimas etapas de evolución del centro volcánico.

Subsecuentemente, en 1995 se perforó el pozo EAC-1 en la zona de Los Azufres-El Potrero Colorado donde los resultados obtenidos no fueron totalmente positivos debido que a pesar de que se encontró una temperatura de 260°C a 1500 metros de profundidad; la permeabilidad era literalmente nula (Viggiano-Guerra, 2011).

Un segundo pozo EAC-2 fue perforado a 1900 metros a lo largo de cual se obtuvieron 183 muestras de canal colectadas a intervalos de 10 metros mismas que fueron analizadas petrográficamente.

Actualmente, el sistema hidrotermal permanece activo pero situado en rocas de baja permeabilidad que se debe a: la falta de eventos tectónicos o magmáticos de importancia que pudiesen de cierta forma reactivar las fallas, además de la inherente baja permeabilidad de *skarns* y granitos los cuales pueden tener limitado el desarrollo del sistema hidrotermal desde el inicio, la intensa deposición mineral secundaria en los depósitos piroclásticos creó una capa de roca muy efectiva (López-Hernández *et al*, 2009).

Una característica importante es distinguir que dado a la baja permeabilidad, los vapores originados a grandes profundidades se condensan una vez llegan al subsuelo, aunque algunos gases logran atravesar conductos permeables delgados y llegan a la superficie pero con baja temperatura (Guzmán-Cortés, 2013).

A pesar de la información existente del área de estudio, la hidrología de este sistema hidrotermal aún no se ha estudiado suficiente puesto que la cantidad de pozos de exploración es limitada.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

La geofísica es una ciencia que aplica los principios físicos para el estudio de las propiedades físicas de la Tierra, es decir, envuelve la toma de medidas en o cerca de la superficie terrestre en la cual ésta es influenciada por sus propiedades físicas de distribución interna (Kearey *et al.*, 2002). El estudio y análisis de estas medidas pueden mostrar variaciones de la estructura interna de la Tierra, cuyos resultados muestran aplicaciones dentro de ámbitos geológicos, mineralógicos, ingenieriles, paleontológicos, geotérmicos, entre otros. Sin embargo no basta con las mediciones de las propiedades mencionadas, sino que es necesario someter dicha información a los métodos matemáticos y/o físicos correspondientes con la finalidad de obtener un modelo aproximado de la estructura del subsuelo.

La elección del método geofísico adecuado a utilizar en un proyecto o investigación dependerá mucho del interés y alcance que el estudio requiera. Para esta investigación se ha elegido el método potencial gravimétrico debido a la utilidad y relación con la geotermia que se han documentado en estudios previos. A continuación se detalla el método empleado.

3.1 Principios del Método Gravimétrico.

El método gravimétrico se fundamenta en la medición de las variaciones de la gravedad sobre distintos puntos de la superficie de la Tierra, de tal forma que, a partir de la identificación de una distribución lateral de la gravedad de los materiales, se puede realizar la interpretación del subsuelo. Así, al encontrar irregularidades mayores o menores que las medidas locales, se pueden reconocer formaciones que podrían ser de interés.

Al igual que la prospección magnética, está agrupada dentro de los métodos potenciales aunque sus bases son distintas, los datos de gravedad proveen contrastes tanto con los sísmicos como con los magnéticos, lo que sirve para una mejor

interpretación geofísica. Las variaciones de la gravedad son relativamente pequeñas y los efectos identificados a escala local son mínimos comparados con los del efecto de fondo del campo de la Tierra, a pesar de eso, la prospección gravimétrica es conocida como una herramienta útil en la exploración de zonas petroleras y mineras.

3.1.1 Forma de la Tierra: El geoide y elipsoide.

De acuerdo con la definición de INEGI (2019), el geoide es una superficie del campo de gravedad de la Tierra que se aproxima al nivel medio del mar en equilibrio estático. Se define de mejor forma como un modelo físico que busca representar la verdadera forma de la Tierra calculándola como una superficie del campo de gravedad con potencial constante; además, es utilizada como referencia para determinar la elevación del terreno. Es importante destacar que la fuerza de gravedad debe ser perpendicular en cualquier punto de la superficie geoidal. El geoide se eleva en regiones más densas y decae en zonas menos densas, debido al efecto de la densidad de la Tierra sobre el geoide. Estas variaciones muestran como consecuencia una topografía diversa alrededor del globo como montañas, llanuras, depresiones, valles, entre otros.

Existe una superficie de referencia conocido como elipsoide, el cual debe su nombre a su factor de achatamiento en los polos y abultamiento en el Ecuador por lo que se pierde la forma de esférica. El Geoide no es una figura regular, sino que presenta curvaturas o variaciones internas de gravedad relacionadas a la distribución no homogénea de la masa sobre la superficie Terrestre respecto a dicha superficie de referencia.

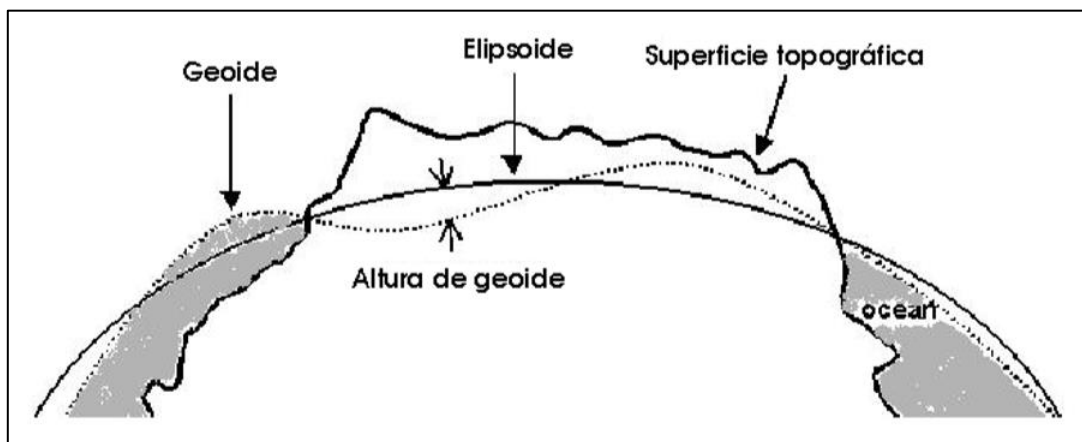


Figura 13. Representación del geoide, elipsoide y el terreno de la Tierra. Recuperado de Torres Zamudio (2002), modificado de Liz y Götze (2001).

3.1.2 Fundamento físico.

3.1.2.1 Ley de la Gravitación Universal.

La base para comprender el método gravimétrico es la *ley de la Gravitación Universal*, la cual establece que la fuerza de atracción F entre dos masas m_1 y m_2 es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas (Serway, 1998). Se expone en la siguiente ecuación:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

G es la constante de Gravitación Universal y su valor en unidades del S.I. es:

$$G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2 \quad (2)$$

Se considera que la atracción gravitacional de una esfera de masa homogénea m con un radio R sobre la superficie, entonces, la fuerza F existente sobre una masa m sería:

$$F = \frac{GM}{R^2} m = mg \quad (3)$$

Esta llamada *atracción gravitacional*, posee un valor numérico sobre la superficie de la Tierra que es de $980 \text{ cm}/\text{s}^2$. Fue medida experimentalmente por primera vez por Galileo, por lo que en su honor, la unidad de aceleración gravitacional $1 \text{ cm}/\text{s}^2$ es conocida como el *Galileo* o *Gal* (Telford *et al.*, 1990).

3.1.3 Correcciones gravimétricas.

La adquisición de datos gravimétricos efectuados sobre la superficie terrestre se ven afectados por diversas fuentes: mareas como consecuencia de la atracción entre el Sol y la Luna, la deriva instrumental dependiendo del gravímetro utilizado, la topografía de la zona, entre otras. Por lo que para hacer una adecuada interpretación es necesario realizar ciertas correcciones para eliminar los valores que no son útiles y así, analizar y comparar correctamente los datos de la gravedad medida con la gravedad teórica de la zona de estudio.

3.1.3.1 *Corrección por mareas*

Las medidas de gravedad en una determinada zona varían en función del tiempo como consecuencia de variaciones periódicas en los efectos gravitacionales de la Tierra con respecto al Sol y la Luna, por lo que una corrección a los datos debe ser realizada. Estas variaciones tienen amplitud de alrededor de 0.3 mGal (Telford *et al.*, 1990) aunque son diferentes dependiendo la hora, el día o el mes.

Sin embargo, estas variaciones son relativamente lentas y suaves por lo que usualmente son incluidas dentro de los instrumentos de medición y su corrección es parte de la deriva instrumental.

3.1.3.2 *Corrección de latitud*

La rotación de la Tierra y su protuberancia ecuatorial producen un incremento de la gravedad con la latitud, lo que muestra una diferencia en el radio ecuatorial y polar de 21 km (Kearey *et al.*, 2002).

La amplitud de este efecto se reduce cuando se sustrae del valor de gravedad en el nivel del mar sobre cualquier punto de la superficie terrestre la gravedad observada. Por lo que en 1967 según el Sistema Geodésico de Referencia, creó una determinación analítica de la gravedad en cualquier punto de la Tierra; mediante la fórmula alternativa pero precisa dada por Mittermayer en 1969, donde los contrastes son ajustados para minimizar el factor de error. La ecuación que representa esta corrección es:

$$g_{\varphi} = 9\,780\,318.5 (1 + 0.005278895 \sin^2 \varphi + 0.000023462 \sin^4 \varphi) \quad (4)$$

3.1.3.3 *Corrección por deriva instrumental*

Durante la toma de datos, el equipo puede afectar las lecturas debido a la fatiga del mismo o a los cambios de temperatura presentes en el ambiente a lo largo del tiempo de adquisición. La corrección por deriva instrumental se basa en la repetición de lecturas que se hacen en la estación base y son registradas a lo largo del día. La lectura del medidor se traza en función del tiempo y se asume que la desviación es lineal entre las

lecturas de base consecutivas; así, la corrección por deriva, en un tiempo t es d , el cual debe sustraerse del valor observado (Kearey *et al.*, 2002).

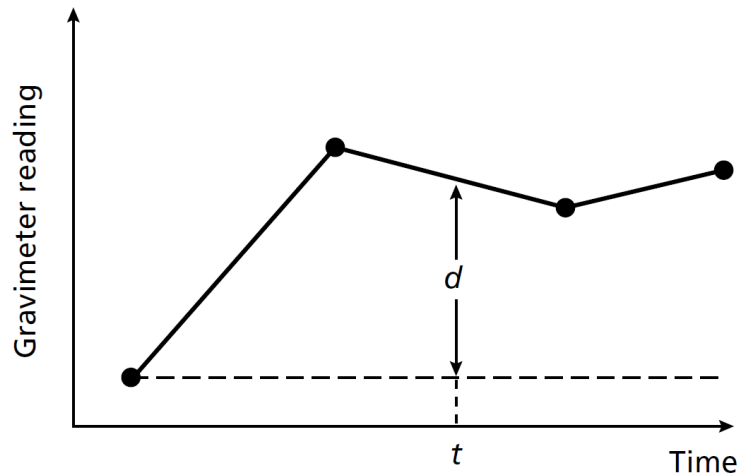


Figura 14. Curva de la deriva del gravímetro construida por lecturas en una localización corregida. La corrección por deriva a ser sustraída por una lectura en el tiempo t es d . Recuperado de Kearey (2002)

3.1.3.4 Corrección al aire libre

Corrige la disminución de la gravedad conforme a la altura en el aire libre que resulta del aumento de la distancia del centro de la Tierra, de acuerdo a la Ley de Newton. Para realizar la corrección se toman en cuenta los cambios de elevación entre las estaciones por lo que se reducen todas las mediciones a una superficie de referencia. Matemáticamente está dada por:

$$FAL = 3.086 h \quad (h \text{ es la altura en metros}) \quad (5)$$

La corrección al aire libre es positiva para una observación puntual por encima del dato de referencia para corregir por la disminución en gravedad con elevación. “No se toma en cuenta el efecto gravitatorio de la roca presente entre el punto de observación y el dato de referencia” (Kearey *et al.*, 2002, p. 134).

3.1.3.5 Corrección de Bouguer

Esta corrección si toma en cuenta el efecto gravitatorio del material rocoso existente entre el punto de observación y el dato de referencia. Por lo que se supone que “la

estación del gravímetro se localiza sobre una placa que se extiende horizontalmente hasta el infinito y cuyo espesor equivale a la diferencia de las elevaciones entre el dato de referencia y el nivel de observación” (Kearey *et al.*, 2002, p. 134).

$$CB = 2\pi G\rho h = 0.4191 \rho h \quad (6)$$

Donde:

$$G: 6.67 \times 10^{-11} N \cdot m^2/kg^2$$

ρ : 2.67 g/cm^3 densidad típica

h : altura en metros

Sobre la superficie, esta corrección debe ser sustraída debido a que la atracción gravitacional del material rocoso entre el punto de observación y el dato de referencia debe eliminarse del valor de gravedad observado. “Para estaciones localizadas por encima del nivel de referencia, la corrección de Bouguer se resta, en cambio para las que están por debajo del nivel de referencia, el efecto se suma” (Telford *et al.*, 1990, p. 12).

3.1.3.6 Corrección topográfica

Esta corrección es para complementar las dos anteriores, ya que ambas no consideran la forma del relieve terrestre. Compensa, respecto al dato de referencia, los efectos por exceso o déficit de masa de la topografía real sobre la placa infinita de Bouguer. En primer lugar, se necesita la información detallada de la topografía dentro de la zona de estudio, ya sean curvas de nivel o modelos digitales de elevación que expongan la forma del relieve a lo largo de los puntos de medición.

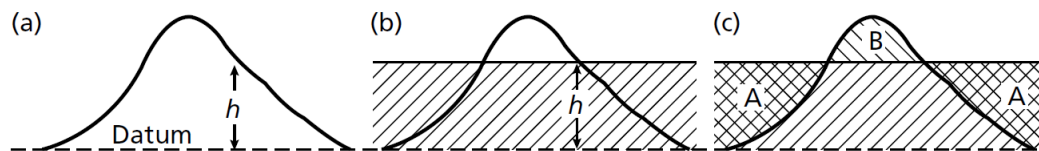


Figura 15. (a) Corrección al aire libre para un observador a una altura h sobre la referencia. (b) Corrección de Bouguer. La zona sombreada corresponde al bloque de roca de grosor h y se extiende al infinito en ambas direcciones horizontales. (c) Corrección topográfica. Recuperado de Kearey (2002)

Esta corrección siempre será positiva debido a que los relieves altos, al contener mayor masa disminuyen la gravedad medida en las estaciones y los valles registran baja fuerza de atracción por la falta de masa.

Para aplicar este tipo de corrección se utiliza la retícula de Hammer (conocida así en nombre a su inventor); es una retícula circular dividida por líneas radiales y concéntricas dentro de un número considerable de compartimientos, su radio puede extenderse desde dos metros hasta 21 kilómetros. La retícula se extiende sobre el mapa topográfico con su centro en la estación de gravedad y el promedio de elevación topográfica de cada compartimento es determinado.

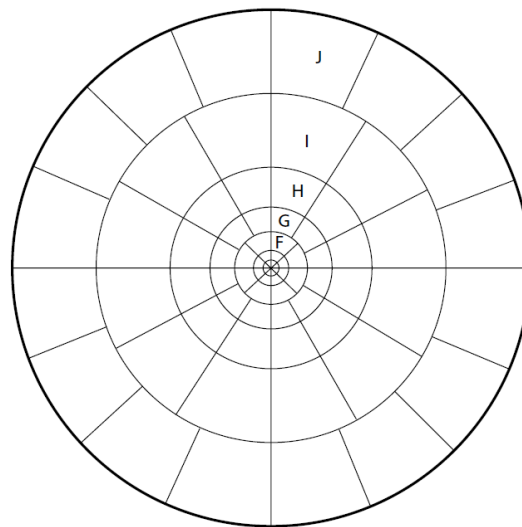


Figura 16. Retícula de Hammer utilizada para la realización de la corrección topográfica. Recuperado de Kearey et al (2002).

La elevación de la estación de gravedad se resta a cada uno de los compartimentos de la retícula y entonces, el efecto gravitacional sobre cada uno de ellos es definido con referencia a tablas construidas en base a la fórmula para el efecto gravitacional de un sector de un cilindro vertical en su eje (Kearey *et al.*, 2002).

3.1.4 Anomalías gravimétricas.

Como se menciona anteriormente, la prospección gravimétrica identifica las variaciones laterales del campo gravitatorio sobre la superficie terrestre. Las diferencias de gravedad encontradas en dicho campo corresponden a factores como: topografía del terreno, movimiento de las mareas, cambios litológicos, estructuras geológicas, fallas y la densidad de los materiales. A estas variaciones se les conoce como anomalía gravimétrica. Sin embargo, las lecturas de los instrumentos empleados para la medición arrojan datos variados y de los cuales se deben definir los valores tanto estándares (superficie de referencia) como los anómalos.

Por lo tanto, una anomalía gravimétrica se definiría como la diferencia entre la información entre las medidas llevadas a cabo durante la adquisición y los valores de la superficie de referencia. Es entonces, que puede hacerse una interpretación de los cuerpos o estructuras en el subsuelo.

3.1.4.1 *Anomalía de aire libre*

Para esta anomalía se toma en cuenta solamente los cambios de altitud corregidos en la corrección al aire libre. Se calcula como si la medición de variaciones gravimétricas fuera hecha a la elevación de la estación y no toma en cuenta la atracción del material entre esa elevación y la superficie de referencia (Kearey *et al*, 2002).

$$\Delta g_{AL} = \Delta g_m - \Delta g_r \pm C^{AL} \quad (7)$$

3.1.4.2 *Anomalía de Bouguer*

La estimación de la anomalía de Bouguer usa un valor de gravedad estándar calculado, aplicando además la corrección al aire libre y la corrección de Bouguer. Se consideran las correcciones por altura y por la atracción del material entre el punto de medición y la superficie de referencia (Telford *et al*, 1990).

$$\Delta g_B = \Delta g_m - \Delta g_r \pm C^{AL} \pm C^B \quad (8)$$

3.1.4.3 Anomalía de Bouguer Completa

Esta anomalía se obtiene al aplicar todas las correcciones mencionadas en el apartado previo. Representa la sumatoria de los efectos gravitatorios de masas ubicadas a niveles profundos y superficiales conocidas como anomalía regional y superficial correspondientemente. Se toma en cuenta la atracción gravitacional del material entre el dato de la estación y el de la superficie de referencia que fue ignorado en la calculación de anomalía al aire libre (Telford *et al*, 1990). Está dada por:

$$\Delta g_{BC} = \Delta g_m - \Delta g_r \pm C^{AL} \pm C^B + (C^T + C^M + C^\phi) \quad (9)$$

Siendo:

Δg_{BC} : Anomalía completa de Bouguer.

Δg_m : Anomalía gravimétrica medida.

Δg_r : Anomalía gravimétrica de la superficie de referencia.

C^{AL} : Corrección al aire libre.

C^B : Corrección de Bouguer.

C^T : Corrección topográfica.

C^M : Corrección por mareas.

C^ϕ : Corrección por latitud.

3.1.5 Anomalías Regional y Residual

Como es mencionado anteriormente, la Anomalía Completa de Bouguer es la sumatoria de las atracciones gravitatorias tanto profundas como superficiales que detecta el instrumento empleado.

Las anomalías de longitudes de onda de gran amplitud se deben a contrastes de densidad profundos de carácter regional asociados a estructuras de gran escala

presentes en la estructura terrestre, por lo que a esta anomalía se le conoce como regional. En cambio, a las estructuras superficiales que generan longitudes de onda pequeños se conocen como anomalía residual, es de carácter local que usualmente es cubierta por los efectos regionales.

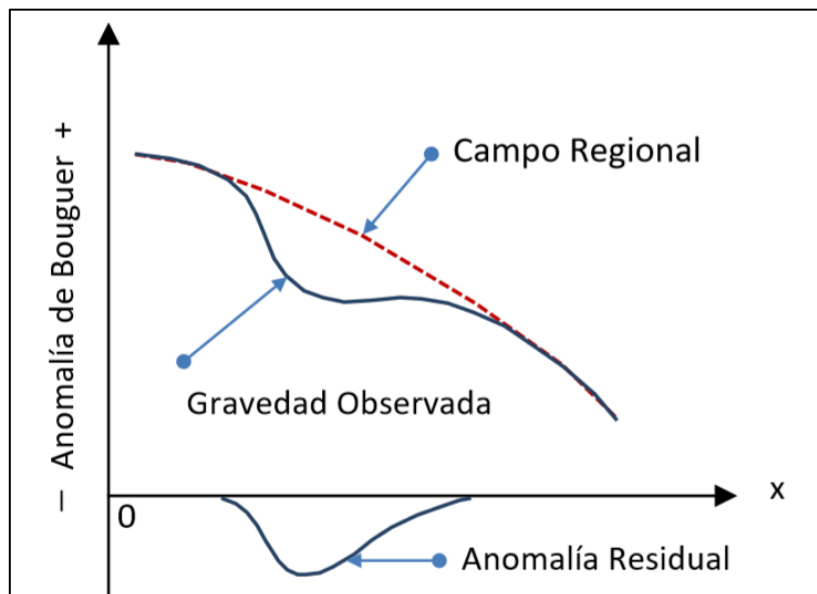


Figura 17. Anomalías regional y residual. Modificado de Kearey (2002).

Por lo que, se deben separar los efectos generados por las anomalías y así elegir la adecuada al momento de realizar una buena interpretación. Para ello existen diversos métodos para separarlas que varían desde ajustes polinómicos hasta el análisis espectral.

3.1.6 Análisis radial espectral

El análisis espectral es un método desarrollado para datos de exploración magnética que ha sido extendido a datos gravimétricos, el cual permite determinar el contenido de frecuencias en las anomalías y así, estimar estadísticamente las profundidades de la parte superior de los cuerpos. De acuerdo con Blakely (1988), es un método que consiste en pasar la señal obtenida en el dominio del espacio al dominio del número de onda mediante la aplicación de la transformada de Fourier, misma que provee información para encontrar el vínculo entre la señal de anomalías magnéticas o gravimétricas y las fuentes que las producen a partir del número de onda.

Se representa por una ecuación de recta cuya pendiente se relaciona con la profundidad de la masa del cuerpo, mientras que la ordenada en el origen depende de la magnitud de la misma; es decir, a mayor pendiente de la recta, mayor es el valor de la profundidad a la que se encuentra situada la masa que produce la anomalía magnética o gravimétrica.

$$\ln P(k) = \ln 4\pi^2 G^2 m^2 - 4\pi|k|z_0 \quad (10)$$

Donde:

$P(k)$ = espectro de potencia

G = constante de gravitación universal

m = masa de un cuerpo puntual

z_0 = profundidad por debajo del nivel de referencia

Gráficamente se obtiene una curva en la que se pueden diferenciar tres secciones claramente definidas, usualmente estas corresponden a:

1. La fuente regional
2. La fuente residual
3. El ruido

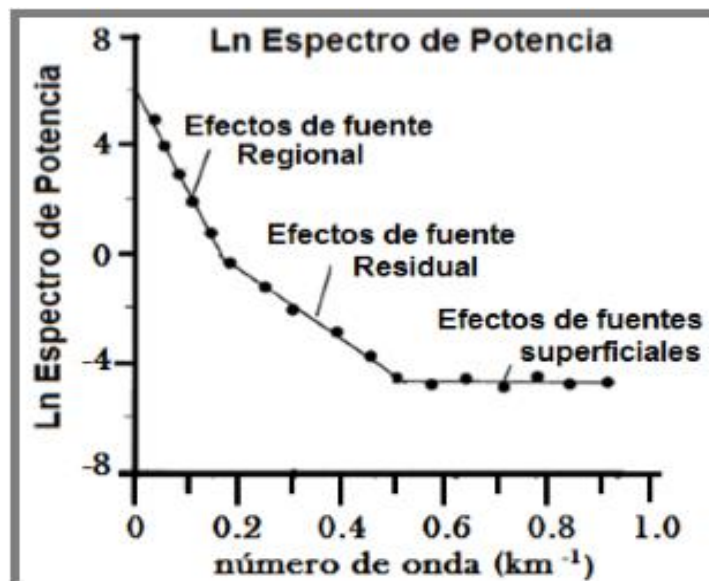


Figura 18. Logaritmo natural del espectro de potencia de la transformada de Fourier de la anomalía de Bouguer en función con el número de onda. Recuperado de Ortega 2014. (Modificado de Spector y Grant, 1970)

3.1.7 Densidad de las rocas.

Se ha referido previamente que las anomalías gravimétricas son el resultado de las diferencias o variaciones del campo gravitacional entre un cuerpo de roca y su entorno, por lo que para un cuerpo de densidad ρ_1 enfrascado en un material de densidad ρ_2 , el contraste de densidad $\Delta\rho$ esta dada por: (Kearey *et al.*, 2002).

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 \quad (11)$$

La densidad de las rocas varía dependiendo de distintos factores geofísicos como pueden ser la porosidad y la composición mineral de cada material. De hecho, la variación en la porosidad en la roca es la causa principal de las variaciones en densidad de las rocas sedimentarias, por lo que en secuencias sedimentarias la densidad tiende a aumentar con la profundidad debido a la cementación progresiva derivada de la compactación en el tiempo.

Por otro lado, las rocas ígneas y metamórficas tienen casi despreciable, de manera que su composición mineralógica es la principal razón de su variación de densidad. Generalmente, existe una progresión de densidades donde las rocas ígneas básicas son más pesadas que las acidas.

Es necesario entonces, tener conocimiento acerca de la densidad entre los distintos tipos de materiales existentes en la superficie terrestre para realizar las interpretaciones precisas de los estudios correspondientes. La medición de esta densidad de materiales puede realizarse mediante métodos de prospección geofísica, de saturación de agua, entre otros. Algunos rangos de densidad se detallan a continuación (tabla 1).

Tabla 1. Densidad de rocas y minerales. Tomado de Telford *et al* (1990).

TIPO DE ROCA	RANGO (g/cm^3)	PROMEDIO (g/cm^3)	TIPO DE MINERAL	RANGO (g/cm^3)	PROMEDIO (g/cm^3)
SEDIMENTARIAS			METÁLICOS		
		1.92	Óxidos y carbonatos		
Tierra	1.2 – 2.4	1.92	Bauxita	2.3 – 2.55	2.45
Arcilla	1.63 – 2.6	2.21	Limonita	3.5 – 4.0	3.78
Grava	1.7 – 2.4	2.0	Siderita	3.7 – 3.9	3.83
Arena	1.7 – 2.3	2.0	Rutilo	4.18 – 4.3	4.25
Arenisca	1.61 – 2.76	2.35	Magnetita	4.2 – 4.4	4.32
Esquisto	1.77 – 3.2	2.4	Cromita	4.3 – 4.6	4.36
Caliza	1.93 – 2.9	2.55	Ilmenita	4.3 – 5.0	4.67
Dolomita	2.28 – 2.9	2.7	Pirolusita	4.7 – 5.0	4.82
			Franklinita	5.0 – 5.22	5.12
IGNEAS			Hematita	4.9 – 5.3	5.18
Riolita	2.35 – 2.7	2.52	Cuprita	5.7 – 6.15	5.92
Andesita	2.4 – 2.8	2.61	Casiterita	6.8 – 7.1	6.92
Granito	2.5 – 2.81	2.64	Wolframita	7.1 – 7.5	7.32
Granodiorita	2.67 – 2.79	2.73	Sulfuros, arseniuros		
Pórfido	2.6 – 2.89	2.74	Esfalerita	3.5 – 4.0	3.75
Cuarzo diorita	2.62 – 2.96	2.79	Malaquita	3.9 – 4.03	4.0
Diorita	2.72 – 2.99	2.85	Calcopirita	4.1 – 4.3	4.2
Lavas	2.8 – 3.0	2.9	Stanita	4.3 – 4.52	4.4
Diabasa	2.5 – 3.2	2.91	Estibnita	4.5 – 4.6	4.6
Basalto	2.7 – 3.3	2.99	Pirrotita	4.5 – 4.8	4.65
Gabro	2.7 – 3.5	3.03	Molibdenita	4.4 – 4.8	4.7
Peridotita	2.78 – 3.37	3.15	Marcasita	4.7 -4.9	4.85
Ígneas ácidas	2.3 – 3.11	2.61	Pirita	4.9 – 5.2	5.0
Ígneas básicas	2.09 – 3.17	2.79	Bornita	4.9 – 5.4	5.1
			Chalcocita	5.5 – 5.8	5.65
METAMORFICAS			Cobalita	5.8 – 6.3	6.1
Cuarcita	2.5 – 2.7	2.6	Arsenopirita	5.9 – 6.2	6.1
Esquisto	2.39 -2.9	2.64	Bismotinita	6.5 – 6.7	6.57
Grawaca	2.6 – 2.7	2.65	Galena	7.4 – 7.6	7.5
Mármol	2.6 – 2.9	2.75	Cinabrio	8.0 – 8.2	8.1
Serpentina	2.4 – 3.1	2.78	Minerales no metálicos		
Pizarra	2.7 – 2.9	2.79	Petroleo	0.6 – 0.9	-
Gneis	2.59 – 3.0	2.8	Hielo	0.88 – 0.92	-
Anfibolita	2.9 – 3.04	2.96	Agua de mar	1.01 – 1.05	-
Eclogita	3.2 – 3.54	3.37	Carbón blando	1.2 – 1.5	1.32
Metamórfica	2.4 – 3.1	2.74	Grafito	1.9 – 2.3	2.15
			Yeso	2.2 – 2.6	2.35
			Ortoclasa	2.5 – 2.6	-
			Cuarzo	2.5 – 2.7	2.65
			Calcita	2.6 – 2.7	-
			Magnesita	2.9 3.25	3.03
			Antracita	1.34-1.8	1.5
			Caolinita	2.2-2.63	2.53
			Biotita	2.7-3.2	2.92
			Fluorita	3.01-3.25	3.14
			Barita	4.3-4,7	4.47

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO

4.1 Adquisición de datos

Para realizar el procesamiento de información, los datos fueron proporcionados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos mediante el convenio con distintas instituciones participantes dentro del proyecto 4.6 de GEMex. Dicha información marca el levantamiento como gravimetría terrestre, se incluyen solamente coordenadas, elevación de estaciones gravimétricas y el valor de Anomalía de Bouguer Completa.

4.1.1 Instrumentación

A pesar de contar con información limitada, de acuerdo con la guía metodológica de la Red Geodésica Mexicana, debido a que en geodesia se requieren valores absolutos de gravedad, todos los levantamientos gravimétricos nacionales se encuentran conectados a un marco de referencia gravimétrico avalado como estándar y conocido como Red Internacional de Estandarización de Gravedad de 1971 (IGSN71). Según la metodología de levantamientos gravimétricos terrestres que realiza la Red Geodésica Mexicana y al IGSN71, éstos dependen directamente de los instrumentos disponibles para hacer las observaciones, donde se identifican los gravímetros absolutos y relativos cuya sensibilidad debe ser de 0.01 mgal de precisión. Usualmente se utiliza el gravímetro SCINTREX CG5, el cual debido a sus características se adapta fácilmente a la topografía del terreno.



Figura 19. Gravímetro SCINTREX CG5 usualmente utilizado en levantamientos gravimétricos.

4.1.2 Características del levantamiento

Se describen a continuación los procesos realizados incluyendo las correcciones, un mapa mostrando un área rectangular cuya dimensión es de 45 por 26 kilómetros, así como la distribución de las 1532 estaciones gravimétricas donde la distancia de separación entre ellas varía con valores desde 200 hasta 600 metros. Se indican las trayectorias que si bien no poseen un orden específico, se realizaron con el propósito de abarcar la mayor parte del terreno a manera de obtener mejor información de la zona.

Tabla 2. Procesos realizados a los datos obtenidos en campo.

CORRECCIÓN POR DERIVA INSTRUMENTAL	CORRECCIÓN POR MAREAS
CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA	CORRECCIÓN AL AIRE LIBRE
CORRECCIÓN LATITUD	

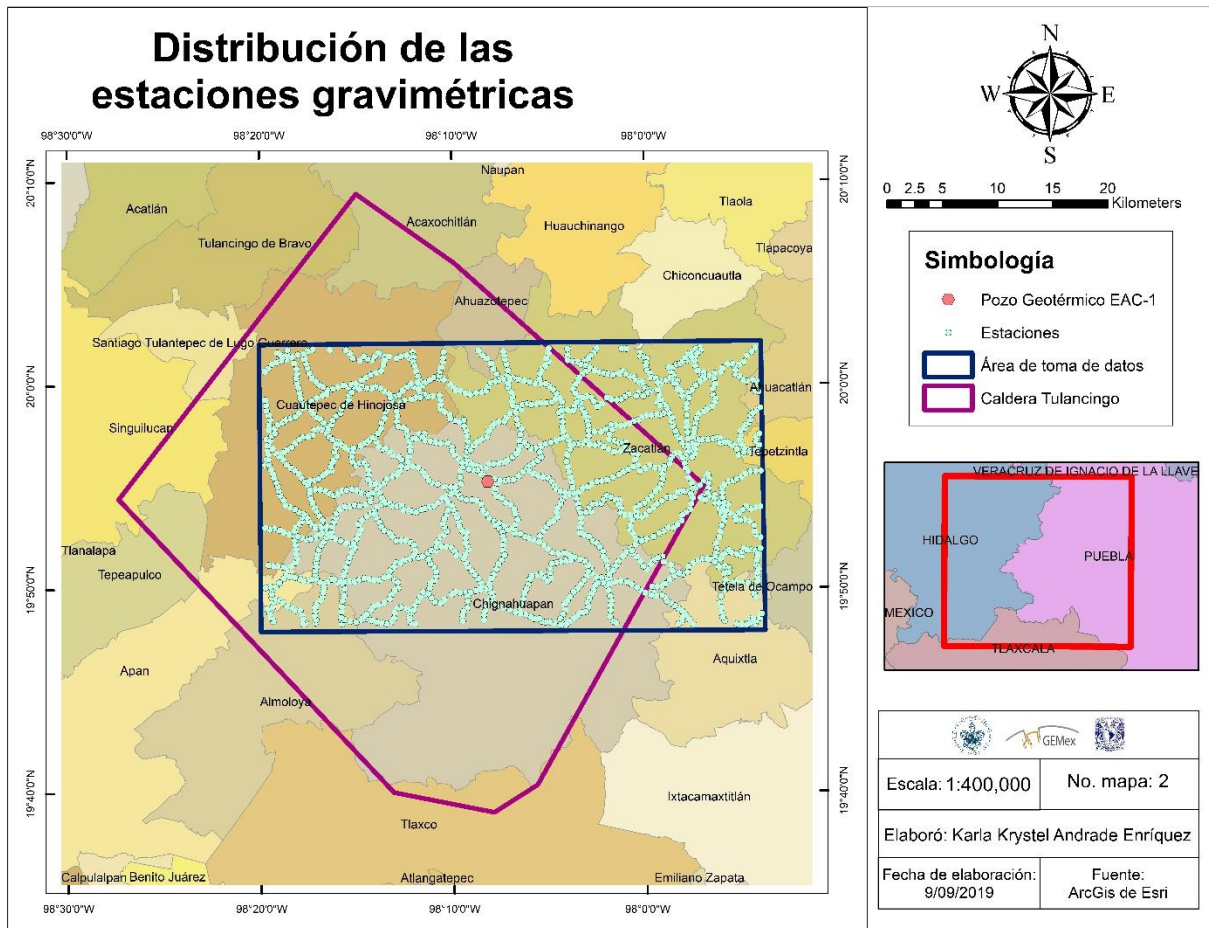


Figura 20. Distribución de las estaciones gravimétricas dentro del área de toma de datos.

4.2 Procesamiento y análisis de información

La etapa de procesamiento de datos gravimétricos radica en la ejecución de un conjunto de procedimientos ordenados cuya finalidad es la obtención de modelos e imágenes del subsuelo que puedan respaldarse con información geológica.

Para el presente estudio, se implementó el uso del software *Oasis Montaj*® versión 6.4.2 de Geosoft, empleando filtros y herramientas para la generación de mapas.

En primer lugar, se sabe que la información en crudo recabada contiene el efecto de todas las masas involucradas en el entorno del gravímetro, es decir, topografía, deriva instrumental, latitud, aire libre, entre otras, las cuales deben eliminarse con el propósito de obtener la distribución real de las masas de interés. No obstante, en este estudio no fue necesario realizar las correcciones correspondientes debido a que la institución involucrada en la adquisición ya había realizado todas las necesarias.

Con la corrección de las mediciones gravimétricas por las diversas fluctuaciones de gravedad involucradas, se generó una base de datos dentro de *Oasis Montaj*® versión 6.4.2 donde se incluyeron las coordenadas y alturas de las estaciones gravimétricas, así como el valor de Anomalía de Bouguer. Teniendo la información ordenada, se llevó a cabo el cálculo de la anomalía completa de Bouguer Completa, utilizando para este proceso una densidad de referencia estándar de 2.67 g/cm^3 .

Posteriormente se generaron los mapas de Anomalía de Bouguer Completa y el de topografía que se muestran correspondientemente (Figura 21 y 22).

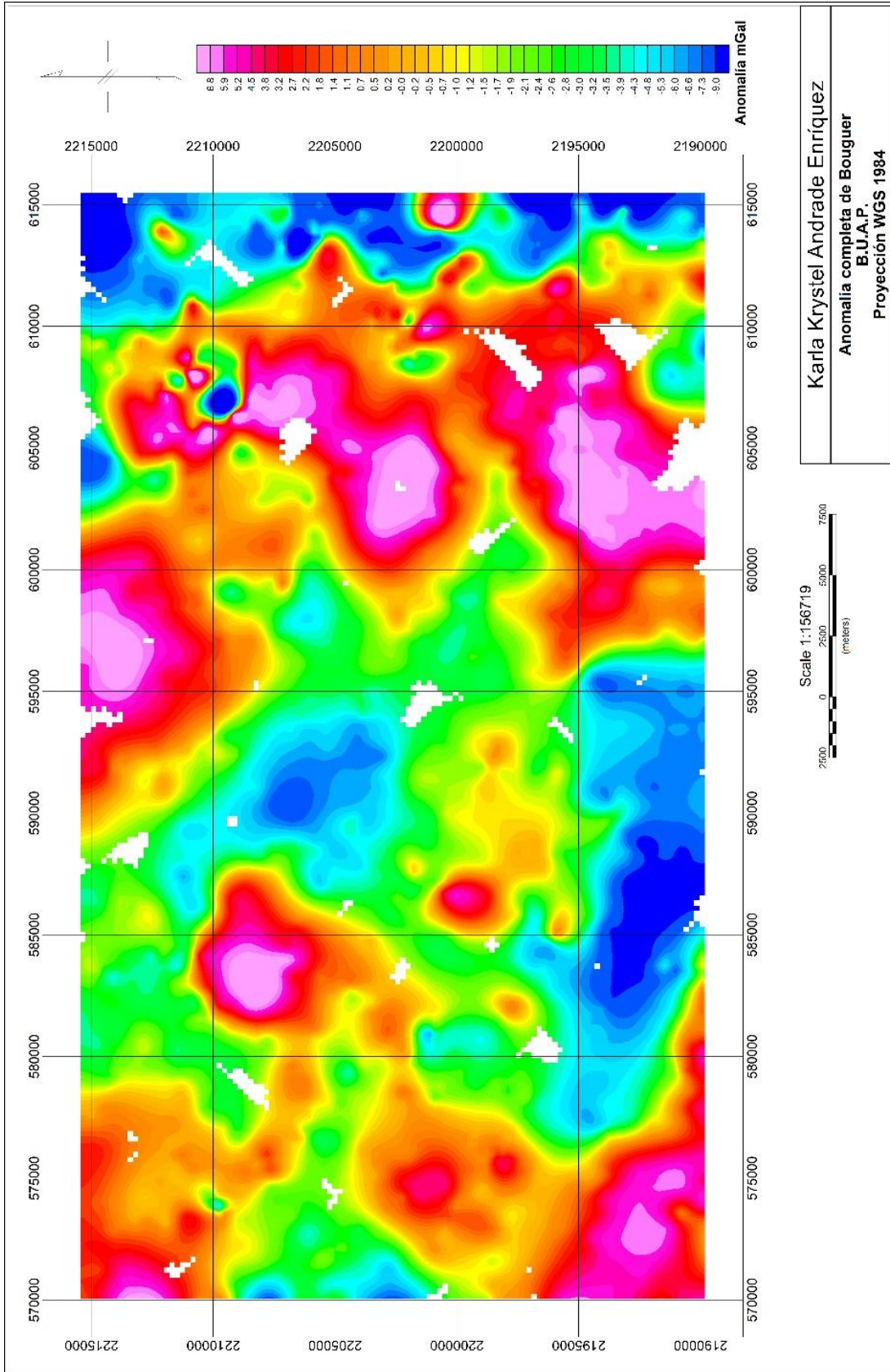


Figura 21. Mapa de Anomalia de Bouguer Completa. Se observan las anomalías superficiales y profundas superpuestas.

El mapa topográfico o de elevación digital se creó con base en las alturas geoidales de la superficie de medición y se observa en seguida.

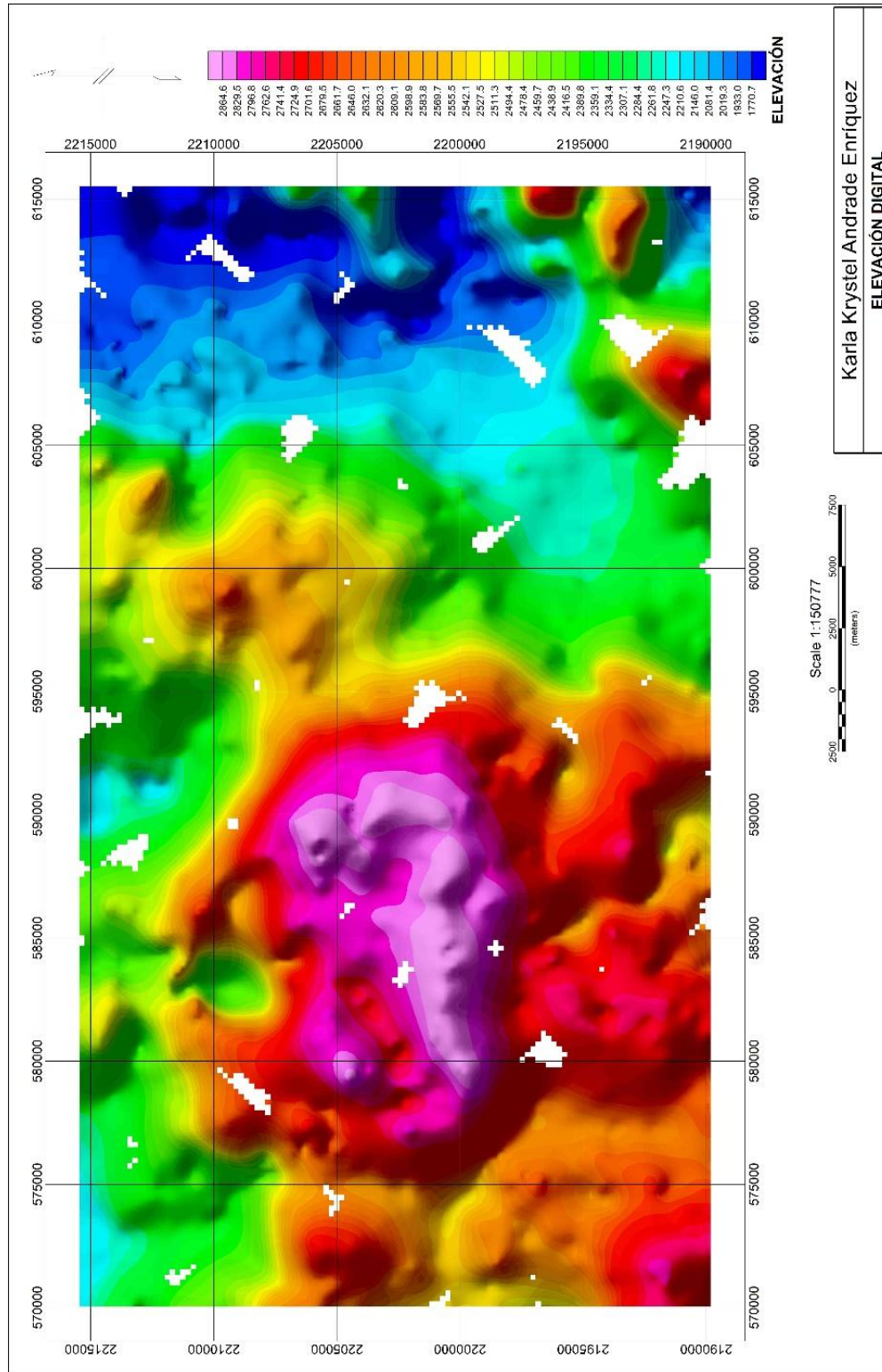


Figura 22. Mapa de elevación digital. Se muestran las zonas de mayor elevación e color morado y las de menor altitud en tonalidades azules.

4.2.1 Separación de las anomalías regional y residual

De acuerdo con Lowrie (1997), la separación de anomalías de origen regional y local es un paso importante en la interpretación de un mapa de gravedad. La anomalía regional usualmente se atribuye a las estructuras profundas que generan longitudes de onda grades; en cambio, la anomalía residual, genera longitudes de onda pequeñas provocados por cuerpos o estructuras superficiales.

Un mapa de Anomalía de Bouguer Completa contiene anomalías superpuestas de diversas fuentes, por lo que, con el propósito de identificar las estructuras de interés, se realizó la separación de dichas anomalías, dando un enfoque diferente a cada una de ellas. Para hacerlo, se aplicó el filtro Butterworth a la Anomalia de Bouguer Completa cuyas especificaciones se observan en la figura 23.

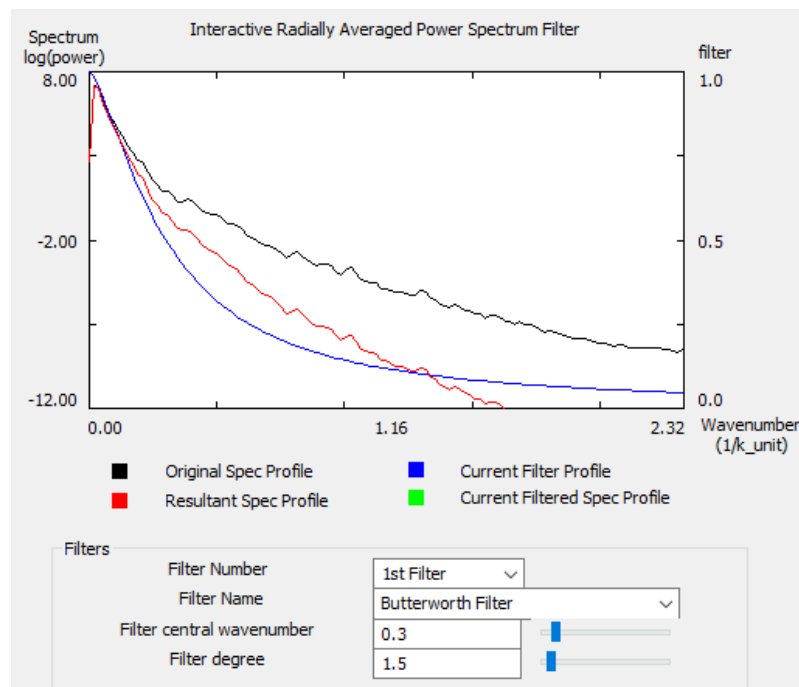


Figura 23. Especificaciones del filtro Butterworth indicando número de onda empleado y grado del filtro.

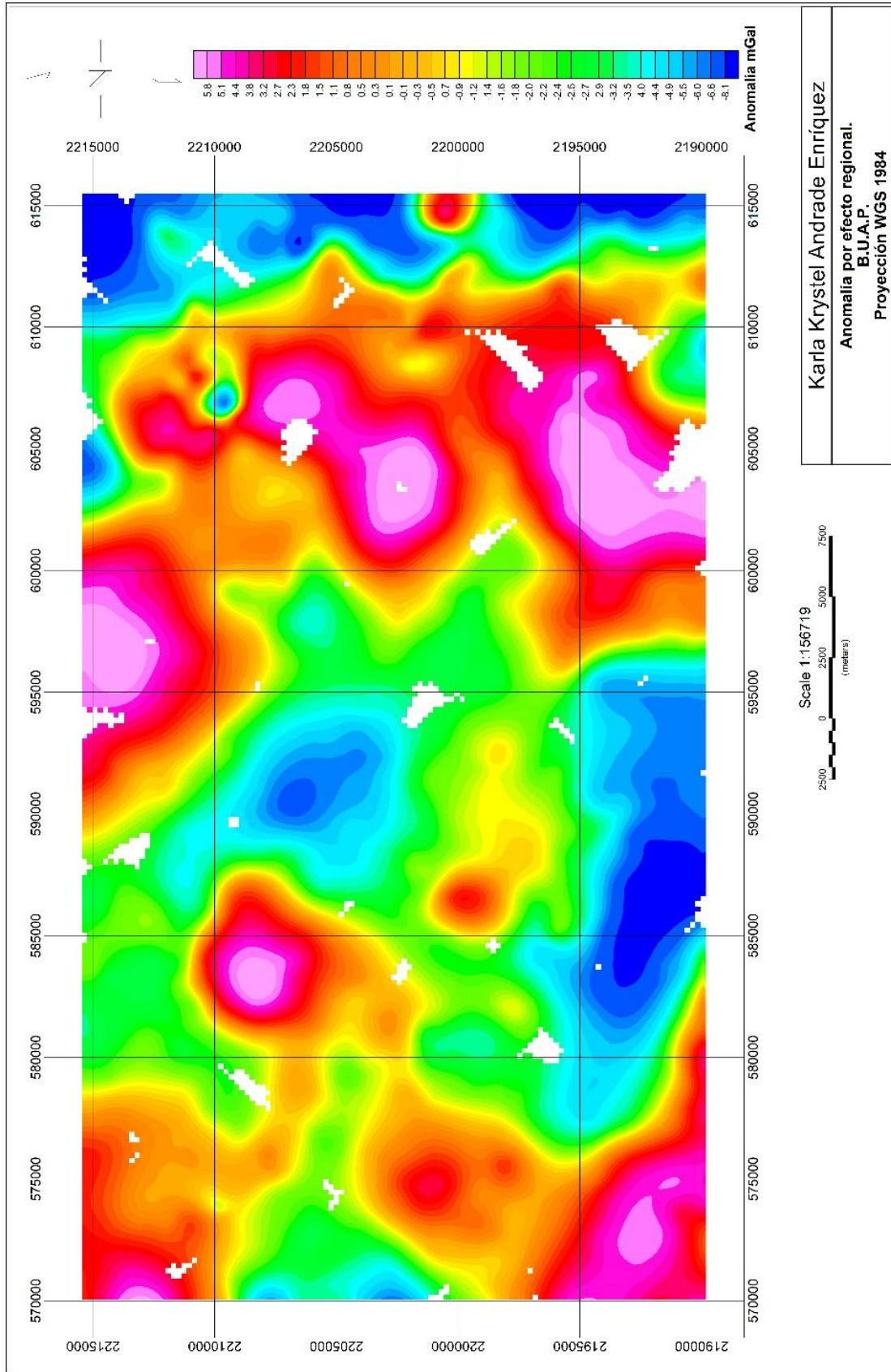


Figura 24. Mapa de Anomalia Regional obtenido como resultado de la aplicación del filtro Butterworth a la Anomalia de Bouguer Completa.

Para la visualización de la anomalía por efecto residual (cuerpos superficiales), se hizo la separación la señal del efecto regional (de gran longitud de onda) de la anomalía de Bouguer Completa. El resultado se observa en la figura 25.

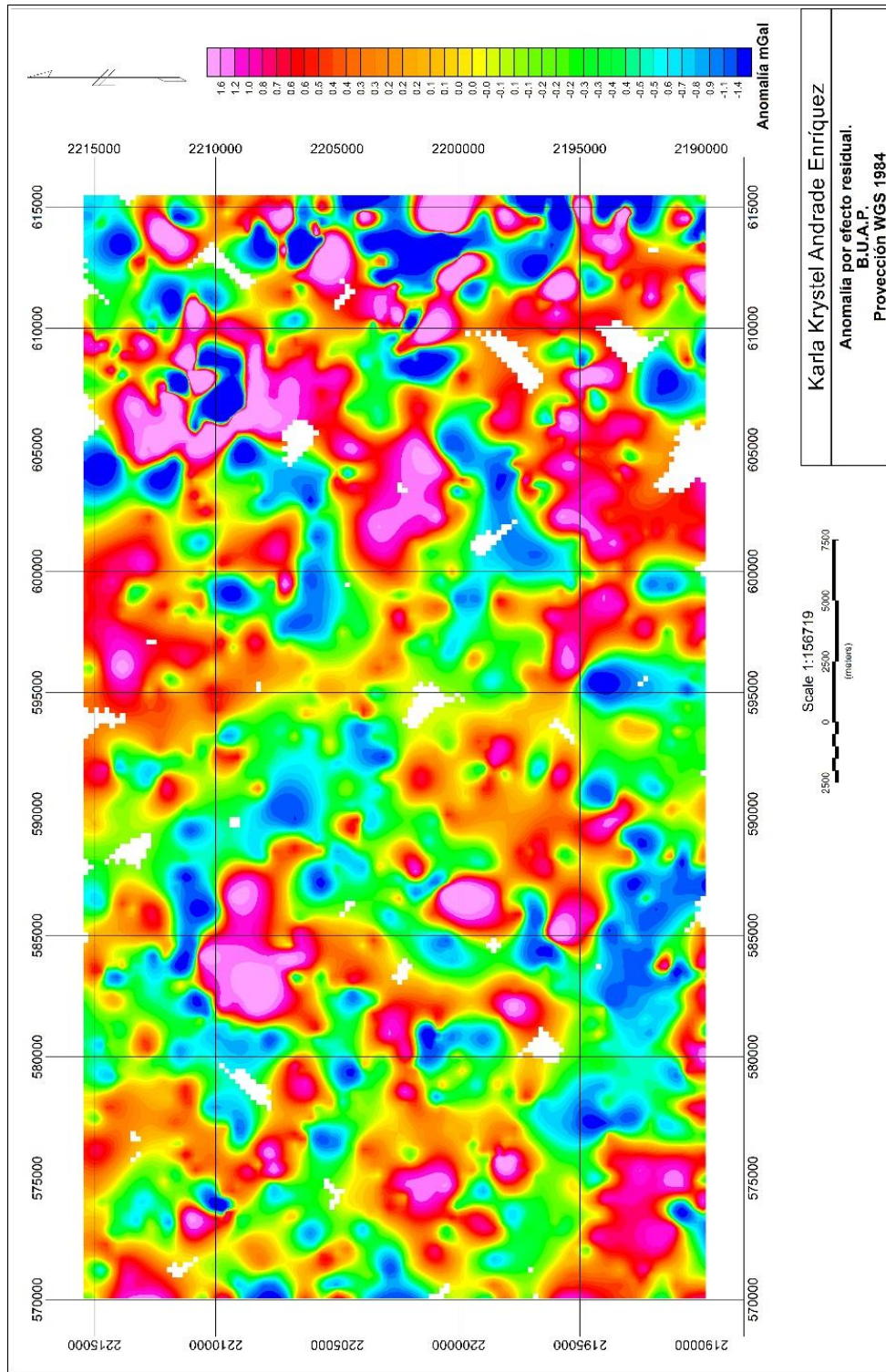


Figura 25. Mapa de Anomalía por efecto residual. Se identifican los cuerpos y estructuras superficiales.

4.2.2 Filtros.

Posteriormente, los filtros contenidos en el *software Oasis Montaj*® versión 6.4.2 de Geosoft fueron utilizados para una mejor visualización e identificación de las anomalías dependiendo las distintas características que se buscaban.

4.2.2.1 Derivada vertical de primer grado

Usualmente se aplican si se desea conocer rasgos litológicos y estructurales superficiales como fracturas, fallas y contactos de las unidades geológicas, debido a que resalta las anomalías de altos gradientes (Henderson, 1949).

4.2.2.2 Derivada vertical de segundo grado

De acuerdo con Henderson y Zietz (1949), se basa en el cálculo del gradiente con respecto a la profundidad del valor de la primera derivada, que como resultado resaltan las longitudes de onda menor, es decir, que permite la visualización de anomalías locales que delinear los bordes de los cuerpos.

4.2.2.3 Continuación analítica ascendente

Dado que el campo gravimétrico de la Tierra es un campo de potencial, posee la propiedad de la continuidad, es decir, se determinan valores de referencia a lo largo de él lo que permite detectar cambios tanto positivos como negativos sobre el campo de gravedad.

Mediante el empleo de este filtro, se proyecta hacia arriba la Anomalía de Bouguer Completa, enfocándose principalmente en sustraer las frecuencias altas de los datos, o sea, eliminar los efectos provocados por fuentes superficiales y por lo tanto, resaltar las bajas frecuencias que, usualmente se asocian a estructuras geológicas profundas. Para este caso, se proyectó la ABC a una altura de 1900 metros.

Los resultados de la aplicación de los filtros mencionados a la Anomalía de Bouguer Completa se muestran a continuación.

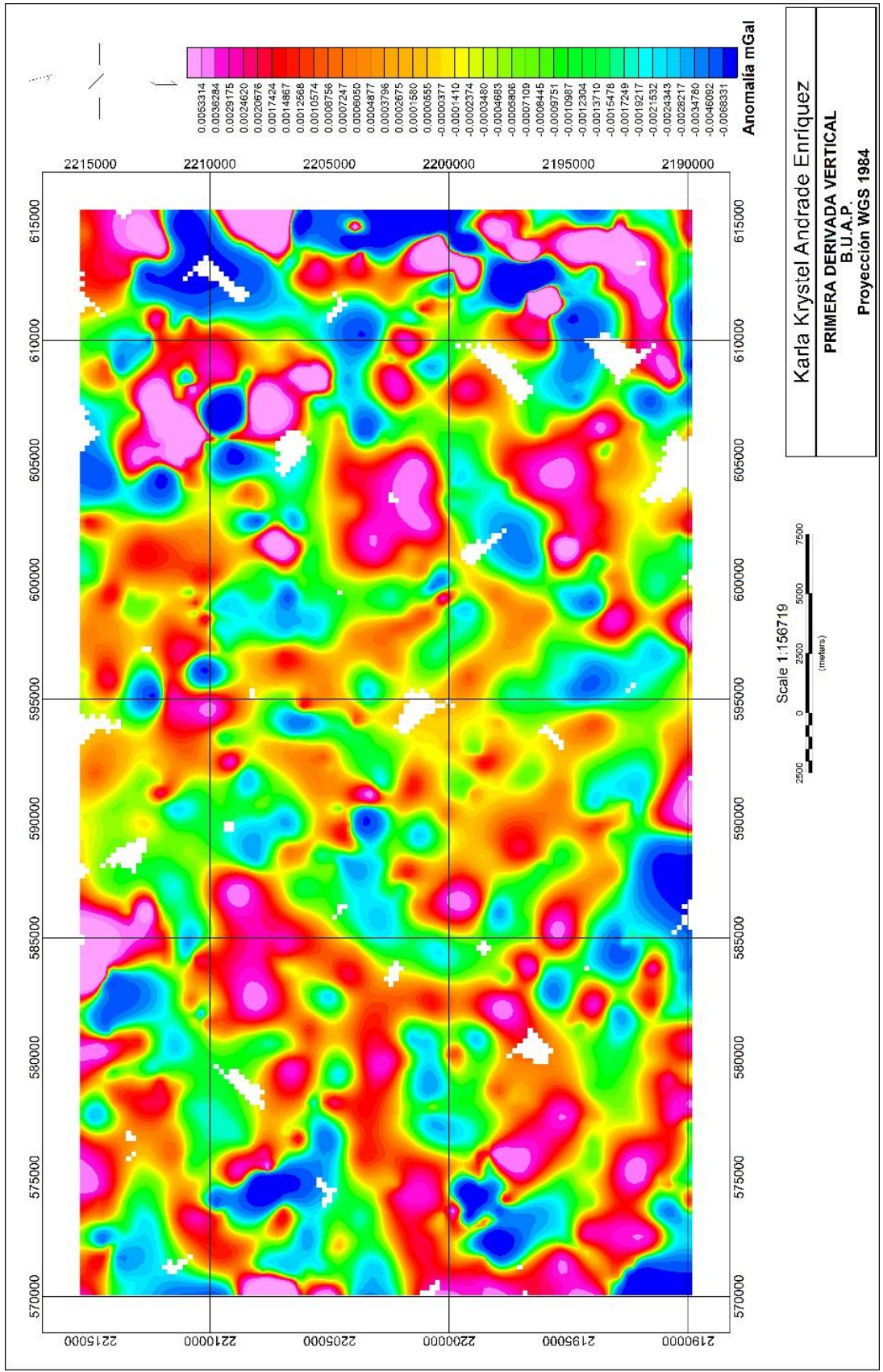


Figura 26. Mapa de primera derivada vertical aplicada a la ABC.

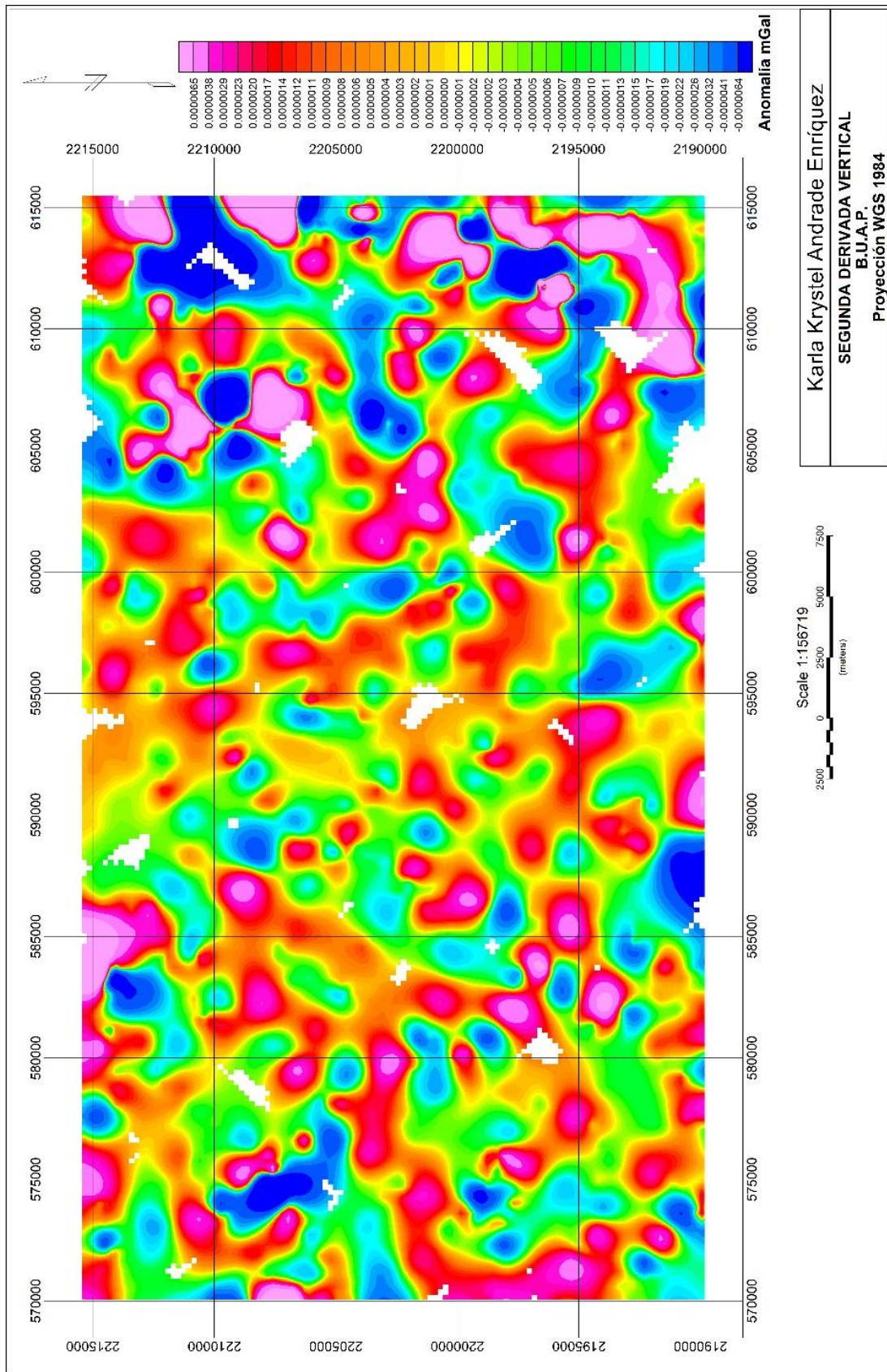


Figura 27. Mapa de segunda derivada vertical aplicada a la ABC.

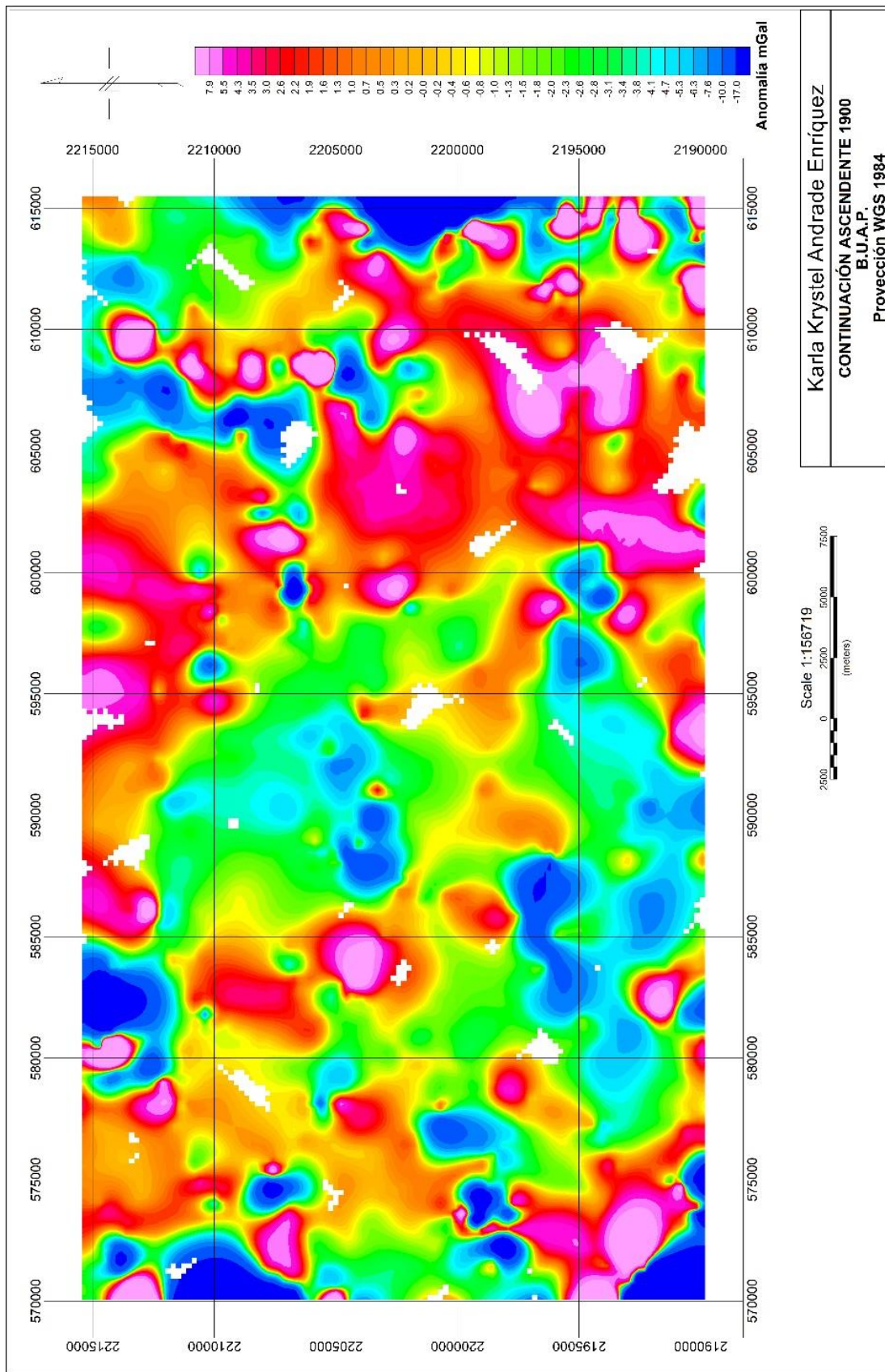


Figura 28. Mapa de continuación ascendente aplicada a la ABC.

4.2.3 Análisis espectral

En este caso, el espectro de potencia que se obtuvo siguiendo la herramienta MAGMAP de *Oasis Montaj 6.4.2*® fue el siguiente:

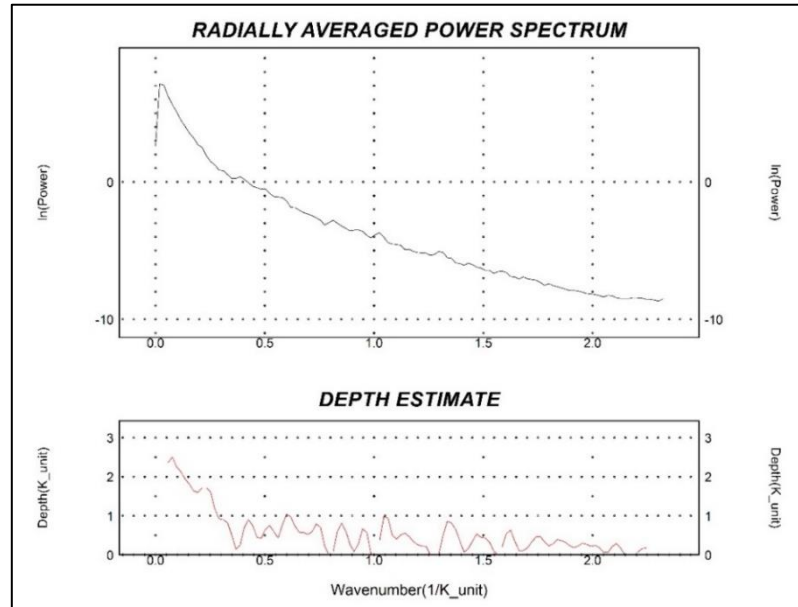


Figura 29. Espectro de frecuencia radial obtenido con MAGMAP.

Posteriormente con la ayuda del *software Excel*, se elaboró una gráfica indicando los cambios de pendiente encontrados y así señalar las profundidades de los efectos tanto regional como residual.

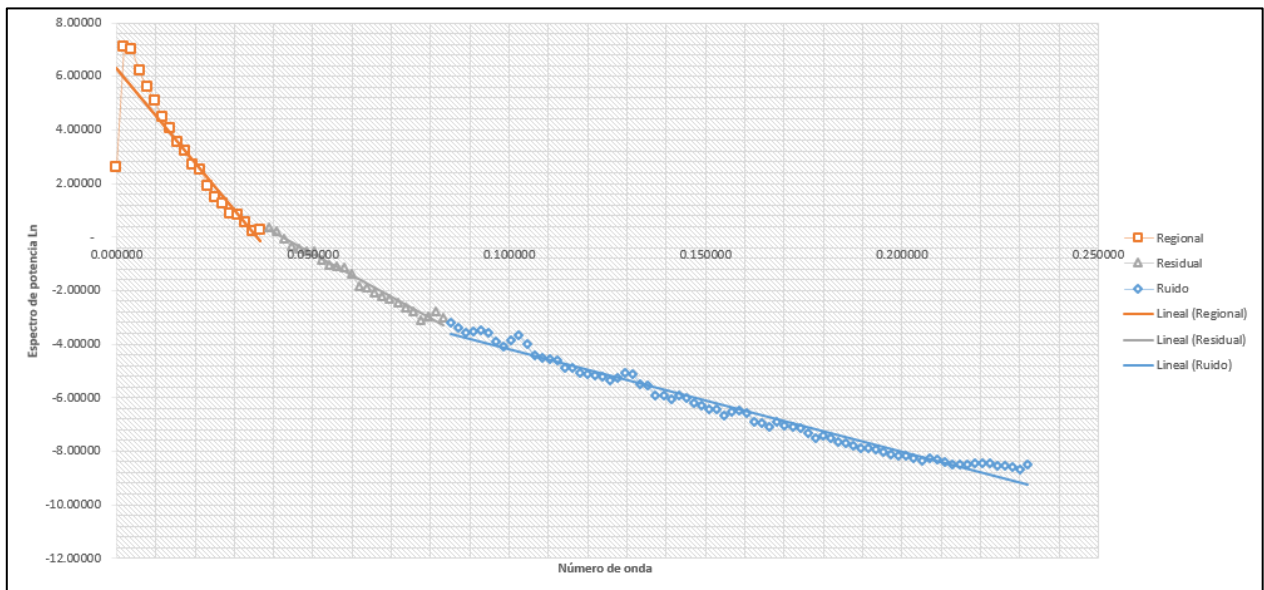


Figura 30. Gráfica de espectro de potencias indicando las tendencias de las pendientes de las anomalías.

Se obtuvieron así, las profundidades de las anomalías correspondientes tomando en cuenta la pendiente de las rectas identificadas en la imagen anterior.

$$Profundidad\ regional = \frac{\frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}}{4\pi} = \frac{\frac{(0.2566 - 7.13260)}{(0.0367 - 0.0019)}}{4\pi} = 15.7142\ km$$

$$Profundidad\ residual = \frac{\frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}}{4\pi} = \frac{\frac{(-2.9986 - 0.3697)}{(0.0831 - 0.0386)}}{4\pi} = 6.0246\ km$$

$$Profundidad\ ruido = \frac{\frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}}{4\pi} = \frac{\frac{(-8.5193 - (3.2091))}{(0.2321 - 0.0851)}}{4\pi} = 2.8743\ km$$

4.2.4 Modelado gravimétrico

En esta etapa de procesamiento, el modelamiento se realizó utilizando la extensión GMSYS dentro del software *Oasis Montaj*® versión 6.4.2, el cual permite simular el comportamiento de estructuras geológicas en profundidad, de tal manera que se ajusten a la respuesta gravimétrica lo más cercano posible (Gomes *et al.*, 2008). Por lo que es funcional para interpretar y modelar el subsuelo indirectamente debido a que las anomalías son calculadas a partir de un cuerpo que compara la anomalía calculada con la observada.

Para comenzar a realizar el modelo geológico a partir de la anomalía de Bouguer Completa, se definió un perfil gravimétrico para crear la geometría y profundidad de las fuentes asociadas a las anomalías observadas. Dicho perfil abarca un territorio cuya longitud aproximada es de 32 000 metros (Figura 31), atravesando zonas de altos valores gravimétricos en contraste con bajos gravimétricos.

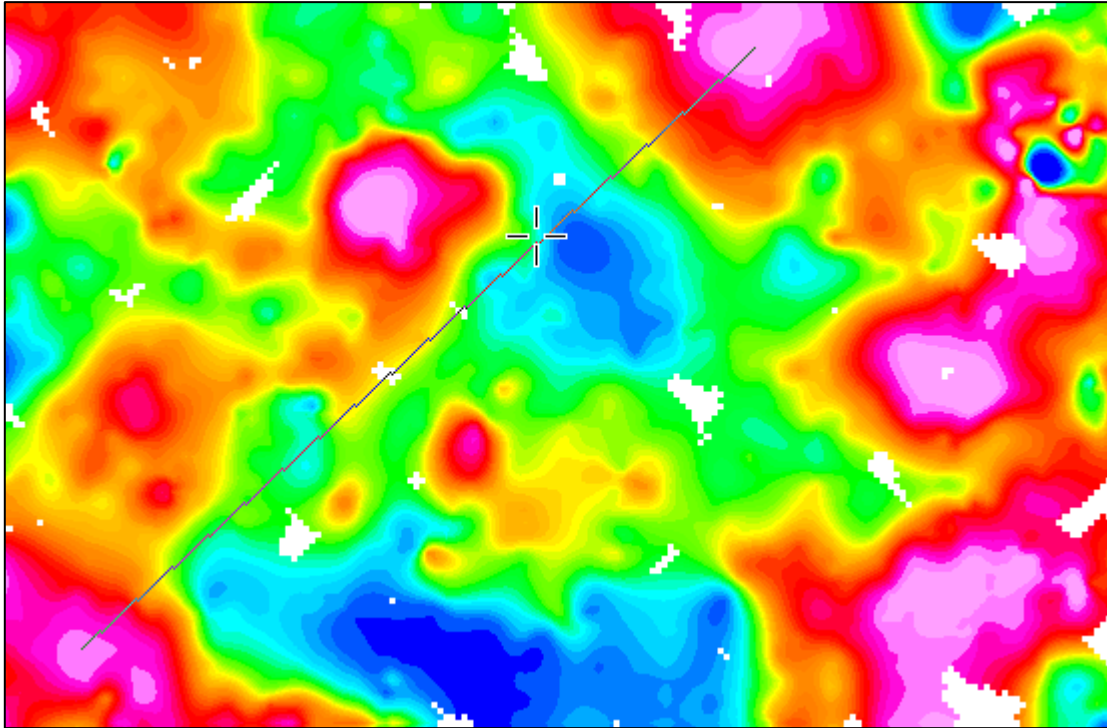


Figura 31. Trazo del perfil gravimétrico empleado para la creación del modelo geológico.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a lo largo del procesamiento de datos se describen a continuación donde se pretende mostrar los productos de mayor interés en cuanto al ámbito geotérmico.

5.1 Descripción e interpretación

5.1.1 Mapa de anomalía de Bouguer Completa

Un mapa de Anomalía de Bouguer Completa sirve para observar y representar las propiedades del contraste de densidades de las rocas; el obtenido de la zona de estudio (Figura 32), en el cual se pueden observar tres dominios gravimétricos principales:

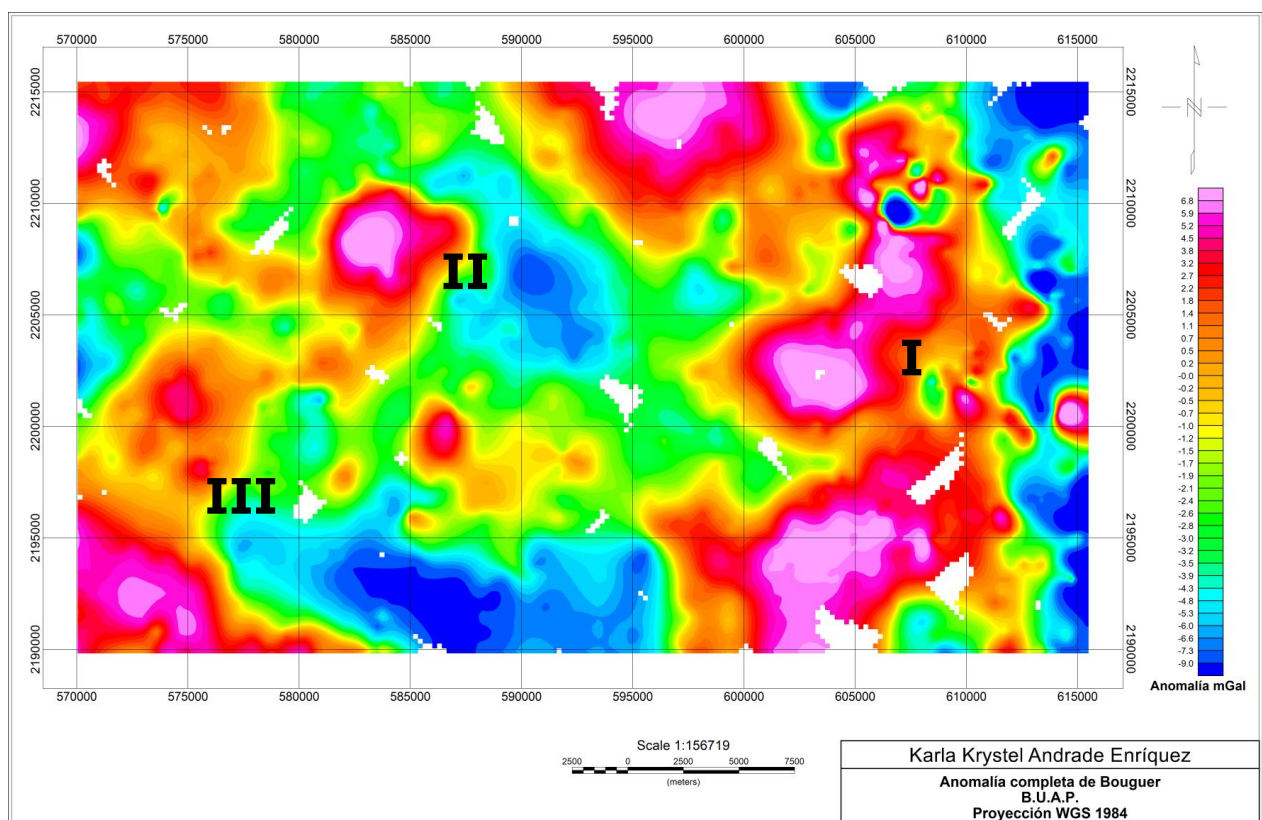


Figura 32. Mapa de ABC señalando los dominios gravimétricos.

1. El primer dominio se encuentra en la zona más prominente y de mayor grado de anomalía gravimétrica se encuentra cerca de los límites Nororiente dentro del área de estudio. Se trata de una anomalía de aspecto diagonal vertical conformada por tres altos gravimétricos, cuyos valores se sitúan entre 6.8 mGal como límite máximo llegando hasta 0.7 mGal como límite mínimo.
2. El segundo dominio de interés se encuentra en la porción Norponiente del territorio. Esta es la zona de mayor importancia debido a que se localiza dentro de la Caldera de Tulancingo e incorpora el pozo EAC-1. Se conforma por dos anomalías opuestas, es decir, una anomalía positiva cuyos valores varían entre 6.8 mGal hasta 0.5 mGal y un decremento en los valores desde -6.6 mGal llegando a -3.9 mGal.
3. Una última zona se identifica como el tercer dominio en la porción Surponiente. Compuesto por dos anomalías opuestas parecidas al caso anterior; una positiva con valores de 5.2 mGal a 0.2 mGal y una negativa de -7.3 mGal hasta -4.3 mGal.

5.1.2 Relación entre mapas resultantes

Así mismo, después de analizar la Anomalía Completa de Bouguer, se compararon la anomalía regional con el resultado del filtro de continuación ascendente a 1900. Esto con el propósito de elegir la imagen más adecuada y precisa para interpretar el área.

Como se observa en la figura 33, ambos mapas muestran la misma tendencia y coinciden con la ubicación de los dominios gravimétricos mencionados anteriormente, sin embargo, en la imagen de anomalía regional obtenida con el filtro Butterworth se aprecian las regiones anómalas más nítidas y suavizadas en comparación con la otra.

Debido a esto, para describir los resultados, se ha elegido el mapa de anomalía regional mediante la aplicación del filtro Butterworth, el cual ha sido la base para identificar los lineamientos regionales dentro del Complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco.

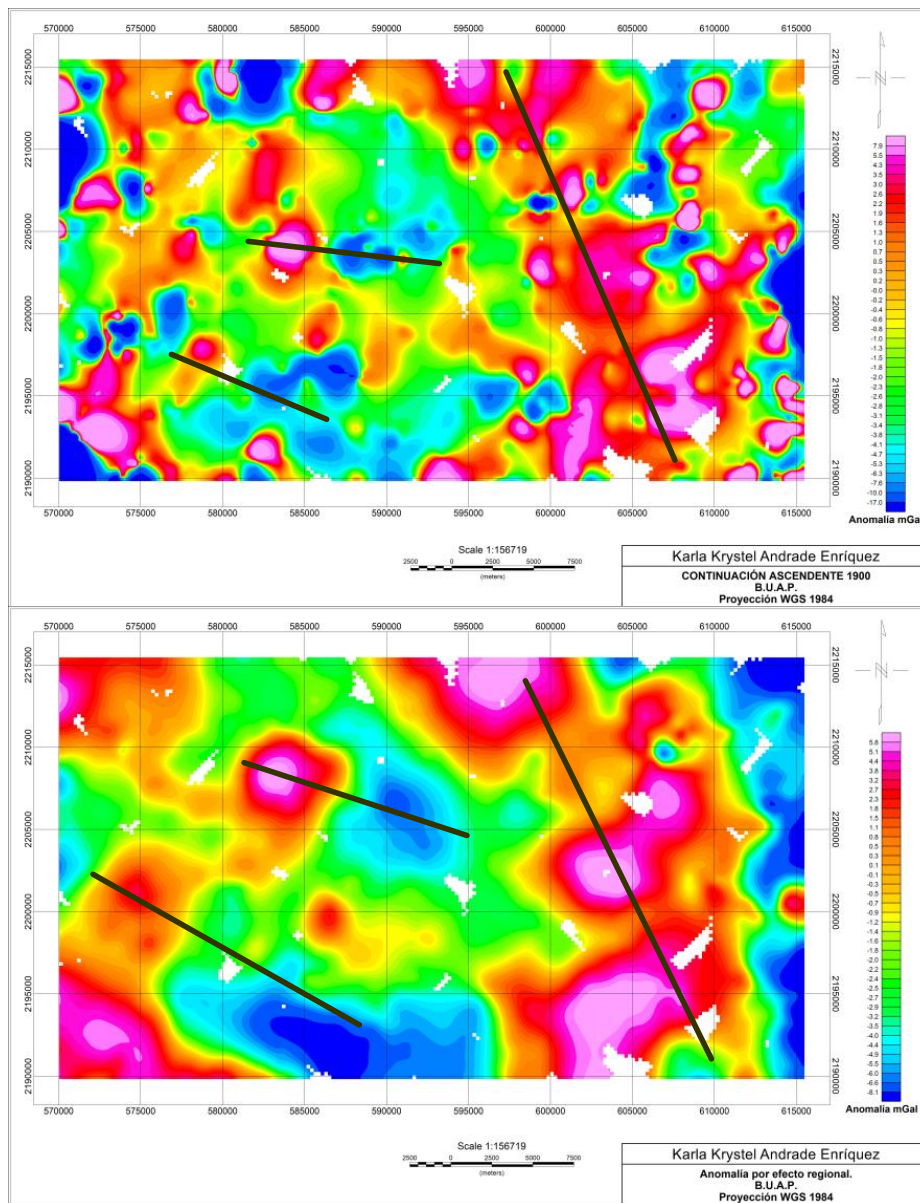


Figura 33. Comparación entre la anomalía regional mediante el empleo del filtro Butterworth y el filtro de continuación ascendente a 1900.

Así mismo, se hizo una comparación entre la primera y segunda derivada efectuada sobre la anomalía de Bouguer. Ambas ayudan a indicar fallas y estructuras superficiales, sin embargo, la primera derivada muestra menor ruido en la imagen, por lo que se ha elegido como adecuada para describir cuerpos superficiales.

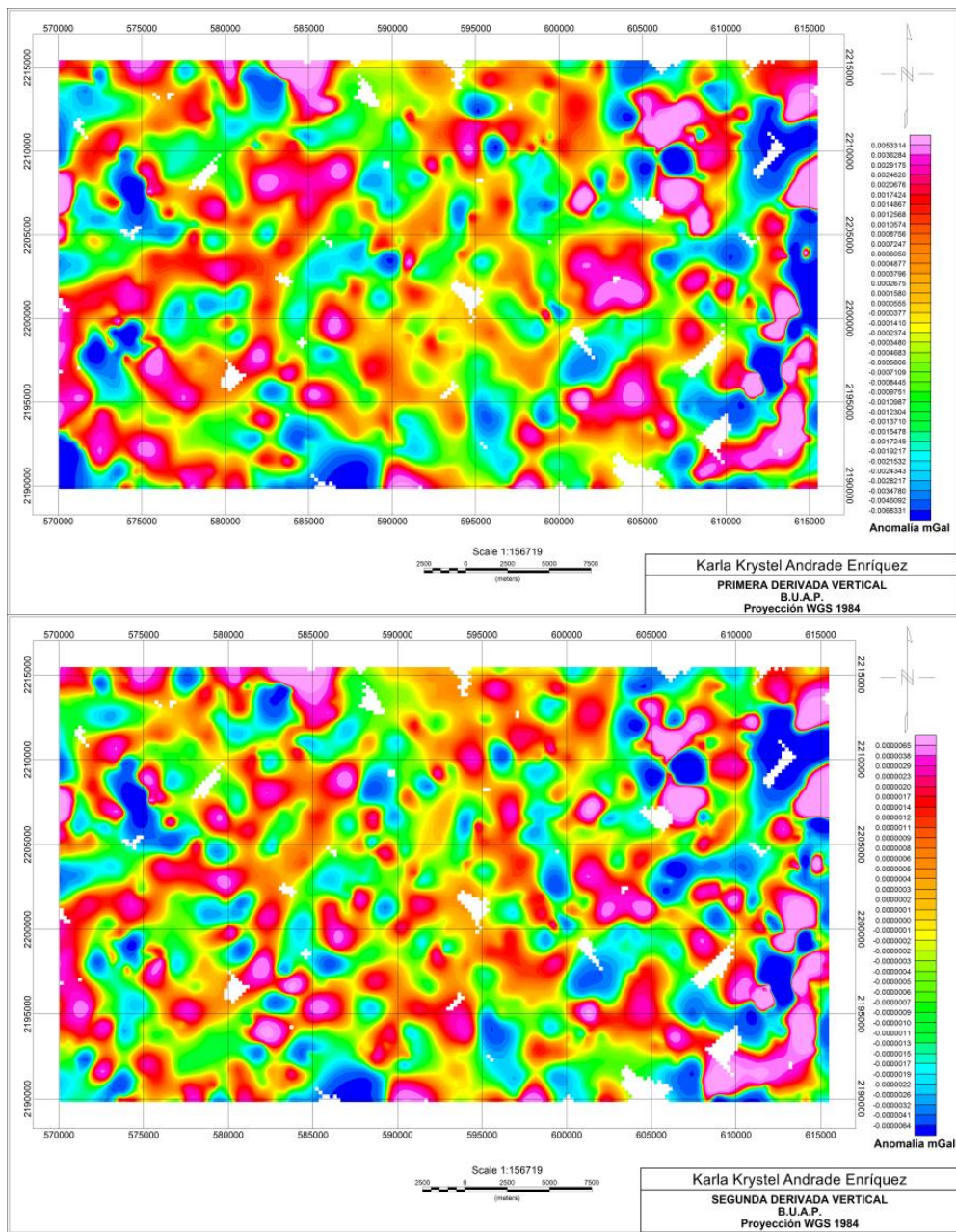


Figura 34. Comparación entre primera y segunda derivada vertical.

5.1.3 Perfiles gravimétricos.

Después de analizar los diferentes mapas obtenidos, se han comparado las diferentes tendencias encontradas dentro del mapa de Anomalía de Bouguer Completa y la geología superficial de la zona. Por lo que, se han creado cuatro distintos perfiles con la finalidad de identificar con mayor facilidad las anomalías observadas más notables.

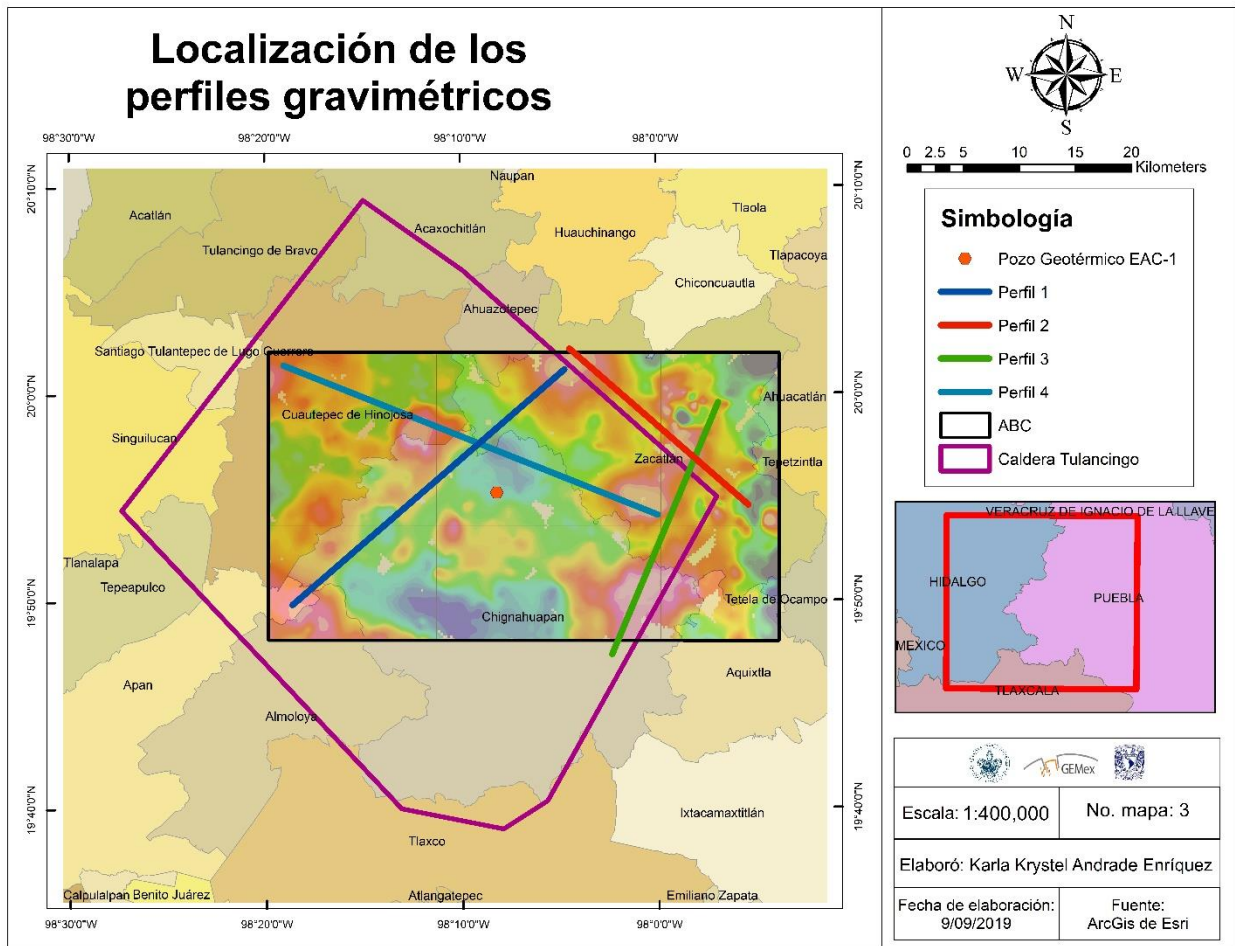


Figura 35. Mapa de localización de perfiles gravimétricos. Elaboración propia.

5.1.3.1 Perfil 1

Se encuentra el perfil 1 de 32 000 metros de longitud comenzando en la porción SW y terminando en la porción NE. Cruza las unidades geológicas:

- Andesita Apan
- Depósitos Aluviales

- Riolita Precaldera
- Basalto Potrerillos
- Dacitas Cruz Colorada
- Ignimbrita Piedras Encimadas

5.1.3.2 Perfil 2

De 35 000 metros de longitud inicia en la porción NW y finaliza en la porción SE y atraviesa las formaciones geológicas:

- Formación Atotonilco
- Basalto la Paila
- Riolita Acoculco
- Riolita Precaldera
- Dacita Cruz Colorada
- Ignimbrita Piedras Encimadas

5.1.3.3 Perfiles 3 y 4

Dentro de la zona I localizada en la porción NorEste, se ubican los perfiles 3 y 4, que a su vez, presentan longitudes de 24 100 y 21 000 metros correspondientemente, además que cruzan las formaciones geológicas:

- Formación Atotonilco
- Ignimbrita Piedras Encimadas
- Riolita Precaldera

Además de asociarse con dichas estructuras, las anomalías de la zona I, coinciden con los lineamientos regionales de la Caldera de Tulancingo.

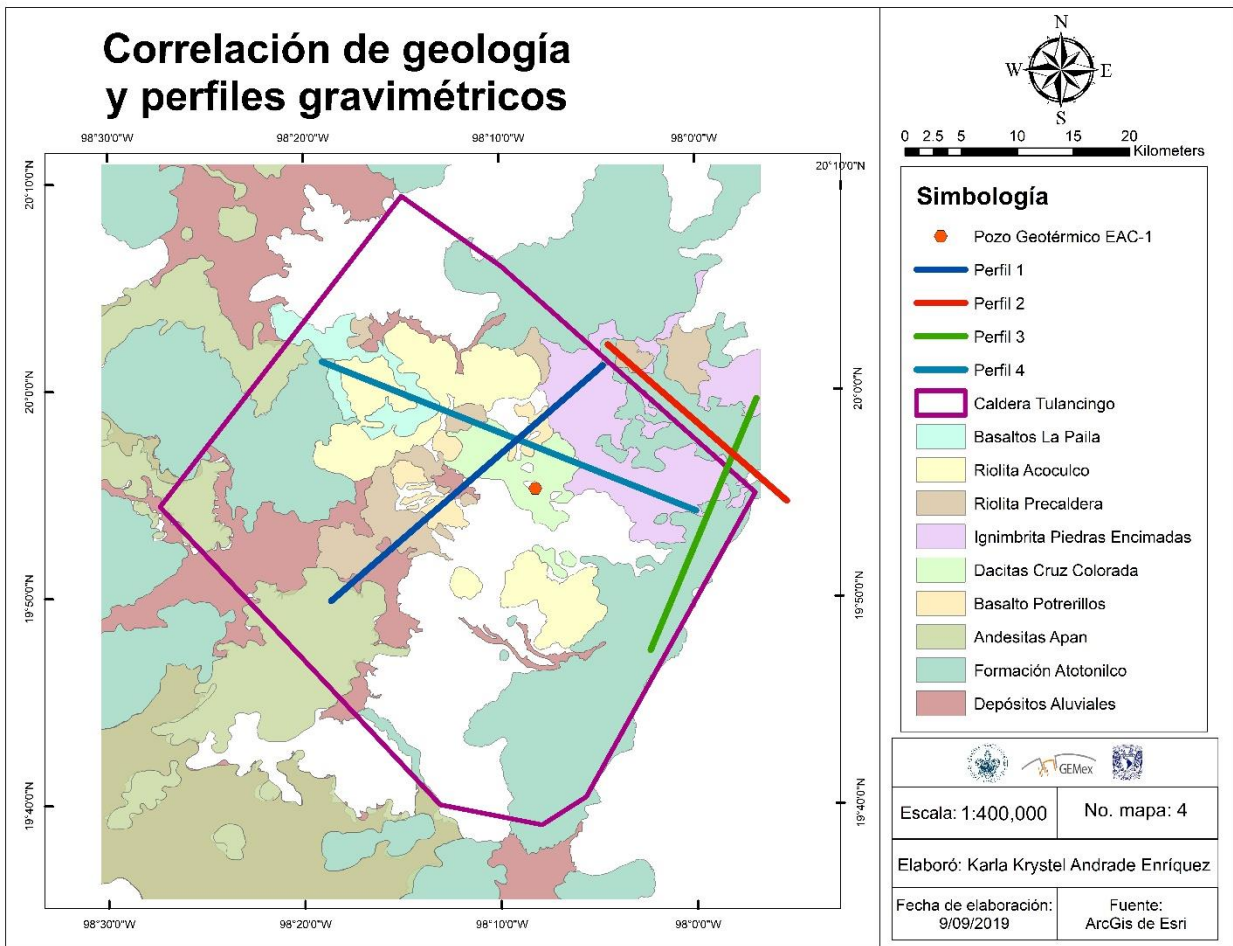


Figura 36. Mapa de correlación de los perfiles gravimétricos con las unidades litológicas que atraviesan.

5.1.4 Modelado geológico

El modelado fue creado a partir del ajuste de la curva de gravedad calculada con la gravedad observada. Para obtener el ajuste de los materiales que conforman la zona del perfil elegido (Figura 24), se tomaron valores de densidad consultados en Telford *et al* (1990), García-Palomo (2018), Avendaño-Cortés (2017), Sánchez-Ramírez (2012) y Torres-Zamudio (2002). Así entonces, se modelaron 13 capas con densidades diversas como se detalla en la Tabla 3.

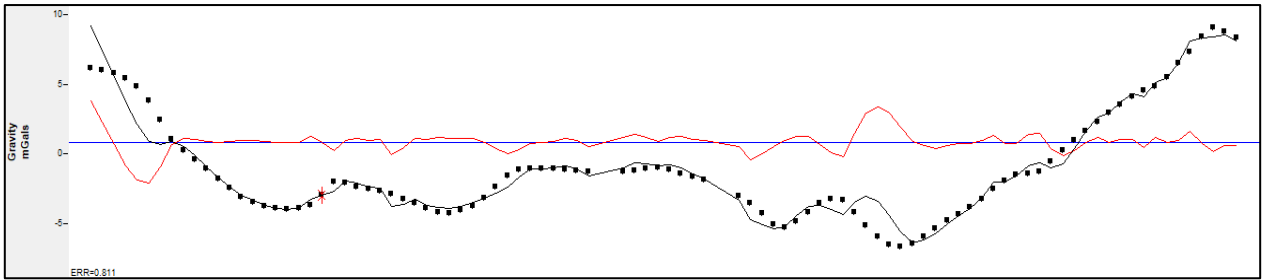


Figura 37. Ajuste de la curva de gravedad observada con gravedad real.

Tabla 3. Capas del modelado geológico con su respectivo valor de densidad.

CAPA	DENSIDAD g/cm³
Manto	3.4
Corteza inferior	3.0
Corteza media	2.8
Corteza superior	2.7
Andesita	2.61 - 2.19
Andesita compactada	2.25
Dacita	2.3
Ignimbrita	2.341
Riolita	2.52
Basaltos	2.8 - 2.72
Granito	2.761
Caliza	2.72
Roca volcánica compactada	2.45

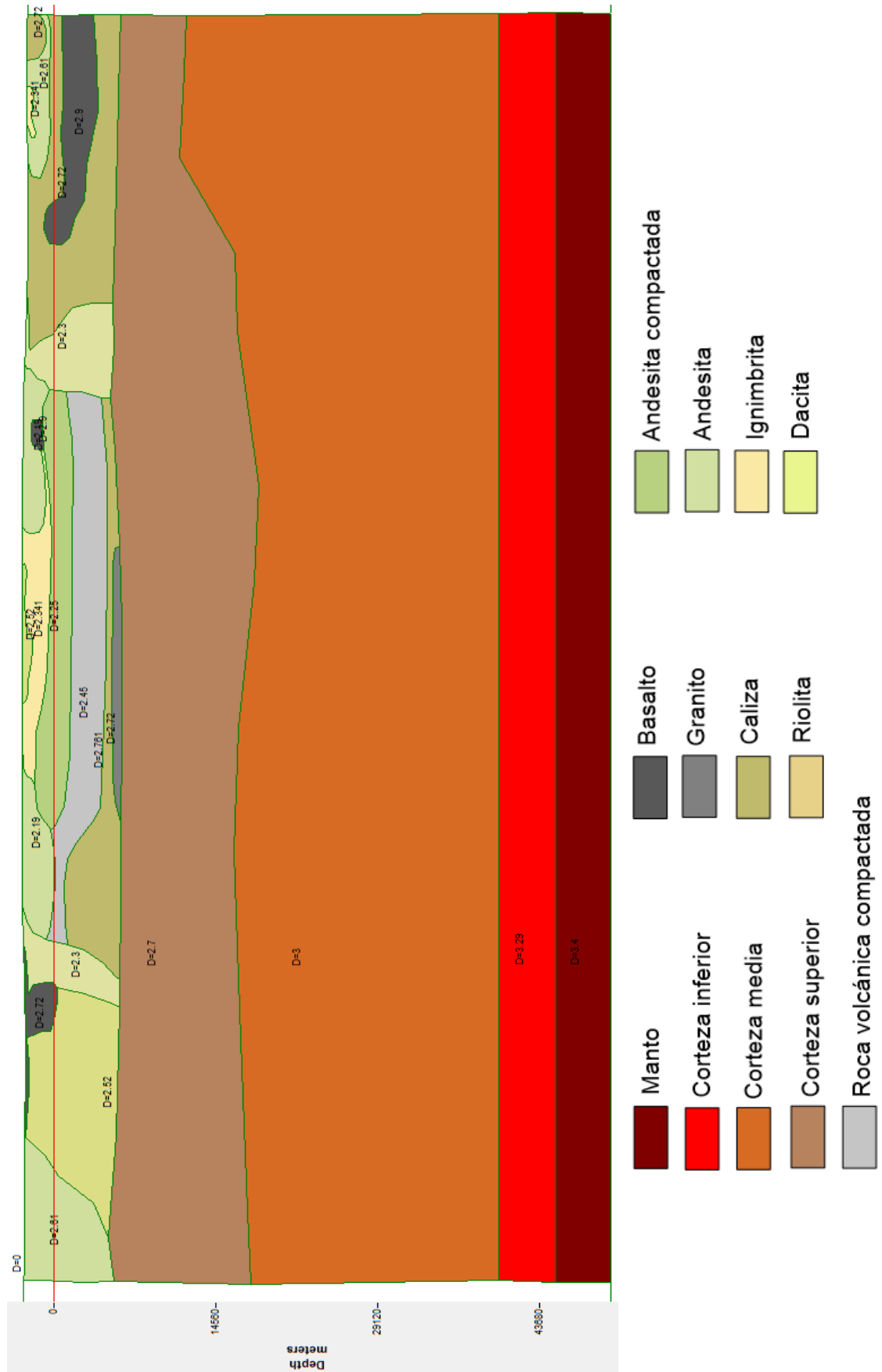


Figura 38. Modelado geológico del perfil 1.

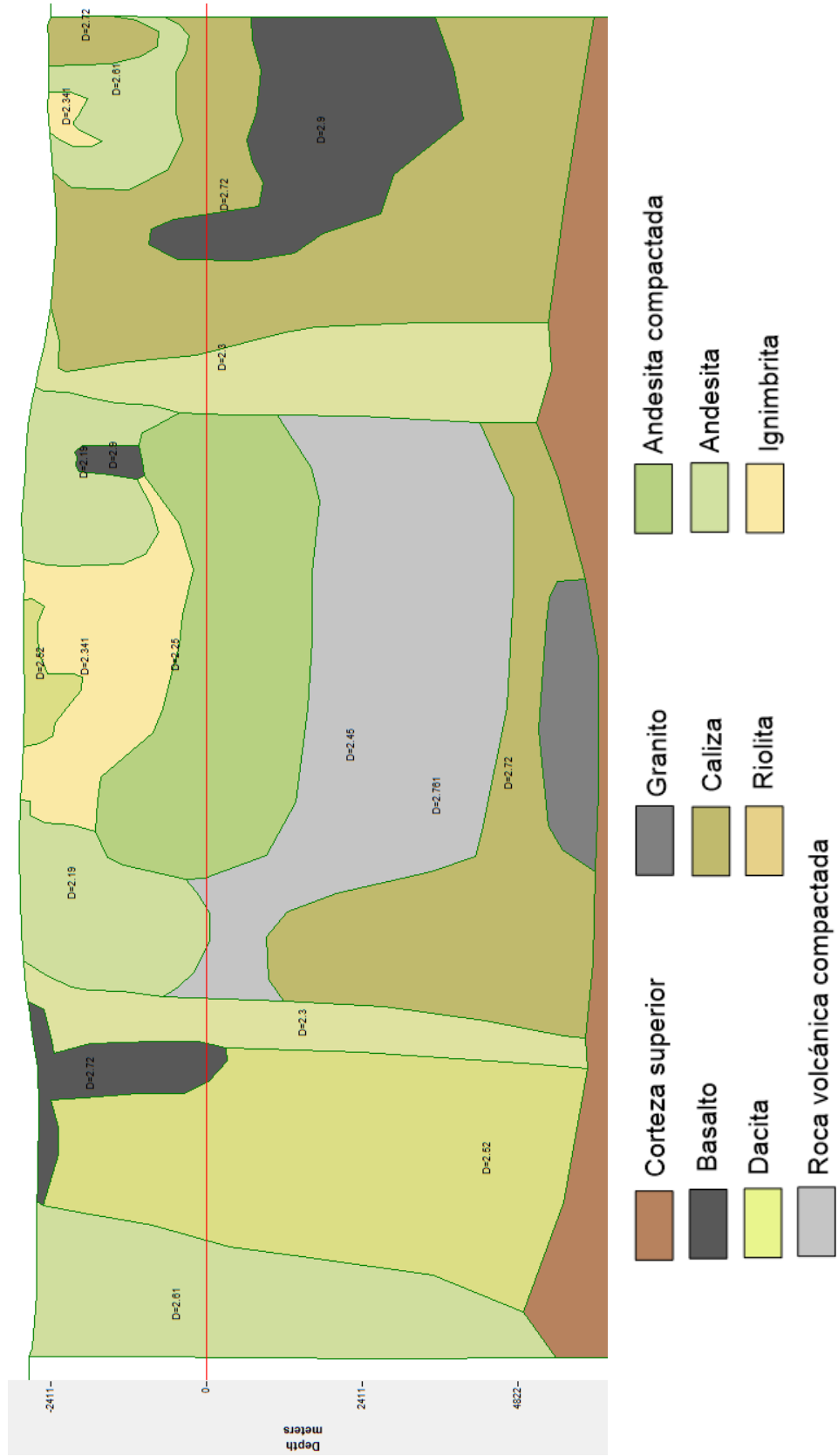


Figura 39. Acercamiento a la zona superficial del modelo geológico del perfil 1.

Como se detalla en el capítulo anterior, el trazo del perfil 1 es transversal y se encuentra en una orientación SW-NE cuya longitud es de 32 kilómetros. Se modelaron 13 capas con un error de ajuste entre curvas de 0.811.

En orden ascendente, la primera capa corresponde al manto terrestre y tiene una densidad de 3.4 g/cm^3 , se localiza a una profundidad de 52 km cuyo espesor fue de 5 km. Una segunda capa corresponde a la corteza inferior de la Tierra con una densidad de 3.0 g/cm^3 y un espesor de 5 km, teniendo su límite superior a una profundidad de 42 km. La tercera capa se refiere a la corteza media con un valor de densidad de 2.8 g/cm^3 , esta capa es la más gruesa en cuanto a espesor, donde el margen superior presenta variaciones de 17 a 12 kilómetros de profundidad. La cuarta capa pertenece a la corteza superior y posee una densidad de 2.7 g/cm^3 con un espesor promedio de 7 km.

A partir de la capa de anomalía regional, se identifican las estructuras que se encuentran distribuidas más cercanas a la superficie terrestre, por lo que, cuentan con valores de profundidad y espesor variados. La quinta capa correspondería a granito situándose a una profundidad de 8 km presentando un espesor de 1 km así como un valor de densidad de 2.761 g/cm^3 . Posteriormente, una capa de caliza con densidad de 2.72 g/cm^3 , roca volcánica fracturada de 2.45 g/cm^3 de densidad, andesita compactada cuya densidad es de 2.25 g/cm^3 , seguido de andesitas superficiales con valores de densidad de 2.19 g/cm^3 e ignimbritas de 2.341 g/cm^3 , así como una capa de riolita de 2.52 g/cm^3 ; todas estas capas mencionadas siguiendo un orden ascendente, caracterizándose por estar rodeadas de dos 'paredes' de sistemas de domos dacíticos en sus extremos laterales cuyo valor de densidad asignado fue de 2.3 g/cm^3 .

Tomando en cuenta ambos 'límites' de los domos de dacita; en la zona lateral izquierda, es decir, en la porción SW del perfil, se sitúan una capa de andesita de 2.61 g/cm^3 , una capa de riolita de 2.52 g/cm^3 y una capa de basalto de densidad 2.72 g/cm^3 . En cambio, en la zona lateral derecha, es decir, la porción NE del perfil, se localiza una capa de relleno de caliza de 2.7 g/cm^3 , una acumulación de basalto de 2.9 g/cm^3 , así como andesita de 2.61 g/cm^3 e ignimbrita de 2.341 g/cm^3 .

Por otra parte, se puede asociar la caliza ubicada en la porción NE y el material riolítico de la porción SW con las anomalías positivas del mapa de Anomalía de Bouguer Completa, que a su vez, se relaciona con los bordes de la Caldera de Tulancingo. En cambio, la zona central con valores negativos de -1.5 a -3.5 mGal (tonalidad verde) se asocia a materiales de depósito y por lo tanto, de relleno de la Caldera de Tulancingo, correspondiendo a los materiales que se encuentran encerrados entre los domos dacíticos mencionados previamente.

Finalmente, tomando en cuenta la información descrita previamente, se considera que los límites de la Caldera Tulancingo son de forma poligonal rectangular, sin embargo, de menor dimensión a la propuesta por Aguirre-Díaz (2018) que posee un perímetro de 157 km y área de 1642 km². Por lo tanto, la dimensión de la Caldera Tulancingo propuesta (Figura 40) tiene un perímetro de 121 km y un área de 966 km².

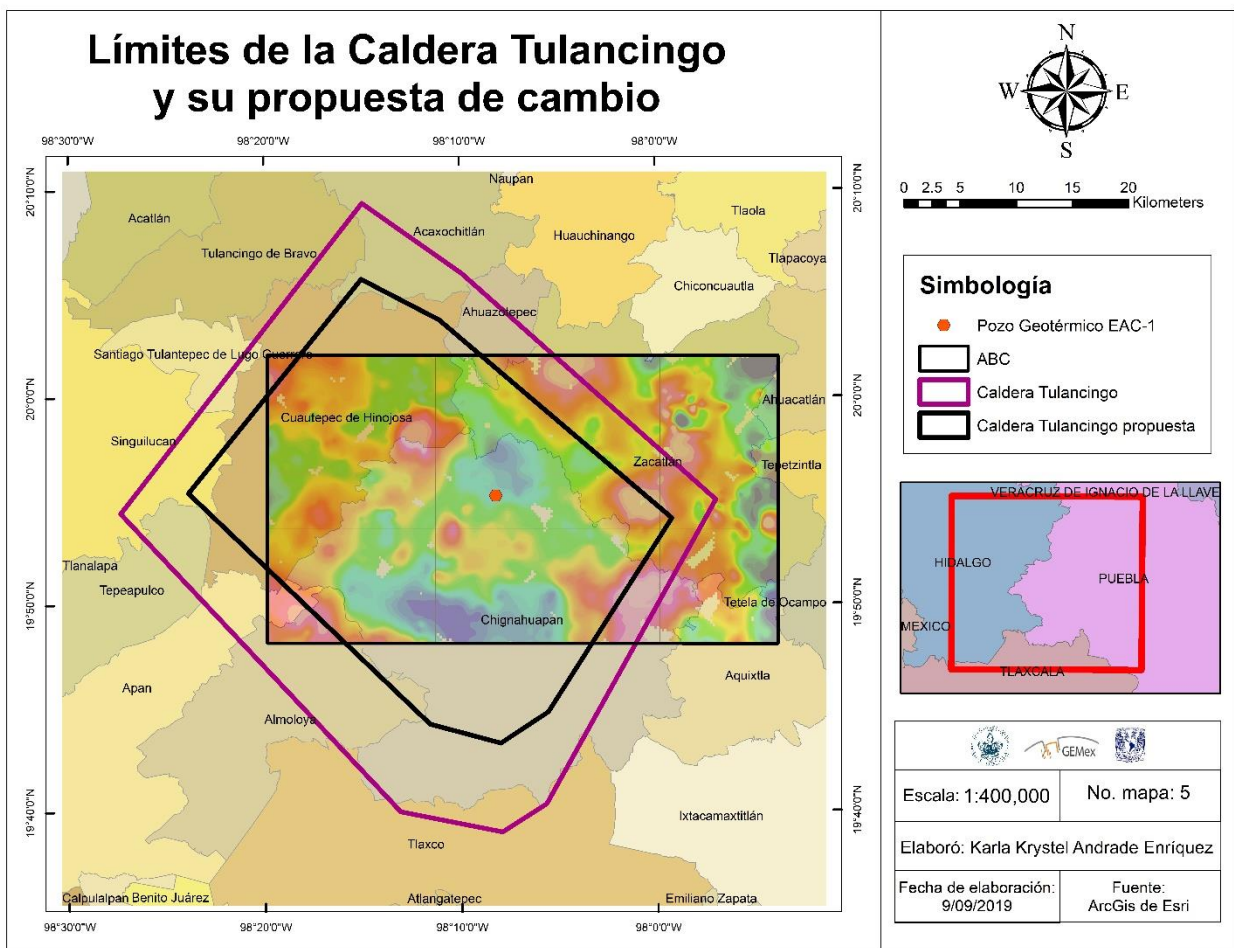


Figura 40. . Propuesta de bordes para la Caldera de Tulancingo. En color púrpura se identifica la forma actual, en color negro la propuesta tomando en cuenta los sectores de altos gravimétricos mostrados en el mapa de Anomalía de Bouguer Completa inferior.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El desarrollo de esta tesis ha sido fundamental para aportar información que amplíe la comprensión del Complejo Volcánico Tulancingo-Acozulco (CVTA), por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

- El mapa de Anomalía de Bouguer Completa muestra la existencia de tres dominios principales donde las anomalías positivas pertenecientes al primer dominio gravimétrico son de aspecto diagonal vertical conformado por tres sectores de altos magnéticos, de los cuales, sus valores se sitúan entre 6.8 mGal como límite máximo llegando hasta 0.7 mGal como límite mínimo. El segundo dominio se conforma por dos anomalías opuestas, es decir, una anomalía positiva cuyos valores varían entre 6.8 mGal hasta 0.5 mGal y un decremento en los valores desde -6.6 mGal llegando a -3.9 mGal. Finalmente el tercer dominio compuesto por dos anomalías opuestas parecidas al caso anterior; una positiva con valores de 5.2 mGal a 0.2 mGal y una negativa de -7.3 mGal hasta -4.3 mGal.
- La separación de las fuentes regional y residual se realizó mediante técnicas de análisis espectral de frecuencia donde se determinaron las profundidades de estas fuentes 15 y 6 kilómetros correspondientemente.
- Para la elección del mapa óptimo de la anomalía regional, se elaboró una comparación entre la imagen del filtro Butterworth y el de continuación ascendente, que a pesar de que ambos tienen la misma funcionalidad, se eligió el mapa de anomalía regional por medio del filtro Butterworth para la identificación de lineamientos regionales debido a la suavidad y claridad de su visualización.
- El análisis del campo gravimétrico ha demostrado ser eficaz para determinar las estructuras geológicas a profundidad que conforman la caldera de Tulancingo, la principal dentro del CVTA. Los resultados muestran que la presencia de las anomalías positivas de la porción Este y Sur Oeste pertenecientes al mapa de Anomalía de Bouguer Completa coinciden con los límites de la Caldera Tulancingo

poligonal rectangular, los lineamientos regionales de la zona, además de asociarse a la estructura de la formación Atotonilco.

- De acuerdo al mapa geológico generado, se identifican a las anomalías negativas (-1.5 a -3.5 mGal) del mapa de Anomalía de Bouguer Completa como los materiales de relleno, y de acumulación de los eventos de colapso de la Caldera Tulancingo, misma zona que a su vez, se encuentra rodeada por las paredes laterales de domos de dacita.
- La estructura de la Caldera de Tulancingo de acuerdo con el modelo geológico propuesto, es de tipo *graben*, es decir, estructuras explosivas volcano-tectónicas de colapso a partir de los cuales se producen erupciones formadoras de ignimbritas de gran volumen.
- El complejo geotérmico que está localizado en las inmediaciones de la caldera Tulancingo, es una depresión tectónica rellena por rocas volcánicas y rodeada de domos de composición dacítica y en la cual se tienen datos de temperaturas a profundidad de 300°C, sin embargo la aparente permeabilidad es reducida.
- Sabiendo que los límites geométricos de la caldera de Tulancingo son más amplios a los de estudios previos y tomando en consideración las imágenes de la Anomalía de Bouguer Completa así como la elevación digital de la zona, se propone que la forma poligonal rectangular sea de menor dimensión como se muestra previamente.

6.2 Recomendaciones

- Se propone ampliar la zona de investigación, para tener una mejor vista del territorio aledaño así como analizar la respuesta geofísica del área.
- Finalmente, realizar estudios Magnetotelúrico sobre la zona, aumentaría la certidumbre de esta investigación, aportando información estructural del subsuelo con mejor precisión.

Referencias.

1. Acevedo Granados, R.J., Elizalde Guerrero, J.D., Méndez Sandoval, I.B., Rivera Méndez, M., Ticas Lara, J.A. (2015). *Caracterización de estructuras geológicas de un área geotérmica mediante la aplicación integrada de las técnicas de mapeo térmico, magnetometría y gravimetría*. Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Unidad de Posgrados.
2. Aguirre-Díaz, G. J., López Hernández, A., Jasso-Torres, K.A., Coutiño-Taboada, M.E., Garay-Delgado, J.G. (2018). *Geología de la caldera de Tulancingo, Hidalgo-Puebla: Versión actualizada*. American Geophysical Union Fall Annual Meeting 2018.
3. Aguirre-Díaz, G.J. (2003). *Características generales del Cinturón Volcánico Mexicano. Una revisión por sectores*. Unión Geofísica Mexicana, GEOS 23, 118-119.
4. Aguirre-Díaz, G.J. (2008). *Caldera types and collapse styles*. American Geophysical Union Fall Annual Meeting 2008.
5. Aguirre-Díaz, G.J., Ferrari, L., Nelson, S.A., Carrasco-Núñez, G., López-Martínez, M., Urrutia-Fucugauchi, J. (1998). *El Cinturón Volcánico Mexicano: Un Nuevo Proyecto Multidisciplinario*. Unión Geofísica Mexicana, v. 18, No. 2, p. 131-138.
6. Aguirre-Díaz, G.J., Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Nieto-Obregón, J., Gutiérrez-Palomares, I. (2008). *Ignimbrite Flare-up and graben-calderas of the Sierra Madre Occidental, Mexico*: in J. Gottsmann, and J. Martí, eds., "Caldera Volcanism: Analysis, Modelling and Response", *Developments in Volcanology 10*, Elsevier, Amsterdam, pp 143-180.
7. Avendaño-Cortes, J. (2017). *Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera de Tulancingo-Acoculco, Puebla*. Tesis de maestría del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California.
8. Blakely, R. (1988). *Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada*. *Journal of Geophysical Research* 93, pp 11817-11832.

9. Chakraborty, K. y Agarwal, B. (1992). *Mapping of crustal discontinuities by wavelength filtering of the gravity field*. Geophysical Prospecting, 41, pp. 801-822
10. Demant, A. (1978). *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología Revista 2, pp 172-187.
11. Demant, A. (1982). *Interpretación geodinámica del Eje Neovolcánico Transmexicano*. Revista Instituto de Geología, UNAM, 5, pp 217-222.
12. García-Palomo, A., Macías, J.L., Tolson, G., Valdez, G., Mora, J.C. (2002). *Volcanic stratigraphy and geologic evolution of the Apan region, east-central sector of the TransMexican volcanic Belt*. Journal of Vulcanology and Geothermal Research 349. Pp 240-255.
13. Grant, F. S. y West, G.F. (1965). *Interpretation Theory in Applied Geophysics (International Series in the Earth Sciences)*. Mc. Graw Hill.
14. Guerrero-Martínez, F.J., Prol-Ledesma, R. M., Granados-Pastrana, E. J., Carrillo-De La Cruz, J- L., González-Díaz, A., González-Romo, I.A. (2019). *Three-Dimensional Temperature Simulations of the Acoculco Caldera Complex, Puebla, Mexico*. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
15. Gutiérrez Gama, J. (2016). *Procesos geológicos del campo geotérmico Acoculco, Puebla, México*. Tlamati Sabiduria v 7.
16. Henderson, R.G. (1970). *On the validity of the use of upward continuation integral for total magnetic intensity data*. Geophysics, 35, 916-919.
17. Henderson, R.G., Zietz, I. (1949). *The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields*. Geophysics, 14, 508-516.
18. INEGI. (2015). *Guía metodológica de la red geodésica gravimétrica*. INEGI
19. Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration (3° ed)*. Blackwell Science.
20. Lermo, J., Antayhua, Y., Bernal, I., Venegas, S. y Arredondo, J. (2009). *Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acoculco, Pue., México*. Geotermia, vl 22 no. 1 pp 40-58
21. Lipman, P.W. (2000). *Calderas: in H. Sigurdsson*. Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press, p. 643-662.

22. López-Hernández, A. (2009). *Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acocolco y su sistema hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México*. Tesis doctoral de la Universidad Nacional Autónoma de México.
23. López-Hernández, A., Castillo-Hernández, D. (1997). *Exploratory drilling at Acocolco, Puebla, Mexico: A hydrothermal system with only nonthermal manifestations*. Geothermal Resources Council Transactions 21, 429-433.
24. López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., Quijano-León, J.L. (2009). *Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acocolco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies*. Geothermics 38, pp 279-293.
25. Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press.
26. Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V.J., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Pearson, W.C., Peirce, J.W., Phillips, J.D. and Ruder, M.E. (2005). *Historical development of the gravity method in exploration*. Geophysics v 70 no.6. pp 63-89.
27. Pantoja, A., Gomez, J., Caballero, J. (2004). *Los sistemas hidrotermales y el origen de la vida*.
28. Sanchez Ramirez, M. (2012). *Interpretación de datos gravimétricos y magnetométricos en las inmediaciones del volcán Popocatepetl*. Tesis de licenciatura de la Universidad Nacional Autónoma de México.
29. Santoyo, E., Barragán-Reyes, R.M, Torres-Rodríguez, V. (1993). *Estructura de los sistemas geotérmicos*. Coordinación de la investigación científica UNAM.
30. Santoyo, E., Barragán-Reyes, R.M. (2010). *Energía geotérmica*.
31. Scandone, R., (1990). *Chaotic collapse calderas*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 42; pp. 285-308.
32. Segerstrom, K. (1961). *Geología del sureste del estado de Hidalgo y noreste del estado de México*. Boletín de la Asoc. Mex. Geol. Mex. 13, 147-168.
33. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
34. Torres Zamudio, A. (2002). *Estructura de la zona de subducción de Oaxaca a partir de datos gravimétricos*. Tesis de licenciatura del Instituto Politécnico Nacional.

35. Torres, V., Arellano, V., Barragán, R. M., González, E., Herrera, J.J., Santoyo, E., y Venegas, S. (1993). *Geotermia en México*. Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica. UNAM, pp 161
36. Viggiano-Guerra, J. C., Flores-Armenta, M y Ramírez-Silva, G. (2011). *Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones*. *Geotermia* 24, pp.14-24.
37. Villa-Caro, R. (2016). *El datum, el geoide, el elipsoide y la cartografía*. *Revista general de marina*.
38. Walker, G., (1984). *Downsag calderas, ring faults, caldera sizes, and incremental caldera growth*. *Journal of Geophysical Research* 89B; pp. 8407-8416.