



**GEOCIENCIAS
APLICADAS
IPICYT**



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

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**“Estudio geofísico de la porción sur del campo
volcánico Los Encinos a través de métodos
potenciales, espectrometría de rayos gamma y
concentración de radón en subsuelo”**

Tesis que presenta

Mónica Lizzeth Sosa Rendón

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

Director (Codirectores) de la Tesis:

Dr. Vsevolod Yutsis

San Luis Potosí, S.L.P., AGOSTO DE 2023



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Estudio geofísico de la porción sur del campo volcánico Los Encinos a través de métodos potenciales, espectrometría de rayos gamma y concentración de radón en subsuelo**” presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Mónica Lizzeth Sosa Rendón** y aprobada el **día de mes de año** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Vsevolod Yutxis

Director de la tesis

Dr. José Alfredo Ramos Leal

Miembro del Comité Tutorial

Dr. Pablo Dávila Harris

Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Geofísica de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Vsevolod Yutsis.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**1079935**) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

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

A mis padres Blanca y Jorge, quienes me enseñaron que la responsabilidad y la lucha constante por lo sueños nos llevan a la realización personal y profesional.

A mi hermano Esteban, quien me compartió su conocimiento para poder lograr metas académicas, por su amor y compañía en este viaje.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi asesor el Dr. Vsevolod Yutsis por brindarme su tiempo y apoyo en este proyecto, por su motivación constante ante cualquier dificultad y sobre todo por la calidad humana la cual siempre será merecedora de mi respeto y admiración.

A mi comité tutorial, el Dr. José Alfredo Ramos y al Dr. Pablo Dávila por su apoyo académico, tiempo y comentarios constructivos en este proceso de estudiante en el IPICT.

De manera importante agradezco el apoyo otorgado por parte de CONACYT en el proyecto titulado: “Estudio geofísico de la porción sur del campo volcánico Los Encinos a través de métodos potenciales, espectrometría de rayos gamma y concentración de radón en subsuelo”.

Agradezco al IPICT por haberme otorgado no solo la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en esta gran institución sino también haberme concedido una beca la cual me permitió realizar mis trabajos de campo y con esto culminar mi proceso con éxito.

Doy gracias a los Doctores de la División en Geociencias Aplicadas quienes me brindaron apoyo durante mi maestría y por su enseñanza. Agradezco también Dr. Sanjeet Kumar Verma, Jefe de la División, al M. en C. David Torres Gaytán, técnico del laboratorio de geofísica, por brindarme su apoyo en el manejo de equipos geofísicos, por facilitarme datos para mi proyecto y el apoyo con softwares. Al Dr. Randall Guevara por su apoyo en la última línea recta de este gran proyecto, gracias a su profesionalismo y sabiduría esta tesis fue una realidad.

Quiero agradecer especialmente a la brigada que me acompañó a la recolección de datos de campo en la zona sur de Los Encinos, Miguel, Juan, Irving, Andrés, Rodrigo y Jaime, sin ustedes todo esto no hubiera sido posible, gracias por pasar tres días de trabajos forzados, por su empeño, apoyo y compartir sus conocimientos conmigo, fuimos un gran equipo.

A mis amigas y compañeras de hogar, Melissa, Carolina y Paola, por ser un excelente apoyo académico y moral. Porque las risas, los viajes y las aventuras nunca faltaron, mi casa siempre será su casa.

A mis compañeros de generación, en especial Dafne y Federico por brindarme su amistad, por ser unos excelentes anfitriones en esta su ciudad y darme su apoyo incondicional en este tiempo de foránea.

Por último, a mi novio Cristian Adrián, que estuvo desde el primer momento, siempre apoyándome y sosteniéndome en los momentos más difíciles, te amo vida.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	i
Créditos Institucionales	ii
Dedicatoria iv	
Agradecimientos	v
Resumen xiii	
Abstract xiv	
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.	1
1.1 INTRODUCCIÓN.	1
1.2 HIPÓTESIS.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 UBICACIÓN.....	3
1.5 ANTECEDENTES.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO GEOLOGICO.	5
2.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	5
2.1.1 MARCO ESTRUCTURAL.	5
2.1.2 CAMPO VOLCANICO LOS ENCINOS.	6
2.2 GEOLOGIA LOCAL.	7
2.2.1 MESOZOICO.....	7
2.2.2 CENOZOICO.....	9
2.2.3 CUATERNARIO.	10
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.	12
3.1 MÉTODOS POTENCIALES.....	12
3.1.1 GRAVIMETRÍA.....	13
3.2.1 MAGNETOMETRÍA.....	16
3.2 METODOS RADIOMÉTRICOS.....	19
3.2.1 RADIOACTIVIDAD.	19
3.2.2 RADIACIONES.....	19
3.2.3 RADIOACTIVIDAD EN LAS ROCAS.	20
3.2.4 DESINTEGRACIÓN RADIATIVA.	22
3.2.5 ESPECTRO DE RAYOS GAMMA NATURALES.	23

3.2.6	INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.	23
3.2.7	MEDICIÓN DE RADIATIVIDAD.	24
3.3.	MÉTODO DE RADÓN.	24
3.3.1	PRINCIPIOS DE MÉTODO.	24
3.3.2.	GEOLOGÍA DE RADÓN.	25
3.3.3	MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN SUELO.	26
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.		27
4.1	MAGNETOMETRÍA.	27
4.1.1	ADQUISICIÓN DE DATOS.	27
4.1.2	PROCESAMIENTO DE DATOS.	28
4.2	GRAVIMETRÍA.	29
4.2.1	ADQUISICIÓN DE DATOS.	29
4.2.2	PROCESAMIENTO DE DATOS.	30
4.3	RADIOMETRÍA.	31
4.3.1	ADQUISICIÓN DE DATOS.	31
4.3.2	PROCESAMIENTO DE DATOS.	31
4.4.	RADÓN.	32
4.4.1	ADQUISICIÓN DE DATOS.	32
4.4.2	PROCESAMIENTO DE DATOS.	33
4.5	GENERACIÓN DE MAPAS DE ANOMALÍAS.	34
CAPÍTULO 5. INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS.		39
5.1	DOMINIOS GEOFÍSICOS.	39
5.1.1	DOMINIOS MAGNÉTICOS.	39
5.1.2	DOMINIOS GRAVIMÉTRICOS.	41
5.2	LINEAMIENTOS GEOFÍSICOS.	43
5.2.1	LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS.	43
5.2.2	LINEAMIENTOS GRAVIMÉTRICOS.	45
5.3	ANÁLISIS ESPECTRAL.	47
5.4	DECONVOLUCIÓN DE EULER.	48
5.5	COMPARACIÓN DE DATOS RADIOMÉTRICOS.	49
5.6.	CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN EN SUBSUELO.	52
5.6	MODELO GEOFÍSICO.	55

5.6.1 SECCIÓN GEOLÓGICO-GEOFÍSICAS	56
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	58
REFERENCIAS.....	59

Índice de tablas.

TABLA 1.	Cuadro técnico de los métodos geofísicos de potencial. Modificada de (Cantos Figuerola José, 1973).	12
TABLA 2.	Tabla de susceptibilidad de algunas rocas. Los valores se expresan en unidades cegesimales. (Cantos Figuerola José, 1973)	18
TABLA 3.	Tabla de contenidos medios de Uranio y Torio en rocas y sustancias naturales en gramos por tonelada. (Cantos Figuerola José, 1973).....	21
TABLA 4.	Tabla de índices estructurales en la Deconvolución de Euler. (Información obtenida de Oasis Montaj Help.).....	49
TABLA 5.	Tabla de valores de susceptibilidad y densidad utilizados para el modelo geológico-geofísico.....	55

Índice de figuras.

FIGURA 1.	Mapa de ubicación de la zona de estudio. Imagen obtenida de Google Earth y modificada en ARCGIS.....	3
FIGURA 2.	Geología de la zonas norte y sur del Campo Volcánico tipo Intraplaca “Los Encinos”. Imagen tomada de la Carta Geológica-Minera del SGM y modificada en ARCGIS.	¡Error! Marcador no definido.
FIGURA 3.	Terrenos Tectonoestratigráficos de México, Campa-Uranga y Coney, 1983. Obtenido del SGM y modificado con el mapa satelital del área de estudio obtenida de Google Earth.	6
FIGURA 4.	Mapa geológico perteneciente a la porción sur del campo volcánico Los Encinos. Imagen tomada de la Carta Geológica-Minera del SGM y modificada en ARCGIS.....	8
FIGURA 5.	Columna estratigráfica de la zona sur de Los Encinos. Modificada del SGM.....	11
FIGURA 6.	Representación de algunas superficies equipotenciales y líneas de campo de una masa puntual. Superficie Equipotencial = En cada punto el potencial tiene el mismo valor, decreciente a medida que la circunferencia está más próxima a la masa ($V_1 < V_2 < V_3$)	13
FIGURA 7.	Medidas de la gravedad terrestre.	15
FIGURA 8.	Identificación de los polos magnéticos y polos geográficos. Las líneas rojas indican las líneas del campo magnético que salen del polo magnético norte y entran en el polo magnético sur.	16
FIGURA 9.	Componentes del campo magnético terrestre:	17
FIGURA 10.	Equipo de aeromagnética. Imagen obtenida del SGM.	19
FIGURA 11.	Equipo de magnetometría GEM Systems GSM-19.	27
FIGURA 12.	Distribución de puntos de levantamiento magnético.....	28
FIGURA 13.	Equipo de gravimetría Scintrex Autograv CG-5.	29
FIGURA 14.	Distribución de puntos de levantamiento gravimétrico.....	30
FIGURA 15.	Equipo de espectrometría de rayos gamma RS 125 Super-SPEC.....	31
FIGURA 16.	Equipo RAD7.	32
FIGURA 17.	Distribución de puntos de levantamiento radiométrico y medición de Radón.....	33
FIGURA 18.	A) Mapa de reducción al Polo de Aeromagnética y B) Mapa de reducción al Polo de Magnetometría Terrestre.....	34

FIGURA 19.	A) Mapa de la anomalía de Bouguer completa de gravimetría satelital y B) Mapa de la anomalía de Bouguer completa de gravimetría terrestre.....	35
FIGURA 20.	Mapa de reducción al polo con 1ra. Derivada en Z de Aeromagnética y B) Mapa de reducción al polo con 1ra. Derivada en Z de Magnetometría Terrestre.....	36
FIGURA 21.	A) Mapa de anomalía de Bouguer residual con 1ra. Derivada en Z de gravimetría terrestre y B) Mapa de anomalía de Bouguer residual con 1ra. Derivada en X de gravimetría terrestre.....	36
FIGURA 22.	A) Mapa con filtro de señal analítica de Magnetometría y B) Mapa con filtro de señal analítica de Gravimetría Terrestre.	37
FIGURA 23.	A) Mapa de Uranio (ppm). B) Mapa de Torio (ppm). C) Mapa de Potasio (%).	37
FIGURA 24.	A) Mapa de Radón y B) Mapa de Torón.	38
FIGURA 25.	Mapa de Dominios Aeromagnéticos.	39
FIGURA 26.	A) Dominios magnéticos en mapa con filtrado de Reducción al polo. B) Dominios magnéticos en mapa con filtrado de Reducción al Polo con continuación ascendente a 400 metros.	41
FIGURA 27.	Mapa de dominios gravimétricos satelitales.	41
FIGURA 28.	A) Dominios gravimétricos terrestres en mapa de señal analítica. B) Dominios gravimétricos terrestres en mapa de señal analítica con continuación ascendente a 400 metros.	43
FIGURA 29.	A) Mapa de lineamientos aeromagnéticos; B) Direcciones preferenciales de lineamientos aeromagnéticos.....	44
FIGURA 30.	A) Mapa de lineamientos magnéticos terrestres; B) Direcciones preferenciales de lineamientos magnéticos.....	45
FIGURA 31.	A) Mapa de Lineamientos gravimétricos satelitales; B) Direcciones preferenciales de lineamientos gravimétricos.....	46
FIGURA 32.	A) Mapa de lineamientos gravimétricos terrestres; B) Direcciones preferenciales de lineamientos gravimétricos.....	47
FIGURA 33.	Ubicación de las pendientes en el espectro de potencia.	48
FIGURA 34.	Mapa de reducción al polo con Deconvolución de Euler para un índice estructural de 0.	49
FIGURA 35.	Mapa de anomalía completa de Bouguer con Deconvolución de Euler para un índice estructural de 1.	50
FIGURA 36.	Comparación de datos de dosis de radiación (DR) con la geología de la zona de estudio.	51

FIGURA 37.	Comparación de Potasio (K), Torio (Th) y Uranio (U) con la geología de la zona de estudio.	52
FIGURA 38.	Concentración de Radón en el punto de muestreo LE001 (Estación Base).....	53
FIGURA 39.	Concentración de Radón en el punto de muestreo LE006.	54
FIGURA 40.	Concentración de Radón en el punto de muestreo LE008x.....	54
FIGURA 41.	Ubicación de la sección A-A'.	56
FIGURA 42.	Modelo sección A – A'.	57

Resumen

Estudio geofísico de la porción sur del campo volcánico Los Encinos a través de métodos potenciales, espectrometría de rayos gamma y concentración de radón en subsuelo.

PALABRAS CLAVE: Campo volcánico Los Encinos, vulcanismo intraplaca, magnetometría, gravimetría, concentración de radón y torón, rayos gamma, diques.

En este estudio se presenta como resultado de la combinación de varias metodologías geofísicas, un modelo geológico-geofísico de la zona volcánica de Los Encinos, el cual simula la litología del subsuelo y nos muestra un resultado en 2D de las diferentes anomalías magnéticas, gravimétricas y radiométricas obtenidas con la recopilación de datos en campo y una relación entre el magnetismo de esta zona volcánica y las estructuras que encontramos en la corteza.

Se realizó levantamiento terrestre de magnetometría y gravimetría, realizando 20 perfiles de aproximadamente 2 km de longitud, tomando mediciones cada 50 y 100 metros dependiente de la topografía del terreno. Por otro lado, se hizo levantamiento de concentración de radón y rayos gamma en el subsuelo, teniendo los mismos puntos de medición de ambos métodos. Por último, obtuvimos información aeromagnética del Servicio Geológico de los Estados Unidos y datos del modelo gravimétrico mundial WGM 2012 que utilizo datos del satélite GOCE.

Toda información obtenida en campo y en laboratorio fue procesada y se generaron diferentes mapas los cuales nos identificaron lineamientos y dominios geofísicos que fueron asociados a inestabilidad tectónica en la zona lo cual indica la existencia de fallamiento activo, comprobado también con altos niveles de concentración de radón y rayos gamma en ciertas zonas.

Como recomendación se alienta a realizar un estudio un tanto más extenso en cuanto a mediciones terrestres para poder lograr un proyecto más completo y una caracterización más acertada del subsuelo a grandes extensiones.

Abstract

Geophysical study of the southern portion of the Los Encinos volcanic field using potential methods, gamma ray spectrometry and subsurface radon concentration.

KEY WORDS: Los Encinos volcanic field, intraplate volcanism, magnetometry, gravimetry, radon and thoron concentration, gamma rays, dikes.

In this study, a geological-geophysical model of the Los Encinos volcanic zone is presented as a result of the combination of several geophysical methodologies, which simulates the lithology of the subsurface and shows us a 2D result of the different magnetic, gravimetric and radiometric anomalies obtained with the collection of data in the field for the characterization and a relationship between the magnetism of this volcanic area and the structures found in the crust.

A terrestrial survey of magnetometry and gravimetry was carried out, making 20 profiles of approximately 2 km in length, taking measurements every 50 and 100 meters depending on the topography of the terrain. On the other hand, a survey of the concentration of radon and gamma rays in the subsoil was carried out, having the same measurement points of both methods. Finally, we obtained aeromagnetic information from the United States Geological Survey and data from the WGM 2012 world gravimetric model that used data from the GOCE satellite.

All information obtained in the field and in the laboratory was processed and different maps were generated, which identified guidelines and geophysical domains that were associated with tectonic instability in the area, which indicates the existence of active faulting, also verified with high levels of radon concentration and gamma rays in certain areas.

As a recommendation, it is encouraged to carry out a somewhat more extensive study in terms of terrestrial measurements in order to achieve a more complete project and a more accurate characterization of the subsurface large areas.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Los procesos magmáticos de tipo intraplaca son eventos que se encuentran localizados en el interior de las placas, sobre continentes u océanos. En algunos de los casos estos procesos pueden llamarse puntos calientes o hot spot, donde se estima la presencia de una región del manto donde la temperatura es más elevada que sus alrededores y ascienden por convección rocas calientes en estado sólido.

En este tipo de procesos los magmas basálticos suben a la superficie a través de fracturas y atraviesan fácilmente la corteza continental, debido a que aumenta su densidad. A consecuencia de que las velocidades en la que ascienden estos magmas son relativamente altas la mayoría de las ocasiones incluyen xenolitos provenientes del manto .

Los magmas que general las zonas de tipo intraplaca continental exhiben un amplio espectro de composiciones entre los cuales podemos tener basálticos, transicionales subalcalinos, tipo basaníticos y nefeliníticos, ultrapotásicos y carbonatitas (López-Ruiz & Cebriá, 2007).

En México, este tipo de procesos intraplaca continental ocurre en regiones de la placa norteamericana donde existen una basta cantidad de localidades al norte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). En estas zonas las rocas volcánicas que se pueden encontrar son de tipo alcalina y algunas contienen xenolitos de peridotita, conjuntos de megacristales y granulitas feldespáticas. La ubicación de muchos de los campos volcánicos intraplaca existentes en estas zonas sugiere que fueron creados bajo la influencia de fallas que delimitan dominios tectónicos regionales en el basamento (Aranda-Gómez et al., 2005).

El campo volcánico Los Encinos es uno de los tantos localizados al norte de la FVTM, en el noreste de San Luis Potosí y noroeste de Zacatecas. En esta tesis se estudiará una pequeña parte la porción sur de Los Encinos cerca del municipio Villa de Guadalupe, SLP. Se analizó la geología general de la zona por medio de revisión de literatura ya publicada, digitalización de mapas geológicos, la creación de mapas geofísicos, radiométricos y de análisis de Radón, para concluir con la modelación geológica - geofísica, todo esto con el fin de realizar una caracterización del subsuelo del área de estudio (Puerto del Toro).

Los métodos geofísicos ayudaran a medir y conocer las propiedades de las rocas en el subsuelo. En este trabajo se utilizó métodos potenciales (Magnetometría y gravimetría) con apoyo de espectrometría de rayos gamma y análisis de radón. Los datos y mapas obtenidos con estos métodos en conjunto con la geología previamente analizada ayudaran a concluir con el modelo geológico – geofísico.

1.2 HIPÓTESIS.

Se estima la existencia de procesos volcánicos tipo intraplaca en la zona de Los Encinos, lo que tiene estrecha relación con anomalías resultantes de campos potenciales (Magnetometría y gravimetría) y a su vez relacionado con anomalías de espectrometría de rayos gamma y altas concentraciones de radón en el subsuelo por fracturamientos y fallamiento activo. Lo anterior comprobado con la geología documentada de la zona de estudio, donde se muestran zonas de fracturamientos.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo general:

Presentar un modelo geológico-geofísico de la estructura interna de la zona intraplaca de la porción sur de Los Encinos por medio de métodos geofísicos potenciales (magnetometría área, magnetometría terrestre, gravimetría satelital y gravimetría terrestre) con apoyo de métodos radiométricos y concentración de radón en el subsuelo.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Realizar un reconocimiento geológico-estructural del área de estudio.
- Realizar un levantamiento geofísico con métodos potenciales incluyendo magnetometría y gravimetría.
- Obtener datos de gravimetría satelital y aeromagnética para realizar análisis estructural regional.
- Realizar levantamiento de espectrometría de rayos gamma y obtener datos de concentración de radón.
- Integración de datos geológicos y geofísicos para la preparación de los modelos físico-geológicos del área.

1.4 UBICACIÓN.

La zona sur del campo volcánico de tipo intraplaca “Los Encinos” se encuentra al NE del Estado de San Luis Potosí, dentro de las coordenadas geográficas $23^{\circ} 30'$ a $23^{\circ} 00'$ de latitud norte y $101^{\circ} 15'$ a $100^{\circ} 45'$ de longitud oeste; su altura promedio los 2000 msnm. Aproximadamente (Figura 1).

La región está rodeada de varios municipios de importancia turística y minera como Real de Catorce, Charcas, Matehuala, Villa de Guadalupe, entre otras. Para llegar a la zona desde la ciudad de San Luis Potosí se toma la carretera San Luis Potosí-Matehuala para posteriormente dar vuelta en el entronque hacia Charcas. Se atraviesa todo el municipio de Villa de Guadalupe hasta llegar al ejido Rancho Alegre (Figura 1).

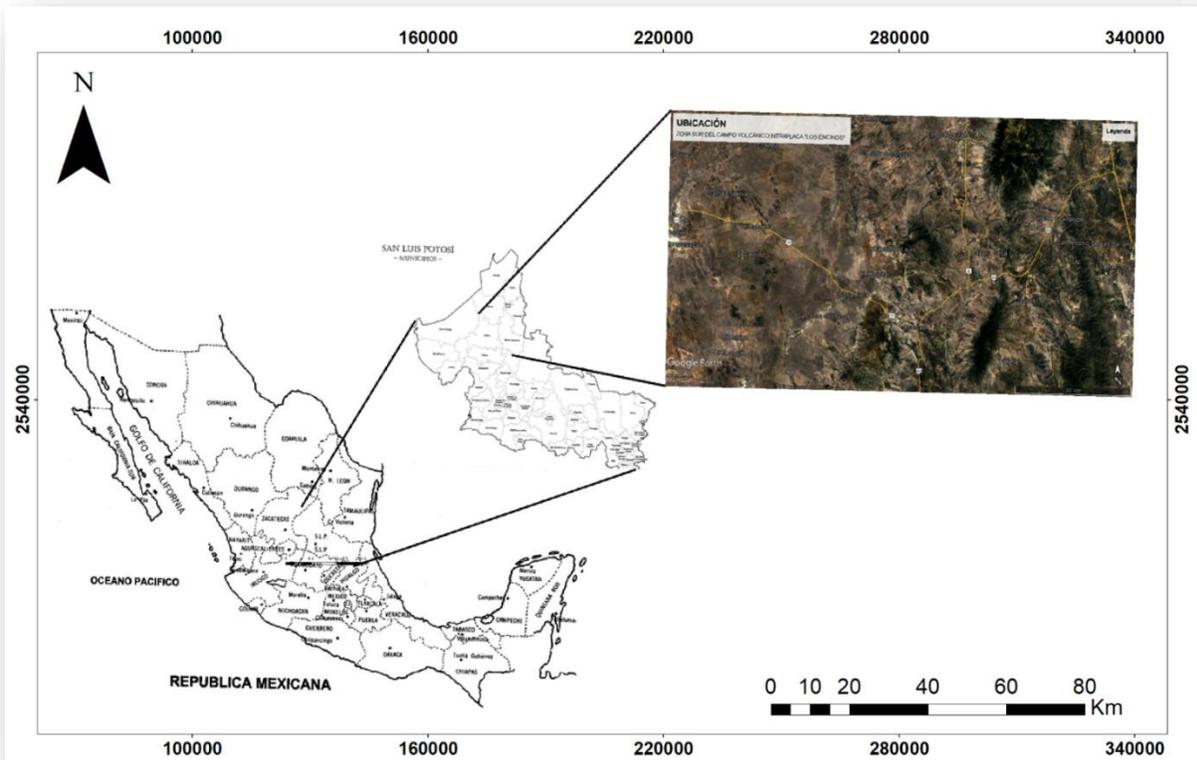


FIGURA 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. Imagen obtenida de Google Earth y modificada en ARCGIS.

1.5 ANTECEDENTES.

La existencia de trabajos, artículos o documentos oficiales publicados a cerca del Campo Volcánico Los Encinos es muy poca, sin embargo, parte importante y fundamental de esta investigación parte del trabajo realizado por **Aranda Gómez y de Nieto Samaniego en 2005** donde se mencionan importantes características geológicas y estructurales de esta importante localidad volcánica de tipo intraplaca. Ambos trabajos realizados en la Mesa Central y norte de México y mencionando a nuestra área de estudio en pequeños apartados.

El Servicio Geológico Mexicano (SGM) muestra en sus cartas geológico-minera importante información geológica y estructural de la zona de Los Encinos. Para este trabajo se utilizó la carta Matehuala (F14-1) y la carta de Villa de Guadalupe (F14-A34); esta última para un enfoque más preciso y detallado de la geología de Puerto del Toro donde fueron tomados los estudios geofísicos en campo.

La existencia del informe geológico - minero de Villa de Guadalupe, realizado por **Víctor Julián Martínez, por parte de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)**, nos aporta más información de la geología y geoquímica la zona de estudio, ya que se encuentra muy cerca al municipio ya antes mencionado.

La zona volcánica de tipo intraplaca Los Encinos forma parte de la provincia fisiográfica de la Mesa Central y de la unidad paleogeográfica de la Cuenca Mesozoica del Centro de México. Tiene un área aproximada de 5000 km² y está localizado en el Noroeste de San Luis Potosí y Noreste de Zacatecas (Aranda-Gómez et al., 2005).

Durante el Mesozoico la región se vio expuesta a intenso plegamiento y fallamiento consecuencia de los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide lo cual dio origen a pliegues y cabalgaduras en la secuencia marina, por sobre rocas volcánicas, volcanosedimentarias y metamórficas del basamento.

Posteriormente en el Cenozoico comienza intensa actividad volcánica que deja como consecuencia la reactivación de fallas y fracturas que da origen al campo volcánico de tipo intraplaca "Los Encinos". Las rocas que destacan en esta área son riolitas, xenolitos y andesita-dacítica.

En el área local de estudio tenemos la presencia de afloramiento basáltico, toba riolítica y caliza – lutita del cretácico, encajonando la zona de Puerto del Toro donde tenemos la presencia de una falla de movimiento lateral derecho cubierta de aluvión cuaternario que rellena gran parte de las depresiones tectónicas de la zona.

CAPÍTULO 2. MARCO GEOLOGICO.

2.1 GEOLOGIA REGIONAL.

La zona del campo Los Encinos está cubierta en gran parte por material aluvial, podemos notar la presencia de gran cantidad caliza y caliza-lutita del Cretácico con algunas intrusiones de granodiorita-monzonita en la zona NE con poca presencia en el SO (Figura 2). En la parte central de la zona de estudio podemos encontrar conglomerado polimíctico del Terciario y Cuaternario, acompañado del basalto del terciario.

Para complementar la información anterior, se realizó la digitalización del territorio geológico de la zona completa del campo volcánico en el software ARCGIS (Figura 3), utilizando la carta geológica-minera del SGM "Matehuala -F14-1" con el fin de mostrar el tipo de geología perteneciente en esta zona, sus edades y también los tipos de fallas que podemos encontrar a lo largo del área y así comparar al final nuestros resultados geofísicos con la geología de Los Encinos.

2.1.1 MARCO ESTRUCTURAL.

La zona regional donde se encuentra el campo volcánico Los Encinos cuenta con una cubierta sedimentaria del Mesozoico donde se presentan intensos fenómenos de pliegues y fallas originados de los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide donde se produjeron anticlinales y sinclinales con diferentes comportamientos estructurales.

Por otro lado, las rocas pertenecientes al Triásico presentan plegamientos y ondulamientos que forman estructuras anticlinales de gran tamaño tal como la de San Rafael-La Trinidad en el municipio de Charcas, SLP.

El Jurásico-Cretácico se caracteriza por la presencia de plegamiento bien desarrollado con cabalgaduras y escamas tectónicas que se pueden observar en las sierras de Catorce y Charcas. El plegamiento en estas zonas consiste en anticlinales y sinclinales asimétricos con rumbo NW-SE en el área oeste y N-S en la zona central.

La zona está compuesta por diferentes tipos de fallas que dan origen a estos fenómenos de plegamiento resultado a su vez de procesos compresivos desarrollados a finales del Cretácico. Un ejemplo de este tipo de elementos estructurales es la Falla de San Tiburcio que cruza por la zona con un rumbo NW-SE, tiene una longitud de 300 Km y se estima que fue reactivada en el Mioceno Tardío y podría seguir activa gracias al vulcanismo basáltico del Cuaternario.

En la Sierra de Catorce se reconocen fallas de dirección N-S que se localizan en el costado Oeste de esta extensa Sierra y buzan hacia el oeste. Se caracterizan por ser fallas normales con origen en el Paleógeno (Nieto Samaniego A. F. et al., 2005).

En general, las fallas y fracturas de la zona de estudio tienen un patrón caracterizado por sistemas de fallas normales con rumbos NW-SE y NE-SW originadas en el Eoceno (Vélez López J et al., 1996).

2.1.2 CAMPO VOLCANICO LOS ENCINOS.

El campo volcánico de tipo intraplaca “Los Encinos” tienen origen en el Mioceno medio con 12-10 M.a. a partir de una intensa actividad volcánica basáltica alcalina por la reactivación de fallas y fracturas con rumbo NW-SE que a su vez son paralelas del fenómeno estructural conocido como la Falla de San Tiburcio (Aranda-Gómez et al., 2005).

La zona tiene una elevación aproximada de 2000 m.s.n.m y está rodeado de sierras tales como la Sierra de Catorce, la Sierra de Charcas, Sierra El Bozal, entre otras. Pertenece a la provincia fisiográfica de la Mesa Central (Figura 2) y abarca un área extensa de aproximadamente 5000km² en el noroeste de San Luis Potosí y noreste de Zacatecas. Su unidad paleogeográfica es la Cuenca Mesozoica del Centro de México y el terreno tectonoestratigráfico que le corresponde es el de Sierra Madre.

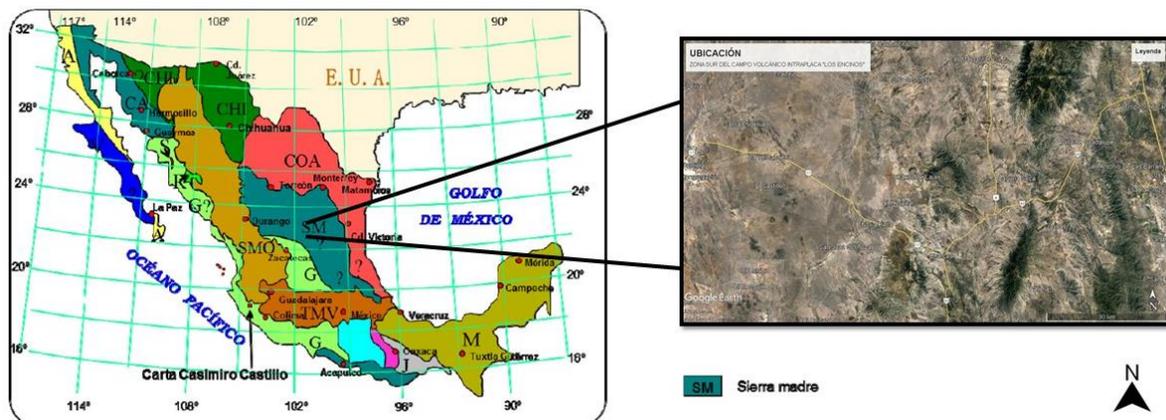


FIGURA 2. Terrenos Tectonoestratigráficos de México, Campa-Uranga y Coney, 1983. Obtenido del SGM y modificado con el mapa satelital del área de estudio obtenida de Google Earth.

EL área de los encinos se caracteriza por el afloramiento de rocas volcánicas. Las rocas ígneas máficas de tipo intraplaca forman cuellos volcánicos que se

encuentran ubicados en el oeste y norte de la Sierra de Catorce. Dentro de esta misma área, los volcanes de Los Encinos definen dos alineamientos paralelos a la tectónica definida por fallas normales cenozoicas (Aranda-Gómez et al., 2005).

Las rocas volcánicas de tipo intraplaca que abundan en el campo volcánico Los Encinos son hawaitas y xenolitos de rocas ultramáficas y granulitas provenientes del manto y de la base de la corteza (Aranda-Gómez et al., 2005).

Según **Aranda (2005)** y **Nieto Samaniego (2005)** el evento volcánico más reciente con el cual terminó la historia magmática de esta zona tiene una edad de Plioceno-Cuaternario y trata de magmas provenientes del manto y de la corteza inferior con características que indican que el magma ascendió rápidamente de la corteza probablemente asociado a zonas de fallas profundas que facilitaron su ascenso rápido. Sin embargo, no hay evidencia de este fallamiento de gran magnitud asociado a estos eventos volcánicos.

2.2 GEOLOGIA LOCAL.

2.1.3 MESOZOICO.

La historia geológica de la zona es bastante compleja con características que ligan la evolución tectónica desde el Proterozoico Superior.

La evolución de la región comienza con la Formación Zacatecas (TrsAr-Lu) en el Triásico superior con depósitos turbidíticos que fueron afectados por compresión durante el Jurásico Inferior provocando la creación de rocas metamórficas y esquistosidad (Figura 3 y 4).

El carácter turbidítico de las secuencias turbidíticas de la zona, ha sido interpretada como evidencia de que en esta región existió un margen continental, la zona continental localizada hacia el E-NE y de W-SW la región oceánica (Nieto Samaniego Á. F. et al., 2005).

Posterior a un periodo de erosión se depositan lechos rojos pertenecientes a la Formación Nazas (JsCgp) en el Jurásico Medio junto con rocas volcánicas producto de la actividad del Arco Magmático Continental del Triásico-Jurásico (Figuras 3 y 4).

El Jurásico está caracterizado por la existencia de rocas continentales, conglomerado y arenisca con algunas rocas volcánicas intercaladas (Figuras 3 y 4).

Las rocas marinas calcáreas son parte del segundo conjunto litológico del Jurásico, formado con base compuesta de caliza y en la parte superior por limolita calcárea con estratos de pedernal de la Formación La Caja (JsCz y JsLm-Cz).

Durante la formación de la Orogenia Laramide se causa un evento magmático por la migración del Arco magmático anteriormente mencionado lo que da origen a

cuerpos ígneos intrusivos de composición félsica e intermedia provocando a su vez metamorfismo en las rocas sedimentarias ya preexistentes y mineralización en algunas zonas (Vélez López J. et al., 1996).

El componente más importante del Cretácico consiste en lutita, arenisca y calizas (KiCz, KiCz-Lu, KsCz y KsCz-Lu). Este conjunto litológico muestra facies metamórficas de esquistos verdes, principalmente en los componentes volcánicos (Nieto Samaniego Á. F. et al., 2005).

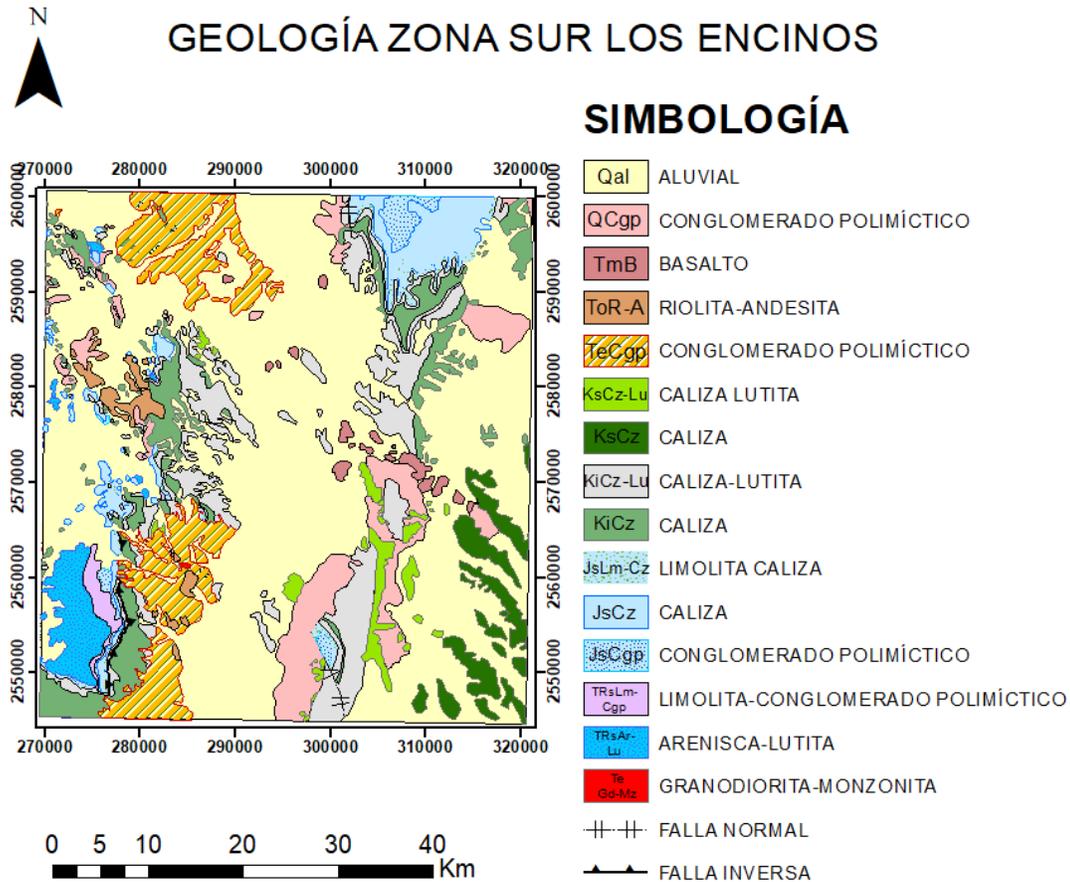


FIGURA 3. Mapa geológico perteneciente a la porción sur del campo volcánico Los Encinos. Imagen tomada de la Carta Geológica-Minera del SGM y modificada en ARCGIS.

En general, la era mesozoica en esta zona está representada por rocas metamórficas producidas por eventos magmáticos posteriormente afectados por compresión, rocas sedimentarias marinas del Triásico medio, clásticas continentales, rocas ígneas intrusivas y volcanosedimentarias (Figura 3 y 4).

2.1.4 CENOZOICO.

Las rocas ígneas más antiguas en la zona de Los Encinos consisten en derrames andesíticos-dacíticos, tobas e ignimbritas riolíticas cuya edad se correlaciona con las rocas ígneas de San Luis Potosí de 28 a 31 M.a. y el evento volcánico de la Sierra Madre Occidental. Estas rocas ígneas cubren discordantemente el conglomerado y otras rocas mesozoicas en la región de Charcas. A su vez, las rocas ígneas cenozoicas están cubiertas por conglomerados y gravillas con fósiles del Plioceno-Pleistoceno. En este periodo se produce fallamiento con vulcanismo básico alcalino asociado que dio origen a estructuras tipo maar (Santo Domingo), con contenido de Xenolitos provenientes de la corteza y manto superior (Aranda-Gómez et al., 2005).

En el Eoceno Inferior, la región sufre una fase tectónica distensiva lo que generó fallas normales de alto ángulo que delimitan fosas tectónicas y grandes bloques levantados cuya erosión produjo conglomerados continentales asociados a los levantamientos de Charcas y Catorce (TeCgp).

En el Mioceno Medio (10 a 12 M.a.), empieza una intensa actividad alcalina como consecuencia de una reactivación de fallas y fracturas de rumbo NW-SE, paralelas a la gran falla de San Tiburcio, lo que posteriormente dio origen a la creación del Campo Volcánico Los Encinos. Con esta fase distensiva también se produjo el levantamiento isostático de las sierras de los alrededores de la zona (Sierras de Charcas, Catorce, Coronado, La Peña y Sierra Vieja).

Existe la presencia de un *hiatus* en la actividad volcánica de esta zona, el cual marca un cambio de la composición de los magmas (ToR-A), ya que pasa de ser un vulcanismo eocénico que presenta ambas composiciones (andesítico y riolítico) a ser un vulcanismo principalmente riolítico en el oligoceno (Nieto Samaniego Á. F. et al., 2005).

El Cenozoico está caracterizado por la presencia de depósitos gruesos continentales los cuales están constituidos de conglomerados, arenas y gravas que cubren discordantemente a las rocas mesozoicas y rellenan fosas tectónicas que fueron formadas en el Eoceno-Oligoceno.

Las rocas que alcanzan más distribución en la zona de Los Encinos son las rocas clásticas continentales junto con rocas ígneas intrusivas y extrusivas.

2.1.5 CUATERNARIO.

La existencia de arcillas, arenas y gravas en el área de estudio es producto de una intensa erosión a la que ha sido sometida la región del campo volcánico y los alrededores. Este tipo de rocas sedimentarias las encontramos depositadas en los flancos de las sierras como depósitos de talud, abanicos aluviales y cubren los amplios valles (QCgp, Qal).

En general, las rocas volcánicas pliocénicas y cuaternarias de toda la Mesa Central se caracterizan por que la composición de sus lavas es alcalina y son portadoras de xenolitos que provienen del manto y de granulitas procedentes de la base de la corteza (Nieto Samaniego Á. F. et al., 2005).

Desde el Cuaternario la región de Los Encinos ha estado sometida a una intensa erosión y a un constante depósito de sedimentos clásticos continentales, rellorando así cuencas endorreicas que posteriormente son ocupadas por lagunas saladas principalmente en la zona oeste del área del campo volcánico (Vélez López J. et al., 1996).

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.

3.1 MÉTODOS POTENCIALES.

Los métodos de potencial comprenden los campos potenciales del subsuelo como el gravimétrico y magnético (Tabla 1), son de fuente natural presente en el medio donde se está estudiando. Generalmente se obtienen imágenes en 2D para definir cambios laterales en los materiales asociados a cambios en las propiedades físicas de estos.

TABLA 1. Cuadro técnico de los métodos geofísicos de potencial. Modificada de (Cantos Figuerola J. 1973).

	Método gravimétrico.	Método Magnético.
Aplicaciones.	<p>En petróleo: Estudios de reconocimiento y complementarios. Estructuras anticlinales y sinclinales. Fallas, diapiros, domos salinos.</p> <p>En minerales: Filones y masas de minerales con contrastes de densidad.</p> <p>En aguas: Estructuras, fallas, cavernas poco profundas, que pueden contener agua.</p>	<p>En petróleo: Profundidad de basamento.</p> <p>En minerales: Menas magnéticas, Fe, Ni, Cr, Ti. Profundidad y volumen del yacimiento.</p> <p>En aguas: Contactos con rocas hipogénicas que pueden ser de interés hidrogeológico.</p>
Valores medidos.	Gravedad en miligales.	Susceptibilidad magnética de rocas y minerales. Valores medidos en gammas.
Instrumentos empleados.	Gravímetros. Balanzas de torsión y Péndulos.	Magnetómetros. Balanzas magnéticas. Magnetómetros de protones. Magnetómetros de vapor de Cesio. Magnetómetros de Flujo.
Tipo de prospección.	Terrestre y Marinas.	Terrestre y aérea. Marina como complemento de otros.
Resultados obtenidos.	Mapas de Bouguer, Residuales y Transformados.	Profundidad de basamentos. Mapas magnéticos, localización y profundidad de masas magnéticas.

Los campos de potencial están en función del tiempo y de la posición, es decir, estudian y describen las energías que actúan en un punto del espacio en un tiempo determinado. Hay campos escalares y vectoriales.

- a) **Campos escalares.** Están en función del tiempo y el espacio.
- b) **Campos vectoriales.** Dependen de la posición, magnitud y dirección.

El potencial está definido como el trabajo necesario para transferir una unida de masa o carga eléctrica de un punto a otro (Figura 5). La teoría del potencial puede ser aplicadas en muchas áreas de estudio incluida la Geofísica donde específicamente podemos encontrarla en las ramas como: gravimetría, magnetometría, electromagnetismo, flujo de calor, etc.

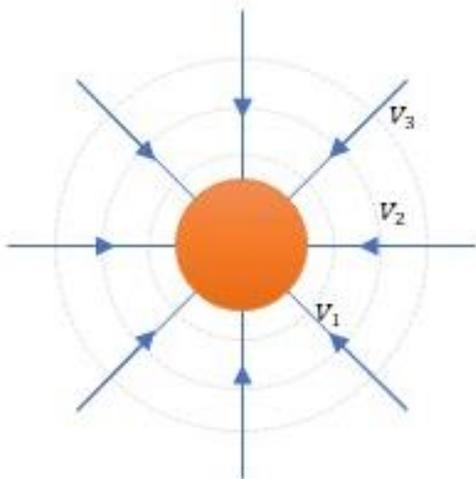


FIGURA 5. Representación de algunas superficies equipotenciales y líneas de campo de una masa puntual. Superficie Equipotencial = En cada punto el potencial tiene el mismo valor, decreciente a medida que la circunferencia está más próxima a la masa ($V_1 < V_2 < V_3$)

3.1.1 GRAVIMETRÍA.

El método gravimétrico está basado en el estudio de la variación de la componente vertical del campo gravimétrico terrestre. Las anomalías o variaciones de este podrán ser detectadas con instrumentos adecuados como el gravímetro, que es un equipo que se encarga de medir los valores relativos de la gravedad terrestre.

Las variaciones ya mencionadas son ocasionadas por la distribución irregular de masas de diferentes densidades a profundidad, por lo que conociendo a aquéllas se puede llegar a una interpretación probable de lo que se encuentra en el subsuelo, tomando en cuenta también la geología de la zona que se esté estudiando y de la distribución de las densidades en profundidad.

El campo gravimétrico terrestre consta de dos partes fundamentales: la primera debida a la atracción producida por la tierra de acuerdo con la Ley de Newton (Ec. 1).

$$g = K \frac{M}{R^2} \quad (1)$$

Donde:

M= masa de la Tierra.

R= Radio

K= Constante de gravitación universal = 67.64×10^{-9} .

La segunda es la debida a la rotación de la tierra (Cantos Figuerola, 1978).

La variación de la gravedad sobre la superficie de la tierra depende de tres factores:

A) Con la Latitud.

La gravedad varia de un punto a otro en la Tierra debido a que su forma NO es esférica. Nuestro planeta Tierra es achatada en los polos, es decir, la distancia es máxima en el ecuador, con un valor de la gravedad mínimo; y mínima hacia los polos, con un valor máximo de gravedad.

La aceleración de la gravedad es, entonces, función de la latitud (Cantos Figuerola J. 1973).

A lo largo de la historia se han propuesto diferentes fórmulas que dan como resultado la gravedad teórica o también llamada "normal" sobre la superficie de la tierra considerando dos teorías: que la tierra se considera un *elipsoide* o un *esferoide*.

Para calcular el valor normal o teórico de la gravedad en cualquier punto de la superficie terrestre se utiliza la siguiente formula (Ec. 2):

$$g_0 = 978.049(1 + 0.0052884 \operatorname{sen}^2 \varphi - 0.0000059 \operatorname{sen}^2 2 \varphi) \frac{cm}{seg^2} \quad (2)$$

Donde:

g_0 = gravedad a la latitud ϕ y al nivel del mar.

978.049 = es el valor de la gravedad en el ecuador donde $\phi = 0$

B) Con la Altura.

Ahora bien, cuando se realizan mediciones sobre la superficie terrestre, se tiene una altura h sobre el nivel del mar, que hace conveniente estudiar las variaciones de esta gravedad con la altitud, lo que nos dará lugar a las siguientes correcciones para reducir la gravedad observada al dicho nivel:

- 1) Corrección de aire libre.** Debida a la altura h de la estación, es decir, a estar más alejada de la Tierra (Ec. 3).

$$\Delta g_{al} = \Delta g + 0.3086 h \quad (3)$$

- II) **Corrección de Bouguer.** Se calcula hallando el efecto gravimétrico del terreno comprendido entre el nivel de la estación y el nivel del (Ec. 4).

$$\Delta g_B = \Delta g - 2\pi K * 2.67 * h \quad (4)$$

- III) **Corrección Topográfica.** Corrige las variaciones en la aceleración de la gravedad observada causada por variaciones en la topografía cercanas a la estación.

C) Con el Tiempo.

Sobre el planeta se observan cambios en los valores de la aceleración de la gravedad, tanto por la amplitud del cambio, su duración en el tiempo y la fuente que provoca la variación.

- I) **Efecto de las mareas.** El efecto que causan los astros es una pequeña deformación en la superficie de los mares y océanos lo que produce una influencia en los gravímetros. Esta variación llega hasta unos 0.05 mgal/hr. Este efecto queda parcialmente eliminado después de efectuar la corrección por deriva.
- II) **Deriva Instrumental.** Esta deriva es producida algunas ocasiones por variaciones de temperatura. Cuando se efectúan mediciones sobre una misma estación en diversos intervalos de tiempo, observamos que el gravímetro nos da valores que son ligeramente diferentes.

Por otra parte, existen dos medidas importantes de la gravedad (Figura 6):

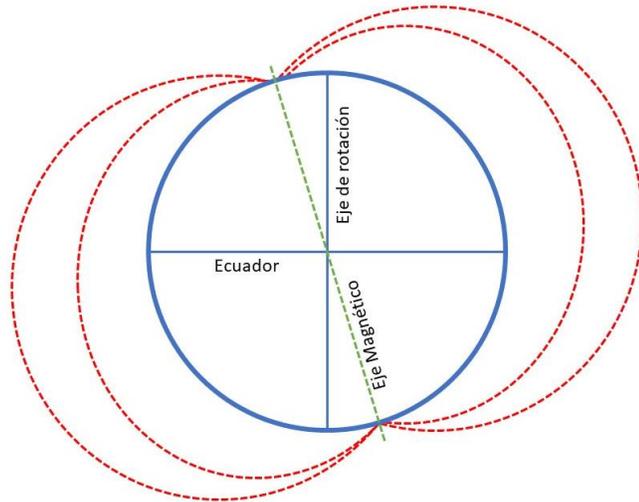


FIGURA 6. Medidas de la gravedad terrestre.

3.2.1 MAGNETOMETRÍA.

Se dice que nuestro planeta tierra es un imán natural que da lugar a un campo magnético terrestre. **William Gilbert (1600)** menciona la existencia de dos polos magnéticos cercanos a los polos geográficos norte y sur (Figura 8).

FIGURA 7. Identificación de los polos magnéticos y polos geográficos. Las líneas rojas indican las líneas del campo magnético que salen del polo magnético norte y entran en el polo magnético sur.



El campo magnético terrestre es consecuencia de corrientes eléctricas que se relacionan con las corrientes que generan el núcleo interno y externo y posteriormente son propagadas a la superficie terrestre (Figura 8).

El campo magnético está definido por \vec{H} , que es la fuerza por la que pasa un polo magnético positivo, su expresión es la siguiente (Ec. 5):

$$\vec{H} = \frac{q}{r^2} \quad (5)$$

Las pequeñas variaciones de este campo magnético indican la presencia de anomalías a profundidad causadas por cambios en las propiedades físicas de las rocas subyacentes o tal vez la presencia de sustancias magnéticas que pueden ser de interés comercial.

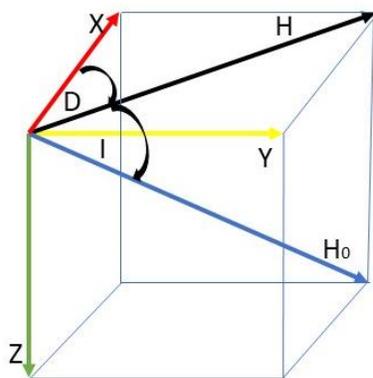


FIGURA 8. Componentes del campo magnético terrestre:

H= Componente Horizontal.
 X=Componente al norte geográfico.
 Y=Componente al este geográfico.
 Z=Componen vertical.
 D= Declinación geomagnética.
 I= Inclinación magnética.

a) Leyes de acciones magnéticas.

Coulomb observó que, con barras magnéticas muy largas, la fuerza de repulsión entre los extremos del mismo signo, es inversamente proporcional a los cuadrados de las distancias (Ec. 6). Llegó a la conclusión de que se trataba de fuerzas newtonianas, por lo tanto, se puede aplicar las leyes que rigen esta clase de fuerzas (Cantos Figuerola J. 1973):

$$\vec{F} = C_m \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (6)$$

Donde:

C_m =Constante magnética de proporcionalidad que depende del medio en el que están situados los polos.

r^2 = Distancia entre los polos.

q_1 y q_2 = Intensidad de los polos magnéticos.

b) Unidad de medida.

La unidad de intensidad magnética es el Tesla (T) en el sistema Internacional (SI). Un T equivale a 10^4 gauss, por lo que en Geofísica esta unidad es demasiado grande, se maneja comúnmente el nano tesla (nT), que equivale a 10^{-9} .

En el sistema Cegesimal la unidad de medida es el Oersteds que define como el campo creado por un poco magnético de intensidad unidad a 1 am de distancia (Cantos Figuerola José, 1973).

c) Susceptibilidad de las rocas.

La susceptibilidad de las rocas definida por k es la propiedad que tienen las rocas y minerales a ser magnetizados, influencia que se tiene por el campo magnético definido con H. La cantidad de magnetización que tienen las rocas está definida por I y su relación se puede describir con la siguiente ecuación (Ec. 7):

$$I = kH \quad (7)$$

Todas las rocas pueden generar campos magnéticos a nivel atómico, por lo tanto, se pueden clasificar en tres partes: paramagnético, con susceptibilidades positivas (olivinos, piroxenos, granate, biotita); diamagnético, con susceptibilidad negativa o débil (cuarzo, calcita, halita, yeso); y ferromagnéticos con susceptibilidades altas (hierro, cobalto, níquel).

TABLA 2. Tabla de susceptibilidad de algunas rocas. Los valores se expresan en unidades cegesimales. (Cantos Figuerola J. 1973)

Magnetita	0.3 a 0.8 Oersted
Granito	$(28 \text{ a } 2700) * 10^{-6}$ Oersted
Diorita	$46.8 \text{ a } 10^{-6}$ Oersted
Gabro	$(68 \text{ a } 2370) * 10^{-6}$ Oersted
Arenisca	$16.8 * 10^{-6}$ Oersted
Dolomía	$14 * 10^{-6}$ Oersted
En el vacío	0 Oersted
Calcita pura	$-1 * 10^{-6}$ Oersted
Grafito	$-10 * 10^{-6}$ Oersted

d) Método aeromagnético.

Este método tiene muchas ventajas como el descubrimiento de minerales magnéticos, permite calcular la profundidad del basamento con respecto a la altura en la que se hace el vuelo, por lo tanto, determina los espesores sedimentarios; también es útil para un mejor levantamiento geológico de una región.

Al volar a una distancia considerable del suelo, este método elimina los errores que producen algunos disturbios locales. También tiene la ventaja de ser accesible para hacer mediciones en zonas boscosas, de pantanos, selvas y desiertos, lo cual en tierra sería costoso o hasta imposible (Figura 9).

La altura con la que se hacen las mediciones aéreas varía según el propósito que se esté buscando, que van desde los 150m hasta los 100m de altura.

Resumiendo, la estabilidad y sensibilidad del magnetómetro aéreo hace de este método más efectivo, con excelentes resultados, aparte de que hace mediciones en la componente total en la dirección del campo magnético y el elemento medidor se mantiene siempre paralelo al vector magnético.



FIGURA 9. Equipo de aeromagnética. Imagen obtenida del SGM.

3.2 MÉTODOS RADIOMÉTRICOS.

3.2.1 RADIOACTIVIDAD.

La radioactividad es la facultad que tienen los núcleos de algunos elementos para transmitir radiaciones, por lo tanto, a estos se les llama radioactivos. En este proceso, el átomo original queda transformado en un nuevo elemento, que a su vez podría ser o no radioactivo (Cantos Figuerola J. 1973).

En 1896 el físico francés Henri Becquerel realizó experimentos con fluorescencia natural utilizando sal de uranio sobre una placa fotográfica cubierta con papel obstruyendo la luz, comprobando así que la placa se ennegrecía. Después de varios experimentos con el uranio, llegó a la conclusión que este compuesto emitía una radiación capaz de atravesar sustancias opacas a la luz.

Posteriormente entre 1898 y 1899, los esposos Pierre Curie y Marie Curie descubrieron dos nuevos elementos: el radio y el polonio, con los cuales se efectuaba un fenómeno con aún más intensidad.

3.2.2 RADIACIONES.

El físico británico Ernest Rutherford comprobó que las sustancias que se utilizaban contaban con diferentes tipos de radiaciones a las cuales logró clasificar de la siguiente manera: *Alfa* (α), *Beta* (β) y *Gamma* (γ).

Estas radiaciones α , β y γ poseen diferentes características y constitución entre sí al momento de ser emitidas por la desintegración de los elementos radioactivos.

a) Radiaciones α . Son núcleos ionizados compuestos de helio. Al carecer de electrones, su carga es positiva compuesta por 2 protones, 2 neutrones y electrones con una masa de 4 uma.

Se generan en desintegración radioactiva, proceso que es conocido por la ley de Soddy: *“cuando un átomo radioactivo emite una partícula α , el núcleo pierde dos cargas positivas y cuatro unidades de masa, transformándose en un nuevo átomo cuyo número atómico es dos unidades mayor y un peso atómico cuatro unidades inferior, comportándose químicamente como el elemento situado dos lugares anteriores en la Tabla periódica”* (Cantos Figuerola J. 1973).

b) Radiaciones β . Son electrones, con carga negativa con alta energía emitidos por la desintegración radioactiva de un núcleo atómico, ocurre cuando uno de los neutrones del núcleo se disocia en un protón, que queda en el núcleo aumentando su carga, y un electrón que lo abandona.

Según la ley de Fajans, cuando un átomo radiactivo emite una partícula β , pierde una carga negativa y aumenta uno en su carga positiva, así, se transforma en un átomo con un número con una unidad superior y el número de masa no varía, lo que corresponde al elemento situado un lugar después de la Tabla periódica.

c) Radiaciones γ . Compuestas por ondas electromagnéticas, de la misma naturaleza y velocidad que la luz o los rayos X. Poseen altas energías que producen radiación ionizante capaz de traspasar la materia más profundamente que las radiación alfa y beta.

Este tipo de radiación se produce por la desexcitación de un núcleo de un estado excitado a otro con menor energía y por la desintegración de isotopos radiactivos. La emisión de la radiación γ es el resultado de un proceso de reajuste energético (Cantos Figuerola J. 1973).

3.2.3 RADIOACTIVIDAD EN LAS ROCAS.

A lo largo de toda la superficie terrestre pueden estar presentes todos los tipos de radiaciones mencionadas anteriormente, distribuidas de diferente manera de unas zonas a otras, esto como consecuencia de la distribución de los diferentes elementos que emitan estas radiaciones.

Los elementos radiactivos presentes en la superficie de la Tierra, como ya mencioné, son la causa de las radiaciones existentes tanto en las rocas como en el agua y el aire. Las mediciones de esta radiactividad se utilizan para la protección de materiales radiactivos, para el mapeo y la distribución de estructuras geológicas, también para la determinación de líneas de falla y, en algunas ocasiones y bajo varios factores, para la exploración de materiales no radiactivos.

Existen más de 200 núcleos radiactivos naturales que producen las radiaciones α , β y γ . Dentro de estos, los elementos más importantes presentes en la Tierra que producen radiación son: uranio, torio y potasio.

- a) **Uranio (U).** Este elemento se encuentra presente en la corteza terrestre en concentraciones de 2 a 4 ppm en promedio. Formas minerales separados o está presente en otros minerales de forma dispersa. El uranio está presente en minerales accesorios de rocas como el zircón, la esfena, la apatita, la monzonita, entre otros. Un gramo de uranio produce 33400 cuantos $\frac{\gamma}{s}$.
- b) **Torio (Th).** Este elemento forma compuestos de oxígeno en forma similar a los del uranio. La concentración de torio en la corteza terrestre es de 8 a 12 ppm en promedio. El torio está presente en grandes cantidades en los minerales de accesorios de rocas como la monzonita, la ortita, el zircón, la esfena, la apatita, etc. Un gramo de torio emite 17400 cuantos $\frac{\gamma}{s}$.
- c) **Potasio (K).** Está presente en la corteza de la Tierra en concentraciones de 2.5%. En un elemento que se encuentra ampliamente a lo largo de la litosfera. En rocas magnéticas y metamórficas los feldespatos potásicos como la biotita, nefelita, moscovita, flogopita, entre otros, tienen un alto contenido de potasio. Un gramo de potasio emite 3.31 cuantos $\frac{\gamma}{s}$.

Hay una gran diferencia de radiaciones entre los diversos tipos de sustancias o rocas en la Tierra. El contraste que hay entre las radiaciones que son emitidas en cada caso nos permitirá deducir el tipo de roca que podemos encontrar en el subsuelo, este o no visible a causa de recubrimientos. Al hacer mediciones con equipos detectores se permitirá ver los incrementos locales de emanaciones en lugares donde haya especies de minerales con abundante cantidad de uranio, torio y potasio, los cuales también pueden ser acompañados por otros paragenéticos aprovechables, y que puedan yacer en bancos, filones o depósitos.

TABLA 3. Tabla de contenidos medios de Uranio y Torio en rocas y sustancias naturales en gramos por tonelada. (Cantos Figuerola José, 1973)

SUSTANCIA	URANIO (g/tm)	TORIO (g/tm)
Agua de mar	0.00015 a 0.0016	
Fosfatos marinos	0.001 a 0.065	
Sedimentos marinos	0.65 a 1.07	

Aguas de campos petrolíferos	10	
Petróleo	100	
Rocas ígneas básicas	0.96	3.9
Rocas ígneas intermedias	2.61	9.97
Rocas graníticas	3 a 5	13.4
Diabasas	0.83	2
Basaltos	0.83	5
Calizas	1.3	1.1
Rocas sedimentarias	1.2	
Rocas de origen arenoso		5.4
Rocas de origen arcilloso		12
Arcillas pizarrosas		10.1

3.2.4 DESINTEGRACIÓN RADIATIVA.

La desintegración radiactiva es la disminución de la intensidad de la radiación de cualquier material que sea radiactivo, todo esto con el paso del tiempo y debido a la emisión espontánea de radiación a partir de un núcleo atómico.

El núcleo que atraviesa la desintegración es conocido como radionucleido padre y el proceso por el cual pasa produce como mínimo un nucleido hijo.

Hay tres tipos de procesos de desintegraciones: a) desintegración alfa: Esta ocurre cuando el núcleo suelta un núcleo de helio; b) desintegración gamma: cuando la desintegración NO da lugar a ninguna transmutación nuclear, es decir, la energía del núcleo excitado es emitida como un rayo gamma; y c) Fisión nuclear: esta ocurre cuando el núcleo se divide en dos o tres núcleos hijos más pequeños.

3.2.5 ESPECTRO DE RAYOS GAMMA NATURALES.

Son tres fuentes de radiactividad natural las que existen en el planeta: Potasio, Torio y Uranio. Estos tres isótopos radiactivos emiten rayos gamma con diferentes niveles de energía. El resultado de espectroscopia de rayos gamma se presenta en totales y las fracciones de potasio se representa en porcentaje (%), el torio y el uranio en partes por millón (ppm).

La espectrometría de rayos gamma consiste en la medición y registro de estas tres fuentes de radiactividad natural, las cuales son liberadas por formaciones rocosas en campo.

Los rayos gamma se muestran como ondas electromagnéticas que son creadas por fotones de alta frecuencia. Este tipo de ondas tienen una gran cantidad de energía que las hace capaces de atravesar la materia sólida. Durante el viaje estas crean partículas eléctricas (iones) que son utilizadas para captar la radiactividad del material el cual atraviesan.

En Geofísica, los estudios de espectrometría de rayos gamma nos ayudan a saber información de los primeros centímetros de la superficie con lo cual se puede llevar a cabo un mapeo geológico del área con las variaciones del contenido de uranio, torio y potasio en formaciones rocosas. También son muy útiles para la detección de áreas con alteración hidrotermal.

3.2.6 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.

La radiación natural puede provenir de fuentes diferentes como la radiación cósmica que proviene de fuentes externas a la tierra, o las de nucleidos primordiales de origen terrestre; pero, además de estas, existen radiaciones artificiales producidas por reacciones nucleares o aceleradoras de partículas. Estas fuentes de radiación pueden ser de partículas cargadas o de radiación electromagnética.

La radiación electromagnética, que es de nuestro interés, funciona mediante la interacción de fotones (gamma y X), producen efectos en la materia que originan como resultado ionizaciones. Los principales efectos son conocidos como:

- a) Efecto fotoeléctrico. EL fotón incidente colisiona con otros electrones del átomo cediendo toda su energía, lo que provoca la expulsión de dicho electrón.
- b) Efecto Compton. El fotón se dispersa, su energía se reduce y hace que el átomo se ionice.
- c) Creación de pares. El fotón incide con energía alta, lo que provoca que el fotón desaparezca al pasar cerca del núcleo y se origina un par de electrón-positrón.

3.2.7 MEDICIÓN DE RADIATIVIDAD.

La radiactividad se puede medir por medio de diferentes métodos como: la detección, la prospección en superficie, prospección aérea y por sondeos.

En campo podemos encontrar formaciones rocosas con elementos como Uranio, Torio y productos de desintegración de estos dos lo cual genera una radiactividad mínima conocida como *ruido de fondo local* (Cantos Figuerola J. 1973), que es considerada como una medida base, donde a partir de esta se consideran valores altos como anomalías positivas.

Se comienza un recorrido por el área de interés, yendo por caminos o senderos, con el equipo detector capaz de captar las manifestaciones de radiación en contraste. Conforme se hace el recorrido se hacen anotaciones de las mediciones o un croquis provisional que muestre las mediciones con anomalías.

Los recorridos pueden realizarse a pie o en un vehículo con paradas en puntos previamente seleccionados o mapeados. Se coloca el equipo en superficie y se toman las mediciones deseadas (en nuestro caso de 10 a 12 mediciones por punto) de torio, uranio y potasio.

Estos datos son examinados y procesados en el laboratorio, cambiando las unidades de medida a conveniencia, graficando los resultados y finalmente cuando se tienen todos los perfiles o puntos de medición completos se hace un mallado para obtener un mapa de contrastes para cada elemento radiactivo.

3.3. MÉTODO DE RADÓN.

El Radón es un gas radiactivo de origen natural que podemos encontrar en el subsuelo, formaciones rocosas y el agua. Este gas emana de manera ascendente por medio de fallas y fracturas hasta llegar a la superficie.

El monitorio o medición de la concentración de radón en el subsuelo nos es útil como herramienta geofísica, ya que nos ayuda a encontrar la existencia de fenómenos tectónico - sísmico - volcánicos.

Este gas es producto de la desintegración del Radio Ra^{226} de la cadena radiactiva del Uranio U^{238} y su unidad de medida es Bq/m^3 .

3.3.1 PRINCIPIOS DE MÉTODO.

Como ya mencionamos anteriormente, el gas Radón es de fuente natural, producto de la desintegración del Uranio, elemento que se encuentra en pequeñas cantidades en el subsuelo y formación rocosas.

La importancia de este método como parte de la geofísica nuclear es su empleo como herramienta para registrar la ocurrencia de eventos sísmicos por medio del registro de anomalías de la cantidad de radón en el subsuelo generado por movimientos en el terreno como vulcanismo o hidrotermalismo.

El radón es un gas noble que emite partículas alfa. También existen isotopos radiactivos como el torón Rn^{220} también emisor de partículas alfa (Peña et al., 2006).

3.3.2. GEOLOGÍA DE RADÓN.

3.3.2.1. FORMACIÓN DE RADÓN.

El radón se origina por la desintegración de los átomos de radio dentro de los granos de la roca que contiene cantidades de uranio. Cuando el radón se libera de los granos minerales contenidos en la formación rocosa o el subsuelo migra a través de espacios intergranulares por medio de difusión o arrastre (Peña et al., 2006).

La mayor cantidad de radón se concentra en el suelo y subsuelo, hasta 1 metro de profundidad, de donde posteriormente sale hacia la atmosfera. En materiales como arenas y gravas hay mayor emanación que en materiales compactos como la arcilla, ya que es menos permeable. En conclusión, podemos encontrar mayor concentración de radón en zonas graníticas que en zonas arcillosas o calcáreas.

3.3.2.2. MOVIMIENTO DE RADÓN.

Una vez que el gas Radón es emanado por diferentes tipos de minerales, su movimiento ascendente hacia la superficie y acumulación en el aire que respiramos es controlado por:

- a) Las características transmisoras del suelo y/o subsuelo (incluyendo porosidad y permeabilidad).
- b) La naturaleza de los fluidos portadores (dióxido de carbono y agua subterránea).
- c) Factores meteorológicos como presión atmosférica, humedad relativa, precipitación y vientos.
- d) El ambiente geológico-estructural, sismo-tectónico e hidrogeológico dominante. **(Mingorance, y otros, 2018).**

La *Exhalación* es denominada como el parámetro que controla la cantidad de gas que sale de la roca fuente del radón y la *Emanación* sucede cuando el radón está en movimiento entre los poros de la formación rocosa o subsuelo hasta llegar completamente a la superficie.

Las fracturas y fallas del suelo ayudan con la emanación de este gas, pero también disuelto en agua puede migrar a lo largo de fracturas o cavernas en distancias largas y su velocidad es dependiente del flujo que lleve el fluido.

3.3.3 MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN SUELO.

La magnitud con la que se mide la radiactividad por desintegración del radón es el Becquerel (Bq) y para el caso de la concentración de esta radiactividad en un espacio cerrado se usa el Becquerel por metro cubico que expresa el número de desintegraciones en un metro cubico de aire **(Mingorance, y otros, 2018)**.

La medición de la concentración de este gas se hace por medio de equipos electrónicos portátiles que cuentan con una alta sensibilidad para detectar el radón en áreas de gran perímetro, todo esto sin la interferencia de otros tipos de gases.

Se marcan puntos previamente en un mapa o se realiza un croquis previo a salir a campo donde localizaremos los puntos de medición de radón. El perfil se puede realizar en caminos o senderos donde sea accesible el paso en camioneta o a pie. Se coloca el equipo en el suelo, se hace un pozo pequeño en el suelo y se introduce una manguera con un filtro, la cual nos ayudará a absorber el gas del subsuelo donde posteriormente será medida su concentración con el equipo.

Los datos se procesan en el laboratorio para hacer graficas que nos muestren el contenido de radón y torón en el área y por último realizar un mapeo de contraste en toda la zona estudiada.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.

Para la realización de este proyecto se realizó una metodología apoyada de Métodos Potenciales: Magnetometría (aérea y terrestre) y gravimetría (terrestre y satelital) con apoyo de Radiometría y medición de Radón en una pequeña zona del sur del Campo Volcánico Los Encinos. Todo esto para obtener las propiedades físicas en el área y determinar las estructuras y fenómenos dominantes que se encuentren presentes, lo cual nos va a permitir hacer una caracterización ideal del medio posteriormente apoyada con la geología.

4.1 MAGNETOMETRÍA.

4.1.1 ADQUISICIÓN DE DATOS.

Se obtuvieron datos a través de magnetometría terrestre realizada en 9 campañas donde se obtuvieron 821 puntos de medición distribuidos en 20 perfiles de 2 km cada uno. Las mediciones se realizaron cada 50 m, tomando en cuenta que había levantamientos que se hicieron un poco menos o más de los 50 m debido a la topografía del terreno donde ya no había acceso.

Para el levantamiento terrestre se utilizaron 3 magnetómetros: 2 equipos GEM Systems GSM-19 y un equipo Geometrics G-857. Las campañas estuvieron compuestas por 2 personas y 1 operador en la estación base (Figura 10).

FIGURA 10. Equipo de magnetometría GEM Systems GSM-19.



Los datos obtenidos de la aeromagnética fueron del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Se utilizaron los datos. grid de anomalías magnéticas de América del Norte generados en el 2002 registrados con número de serie 2002-414 que contiene la intensidad total residual del campo magnético terrestre.

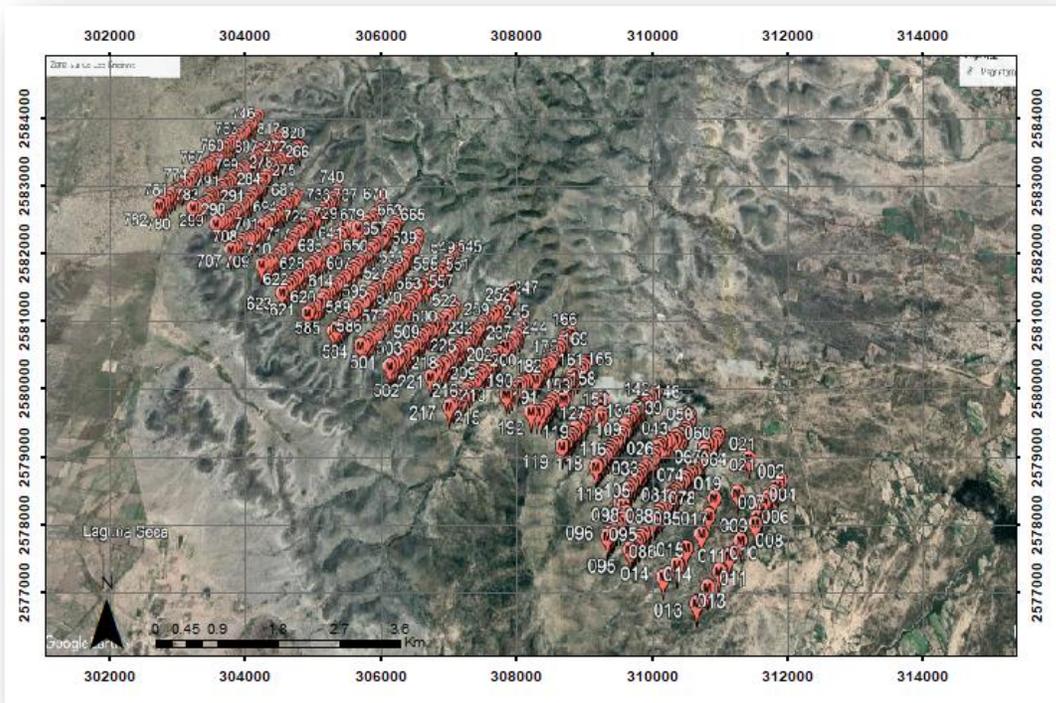


FIGURA 11. Distribución de puntos de levantamiento magnético.

4.1.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.

Los datos de magnetometría aérea que se obtuvieron de USGS son valores que corresponden a el campo magnético residual, por lo cual para obtener un mapa de anomalías magnéticas de la zona estudiada los datos se ingresaron al software Oasis Montaj versión 8.4 de Geosoft, donde fueron manipulados y procesados con reducción al polo, esto para borrar anomalías asimétricas causadas por la inclinación y así tener un mejor resultado de las anomalías causadas por los cuerpos o formaciones del subsuelo. Finalmente, a este proceso se le aplico el filtrado de señal analítica, 1ra. y 2da. derivada en X, Y y Z.

Para el procesado de los datos magnéticos terrestres se realizó un procesado previo donde se colocaron los datos obtenidos en campo (coordenadas, altura, Campo

Magnético Total [CMT], y notas) ordenados cronológicamente de acuerdo al día que fueron obtenidos. Con estos datos crudos se realizó una corrección de 22 nT entre un magnetómetro y otro para nivelar el dato. Con esto se procede a hacer la corrección por variación diurna y la corrección geomagnética.

Lo siguiente a realizar es manipular y procesar los datos en el software Oasis Montaj versión 8.4 de Geosoft. Aquí con ayuda del IGRF (CMT-IGRF) obtenemos el Campo Magnético Residual (CMR) con el cual estaremos sacando la reducción al polo para después realizar el filtrado con señal analítica, 1ra. y 2da derivada en X, Y y Z para su posterior interpretación.

4.2 GRAVIMETRÍA.

4.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS.

Se obtuvieron datos de gravimetría terrestre a través de 3 campañas realizadas en campo de donde se obtuvieron 92 puntos de medición a lo largo de 10 perfiles. Estos puntos de medición se hicieron cada 500 m, tomando en cuenta que hubo puntos donde las distancias sobrepasaban o iban a menos de los 500m debido a la topografía de terreno donde ya no había acceso.

Para el levantamiento se utilizó el equipo marca Scintrex Autograv CG-5, basado en un microprocesador con rango de medición de más de 8000 mGals y resolución de 0.001 mGal. La campaña estuvo compuesta por 3 personas, 1 operador y 2 ayudantes (Figura 12).

Los datos de gravimetría del área regional se obtuvieron de 751 puntos de medición terrestre y datos del modelo gravimétrico mundial WGM 2012 que utilizo datos del satélite GOCE (Figura 13).

FIGURA 12. Equipo de gravimetría Scintrex Autograv CG-5.



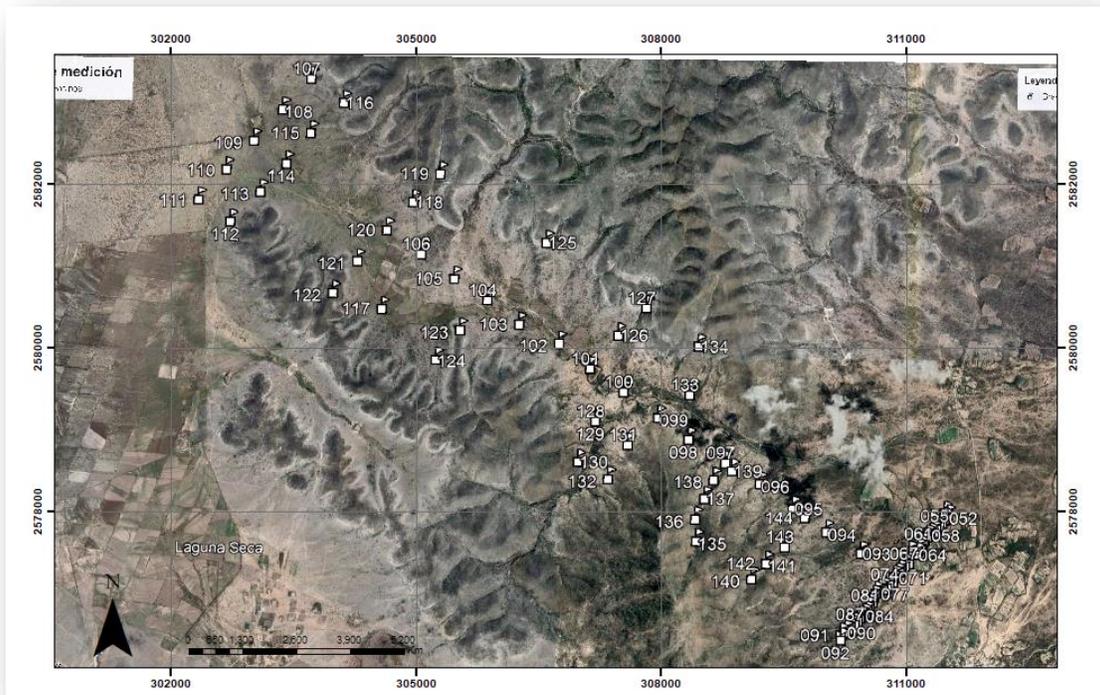


FIGURA 13. Distribución de puntos de levantamiento gravimétrico.

4.2.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.

Los datos de gravimetría satelital corresponden a un área comprendida en latitud $22^{\circ} - 24^{\circ}$ N; longitud $100^{\circ} - 102^{\circ}$ W. A los valores de Aire libre se le resta la corrección de Bouguer para obtener la anomalía de Bouguer Simple, utilizando una densidad de 2.67 g/cm^3 , elevación geoidal y coeficiente 0.04172 . Se obtuvo también la anomalía isostática, calculada de acuerdo al modelo de Airy-Heiskanen ($T_c=30 \text{ km}$).

Los datos de la anomalía de Bouguer Simple se procesaron en el software Oasis Montaj 8.4 de Geosoft donde se hizo la corrección por terreno para obtener la anomalía de Bouguer Completa.

Para los datos de gravimetría terrestre obtenidos en campo se realizó una corrección por deriva instrumental, corrección del aire libre, corrección de Bouguer y la corrección por terreno o topográfica.

Para obtener la anomalía de Bouguer residual se procesaron los datos en el software Oasis Montaj versión 8.4 de Geosoft, aplicando el filtro polinomial de segundo orden. Después de obtener el mapa de anomalía residual procedí a aplicar una serie de filtros desde la herramienta MAGMAP para obtener señal analítica, 1ra. y 2da. Derivada en X, Y y Z.

4.3 RADIOMETRÍA.

4.3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS.

Los datos radiométricos se obtuvieron de 10 puntos de medición aleatorios distribuidos a lo largo de la zona estudiada. El tiempo de muestreo era cada 1 segundo por medición, dando en total de 10 a 12 segundos.

La adquisición de los datos se hizo a través de un espectrómetro RS 125 Super-SPEC, un equipo con un gran detector para búsqueda o estudio, ensayo de lectura directa, modo escaneo y almacenamiento de datos. La campaña estuvo compuesta por 2 personas: un operador y un ayudante (Figura 14).



FIGURA 14. Equipo de espectrometría de rayos gamma RS 125 Super-SPEC.

4.3.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.

Se registraron los datos obtenidos en campo en un documento Excel para tener un control con coordenadas, número de punto de medición, niveles medidos de Uranio, Torio y Potasio. En muchos casos los niveles de cada elemento son medidos en cuentas por segundo (cps), pero con el espectrómetro RS 125 los niveles de potasio se dan directamente en porcentaje (%), el uranio y el torio en partes por millón (ppm), de esta manera se evita el proceso de conversión.

Ya con estos valores obtenidos se procesan los datos en el software Oasis Montaj de Geosoft, donde se realiza un mapa con la distribución de cada uno de estos elementos a lo largo de toda la zona estudiada para mostrar un contraste notorio entre niveles altos y bajos de uranio, torio y potasio.

4.4. RADÓN.

4.4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS.

En la adquisición de los datos de este proyecto se utilizó el equipo RAD7 (Figura 15). Se muestrearon 10 puntos diferentes dispersos en la zona de estudio, los puntos de medición están situados en las mismas coordenadas de los puntos de Rayos Gamma (Figura 16).



FIGURA 15. Equipo RAD7.

El muestreo realizado en cada punto de medición tiene una duración aproximada de 20 minutos, donde el equipo va leyendo y guardando los niveles de Radón y Torón que se encuentran en el subsuelo. La campaña estuvo compuesta por dos personas: un operador y un ayudante.

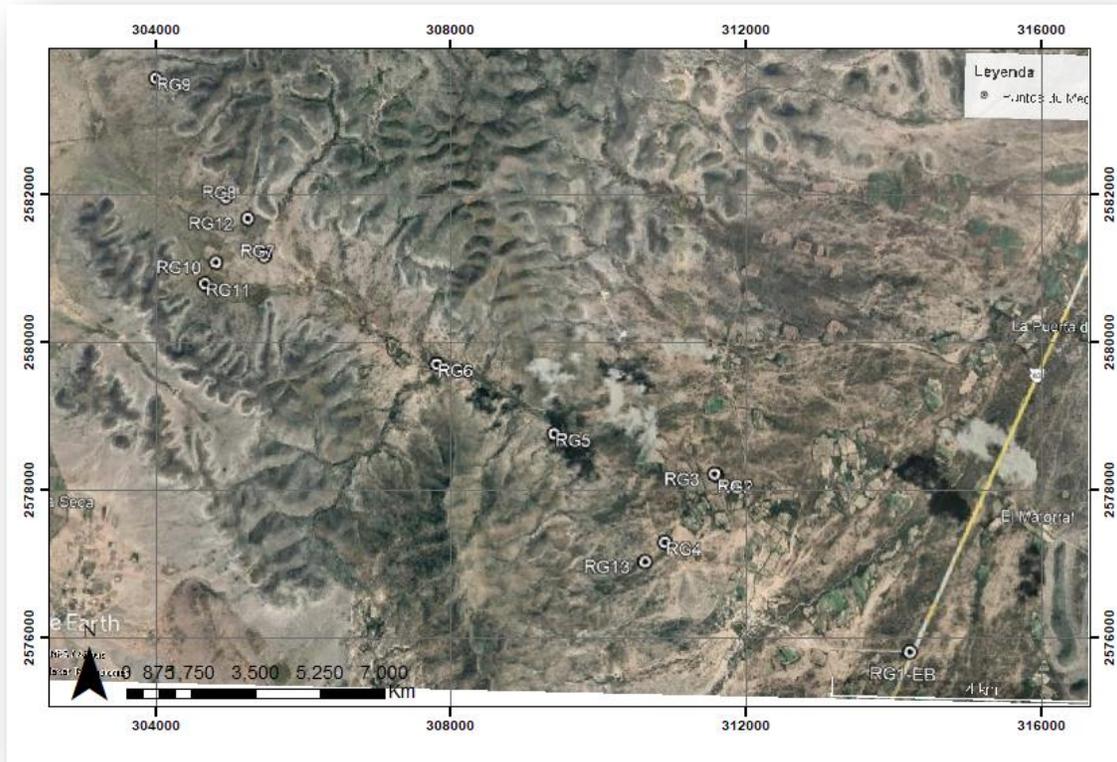


FIGURA 16. Distribución de puntos de levantamiento radiométrico y medición de Radón.

4.4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.

De igual manera que con los elementos de rayos gamma, los datos de muestreo de Radón se registraron en un documento de Excel para tener un control con las coordenadas, fecha de adquisición de datos, numero de punto de medición y los datos obtenidos de los niveles de radón y torón. Los datos adquiridos se encuentran en Becquerel por metro cubico (Bq/m^3).

Los datos obtenidos de Radón y Torón se llevaron al software Oasis Montaj de Geosoft, donde se crearon mapas para observar mejor la distribución de niveles de radón y torón respectivamente en la zona de estudio.

4.5 GENERACIÓN DE MAPAS DE ANOMALÍAS.

Para los mapas de métodos potenciales (Magnetometría y gravimetría) se realiza un archivo con terminación *.grid* de los datos de Campo Magnético Residual (CMR) y de la Anomalía Completa de Bouguer respectivamente.

Para la realización de los mapas magnéticos se llevaron a cabo una serie de filtros explicados en el apartado 4.1.2. A continuación se muestran los mapas de la reducción al polo, filtro matemático aplicado en el módulo MAGMAP de Oasis Montaj (Figura 17 a y b).

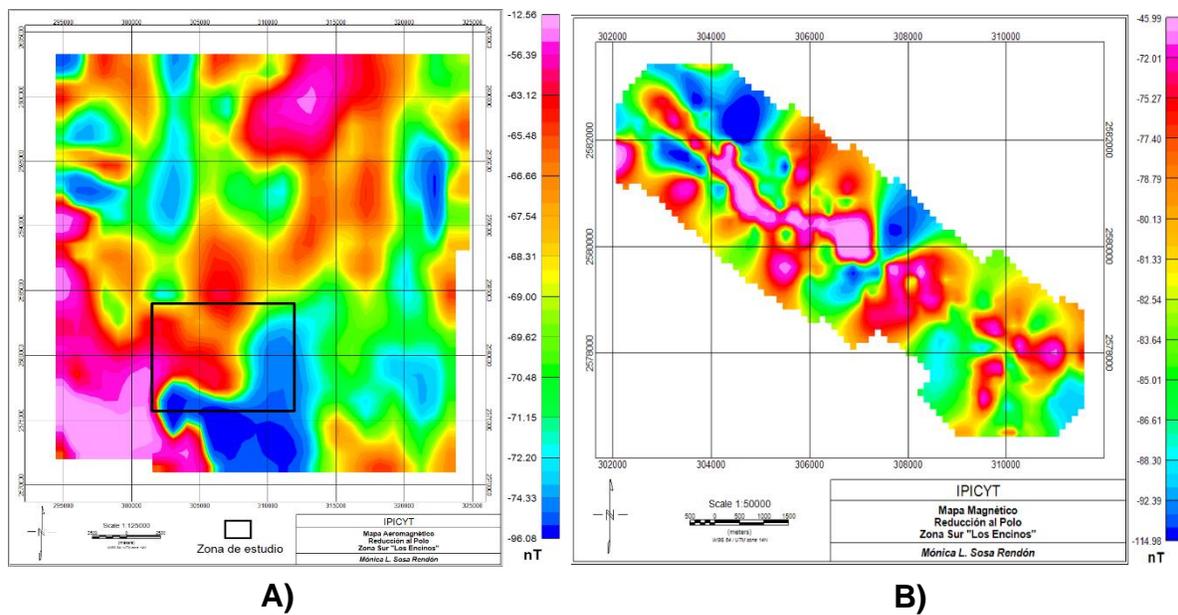


FIGURA 17. A) Mapa de reducción al Polo de Aeromagnética y B) Mapa de reducción al Polo de Magnetometría Terrestre.

Para la obtención de los mapas de gravimetría satelital y terrestres se aplicó un filtrado explicado en el apartado 4.2.2 donde obtuvimos la Anomalía Residual de Bouguer con la cual realizamos los filtrados posteriores. A continuación, se muestran el mapa de la anomalía de Bouguer completa de la gravimetría satelital en el lado izquierdo; y por el lado derecho se muestra el mapa de la anomalía de Bouguer completa de la gravimetría terrestre realizada en el área de estudio (Figura 18a y Figura 18b).

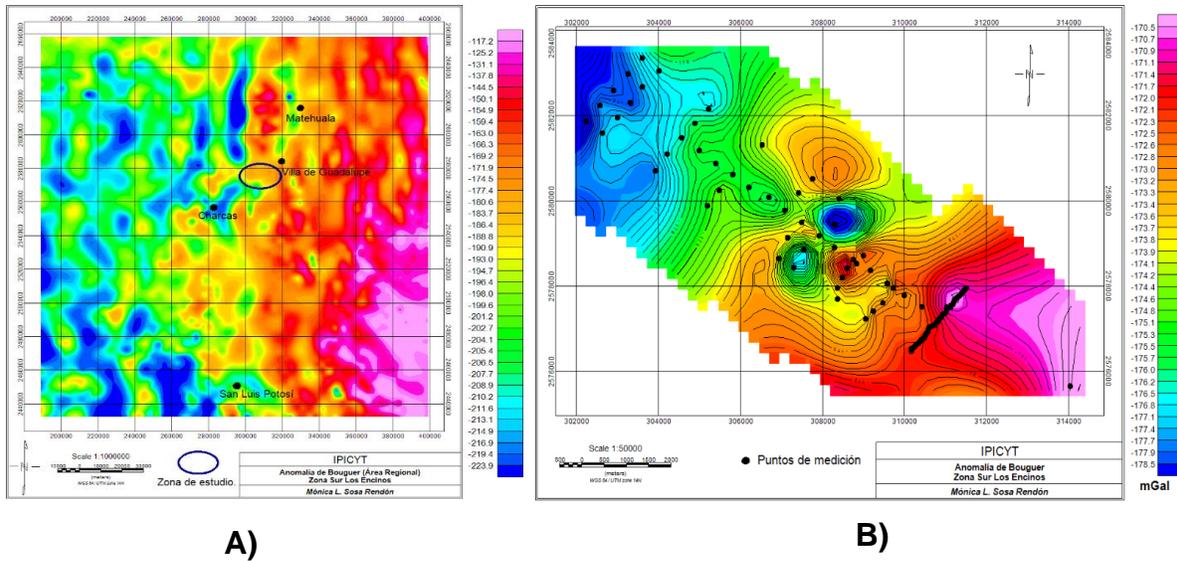


FIGURA 18. A) Mapa de la anomalía de Bouguer completa de gravimetría satelital y B) Mapa de la anomalía de Bouguer completa de gravimetría terrestre.

Se realizó también el filtrado con 1ra y 2da derivadas en X, Y y Z en los datos de ambos métodos, con lo cual podemos observar mejor el centro y los límites de las anomalías asociadas generalmente a estructuras geológicas, y también por otro lado, observar mejor algunos cuerpos y/o estructuras a poca profundidad. A continuación, se muestran algunos de estos mapas, resultado de este proceso (Figura 19 a, b, Figura 21 a y b).

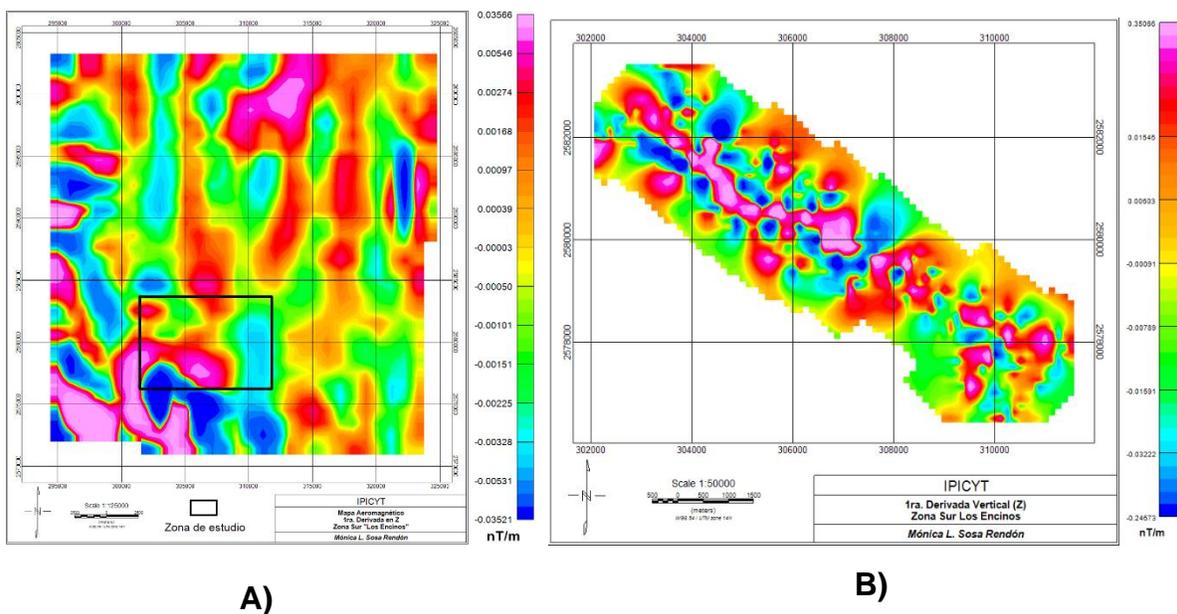


FIGURA 19. Mapa de reducción al polo con 1ra. Derivada en Z de Aeromagnética y B) Mapa de reducción al polo con 1ra. Derivada en Z de Magnetometría Terrestre.

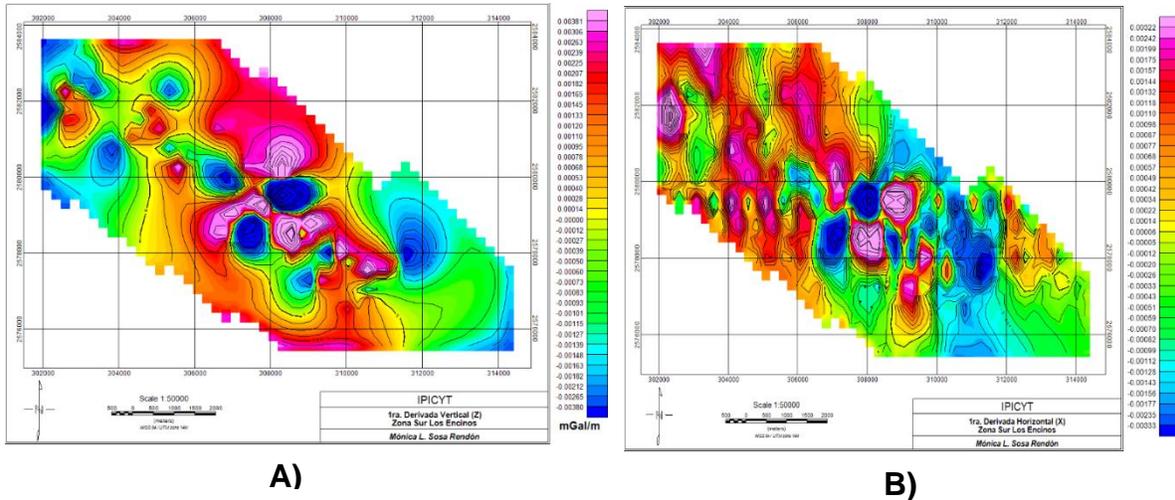


FIGURA 20. A) Mapa de anomalía de Bouguer residual con 1ra. Derivada en Z de gravimetría terrestre y B) Mapa de anomalía de Bouguer residual con 1ra. Derivada en X de gravimetría terrestre.

Ambos métodos sufren otro proceso de filtrado conocido como señal analítica, que se realiza para evidenciar más el cambio de gradiente y con esto se localizar con mayor claridad los límites de los cuerpos que generan las anomalías, es decir, nos ayuda a darnos una idea de la forma que puede tener este cuerpo. A continuación, se muestran los mapas con el filtro de señal analítica (Figura 21 a y b).

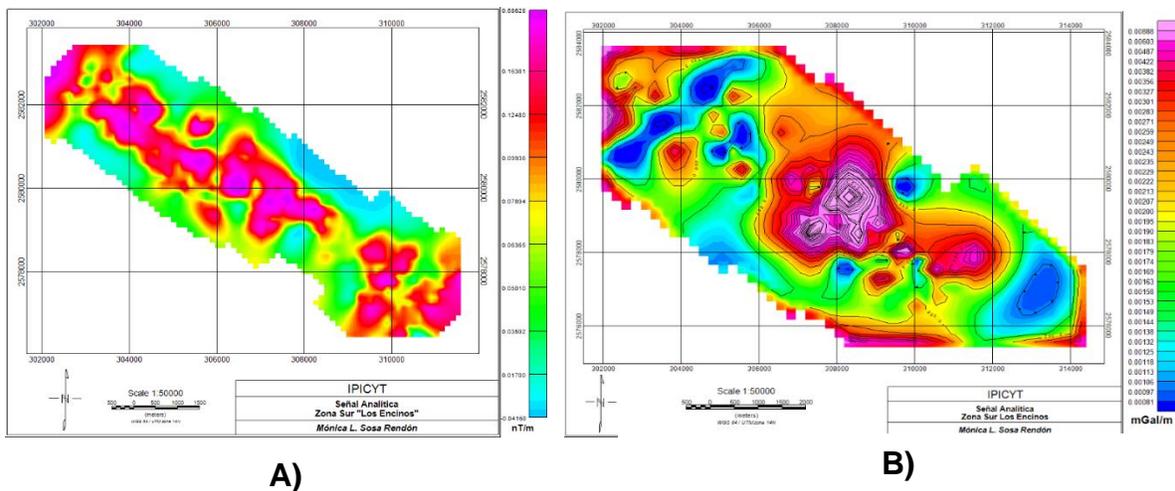
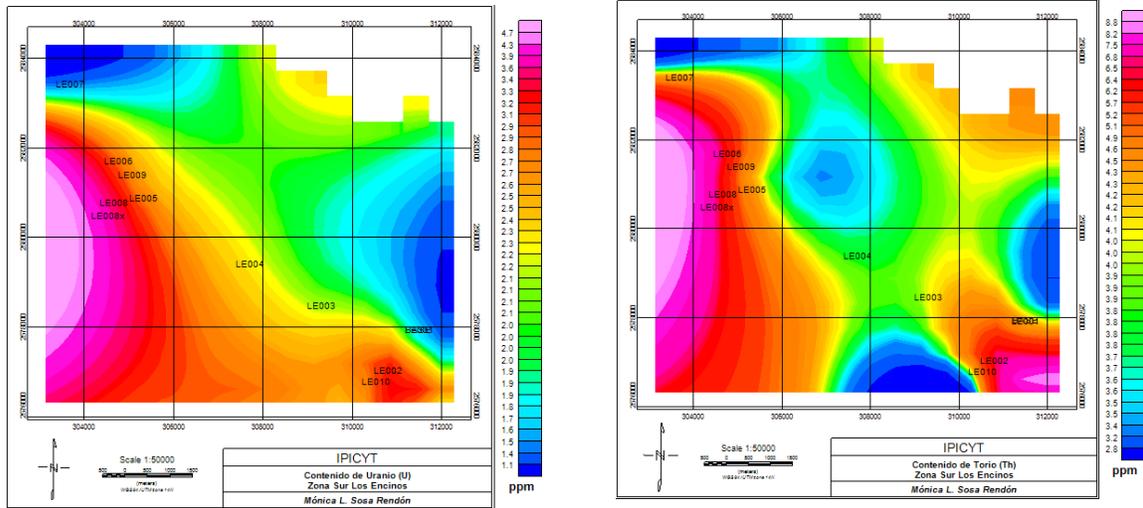


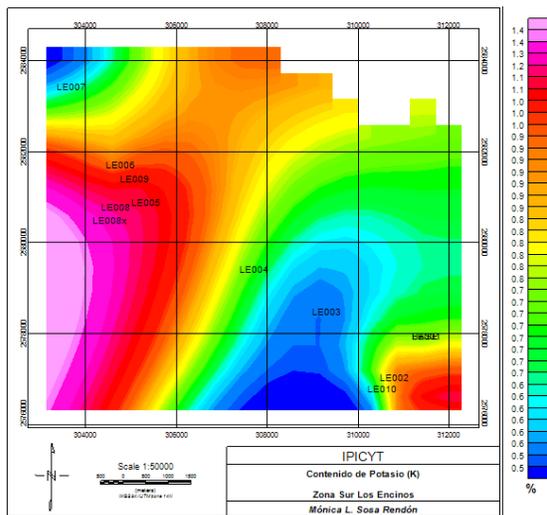
FIGURA 21. A) Mapa con filtro de señal analítica de Magnetometría y B) Mapa con filtro de señal analítica de Gravimetría Terrestre.

Para los datos de Rayos gamma se hizo una base de datos como ya se mencionó en el apartado 4.3.2. Con esta base de datos se generó el archivo *.grid* con el cual se generaron los siguientes mapas de distribución de cada elemento en el área de estudio (Figura 23 a, b y c).



A)

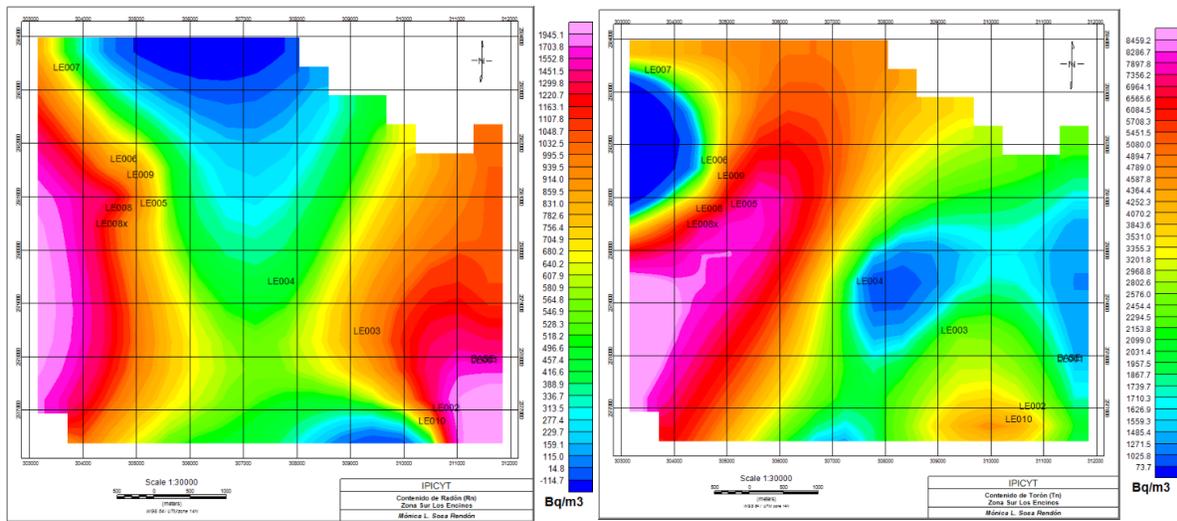
B)



C)

FIGURA 22. A) Mapa de Uranio (ppm). B) Mapa de Torio (ppm). C) Mapa de Potasio (%).

Los datos obtenidos del muestreo de radón y torón en la zona se metieron a Oasis Montaj creando una base de datos para posteriormente hacer el archivo .grid con el cual después hicimos los mapas de distribución de Radón y torón que se muestran a continuación (Figura 23 a y b).



A)

B)

FIGURA 23. A) Mapa de Radón y B) Mapa de Torón.

CAPÍTULO 5. INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS.

5.1 DOMINIOS GEOFÍSICOS.

Los dominios geofísicos, ya sean magnéticos y/o gravimétricos son regiones que contienen propiedades similares (o iguales). Estas propiedades pueden ser físicas y/o estructurales y nos ayudan a la caracterización de la geología en el subsuelo.

5.1.1 DOMINIOS MAGNÉTICOS.

Se realizó una delimitación de los *dominios aeromagnéticos* en el mapa con filtrado de Reducción al Polo. En este mapa se logra identificar tres dominios predominantes que fueron nombrados como DAM I, DAM II y DAM III como se muestra en la figura 24.

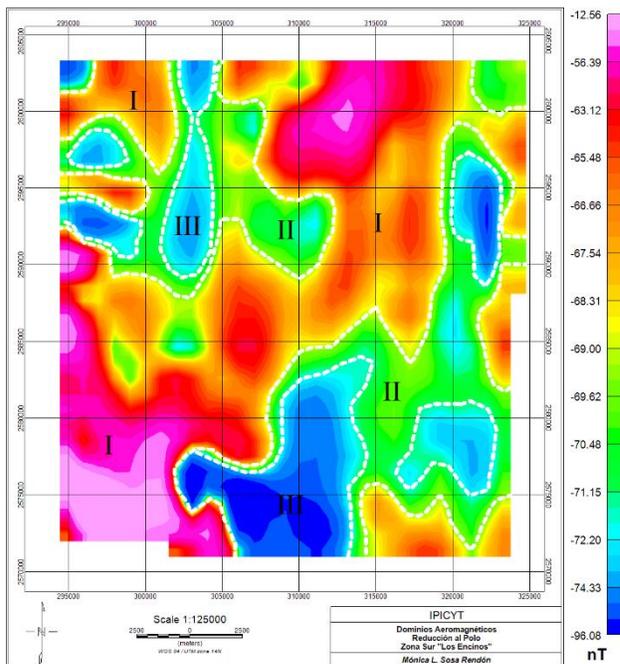


FIGURA 24. Mapa de Dominios Aeromagnéticos.

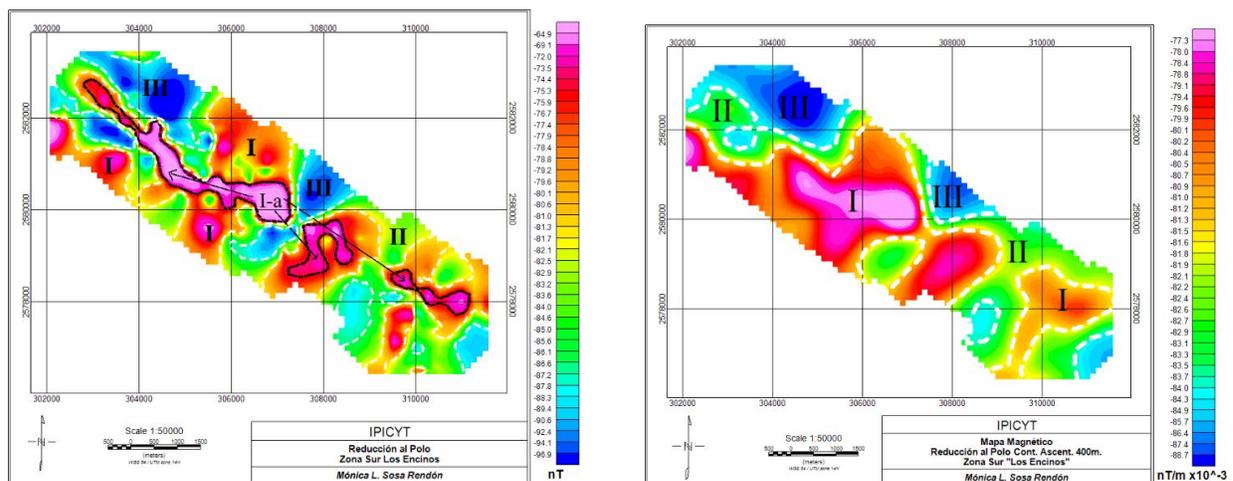
En el DAM I se identifican las anomalías más altas de -65 a -49 nT, con una orientación SO-NE con algunas partes en el este de la zona. Los dos altos magnéticos, es decir, las anomalías con valores más elevados se encuentran al suroeste en las localidades de Cerro Prieto y Laguna Seca; y en el norte en las localidades de La Maroma y Ojo de Agua de Rodríguez correspondientes a la zona sur de la Sierra de Catorce. Los altos magnéticos de la zona norte se relacionan posiblemente a la geología estructural de la zona sur de la Sierra de Catorce, donde se encuentran múltiples zonas de fallamiento normal e inverso en dirección N-S con

zonas encajonantes, y al afloramiento esporádico de roca volcánica. En la parte SO encontramos otra falla inversa con dirección N-S y en la parte centro de este dominio aeromagnético la presencia de afloramientos basálticos.

En el DAM II existe la presencia de anomalías con valores entre los -70 a -67 nT dispersas en el sureste y noroeste de la zona de estudio. En el sureste podemos encontrar localidades como El Matorral y La Puerta de la Jara Brava, y hacia el oeste el municipio de Villa de Guadalupe; y las partes del noroeste tenemos la localidad de El Astillero en la zona suroeste de la Sierra de Catorce. La geología en esta zona está cubierta por material aluvial con algunas zonas de conglomerado polimíctico del cuaternario y afloramientos basálticos del terciario pertenecientes a la Formación Los Encinos en la zona oeste del DAM II.

El DAM III cuenta con anomalías que van desde -79 a los -70 nT, situándose las anomalías más bajas en la zona sur del mapa aeromagnético y algunas en la zona este y noroeste. Dentro de la anomalía con valores más bajos en la parte sur del mapa encontramos las localidades de Rancho Alegre, San Rafael de Solís, Coloradillos y la Sierra de la Sierpe. En esta última de acuerdo a la geología estructural se encuentra un anticlinal recumbente y en toda la zona con anomalías que van desde los -79 a los -75 nT hay presencia de toba riolítica de la Formación Zaragoza y basamento del terciario en conjunto con conglomerado polimíctico. En las anomalías de la zona noroeste se encuentra la localidad de El Mogote, donde hay presencia de de basalto y conglomerado polimíctico del terciario; y más al norte la localidad de Guadalupe del Carnicero cubierta de material aluvial.

Para la determinación de los *dominios magnéticos terrestres* se realizó el mapa magnético con filtrado de Reducción al Polo y otro con Reducción al Polo con Continuación Ascendente a 400 metros. Los tres dominios predominantes es en la zona estudiada fueron nombrados como DM I, DM II y DM II como se muestra en la figura 25 a y b.



A)

B)

FIGURA 25. A) Dominios magnéticos en mapa con filtrado de Reducción al polo. B) Dominios magnéticos en mapa con filtrado de Reducción al Polo con continuación ascendente a 400 metros.

En el DM I existen anomalías con altos valores que van de -80 a -65 nT en el mapa A), agregando un subdominio nombrado como DM I-a donde se enfatiza los valores más altos que coinciden perfectamente con la falla lateral inferida que se encuentra en la zona del Puerto del Toro. En esta zona encontramos caliza del cretácico y conglomerado polimíctico del terciario cubierto por aluvial del cuaternario. Las anomalías altas que encontramos al norte pertenecientes a la Sierra El Jorongo y al sur de la falla perteneciente a la Sierra La Sierpe se estiman sean producto de zonas encajonantes. En el mapa B) se aprecia una mejor visualización del dominio con valores altos con dirección NW-SE, encontrado de nuevo los valores más altos en la zona de falla de Puerto del Toro.

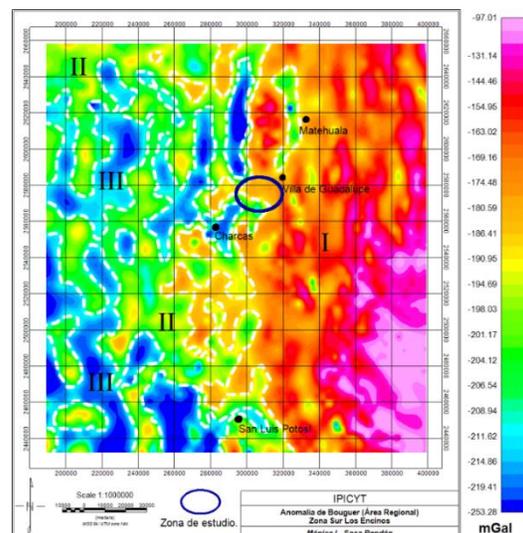
EL DM II se tiene en diferentes puntos de la zona mapeada con valores que van de -87 hasta los -81 nT donde su mayor extensión es en el sureste del mapa, al este de la Sierra La Sierpe, donde encontramos caliza del cretácico y conglomerado polimíctico del terciario.

En el DM III se tienen las anomalías con valores bajos que van de -97 a -88 nT que se localizan al noroeste y norte de la zona mapeada. Estos bajos se encuentran en la parte sur la Sierra El Jorongo donde predomina el afloramiento de caliza de cretácico.

5.1.2 DOMINIOS GRAVIMÉTRICOS.

Se realizó la determinación de *dominios gravimétricos* de acuerdo a la gravimetría satelital obtenida en el USGS con el mapa de Anomalía de Bouguer, donde se obtuvieron tres dominios denominados como DGS I, DGS II y DGS III como se muestra en la figura 26.

FIGURA 26. Mapa de dominios gravimétricos satelitales.

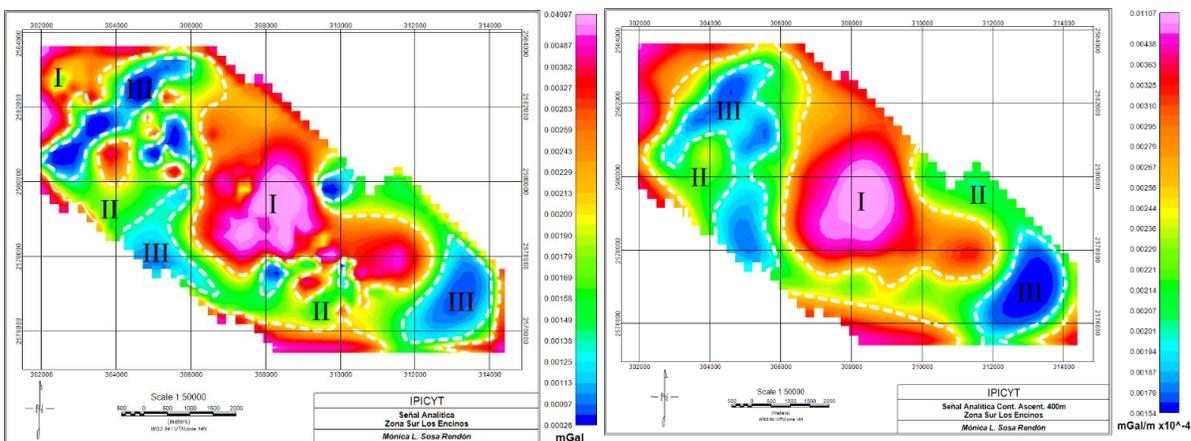


El DGS I se encuentra en toda el área este del mapa con valores que van de -186 a -97 mGal, notándose las anomalías más altas al sureste de la zona. Dentro de este dominio podemos encontrar municipios como Santa Catarina, Villa Juárez y Cerritos en el sureste; Villa Hidalgo, Villa de Arista y Guadalcázar en el centro; y el área noreste tenemos Villa de Guadalupe, Matehuala y Santa Rita. En la parte norte de la zona de estudio se encuentra un complejo sistema de fallas normales e inversas con orientación N-S pertenecientes a la Sierra de Catorce. En la parte sur de la zona de estudio encontramos basalto del triásico que viene de la Formación Los Encinos y algunos afloramientos de toba riolítica de la Formación Zaragoza. En la zona sureste del mapa hay presencia de afloramientos de roca ígnea volcánica (granito) en conjunto con caliza del cretácico; también se puede encontrar basalto y toba basáltica del cuaternario, toba riolítica, ignimbrita, latita, brecha volcánica, andesita y riolita del terciario en zonas cercanas al este a la capital potosina.

En el DGS II se tienen valores de -192 a -188 mGal dispersas en la zona oeste del mapa en donde podemos encontrar gran cantidad de aluvión con afloramientos de arenisca-lutita del cretácico y toba basáltica del terciario. En este dominio se encuentran localidades como Espíritu Santo, Las Cabras, Rancho Seco, La Yerbabuena y El Refugio.

En el DGS III están los valores más bajos que van de -253 hasta -208 mGal. Estas anomalías reflejan la presencia de roca ígnea de triásico, tales como la riolita, latita y grandes afloramientos de toba riolítica cerca de la zona oeste de la ciudad de San Luis Potosí. En este dominio encontramos localidades como Salinas de Hidalgo, Purísima del Roció, Loreto en el sur; y Santo Domingo, San Juan del Salado y Majoma en el oeste y noroeste del mapa.

El análisis y división de los dominios gravimétricos terrestres se realizaron en el mapa con filtrado de Señal Analítica y en el mapa de Señal Analítica con continuación ascendente a 400 metros. Estos dominios quedaron determinados como DGT I, DGT II y DGT III como se muestra en la figura 27.



A)

B)

FIGURA 27. A) Dominios gravimétricos terrestres en mapa de señal analítica. B) Dominios gravimétricos terrestres en mapa de señal analítica con continuación ascendente a 400 metros.

En DGT I se encuentra en su mayoría en la zona centro, NE y SW de la zona mapeada con valores que van desde 0.00206 mGal hasta los 0.04097 mGal (Figura 34). Las anomalías con valores más altos los encontramos en el centro de la zona de falla en Puerto del Toro, donde los valores gravimétricos van de 0.00438 a 0.01107 mGal como se observa en la figura 34 B). En esta zona encontramos caliza y lutita de cretácico cubierta por aluvión cuaternario. Los altos que encontramos en la zona sureste corresponden al anticlinal recumbente de la Sierra La Sierpe cubierto con caliza y conglomerado polimíctico. En el caso de la anomalía encontrada en el área noroeste encontramos Tanque Nuevo donde predomina material aluvial con algunas afloraciones de caliza-lutita.

En el DGT II tenemos valores de 0.00205 a 0.00250 mGal donde en su mayoría encontramos caliza, caliza-lutita del cretácico cubierta por conglomerado polimíctico del terciario y aluvión cuaternario en algunas zonas (SW-NE). Dentro de estas zonas de anomalías medias tenemos localidades como el noreste de Puerto del Toro, Tanque El Reparó y Santa Inés de la Oscuna.

En DGT III encontramos los valores más bajos que van de 0.00154 a 0.00204 mGal localizados en el SE Y NW del mapa. En el suroeste de la zona está la localidad de Rancho Alegre y Potrero La Paleta, cubiertas de aluvión y conglomerado polimíctico del terciario. En la zona noroeste se encuentra una cubierta de aluvión cuaternario y algunos afloramientos de caliza del cretácico.

5.2 LINEAMIENTOS GEOFÍSICOS.

Los lineamientos se utilizan para la determinación y delimitación de fallas, contactos o dirección preferencial de estructuras. Existen lineamientos topográficos y geofísicos; en nuestro se trazaron lineamientos magnéticos y gravimétricos.

5.2.1 LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS.

La delimitación de los lineamientos aeromagnéticos se realizó en el mapa de Reducción al Polo, aplicando el filtro de la primera derivada en Z. Este filtro nos ayuda a ubicar el centro y los límites de las anomalías no superficiales comúnmente asociadas a estructuras geológicas, fallas y/o cabalgaduras.

En el mapa de la figura 28 a y b se observa una parte de la zona sur del campo volcánico Los Encinos con una dirección preferencial N-S y otras zonas con dirección NW-SE.

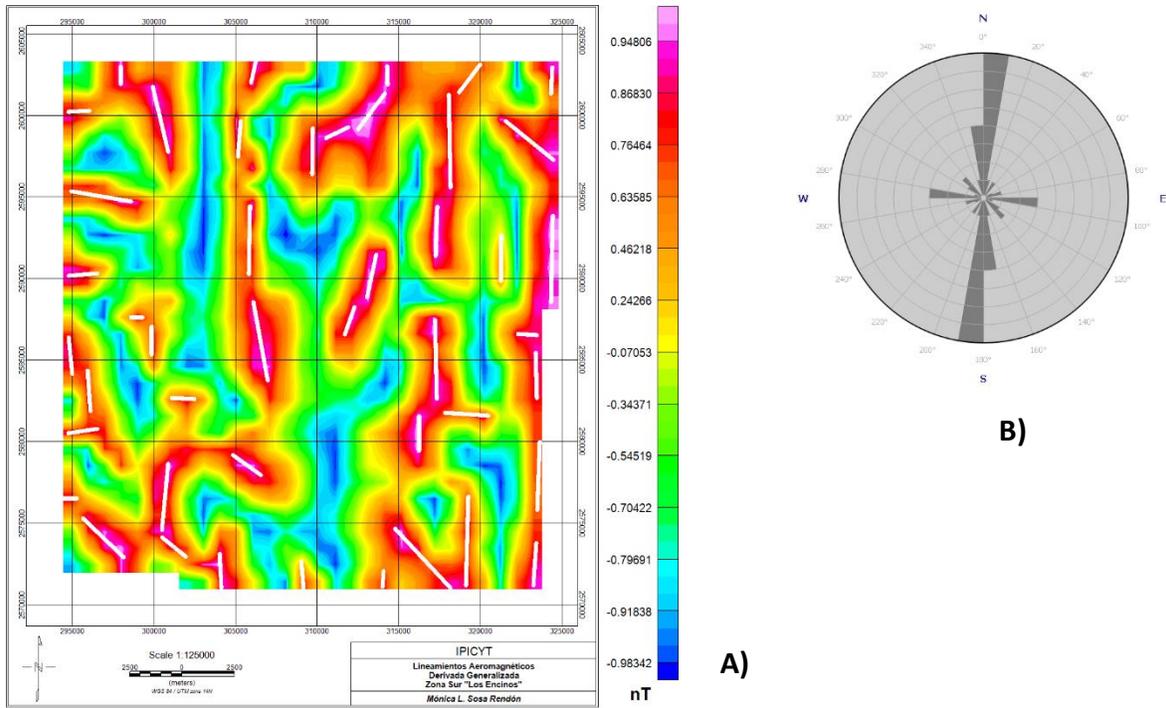


FIGURA 28. A) Mapa de lineamientos aeromagnéticos; B) Direcciones preferenciales de lineamientos aeromagnéticos.

Los lineamientos encontrados en el área centro del mapa con dirección NS, NW-SE y E-W son correspondientes a la zona de estudio donde podemos encontrar el fenómeno estructural de la Sierra de Catorce, Sierra la Sierpe y Sierra el Jorongo que forman parte de la zona sur del campo volcánico Los Encinos. Entre estas dos últimas sierras se encuentra la falla inversa recumbente de Puerto el Toro.

Se hizo una delimitación de lineamientos magnéticos terrestres en el mapa de Reducción al Polo con continuación ascendente a 400 metros (figura 29) Los lineamientos fueron marcados en algunas zonas altas de anomalías las cuales nos indican la presencia de la falla inversa de Puerto el Toro ya antes mencionada.

La dirección preferencial de los lineamientos magnéticos terrestres es NW-SE y menor cantidad en dirección NE-SW, estas últimas correspondientes tal vez a zonas encajonantes de las sierras La Sierpe y El Jorongo.

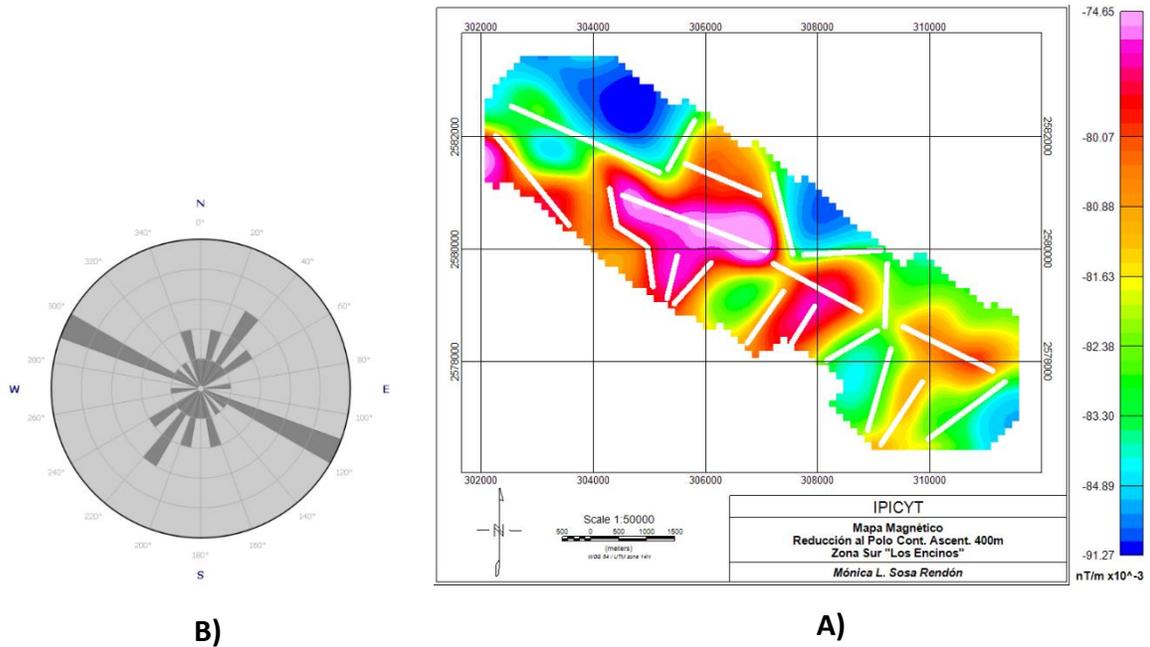


FIGURA 29. A) Mapa de lineamientos magnéticos terrestres; B) Direcciones preferenciales de lineamientos magnéticos.

Los lineamientos magnéticos fueron previamente identificados y comparados con lineamientos topográficos en las cartas topográficas y geológicas de Matehuala (F14-1) y Villa de Guadalupe (F14-A34) del Servicio Geológico Mexicano.

5.2.2 LINEAMIENTOS GRAVIMÉTRICOS.

Al mapa de la anomalía completa de Bouguer se le marcaron los lineamientos gravimétricos satelitales regionales, donde las direcciones preferenciales son NW-SE como se muestra en la figura 30 a y b.

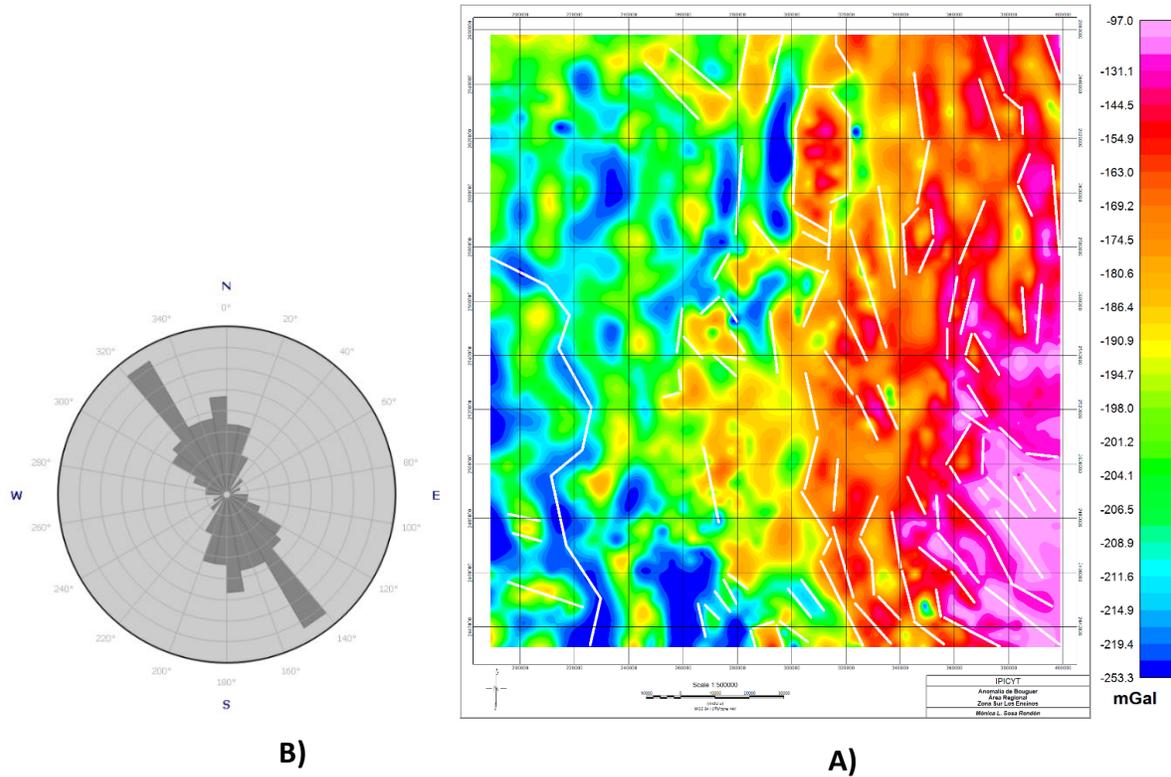


FIGURA 30. A) Mapa de Lineamientos gravimétricos satelitales; B) Direcciones preferenciales de lineamientos gravimétricos.

En la zona SW de la zona regional del sur de Los Encinos se encuentran anomalías bajas donde se registran lineamientos con dirección preferencial NNE que coincide con la mega falla que divide el terreno Guerrero y Sierra Madre.

Los lineamientos pertenecientes a la zona SE del mapa cuentan con dirección preferencial NE, donde se encuentran un conjunto de anticlinales y sinclinales de las sierras La Noria, El Tablón, Las Paradas, San Pedro, El Mezquite y La Cuchilla Atravesada. Acompañando estos fenómenos estructurales tenemos múltiples fallas normales e inversas con dirección NE (Figura 31 a y b).

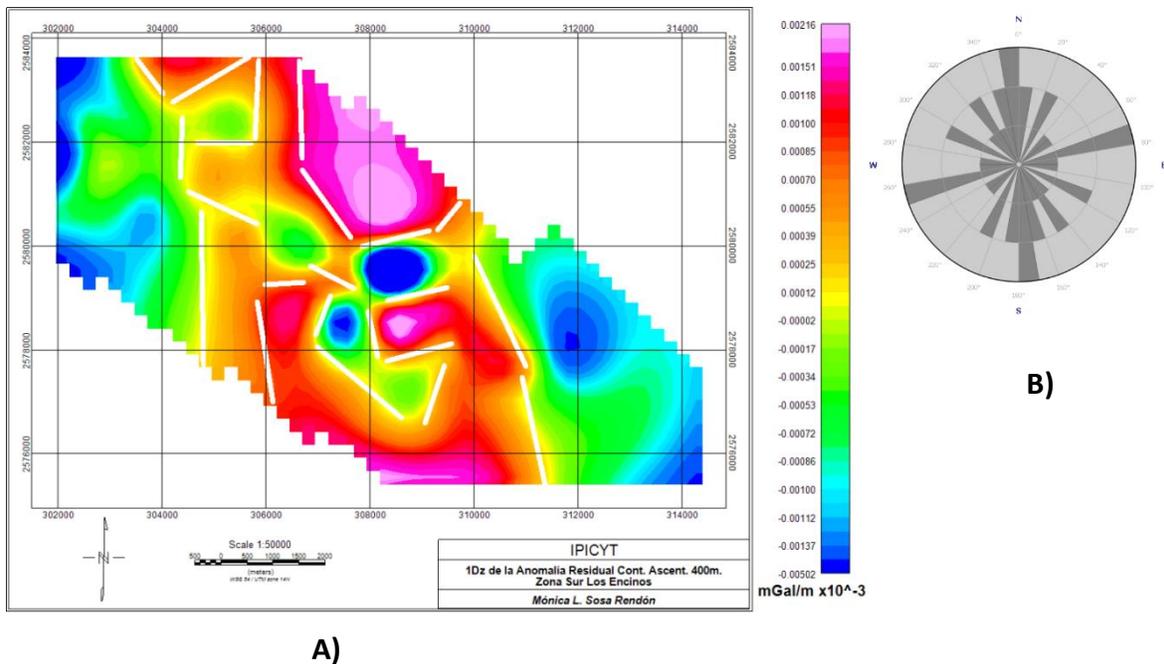


FIGURA 31. A) Mapa de lineamientos gravimétricos terrestres; **B)** Direcciones preferenciales de lineamientos gravimétricos.

Los lineamientos gravimétricos terrestres fueron marcados en el mapa de Anomalia Residual con el filtro de la 1ra. Derivada en Z con continuación ascendente a 400 metros. Según la roseta de esfuerzos la dirección preferencial de los lineamientos es N-S y NE-SW como se muestra en la figura 31.

Los lineamientos estructurales encontrados en la zona sur del mapa corresponden a anticlinales de la Sierra La Sierpe con rumbo NNW. Los lineamientos del área norte son parte del este de la Sierra el Jorongo.

5.3 ANÁLISIS ESPECTRAL.

En la figura 32 se encuentra el espectro de potencia y las profundidades estimadas divididas en tres dominios de frecuencia. El dominio A está definido por los valores que van de 0 a 0.19 ciclos/km.

El dominio B comprende un intervalo que va de 0.19 hasta 2.10 ciclos/km. Por último, el dominio C está ubicado entre los valores 2.10 a 4 ciclos/km y es conocido como ruido blanco.

Para calcular las profundidades de los dominios A, B y C se tomaron en cuenta las ecuaciones de las rectas trazadas en el espectro de potencia. Este cálculo de las pendientes me llevo a la deducción de las profundidades para cada una de las

fuentes. Todo el procedimiento se llevó a cabo en Microsoft Excel, aplicando la fórmula (Ec. 8):

$$\text{Profundidad} = m/(4*\pi) \quad (8)$$

De acuerdo a la ecuación anterior se obtuvieron las siguientes profundidades:

- 1) Dominio A = Fuente profunda:
Profundidad = -0.564 km.
- 2) Dominio B = Fuente intermedia:
Profundidad = -0.253 km.

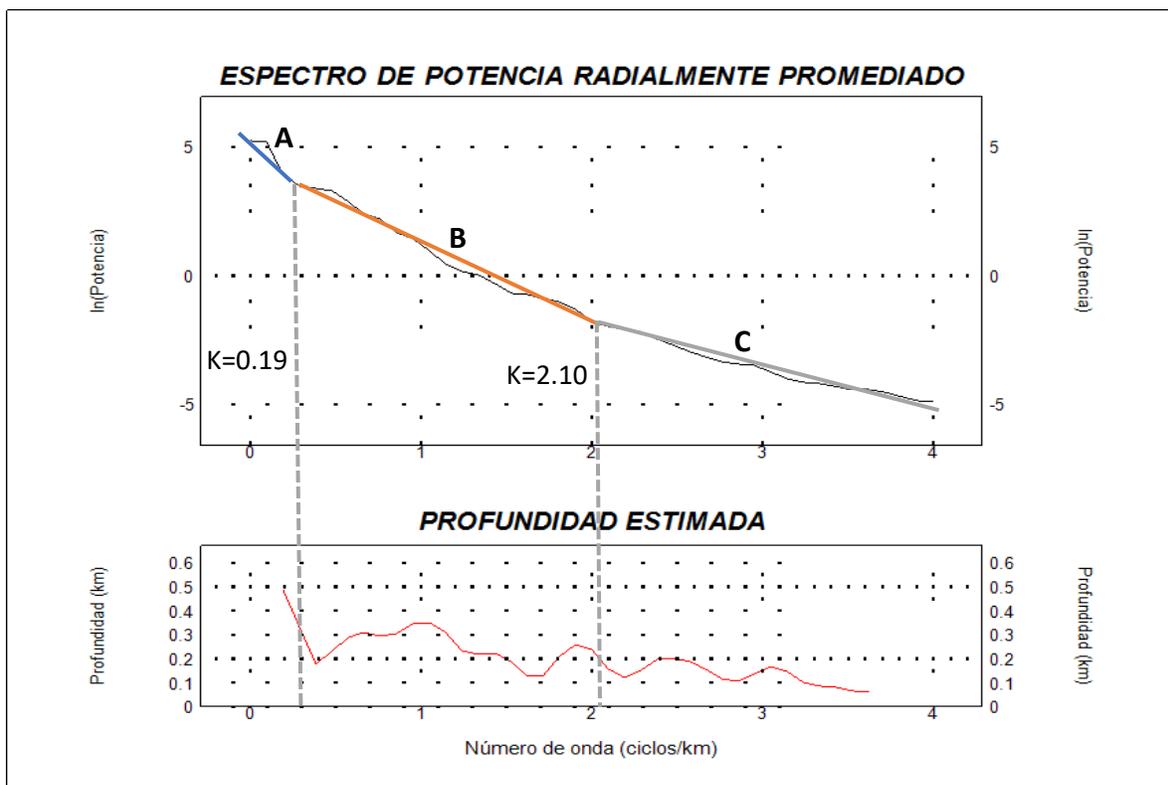


FIGURA 32. Ubicación de las pendientes en el espectro de potencia.

5.4 DECONVOLUCIÓN DE EULER.

La deconvolución de Euler (ED, por sus siglas en inglés) es una herramienta que utiliza la ecuación de homogeneidad de Euler junto con un índice estructural (SI, por sus siglas en inglés) para estimar la profundidad de las fuentes que causan las anomalías (Orihuela & García, 2015), por ejemplo, la presencia de estructuras geológicas como fallas, contactos, diques, intrusivos, etc.

A continuación, se muestra la Tabla 4 con el número de índice estructural de acuerdo a la forma de las anomalías para cada uno de los métodos potenciales utilizados en este proyecto.

TABLA 4. Tabla de índices estructurales en la Deconvolución de Euler.
(Información obtenida de Oasis Montaj Help.)

SI	Magnetic Field	Gravity Field
0	Contact / Step	Sill / Dyke / Step / Ribbon
1	Sill / Dyke	Cylinder / Pipe
2	Cylinder / Pipe	Sphere
3	Sphere / Barrel / Ordnance	N/A

En este proyecto se configuró la herramienta ED en Oasis Montaj para mostrar fuentes de anomalías con estructuras como contactos, bordes, fracturas o diques.

En la figura 33 se muestran las soluciones de ED para un índice estructural de 0, usando como base el mapa de reducción al polo. Se encontraron profundidades estimadas que varían desde los 500 a los 2000 metros, y su respuesta magnética está relacionada a un tipo de contacto o bloque de falla con dirección NW-SE.

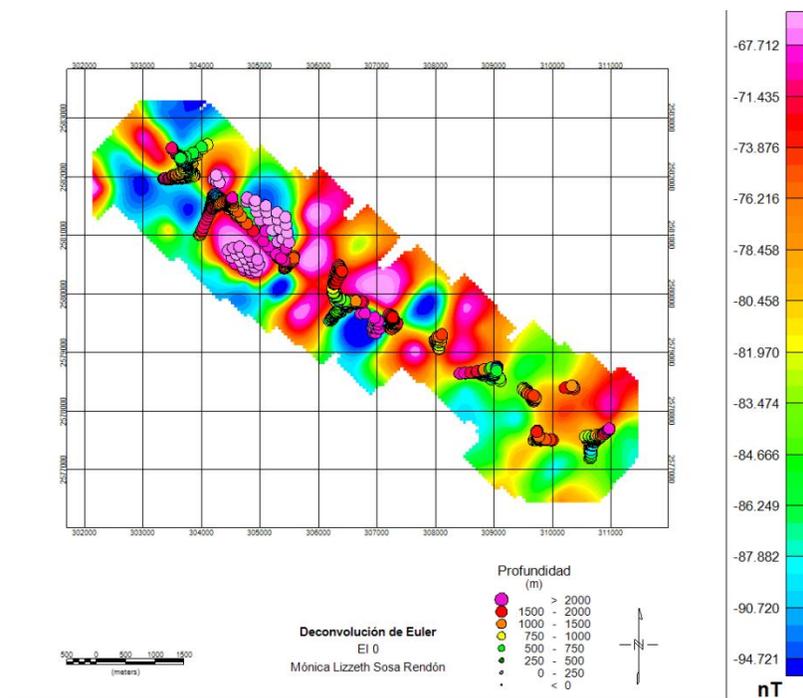


FIGURA 33. Mapa de reducción al polo con Deconvolución de Euler para un índice estructural de 0.

En los datos gravimétricos se aplicó la deconvolución de Euler en el mapa de la anomalía completa de Bouguer como se muestra en la figura 34. Para estos datos se utilizó el índice estructural de 1. Las profundidades que se estimaron rondan en su mayoría entre los 250 y los 2000 metros, encontrándose en el centro de la zona de puerto del Toro las soluciones con profundidades mayores a los 1000 metros.

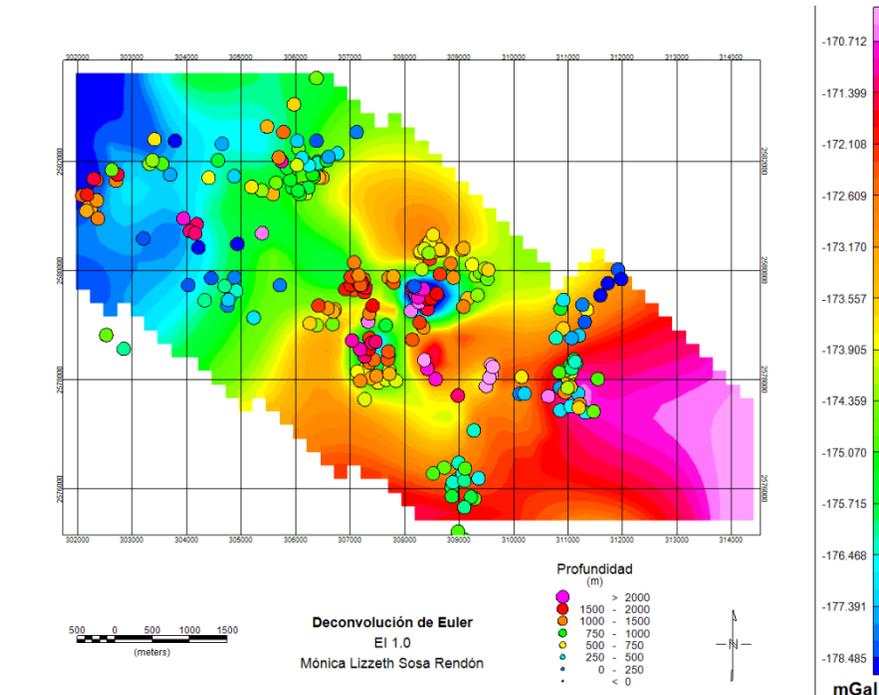


FIGURA 34. Mapa de anomalía completa de Bouguer con Deconvolución de Euler para un índice estructural de 1.

5.5 COMPARACIÓN DE DATOS RADIOMÉTRICOS.

Se hizo una comparación de los datos de espectrometría de rayos gamma con el mapa geológico de la zona donde fueron tomados estos datos.

A continuación, se muestra el mapa de distribución de dosis de radiación (DR) que es equivalente a la radiación total encontrada en la zona de estudio medida en Roentgen por hora (Figura 35).

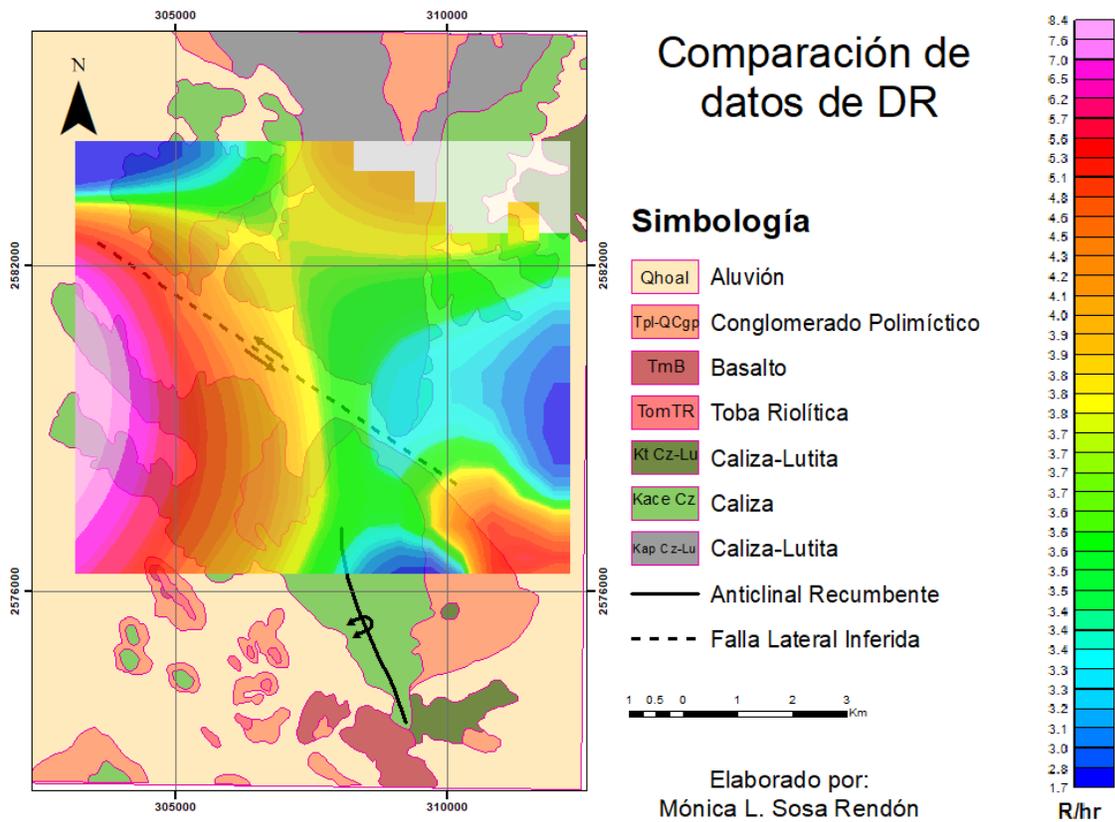


FIGURA 35. Comparación de datos de dosis de radiación (DR) con la geología de la zona de estudio.

Se puede observar que las lecturas más altas de dosis de radiación se encuentran en el área SW con poca presencia en el SE, donde tenemos gran cantidad de caliza y algunas zonas con afloramiento basáltico y toba riolítica hacia el sur (SW) y por otro lado la presencia de conglomerado polimíctico y aluvión (SE). También, los valores medios a altos cubren la porción NW de la falla lateral (Figura 36 a, b y c).

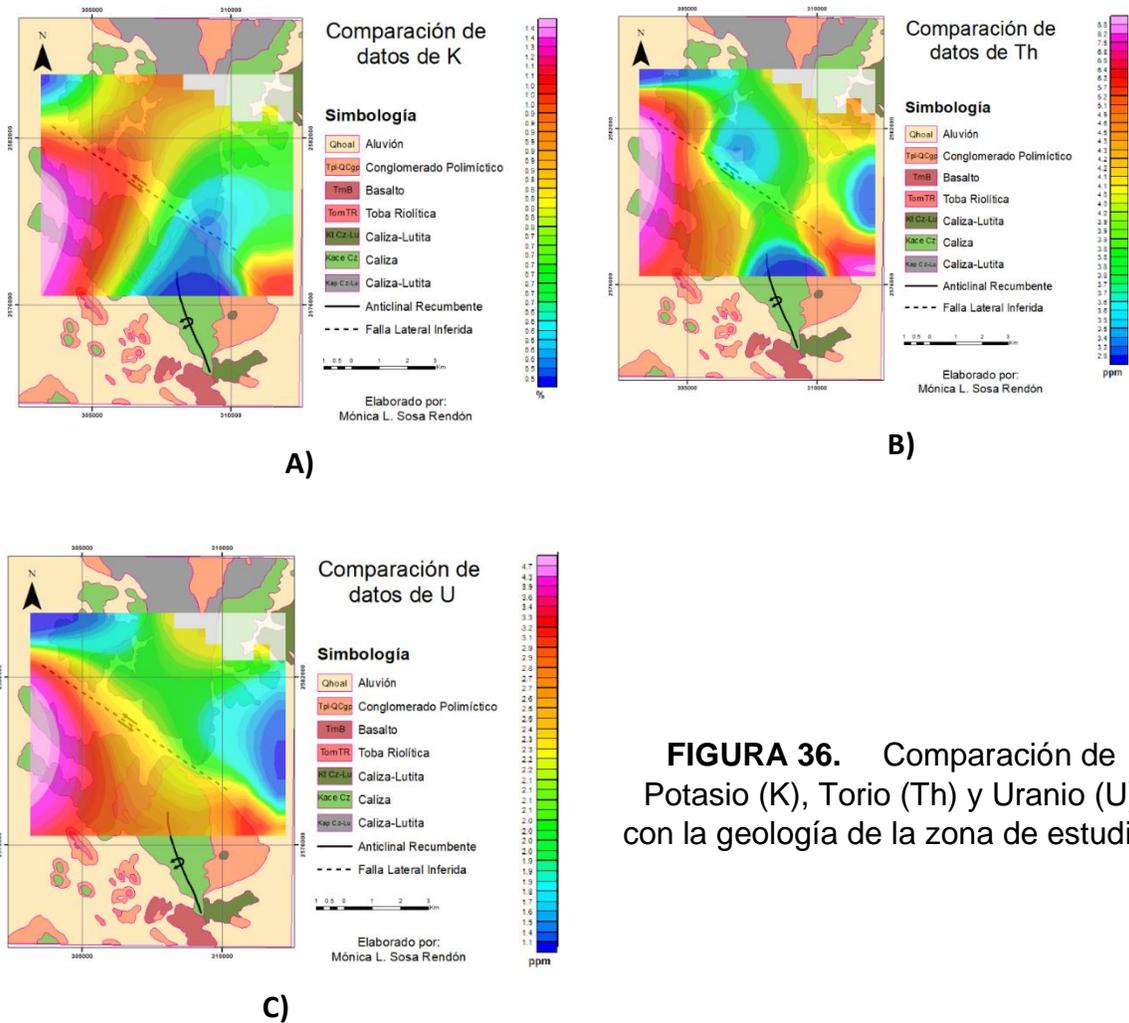


FIGURA 36. Comparación de Potasio (K), Torio (Th) y Uranio (U) con la geología de la zona de estudio.

En la figura 36 se puede observar la comparación de cada uno de los elementos obtenidos en el estudio de espectrometría de rayos gama con la geología de la zona de estudio. En los tres mapas podemos notar lecturas con valores altos en el oeste de la zona donde si seguimos la secuencia de la geología encontramos rocas ígneas como el basalto y la toba riolítica. Recordemos que la presencia de valores altos en los elementos principales de la espectrometría de rayos gamma aparte de ser un indicador de rocas ígneas nos permite estimar la presencia de alteración hidrotermal y flujo de calor en el subsuelo.

5.6. CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN EN SUBSUELO.

Se procesaron los datos obtenidos de cada una de las 11 lecturas que se realizaron en campo en la medición de radón en el subsuelo. Cada muestreo duró alrededor de 15 minutos en donde se midió la concentración de radón y torón en el subsuelo.

EL equipo RAD7 además de medir la concentración de estos gases tiene la capacidad de medir la humedad relativa y la temperatura en el ambiente. Con el software CAPTURE 5.5.5 se logra mostrar el promedio de los parámetros anteriores además de graficar el contenido de radón y torón en Bq/m^3 en función del tiempo (Figura 37, 38 y 39).

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas de tres puntos estratégicos en todo el estudio y corresponden a los puntos de medición: LE001 (Base, SE), LE004 (Centro) y LE008x (NW).



FIGURA 37. Concentración de Radón en el punto de muestreo LE001 (Estación Base)

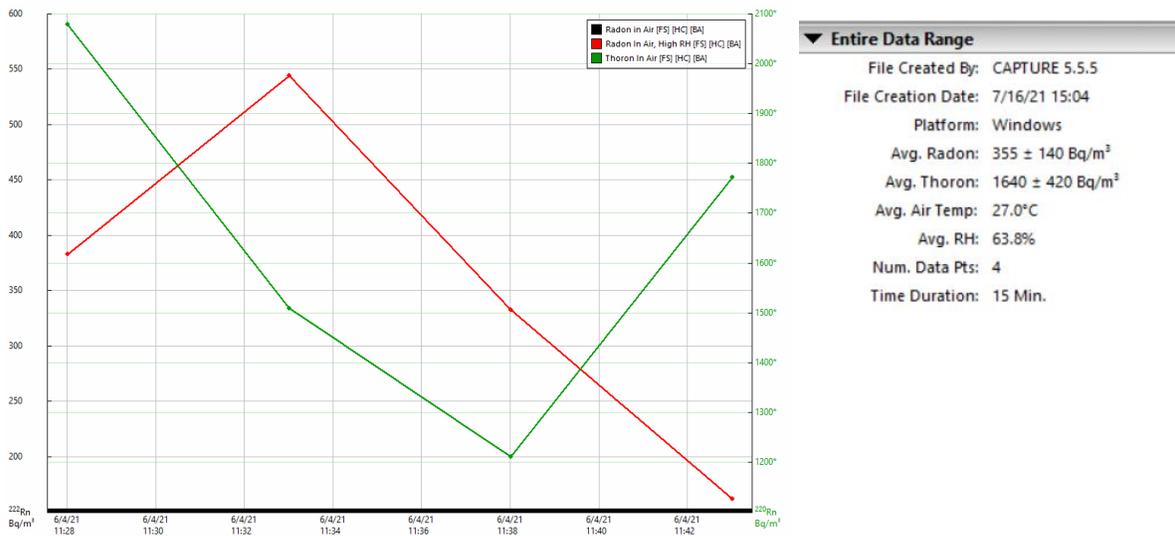


FIGURA 38. Concentración de Radón en el punto de muestreo LE006.



FIGURA 39. Concentración de Radón en el punto de muestreo LE008x.

En la figura 37 correspondiente al punto de muestreo LE001 forma parte también de la estación base donde se hizo la calibración de equipos geofísicos. En esta zona fue donde se encontraron los valores más altos de radón en toda la zona de estudio teniendo un promedio de 971 Bq/m^3 y un pico de hasta 1600 Bq/m^3 .

En el caso del torón se encontró su pico más alto en 7300 Bq/m^3 y un promedio de 6470 Bq/m^3 en el punto de muestreo LE008x como se muestra en la figura 46.

Se realizaron las gráficas de cada uno de los puntos de muestreo las cuales se encuentran en el anexo de este documento. El promedio más elevado de contenido de radón en el subsuelo se encuentre en el punto LE002 como se observa en la figura 23 a, que se representa en la imagen con un color de rojizo a rosa en la parte SE de la zona de estudio.

Por otro lado, en el punto de muestreo LE006 se observa contenido bajo de radón y torón como también se nota en la figura 23b que muestra poca concentración de estos gases en la zona media del mapa.

En toda la zona encontramos valores elevados de gas radón que van de los 500 a los 2000 Bq/m^3 y de torón con 700 a 6000 Bq/m^3 . Estos datos generales nos ayudan a determinar el área como zona de fallas y fracturamientos activos, teniendo como prueba principal la existencia y documentación de la falla lateral de Puerto del Toro. Además de estos fenómenos estructurales, los resultados elevados de radón nos permiten estimar eventos tectónicos-volcánicos y la presencia de suelos basálticos.

5.6 MODELO GEOFÍSICO

Después de reunir toda la información geofísica y geológica necesaria para la elaboración de diferentes mapas y diagramas, con el fin de tener una mayor confiabilidad de la interpretación y análisis de estos, se realizó un modelo 2D geológico-geofísico mediante distintos cuerpos geométricos que simulan la litología del subsuelo de la zona estudiada.

Para realizar este modelo se utilizó la herramienta GM-SYS, de Oasis Montaj. Tomando los valores de la anomalía de Bouguer completa para el perfil gravimétrico, los valores del Campo Magnético Residual para generar el perfil magnético y los datos de topografía tomados en campo.

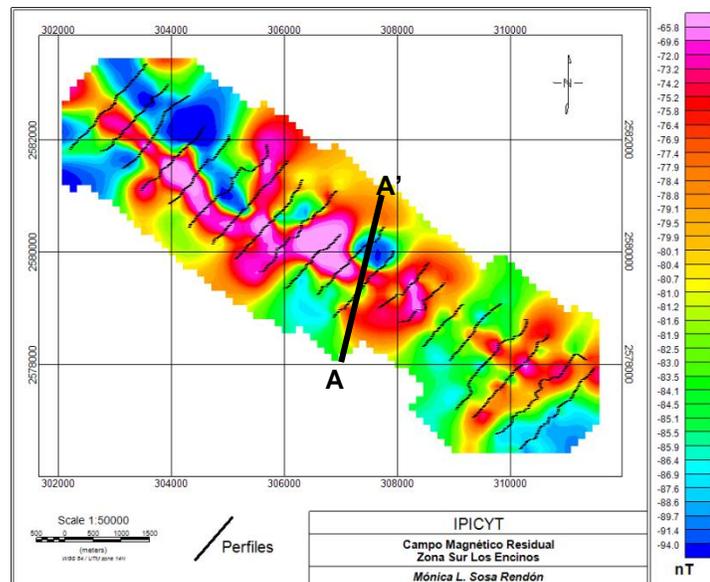
A continuación de muestra la tabla de los valores de densidad y susceptibilidad que se utilizó para las diferentes litologías geológicas encontradas en el área de estudio, ver Tabla 5.

TABLA 5. Tabla de valores de susceptibilidad y densidad utilizados para el modelo geológico-geofísico.

LITOLOGÍA	SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA	DENSIDAD (kg/m^3)
CALIZA-LUTITA	0.01132	2530
CALIZA	0.00315	2700
MARGA-LUTITA	0.00001	2500
DIQUE BASALTICO	0.00001	2500

Se realizó una sección (A-A') con una orientación SW-NE como se muestra en la Figura 40. Dicha sección, con una longitud de aproximadamente 3.1 km., atraviesa la falla lateral inferida de Puerto del Toro.

FIGURA 40. Ubicación de la sección A-A'.



5.6.1 SECCIÓN GEOLÓGICO-GEOFÍSICA

El modelo realizado se ajusta por medio de cuerpos poligonales. Se tienen 3 cuerpos horizontales que simulan las secuencias sedimentarias, donde entre estas sobresale un cuerpo central que simula la existencia de un cuerpo ígneo que intrusión a través de la falla presente en el área de estudio, siendo este un posible dique basáltico de acuerdo a la forma en que intrusión (Figura 41).

Se logra observar la presencia de un alto magnético de -48 nT y un bajo gravimétrico de -1 mGal, ambos asociados al cuerpo basáltico anteriormente mencionado. La profundidad de éste ronda los 1500 m y sus dimensiones van aumentando conforme se acerca a la superficie.

La capa más profunda de esta secuencia sedimentaria compuesta por margalutita corresponde a la Formación Taraises y tiene un espesor que ronda entre los 70 y 700 m. La segunda capa compuesta por caliza perteneciente a la Formación Cupido, sus espesores rondan los 100 y 500 m aproximadamente. La tercera y última capa está compuesta por caliza-lutita que pertenece a la Formación La Peña con un espesor aproximado de 500 a 1000m.

Como parte de la superficie se consideró una diminuta capa compuesta de material aluvial depositado en el holoceno, y sus espesores no sobrepasan los 50m.

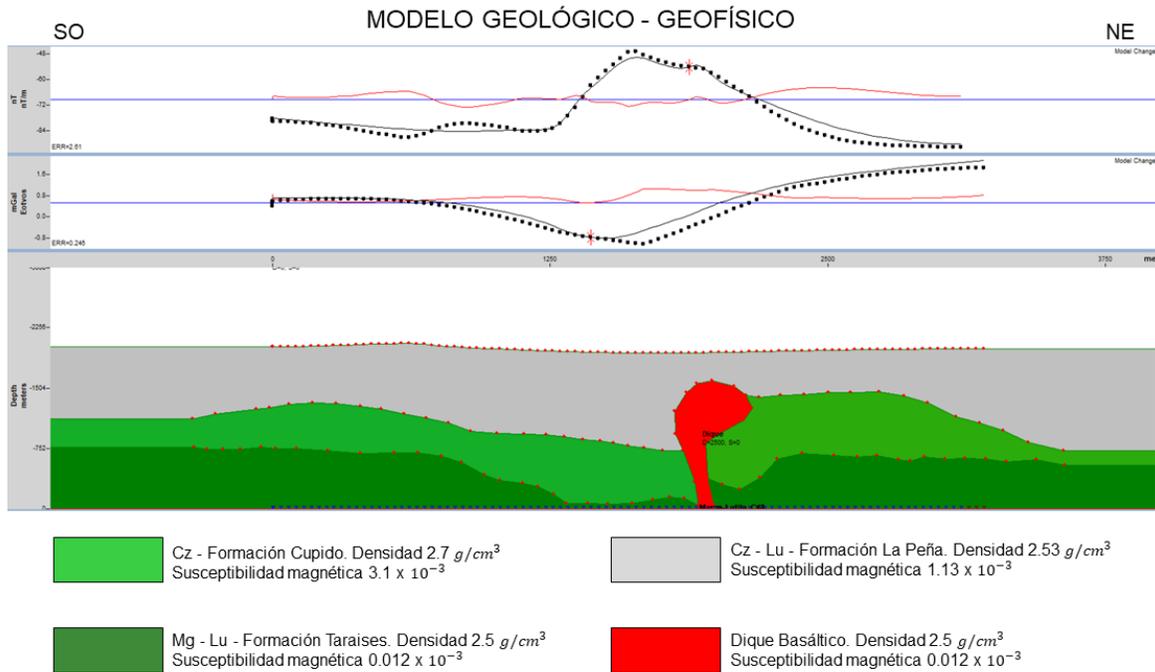


FIGURA 41. Modelo sección A – A'.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

Usando la combinación de métodos potenciales con métodos radioactivos, se generó una diversidad de mapas y datos que dieron resultado un modelo geológico-geofísico en el que se identifica la presencia de un dique basáltico, que da origen una serie de anomalías en los diferentes estudios realizados.

Con el análisis e interpretación de los resultados de métodos potenciales (gravimetría y magnetometría) se identificó una anomalía con una distribución variable, la cual indica que el área de estudio es una zona inestable, debido a movimientos verticales. Las anomalías resultantes nos confirman la presencia de una falla de movimiento lateral derecho que pasa por el valle de la zona de estudio conocida como Puerto del Toro.

En el mapa de dominios y lineamientos magnéticos resaltan una alineación de las anomalías con los valores más elevados en la zona, los cuales coinciden perfectamente con la dirección del fallamiento activo de la zona, asociados igualmente a intrusiones basálticas dentro de la zona las cuales están cubiertas con material sedimentario (caliza del Cretácico, conglomerado polimíctico del Terciario y aluvial del Cuaternario).

La Deconvolución de Euler dio como resultado un estimado entre los 500 y 2000 metros de profundidad a lo largo de todo el perfil seleccionado.

La comparación de los datos radiactivos obtenidos, correspondiente al potasio, torio y uranio mostró valores elevados en la parte oeste de la zona de estudio, donde aflora el basamento. Los valores altos de rayos gamma, indican presencia de rocas ígneas, vulcanismo y flujos de calor.

La concentración de radón y torón en el subsuelo muestran una distribución variable, pero con valores elevados en zonas que nos indican fracturación activa en la formación rocosa y fenómenos tectónico-volcánicos.

En conclusión, obtenemos un modelo geológico-geofísico simulando la litología del subsuelo de la zona de estudio, donde resalta la posible formación de un dique basáltico.

REFERENCIAS

- Aguilera Gaspar Felipe, & Ramos Leal Jose Alfredo. (2018). *Distribución espacio-temporal de Radón en interiores urbanos en San Luis Potosí*.
- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., Housh, T. B., Valdez-Moreno, G., & Chávez-Cabello, G. (2005). El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico tardío en el centro y norte de México: una revisión. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 187–225. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a1>
- Aranda Gómez Jose Jorge, Henry Christopher D., & Luhr James F. (2000). *Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México*. <http://www.igeofcu.unam.mx/sgml>
- Aranda-Gómez José Jorge, Henry Christopher D., & Luhr James F. (2000). Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, III, 59–71. [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/5301/5301-\(3\)Aranda.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/5301/5301-(3)Aranda.pdf)
- Bankey, V., Cuevas, A., Daniels, D., Finn, C. A., Hernandez, I., Hill, P., Kucks, R., Miles, W., Pilkington, M., Roberts, C., Roest, W., Rystrom, V., Shearer, S., Snyder, S., Sweeney, R. E., Velez, J., Phillips, J. D., & Ravat, D. K. A. (2002). Digital data grids for the magnetic anomaly map of North America. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/OFR02414>
- Barboza Gudiño José Rafael. (2012). *Sedimentary Tectonics and Stratigraphy: The Early Mesozoic Record in Central to Northeastern Mexico*. www.intechopen.com
- Barboza Gudiño José Rafael, Hoppe Markus, Gómez Anguiano Martín, & Martínez Macías Pánfilo Raymundo. (2004). Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21, 299–319. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57221301>
- Barboza-Gudiño, J. R., Molina-Garza, R. S., & Lawton, T. F. (2012). Sierra de Catorce: Remnants of the ancient western equatorial margin of Pangea in central Mexico. *GSA Field Guides*, 25, 1–18. [https://doi.org/10.1130/2012.0025\(01\)](https://doi.org/10.1130/2012.0025(01))
- Bustamante Garcia Jorge. (2011). *INVENTARIO FÍSICO DE LOS RECURSOS MINERALES DE LA CARTA CASIMIRO CASTILLO E13-B22 - MUNICIPIOS: CASIMIRO CASTILLO, VILLA PURIFICACIÓN, LA HUERTA, AUTLÁN DE NAVARRO, CUAUTILÁN DE GARCÍA, BARRAGÁN, ESTADO DE JALISCO*.
- Caballero, A. (2009). *Exploración de aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá (Sector de Las Tablas) mediante métodos geofísicos*. www.tdx.cat
- Cantos Figuerola José. (1973). *Tratado de Geofísica*.
- Carracedo, J. C., Pérez Torrado, F. J., & Rodríguez Badiola, E. (2013). *Canarias : islas volcánicas intraplaca*.

- Celestino Olivares Ivan Jacob, & Lopez Loera Hector. (2019). *MODELO 3D DE LA ESTRUCTURA VOLCÁNICA LA MALINCHE, EN LOS ESTADOS DE PUEBLA Y TLAXCALA, A PARTIR DE UN ESTUDIO AEROMAGNÉTICO.*
- Galván Pineda, J., & López Loera, H. (2016). *Métodos potenciales y electromagnéticos aplicados a la modelación bidimensional del volcán tipo maar "La Joyuela", San Luis Potosí, México.*
- Garcés Gómez Jaime Alberto. (2019). *Análisis de las anomalías magnéticas y geoquímicas de la zona de Piaxtla dentro del Complejo Acatlán: Implicaciones tectónico-mineras.*
- Giménez, M. E., Martínez, P. M., & Introcaso, A. (2008). *Lineamientos regionales del basamento cristalino a partir de un análisis gravimétrico.*
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0004-48222008000200014&script=sci_arttext&tlng=pt
- González Gómez, D. (2001). *ANÁLISIS ESPECTRAL: CONSIDERACIONES TEÓRICAS Y APLICABILIDAD* (Vol. 16).
- González Martínez Isahic. (2017). *Emanaciones de Radón (222Rn) en aguas termales del Estado de México: Premonitor Geofísico.*
- Guerrero Aguilar José Luis. (2005). *INVENTARIO FÍSICO DE LOS RECURSOS MINERALES DEL MUNICIPIO VILLA DE GUADALUPE, S.L.P.*
- Hernández, A., & Eulogio, H. (2015). *El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas.*
- Julio Vélez López, I., Cuevas, A., Ramón, C., Montiel, M., & Hernández Pérez, I. (1996). *CONSEJO DE RECURSOS MINERALES TEXTO GUÍA CARTA MAGNÉTICA "MATEHUALA" F14-1 ESTADOS DE SAN LUIS POTOSÍ, NUEVO LEÓN, ZACATECAS Y TAMAULIPAS ESCALA 1:250 000.*
- Lince Klinger, F., Giménez, M. E., Martínez, M. P., & Introcaso, A. (2008). *Las estructuras de la Cuenca de Bermejo y Sierra de Valle Fértil a partir de los métodos deconvolución de Euler y señal analítica.* http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222008000200013
- López-Ruiz, J., & Cebriá, J. M. (2007). Procesos y riesgos volcánicos. *Estudios Geológicos*, 63(2), 41–65.
- Martínez Ruiz Victor Julián. (1998). *INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA Y GEOQUÍMICA-HOJA VILLA DE GUADALUPE-ESCALA 1:50,000-CONTRATO CON EL INSTITUTO DE GEOLOGÍA DE LA UASLP.*
- Mitre Salazar Luis Miguel. (1989). La Mega falla Laramidica De San Tiburcio, Estado De Zacatecas. *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología*, 8, 47–51.
- Mota Gómez Jesus. (2020). *MODELACIÓN GEOLOGICA-GEOFÍSICA DE LA ZONA VOLCÁNICA LA PÓLVORA, SAN LUIS POTOSÍ.*
- Nieto Samaniego Ángel Francisco, Alaniz Álvarez Susana Alicia, & Camprubí í Cano Antoni. (2005). *La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica.*

- Orihuela, N., & García, A. (2015). *DECONVOLUCIÓN DE EULER DE DATOS GRAVIMÉTRICOS DEL SEGMENTO CENTRAL DE LA ZONA DE BORDE SUR DE LA PLACA CARIBE*. 37(2).
- Peña, P., Balcazar, M., Flores Ruiz, J. H., & López Martínez, A. (n.d.). *Utilización del gas radón como un trazador geofísico natural*.
- Peredo Mancilla Claudia Rigel. (2015). *Análisis geológico-estructural de la Zona del Silencio, noreste de México a través de métodos geofísicos potenciales*.
- SSN - Catálogo de sismos / UNAM, México. (n.d.). Retrieved May 11, 2022, from <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Torres Gaytan David Ernesto. (2013). *Estudio Geofísico aplicado a la exploración minera en EL Milagro de Guadalupe, Municipio de Guadalcázar, Estado de San Luis Potosí*.
- Tristán González Margarito, Aguillón Robles Alfredo, Barboza Gudiño José Rafael, Torres Hernandez José Ramón, Bellon Hervé, López Doncel Rubén, Rodríguez Ríos Rodolfo, & Labarthe Hernández Guillermo. (2009). *Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí* (Issue 3).
- Velázquez Juárez Daniel Arturo. (2019). *Modelación geológica-geofísica con uso de métodos potenciales de la estructura interna de La Caldera de Los Humeros, Puebla*.
- Zavala-Monsivaís Aurora, Barboza-Gudiño José Rafael, Velasco-Tapia Fernando, & García-Arreola Maria Elena. (2012). *Sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México*. 64, 277–293.