



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

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Estudio petrogenético de las rocas volcánicas
Complejo Volcánico La Repartición, San Luis
Potosí, México**

Tesis que presenta

Daniel Soto Ramírez

Para obtener el grado de

Maestro(a) en Geociencias Aplicadas

Director (Codirectores) de la Tesis:

Dr. Sanjeet Kumar Verma

Dr. Darío Torres Sánchez

San Luis Potosí, S.L.P., 4 de Julio del 2025



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Estudio petrogenético de las rocas volcánicas Complejo Volcánico La Repartición, San Luis Potosí, México**” presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Daniel Soto Ramírez** 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. Sanjeet K. Verma

Director

Dr. Darío Torres Sánchez

Codirector

Dr. Héctor López Loera

Miembro del Comité Tutorial

Dr. Sonia Torres Sánchez

Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en los Laboratorios de: Laboratorio de Geología Aplicada, Petrografía y Petrofísica (Lab-GeoApp de la División de Geociencias Aplicadas, además del LINAN (Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Sanjeet Kumar Verma y la codirección del Dr. Darío Torres Sánchez

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (1241765) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

A mi madre.

**“Mientras el corazón lata, mientras la carne palpita,
no me explico que un ser dotado de voluntad
se deje dominar por la desesperación.”**

Jules Verne

Agradecimientos

Toda obra merece un reconocimiento para su creador, y esta no es la excepción. Dedico esta obra a todos aquellos que, de una u otra forma, compartieron conmigo las experiencias de estos dos últimos años. En especial, quiero agradecer a tres personas fundamentales: a mi madre, por ser la principal razón que me llevó a embarcarme en esta aventura tan lejos de casa; a mi hermano, por guiarme en el camino hacia mis sueños; y a mi abuela, por su amoroso gesto de cocinar cada vez que la visitaba, por escucharme y por su apoyo incondicional, único en su forma.

A mis asesores, el Dr. Sanjeet K. Verma y el Dr. Darío Torres Sánchez, quiero expresar mi sincero agradecimiento por permitirme ser su asesorado, por creer en mí, y por su valiosa orientación y apoyo a lo largo de la realización de esta tesis. Aprecio profundamente sus enseñanzas, su amistad y todo el respaldo que me ha brindado durante este proceso.

A mis asesores, el Dr. Héctor López Loera, y la Dra. Sonia Torres Sánchez por su asesoramiento que hicieron que fuese más fácil entender esta tesis.

Agradezco profundamente al Dr. José Ramón Torres por su invaluable apoyo en el campo y sus enseñanzas, y a la Mtra. María Mercedes Zavala Arriaga, técnico del laboratorio LabGeo-App en el área de Geociencias Aplicadas del IPICYT, por su apoyo y amistad durante la realización de esta tesis, así como por su esencial ayuda en los análisis de laboratorio.

A Estefanía por su apoyo, su amistad y amor incondicional en todo este proceso.

Al Dr. Vsevolov Yutxis, por sus asesorías y forma de mostrarme la geofísica.

A mis tías: Yudith y Are por escucharme y cuidarme desde que era pequeño, por esos momentos de chisme.

A mis amigos, los futuros doctores, Mahendra Shukla y Erik Emmanuel Martínez Torres, por su hermandad, su amistad, sus clases y asesorías, su comprensión y todas las experiencias compartidas.

A mis amigos Wilson, Fufurufo, Pavel, Rodri, Hassan, Rober, Balta y Luis, por sus conversaciones, su apoyo y por creer en mí.

A mis compañeros del IPICYT, por estar ahí cuando los necesité.

A IPICYT por ser mi casa, por permitirme tener un sueño que cumplir.

Expreso mi más sincero agradecimiento al Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la concesión de la beca.

CONTENIDO

Aprobación de la tesis.....	ii
Créditos Institucionales	iii
Agradecimientos.....	vi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVO.....	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4 HIPÓTESIS.....	5
CAPÍTULO 2.	6
ANTECEDENTES	6
CAPÍTULO 3.	9
MARCO TEÓRICO	9
3.1 LOCALIZACIÓN Y FISIOGRAFÍA.....	9
3.1.1 LOCALIZACIÓN	9
3.1.2 FISIOGRAFÍA	10
3.2 GEOLOGÍA REGIONAL	12
3.3 ESTRATIGRAFÍA LOCAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LA REPARTICIÓN. 13	
3.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LA REPARTICIÓN	
.....	16
CAPÍTULO 4.	18
METODOLOGÍA	18
4.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO.....	18
4.2 ANÁLISIS GEOQUÍMICO	19
4.2.1 ANÁLISIS DE ELEMENTOS MAYORES	20
4.2.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS	22

4.3 ANÁLISIS AEROMAGNÉTICO	23
CAPITULO 5.	27
RESULTADOS	27
5.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO	27
5.2 GEOQUÍMICA ANALÍTICA	30
5.2.1 ELEMENTOS MAYORES	30
5.2.2 ELEMENTOS TRAZA Y ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS	33
5.3 AEROMAGNETISMO	35
5.3.1 DOMINIOS AEROMAGNÉTICOS	37
DAM I	40
DAM Ia	40
DAM Ib	40
DAM II	41
DAM IIa	41
DAM III	42
DAM IV	42
5.3.2. MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO 2D	45
CAPITULO 6	47
DISCUSIÓN	47
6.1 FUENTE MAGMÁTICA	47
6.2 PROCESO PETROGENÉTICO	53
CAPITULO 7	57
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFIA	59
ANEXOS	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Mapa del Campo Volcánico de San Luis Potosí (Tomado y modificado de Tristán-González et al., 2009). De muestra la distribución de los complejos volcánicos que componen el campo Abreviaciones: SLP=San Luis Potosí, VA=Villa de Arista; P=Pinos; GB=Graben Bledos. A.- Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito; B.- Complejo Volcánico Pinos; C.- Complejo Volcánico Aqualulco; D.- Complejo Volcánico la Repartición; E.- Complejo Volcánico Villa Hidalgo; F.- Complejo Volcánico Santa María. 9

Figura 2. Localización de la zona de estudio, en él se muestran la localización en el país, la región El Complejo Volcánico de La Repartición (CVLR) se localiza en la porción noreste del CVSLP. 10

Figura 3. Provincias fisiográficas en las que se localiza el área de estudio; el área de estudio se localiza en los límites de las provincias fisiográficas Mesa Central (MC) y la Sierra Madre Oriental (SMO). Basado en datos obtenidos de INEGI. 12

Figura 4. Geología local del derrame Romerillo en el CVLR. (Tomado y modificado de Tristán-González et al., 2009; Carta geológico-minera, Llanos del Carmen, 2001). 15

Figura 5. Esquema estructural del Campo Volcánico La Repartición. (Elaboración basado en F14-A65 Llanos del Carmen, 2001; F14-A64 Arista, 2001). 17

Figura 6. Preparación de muestras para análisis geoquímico. 20

Figura 7. Laminas delgadas con textura traquítica donde se conocen fenocristales de plagioclasa (Pg), piroxeno (Px), olivino (Ol) y minerales opacos (Opc) además de reemplazamiento de olivino por plagioclasa. La matriz está compuesta principalmente de Pg y Px, se observan texturas de zoneamiento en la plagioclasa, se observan pequeños cristales de plagioclasa alrededor de los fenocristales que demuestran la fluidez. 30

Figura 8. A) Diagrama Total Alkali vs Silica (TAS), B) Diagrama bivariado de K_2O (wt %) vs SiO_2 (wt %), C) Diagrama ternario AFM. Basados en: Le Bas et al., 1986; Peccerillo y Taylor, 1976; Irvine y Baragar, 1971. 32

Figura 9. Diagramas Harker y/o diagramas bivariados Mg# vs elementos mayores. a) #Mgvs Na_2O , b) #Mgvs K_2O , c) #Mgvs Al_2O_3 , d) #Mgvs TiO_2 , e) #Mgvs Fe_2O_3 , f) #Mgvs FeO , g) #Mgvs P_2O_5 33

Figura 10. a) Diagrama de condrita de elementos de tierras raras normalizadas para rocas volcánicas máficas; b) Diagrama de manto primitivo de multielementos normalizados para rocas volcánicas intermedias del Derrame Romerillo, CVLR. (Valores tomados de McDonough y Sun, 1995). 35

Figura 11. Mapa del Campo Magnético Residual del Derrame Romerillo. 36

Figura 12. Mapa del Campo Magnético Reducido al Polo. 37

Figura 13. B-H, Perfiles de la respuesta de la SA, el RP y la topografía en el CVLR. 39

Figura 14. Dominios Aeromagnéticos en la configuración de Señal Analítica. 43

Figura 15. Representación del Espectro de Potencia para el mapa de RP del Derrame Romerillo. 44

Figura 16. a) Diagrama de Nb/Yb vs Th/Yb; b) Diagrama de La/Nb vs Ba/Nb; c) Diagrama de Zr/Y vs Nb/Y (Basado en los diagramas de Pearce; abreviaciones: N-MORB: normal Mid-Ocean Ridge Basalt; E-MORB: Enriched Mid-Ocean Ridge Basalt; OIB: Ocean Island Basalt; LCC: Lower Continental Crust; MCC: Middle Continental Crust; PM: Primitive Mantle, UCC: Upper Continental Crust.; Los valores de OIB, N-MORB, E-MORB, estos datos fueron tomados de McDonough and Sun, 1995; los valores LCC, MCC y UCC fueron tomados de Rudnick and Gao 2003). 49

Figura 17. a) Diagrama de $(La/Nb)_N$ vs $(Th/Nb)_N$; b) Diagrama de $(Ce/Pb)_N$ vs $(Th/Nb)_N$; c) Diagrama de $(La/Nb)_N$ vs $(Ce/Pb)_N$. (Abreviaciones: CA–Continental Arc; CC–Continental Crust; IA–Island Arc; OIB–Ocean Island Basalts; Sub, subduction-related magmatic suites; los valores normalizados fueron tomados de McDonough and Sun, 1995. 50

Figura 18. Sección aeromagnética modelada en 2D de la anomalía magnética del Derrame Romerillo. Las unidades geológicas fueron modeladas con las siguientes susceptibilidades (SI):

Basalto: 7×10^{-3} - 12.6×10^{-3} ; Roca intermedia: 1×10^{-3} - 3×10^{-3} ; Sedimentos cuaternarios, Jurásicos y Unidad Geológica Indeterminada (UGI): 1.26×10^{-7}	52
Figura 19. Los diagramas a) Ce vs Ce/Yb; b) La vs La/Yb; c) La vs (La/Hf), muestran los efectos de la cristalización fraccionada y la fusión parcial.	54
Figura 20. a) Modelo de fusión parcial en diagrama de tierras raras para lherzolita de espinela, (Frey, 1980; McKenzie y O’Nions, 1991); b) Modelos de fusión parcial en diagramas de tierras raras para lherzolita de granate (McDonough, 1990, McKenzie y O’Nions, 1991); c) Modelo de fusión parcial en diagrama bivariado de (La/Yb) vs (Sm/Yb) para lherzolita de espinela y lherzolita de granate.	55
Figura 21. Diagrama esquemático que representa la generación y ascenso del magma máfico del Derrame Romerillo, CVLR. (FP: Fusión parcial, CF: Cristalización parcial; basado en Burchardt, 2009 y Torres-Sánchez et al., 2019).	59
Figura 22. Afloramientos de caliza en el Derrame Romerillo.	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información petrográfica de las rocas del Derrame Romerillo en el Complejo Volcánico de La Repartición. Los datos son presentados en porcentaje. Minerales: Ol: olivino; Pg: plagioclasa; Px: piroxeno. Opc: opaco.	19
Tabla 2. Valores de análisis estándar, (Basado en Verma et al., 2018)	22
Tabla 3. Fórmulas para calcular la profundidad de las fuentes magnéticas de acuerdo con el tipo de fuente, centro del cuerpo (zc), techo de la estructura (zt). mitad del ancho de la amplitud ($X12$). (Tomado de Hinze et al., 2013).	25
Tabla 4. Síntesis de las profundidades de la anomalía del Derrame Romerillo.	44
Tabla 5. Susceptibilidades magnéticas de las unidades geológicas.	46

ANEXOS

Tabla A 1. Composiciones representativas de elementos mayores (expresadas en wt%) de las rocas básicas del conjunto Romerillo. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.....	67
Tabla A 2. Composiciones representativas de elementos mayores (expresadas en wt%) de las rocas básicas del conjunto La Repartición. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.	68
Tabla A 3. Composiciones representativas de elementos traza (expresadas en ppm) de las rocas básicas del conjunto Romerillo. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.....	69
Tabla A 4. Composiciones representativas de elementos traza (expresadas en ppm) de las rocas básicas del conjunto La Repartición. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.....	70

RESUMEN

El Derrame Romerillo (DR) forma parte del Complejo Volcánico La Repartición (CVLR) del Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) perteneciente a la provincia de la Mesa Central. La zona de estudio (DR) se encuentra relacionada geológicamente con la Plataforma Valles San Luis Potosí. Esta área se caracteriza por rocas volcánicas de texturas porfídicas y traquíticas con matriz con microlitos de plagioclasas y piroxenos, como también, con un arreglo mineralógico principal de plagioclasas, piroxenos y olivinos. Las rocas volcánicas del DR se clasifican como composiciones de traquibasaltos con afinidad a series shoshoníticas. Las rocas volcánicas del DR se caracterizan por presentar concentraciones de $\text{SiO}_2 = 47.5\text{--}49.31$ wt.%, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 9.6\text{--}17.9$ wt.%, $\text{MgO} = 5.83\text{--}7.4$ wt.% y un $\text{Mg\#} = 45.6\text{--}62.3$ [$\text{Mg\#} = 100 \times (\text{Mg}^{2+}/\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$]. Por otro lado, estas rocas muestran un enriquecimiento en tierras raras ligeras (LREE) y elementos litófilos de iones grandes (LILE). El comportamiento de las relaciones y patrones de elementos traza y tierras raras sugieren una afinidad con ambientes tectónicos tipo basaltos de islas oceánicas (OIB), y se relaciona a procesos magmáticos de fusión parcial, con distintos grados de cristalización fraccionada. Con el fin de caracterizar la fuente magmática de este derrame y obtener un modelo geológico-geofísico en 2D, el área de estudio fue analizada mediante el método de magnetometría aérea, calculando la profundidad de la fuente que genera la respuesta magnética registrada.

ABSTRACT

The Derrame Romerillo (DR) is part of the La Repartición Volcanic Complex (RVC), which belongs to the San Luis Potosí Volcanic Field (SLPVF) within the Mesa Central province. The study area, Derrame Romerillo (DR), is geologically associated with the Valles–San Luis Potosi Platform. This area is composed of volcanic rocks and exhibiting porphyritic and trachytic textures, with a groundmass of plagioclase and pyroxenes, and an essential mineral assemblage consisting of plagioclase, pyroxenes, and olivine. These rocks are classified as trachybasalts compositions and an affinity with the shoshonitic series. The volcanic rocks are characterized by concentrations of $\text{SiO}_2 = 47.5\text{--}49.31$ wt.%, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 9.6\text{--}17.9$ wt.%, $\text{MgO} = 5.83\text{--}7.4$ wt.% and $\text{Mg\#} = 45.6\text{--}62.3$ [$\text{Mg\#} = 100 \times (\text{Mg}^{2+}/\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$]. Furthermore, these rocks exhibit enrichment in light rare earth elements (LREE) and large ion lithophile elements (LILE). The trace element and rare earth element (REE) patterns, along with their ratios, indicate an affinity with ocean island basalt (OIB)-type tectonic environments and reflect magmatic processes involving partial melting with various degrees of fractional crystallization. In order to characterize the magmatic source of this volcanic spill and develop a 2D geological–geophysical model, the study area was analyzed using aeromagnetic data, allowing for the calculation of the depth of the magnetic source that generates the recorded magnetic response or anomalies

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La Mesa Central (MC) ha sido objeto de numerosos estudios geológicos, los cuales se han enfocado principalmente en la exploración y explotación de yacimientos minerales (Raisz, 1959; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Orozco-Esquivel *et al.*, 2002; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Esta provincia se encuentra conformada por rocas que representan distintas facies marinas del Triásico las cuales delimitan la posición del margen continental, como también, adyacente a estas facies se encuentran distribuidas rocas continentales y secuencias sedimentarias de edad Jurásica. A su vez, en la parte central de la MC se desarrolló una cuenca marina profunda, en la que se acumularon secuencias de lutitas y areniscas calcáreas. Hacia el este de la MC se encuentra la Plataforma Valles-San Luis Potosí la cual se caracteriza por facies de ambientes arrecifales y de talud (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). De igual forma, la MC se encuentra caracterizada por la presencia de rocas que representan actividad volcánica de composiciones félsica y por magmatismo máfico e intermedio del Paleógeno (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Distintos estudios han sido desarrollados en la MC desde perspectivas geológicas, geofísicas y petrológicas (p.ej. Orozco-Esquivel *et al.*, 2002; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Sieck *et al.*, 2019),

sin embargo, el origen, evolución, periodo de actividad volcánica de distintas áreas de la zona sigue siendo un tema de interés dentro de la investigación geológica del país. Tal es el caso del Campo Volcánico de San Luis Potosí, (CVSLP; Labarthe-Hernández *et al.* 1982) localizado en la porción sureste de la región sur de la Mesa Central (Raisz, 1959), está definido inicialmente por lavas e ignimbritas del Paleógeno y del Neógeno; el Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) es un vasto sistema que abarca aproximadamente 10,000 km². Este campo está conformado principalmente por secuencias de lavas y flujos piroclásticos, con una historia eruptiva que se extiende desde el Eoceno medio hasta el Cuaternario, cubriendo un rango composicional completo desde rocas máficas hasta rocas félsicas. (Tristán-González *et al.*, 2009). De igual forma, Tristán y sus colaboradores en 2009, establecen que el CVSLP se divide en diversos complejos volcánicos, esto a partir de la semejanza estratigráfica, geoquímica y geocronológica, estos complejos volcánicos son: Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Torres-Hernández *et al.*, 2006, Torres-Sánchez *et al.*, 2019, 2020), Complejo Volcánico Pinos (Aguillón-Robles, 1983; Rocha-Echavarría *et al.*, 2006; Aranda-Gómez *et al.*, 2007, Verma *et al.*, 2020), Complejo Volcánico Aqualulco (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1981; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; 1995; Verma, *et al.*, 2023), Complejo Volcánico Villa Hidalgo (Barboza-Gudiño *et al.*, 2002, Pérez-Corona *et al.*, 2017), Complejo Volcánico Santa María (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984; Medina-Romero *et al.*, 2005), y el Complejo Volcánico La Repartición (Barboza-Gudiño *et al.*, 2001, Tristán-González *et al.*, 2009).

El Complejo Volcánico La Repartición (CVLR; Barboza-Gudiño *et al.*, 2001), se encuentra conformado de manera general por depósitos de flujos piroclásticos que corresponden a la ignimbrita Santa María, como también, por un conjunto de lavas dacíticas, así como de secuencias de flujos andesíticos y basálticos, los cuales se encuentran emplazados a lo largo de fallas de orientación NW (Tristán-González *et al.*, 2009). A su vez, se ha observado una estrecha relación con los derrames lávicos y estructuras de fallas, como también, se ha mostrado un patrón de diques tufocíticos y acumulaciones de material piroclástico y epiclásticos. Estos eventos volcánicos se emplazaron durante el Oligoceno–Mioceno y descansan discordantemente sobre calizas arrecifales Cretácicas de la Formación El Abra correspondiente a la Plataforma Valles–San Luis Potosí (Carrillo–Bravo, 1971; Barboza–Gudiño *et al.*, 2001).

Una de las áreas de principal interés en el Complejo Volcánico de la Repartición es el Derrame Romerillo (DR), debido a la amplia presencia de rocas volcánicas de composición máfica que difieren con las litologías dominantes del CVLR (Barboza-Gudiño *et al.*, 2001). El estudio de las rocas volcánicas de composición máficas en el Derrame Romerillo es fundamental para la comprensión del comportamiento del manto, procesos magmáticos y procesos geológicos que tuvieron lugar en la región central del país, como también, el conocer la geodinámica que tuvo lugar durante los distintos periodos de formación del CVSLP.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La actividad volcánica del CVSLP ha sido ampliamente estudiada desde diversos enfoques como cartográficos, geofísicos, geológico-estructurales, petrográficos, geoquímicos y geocronológicos. Sin embargo, existen localidades con poca información petrológica (petrográfica-geoquímica) y geofísica. Tal es el caso, del Derrame Romerillo el cual forma parte del Campo Volcánico La Repartición. Por lo tanto, el presente estudio se enfoca en generar nueva información petrológica y geofísica, que ayude a comprender la dinámica de generación magmática en la zona y su relación con rasgos tectónicos regionales.

1.3 OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

Generar un modelo petrogenético (cualitativo y cuantitativo) y aeromagnético de las rocas volcánicas del Derrame Romerillo que brinde información referente al origen, evolución y dinámica del magmatismo de la zona de estudio

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades petrográficas (abundancia, forma, tamaño y relaciones espaciales de textura, estructura y fabrica) del CVLR mediante microscopía de luz polarizada.
- Determinar la composición geoquímica de muestras de roca, mediante fluorescencia de rayos X (FRX) para elementos mayores y elementos de tierras raras y traza por medio de ICP-MS.

- Generación de determinación de lineamientos magnéticos y dominios aeromagnéticos que validen la existencia de estructuras geológicas.
- Establecer las profundidades de anomalías magnéticas del Derrame Romerillo.
- Elaboración de modelos petrogenéticos cuantitativos que evalúen los procesos magmáticos que generaron el magmatismo que tomaron lugar en el Derrame Romerillo.
- Proponer el ambiente tectónico para el magmatismo del CVLR.

1.4 HIPÓTESIS

Las hipótesis de este trabajo de investigación son las siguientes:

1. Las rocas volcánicas del Derrame Romerillo de composición básica tienen su origen por medio de procesos de cristalización fraccionada de fuentes del manto superior.
2. Los magmas que dieron origen a las rocas volcánicas del Derrame Romerillo ascendieron a través de fallas y fracturas del sistema de fallas.

CAPÍTULO 2.

ANTECEDENTES

La caracterización del Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) ha evolucionado desde los estudios pioneros de Labarthe-Hernández *et al.* (1982), quienes lo definieron como una provincia volcánica dominada por rocas félsicas de edad del Oligoceno, vinculada a una tectónica extensional. Investigaciones posteriores, como las de Aranda-Gómez *et al.* (1983), propusieron conexiones genéticas con el volcanismo de la Sierra Madre Occidental y reconocieron la presencia de estructuras de calderas del Terciario Medio. Dentro de este estudio clasificaron a la mayoría de las rocas del CVSLP como calco-alcalinas.

Tristán-González (1986) documentó una intensa actividad volcánica en el graben de Villa de Reyes caracterizada por la erupción de abundantes lavas y piroclastos de composición félsica durante el Oligoceno (~32 - 27 Ma).

Por otro lado, López-Loera *et al.* (2008), utilizaron métodos potenciales para analizar la estructura del subsuelo del campo volcánico de Ventura, enfocándose en la relación entre las estructuras tectónicas, la distribución de los conductos volcánicos y las características de los volcanes Joya Honda y Joyuela. Proponiendo que la intersección de fallas facilita el ascenso rápido del magma y que la estructura del maar de Joya Honda es una cuenca asimétrica rellena de material volcánico.

Pérez-Corona *et al.* (2017) integro y proceso una serie de conjuntos de datos potenciales (magnetometría y gravimetría), e interpretó los lineamientos geofísico-

estructurales relacionados a fallas afectan la cuenca de Villa Hidalgo que asocio a la Orogenia Laramide y a zonas de cizalla post-laramídicas.

Torres-Sánchez *et al.* (2019) ofrece una caracterización detallada de las rocas volcánicas que permitió identificar una amplia gama de composiciones, desde basálticas hasta riolíticas del Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito (CVSSM), y determinando los periodos de formación entre los 22–21 Ma, los 32–28 Ma y los 34–32 Ma.

Acosta-Fimbres (2020) estudio el domo volcánico San Juan de los Herrera determinó que sus rocas se formaron a partir de la fusión parcial de la corteza continental superior en un ambiente de rift continental, a partir de múltiples eventos, que permitió entender el origen y evolución de magmas félsicos del Complejo Volcánico de Pinos.

Almaguer *et al.* (2023), genero un modelo 3D integrado para caracterizar La Joya Honda y La Joyuela, que le permitió determinar la geometría de la zona raíz y los diques alimentadores de estos volcanes tipo maar, donde concluye que ambos maares pueden compartir un sistema de alimentación común, pero con diferencias en sus conductos de alimentación.

Verma *et al.* (2023). estudio la evolución, origen y procesos magmáticos y petrogénesis de rocas máficas e intermedias en el Cúcamo, AVC, donde determina que el origen que las rocas máficas se formaron por fusión parcial de una fuente de manto, mientras que las rocas intermedias, por otro lado, se formaron a partir de

procesos de asimilación y fraccionamiento entre magmas máficos y la corteza continental.

El Complejo Volcánico de La Repartición ha sido descrito por primera vez por Barbosa-Gudiño *et al.* (2001), como una zona de depósitos de flujos piroclásticos de diversos orígenes (ignimbritas riolíticas, lavas dacíticas ricas en potasio, secuencias de flujos de andesitas a basaltos. Tristán-González *et al.* (2009) han reportado un análisis geocronológico para el Campo Volcánico de San Luis Potosí en donde se ha definido la actividad volcánica del campo desde el Eoceno Medio hasta el Cuaternario. De igual forma, estos autores han reportado que la actividad volcánica se encuentra asociada a procesos tectónicos de extensión ocurridos durante el Oligoceno.

CAPÍTULO 3.

MARCO TEÓRICO

3.1 LOCALIZACIÓN Y FISIOGRAFÍA

3.1.1 LOCALIZACIÓN

El Complejo Volcánico de La Repartición (CVLR) se localiza en la porción noreste del CVSLP (Figura 1), y cerca de la parte central del estado de San Luis Potosí, México. En sí, el CVLR se comprende de depósitos de flujos piroclásticos, junto con un conjunto de lavas de composición dacíticas, andesíticas y basálticas, como de igual forma, llega a presentar diques tufocíticos y acumulaciones de material piroclástico y epiclástico (Tristán-González *et al.*, 2009).

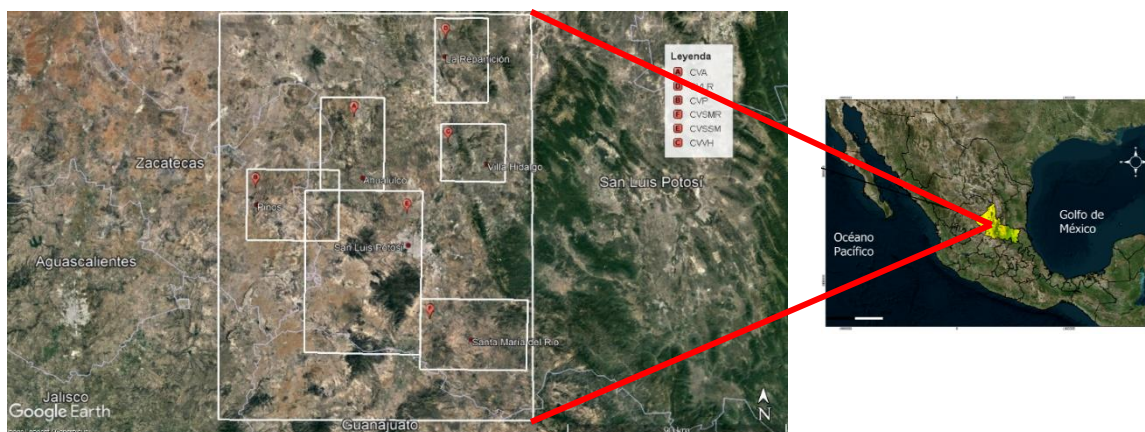


Figura 1. Mapa del Campo Volcánico de San Luis Potosí (Tomado y modificado de Tristán-González *et al.*, 2009). De muestra la distribución de los complejos volcánicos que componen el campo Abreviaciones: SLP=San Luis Potosí, VA=Villa de Arista; P=Pinos; GB=Graben Bledos. A.- Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito; B.- Complejo Volcánico Pinos; C.- Complejo Volcánico Ahuatlulco; D.- Complejo Volcánico la Repartición; E.- Complejo Volcánico Villa Hidalgo; F.- Complejo Volcánico Santa María.

El Derrame se localiza en la porción sureste de la región sur de la Mesa Central, en la sección norte del CVSLP, y cubre las localidades de La Repartición, Guadalupe, Verdes, El Charquillo y Chancanquero (Figura 2), en las coordenadas

(2544094 mN, 307070 mE), (2544094 mN, 329516 mE), (2517634 mN, 307070 mE)
y (2517634 mN, 329516 mE).

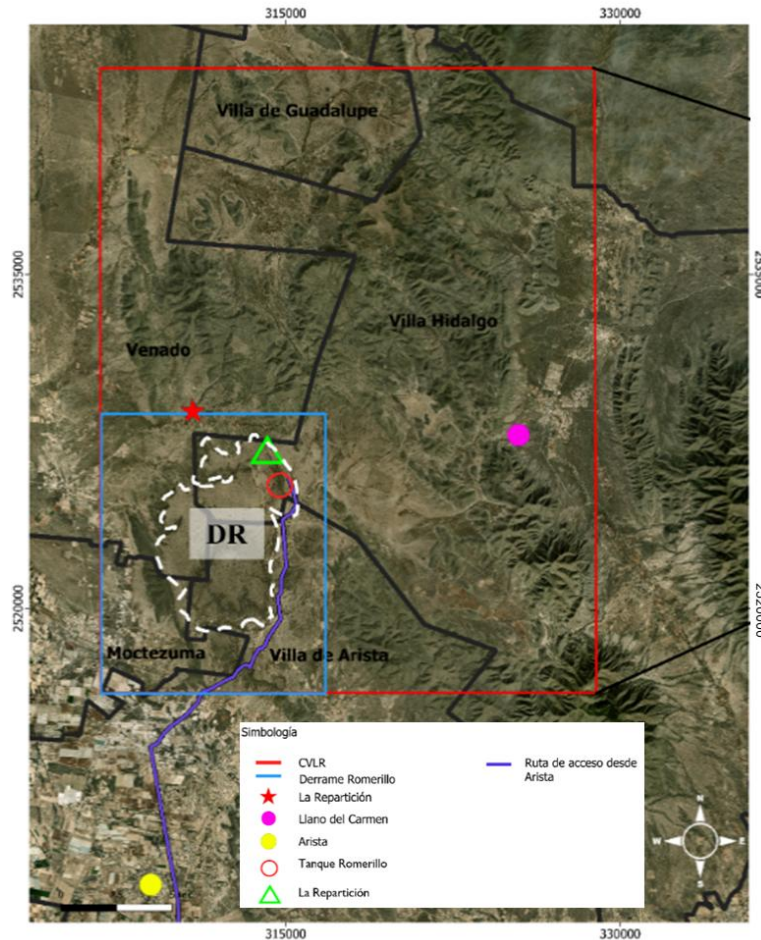


Figura 2. Localización de la zona de estudio, en él se muestran la localización en el país, la región El Complejo Volcánico de La Repartición (CVLR) se localiza en la porción noreste del CVSLP.

3.1.2 FISIOGRAFÍA

El área de estudio se sitúa en el límite de la provincia fisiográfica de la Mesa Central (MC) con la Sierra Madre Oriental. (SMOR; Tamayo, 1941; Raisz, 1959; Álvarez, 1961; Figura 3.), algunos autores han definido a esta zona de transición como la subprovincia de las Sierras Bajas (Raisz, 1964; Lugo-Hubp, 1990).

Raisz (1959) definió la Mesa Central de México como una extensa planicie elevada, rodeada de montañas, y ubicada en la parte central del país. Esta provincia fisiográfica se caracteriza por altitudes superiores a los 2000 metros sobre el nivel del mar y relieves moderados. Según Nieto-Samaniego *et al.* (2005), la Mesa Central está cubierta principalmente por rocas volcánicas del Cenozoico en su parte meridional y por rocas sedimentarias más antiguas, como las del Cretácico, en la región septentrional. Amplias zonas de la MC están cubiertas por tobas y materiales residuales del Pleistoceno y Reciente.

Hacia el este, el área de estudio limita con la porción occidental de la Sierra Madre Oriental (SMOr). Esta cadena montañosa se extiende desde la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y se proyecta continuamente hacia el noroeste, internándose en la parte central de Coahuila y Chihuahua. Está formada principalmente por rocas sedimentarias marinas plegadas (calizas, areniscas y lutitas), lo que resulta en una topografía accidentada con valles y crestas paralelas (Tamayo, 1941; Raisz, 1959; Álvarez, 1961).

Desde una perspectiva geológica, la SMOr es el resultado del levantamiento y deformación de rocas principalmente Mesozoicas. Por otra parte, la SMOr corresponde a un cinturón plegado y cabalgado el cual se ha desarrollado durante el periodo de actividad tectónica definido como Laramídico (De Csema, 1960).

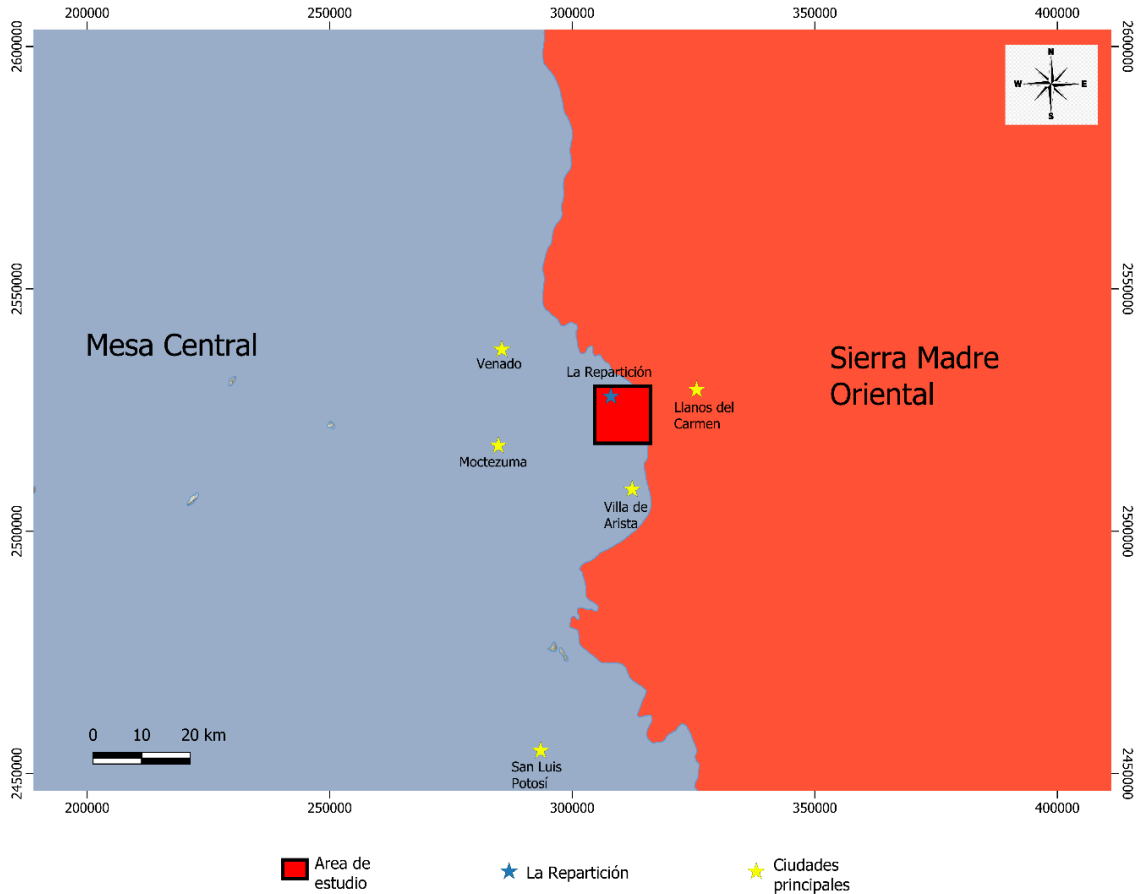


Figura 3. Provincias fisiográficas en las que se localiza el área de estudio; el área de estudio se localiza en los límites de las provincias fisiográficas Mesa Central (MC) y la Sierra Madre Oriental (SMO). Basado en datos obtenidos de INEGI.

3.2 GEOLOGÍA REGIONAL

El basamento Mesozoico del Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) está caracterizado por una secuencia sedimentaria marina que incluye la Cuenca Mesozoica del Centro de México y la Plataforma Valles-San Luis Potosí (Carrillo-Bravo, 1982). Estas sucesiones carbonatadas, formadas entre el Jurásico y el Cretácico, fueron posteriormente deformadas durante la separación de las placas Norteamericana, Sudamericana y Africana. Esta separación se encuentra relacionada a la formación del Golfo de México y del océano Atlántico durante el Periodo Jurásico (Kotelnikov *et al.*, 2014). Como resultado de esta actividad,

numerosas fallas desplazaron bloques del basamento cristalino, generando una topografía irregular en la región. Sobre esta topografía se depositaron sedimentos carbonatados, que evolucionaron hasta el Cretácico Temprano (Padilla y Sánchez, 2007). Estos procesos condujeron al adelgazamiento de la corteza y al incremento de la actividad ígnea en la región.

Los depósitos del Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) se superponen discordantemente sobre las formaciones marinas del Mesozoico. Las formaciones volcánicas del CVSLP se formaron durante una actividad tectónica extensional que cubrió desde el Oligoceno hasta el Mioceno (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Tristán-González, 1986). La historia volcánica de la región se divide en varias etapas, cada una con características y tipos de erupciones distintivos. La primera etapa, que tuvo lugar en el Eoceno medio, fue particularmente intensa y se caracterizó por la formación de grandes domos volcánicos compuestos principalmente por rocas ricas en sílice. Posteriormente en el Mioceno-Cuaternario, ocurrieron erupciones que produjeron rocas como riolitas y basaltos, a través de fisuras y grietas en la corteza terrestre (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Tristán-González *et al.*, 2009).

3.3 ESTRATIGRAFÍA LOCAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LA REPARTICIÓN

La secuencia estratigráfica de la zona está dominada por calizas arrecifales y lagunares de la **Formación El Abra**, depositadas durante el Albiano-Cenomaniano (Carrillo-Bravo, 1971). En la base de la secuencia, se encuentra una unidad dolomítica de grano fino a grueso, de color oscuro, que sugiere condiciones de deposición restringidas (Suter, 1990). Encima de esta unidad, se desarrolla una

secuencia que incluye calizas y dolomitas, intercaladas con calcarenitas bioclásticas ricas en miliolas y toucasias. Hacia la parte superior, predominan las calizas oolíticas y bioclásticas, con estratificación cruzada. Estos cuerpos carbonáticos se extendieron hasta el Turoniano y parte del Senoniano (Aguayo-Camargo, 1975). Asociadas a esta unidad, se encuentran calcarenitas y brechas calcáreas de origen turbidítico, pertenecientes a las formaciones Tamabra (Albiano) y Soyatal (Turoniano-Santoniano). La **Formación Tamabra**, se encuentra en la transición de la plataforma y la cuenca de esta (Barboza-Gudiño, 2001), presenta dos dominios sedimentarios principales: uno autóctono y otro alóctono. El dominio autóctono se caracteriza por mudstone y wackestone que albergan fauna pelágica, mientras que el dominio alóctono está compuesto por packstone, floatstone y rudstone, cargados de detritos provenientes del margen de la plataforma y del complejo arrecifal. Estos sedimentos alóctonos fueron transportados desde el margen de la plataforma (López-Doncel, 2003; Rodríguez-Hernández *et al.*, 2006). Por otro lado, la **Formación Soyatal**, descrita por López-Doncel (2002) incluye caliza, caliza margosa, marga, arenisca fina y lutita, con bancos de brecha calcárea. Se divide en tres unidades: 1) Inferior, con caliza gris oscuro, marga y lutita café oscuro; 2) Media, con brecha calcárea masiva a delgada y bioclastos arrecifales; 3) Superior, con marga gris, arenisca fina color ocre y lutita café oscuro, con bancos de brechas y secuencias rítmicas.

La secuencia estratigráfica finaliza con la **Formación Cárdenas** (Campaniano-Maastrichtiano), compuesta principalmente por lutitas y areniscas finas de origen terrígeno. Esta unidad representa una transición importante en el

registro sedimentario, evidenciando un incremento en el aporte de material clástico desde fuentes occidentales. La predominancia de facies terrígenas sugiere el fin de la actividad arrecifal y lagunar, presente en las unidades subyacentes, y refleja un cambio en el equilibrio sedimentario de la cuenca (Carrillo-Bravo, 1971)

Sobreyaciendo estos depósitos, se encuentran una secuencia de sedimentos fluvio-lacustres, en su mayoría volcanogénicos, incluyendo conglomerados y rocas volcánicas como dacitas e ignimbritas riolíticas, probablemente del Mioceno. De igual forma se observa un volcanismo bimodal con rocas de composición máfica y tobas de composición félsica. Además, se identifican tobas retrabajadas y pumicitas intercaladas con depósitos aluviales recientes, formados por gravas de caliza y rocas volcánicas, que se depositaron en abanicos aluviales y planicies con limos calcáreos y costras de caliche (Barboza-Gudiño *et al.*, 2001).

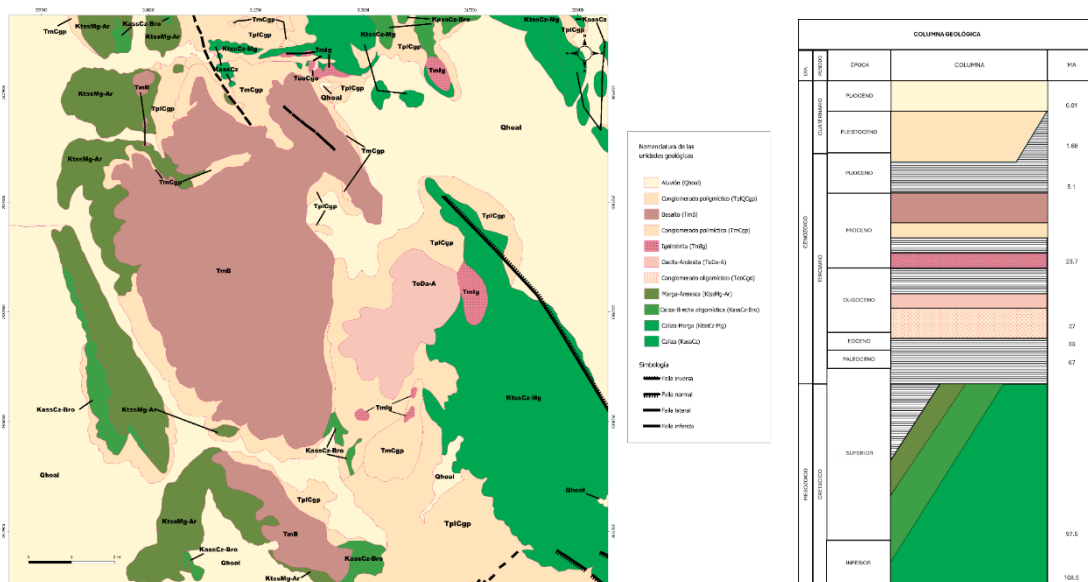


Figura 4. Geología local del derrame Romerillo en el CVLR. (Tomado y modificado de Tristán-González *et al.*, 2009; Carta geológico-minera, Llanos del Carmen, 2001).

3.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LA REPARTICIÓN

La deformación que afectó durante el Cenozoico a la Mesa Central comenzó en el Eoceno y se clasifica como una deformación tipo triaxial. Esta deformación generó fallas normales con direcciones aproximadamente ortogonales, que se desarrollaron de manera sincrónica. Además, la tectónica extensional muestra una relación parcial con la actividad volcánica (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Morán-Zenteno *et al.*, 2005). Los cuerpos extrusivos del Cinturón Volcánico de la Sierra Madre Occidental (CVLR) presentan una alineación general a lo largo del Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT). Este sistema, con actividad registrada entre el Eoceno y el Oligoceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), constituye los límites septentrional y meridional de la Mesa Central (MC), así como una parte considerable de su límite poniente. El SFSLT, se caracteriza por un conjunto de fallas con rumbo noroeste-sureste que se distribuyen geográficamente desde San Luis de La Paz, Guanajuato, hasta Tepehuanes, Durango. Labarthe-Hernández *et al.* (1982) y Tristán-González (1986), tuvo un aumento de actividad en el Oligoceno tardío. Las fallas y demás lineamientos estructurales presentados (Figura 5) son el resultado de diversos estudios realizados por el SGM en las cartas geológico-minero F14-A54 (2001) y F14-A64 (2003).

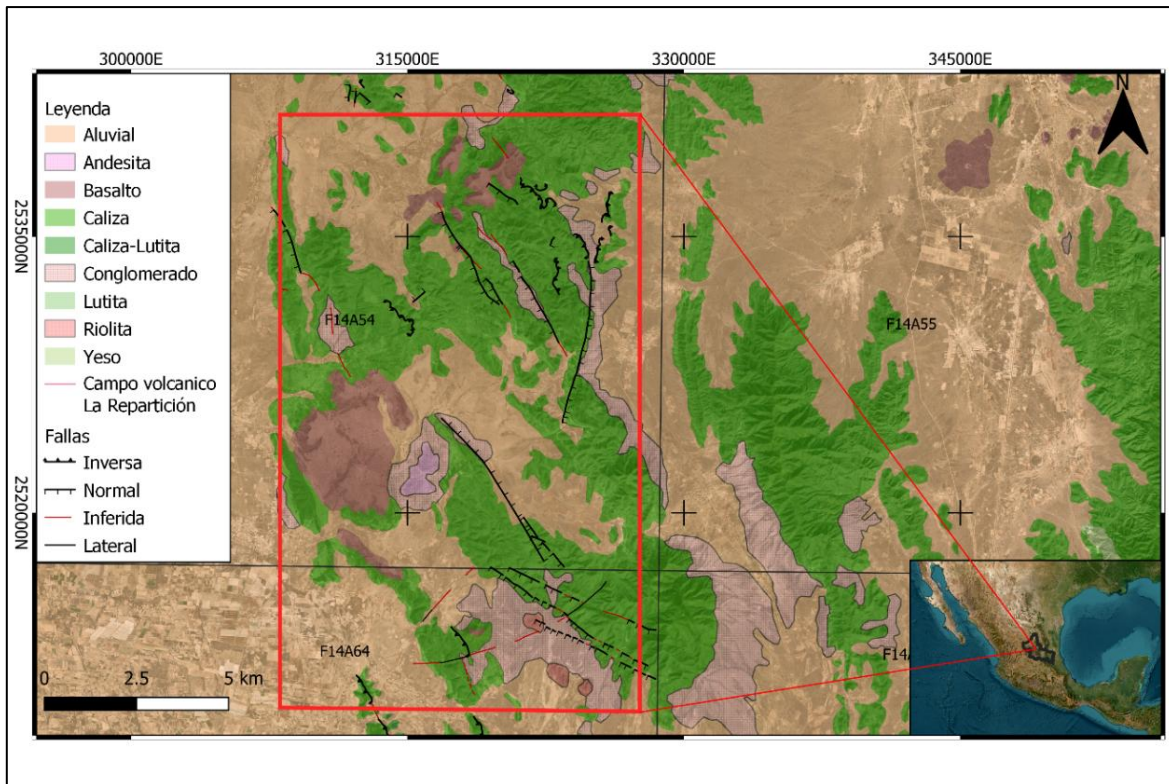


Figura 5. Esquema estructural del Campo Volcánico La Repartición. (Elaboración basado en F14-A65 Llanos del Carmen, 2001; F14-A64 Arista, 2001).

CAPÍTULO 4.

METODOLOGÍA

4.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Para la elaboración de láminas delgadas, se seleccionaron 23 muestras. La preparación de estas láminas se basó en el protocolo interno del Laboratorio de Geología Aplicada, Petrografía y Petrofísica, IPICYT. El procedimiento consistió en:

Corte: se cortan las muestras con una cortadora de disco diamantado a un tamaño aproximado de 2.1x4.5x1.5cm de largo y ancho.

Pulido: los fragmentos de roca cortada se pulen con polvos abrasivos desde 100 - 1000 μ m, hasta lograr una superficie lisa y libre de imperfecciones. De igual forma, se pulieron los portaobjetos con abrasivo 1000 μ m para obtener una superficie adherible.

Pegado: Tras el secado de las muestras, los portaobjetos se fijaron a la superficie limpia de los fragmentos de roca empleando una mezcla de 70% de resina epóxica y 30% de catalizador. Con el fin de lograr una adhesión superior, los ejemplares fueron precalentados durante algunos minutos. La muestras reposaron por tres días.

Desbaste: Se desbastaron los fragmentos de roca, ya adheridos a los portaobjetos, hasta llegar a un espesor de aproximadamente 0.03mm. Posterior a esto se pulió con abrasivos 220-1000, controlando continuamente el grosor de la lámina con apoyo del microscopio petrográfico.

Para determinar las características mineralógicas de las muestras, se consultó la información reportada por Heinrich (1970), Higgins (2006), McKenzie et al. (1982), Philpotts (1989) y Vernon (2018). Se analizaron un total de cinco láminas delgadas del Derrame Romerillo en el Laboratorio de Geología Aplicada, Petrografía y Petrofísica, IPICYT, utilizando microscopía de luz polarizada con nicoles cruzados. Las composiciones modales de las muestras se calcularon mediante el método de conteo de puntos de Delesse-Rosiwal (Tabla 1, Williams y Lufkin, 1942). Este procedimiento implicó superponer una trama de líneas paralelas muy próximas entre sí sobre cada lámina delgada y sumar la longitud total de las líneas que intersecaban cada fase mineral. Para obtener un modelo representativo, se hizo un conteo de 100 puntos por cada muestra analizada.

Tabla 1. Información petrográfica de las rocas del Derrame Romerillo en el Complejo Volcánico de La Repartición. Los datos son presentados en porcentaje. Minerales: Ol: olivino; Pg: plagioclasa; Px: piroxeno. Opc: opaco.

Muestra	Grupo	Unidad	Lat (N)	Long (E)	Textura	Fenocristales			
						Ol	Pg	Px	Opc
LR1	Basalto	T. Romerillo	22°49'44.03"	100°48'23.01"	Traquítica	13.42	63.42	15.85	7.32
LR5	Basalto	T. Romerillo	22°49'38.97"	100°49'38.97"	Traquítica	4.49	65.17	28.09	2.25
LR12	Basalto	T. Romerillo	22°49'42.9"	100°48'14.85"	Traquítica	23.3	30.1	33.98	12.62
LR12 ₁	Basalto	T. Romerillo	22°49'42.9"	100°48'14.85"	Traquítica	20.1	34.15	32.3	13.45
LR16	Basalto	La Repartición	22°50'22.95"	100°48'39.38"	Porfírica	37.76	39.8	11.22	11.22
LR21	Basalto	La Repartición	22°50'24.49"	100°48'38.35"	Traquítica	32.29	47.92	11.46	8.33

4.2 ANÁLISIS GEOQUÍMICO

Fueron seleccionadas un total 23 muestras frescas y homogéneas para la elaboración de análisis geoquímicos. Las muestras fueron trituradas usando una trituradora por percusión en donde se obtuvieron fragmentos de roca de tamaños

entre 0.5-0.8mm con cantidades de 100-250 gr. Una vez trituradas las muestras se colocaron en un molino mono-planetario de ágata con esferas en donde se llevó a cabo su pulverización. Las muestras se dejaron en el molino de ágata cerca de 20 minutos logrando generar un polvo de roca con un tamaño aproximado de 75-28 μ m. Se obtuvo cerca de 25-30 gr de polvo de roca, el cual se colocó en recipientes limpios y estériles para evitar su contaminación. Los procedimientos de triturar y molienda se realizaron en el Laboratorio de Geología Aplicada de la División de Geociencias Aplicadas en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT; Figura 6).



Figura 6. Preparación de muestras para análisis geoquímico.

4.2.1 ANÁLISIS DE ELEMENTOS MAYORES

Para analizar las muestras del Derrame Romerillo, se empleó la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) utilizando un espectrómetro Rigaku ZSX Primus II. Este equipo está disponible en el laboratorio del LINAN (Laboratorio Nacional de

Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología), ubicado en las instalaciones del IPICYT. La FRX cuantifica la concentración de elementos mayores en una muestra mediante la emisión fluorescente secundaria de rayos X.

El proceso de FRX implica irradiar la muestra con rayos X provenientes de una fuente (como un tubo de rayos X, sincrotrón o material radiactivo). Los elementos de la muestra, al ser irradiados, emiten una radiación fluorescente característica que funciona como una huella digital para cada átomo, permitiendo así determinar la composición de la muestra. Un sistema básico de FRX consta de una fuente de radiación, la muestra y un detector.

Para asegurar la calidad de las muestras, se aplicó la técnica de Pérdida por Ignición (LOI). Se determinó que valores superiores al 4% podrían indicar alteraciones que afecten su procesamiento. El contenido de LOI en las muestras analizadas varió entre 0.079% y 0.647% en peso, lo cual es consistente con muestras frescas.

Se calibró el equipo usando modelos de regresión lineal ordinaria e incertidumbre ponderada de mínimos cuadrados. Estos modelos se basaron en materiales de referencia geoquímicos. De acuerdo con Verma *et al.* (2018), se emplearon diversas muestras para minimizar la incertidumbre en las concentraciones de elementos mayores, aplicando correcciones por deriva y efectos de matriz.

Este procedimiento se validó con una muestra de Hawaiiita, cuyos resultados se compararon con datos de la literatura para ajustar la calibración del equipo. Gracias

a este método, se logró una precisión inferior al 1% para los elementos mayores analizados (Tabla 1).

Tabla 2. Valores de análisis estándar, (Basado en Verma et al., 2018)

Roca		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
ATTI	\bar{x}	62.3	0.4951	9.666	4.402	0.02416	6.17	2.144	0.058	0.7781	0.7828
	u_{99}	2.23	0.0143	0.321	0.235	0.00269	0.52	0.076	0.065	0.0366	0.0125
CSB1	\bar{x}	52.76	0.1343	24.4	3.564	0.01398	1.604	1.105	2.123	0.4337	0.0357
	u_{99}	2.04	0.013	0.48	0.233	0.00268	0.398	0.075	0.083	0.0361	0.0057

Posteriormente, se analizó una pastilla para verificar que la calibración fuera adecuada. Después, se procedió al análisis del resto de muestras, manteniendo un orden en su acomodo y numeración. Cada pastilla estuvo aproximadamente 40 minutos en el FRX. Por último, los resultados obtenidos para los elementos mayores y menores se ajustaron y se normalizaron para su procesamiento.

Los resultados de elementos mayores obtenidos de los grupos de muestras del derrame se presentan en la Tabla A 4 y Tabla A 5. Estos datos han sido ajustados a partir de la base anhidra utilizando la normalización CIPW (Verma y Rivera-Gómez, 2013) y siguiendo el ajuste de la relación Fe₂O₃/FeO propuesto por Middlemost (1989).

4.2.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS

Para el estudio de los elementos traza, las muestras previamente preparadas fueron enviadas al Laboratorio del Agua y Monitoreo Ambiental (LAMA-UCEM), en donde se realizó la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado

Inductivamente (ICP-MS) que permitió determinar elementos traza y sus isótopos, para ello se utilizó el equipo Thermo Scientific modelo iCAP.

El proceso de ICP-MS consiste en transportar la muestra líquida hacia un nebulizador, donde se convierte en aerosol con la ayuda de argón. Este aerosol se ioniza en un plasma de alta temperatura (hasta 8000 K), lo que permite que los átomos presentes en la muestra se conviertan en iones. Estos iones son luego analizados mediante un filtro cuadrupolar que los separa según su relación carga/masa, y su abundancia se mide en el detector. El ICP-MS debe cumplir condiciones de vacío y extracción antes de ser calibrado en modo STD (estándar) y KED (discriminación de energía cinética) con celda de colisión. Para el análisis de las muestras, se siguió la metodología de digestión del laboratorio de Instituto de Investigación de Zonas Desérticas (IIZD) de Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. (Tabla A3).

4.3 ANÁLISIS AEROMAGNÉTICO

El **método magnético** se basa en la mayor magnetización de ciertos minerales metálicos en contraste con las rocas y formaciones geológicas, que suelen estar débilmente magnetizadas (Barton et al., 1930). A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas herramientas y técnicas que han mejorado significativamente el análisis y la interpretación de las anomalías magnéticas. Esto ha resultado en su utilidad para aplicaciones como la detección de yacimientos minerales, estudios hidrogeológicos, mapeo de estructuras geológicas y arqueología (Kearey et al., 2002; López-Loera, 2013).

Dentro de este campo, el **método aeromagnético** ha demostrado ser particularmente eficaz para identificar estructuras subterráneas y determinar su profundidad, porque provecha el contraste magnético entre el basamento y las rocas sedimentarias para ofrecer resultados precisos (Vitalis Chidi et al., 2014; Nwosu, 2014).

Los datos magnéticos proporcionados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) se procesaron utilizando los programas Surfer y Oasis Montaj. Es común que los mapas generados a partir de estos datos contengan ruido que dificulte la identificación de anomalías. Para corregir esto, se aplicaron diversas correcciones, como la eliminación del **Campo Magnético Total de la Tierra (CMT)** y ajustes adicionales para corregir posibles derivas o errores instrumentales. Este proceso permite obtener un **Campo Magnético Residual** (Telford y Sheriff, 1990).

Se han desarrollado una serie de filtros que, en su mayoría responde a las transformadas de Fourier y una serie de derivadas que permiten filtrar las bajas y las altas frecuencias. Solo serán puestas algunos de estos filtros en este documento a manera de ejemplificarlos.

El primer filtro aplicado al Campo Magnético Residual (CMR) es la **Reducción al Polo (RP)**. Este método desplaza lateralmente las anomalías y modifica su forma para alinearlas con sus fuentes. Esto hace que las fuentes simétricas generen anomalías simétricas, simulando una toma de datos directa desde el polo norte magnético (Blakely, 1996).

Otro filtro importante que se aplica es la **Señal Analítica (SA)**, también conocida como gradiente total. Esta se calcula combinando los gradientes vertical y horizontal de una anomalía magnética. Dado que es independiente de los campos potenciales, la SA es particularmente efectiva para delimitar los bordes de los cuerpos magnéticos (Nabighian, 1972; Roest y Pilkington, 1992; Blakely, 1996). Para estimar la profundidad de un cuerpo, empleamos **métodos simples** como el **Método del Ancho Medio**. Este método calcula la profundidad al centro o al techo del cuerpo basándose en la mitad del ancho de la anomalía y la mitad de su amplitud máxima (Peters, 1949). Para ello, se utiliza una ecuación específica que depende de la figura geométrica asumida para el cuerpo (Tabla 3; Hinze et al., 2013).

La otra metodología que utilizamos es el **Método del Espectro de Potencia (EPPR)**. Este método transforma los datos magnéticos al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier y un modelo de cuerpo prismático. Esto nos permite identificar un punto máximo en el espectro de potencia, el cual está directamente relacionado con la profundidad y la magnetización de la fuente de la anomalía magnética. La profundidad de la fuente se puede estimar al analizar la pendiente del espectro. El EPPR tiene tres regiones características, cada una vinculada a diferentes profundidades y propiedades de las fuentes (Spector y Grant, 1970, Blakely, 1996).

Tabla 3. Fórmulas para calcular la profundidad de las fuentes magnéticas de acuerdo con el tipo de fuente, centro del cuerpo (z_c), techo de la estructura (z_t), mitad del ancho de la amplitud ($X_1/2$). (Tomado de Hinze et al., 2013).

CUERPO	ECUACIÓN
Esfera	$z_c \leq 2(X_1/2)$

Cilindro delgado horizontal	$z_c \leq 2(X_1)$ $\frac{2}{2}$
Cilindro vertical profundo	$z_t \leq 1.3(X_1)$ $\frac{2}{2}$
Dique vertical	$z_t \leq x_1$ $\frac{2}{2}$

CAPITULO 5.

RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

El análisis petrográfico de las láminas delgadas del Derrame Romerillo (Figura 7) indica que las rocas estudiadas corresponden a litologías de origen ígneo extrusivas e hipocristalinas. En general, se observa una tendencia a texturas traquíticas en la matriz, caracterizada por la alineación de microlitos de plagioclasa, aunque algunas muestras presentan texturas porfiríticas (Figura 7c, d y f). El arreglo mineralógico se compone de aproximadamente un 60% de fenocristales (500 μm a 1000 μm) y microcristales de plagioclasa (Pg), con formas euhedrales a subhedrales orientadas al flujo magmático. Los fenocristales de plagioclasa muestran principalmente maclado tipo Carlsbad y, en algunos casos, polisintético, mientras que en los microcristales predomina el maclado Carlsbad. Se identificaron texturas de zoneamiento en algunos fenocristales de plagioclasa, indicativas de cristalización fraccionada. La composición de la plagioclasa se determinó como cálcico-sódica. También son comunes los fenocristales (300 μm a 1000 μm) y microcristales de olivino (Ol) subhedrales, microcristales de piroxeno (Px) y minerales opacos (Opc).

De manera individual, se observó que:

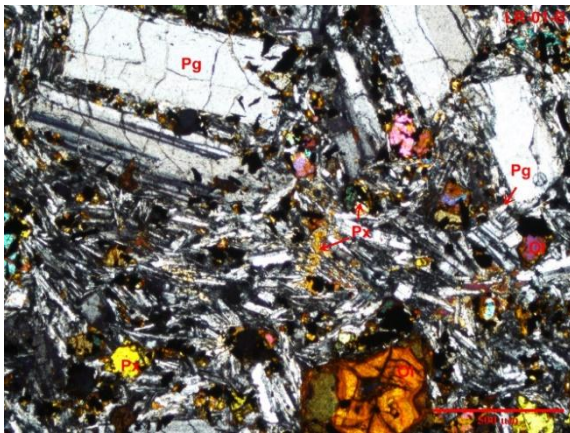
- **LR1:** Textura traquítica con matriz de plagioclasa (63.42% con macla de Carlsbad), piroxeno (15.85%), olivino como fenocristales alterados

(13.42%), y opacos (7.32%). Fenocristales de plagioclasa y olivino > 500 μm .

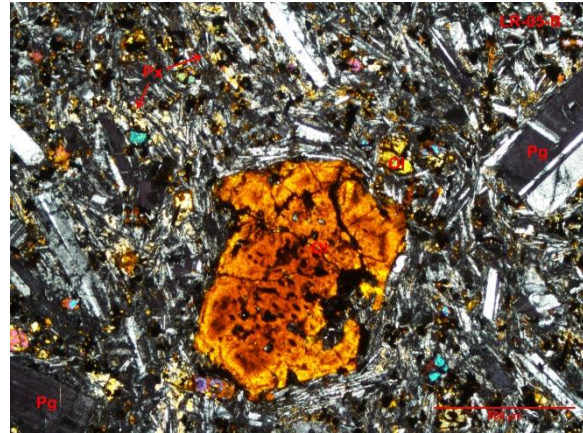
- **LR5:** Textura traquítica con matriz dominada por plagioclasa (65.17% con abundante macla de Carlsbad), piroxeno (28.09%), olivino (4.49%), y opacos (2.25%). Fenocristal de olivino central > 1 mm y plagioclasas \approx 500 μm . Textura tipo corona alrededor de olivino.
- **LR12:** Textura porfirítica hipocristalina con matriz de plagioclasa (30.1% en 7c; 34.15% en 7d) intercreciendo con piroxeno (33.98% en 7c; 32.3% en 7d), olivino (23.3% en 7c; 20.1% en 7d) como matriz y pequeños fenocristales (< 500 μm), y opacos (12.62% en 7c, 13.45% en 7d).
- **LR16:** Textura traquítica hipocristalina con matriz de plagioclasa (39.8%), piroxeno (11.22%), olivino (37.76%), y opacos (11.22%). Fenocristales de plagioclasa con maclado polisintético y zoneamiento, y olivino alterado.
- **LR21:** Textura porfirítica hipocristalina con matriz de plagioclasa (47.92%) y olivino (32.29%), con menor proporción de piroxeno (11.46%) y opacos (8.33%). Fenocristal de plagioclasa central con macla polisintética y zoneamiento, mostrando reemplazamiento de olivino.

Este análisis petrográfico del Derrame Romerillo sugiere que una serie de basaltos con texturas predominantemente traquíticas a porfiríticas, con plagioclasa como el mineral más abundante en la matriz, además de contar con la presencia de

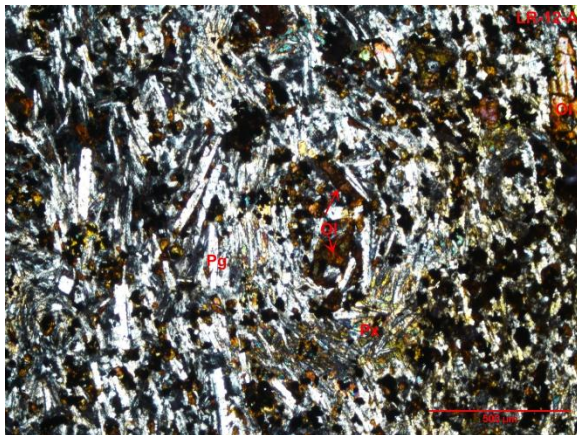
olivino y piroxeno los cuales corresponden a la componente máfica y que se desarrollan como fenocristales y como matriz, presentan en las muestras (Figura 7 a y b) alteración y texturas de reacción, que se deben a un desequilibrio en el proceso de generación del magma, donde se puede ver un efecto de contaminación cortical o de mezcla. Las características cristalográficas de la plagioclasa, como el maclado y el zoneamiento, sugieren una historia de cristalización dinámica durante el emplazamiento del derrame.



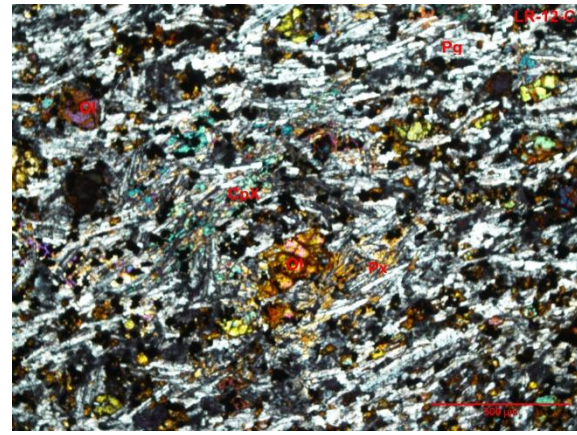
a) LR1



b) LR5



c) LR12



d) LR12₁

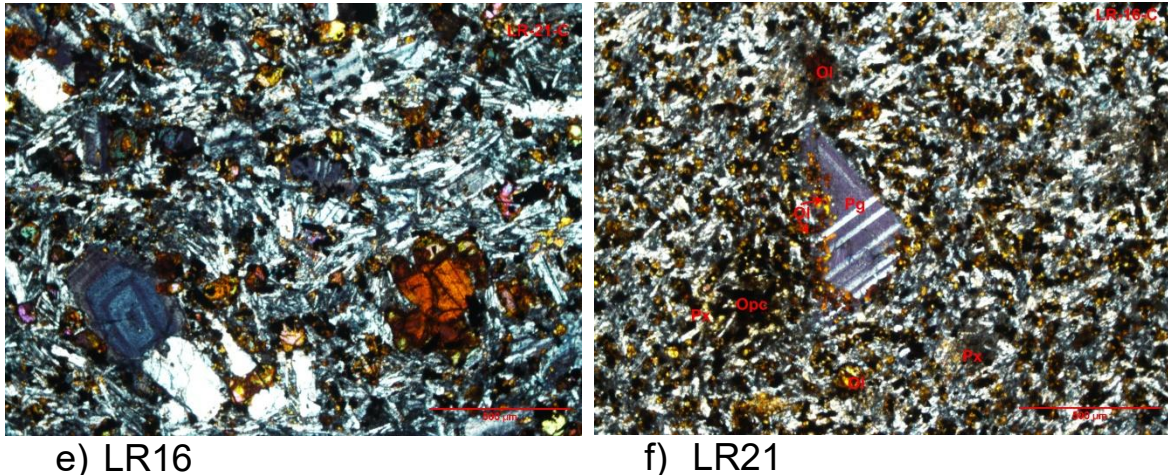


Figura 7. Laminas delgadas con textura traquítica donde se conocen fenocristales de plagioclasa (Pg), piroxeno (Px), olivino (Ol) y minerales opacos (Opc) además de reemplazamiento de olivino por plagioclasa. La matriz está compuesta principalmente de Pg y Px, se observan texturas de zoneamiento en la plagioclasa, se observan pequeños cristales de plagioclasa alrededor de los fenocristales que demuestran la fluidez.

5.2 GEOQUÍMICA ANALÍTICA

Para caracterizar el comportamiento geoquímico del Derrame Romerillo, se recolectaron un total de 23 muestras, las cuales se agruparon en dos categorías principales en función de sus características geoquímicas y su localidad: *i*) Tanque Romerillo y *ii*) La Repartición. Este enfoque facilitó el análisis de elementos mayores, traza y tierras raras.

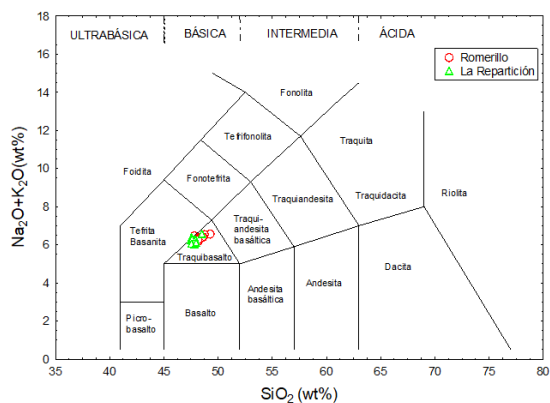
5.2.1 ELEMENTOS MAYORES

Las rocas volcánicas del grupo Romerillo presentan rangos composicionales de $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 47.83\text{--}49.31$ wt%; $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{adj}} = 11.45\text{--}17.91$ wt%; $(\text{MgO})_{\text{adj}} = 5.83\text{--}7.23$ wt%; $(\text{TiO}_2)_{\text{adj}} = 2.46\text{--}3.44$ wt%; $(\text{K}_2\text{O})_{\text{adj}} = 2.17\text{--}3.21$ wt%; $\text{CaO} = 7.68\text{--}8.34$ wt%; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6.14\text{--}10.84$ wt%; $\# \text{Mg} (100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})) = 46.78\text{--}62.30$ (Tabla A1). Por otro lado, las rocas volcánicas del grupo Repartición presentan rangos composicionales de $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 47.51\text{--}48.56$ wt%, $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{adj}} = 9.58\text{--}14.09$ wt%; $(\text{TiO}_2)_{\text{adj}} = 3.07\text{--}3.75$ wt%, $(\text{MgO})_{\text{adj}} = 6.79\text{--}7.40$ wt%; $\text{K}_2\text{O} = 2.06\text{--}2.33$ wt%; P_2O_5

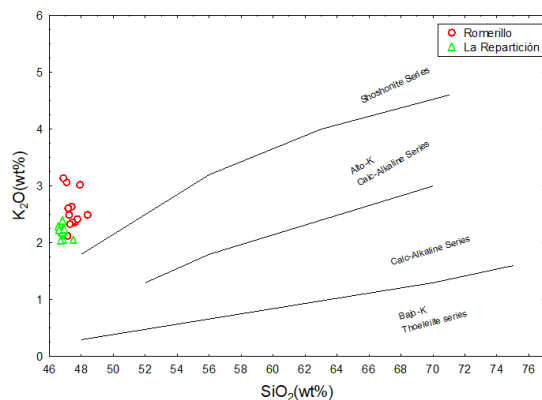
= 1.37–1.49 wt%; CaO = 7.81–8.72 wt%; Fe₂O₃ = 9.32–12.22 wt%; #Mg (100 x Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)) = 45.57–52.49 (Tabla A 2).

La clasificación de las rocas del Derrame Romerillo se realizó utilizando el diagrama Total Alkali vs Silica (TAS; Le Bas *et al.*, 1986), donde se identificaron como traquibasalto con una ligera tendencia hacia composiciones de tefrita-basanita (Figura 8A). Según el diagrama bivariado de K₂O (wt. %) vs SiO₂ (wt. %) (Figura 8B; Peccerillo y Taylor, 1976), a su vez, las muestras muestran una tendencia hacia series shoshoníticas, con un enriquecimiento notable en las rocas del grupo Tanque Romerillo. Además, el diagrama AFM (Figura 8C; Irvine y Baragar, 1971) indica una afinidad calco-alcalina que varía de lo alcalino a lo magnésico.

A



B



C

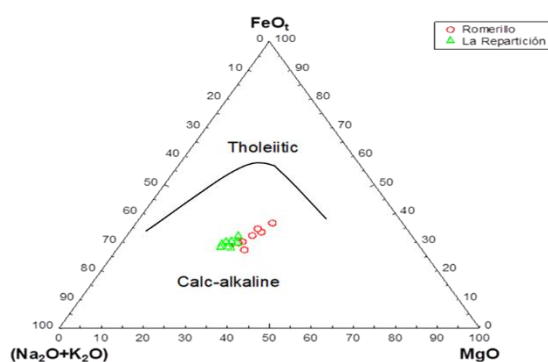
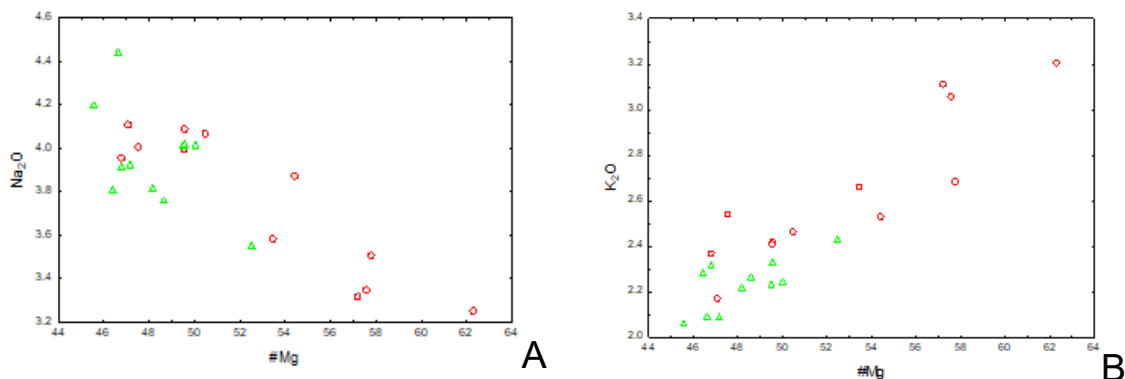


Figura 8. A) Diagrama Total Alkali vs Silica (TAS), B) Diagrama bivariado de K₂O (wt %) vs SiO₂ (wt %), C) Diagrama ternario AFM. Basados en: Le Bas *et al.*, 1986; Peccerillo y Taylor, 1976; Irvine y Baragar, 1971.

Debido a la escasa variabilidad observada en las composiciones y contenido de SiO₂ (~47–49%) de las rocas volcánicas del Derrame Romerillo y La Repartición, se ha escogido el valor del número de magnesio #Mg=100 x Mg²⁺/ (Mg²⁺+ Fe²⁺) como elemento principal para la elaboración de diagramas tipo Harker (Figura 9). Los diagramas Harker (Figura 9b, c, g) muestran tendencias positivas para los elementos K₂O, Al₂O₃, P₂O₅, con excepción en los elementos Na₂O, TiO₂, Fe₂O₃, FeO, los cuales muestran una tendencia negativa (Figura 9a, d, e y f).

A su vez, es de importancia destacar que la mayoría de las rocas de La Repartición se encuentran más enriquecidas en Na₂O, TiO₂ y FeO en comparación a las rocas del derrame Romerillo. Por otro lado, las rocas del derrame Romerillo se encuentran más enriquecidas en K₂O, Al₂O₃ y P₂O₅ (Figura 9).



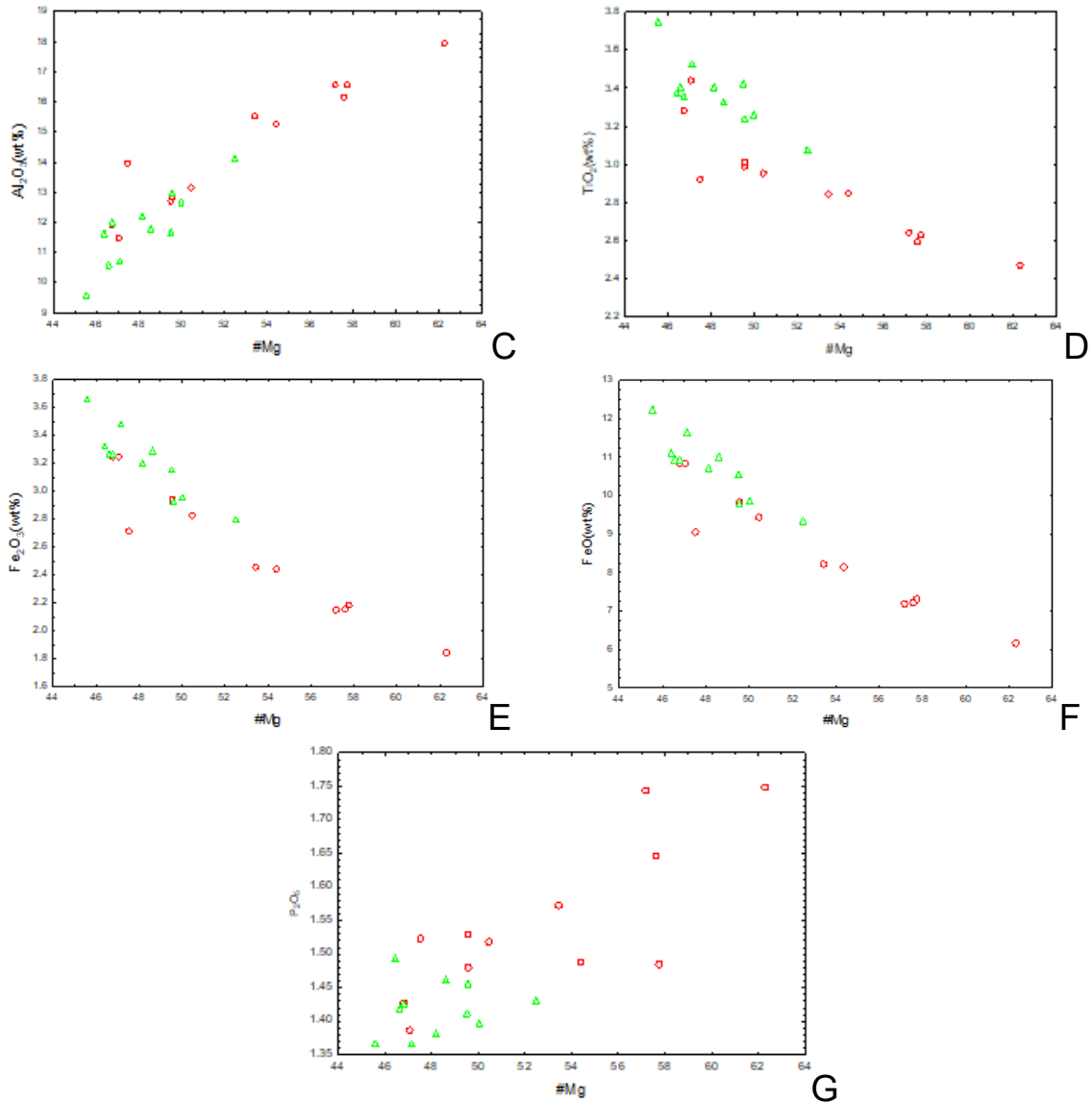


Figura 9. Diagramas Harker y/o diagramas bivariados Mg# vs elementos mayores. a) #MgvsNa₂O, b) #MgvsK₂O, c) #MgAl₂O₃, d) #MgvsTiO₂, e) #MgvsFe₂O₃, f) #MgvsFeO, g) #MgvsP₂O₅

5.2.2 ELEMENTOS TRAZA Y ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS

Las muestras del grupo Romerillo presentan los siguientes rangos composicionales de: Sc de 10.63 a 33.57 ppm, Cr de 5.38 a 24.25 ppm, Ni de 4.60 a 31.90 ppm y Ba de 683.87 a 1638.68 ppm (Tabla A 3). En comparación de las

muestras del grupo La Repartición muestran contenidos de Sc = 10.98–19.45 ppm, Cr = 6.71–13.90 ppm, Ni = 4.01–10.40 ppm y Ba = 500.44–1011.06 ppm (Tabla A 4).

La composición de lantánidos de las muestras del Derrame Romerillo se presenta en diagramas normalizados a condrita (Figura 10a), basados en los valores de las Tablas A3 y A4 (McDonough y Sun, 1995), ambos grupos de rocas del Derrame muestran un enriquecimiento en elementos ligeros de tierras raras (LREE), y un descenso casi a la horizontal en los elementos de tierras raras pesadas (HREE). En contraste, los diagramas normalizados al manto primitivo revelan una tendencia casi horizontal para los elementos incompatibles (LILE) y un descenso en los elementos compatibles (HSFE). En general, ambos grupos exhiben un patrón característico de rocas máficas.

Los patrones de los diagramas de tierras raras normalizados a condrita y al manto primitivo (Figura 10a–b), indican que las muestras no presentan anomalías en Eu. No obstante, en los diagramas multielementos normalizados a manto primitivo se presentan anomalías positivas en Ta ($Ta/Ta^* = 8.66–15.36$), junto con anomalías positivas en Ba, U y P. Además, se observan anomalías negativas en Th, Sr, Er y Rb. A su vez, se llega a observar anomalías negativas en Nb ($Nb/Nb^* = 0.75–1.04$; Tabla A1).

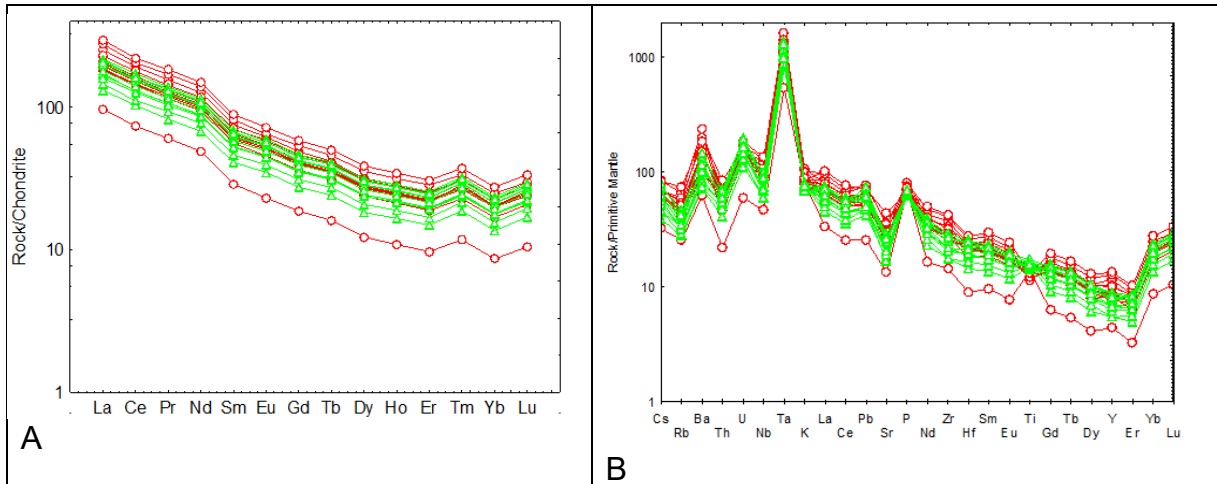


Figura 10. a) Diagrama de condrita de elementos de tierras raras normalizadas para rocas volcánicas máficas; b) Diagrama de manto primitivo de multielementos normalizados para rocas volcánicas intermedias del Derrame Romerillo, CVLR. (Valores tomados de McDonough y Sun, 1995).

5.3 AEROMAGNETISMO

El método aeromagnético es uno de los más efectivos en geofísica para identificar estructuras en el subsuelo y determinar la profundidad del basamento, gracias al contraste de susceptibilidad entre las diferentes rocas. Además, permite realizar estudios en grandes áreas (Dobrin y Sabit 1988; US Army Corps of Engineers, 1995). En el caso del Derrame Romerillo (DR), esta metodología facilita un análisis e interpretación más precisos de las anomalías magnéticas, permitiendo mapeo de estructuras geológicas (Kearey *et al.*, 2002; López-Loera, 2013).

A partir de los datos proporcionados por el SGM, se generó un mapa de Campo Magnético Residual (CMR) para identificar la distribución de anomalías en la zona del derrame. El CMR se obtuvo sustrayendo del Campo Magnético Total (CMT), medido durante el vuelo del SGM, las contribuciones del Campo Magnético de Referencia Internacional (IGRF), las variaciones diurnas, así otros campos magnéticos externos. Con este proceso se eliminan las influencias magnéticas

externas y globales, revelando las variaciones magnéticas locales asociadas a las anomalías en la zona del derrame (López Loera, 2014; Galván, 2016; Figura 11)

Este mapa muestra cambios de contraste que dependen directamente de la respuesta magnética del campo terrestre; así, las áreas de baja intensidad se representan con tonalidades azules, mientras que a medida que la intensidad aumenta, los colores tienden hacia tonos rojos.

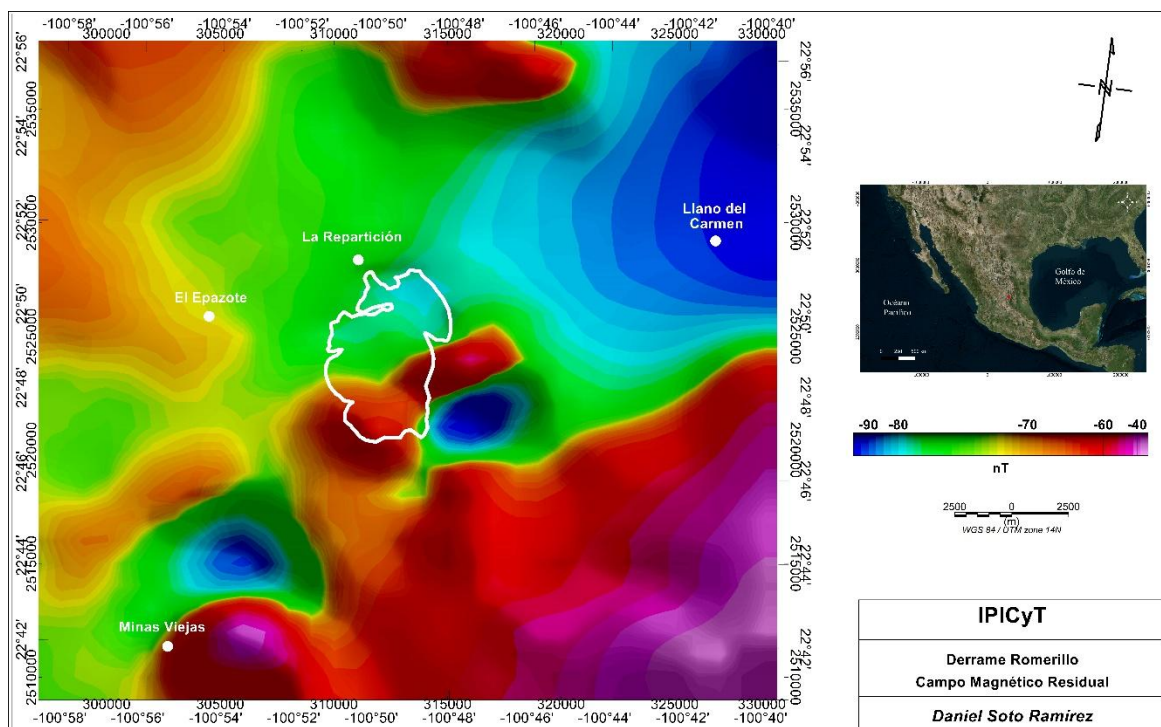


Figura 11. Mapa del Campo Magnético Residual del Derrame Romerillo.

Para realizar un mejor análisis, se realizó la configuración de Reducción al Polo (RP; Baranov y Naudy, 1964; Figura 12), para poder eliminar la asimetría causado por la dirección de magnetización no vertical.

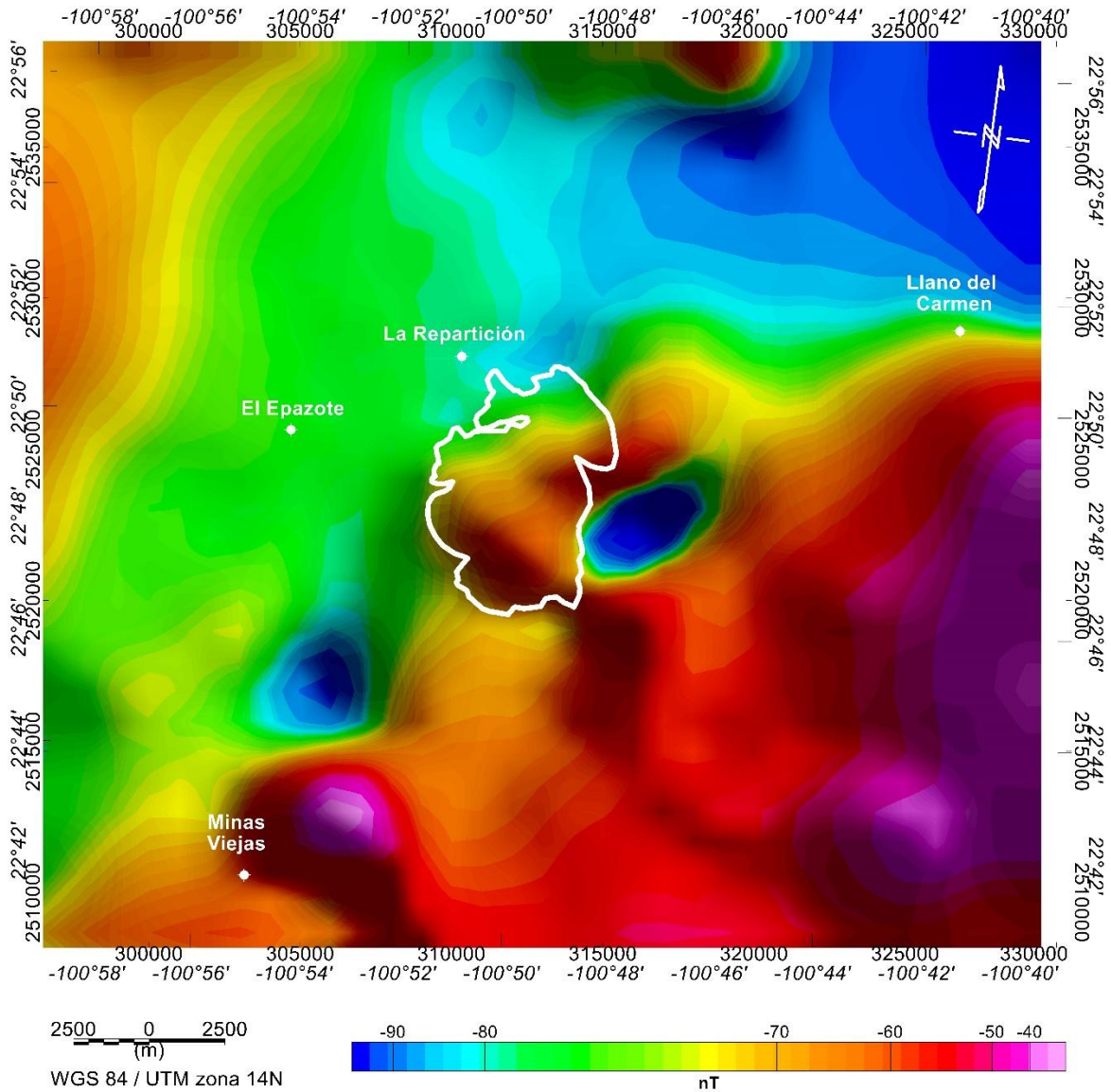
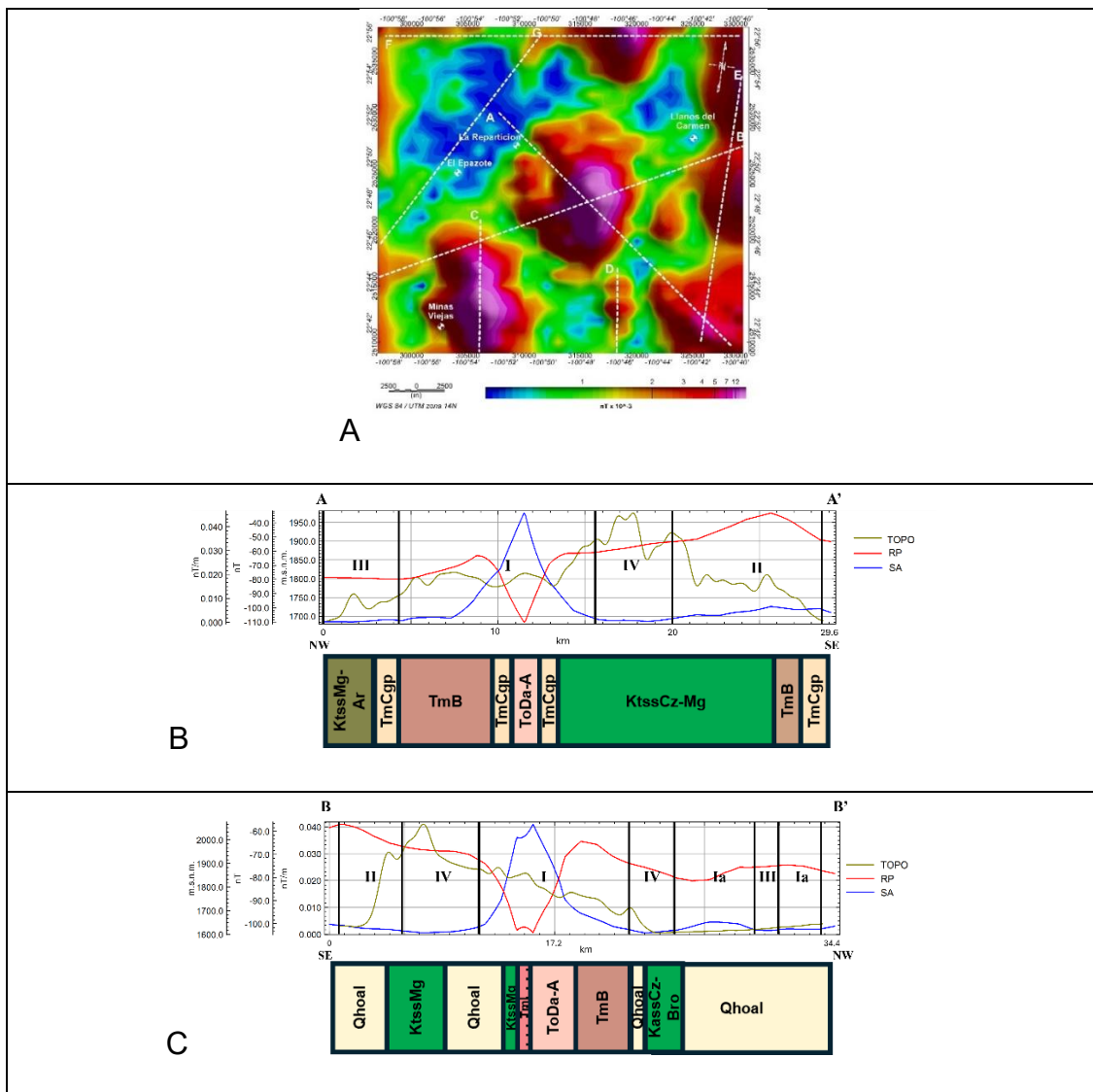


Figura 12. Mapa del Campo Magnético Reducido al Polo.

5.3.1 DOMINIOS AEROMAGNÉTICOS

Los Dominios Aeromagnéticos (DAM) representan áreas con susceptibilidades magnéticas similares y tendencias definidas, que pueden corresponder a una o varias unidades litológicas (González-Piña, 2014; Galván-Pineda, 2016). Para delimitar estos DAM en la zona de estudio, se aplicó el filtro de

Señal Analítica y se generaron perfiles comparativos entre la Señal Analítica (SA), la Reducción al Polo (RP) y la topografía. Este análisis comparativo permitió identificar y definir con mayor precisión los límites de los DAM, relacionando las variaciones magnéticas con las características litológicas y topográficas del área (Topo; Figura 13B–H).



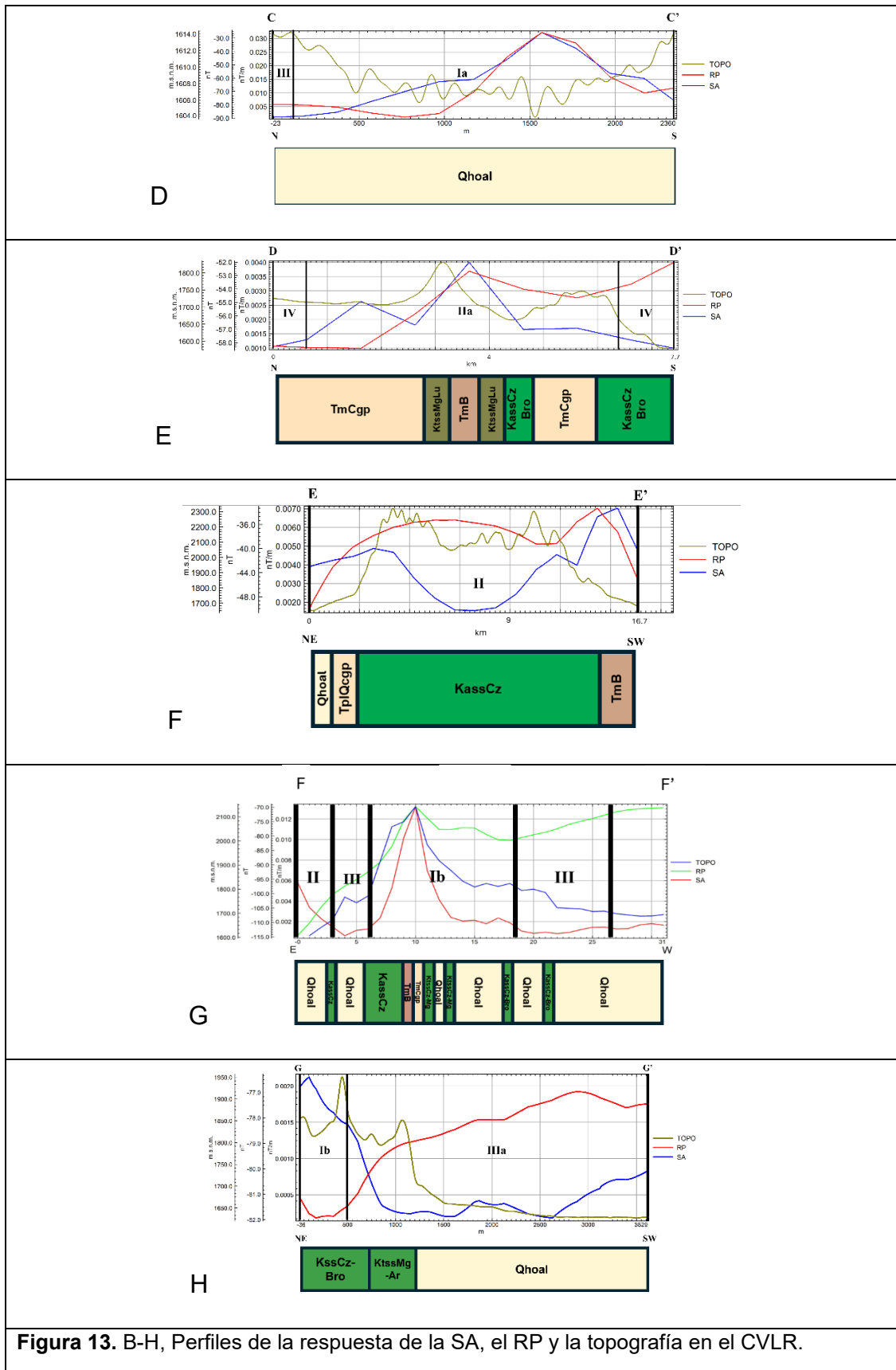


Figura 13. B-H, Perfiles de la respuesta de la SA, el RP y la topografía en el CVLR.

De los perfiles se pudieron obtener 4 dominios y 3 subdominios:

DAM I

Se caracteriza por ser el área de interés principal, con un perímetro de 64.4 km. Se define por una anomalía magnética asociada al evento volcánico del Derrame Romerillo. Mediante los perfiles A y B (Figura 13B–C), se identificaron variaciones en la intensidad de la Señal Analítica (SA) que van desde los 0.0014 nT/m a los 0.0457 nT/m, estas variaciones en SA sugieren la presencia de estructuras geológicas de interés en el subsuelo, por otro lado, la variabilidad del Campo Magnético Residual Reducido al Polo (RP) oscila entre -79.6 nT y -110 nT. La topografía presenta un rango altitudinal entre 1629 m.s.n.m. a los 1760 m.s.n.m. En términos geológicos en superficie, el DAM I está compuesto principalmente por rocas basálticas del Derrame Romerillo, tobas de roca intermedia, así como de depósitos sedimentarios del Cretácico y del Terciario.

DAM Ia

Este dominio se encuentra al suroeste de la carta con un perímetro de 77 km. Tiene una forma irregular con una dirección N-S. Mediante el perfil C (Figura 13D), se identificaron los cambios de variación en SA que van desde los 0.0015 nT/m a los 0.0321 nT/m que sugieren la existencia de una estructura geológica. Por su parte, RP varía entre -81 nT a -80.2 nT. En superficie solo es apreciable conglomerados del terciario.

DAM Ib

Se encuentra al noreste de la carta, con un perímetro aproximado de 36 km, de forma irregular, que al estar al borde de la carta no permite definir una forma

específica, pero parece indicar que posee una dirección N-S. Se definió mediante los perfiles F y G (Figura 13G–H). En términos geológicos en superficie, el DAM Ib está compuesto principalmente por rocas máficas, tobas de roca intermedia, así como de depósitos sedimentarios del Cretácico y del Terciario.

DAM II

Para identificar DAM II, se consideraron los perfiles A, B y E (Figura 13B–C y F), se caracteriza por tener un perímetro de 88.3 km, tiene una forma irregular con una dirección N-S. Mediante los perfiles A, B y E, se identificaron los cambios de variación en SA que van desde los 0.0015 nT/m a los 0.0070 nT/m que sugieren la existencia de una estructura geológica. Por otro lado, RP varía entre -50.3 nT a -33.3 nT. La topografía presenta un cambio de altitud que va desde los 1651.5 m.s.n.m. a los 2322.2 m.s.n.m. Esta zona, ubicada en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, se eleva topográficamente sobre el terreno circundante. La geología de superficie se caracteriza por extensas secuencias sedimentarias del Cretácico y del Terciario, mientras que al sur tenemos presencia de rocas máficas aflorantes.

DAM Ila

El subdominio se encuentra al sureste de la carta, con un perímetro aproximado de 10 km, de forma irregular, posee una dirección N-S. Se definió mediante el perfil D (Figura 13E), la señal analítica es de 0.0015 nT/m a 0.004 nT/m, mientras que la intensidad de RP es de -58.4 nT a -54.1 nT, mientras que la

topografía presenta una altura que va desde los 1686 m.s.n.m. a los 1863 m.s.n.m. En superficie contempla dos afloramientos de rocas máficas.

DAM III

El DAM se localiza al noroeste de la carta, fue determinado con los perfiles A, F y G (Figura 13B, G y H), está conformado de secuencias sedimentarias provenientes de la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental, principalmente de calizas y conglomerados poligmíticos, la altura varia desde los 1626 m.s.n.m. a los 1958 m.s.n.m., con una variabilidad en RP que va de -80.2 a los -75.9. Este dominio se caracteriza por tener la variabilidad más baja en SA con un cambio de los 0.0002 nT/m a los 0.0014.

DAM IV

El dominio se caracteriza por estar compuesto principalmente de rocas sedimentarias de la Mesa Central y la SMO, se determinó con los perfiles A y B (Figura 13B–C) con una topografía que va desde los 1583 m.s.n.m. a los 2268 m.s.n.m., está compuesta principalmente de calizas y conglomerados. Presenta una variabilidad de RP que va de los -60.9 nT a los -66.8 nT y una SA que va de los 0.0006 nT/m a los 0.0013 nT/m.

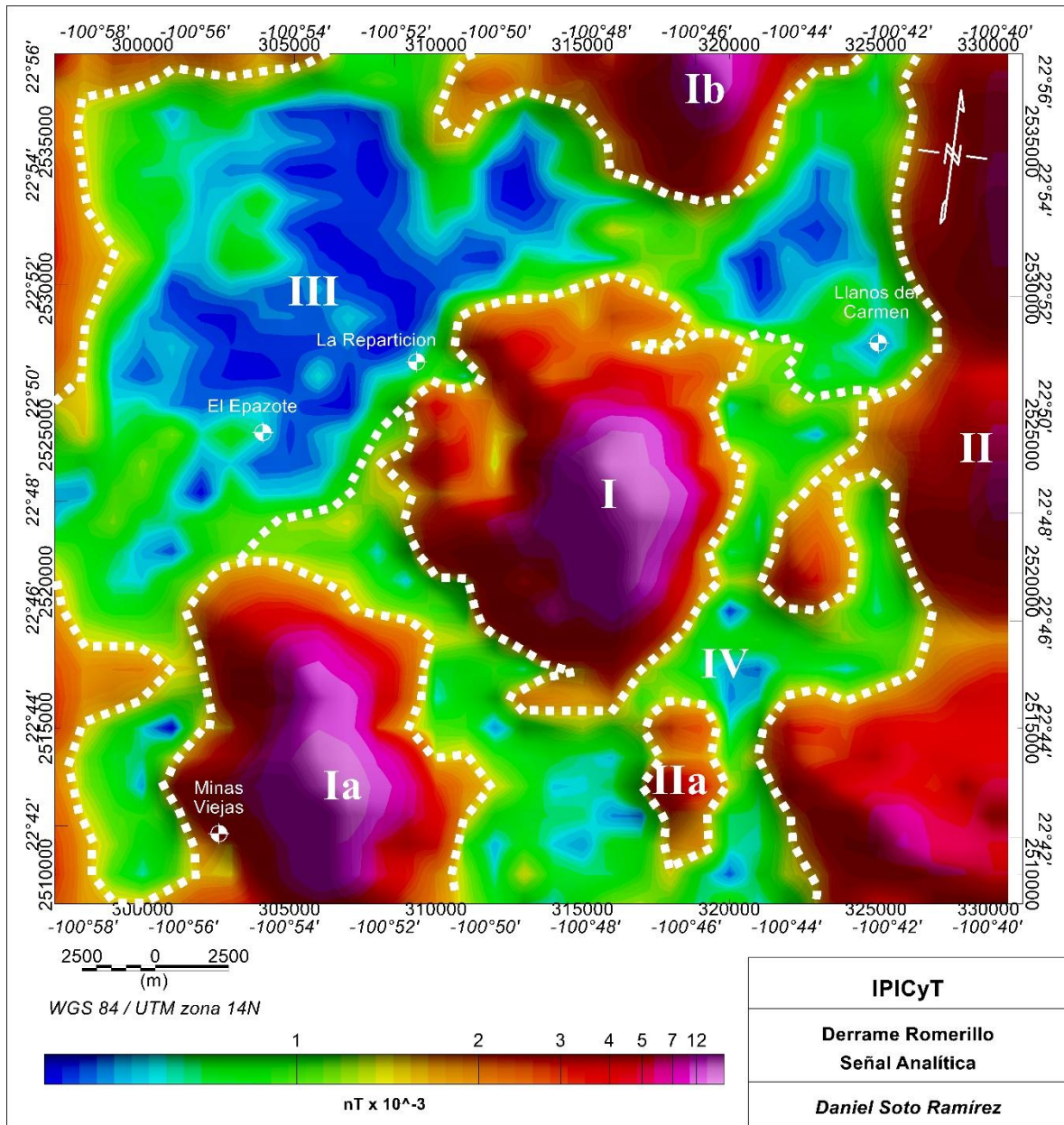


Figura 14. Dominios Aeromagnéticos en la configuración de Señal Analítica.

La Tabla 3 resume los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones de la Tabla 2 a cada tipo de cuerpo intrusivo, además de los de Espectro de Potencia. Esta ecuación permitió estimar la profundidad al centro (Z_c) y al techo (Z_t) de las estructuras intrusivas, considerando su morfología particular. Los valores obtenidos

proporcionan una estimación de la geometría de los cuerpos intrusivos a profundidad. El valor estimado es $X_{\frac{1}{2}} = 2.4$ km. Por otro lado, la profundidad estimada por el método de Espectro de Potencia (Figura 15) fue de para las fuentes someras de 1.68 km mientras que para fuentes profundas fue de 3.8 km.

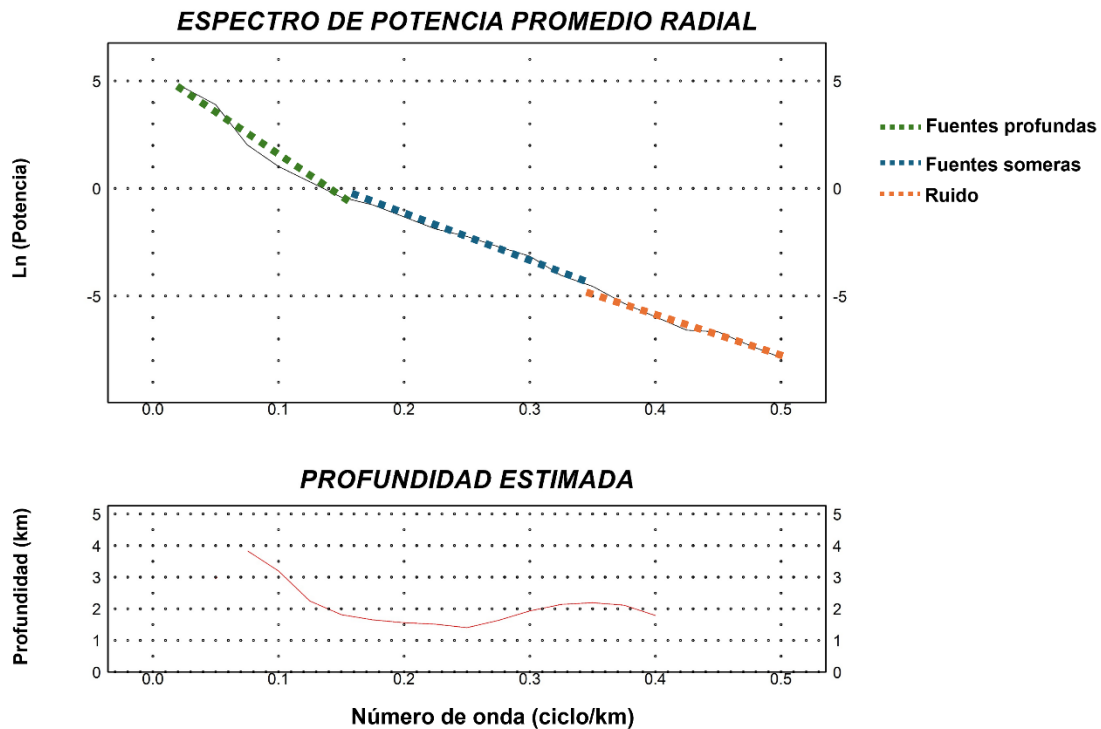


Figura 15. Representación del Espectro de Potencia para el mapa de RP del Derrame Romerillo.

Tabla 4. Síntesis de las profundidades de la anomalía del Derrame Romerillo.

CUERPO	METODOLOGÍA HDW (Km)	CUERPO	METODOLOGIA EPR (Km)
Esfera	4.8	Profundos	3.8

Cilindro delgado horizontal	4.8	Someros	1.68
Cilindro vertical profundo	3.12		
Dique vertical	2.4		

5.3.2. MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO 2D

La modelación de anomalías geofísicas es un problema inverso no único, influenciado por la heterogeneidad de las propiedades físicas de las estructuras geológicas. Se llevó a cabo un modelado 2D inverso de los datos magnéticos utilizando el software GM-SYS. El modelo obtenido representa la distribución de magnetización en el subsuelo, considerando una geometría simplificada de un cuerpo extendido en la dirección perpendicular al perfil. Se realizó un modelado bidimensional de la sección, considerando una variación espacial de la susceptibilidad magnética. Los valores de susceptibilidad utilizados se obtuvieron de la literatura (Clark y Emerson, 1991; Telford *et al.*, 1976; Milsom, 2003; Kearey *et al.*, 2002) y de mediciones de laboratorio. La tabla 5 muestra los valores de susceptibilidad magnética aparente asignados a cada unidad geológica del modelo.

Tabla 5. Susceptibilidades magnéticas de las unidades geológicas.

ESTRATO	SUSCEPTIBILIDAD 1×10^{-3} (SI)
Basalto	7-12.6
Roca intermedia	1-3
Sedimentos cuaternarios	0. 00126
Sedimentos jurásicos	0.00126
Unidad Geológica Indeterminada	0. 00126

CAPITULO 6

DISCUSIÓN

Los resultados geoquímicos y aeromagnéticos permitieron realizar una correlación y poder definir modelos que permitieron comprender el origen y evolución de las rocas del Derrame Romerillo.

Los datos de geoquímica fueron interpretados utilizando el software “Statistica”, que, dentro de sus procesos, permitió ajustar los datos sin procesar a datos normalizados con relación a los estándares petrogenéticos. Para los datos aeromagnéticos se utilizó el software “Oasis Montaj”, que permitió procesar los datos y aplicar los filtros necesarios para su análisis y generación de modelos.

6.1 FUENTE MAGMÁTICA

Se utilizó una metodología multidisciplinaria para investigar las fuentes del Derrame Romerillo. Los análisis espectrales de datos aeromagnéticos proporcionaron información sobre la distribución espacial de las fuentes, mientras que los diagramas bivariados de elementos traza y tierras raras inmóviles permitieron inferir la composición de los magmas fuente (basalto de islas oceánicas (OIB), corteza continental inferior (LCC), corteza continental superior (UCC) y corteza continental media (MCC)). Estos datos permitieron la elaboración de diagramas de fuentes de magma, como (Nb/Yb) vs (Th/Yb), (La/Nb) vs (Ba/Yb) y (Zr/Y) vs (Nb/Yb) (McDonough y Sun, 1995; Rudnick y Gao 2003; Pearce, 2008; Figura 16).

El diagrama (Nb/Yb) vs (Th/Yb) de elementos traza (Figura 16a), muestra que las rocas máficas presentan una tendencia hacia el MCC con composiciones similares a las de los OIB, lo que sugiere una fuente de manto enriquecido. Además, la mayoría de las muestras se ubican por encima de la tendencia de los MORB, lo que indica un enriquecimiento significativo en elementos incompatibles como Nb y Th. Este enriquecimiento podría reflejar diferentes grados de fraccionamiento cristalino.

Por otro lado, el diagrama (Ba/Nb) vs (La/Nb) (Figura 15b) sugiere una interacción de los magmas ascendentes con la corteza continental, así como un enriquecimiento derivado de la fusión parcial de la litosfera inferior enriquecida. La dispersión en estos datos señala una composición de fuente mantélica. El diagrama (Zr/Y) vs (Nb/Y) se utiliza tradicionalmente para realizar estimados relacionados a procesos de fusión parcial, cuantificando en sí, las anomalías de Nb en relación de rocas basálticas de Islandia. De acuerdo con la propuesta Fitton *et al.* (1997), este diagrama presentado en la Fig. 16c (Zr/Y–Nb/Y) se observa que las rocas del Derrame Romerillo presentan un grafo de fusión parcial moderado, con una composición comparable a la disposición del manto y a distintos niveles de corteza continental. A partir de esto, podemos observar que las muestras del DR presentan una afinidad de OIB, lo cual puede marcar una fuente totalmente mantélica.

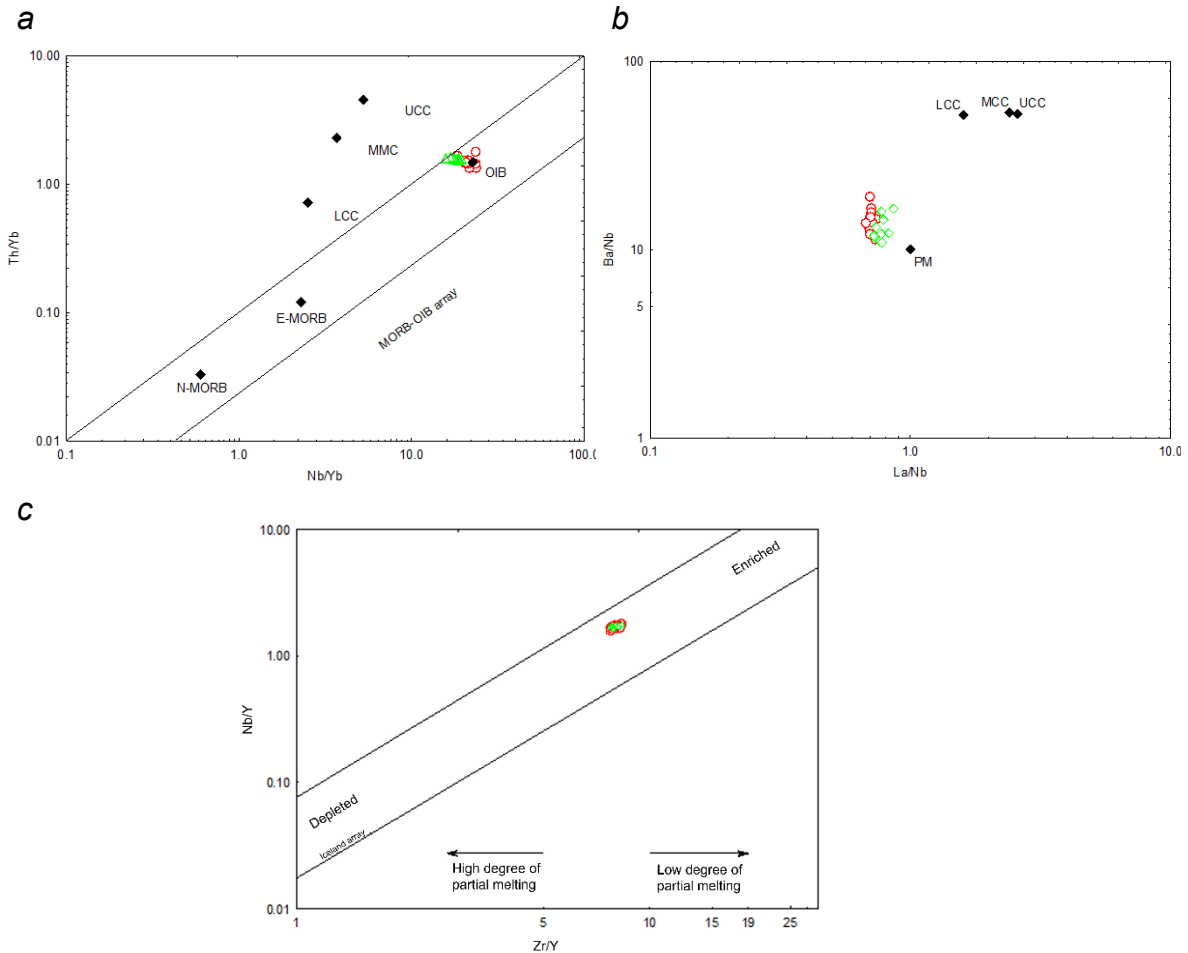


Figura 16. a) Diagrama de Nb/Yb vs Th/Yb; b) Diagrama de La/Nb vs Ba/Nb; c) Diagrama de Zr/Y vs Nb/Y (Basado en los diagramas de Pearce; abreviaciones: N-MORB: normal Mid-Ocean Ridge Basalt; E-MORB: Enriched Mid-Ocean Ridge Basalt; OIB: Ocean Island Basalt; LCC: Lower Continental Crust; MCC: Middle Continental Crust; PM: Primitive Mantle, UCC: Upper Continental Crust.; Los valores de OIB, N-MORB, E-MORB, estos datos fueron tomados de McDonough and Sun, 1995; los valores LCC, MCC y UCC fueron tomados de Rudnick and Gao 2003).

También se utilizaron las relaciones entre Th/Nb, La/Nb y Ce/Pb en las rocas máficas del Derrame Romerillo para comprender mejor la fuente del magma, basados en esto, se emplearon los diagramas propuestos por Moreno *et al.* (2014) (Figura 17a–c), estos diagramas sugieren una afinidad de OIB en las rocas máficas del Derrame mostradas típicamente en fuentes de corteza continental, lo cual

sugiere que podría haber contaminación de otros magmas o contaminación durante su génesis.

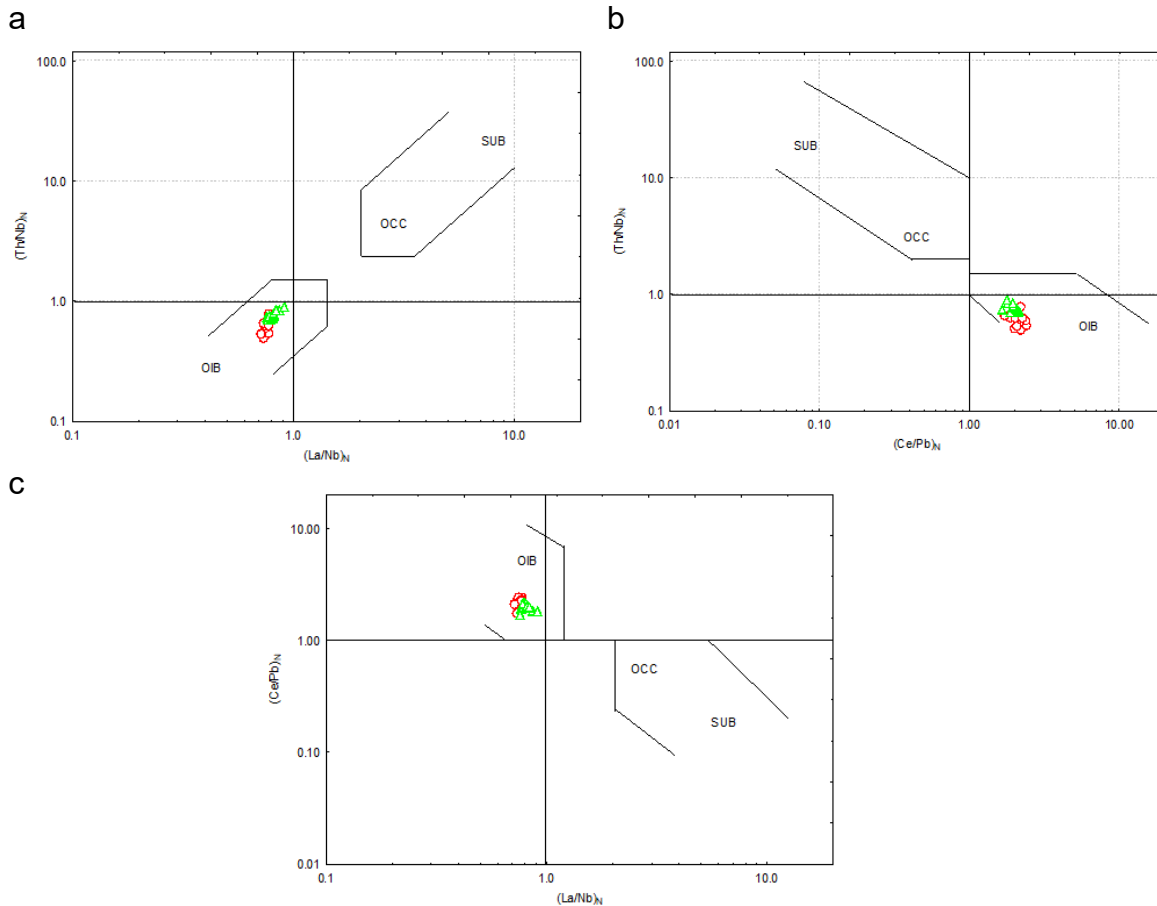


Figura 17. a) Diagrama de $(La/Nb)_N$ vs $(Th/Nb)_N$; b) Diagrama de $(Ce/Pb)_N$ vs $(Th/Nb)_N$; c) Diagrama de $(La/Nb)_N$ vs $(Ce/Pb)_N$. (Abreviaciones: CA–Continental Arc; CC–Continental Crust; IA–Island Arc; OIB–Ocean Island Basalts; Sub, subduction-related magmatic suites; los valores normalizados fueron tomados de McDonough and Sun, 1995.

Por otra parte, la inversión de los datos aeromagnéticos permitió construir un modelo geológico-geofísico que correlaciona las variaciones en la susceptibilidad magnética con las diferentes unidades litológicas, identificando zonas dominadas por rocas ígneas extrusivas y secuencias sedimentarias. Aunque la resolución de los datos limitó el análisis detallado de las estructuras geológicas. Por un lado, los DAM, permitieron establecer zonas asociadas a estructuras con altos valores

magnéticos, siendo DAM I el más importante por ser el que está asociado con el Derrame Romerillo, una anomalía que abarca un área de 55 km², que parece estar asociado con la estructura fuente del DR.

Para determinar la geometría y profundidad del cuerpo asociado al Derrame Romerillo, se construyó un modelo magnético 2D (Figura 18) utilizando el programa GM-SYS. Se invirtieron los datos de Campo Magnético Reducido al Polo, empleando el algoritmo de Marquardt (1963) y utilizando los resultados del Espectro de Potencia y el Método de Peters (1989) como valores iniciales. La anomalía es modelada por cuerpos poligonales con diferentes magnetizaciones, sin embargo, una de las problemáticas en la construcción de los modelos cuantitativos es la heterogeneidad de las propiedades magnéticas observadas en depósitos minerales donde las magnetizaciones remanentes producen direcciones de magnetización dispersas (López-Loera *et al.*, 2020). En este modelo se muestra que existe un cuerpo que se extiende a lo largo de 11.99 km, con una profundidad de 4.8 km y un espesor máximo de 3 km. Las variaciones en la magnetización observada en superficie se correlacionan con los cambios en la composición de las rocas subterráneas. De acuerdo con lo anterior, la profundidad de la fuente está en un rango de 1.74 km a 3.2 km de la superficie al techo.

Las zonas de alta magnetización corresponden a la presencia de rocas traquibasálticas, mientras que las zonas de baja magnetización se asocian con rocas sedimentarias.

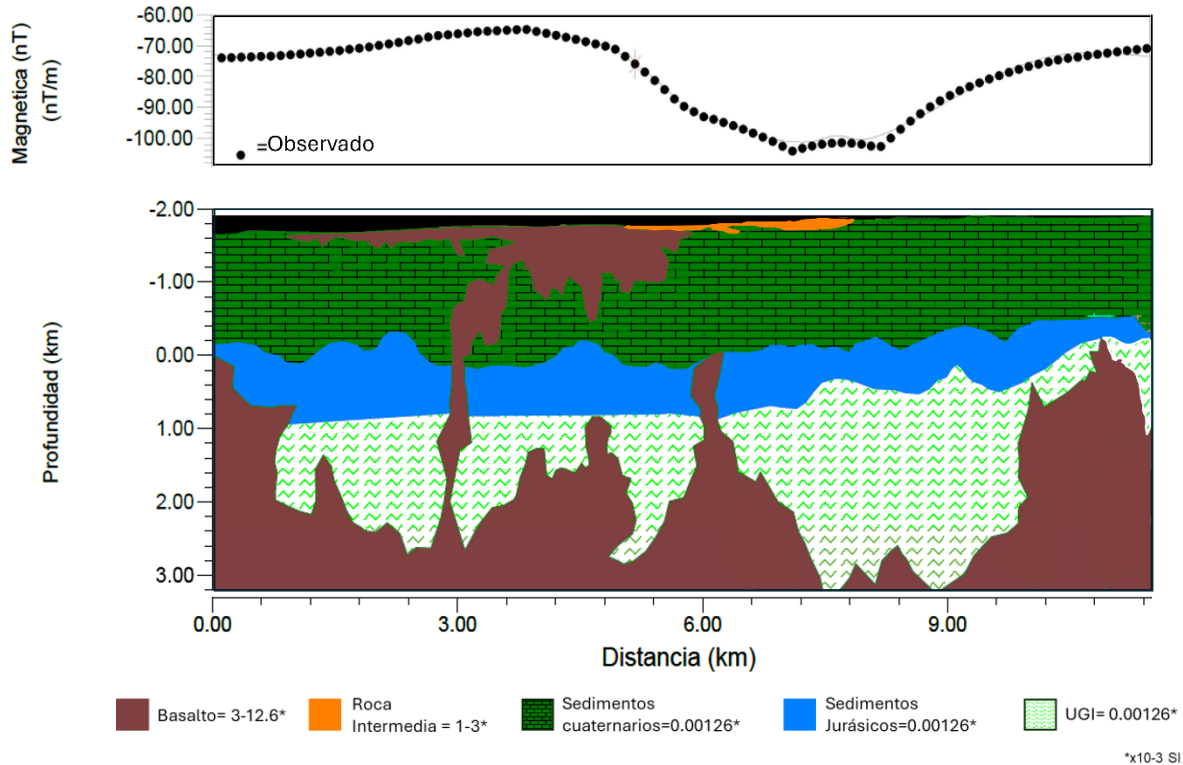


Figura 18. Sección aeromagnética modelada en 2D de la anomalía magnética del Derrame Romerillo. Las unidades geológicas fueron modeladas con las siguientes susceptibilidades (SI): Basalto: 7×10^{-3} - 12.6×10^{-3} ; Roca intermedia: 1×10^{-3} - 3×10^{-3} ; Sedimentos cuaternarios, Jurásicos y Unidad Geológica Indeterminada (UGI): 1.26×10^{-7} .

La combinación de datos geoquímicos y magnetométricos sugiere que el magma que originó el Derrame Romerillo se generó en la interfase manto-corteza inferior. Aunque la profundidad exacta de ascenso del magma es incierta, los datos magnetométricos indican que se emplazó un cuerpo magmático (stock) a aproximadamente 5 km de profundidad, el cual podría ser la fuente de diversos depósitos superficiales en la zona de interés.

La interpretación de los datos magnéticos aéreos presentó limitaciones que impidieron la identificación precisa de lineamientos aeromagnéticos en la zona de estudio, tales limitaciones están asociadas a la resolución y el espaciado de las

líneas de vuelo y la profundidad de las fuentes magnéticas (Grauch y Cordell, 1987), que generaron respuestas magnéticas ambiguas, no obstante, fue posible determinar lineamientos geológicos relevantes mediante un exhaustivo trabajo de campo. Este trabajo permitió identificar y mapear estructuras clave, especialmente en la zona de 'El Derrame', donde afloramientos de caliza visibles entre basaltos. La observación detallada de estos afloramientos, combinada con el análisis estructural, permitió superar las limitaciones de los datos magnéticos aéreos y obtener una comprensión más precisa de la geología local (Figura 22).

6.2 PROCESO PETROGENÉTICO

Para obtener una visión detallada de las características y evolución de las rocas máficas del Derrame Romerillo y rocas de La Repartición, se utilizaron diagramas bivariados Ce vs (Ce/Yb), La vs (La/Yb) y La vs (La/Hf) (Figura 19a–c; Zou, 2007). Estos diagramas apoyan a la evaluación del grado de fraccionamiento de los elementos de tierras raras (REE) y cómo varía en función del contenido de los REE. La interpretación de estos diagramas permitieron una mejor comprensión de los procesos magmáticos y las condiciones de formación de las rocas máficas.

Las muestras de roca presentan una tendencia hacia procesos de cristalización fraccionada, sin embargo, debido a la variabilidad observada en tendencias de tierras raras y elementos traza en algunas muestras de la zona, niveles bajos de fusión parcial, como de asimilación no han sido excluidos. Por lo tanto, para poder obtener una información más concreta acerca de procesos de asimilación y/o diferenciación entre las rocas máficas se recomienda utilizar

información isotópica complementada con contenidos de elementos traza y tierras raras.

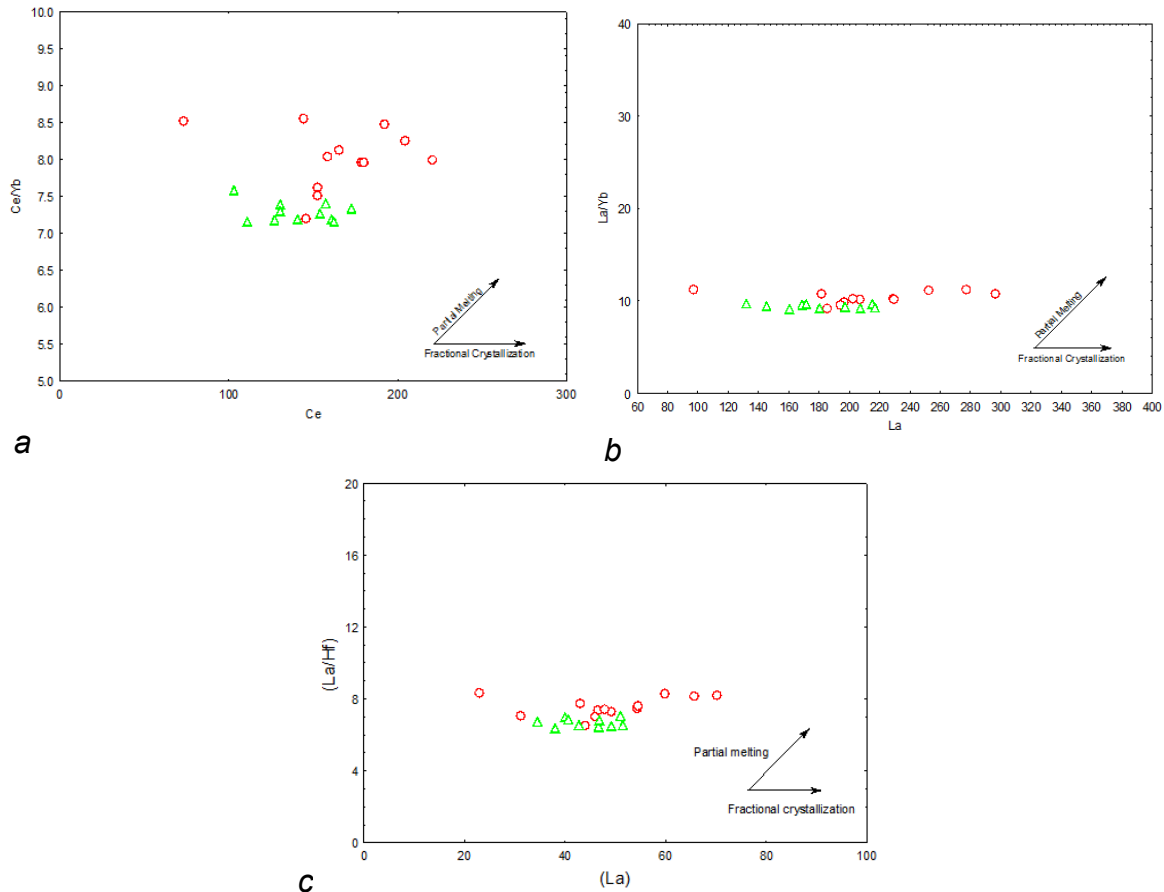


Figura 19. Los diagramas a) Ce vs Ce/Yb; b) La vs La/Yb; c) La vs (La/Hf), muestran los efectos de la cristalización fraccionada y la fusión parcial.

Para poder brindar una aproximación acerca del proceso de generación de las rocas máficas del Derrame Romerillo y La Repartición se elaboraron modelos de fusión parcial siguiendo las ecuaciones propuestas por Zou (2007) de procesos de fusión parcial por lote (*bulk partial melting*). El modelo de procesos de fusión parcial por lote consiste en:

$$C_l = \frac{C_o}{F + D(1 - F)}$$

Donde: F = Grado de fusión
 D = Coeficiente de partición total
 C_o = Composición inicial de la

La unificación de simbología de las muestras analizadas (Figura 20) ha sido utilizado para una mejor comprensión de la fuente que dio origen a las rocas máficas del Derrame Romerillo. Para la elaboración de estos modelos se utilizaron la concentración de dos fuentes tipo para la representación del manto como composición inicial: (i) lherzolita de granate (0.63 ol + 0.30 opx + 0.02 cpx + 0.05 gt; Frey, 1980); (ii) lherzolita de espinela (0.66 ol + 0.25opx + 0.08 cpx + 0.02 sp; McDonough, 1990). A su vez, los coeficientes de partición utilizados son en base a los propuestos por McKenzie y O’Nions (1991).

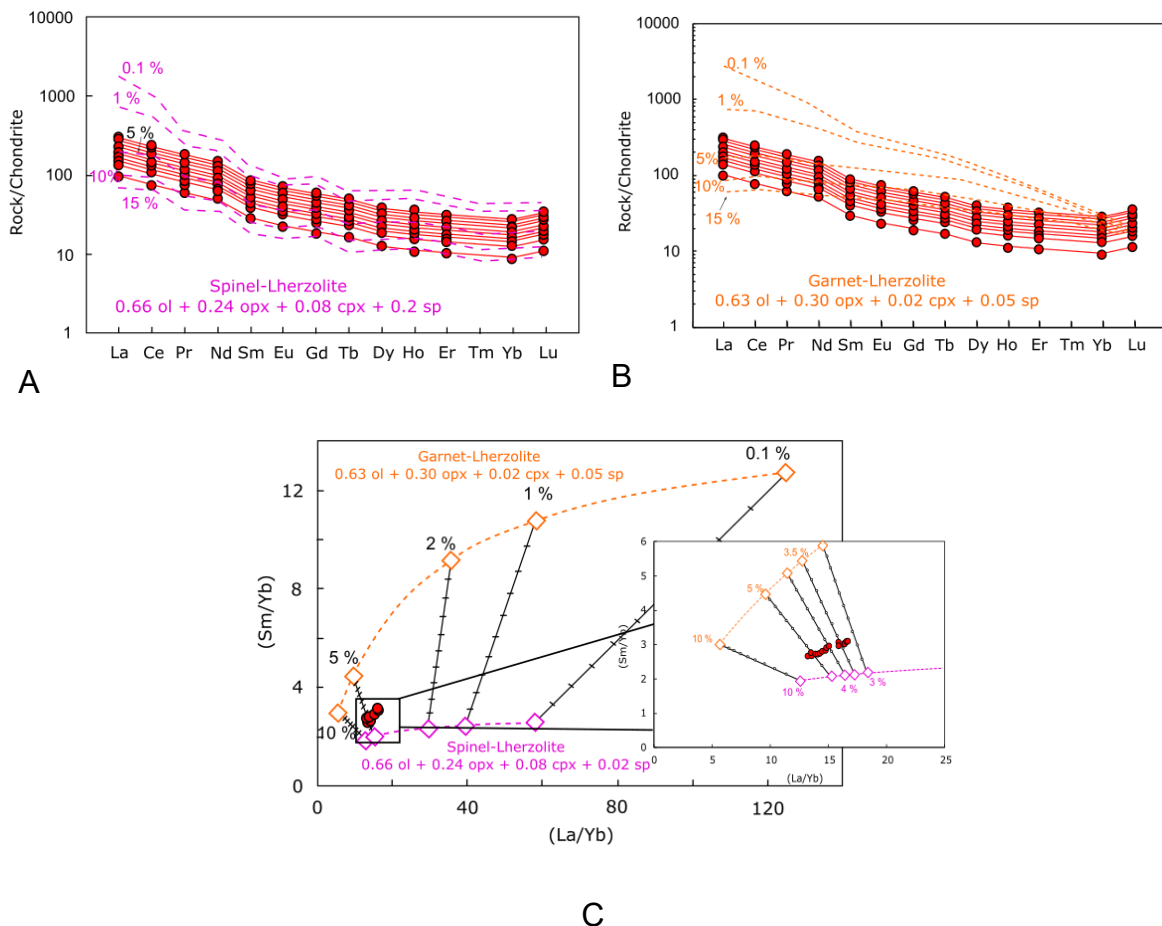


Figura 20. a) Modelo de fusión parcial en diagrama de tierras raras para lherzolita de espinela, (Frey, 1980; McKenzie y O’Nions, 1991); b) Modelos de fusión parcial en diagramas de tierras raras para lherzolita de granate (McDonough, 1990, McKenzie y O’Nions, 1991); c) Modelo de

fusión parcial en diagrama bivariado de (La/Yb) vs (Sm/Yb) para lherzolita de espinela y lherzolita de granate.

A partir de los resultados observados en los modelos de fusión parcial se puede interpretar que las rocas máficas del Derrame Romerillo se llegan a asociar a procesos de fusión parcial de una fuente mantélica heterogénea, representada por líneas de mezcla (líneas punteadas en Figura 20c), la cual presente una combinación de 75% de lherzolita de espinela con 25% de lherzolita de granate. Estos tipos de comportamiento puede indicar que las rocas máficas del Derrame Romerillo se generaron en partes superiores de una astenosfera heterogénea, en donde se dio lugar la combinación de componentes corticales dentro de los fluidos resultantes de la fusión de la astenosfera superior. Estos resultados en conjunto con el tipo de ambiente extensional que se presentan en la región sugiere un ascenso de cuerpos astenosféricos que brindaron condiciones termodinámicas para la generación de fluidos de composición máfica, los cuales durante su ascenso pudieron sufrir bajos niveles de cristalización fraccionada (Figura 20a–c).

Sin embargo, este primer acercamiento a los procesos dominantes en la evolución de las rocas máficas de la región del Derrame Romerillo, brinda una oportunidad para la generación de nuevas investigaciones enfocadas en aspectos de comprensión de la dinámica y composición del manto dominante en el sector del Complejo Volcánico de La Repartición.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

El análisis conjunto de información petrográfica, geoquímica y geofísica permitió entender el Derrame Romerillo, su composición, origen y fuente.

Primero, la magnetometría aérea permitió entender que las anomalías en el derrame obtenidas con el filtro de Señal Analítica están asociadas a la presencia de cuerpos ígneos, así como la distribución y extensión de los productos, también permitió la identificación de cuerpos intrusivos que no afloran asociados a los contrastes magnéticos con las rocas encajonantes. Estas anomalías fueron caracterizadas mediante la aplicación de una serie de filtros matemáticos a la información aeromagnética, de donde se identificaron 4 dominios aeromagnéticos en un área de $\sim 977 \text{ km}^2$, teniendo como centro el DAM I, el cual está asociado con la fuente del Derrame Romerillo, y sus subdominios DAM Ia y DAM Ib que muestran rangos similares en su SA, con dirección N-S, resultando de interés por su ubicación y porque estas estructuras permanecen ocultas bajo una capa de sedimentos, estos dominios en su mayoría están caracterizados por ser una secuencia de calizas del Cretácico que solo en DAM Ib tenemos el afloramiento de rocas máficas y tobas de rocas intermedias. Sin embargo, DAM Ia no aflora en la parte sur, lo que explica su ausencia en la cartografía del Servicio Geológico Mexicano.

El análisis geoquímico y petrográfico de las rocas máficas muestran que se tienen composiciones basálticas calcoalcalinas con predominancia cálcico-sódica, además exhiben texturas traquíticas y ensamblaje mineral de fenocristales de plagioclasas, olivino, y piroxenos presentados como xenocristales, en donde se muestran

procesos débiles de cristalización el cual pudo deberse a un enfriamiento paulatino del magma. Además, se determinó que el componente básico del Derrame Romerillo está conformado por traquibasaltos. De igual forma, el DR presenta patrones de enriquecimiento en tierras raras ligeras con anomalías positivas de los elementos Ta, Ba, U y P, y anomalías negativas de Nb, Th, Sr, Er y Rb. Aplicando modelos cuantitativos de fusión parcial se observó que las rocas de composición básica del DR surgieron como producto de procesos de fusión parcial de una fuente mantélica heterogénea de 25 % lherzolita de granate con 75% lherzolita de espinela. Fue importante comprender que cada método determinó diferentes profundidades, el método aeromagnético permitió encontrar la presencia de un cuerpo fuente del DR, el cual según el modelo 2D, se extiende 12 km y tiene una profundidad que va de desde los 2 km hasta los 6 km por debajo de la superficie, mientras que el análisis de los datos geoquímicos ubica el origen del magma a zonas en la interacción entre el manto superior y la corteza inferior.

Por otro lado, el stock encontrado por los datos aeromagnéticos, en conjunto con los datos obtenidos de los elementos traza, permitieron asociar la anomalía de Ta con la interacción del magma con la base sedimentaria en donde se acumuló hasta su ascenso a la superficie.

Por último, el DR se originó bajo una configuración tectónica extensional de rift continental, en la que en algún punto de su formación el magma comenzó a acumularse.

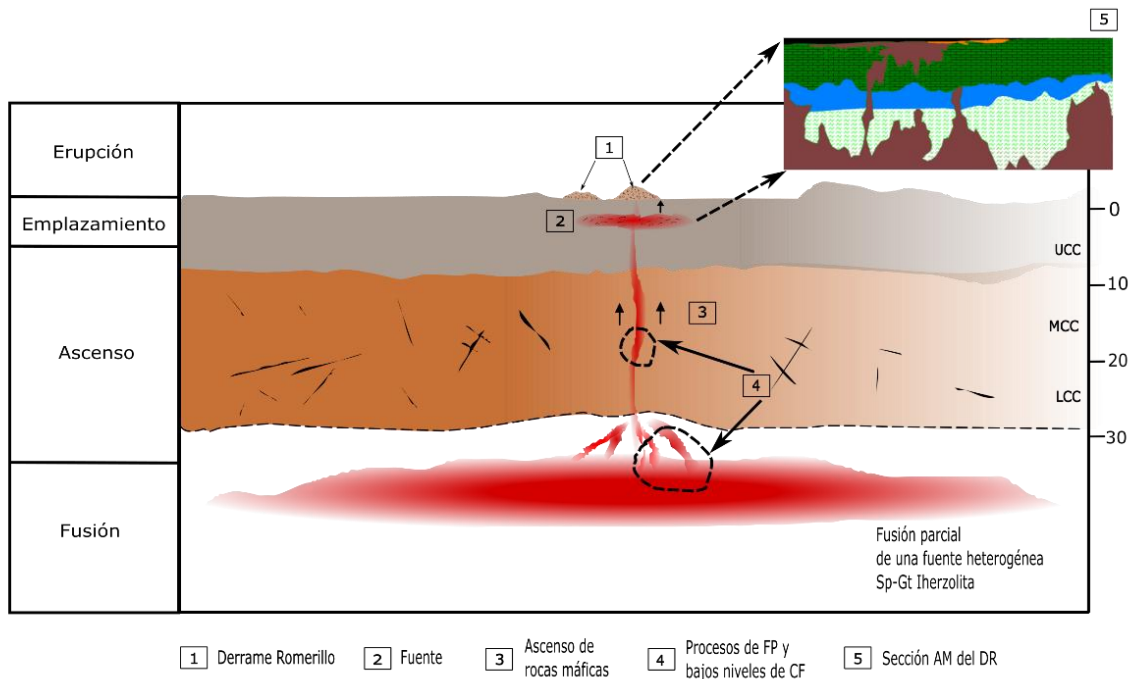


Figura 21. Diagrama esquemático que representa la generación y ascenso del magma máfico del Derrame Romerillo, CVLR. (FP: Fusión parcial, CF: Cristalización parcial; basado en Burchardt, 2009 y Torres-Sánchez *et al.*, 2019).

BIBLIOGRAFIA

- Acosta-Fimbres, K.G., (2020). Evolución Petrológica y Geoquímica de las Riolitas del Domo de Pinos, Campo Volcánico de San Luis Potosí. (Maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica Y Tecnológica.
- Aguayo-Camargo, J. E., (1975). Sedimentary environment and diagenetic implications of the El Abra limestone at this type locality. East México. (Doctorado). The University of Texas at Dallas.
- Aguillón-Robles, A., (1983). Cartografía geológica de las hojas Espíritu Santo, Pinos, El Obraje y Ojuelos, Estados de San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato y Zacatecas. Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP. Folleto Técnico 93.

- Aguirre-Díaz, G. y Labarthe-Hernández, G., (2003). Fissure-source origin for voluminous ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and its relationship with Basin and Range faulting. *Geology*, (31), p. 773-776.
- Almaguer, J., Guevara, R., Sieck, P., Aguillón-Robles, A., López-Loera, H., Cerca, F. y Tristan-González, M., (2023). An integrated geophysical and geological 3D model to characterize the feeder system of La Joya Honda and La Joyuela Maars Complex in central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, (125), 104254. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104254>.
- Álvarez, M.J., (1961). Provincias fisiográficas de la República Mexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, (24), p. 5-20
- Aranda-Gómez, J.J., Labarthe-Hernández, G. y Tristan-González, M., (1983). El volcanismo Cenozoico en San Luis Potosí y su relación con la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental: Guadalajara Jalisco, Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México, Convención Nacional 15, Memoria, p. 261-287.
- Aranda-Gómez, J.J., Molina-Garza, R., McDowell, F.W., Vassallo-Morales, L.F., Ortega-Rivera, M.A., Solorio-Munguía, J.G., Aguillón-Robles, A., (2007). The relationships between volcanism and extension in the Mesa Central: the case of Pinos Zacatecas, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (24), 216-233.
- Baranov, V. y Naudy, H. (1964). Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole. *Geophysics*, (29), 67-79.
- Barboza-Gudiño, J.R., Mata-Segura, J.L. y Martínez-De la Cruz, M., (2001): Informe de la Carta Geológico-Minera escala 1:50,000: F14-A54 Llanos del Carmen. Informe técnico, Consejo de Recursos Minerales.
- Barton, D. C., y Summers, E. B., (1930). Review of the Geophysical Methods of Prospecting [Review of Elements of Geophysics; Geophysical Methods of Prospecting, Principles and Recent Successes; Geophysical Prospecting, 1929; Early Geophysical Prospecting, by R. Ambronn, M. C. Cobb, C. A. Heiland, y W. R. Jones]. *Geographical Review*, 20(2), p. 288-300. <https://doi.org/10.2307/208886>
- Blakely, R., (1996). Potential theory in gravity and magnetic applications. (1st ed., pp. 154-174). Cambridge: The Press Syndicate of The University of Cambridge.
- Carrillo-Bravo, J., (1971). La Plataforma Valles-San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 23(1-6), p.102.
- Carrillo-Bravo, J., (1982). Exploración Petrolera de la Cuenca Mesozoica del Centro de México: Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. (34), 21-46.
- Clark, D.A. y Emerson, D.W., (1991) Notes on Rock Magnetization Characteristics in Applied Geophysical Studies. *Exploration Geophysics*. (22), p. 547-555.

- De Cserna, Z., (1960). Orogenesis in time and space in Mexico: Geologische Rundschau. (50), p. 595-605.
- Dobrin, M.B. y Sabit C.H., (1988). Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill Book Company. (4), p. 633-660.
- Galván-Pineda, J., (2016). Métodos potenciales y electromagnéticos aplicados a la modelación bidimensional del volcán tipo maar “La Joyuela”, San Luis Potosí, México. (Maestría) Instituto Potosino de Investigación Científica Y Tecnológica.
- González-Piña, M. J., (2014). Delimitación aeromagnética del Bloque Jalisco. Implicaciones geohidrológicas en Tequila, Jalisco. (Maestría) Instituto Potosino de Investigación Científica Y Tecnológica.
- Grauch, V., Cordell, L., (1987). Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. Geophysics. 52(1), p.118-21.
- Heinrich, E.W.N., (1970). Identificación microscópica de los minerales. URMO, Bilbao, España, p. 456.
- Higgins, M., (2006). Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press. USA, p. 265.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., y Saad, A. H., (2013). Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications. Cambridge University Press. Horner, J., y Steyrer, H. P., 2005, An analogue model of a crustal-scale fracture zone in West-Central México: evidence for a possible control of ore-forming processes. Geol. Paläont., Abh, p. 185-206.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R.A., (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can J Earth Sci 8 (2), p. 523-548.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I., (2002). An introduction to geophysical exploration. Malden, MA: Blackwell Science. (3), p. 155-160.
- Kotelnikov, A., Diakonov, V., Romero, M. y Usova, V., (2014). Formación del Golfo de México y la Península de Florida. Peoples´ Frienship Russian university
- Labarthe-Hernández, G., Jiménez-López, L.S. y Aranda-Gómez, J.J., (1995), Reinterpretación de la geología del Centro Volcánico de Aqualulco, SLP: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 121.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. y Aranda-Gómez, J.J., (1982). Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 85.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., (1984). Cartografía geológica 1:50,000 Salitrera, S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 94.

- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, p. 745–750.
- López Loera, H., y Tristan González, M., (2013). Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, (65), p. 137-156.
- López-Doncel, R., (2002). Estudios estratigráficos y deposicionales de la Formación Soyatal (Turoniano), en la Sierra de Álvarez y Sierra del Coro, porción centro-occidental del estado de San Luis Potosí (resumen), en XVI Convención Geológica Nacional, Puerto Vallarta, Jalisco: México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, 335-336.
- López-Doncel, R., (2003). La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20 (1): 1-19.
- López-Loera, H., (2014). Geofísica para la localización de agua subterránea en Ambientes Volcánicos Áridos de la Mesa Central. Caso La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, (6), 165-181.
- López-Loera, H., Aranda-Gomez, J., Arzate-Flores, J. y Molina Garza, R., (2008). Geophysical surveys of the Joya Honda Maar (Mexico) and surroundings; volcanic implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research - J VOLCANOL GEOTHERM RES.* 170. 135-152. 10.1016/j.jvolgeores.2007.08.021.
- López-Loera, H., Cifuentes-Nava, G., Goguitchaichvili, A., Cervantes, M., Simón-Velázquez, S., Rosas-Elguera, J., Morales, J., Delgado-Granados, H. y Urrutia-Fucugauchi, J., (2020). An integrated magnetic survey on lava flows associated to the Paricutin volcano (Western Mexico). *Journal of South American Earth Sciences*, p. 1-10.
- López-Loera, H., Macías, J.L., Espíndola, J.M., Arce, J.L., Layer, P.W. y Torres-Gaytan, D.E., (2020), The Santa Fe Intrusion and Other Magmatic Bodies Under the Chichón Volcano Area (Mexico): inferences from Aeromagnetic and New Petrologic-Geochronologic Data. *Surveys in Geophysics*, p. 859 - 895.
- Lugo-Hubp, J., (1990). Mapa geomorfológico del occidente de la cuenca de México. *Investigaciones Geográficas*, 1(21). <https://doi.org/10.14350/rig.58988>.
- Marquardt, D. W., (1963). An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, p. 431 - 441.
- McDonough, W., y Sun, S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, (120), 223–253.

- McKenzie, D. y O'nions, R.K., (1991). Partial Melt Distributions from Inversion of Rare Earth Element Concentrations, *Journal of Petrology*, (32), p. 1021-1091,
- McKenzie, W.S., Donaldson, C.H., Guilford, C., (1982). *Atlas of igneous rocks and their textures*, Harlow: Longman, 12.
- Medina-Romero, E., Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Bellon, H., Cotten, J., (2005). Características geoquímicas del vulcanismo intermedio en la porción poniente del Campo Volcánico Río Santa María en la región meridional del Estado de San Luis Potosí (resumen), en XV Congreso Nacional de Geoquímica, San Luis Potosí, *Actas INAGEQ*, 11, 108.
- Middlemost, E.A., (1989). Iron Oxidation Ratios, Norms and the Classification of Volcanic Rocks. *Chemical Geology*, (77), p. 19–26.
- Milsom, J. (2003). *Field geophysics*. (3ª ed). England. John Wiley y Sons Ltd.
- Morán-Zenteno, D., Keppie, J. y Cerca, M., (2005). La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, ISSN 0366-1784, Tomo 57, N° 3, p. 319-341. 57. 10.18268/BSGM2005v57n3a4.
- Nabighian, M. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *geophysics*, 37(3), 507-517. doi: 10.1190/1.1440276
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., y Camprubí, A., (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, (3), p. 285-318.
- Nwosu, O., (2014). Determination Of Magnetic Basement Depth Over Parts Of Middle Benue Trough By Source Parameter Imaging (SPI) Technique Using HRAM. *International Journal of Scientific y Technology Research*. (3). p. 262.
- Orozco-Esquivel, M.T., Nieto-Samaniego, A.F: y Alaniz-Alvarez, S.A., (2002). Origin of rhyolitic lavas in the Mesa Central, Mexico by crustal melting related to extension. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 118, 37–56.
- Padilla y Sánchez, R., (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, (LIX), p. 19-42.
- Pearce, J. A. (2008). Geochemical fingerprinting of Oceanic Basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1–4), 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Peccerillo, A. y Taylor, S.R. (1976) Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, (58), 63-81.
- Pérez-Corona, F. Y., López-Loera, H., Fregoso-Becerra, E., Yutisis, F., Martínez-Ruíz, V. J., y Dávila-Harris, P., (2017). Caracterización de lineamientos

estructurales y sus implicaciones hidrogeológicas en la cuenca de Villa Hidalgo (San Luis Potosí) integrando métodos geofísicos potenciales. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 69(3), p. 555–576.

Peters, L., (1949), The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. *Geophysics*, p. 290–320.

Philpotts, A.R., (1989). *Petrography of igneous and metamorphic rocks*. Prentice–Hall, New Jersey, 178.

Raisz, E., (1959)., *Landforms of Mexico*, Map scale 1:3,000,000. Cambridge, Massachusetts, U.S., Office of Naval Research, Geography Branch, 1 Mapa.

Raisz, E. (1964) *Landforms of Mexico*, Map with Text, scale: 1:3,000,000. Cambridge, Massachusetts, U.S., Office of Naval Research, Geography Branch 2 Mapa.

Rocha-Echavarría, N.A., Aguillón-Robles, A., Rodríguez-Ríos, R., Bellon, H., Torres-Hernández, J.R., (2006), Petrología y geoquímica de los centros volcánicos de la Sierra de Pinos Zac y su relación con el Campo Volcánico de San Luis Potosí (resumen). Reunión Anual, Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jal., *GEOS*, 26, 106.

Rodríguez-Hernández, E.I., López-Doncel, R. y Cruz-Márquez, J., (2006). Microfacies de brechas calcáreas de la Formación Tamabra en la parte central del estado de San Luis Potosí, México. (resumen). Reunión Anual, Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jal., *GEOS*, 26 (1), 137-138

Roest, W., Verhoef, J., y Pilkington, M., (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *GEOPHYSICS*, 57(1), 116-125. doi: 10.1190/1.1443174

Rudnick, R. L., y Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>

Sieck, P., López-Doncel, R., Dávila-Harris, P., Aguillón-Robles, A., Wemmer, K. y Maury, R.C., (2019). Almandine garnet-bearing rhyolites associated to bimodal volcanism in the Mesa Central of Mexico: geochemical, petrological and geochronological evolution. *J. S. Am. Earth Sci.* 92, 310–328.

Spector, A., y Grant, F., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, p. 293 - 302.

Suter, M., (1990). Geología de la hoja escala 1: 100,000: 14Q-e(5) Tamazunchale, Estado de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí. – *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, (22): 55 p.

Tamayo, J.L., (1941). Morfología de la República Mexicana y division regional de la misma. *Revista Geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*. (1), p. 221-223

Telford, W., Geldart, L., y Sheriff, R., (1990). *Applied geophysics* (2a ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

- Torres-Hernández, J.R., Labarthe-Hernández, G., Aguillón-Robles, A., Gómez-Anguiano, M. y Mata-Segura, J.L., (2006). The pyroclastic dikes of the Tertiary San Luis Potosí volcanic field: Implications on the emplacement of Panalillo ignimbrite: *Geofísica Internacional*, (45), p. 243-253.
- Torres-Sánchez, D., Verma, S.K., Barry, T.L. y Verma, S.P., (2020). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and petrogenesis of the Sierra de San Miguelito Volcanic Complex, Mesa Central, Mexico. *Lithos*, 370-371, 105613.
- Torres-Sánchez, D., Verma, S.K., y Verma, S.P., (2019). Petrogenetic and tectonic implications of Oligocene-Miocene volcanic rocks from the Sierra de San Miguelito complex, central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 95, 102311.
- Tristán-González M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., y Labarthe-Hernández, G., (2009). Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (61), 287–303.
- Tristán-González, M., (1986). Estratigrafía y tectónica del Graben de Villa de Reyes, en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 107, 91
- US Army Corps of engineers, (1995). Geophysical exploration for engineering and environmental investigations. U.S. Army corps of engineers, Washington, DC.
- Verma, S. K., Acosta-Fimbres, K.G., Torres-Sánchez, D., Torres-Hernández, J.R., Torres-Sánchez, S.A. y López-Loera, H., (2020). Geochemistry and petrogenesis of oligocene felsic volcanic rocks from the Pinos Volcanic Complex, Mesa Central, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 102, 1
- Verma, S. K., Torres-Sánchez, D., Sandoval-Espinel, L.C., Hernández-Martínez, K.R., Shukla, M., Torres-Sánchez, S.A., Torres-Hernández, J.R., López-Loera, H. y Zandomeni, P.S., (2023). Geochemistry, petrogenesis, and tectonic setting of the Cúcamo mafic and intermediate volcanic rocks from the Aqualulco volcanic complex, San Luis Potosí, Mexico. *Geochemistry*, 83(4), 126015. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2023.126015>.
- Verma, S.P., Rivera-Gómez, M.A., 2013. Computer programs for the Classification and nomenclature of igneous rocks, 36, 115–124.
- Vernon, R.H., 2018. A Practical Guide to Rock Microstructure. Macquarie University.
- Vitalis Chidi, O., Ogunkoya, C., Makinde, V. y Layade, G., (2014). Source Depth Determination from Aeromagnetic Data of Ilesha, Southwest Nigeria, Using the Peters' Half Slope Method. *Earth Science Research Journal*. (3). p.152 - 162. 10.5539/esr.v3n1p41.

Williams-Postel, A. y Lufkin, H.M., (1942). Datos adicionales sobre el método Delesse-Rosiwal. *The American Mineralogist*. Vol. 27 (5): p. 335–343.

Zou, H., 2007. *Quantitative Geochemistry*. Imperial College Press, London.

ANEXOS

Tabla A 1. Composiciones representativas de elementos mayores (expresadas en wt%) de las rocas básicas del conjunto Romerillo. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.

Muestra	LR01	LR02	LR03	LR04	LR05	LR06	LR07	LR08	LR09	LR10	LR11	LR12
Roca	Traquibasalto potásico											
Coord. X	314624	314610	314623	314623	314251	314543	314625	314630	314655	314707	314757	314856
Coord. Y	2525713.00	2525707.00	2525702.00	2525702.00	2525562	2525597	2525592	2525578	2525543	2525568	2525588	2525675
SiO2	48.40	47.62	47.11	47.25	47.76	46.87	47.39	47.48	47.30	47.17	47.93	47.21
TiO2	2.87	2.92	2.59	2.79	2.89	2.41	2.58	2.94	3.22	3.36	2.55	2.78
Al2O3	13.70	12.50	16.27	14.96	12.87	17.55	16.27	12.39	11.67	11.20	15.94	15.21
Fe2O3	12.52	13.49	9.97	11.28	13.05	8.50	10.12	13.52	15.00	14.96	10.03	11.34
MnO	0.22	0.18	0.21	0.18	0.20	0.18	0.18	0.19	0.19	0.21	0.17	0.16
MgO	5.72	6.69	6.72	6.79	6.71	7.09	6.99	6.70	6.66	6.71	6.88	6.57
CaO	7.80	7.50	8.20	8.03	7.64	8.02	8.00	7.71	7.66	7.89	8.03	7.95
Na2O	3.94	3.99	3.26	3.80	3.99	3.19	3.45	3.90	3.88	4.02	3.30	3.51
K2O	2.49	2.36	3.06	2.48	2.42	3.14	2.64	2.35	2.33	2.12	3.02	2.61
P2O5	1.50	1.45	1.71	1.46	1.49	1.71	1.46	1.49	1.40	1.36	1.62	1.54
LOI	0.0896861	0.46	0.10956175	0.24	0.19934	0.64778	0.33667	0.48924	0.07994	0.23002	0.02998	0.16823
Total	99.24	99.16	99.21	99.27	99.21	99.31	99.41	99.16	99.39	99.23	99.51	99.06
	Valores ajustados											
SiO2Adj	49.3089747	48.7728005	47.9159432	48.1425035	48.7426	47.8302	48.2213	48.6477	48.2077	48.2202	48.5638	48.177
TiO2Adj	2.91950357	2.986120847	2.63332239	2.84425397	2.95032	2.46219	2.62154	3.00753	3.27885	3.43649	2.58625	2.84076
Al2O3Adj	13.9567141	12.80235762	16.5440753	15.245416	13.1337	17.9114	16.5558	12.6952	11.8972	11.4454	16.1571	15.524
Fe2O3Adj	2.7115991	2.936824362	2.15451505	2.44240073	2.83166	1.84306	2.18959	2.94354	3.24882	3.25135	2.15999	2.45994
FeOAdj	9.03866366	9.78941454	7.18171685	8.14133578	9.43887	6.14354	7.29864	9.81182	10.8294	10.8378	7.19995	8.19981
MnOAdj	0.21916085	0.185410416	0.2166128	0.18663493	0.207	0.18546	0.18268	0.19774	0.19269	0.21159	0.17125	0.16689
MgOAdj	5.82936644	6.850450682	6.83518628	6.91918879	6.84823	7.23447	7.10953	6.86504	6.78367	6.86389	6.96793	6.70517
CaOAdj	7.94511893	7.686665227	8.34360856	8.18704222	7.79473	8.18202	8.14219	7.89585	7.80289	8.06644	8.14148	8.10841
Na2OAdj	4.00943396	4.091469498	3.32024043	3.87253097	4.06843	3.25348	3.5075	3.99701	3.95917	4.10838	3.34636	3.58533
K2OAdj	2.53852001	2.417623004	3.11110325	2.53043356	2.46546	3.20521	2.68587	2.40859	2.37125	2.17154	3.05941	2.66037
P2O5Adj	1.52294473	1.480863307	1.74367589	1.48825962	1.51899	1.74895	1.48535	1.53002	1.42841	1.38683	1.64645	1.57226
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mg #	47.5132169	49.55157062	57.1896932	54.3984467	50.4551	62.3048	57.7568	49.5476	46.787	47.0605	57.598	53.44
	Norma CIPW											
Or	15.0017024	14.28724636	18.3854548	14.9539145	14.5699	18.9416	15.8725	14.2339	14.0132	12.833	18.08	15.7218
AB	31.2164606	29.99841441	23.5357423	26.2341404	29.4544	22.6104	25.8523	29.6213	28.9935	29.2252	25.544	27.028
AN	12.5869023	9.426005908	21.049157	16.7416054	10.2923	24.8016	21.4964	9.58435	7.687	6.37446	20.0287	18.4072
NE	1.46814072	2.504041883	2.46979242	3.539662	2.69311	2.66506	2.07325	2.27534	2.442	3.00044	1.50161	1.79309
DIM	8.63812271	9.950782957	5.22593708	7.98897383	9.78099	2.70694	5.39404	10.2427	10.915	12.4979	5.62975	6.449
DIF	5.15608058	5.572770477	1.99625846	3.46735907	5.2507	0.79044	2.01873	5.73614	6.83855	7.60369	2.11591	2.9092
DI	13.7942033	15.52355343	7.22219554	11.4563329	15.0317	3.49739	7.41277	15.9789	17.7536	20.1016	7.74566	9.3582
FO	7.36836749	8.724130332	10.2323576	9.48139962	8.77541	11.7476	10.6566	8.65475	8.29434	7.92016	10.3329	9.60811
FA	5.55955556	6.176127432	4.94064721	5.20177609	5.95492	4.33606	5.04136	6.12684	6.56907	6.09117	4.90907	5.47893
OL	12.9279231	14.90025776	15.1730048	14.6831757	14.7303	16.0836	15.6979	14.7816	14.8634	14.0113	15.2419	15.087
MT	3.93118993	4.257800197	3.12347782	3.54093245	4.10529	2.67195	3.17439	4.26752	4.71015	4.71378	3.13148	3.5664
IL	5.54498928	5.671689492	5.00127806	5.4021096	5.6036	4.67627	4.97904	5.71231	6.22773	6.52707	4.91206	5.39555
AP	3.52848839	3.430990554	4.03989719	3.44812696	3.51933	4.05212	3.44139	3.54488	3.30947	3.21313	3.81463	3.64275

Tabla A 2. Composiciones representativas de elementos mayores (expresadas en wt%) de las rocas básicas del conjunto La Repartición. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.

Muestra	LR13	LR14	LR15	LR16	LR17	LR18	LR19	LR20	LR21	LR22	LR23
Roca	Traquibasalto potásico										
Coord. X	314168	314184	314174	314172	314167	314183	314168	314158	314202	314200	314217
Coord. Y	2526992	2526963	2526938	2526916	2526867	2526908	2526915	2526997	2526963	2526953	2526957
SiO2	46.91	46.90	46.86	47.53	46.77	46.84	46.60	46.75	46.87	46.64	46.95
TiO2	3.20	3.45	3.01	3.33	3.37	3.34	3.17	3.68	3.28	3.25	3.30
Al2O3	12.43	10.45	13.82	10.36	11.46	11.94	12.67	9.40	11.72	11.51	11.37
Fe2O3	13.66	16.07	12.91	15.08	14.62	14.83	13.51	16.93	15.06	15.20	15.34
MnO	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.18	0.19	0.20
MgO	6.90	7.24	7.20	6.64	7.24	6.95	6.70	7.15	6.68	7.25	6.70
CaO	8.44	7.65	7.84	8.15	8.39	8.02	8.55	7.92	7.65	7.84	7.78
Na2O	3.94	3.84	3.48	4.35	3.96	3.75	3.94	4.12	3.83	3.69	3.73
K2O	2.20	2.05	2.39	2.05	2.20	2.18	2.28	2.02	2.27	2.22	2.24
P2O5	1.37	1.34	1.40	1.39	1.39	1.36	1.43	1.34	1.39	1.43	1.46
LOI	0.16895	0.56716	0.5346	0.11969	0.17375	0.07876	0.15998	0.17201	0.24873	0.5	0.15911
Total	99.41	99.73	99.62	99.18	99.75	99.48	99.21	99.69	99.19	99.72	99.22
	Valores ajustados										
SiO2Adj	47.7845	47.9063	47.7801	48.5617	47.5124	47.6847	47.5602	47.6149	47.953	47.5776	47.9807
TiO2Adj	3.25578	3.52442	3.07351	3.40116	3.42127	3.40313	3.23602	3.74607	3.35565	3.31964	3.36839
Al2O3Ad	12.6646	10.6697	14.0887	10.581	11.6438	12.1503	12.9323	9.57719	11.9937	11.7401	11.6149
Fe2O3Ad	2.95703	3.4885	2.79744	3.2745	3.15786	3.20793	2.9298	3.66478	3.27486	3.29562	3.3315
FeOAdj	9.85676	11.6283	9.32482	10.915	10.5262	10.6931	9.766	12.2159	10.9162	10.9854	11.105
MnOAdj	0.19419	0.1938	0.18469	0.19112	0.19498	0.1961	0.1983	0.2024	0.18018	0.19428	0.20178
MgOAdj	7.02682	7.39105	7.34073	6.78818	7.35145	7.07734	6.83913	7.28725	6.83719	7.40074	6.8518
CaOAdj	8.6006	7.81603	7.99193	8.32801	8.52762	8.16229	8.72947	8.06245	7.82904	7.99692	7.95425
Na2OAdj	4.01554	3.92491	3.55322	4.44671	4.01832	3.82103	4.0219	4.20065	3.91341	3.76267	3.81227
K2OAdj	2.24589	2.09087	2.43356	2.0931	2.23302	2.22301	2.33147	2.06153	2.32033	2.2648	2.28513
P2O5Adj	1.39831	1.36607	1.43134	1.41951	1.41302	1.38111	1.45538	1.36687	1.42641	1.46226	1.49434
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mg #	50.0156	47.15	52.4931	46.6076	49.502	48.1595	49.5701	45.5725	46.7839	48.6019	46.4103
	Norma CIPW										
Or	13.2724	12.3562	14.3814	12.3694	13.1963	13.1371	13.7781	12.1829	13.7123	13.3841	13.5042
AB	25.7726	29.6282	26.9335	29.3387	25.3276	27.5126	24.6045	28.0629	28.7287	27.5391	29.3155
AN	9.8982	5.31977	15.3048	2.72884	7.13847	9.43556	10.3473	1.18757	8.30627	8.45474	7.83043
NE	4.44523	1.94107	1.69709	4.48982	4.69905	2.61102	5.10719	4.05305	2.37568	2.32913	1.59417
DIM	12.5783	12.4175	8.22167	14.7832	13.6866	11.3869	12.4128	14.816	10.7087	11.1766	10.9456
DIF	6.66564	7.64948	3.9505	9.20335	7.44837	6.60424	6.69246	9.672	6.65009	6.5155	6.96108
DI	19.244	20.067	12.1722	23.9865	21.1349	17.9912	19.1053	24.488	17.3588	17.6921	17.9067
FO	8.1784	8.86637	10.1416	7.04563	8.38499	8.6536	7.90459	7.90605	8.45478	9.28639	8.4033
FA	5.47856	6.90444	6.15991	5.54474	5.76834	6.34446	5.38731	6.52427	6.6371	6.84334	6.75564
OL	13.657	15.7708	16.3015	12.5904	14.1533	14.9981	13.2919	14.4303	15.0919	16.1297	15.1589
MT	4.28708	5.05766	4.05571	4.74739	4.57826	4.65086	4.24759	5.31323	4.74793	4.778	4.83002
IL	6.18384	6.6942	5.83764	6.46005	6.49821	6.46376	6.14628	7.1152	6.37365	6.3052	6.39778
AP	3.23972	3.16504	3.31626	3.28884	3.2738	3.19986	3.37195	3.16689	3.30482	3.38789	3.46222

Tabla A 3. Composiciones representativas de elementos traza (expresadas en ppm) de las rocas básicas del conjunto Romerillo. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.

Muestra	LR01	LR02	LR03	LR04	LR05	LR06	LR07	LR08	LR09	LR10	LR11	LR12
Elementos traza y tierras raras												
La	59.8808	22.9979	65.7411	70.3009	54.294	54.4628	46.5444	49.1159	43.0675	46.0174	47.9788	43.9741
Ce	117.981	45.1408	125.362	135.189	109.533	110.42	93.5976	101.451	88.4338	93.5738	97.3094	89.3001
Pr	14.4572	5.60189	15.79	17.0525	13.2288	13.4719	11.4294	12.1839	10.6722	11.3144	11.8145	11.0116
Nd	57.811	22.4013	63.8081	68.1067	53.5409	54.127	46.1912	49.4898	42.9844	45.8769	47.7945	44.6997
Sm	11.1217	4.28479	12.153	13.161	10.3668	10.4937	9.01277	9.59195	8.27927	9.03793	9.31329	8.79773
Eu	3.4902	1.30017	3.6502	4.07992	3.2666	3.32385	2.92044	3.06131	2.56063	2.92902	2.88767	2.8478
Gd	9.7292	3.71966	10.6971	11.6309	9.2492	9.35893	8.04374	8.44131	7.22593	8.13629	8.21457	7.90311
Tb	1.50579	0.58002	1.66207	1.8165	1.45178	1.46147	1.27158	1.32037	1.13085	1.28696	1.27825	1.27517
Dy	7.79783	3.02492	8.73504	9.51988	7.58758	7.63838	6.68136	6.86638	5.86563	6.73095	6.69914	6.60158
Ho	1.5591	0.59419	1.72618	1.88562	1.51965	1.53196	1.32515	1.36957	1.15966	1.34957	1.32403	1.33496
Er	4.07604	1.55452	4.56191	4.92081	4.01871	4.00468	3.49007	3.58101	3.02166	3.54879	3.4799	3.46468
Tm	0.75755	0.29068	0.82876	0.92178	0.76097	0.76104	0.67126	0.68268	0.56261	0.68251	0.65494	0.70406
Yb	3.65938	1.39258	3.99252	4.44719	3.61762	3.64521	3.22468	3.28199	2.71782	3.27438	3.1811	3.26122
Lu	0.67892	0.25795	0.73462	0.82596	0.68151	0.6779	0.60434	0.61117	0.50992	0.61432	0.58916	0.63505
Ba	1638.68	433.252	1402.48	1392.11	1269.03	1040.38	1039.55	1039.34	879.858	795.69	761.736	683.866
Be	2.4779	1.0126	2.63909	2.90244	2.21899	2.10652	1.77822	1.75186	1.75647	1.59756	1.79237	1.48625
Rb	41.6833	16.2029	35.6304	46.7902	37.8654	34.2267	27.7199	30.3231	32.1923	27.2232	32.6945	25.1873
Sr	754.526	280.967	738.183	916.465	660.846	639.61	595.355	594.135	553.785	575.658	558.567	528.249
Cr	14.4471	5.37667	24.2535	22.786	13.1906	12.5905	14.7815	11.1625	15.8113	14.3335	11.9595	13.1316
Co	41.1825	13.2912	42.7572	47.3024	34.2279	33.626	31.8389	31.6439	31.6511	31.8522	28.4107	26.1103
Ni	12.054	4.60285	15.856	17.2801	9.03591	9.96529	11.3661	8.4966	31.8994	17.2674	8.07592	8.69755
Cs	0.66205	0.25366	0.53393	0.65833	0.54442	0.56753	0.52273	0.57759	0.46593	0.4867	0.45217	0.52554
Cu	20.3235	9.88347	28.473	28.4449	19.8785	19.2369	21.5959	19.6688	15.9279	18.3661	12.8518	14.2625
Ga	33.7732	13.0496	36.4331	39.5051	29.4503	28.7515	25.0246	25.9096	24.9086	24.107	25.653	22.3422
Hf	7.25203	2.76225	8.07751	8.57148	7.26258	7.15852	6.29854	6.74152	5.57381	6.57111	6.48183	6.75536
Li	10.5226	3.66779	9.43127	13.4288	7.89474	8.25062	8.31465	7.2276	6.98373	7.4901	5.93785	8.72729
Mn	2366.04	795.713	2616.42	2560.99	1927.94	1794.21	1545.65	1602	1493.75	1528.37	1520.75	1214.85
Nb	86.0005	33.1146	94.0534	95.6476	76.7457	75.5414	65.7947	69.742	63.7633	65.9216	65.4559	60.1282
Pb	5.3071	1.81839	5.44998	5.02816	4.10033	4.43035	4.43099	4.48789	3.80756	4.82735	3.85184	3.60604
Sb	0.56734	0.26932	0.80364	0.87657	0.5978	0.58933	77.9325	208.126	84.4945	38.7533	26.6349	35.5444
Sc	27.102	10.6316	27.2531	33.5674	24.2523	23.3106	20.4902	20.2696	20.5809	19.8234	20.971	17.4999
Ta	57.1265	21.9494	66.252	52.8195	48.006	57.4404	51.0033	52.1265	43.0998	53.7328	46.0938	45.4335
Th	5.01573	1.87133	7.10903	5.95877	5.25176	5.40231	4.73863	5.05462	3.91383	4.97487	4.6888	5.3849
Ti	0.34405	0.12677	0.33885	0.41608	0.35423	0.34674	0.3056	0.31138	0.2543	0.30524	0.28105	0.3475
U	3.27921	1.25053	3.45961	3.87693	3.38653	3.35128	3.24447	3.36122	2.68713	3.20044	3.15375	3.18235
V	265.303	119.923	292.443	372.785	228.585	213.428	247.945	207.177	226.998	205.101	219.582	195.789
Y	52.4747	20.0228	58.2678	60.6481	46.2826	45.6684	38.9836	39.4045	37.393	38.2311	39.8034	34.8853
Zn	160.496	66.3645	215.259	202.712	142.574	138.098	144.099	133.094	241.966	150.959	128.004	113.454
Zr	416.46	161.416	455.601	471.374	372.527	355.188	306.891	328.87	311.11	303.109	328.743	283.904
Nb/Yb	23.5014	23.7792	23.5574	21.5074	21.2144	20.7235	20.4035	21.2499	23.4612	20.1326	20.5765	18.4373
Th/Yb	1.37065	1.34378	1.78059	1.3399	1.45171	1.48203	1.46949	1.54011	1.44006	1.51933	1.47396	1.65119
Ta/La	0.954	0.95441	1.00777	0.75133	0.88419	1.05467	1.0958	1.0613	1.00075	1.16766	0.96071	1.03319
Hf/Sm	0.65206	0.64466	0.66465	0.65128	0.70056	0.68217	0.69885	0.70283	0.67322	0.72706	0.69598	0.76785
Zr/Y	7.93639	8.06158	7.81909	7.77227	8.04895	7.77754	7.87231	8.34601	8.32001	7.92832	8.25916	8.13822
Nb/Y	1.63889	1.65384	1.61416	1.57709	1.6582	1.65413	1.68775	1.7699	1.70522	1.72429	1.64448	1.7236
(Ba/Nb)N	19.0543	13.0834	14.9115	14.5546	16.5355	13.7723	15.7999	14.9026	13.7988	12.0702	11.6374	11.3735
La/Nb	0.69628	0.6945	0.69898	0.735	0.70745	0.72097	0.70742	0.70425	0.67543	0.69806	0.733	0.73134
Gd/Yb	0.33678	0.34737	0.38236	0.32613	0.33995	0.33572	0.30542	0.31274	0.32945	0.30537	0.35789	0.31181
Eu/Eu*	0.12242	0.11841	0.15826	0.13014	0.14546	0.15516	0.15728	0.15808	0.13058	0.16717	0.15094	0.19758
Ce/Yb	8.46779	8.51359	8.24678	7.98404	7.9522	7.95594	7.62331	8.11863	8.546	7.5057	8.03421	7.19179
Ce/Pb	1.99082	2.22309	2.05991	2.40774	2.39223	2.23196	1.89165	2.02437	2.07993	1.73589	2.26237	2.21768
Th/Nb	0.50252	0.48692	0.65127	0.53679	0.58962	0.6162	0.62056	0.62448	0.52888	0.65025	0.61722	0.77165
(La/Sm)P	3.47972	3.46885	3.49608	3.45221	3.38481	3.35427	3.33761	3.30934	3.36189	3.29063	3.32945	3.23037
Zr/Nb	4.84253	4.87446	4.84407	4.92824	4.85404	4.70189	4.66438	4.71552	4.87914	4.59802	5.02236	4.72164
Sr/Y	14.3789	14.0323	12.6688	15.1112	14.2785	14.0055	15.2719	15.0779	14.8099	15.0573	14.0331	15.1425
La/Yb	16.3636	16.5146	16.4661	15.808	15.0082	14.9409	14.4338	14.9653	15.8463	14.0538	15.0825	13.4839

Tabla A 4. Composiciones representativas de elementos traza (expresadas en ppm) de las rocas básicas del conjunto La Repartición. Las coordenadas están en el sistema UTM, datum WGS 84, Zona 14N.

LR13	LR14	LR15	LR16	LR17	LR18	LR19	LR20	LR21	LR22	LR23
Elementos traza y tierras raras										
31.274	39.991	50.9921	46.6586	51.4193	40.6445	46.8126	49.1344	34.4791	38.0332	42.725
63.2485	80.0729	98.8175	96.6416	105.765	80.0956	94.444	99.5611	68.0322	77.9837	86.3826
7.64908	9.94833	12.5026	11.6352	12.8664	9.89676	11.5183	12.2197	8.66633	9.58681	10.6899
30.9774	40.0247	50.6015	47.4717	52.4195	40.4221	46.5111	49.998	35.2713	39.36	43.5799
6.07504	7.85685	9.84538	9.3432	10.1991	7.84871	9.14046	9.74071	6.85083	7.72463	8.53963
1.97091	2.51684	3.1934	3.05193	3.36382	2.53769	3.01105	3.20953	2.2177	2.52578	2.77169
5.46103	7.04637	8.99518	8.43384	9.25939	7.15449	8.30775	8.87123	6.20969	7.00911	7.80655
0.86977	1.11768	1.42337	1.35085	1.48465	1.142	1.33309	1.43388	0.98754	1.12313	1.25172
4.50489	5.85432	7.46568	7.03138	7.73887	5.99382	6.97943	7.51584	5.11649	5.84763	6.47384
0.90605	1.17697	1.49634	1.42426	1.56217	1.20448	1.40404	1.50609	1.03173	1.17896	1.30638
2.3891	3.0877	3.90937	3.71993	4.09571	3.14051	3.68994	3.94976	2.69255	3.08028	3.43872
0.46327	0.59161	0.7549	0.72749	0.80101	0.61268	0.72286	0.77935	0.53059	0.60673	0.67761
2.19313	2.84761	3.61172	3.43421	3.79329	2.88457	3.41752	3.65691	2.49769	2.85402	3.15869
0.41784	0.53667	0.68111	0.65785	0.72563	0.55068	0.65132	0.70651	0.48151	0.54945	0.61133
500.436	601.294	739.151	764.018	917.501	566.881	733.466	1011.06	513.266	692.122	816.811
0.95231	1.27352	1.52138	1.55109	1.5581	1.19148	1.36554	1.45333	0.92706	1.06314	1.13303
17.5531	21.5303	26.8602	26.3755	29.4014	20.862	24.6394	26.847	18.2103	20.2821	22.0126
372.785	440.128	549.577	549.414	603.925	435.729	517.831	557.946	353.723	402.955	433.459
8.37444	10.8525	13.572	12.7942	13.9026	10.5633	11.424	13.032	6.71051	7.59131	8.0922
20.8796	22.6633	29.3099	28.0362	30.6612	23.3324	25.8923	28.3999	16.2405	18.9716	20.1922
5.59504	7.34501	10.4004	8.7348	8.57468	6.75434	7.37676	8.65817	4.01319	4.66027	5.07835
0.30894	0.35656	0.44865	0.52296	0.58336	0.40534	0.48578	0.6201	0.36474	0.44688	0.48849
9.01363	10.2936	15.5342	21.4788	28.0242	15.5201	13.7983	15.7587	10.7975	10.2427	12.0468
15.5606	19.2404	23.5003	23.1844	25.1744	18.4123	21.1317	22.8291	14.64	16.6761	17.9256
4.44318	5.69682	7.25503	7.21172	7.8534	5.89876	6.86314	7.5631	5.12108	5.97459	6.52795
4.25369	6.04878	7.64215	5.98131	6.73054	4.83447	5.16977	6.01357	3.5945	3.94955	4.08793
922.364	1061.74	1309.32	1310.46	1493.39	1027	1221.87	1236.2	728.947	889.302	964.816
42.8918	53.2923	66.5832	64.6109	69.8107	52.1284	60.6706	63.6683	41.8691	48.2108	49.6764
2.99894	3.30715	4.22506	5.21906	4.57595	3.5484	4.31626	4.50453	3.35433	3.57331	4.3303
93.5494	5.54635	26.0448	11.687	17.4218	57.7854	19.8997	4.02451	23.6471	8.8523	4.97033
12.7147	15.1307	18.5423	18.0553	19.4512	14.1038	16.1937	17.3005	10.9826	12.2214	12.8454
34.5229	45.4285	56.0162	52.0067	42.793	47.3618	54.1105	53.4323	35.3161	41.7621	40.7244
3.44254	4.34612	5.5287	5.4861	5.98701	4.49661	5.38974	5.72382	4.019	4.61252	5.05575
0.21574	0.26826	0.34847	0.34732	0.3963	0.28539	0.33452	0.37706	0.25912	0.28715	0.34014
2.32897	2.89407	3.60814	3.67197	4.10594	3.03105	3.50817	4.02983	2.7119	3.05913	3.45473
121.457	149.323	180.856	186.215	198.322	145.878	155.774	190.186	115.09	119.404	129.07
24.8914	31.2409	39.5452	36.3622	40.0214	30.6811	35.2393	37.1214	24.9205	27.9708	30.8645
92.1815	94.8142	117.331	121.102	111.386	82.5529	91.658	91.6823	63.2265	65.0048	71.5417
196.745	246.862	305.617	303.209	325.035	239.136	274.487	298.595	196.37	228.345	243.644
19.5573	18.7147	18.4353	18.8139	18.4037	18.0715	17.7528	17.4104	16.7631	16.8923	15.7269
1.56969	1.52623	1.53077	1.59748	1.57832	1.55885	1.57709	1.56521	1.60908	1.61615	1.60058
1.10389	1.13597	1.09853	1.11462	0.83224	1.16527	1.1559	1.08747	1.02428	1.09804	0.95317
0.73138	0.72508	0.7369	0.77187	0.77001	0.75156	0.75085	0.77644	0.74751	0.77345	0.76443
7.90415	7.90191	7.7283	8.33858	8.12153	7.79424	7.78923	8.04373	7.87986	8.16371	7.89398
1.72316	1.70585	1.68372	1.77687	1.74433	1.69904	1.72167	1.71514	1.68011	1.72361	1.6095
11.6674	11.2829	11.1012	11.8249	13.1427	10.8747	12.0893	15.8802	12.2588	14.3562	16.4426
0.72914	0.75041	0.76584	0.72215	0.73655	0.7797	0.77159	0.77172	0.8235	0.78889	0.86007
0.30628	0.3288	0.33028	0.31059	0.30854	0.32302	0.30788	0.31203	0.33043	0.32877	0.34923
0.17702	0.18001	0.18253	0.18799	0.18972	0.18969	0.1978	0.19811	0.21176	0.21234	0.2202
7.57445	7.38534	7.18597	7.39099	7.32307	7.29278	7.2582	7.15057	7.15386	7.1765	7.18264
1.88868	2.16825	2.09449	1.65824	2.06985	2.0214	1.95949	1.97932	1.81629	1.95438	1.78642
0.69156	0.70268	0.71546	0.73161	0.73894	0.74325	0.76544	0.77462	0.82708	0.82436	0.87692
3.32706	3.28957	3.34731	3.22747	3.2583	3.3468	3.30994	3.26003	3.25266	3.18209	3.23347
4.58702	4.63223	4.59001	4.69285	4.65595	4.58743	4.52422	4.68985	4.6901	4.73639	4.90462
14.9765	14.0882	13.8974	15.1095	15.09	14.2019	14.6947	15.0303	14.1941	14.4063	14.4039
14.2599	14.0437	14.1185	13.5864	13.5553	14.0903	13.6978	13.436	13.8044	13.3262	13.5262

Tabla A5. Metodología de digestión de rocas máficas.

Etapa	Procedimiento	Reactivos y Dosis	Equipo	Objetivo
1. Preparación de la muestra	Calcinación (950 °C por 2 h)	Muestra sólida (aprox. 0.1 g)	Mufla	Eliminar materia orgánica
2. Digestión	Adición de Ir como trazador y ácidos. Agregado los ácidos uno a uno hasta su reducción a 1 ml. Para finalizar con HCl hasta	Ir (100 µL) HF (15 mL) HF (15 mL) HNO ₃ (10 mL) HNO ₃ (5 ml) HCl (10 mL)	Vaso de teflón	Disolver la muestra y añadir trazador interno
3. Dilución	Transferencia a matraz aforado	HNO ₃ al 2% (25 ml)	Matraz aforado, pipeta	Ajustar volumen y transferir la muestra



Figura 22. Afloramientos de caliza en el Derrame Romerillo.