



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“MODELO DE EMPLAZAMIENTO DE DOMOS FÉLSICOS DEL ÁREA SAN JOSÉ
ALBURQUERQUE-TIERRA NUEVA, ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, Y SU
ASOCIACIÓN CON EL INTRUSIVO PALO VERDE”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Ing. Karina García Pérez

Estudiante becada por el Servicio Geológico Mexicano (GRH/922/2013)

Asesor:

Dr. Alfredo Aguillón Robles

Co-asesor:

Dr. Macario Rocha Rocha

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2017





UASLP

Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

24 de noviembre de 2016

**ING. KARINA GARCÍA PÉREZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Alfredo Aguillón Robles y Macario Rocha Rocha**, Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 24 de noviembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“MODELO DE EMPLAZAMIENTO DE DOMOS FÉLSICOS DEL ÁREA SAN JOSÉ ALBURQUERQUE-TIERRA NUEVA, ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, Y SU ASOCIACIÓN CON EL INTRUSIVO PALO VERDE”

INTRODUCCIÓN

1. AMBIENTE GEOTECTÓNICO
 2. PETROGRAFÍA DE LA SECUENCIA ÍGNEA DEL CAMPO VOLCÁNICO DEL RÍO SANTA MARÍA
 3. ANÁLISIS GEOQUÍMICO DE LOS DOMOS RIOLÍTICOS-INTRUSIVO PALO VERDE
 4. GEOCRONOLOGÍA
 5. GEOLOGÍA ECONÓMICA
 6. MODELO DE EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS DÓMICAS
- CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E



**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco al Servicio Geológico Mexicano (SGM) por otorgarme el permiso y el apoyo para realizar los estudios de maestría, así como financiamiento para el desarrollo del proyecto de tesis. Además, me permito agradecer a la plantilla académica de la Maestría en Geología Aplicada, así como a todo el personal del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Agradezco a los Ings. Enrique Espinosa Arámburu (Asesor Interno del SGM), Ramón Mérida Montiel y José Antonio López Ojeda, por su valioso apoyo e intervención ante el Comité del Programa de Formación y Desarrollo del Recurso Humano del Servicio Geológico Mexicano, así como las facilidades otorgadas para culminar satisfactoriamente el documento de tesis.

Me permito agradecer al Dr. Macario Rocha Rocha y al Ing. Ramón Mérida Montiel, por su intervención ante el SGM para que el proyecto de tesis originalmente planeado fuese llevado a cabo.

Agradezco a mis asesores el Dr. Alfredo Aguillón Robles y el Dr. Macario Rocha Rocha, por su dirección durante el desarrollo del presente trabajo, así como la valiosa aportación de índole académico que hizo posible la culminación de este posgrado.

Mi reconocimiento y agradecimiento a los miembros del comité académico, Dr. Alfredo Aguillón Robles, Dr. Macario Rocha Rocha, Dr. Margarito Tristán González, Dr. José Ramón Torres Hernández y Dr. Miguel Morales Gámez por su contribución a la mejora de esta tesis.

Mi agradecimiento y reconocimiento al Dr. Margarito Tristán González por su apoyo incondicional desde el inicio, durante y culminación de este posgrado.

Mi más profundo agradecimiento al M. en C. Josué Crisanto Herrera Monreal por la disposición que siempre tuvo por aportar ideas y que me permitieron la conceptualización del modelo final.

De igual manera, mi profundo agradecimiento al Dr. Macario Rocha Rocha, Dr. Margarito Tristán González, M. en C. Josué Crisanto Herrera Monreal, M. en C. Brígido Santiago Carrasco y a los ingenieros Manuel Ángel Osorio Nicolás, Marcos Torres Ramírez y David Morales Basurto, por el apoyo brindado durante los trabajos de campo, así como la disponibilidad que siempre mostraron para aclarar mis dudas, y por sus valiosos consejos.

El agradecimiento al Ing. Erasmo Mata Martínez por el apoyo brindado en el corte de muestras.

Me permito agradecer al Dr. Rafael Barboza Gudiño por su intervención en la vinculación para la realización de la isotopía radiogénica.

Mi agradecimiento a todo el personal que participó en el análisis y la obtención de resultados de laboratorio de las muestras estudiadas en el presente trabajo en las diferentes instituciones incluyendo: Centro Experimental Chihuahua y Oaxaca por el apoyo de química analítica y laminación; Instituto de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla, Qro., por el apoyo en los análisis de isotopía radiogénica, el cual está a cargo el Dr. Luigi A. Solari; Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (LGIG) por el apoyo en los análisis de química analítica, el cual está liderado por el Dr. Alfredo Aguillón Robles.

Agradezco al M. en C. Gilberto Martínez Esparza por la capacitación, entrenamiento y apoyo personalizado en el *software* ioGAS, que fue fundamental en la interpretación de la química analítica.

Agradezco al M. en C. Raucel Pascacio Toledo por el apoyo brindado en la interpretación de los datos magnéticos del presente trabajo, que es base del entendimiento de la hipótesis planteada.

Mi más profundo agradecimiento a todos aquellos que pusieron un granito de arena y fueron parte de este logro, incluyendo a los ingenieros: Omar Alfredo Galeana Galicia, Jessica Rivera Pérez, Laura Cecilia Tristán Capetillo, Karina Narváez, Ana Rocío Hernández García y al M. en C. Luis Daniel Barajas Nigoche.

Mi profundo agradecimiento al Analista José Francisco Sena Martínez y al Ing. Homar Peña Ortiz por su incondicional apoyo, así como la edición final de algunas figuras.

Mi gratitud a Betzahl de la Torre Rodríguez, Juan Carlos Guel Casillas y Efrén Román Guerrero Nava, por su disposición para contribuir atentamente a los requerimientos que los estudiantes solicitamos durante el desarrollo del posgrado.

Agradezco a mi amado esposo el Ing. Manuel Ángel Osorio Nicolás por su incondicional apoyo, comprensión, amor y contribución en la elaboración de figuras en 3D que son de gran importancia en la tesis.

Agradezco a mis padres Porfiria Pérez Hernández y Erasmo García Rosales por los consejos durante toda mi vida, así como a mis hermanas Saira Elizabeth, Dianaí, Analí y Teresa, quienes como familia siempre estuvieron y están atentos de mi persona y desarrollo profesional.

Finalmente, agradezco infinitamente el tiempo y apoyo de compañeros y amigos, así como de aquellas personas anónimas que no menciono pero que me han apoyado en momentos importantes de mi vida.

¡Muchas gracias!

DEDICATORIA

“A quien en todo momento está conmigo”

DIOS

A mi esposo (Manuel Ángel Osorio Nicolás) y a mi hijo (†)

Quienes son mi inspiración

A mis padres (Porfiria Pérez Hernández y Erasmo García Rosales)

Por su ejemplo de superación

A mis hermanas Saira Elizabeth, Dianaí, Analí y Teresa.

Por su motivación

A todas aquellas personas que me apoyaron para la consumación de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes generales	2
Localización y vías de acceso	4
Geomorfología	4
Propósito y alcance del estudio	6
Objetivo	7
Metodología	7
1) Gabinete	7
2) Trabajo de campo	8
3) Análisis de laboratorio	8
4) Elaboración de texto explicativo o tesis de grado	9
1. AMBIENTE GEOTECTÓNICO	10
1.1. Paleogeografía y evolución magmática	11
1.2. Geología Regional	11
1.3. Estratigrafía	11

1.3.1. Formación El Abra (Kta)	16
1.3.2. Unidad Cretácica Indefinida	18
1.3.3. Formación Cenicera (Pc)	19
1.3.4. Riodacita del Carmen (Prc)	20
1.3.5. Intrusivo Palo Verde (Ppv)	22
1.3.6. Ignimbrita Santa María (Pis)	23
1.3.7. Ignimbrita El Órgano (Por)	24
1.3.8. Serie Potrerillo (Pdp)	26
1.3.9. Traquita Ojo Caliente (Poc)	29
1.3.10. Andesita Estanco (Pae)	30
1.3.11. Domos Rioliticos (Pdr)	31
Zona Noroccidental	34
Zona Suroccidental	34
Zona Suroriental	36
1.4 Estructural	39
1.4.1. Análisis estructural	42
2. PETROGRAFÍA DE LA SECUENCIA ÍGNEA DEL CAMPO VOLCÁNICO DEL RÍO SANTA MARÍA	46
2.1. Petrografía de Domos Riolíticos (Pdr)	46
Zona noroccidental	46
Zona suroccidental	50
Zona suroriental	52
2.2. Petrografía del Intrusivo Palo Verde (Ppv)	54

3. ANÁLISIS GEOQUÍMICO DE LOS DOMOS RIOLÍTICOS-INTRUSIVO PALO VERDE	63
3.1. Diagramas de variación tipo Harker	64
3.2. Diagrama de clasificación química	72
3.3. Diagrama de discriminación	74
3.4. Elementos REE o diagramas de araña	77
4. GEOCROLOGÍA	79
4.1. Procedimiento analítico	81
4.2. Resultados	84
5. GEOLOGÍA ECONÓMICA	91
5.1 Alteración hidrotermal y supergénica	91
5.2 Mineralización (fluorita, estaño, y magnetita)	102
5.3 Análisis de datos aeromagnéticos	107
6. MODELO DE EMPLAZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DÓMICAS	111
CONCLUSIONES	116
BIBLIOGRAFÍA	118

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Mapa de localización y vías de acceso.	5
Figura 2. Modelado hipsométrico del área de estudio.	6
Figura 1.1. Mapa paleogeográfico.	12
Figura 1.2. Mapa mostrando los Terrenos tectono-estratigráficos.	13
Figura 1.3. Columna estratigráfica del área de estudio.	14
Figura 1.4. Mapa Geológico del área de estudio.	15
Figura 1.5. Fotografías mostrando aspecto de la Formación El Abra.	16
Figura 1.6. Fotografía mostrando aspecto de brecha calcárea.	17
Figura 1.7. Fotografía mostrando detalle de arenisca y lutita deformada.	18
Figura 1.8. Fotografía mostrando detalle de conglomerado, correspondiente a la Formación Cenicera.	20
Figura 1.9. Fotografía mostrando las características litológicas del miembro inferior de la Riodacita del Carmen.	21
Figura 1.10. Fotografías mostrando panorámica de la localidad tipo del Intrusivo Palo Verde.	22
Figura 1.11. Fotografía mostrando el miembro inferior en contacto con el miembro superior de la unidad Ignimbrita El Órgano.	25
Figura 1.12. Fotografía mostrada panorámica del miembro superior de la unidad Ignimbrita El Órgano.	26
Figura 1.13. Fotografía mostrando panorámica de la zona sureste del área de estudio.	27
Figura 1.14. Fotografía mostrando zona de esferulitas.	28
Figura 1.15. Fotografía mostrando panorámica del afloramiento de la unidad Traquita Ojo Caliente depositada encima de la Ignimbrita Santa María.	29
Figura 1.16. Fotografía mostrando detalle del flujo lávico correspondiente a la unidad Pae.	30

Figura 1.17. Fotografía mostrando panorámica de domos emplazados sobre una falla normal.	32
Figura 1.18. Mapa Geológico mostrando las zonas de domos riolíticos.	33
Figura 1.19. Panorámicas de aglutinamiento de domos riolíticos.	35
Figura 1.20. Aspecto de domos riolíticos aislados ubicados entre las localidades Tableros y El Tigre.	36
Figura 1.21. Panorámicas de domos aglutinados ubicados en la porción oriente del área de estudio, localmente en el Divisadero.	36
Figura 1. 22. Panorámica de domos aislados, ubicados localmente al occidente de Santa Rosa.	37
Figura 1.23. Mapa estructural del área de estudio.	38
Figura 1.24. Fotografías mostrando fallamiento normal Rancho Viejo con vista al oriente.	39
Figura 1.25. Fotografías mostrando la falla normal Rancho Viejo II.	40
Figura 1.26. Fotografías mostrando la falla Santa María, en la porción meridional del área de estudio sobre el Río Santa María.	41
Figura 1.27. Fotografías mostrando la falla Santa Rosa I.	41
Figura 1.28. Fotografías mostrando la traza de falla y el emplazamiento de los domos riolíticos.	42
Figura 1.29. Estereograma y rosetas de fallas y lineamientos para la zona nororiental.	43
Figura 1.30. Estereograma y rosetas de fallas y lineamientos para la zona central.	44
Figura 1.31. Estereograma y rosetas de fallas y lineamientos para la zona suroccidental.	45
Figura 2.1. Mapa litológico de muestreo correspondiente a la zona noroccidental.	47
Figura 2.2. Mapa litológico de muestreo correspondiente a la zona suroccidental del área de estudio.	48
Figura 2.3. Mapa litológico de muestreo correspondiente a la zona suroriental.	49
Figura 2.4. Fotomicrografía mostrando la forma de cristales y microfallas, rellenas por sericita.	50
Figura 2.5. Fotomicrografía mostrando la textura y forma de los cristales.	51

Figura 2.6. Fotografías mostrando detalle de la muestra megascópica del domo Lobos.	53
Figura 2.7. Fotomicrografía mostrando las características mineralógicas de las muestras PTN-052 y PNT-010.	53
Figura 2.8. Diagrama QAP de clasificación modal de rocas volcánicas.	54
Figura 2.9. Fotografías mostrando afloramientos del Intrusivo Palo Verde.	55
Figura 2.10. Fotomicrografías mostrando la forma de los cristales.	56
Figura 2.11. Diagrama QAP de clasificación modal de rocas plutónicas.	57
Figura 2.12. Fotomicrografías mostrando las texturas mirmequítica y gráfica.	58
Figura 2.13. Fotomicrografías mostrando la textura pertítita.	59
Figura 3.1. Diagrama tipo Harker de elementos mayores.	65
Figura 3.2. Diagrama de TAS.	72
Figura 3.3. Diagramas de clasificación con sílice, elementos mayores y elementos traza.	73
Figura 3.4. Diagramas binarios mostrando que la mayoría de los especímenes se ubican en ambientes tectónicos específicos.	75
Figura 3.5. Diagramas binarios de elementos traza mostrando la afinidad magmática.	76
Figura 3.6. Diagramas binarios de elementos traza mostrando la afinidad magmática.	77
Figura 3.7. Graficas que exhibe diagramas de araña mostrando composiciones REE.	78
Figura 4.1. Mapa litológico del área de estudio, mostrando la ubicación de las muestras colectadas para datación geocronológica.	80
Figura 4.2. Sección esquemática 3D de la localidad Tierra Nueva.	81
Figura 4.3. Fotografías mostrando afloramiento entre el Intrusivo Palo Verde y la Riodacita del Carmen.	82
Figura 4.4. Fotografías panorámicas mostrando la unidad Riolita San Miguelito o Domos Riolíticos.	82
Figura 4.5. Fotografías mostrando zircones separados de las muestras RTN-031 y RTN-065.	83

Figura 4.6. Graficas de las edades de los zircones obtenidos de la muestra RTN-015 correspondiente al Intrusivo Palo Verde.	87
Figura 4.7. Graficas de las edades de los zircones obtenidos de la muestra RTN-031.	88
Figura 4.8. Graficas de las edades de los zircones obtenidos de la muestra RTN-065 que corresponde a la unidad Pdr (Domos Riolíticos).	88
Figura 4.9. Gráficos mostrando edades de zircones y edad ponderada de la muestra RTN-300, correspondiente a la Riodacita del Carmen (Prc).	89
Figura 4.10. Gráfico mostrando la distribución espacial y edades de las muestras datadas.	90
Figura 5.1. Mapa exhibiendo las alteraciones presentes en el área de estudio, así como la relación que existe entre las manifestaciones y la parte estructural.	92
Figura 5.2. Bloque esquemático de la localidad Palo Verde, mostrando las alteraciones presentes, así como el emplazamiento de domos.	93
Figura 5.3. Sección esquemática de la localidad El Tigre-Peña de San Pedro.	94
Figura 5.4. Alteración fílica representada por venas tipo “D” en la localidad El Tigre-Peña de San Pedro.	95
Figura 5.5. Sección esquemática del área La Ordeñita.	96
Figura 5.6. Fotografía mostrando la alteración supergénica y detalle de zonas con <i>stockwork</i> oxidado.	96
Figura 5.7. Bloque esquemático de la localidad Lobos.	97
Figura 5.8. Sección esquemática de la localidad Santa Rosa.	99
Figura 5.9. Fotografías mostrando alteración en el Intrusivo Palo Verde.	99
Figura 5.10. Fotomicrografías mostrando detalle de minerales opacos y transparentes del Intrusivo Palo Verde.	100
Figura 5.11. Fotomicrografías exhibiendo estructura de minerales del Intrusivo Palo Verde.	100
Figura 5.12. Fotomicrografías mostrando detalle ilmenita y apatito reemplazando a feldespato y cuarzo reabsorbido.	101

Figura 5.13. Fotomicrografías mostrando ilmenita, zircón, cuarzo y feldespatos.	101
Figura 5.14. Fotografía mostrando metasomatismo de contacto.	102
Figura 5.15. Fotografías mostrando vetas tipo “D” y halo de oxidación.	103
Figura 5.16. Fotografías mostrando domo riolítico y mineralización de estaño.	104
Figura 5.17. Fotografías mostrando veta de fluorita.	105
Figura 5.18. Fotografías mostrando obras mineras en la localidad Rancho Viejo I.	105
Figura 5.19. Fotografías mostrando brecha de borde en zona de contacto entre domo riolítico e intrusivo Palo Verde.	106
Figura 5.20. Fotografías mostrando mármol diseminación de óxidos primarios.	106
Figura 5.21. Mapa de reducción al polo del campo magnético total.	109
Figura 5.22. Mapa de primera derivada vertical a partir de la reducción al polo del campo magnético.	110
Figura 6.1. Diagramas esquemáticos mostrando la evolución tectónica y modelo de emplazamiento de la unidad precaldérica.	111
Figura 6.2. Diagramas esquemáticos mostrando la evolución tectónica y modelo de emplazamiento del Intrusivo Palo Verde y domos dacíticos de la Serie Potrerillo.	113
Figura 6.3. Bloque esquemático del emplazamiento de domos riolíticos de la unidad San Miguelito.	115

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Resumen de características petrográficas de las muestras correspondientes a Domos Riolíticos e Intrusivo Palo Verde.	60
Tabla 3.1a. Elementos mayores de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES.	66
Tabla 3.1b. Elementos mayores de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES.	67
Tabla 3.1c. Elementos mayores de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES.	68
Tabla 3.2a. Elementos traza y tierras raras de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES.	69
Tabla 3.2b. Elementos traza y tierras raras de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES.	70
Tabla 3.2c. Elementos traza y tierras raras de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES.	71
Tabla 4.1. Mostrando los resultados de LAMC-ICP-MS U-Pb en zircones de las muestras DTN-015 y DTN-031.	85
Tabla 4.2. Mostrando los resultados de LAMC-ICP-MS U-Pb en zircones de las muestras DTN-065 y DTN-300.	86

Resumen

El área de estudio ubicada en la porción suroriental de la provincia magmática “Faja Ignimbrítica Mexicana (FIM)”, está conformada principalmente por el Intrusivo Palo Verde, así como domos riolíticos y riodacíticos, lavas, flujos piroclásticos que forman parte del Campo Volcánico del Río Santa María (CVRSM) y escasos afloramientos de unidades sedimentarias marinas de composición calcáreo-arcillosa y calcárea de edad cretácica. Este magmatismo emplazó a través de fracturas y fallas, alterando y cubriendo parcialmente a la secuencia sedimentaria marina que conforma la zona limítrofe de las provincias geológicas Zacatecana y Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP) en sus porciones suroriental y noroccidental, respectivamente. La importancia de caracterizar a los domos riolíticos e Intrusivo Palo Verde (Ppv) conllevó a entender su génesis magmática y tectónica. El Ppv ocasionó un halo de calco-silicatos, mármol y silicificación; además de alteración potásica (biotita hidrotermal) y fílica (sericita>>cuarzo>>pirita), así como diseminación de óxidos primarios (magnetita) que degradaron a limonita. Los domos riolíticos emplazaron a través de fracturas y fallas, atravesando al Intrusivo Palo Verde, formando estructuras dómicas aglutinadas y aisladas. La zona presenta dos sistemas principales de fallas y fracturas (NE-SW y NW-SE) que forman un arreglo geométrico, así como curvilineamientos, afectando a la secuencia sedimentaria y rocas volcánicas que constituyen el CVRSM, sugiriendo un régimen de extensión, pre-magmatismo y post-magmatismo. Los domos riolíticos están constituidos por cuarzo, ortoclasa y plagioclasa, soportados por matriz microcristalina en el centro y ligeramente vítrea en los borde de estos. El Intrusivo Palo Verde presenta textura porfirítica, constituido por fenocristales de ortoclasa, plagioclasa y cuarzo, así como local biotita, clorita, apatito, magnetita e ilmenita, que están soportados en una masa basal afanítica con presencia de sericita. La química analítica de los domos riolíticos e Intrusivo Palo Verde, sugiere que estos magmas son de carácter calco-alcalino, generados en la corteza superior, con efecto de asimilación de cristalización fraccionada, los cuales presentan similitud a granitos de intraplaca y menor proporción a granitos de arco volcánico. El evento magmático que generó estas rocas ígneas fue durante el Paleógeno, ocasionando *stock*, diques

y domos. Los domos riolíticos presentan vetas y venas de estaño, mientras que el Intrusivo Palo Verde presenta vetas de fluorita y zonas de intensa oxidación, así como posible enriquecimiento supergénico.

Finalmente, las alteraciones son evidentes en el contacto de Pdr y Ppv. En la zona de intersección de los curvilineamientos La Joya Grande-La Ordeñita y Palo Verde-Santa Rosa, la alteración está muy marcada así como el límite noroccidental de la Caldera San Antón, que puede interpretarse como posible zona de calderas anidadas.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio ubicada en la porción meridional del Estado de San Luis Potosí y septentrional del Estado de Guanajuato, corresponde a la zona limítrofe entre las provincias geológicas Zacatecana (en su porción suroriental) y Plataforma Valles-San Luis Potosí (en su porción centro-oriental). En el área afloran rocas calcáreas-arcillosas y calcáreas de edad mesozoica que fueron emplazados y localmente alteradas por magmatismo del Cenozoico. El área está situada en la porción poniente del Complejo Volcánico de Santa María del Rio, conformada por rocas volcánicas de composición intermedia y/o félsica e intrusivo granítico con tendencia a cuarzo-monzonítico que está asociado al margen y parte poniente de la estructura caldérica de edad oligocénica. En la mayor parte del área de estudio, existen domos de composición riolítica-riodacítica, que están emplazados en zonas de debilidad y/o estructuras profundas, principalmente, al noroccidental de la periferia de caldera Milpa Grande. El control estructural jugó un rol importante durante el emplazamiento de plutones y magmas, probablemente, favorecido por el régimen extensional con dirección NW-SE.

El magmatismo del área de estudio ocurrió en varios eventos. Estos emplazaron a través de la unión de dos paleo-elementos (*i.e.* provincia geológica Zacatecana y Plataforma Valles-San Luis Potosí). El intrusivo félsico emplazó durante el Oligoceno Temprano que causó alteración hidrotermal (*i.e.* *skarn* y marmorización) en la secuencia calcárea y calcárea arenosa, así como alteración potásica y fílica en el *stock*. Posteriormente, pulsos magmáticos emplazaron a través de fallas y fracturas, tanto en el intrusivo como en la secuencia sedimentaria marina del Cretácico, formando domos félsicos aglutinados y/o localmente aislados. Además, derrames volcánicos fueron depositados sobre las rocas sedimentarias y el *stock* como producto de la fase eruptiva del magmatismo del Oligoceno. Este evento probablemente removilizó mineralización de fluorita desde el intrusivo, la cual fue depositada en fracturas y/o relleno de cavidades dentro del *stock*, rocas volcánicas y secuencia sedimentaria, así como deposición de mineralización de

estaño en fracturas dentro de las rocas volcánicas, ayudada por el alto contenido de flúor en el magma que favoreció el transporte de éste tipo de mineralización.

Antecedentes generales

La cartografía geológica de la hoja Salitrera F14C15, escala 1:50,000 (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984), delimita gran parte de la caldera Milpa Grande con rocas pre-caldera y derrames andesíticos, y sobre estas rocas flujos de ceniza de composición riolítica (Pis y Por). Además, los autores sugieren un hundimiento posterior de la caldera el cual fue rellenada por Serie Potrerillo (Pdp) para después depositarse flujos de la Traquita Ojo Caliente (Poc) y Andesita Estanco (Pae). También, los autores refieren que en la margen suroriental de la caldera fue emplazado un intrusivo granítico Palo Verde (Ppv) a través de las rocas cretácicas.

Resultados de cartografía geológica de la hoja Tierra Nueva F14-C25, escala 1:50,000 (Tristán González, 1987), menciona uno de los principales eventos estructurales, así como la reconstrucción de la caldera Milpa Grande, cuya resurgencia es representada por el emplazamiento del Intrusivo Palo Verde, sobre el cual fue emplazada una serie de domos del tipo *upheaved* y diques de considerable longitud denominado “Lobos” de composición riolítica. Además, el autor hace énfasis en fallas normales con orientación predominante 290°-300°, donde sobresale la gran falla del Río Santa María, que se pierde en la zona donde fue emplazado el Intrusivo. El vulcanismo del Oligoceno temprano es atribuido a eventos ocurridos cuando la placa Norteamericana colisionó con la dorsal del Pacífico, causando deformación, subducción y magmatismo en el continente.

En la carta Geológico-Minera Tierra Nueva F14C25, escala 50,000 (Sociedad Exploradora Minera, 1999), identificarón lineamientos que son parte de un sistema de tipo extensional orientados principalmente al NW-SE. También, hacen referencia a la mineralización existente en el área, que consiste principalmente de fluorita, mercurio y estaño así como materiales pétreos.

En la carta Geológico-Minera Salitrera F14C15, escala 50,000 (Sánchez-Hernández *et al.*, 2001), mencionan que la secuencia litoestratigráfica está

conformada por un ambiente sedimentario compuesto por roca caliza del Albiano hasta el Santoniano con la Formación El Abra y del Turoniano hasta el Mastrichtiano con la Formación Soyatal, cubiertas parcialmente en discordancia un paquete de rocas volcánicas eminentemente de composición andesítico-dacítico, traquítico y riolítico del Oligoceno hasta el Mioceno. También, documentan rocas intrusivas del Oligoceno como son un cuello volcánico dacítico en el volcán Atotonilco, un granito denominado como intrusivo Palo Verde, así como la presencia de *plugs* con ligeros derrames de andesita porfirítica a afanítica y domos cuarzoláticos que intrusionaron a la granodiorita. En el ámbito económico proponen que el origen de la mineralización de fluorita está relacionada con la intrusión o emplazamiento de domos, los cuales son asociados a fallas.

Tristán-González *et al.*, (2009), sugieren que el vulcanismo del Campo Volcánico de San Luis Potosí está compuesto por una diversidad magmática y multiepisódica, ampliamente asociada a los eventos de la tectónica extensiva de la porción central de México originada principalmente durante el Oligoceno. Los complejos volcánicos principales que conforman el Campo Volcánico de San Luis Potosí, presentan ciertas diferencias entre sí, pero correlacionables por sus características petrológicas y sus edades isotópicas. Los autores dividieron este vulcanismo en seis complejos volcánicos (*i.e.* Ahualulco, Pinos, Villa Hidalgo, La Repartición, Sierra San Miguelito y Santa María).

Aguillón Robles *et al.*, (2012), mencionan a partir de análisis químicos de unidades volcánicas de los complejos volcánicos del CVSLP. Los autores interpretaron que el vulcanismo derivó de la fusión de la cima del manto y por metasomatismo de la base de la corteza, ligado con grados pequeños de cristalización fraccionada, dando como resultado una diversidad magmática y multiepisódica durante el tiempo y espacio, que asoció a estructuras volcánicas de los campos volcánicos de San Luis Potosí y Río Santa María.

Hernández-García (2015), delimitó la posible zona de emisión de la Ignimbrita Santa María y El Órgano, perteneciente al Campo Volcánico de Río Santa María y

así como delimitación de la caldera San Antón, usando técnicas de percepción remota sobre imágenes *Landsat* TM 5.

Localización y vías de acceso

Geográficamente, el área está situada dentro del polígono conformado por las coordenadas UTM 336000-2415000, 262200-2415000, 362000-2393000, 336000-2393000 de la región 14 Q y *datum* WGS87 (Figura 1). Ésta cubre una superficie de 57,435 has, correspondiente a porciones meridional y septentrional, de las hojas F14C15 (La Salitrera) y F14C25 (Tierra Nueva), escala 1:50,000, respectivamente. La mayoría del área de estudio es parte del Estado de San Luis Potosí (*i.e.* 50,972 has), y la porción suroriental corresponde al Estado de Guanajuato (*i.e.* 6,463 has).

El acceso partiendo de la ciudad de San Luis Potosí, es a través de la carretera Federal No. 85, que comunica con la ciudad de Querétaro, realizando un recorrido de 59 km hasta entroncar con la carretera estatal pavimentada que comunica a la cabecera municipal de Tierra Nueva, S.L.P., y presa del Realito, recorriendo 22 km. Posteriormente, el recorrido al área es a través de terracerías (Figura 1).

Geomorfología

En el área de estudio, el relieve varía entre 1,228.82 a 2,510.18 m.s.n.m., formando una orografía de sierras y lomeríos (Figura 2). La depresión más baja está en la porción central, correspondiente al drenaje principal del Río Santa María con dirección NW-SE; mientras que la cota más alta está en la porción nororiental, caracterizada por una topografía abrupta, incluyendo los cerros El Divisadero, El Picacho, Tuna Mansa y El Temeroso, que corresponde a domos volcánicos. En la porción centro-septentrional, la morfología consiste de relieve abrupto debido a los domos, así como lomeríos suaves en las partes más bajas con intemperización en tonos marrón claro, verde olivo y amarillento, debido a la exposición del Intrusivo Palo Verde (Ppv). En la porción suroccidental destaca una topografía con pendientes pronunciadas debido a la separación de bloques representado por las diaclasas, así como tonalidades rosáceas a rojizas, correspondiente a los domos de la unidad Riodacita del Carmen (Prc).

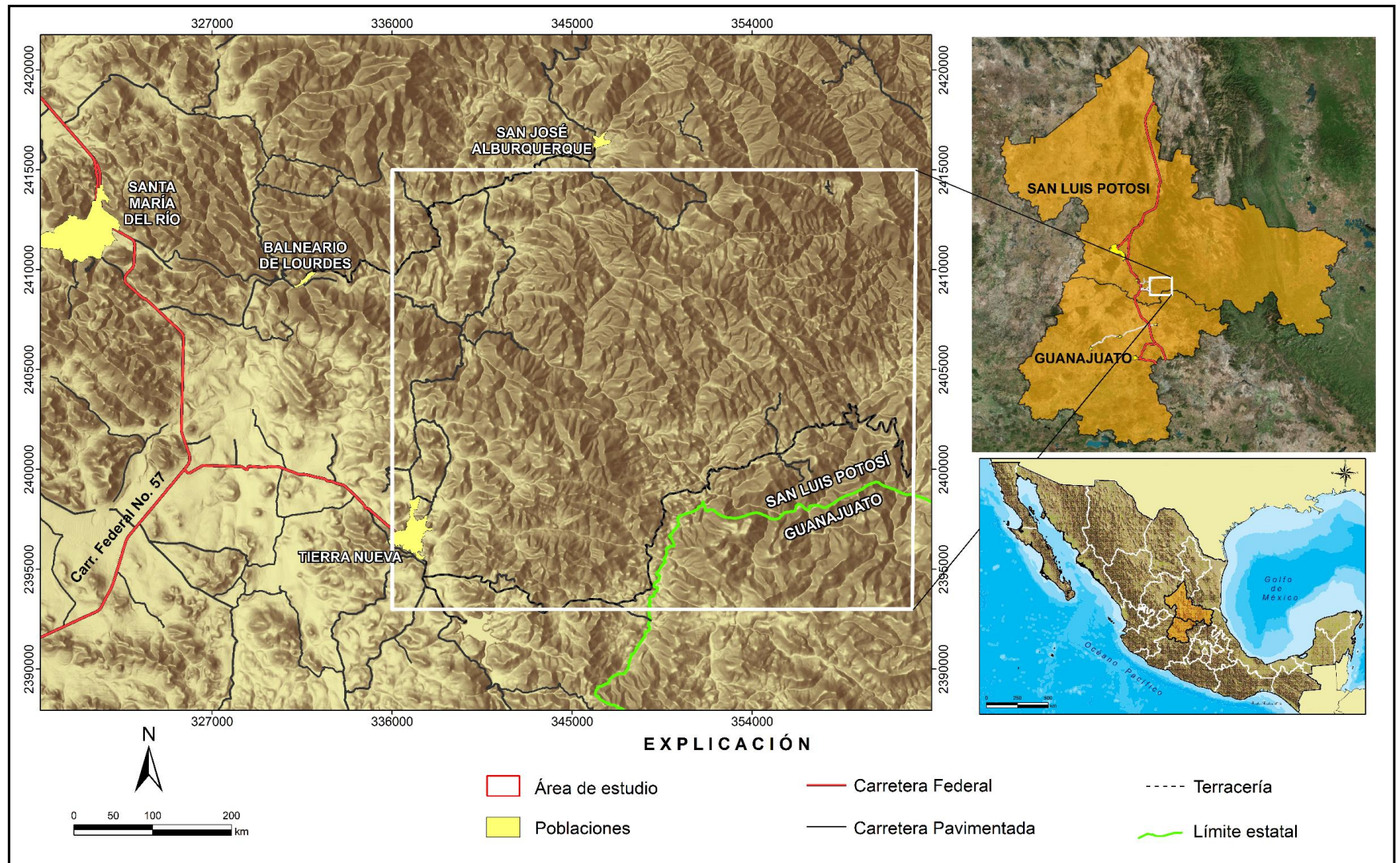


Figura 1. Mapa de localización y vías de acceso. La imagen de la parte izquierda corresponde al área de estudio. Datos toponímicos tomados de INEGI.

La porción suroriental presenta una morfología diferenciada debido a los escarpes muy pronunciados constituidos por depósitos volcánicos del miembro inferior de la unidad Serie Potrerillo (Tdpi) que delimitan la periferia noroccidental de la caldera San Antón.

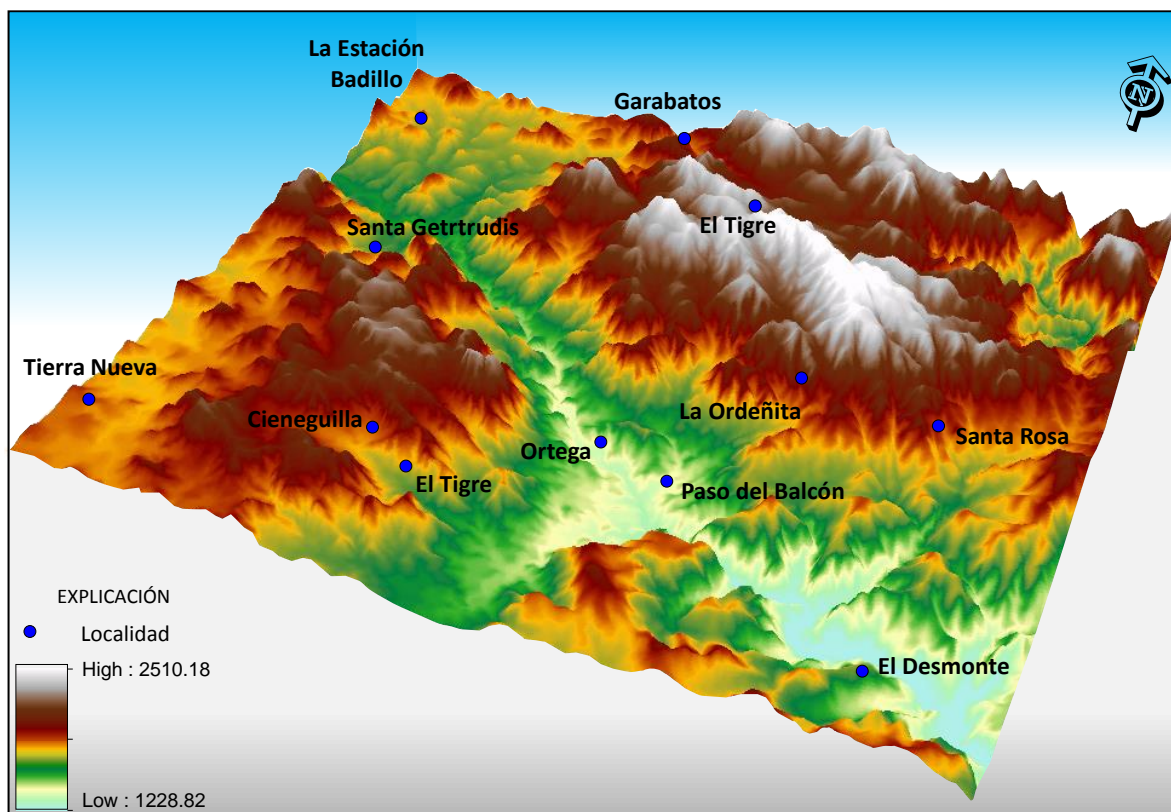


Figura 2. Modelado hipsométrico del área de estudio, mostrando el relieve.

Propósito y alcance del estudio

El propósito del presente trabajo de investigación es documentar detalladamente las características litológicas, estructurales, mineralógicas y químicas de las unidades litológicas presentes en el área de estudio, que sea la base para explicar el emplazamiento de los domos félsicos en el área comprendida entre San José Albuquerque y Tierra Nueva, Estado de San Luis Potosí, y su relación con el entorno geotectónico. Dicho conocimiento debe coadyuvar a la elaboración de un modelo petrogenético y metalogenético para esta área, que a su vez conduzca a generar interés en el potencial económico de la zona.

Objetivo

El objetivo de éste estudio es proponer un modelo genético de emplazamiento de los domos félsicos para entender la relación temporal y espacial de éste magmatismo, así como la posible asociación con el Intrusivo Palo Verde, ubicado en las inmediaciones de las comunidades de San José Albuquerque y Tierra Nueva, S.L.P., proporcionando certidumbre geocientífica a futuras investigaciones. La investigación está basada en datos de campo (*i.e.* mapeo litológico-estructural y alteración), análisis de datos geofísicos, resultados isotópicos, estudios petrográficos, y resultados de química analítica, que permitan tener bases sólidas para interpretar el emplazamiento de los domos y los efectos generados a través del tiempo.

Metodología

La metodología aplicada consistió en cuatro etapas principales usando varias técnicas de investigación que a continuación son descritas.

1) Gabinete

a) Revisión de información relacionada con las ciencias de la tierra y referente al tema tratado, que ha sido generada por instituciones de investigación y dependencias gubernamentales, e iniciativa privada. La información revisada fue integrada en un proyecto y/o Sistema de Información Geografía (SIG) para facilitar la interpretación de datos y conseguir los objetivos propuestos. Por ejemplo, la base bibliográfica incluyó principalmente mapas litológico-estructurales escala 1:50,000 (*i.e.* hojas Salitrera y Tierra Nueva), elaborados por Labarthe-Hernández *et al.*, (1984), Tristán-González (1987), respectivamente.

b) Interpretación de imágenes de satélite con especial énfasis en la detección de lineamientos, control estructural, alteración supergénica, influencia litológica y morfología.

c) Programación de localidades de muestreo para el estudio de química analítica y petrográfica.

d) Integración de un mapa geológico-estructural, mapa de alteración hidrotermal y supergénica, así como imágenes y diagramas requeridos para el texto explicativo final.

2) Trabajo de campo

a) Verificación de contactos, estructuras geológicas, evidencias de mineralización y toma de datos estructurales.

b) Delimitación y mapeo de zonas de interés.

c) Obtención de muestras para análisis químico y petrográfico de los domos riolíticos e Intrusivo Palo Verde.

d) Mapeo y delimitación de zona alteradas.

3) Análisis de laboratorio

a) Preparación y envío de muestras a laboratorios especializados con la finalidad de obtener resultados de química analítica con énfasis en el contenido de óxidos mayores, elementos traza y tierras raras, usando equipo ICP-MS. Los primeros análisis fueron ejecutados en el Centro Experimental Chihuahua del Servicio Geológico Mexicano y los segundos análisis fueron realizados en el laboratorio de química analítica del Instituto de Geología en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

b) Selección, envío y análisis de muestras petrográficas. Las muestras fueron laminadas en el Centro Experimental Oaxaca en el Servicio Geológico Mexicano. El análisis petrográfico fue realizado por la autora, usando un microscopio marca "Leica", de luz transmitida, ubicado en el laboratorio de microscopía del Instituto de Geología de la UASLP.

c) Selección de muestras y separación de zircones para análisis isotópico. La separación de zircones fue realizada por la autora en el laboratorio de

preparación de muestras en el Instituto de Geología de la UASLP. Una vez seccionado los zircones, estos fueron enviados al laboratorio especializado del Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla, Qro., con el objetivo de ser analizado por personal capacitado en el uso de un sistema de ablación láser acoplado con un *cuadrupolo Thermo XII*, y obtener edades isotópicas, mediante el método U-Pb.

4) Elaboración de texto explicativo o tesis de grado

La cuarta y última etapa consistió en la integración e interpretación de la información obtenida, sintetizando los resultados para concluir con aportaciones científicas expuestas en este texto final.

1. AMBIENTE GEOTECTÓNICO

La litología expuesta en el área de estudio es el resultado de un proceso tectónico relacionado con un régimen de convergencia que afectó el continente Americano durante el Cretácico Tardío-Paleogeno. Este proceso fue causado por la subducción oblicua de la placa Farallón debajo de la placa Norteamericana desde la margen paleo-pacífico, afectando la mayor cantidad del territorio mexicano (Goldhammer, 1999 *in* Rocha-Rocha, 2016). Los efectos causados fueron compresión sobre las rocas preexistentes, actividad plutónica, vulcanismo y distensión. Estos efectos moldearon la corteza terrestre, seguido de erosión de la superficie.

El efecto de compresión conocido como Orogenia Laramide, causó cabalgaduras y deformación en las secuencias sedimentarias marinas de naturaleza calcáreo-arcillosas y calcáreas del Cretácico, que fueron depositadas y litificadas sobre un basamento volcanosedimentario y granítico de edad Jurásico y Precámbrico, respectivamente (Campa y Coney, 1983; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1995; Keppie, 2010). La subducción de la placa Farallón causó también grandes volúmenes de magmas que emplazaron a través de la corteza terrestre por zonas de debilidad durante el Paleógeno, como podrían ser: fallas, cabalgaduras y junción de provincias geológicas. Este magmatismo y plutonismo formó *stocks*, diques, domos volcánicos, derrames lávicos y piroclásticos, dentro y sobre la secuencia sedimentaria marina, conformando lo que conocemos como el arco volcánico denominado “Faja Ignimbrítica Mexicana” (FIM).

El área de estudio corresponde a la margen sororiental de la FIM que limita con el margen suroccidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP). Torres-Hernández *et al.*, (2014) han sugerido que el magmatismo del área de estudio tiene características singulares que en general corresponde a magmas calco-alcalinos, dentro del denominado Campo Volcánico del Río Santa María. Los resultados de esta investigación sugieren que existió un evento de extensión posterior a los primeros eventos magmáticos por donde emplazó una serie de

domos félsicos y que las ignimbritas pudieran estar relacionados a posibles calderas, Labarthe-Hernández *et al.*, (1984) y Hernández-García (2015).

1.1. Paleogeografía y evolución magmática

El área de estudio ubicada en la porción meridional del Estado de San Luis Potosí, corresponde a la zona limítrofe entre las provincias geológicas Zacatecana (PGZ) y Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP), en sus porciones suroriental centro-oriental, respectivamente (Figura 1.1).

El magmatismo del Paleógeno generó paquetes de rocas volcánicas denominado Campo Volcánico del Río Santa María. Este emplazó a través de la intersección de dos paleo-elementos (provincia geológica Zacatecana y Plataforma Valles-San Luis Potosí). El intrusivo félsico emplazó durante el Oligoceno Temprano causando alteración hidrotermal en la secuencia calcárea arenosa y calcárea, así como alteración potásica y fílica en el *stock* denominado Intrusivo Palo Verde.

1.2. Geología Regional

El basamento pre-volcánico Mesozoico de la Mesa Central está constituido por los terrenos tectonoestratigráficos correspondiente Terreno Guerrero y Sierra Madre Oriental (Campa y Coney, 1983, Figura 1.2). La geología de la región consta principalmente de rocas ígneas extrusivas procedentes de un mismo complejo volcánico (CVSMR), precedidas por un intrusivo o plutón denominado Palo Verde, el cual a su vez emplazó a través de la secuencia sedimentaria marina del Cretácico, produciendo marmolización por metasomatismo de contacto.

1.3. Estratigrafía

Las unidades litoestratigráficas que afloran en el área de estudio, varían en edad del Cretácico Tardío (Cenomaniano-Maastrichtiano), predominantemente afloran rocas pertenecientes al vulcanismo del Paleógeno y finalmente depósitos recientes del Holoceno (Figuras 1.3 y 4). A continuación, cada una de ellas es descrita brevemente, en orden cronoestratigráfico y de acuerdo al dominio paleogeográfico al que pertenecen.

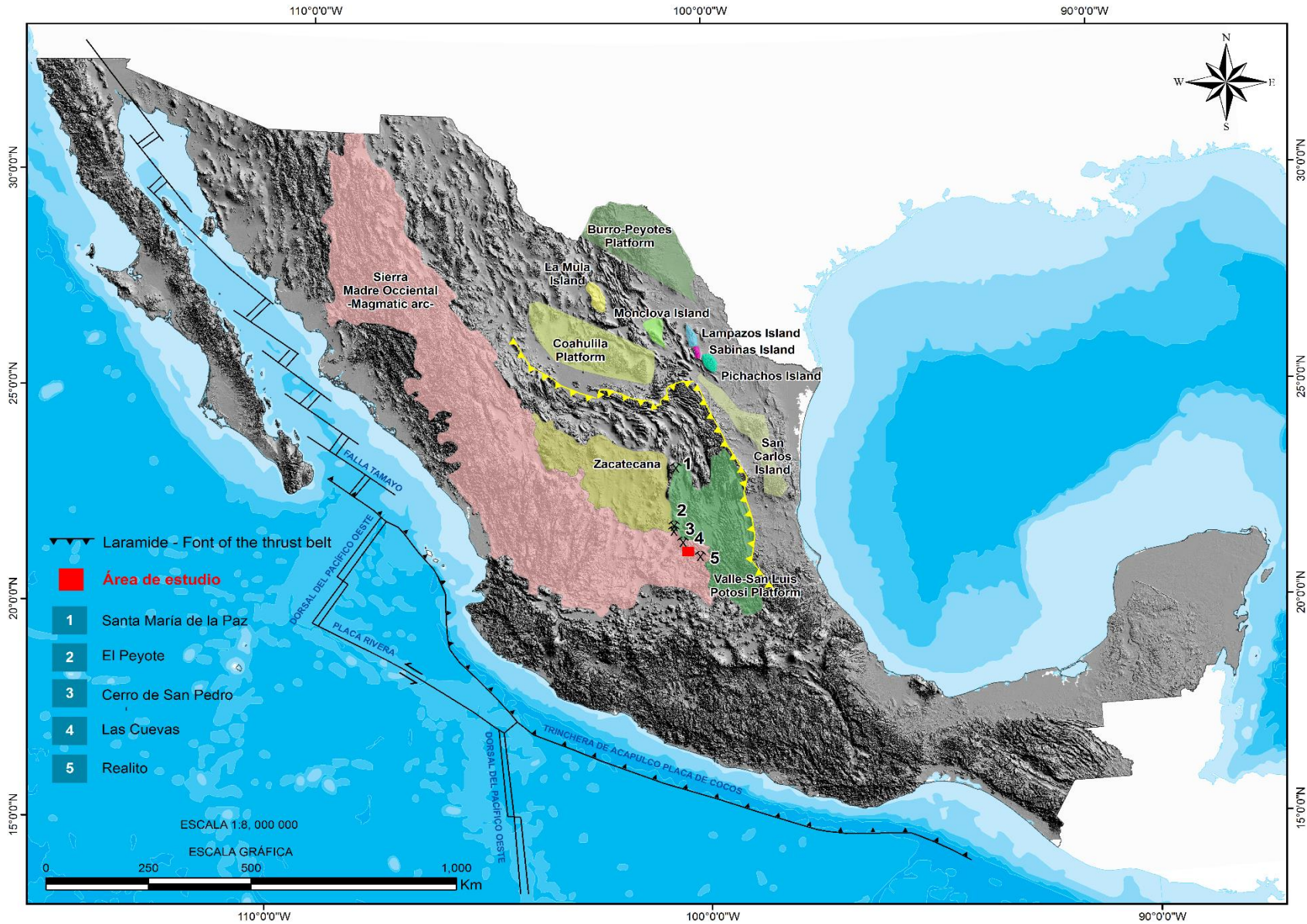


Figura 1.1. Mapa exhibiendo la ubicación del área de estudio y la relación con la paleogeografía (modificado de Rocha-Rocha, 2016).

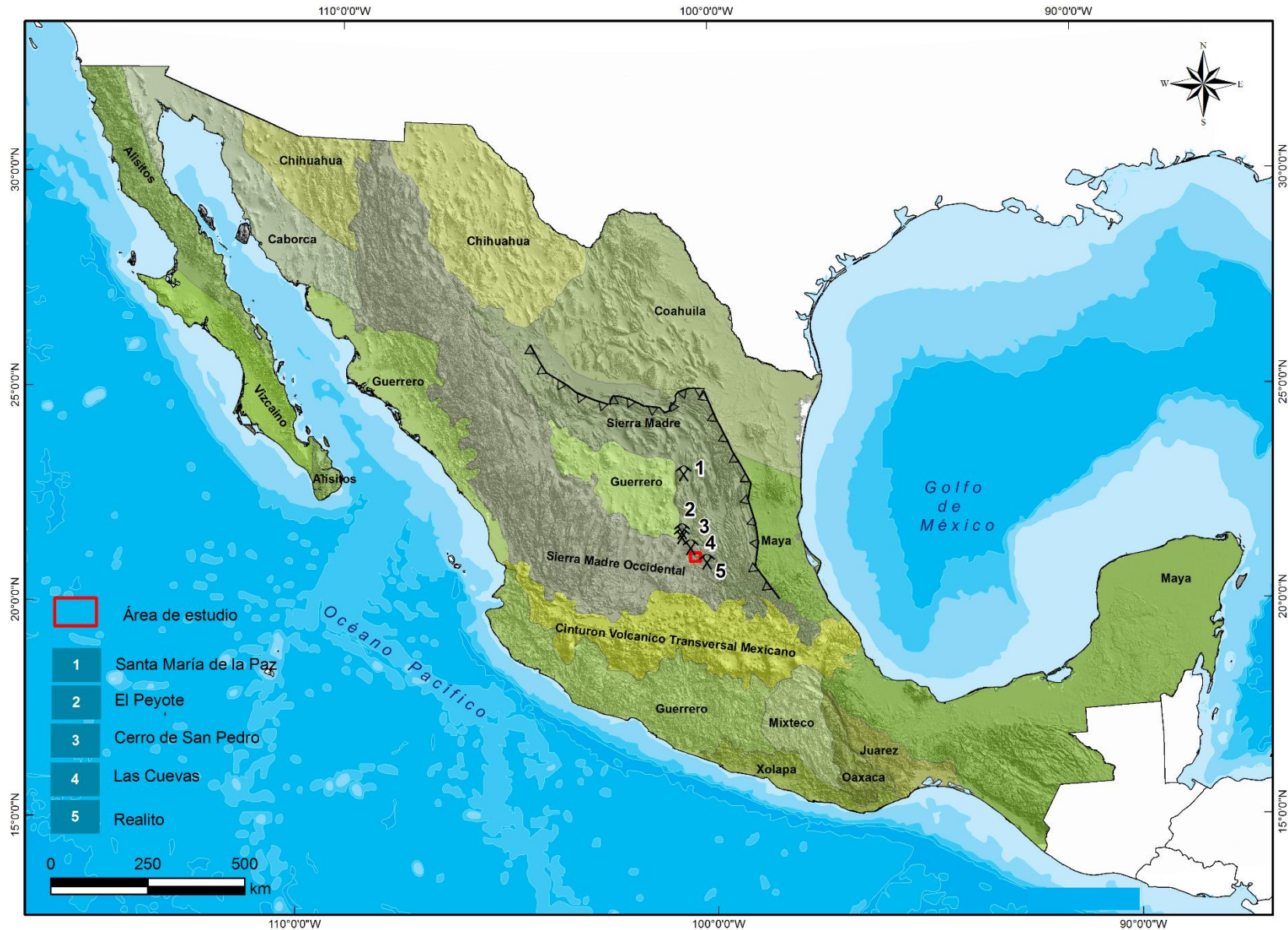


Figura 1.2. Mapa mostrando los Terrenos tectono-estratigráficos y área de estudio (modificado de Campa y Coney, 1983).

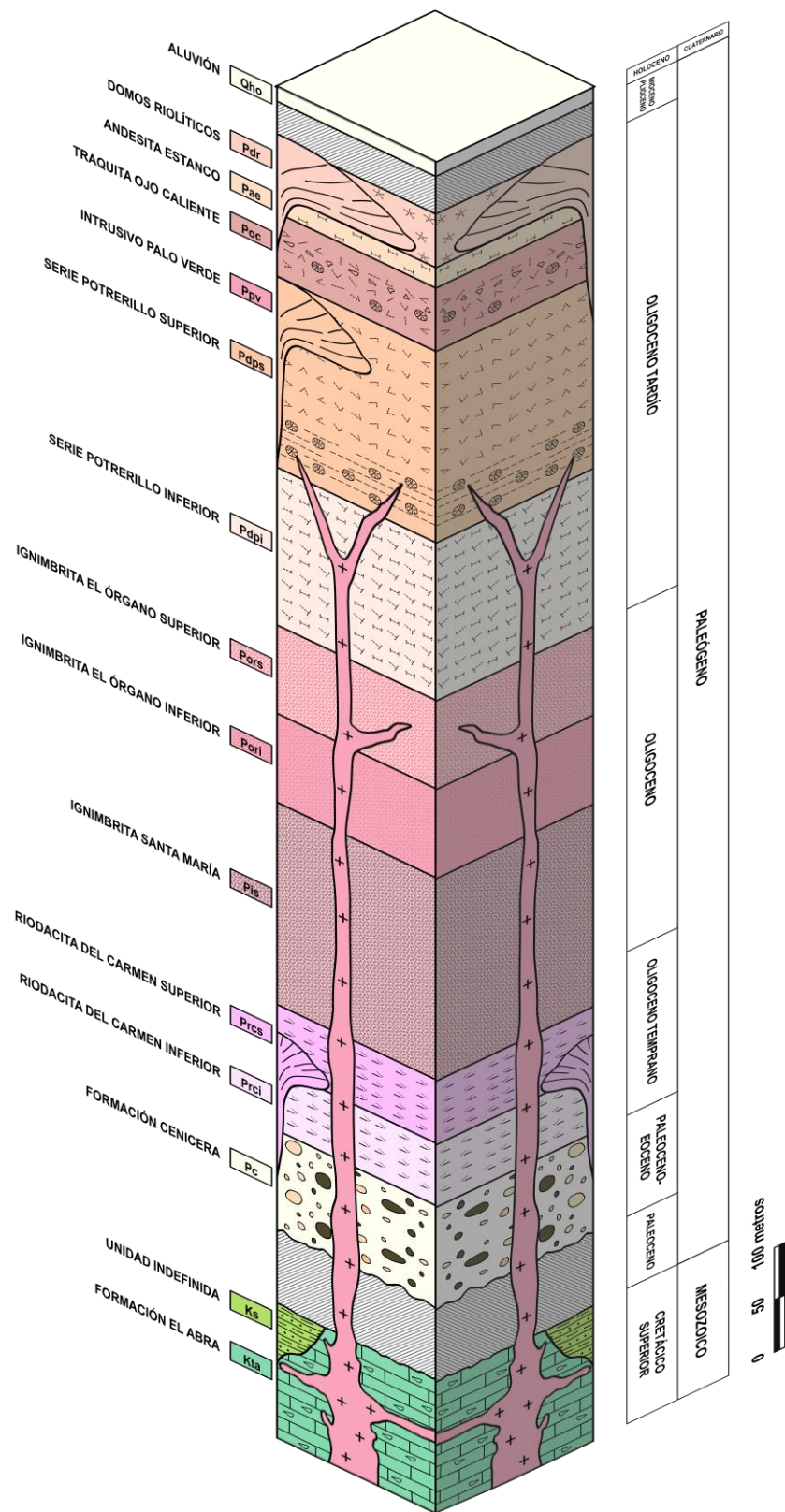


Figura 1.3. Columna estratigráfica del área de estudio. Las unidades litológicas cretácicas no están escaladas.

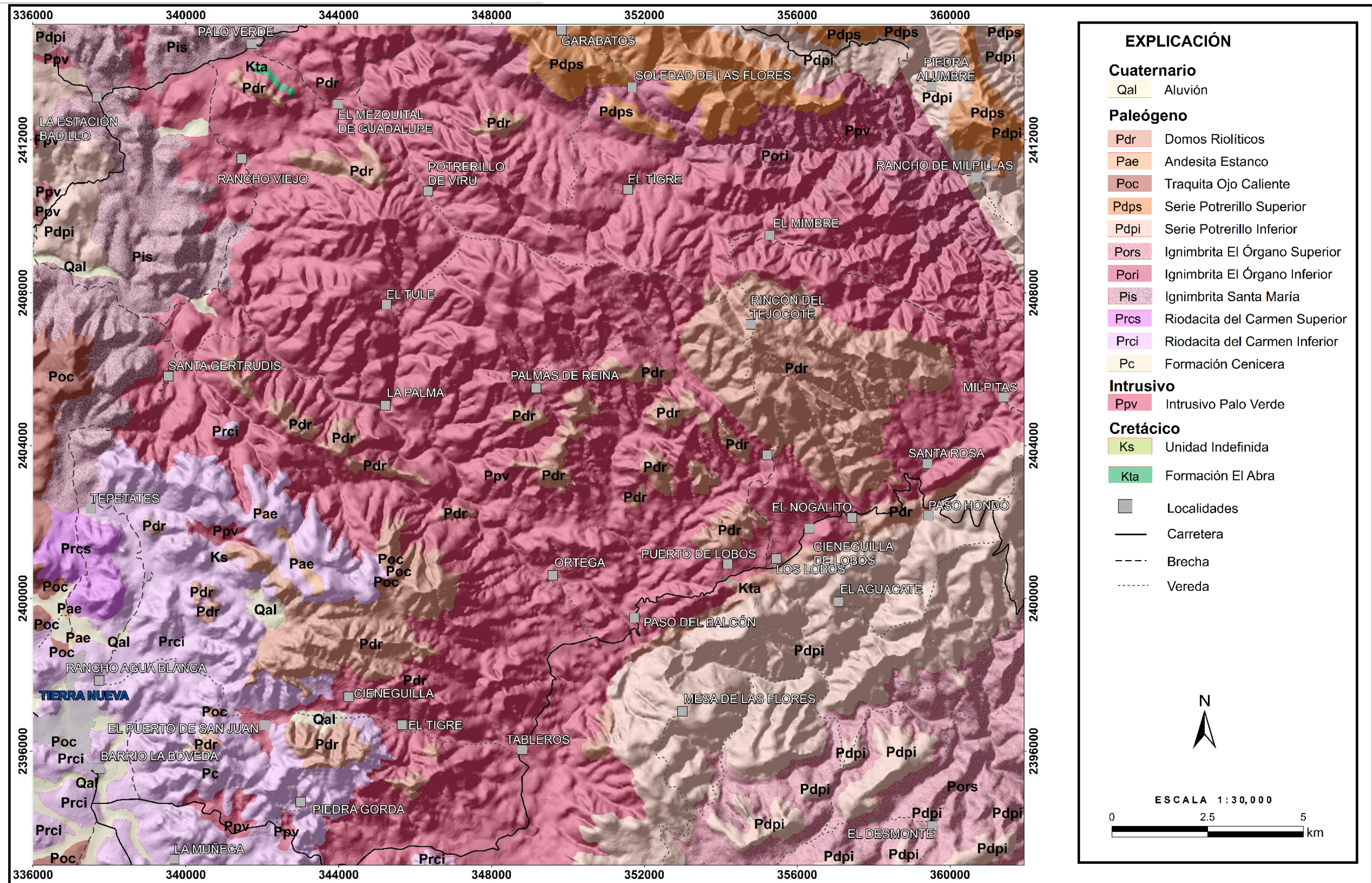


Figura 1.4. Mapa Geológico del área de estudio.

1.3.1. Formación El Abra (Kta)

Esta unidad litológica fue formalmente elevada a la categoría de Formación por Kellum (1930), quien la dividió en fase Miliolina y fase Taninul. Posteriormente, el nombre de Formación El Abra fue aplicado por Muir (1936), para un grupo de dos facies; la facies Taninul, con localidad tipo en el túnel Taninul, al occidente de la estación Taninul sobre el ferrocarril Tampico-San Luis Potosí y la facies El Abra, con localidad tipo en la estación El Abra a 9.4 km al oriente de Ciudad Valles, S.L.P.

En el área de estudio, la Formación El Abra está restringida a dos afloramientos. El primero ubicado en la porción noroccidental del área de estudio, al meridional de la localidad Palo Verde; y el segundo situado al oriente de la localidad Puerto de Lobos (Figura 1.5).



Figura 1.5. Fotografías mostrando aspecto de la Formación El Abra. A) Banco de caliza correspondiente a la Formación El Abra, en la localidad Lobos. B) Detalle de la karsticidad que en porciones presenta la roca, así como fósiles mal preservados.

En la zona de interés, aflora una caliza tipo *mudstone a wackstone* color gris tenue en muestra fresca que intemperiza en tono gris. La caliza ocurre en estratos de espesor mediana a gruesa, caliza dolomitizada, y predominantemente caliza recrystalizada. Los afloramientos de caliza presentan fauna fosilífera mal conservada y local fauna bien formada. En la porción noroccidental del área Palo Verde, ésta llega presentarse interdigitada con una unidad cretácica indefinida. Por otra parte, en la porción suroriental está expuesta una brecha polimíctica restringida

a unos metros (Figura 1.6), teniendo en cuenta que la zona de estudio está ubicada en los límites de las provincias Zacatecana y PVSLP, sugiriendo que estos depósitos calcáreos pudieran haberse depositado en la zona de talud y presumiblemente ésta unidad litológica sea parte de la Formación Tamabra.



Figura 1.6. Fotografía mostrando aspecto de brecha calcárea. A) Fauna fosilífera correspondiente a la Formación Abra; B) Brecha polimíctica.

El contacto inferior de ésta unidad calcárea no aflora, y los colgantes pudieran ser el producto del empuje causado por los intrusivos presentes en el área. Carrillo-Bravo (1971) asignó una edad de Albiano-Cenomaniano para la Formación El Abra. Sin embargo, estudios posteriores realizados por Alencaster *et al.*, (1999) y usando fauna arrecifal (rudistas) en el borde occidente de la PVSLP, determinaron un rango estratigráfico amplio hasta el Santoniano.

Cabe mencionar que Carrillo-Bravo (1971) menciona que para la facies El Abra registra una variedad de espesores que varían de 90 a 2,000 m, dependiendo del área y/o de la litofacies. La Caliza El Abra es correlacionable con las formaciones Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura. El ambiente de depósito ha sido sugerido como plataforma amplia y estable de aguas someras (Carrasco, 1970).

1.3.2. Unidad Cretácica Indefinida (Ks)

En el área de estudio, la unidad litológica aflora en el límite noroccidental (*e.i.* al septentrional de la comunidad del Carmen), restringiéndose aproximadamente 1 km². Las condiciones de ocurrencia en el área de Palo Verde sugieren que ésta unidad litológica pudiera estar interdigitada con caliza recristalizada de la Formación El Abra.

La unidad litológica consiste de una secuencia de arenisca y lutita de grano fino a medio, de color gris verdoso, que intemperizan por lo general en color amarillento. El espesor de los estratos varía de 10 a 50 cm. La arenisca está conformada de granos incluyendo feldespatos y cuarzo de forma angular a subredondeado, así como líticos, que flotan en matriz muy fina, interestratificada con capas de lutita fésiles y laminares de tonalidades que varían de olivo, amarillento y rojizo. En el área Palo Verde predomina la arenisca a diferencia del afloramiento encontrado al nororiental de Tierra Nueva y al oriente del Cerro El Zapote donde predomina la lutita fuertemente deformada (Figura 1.7).

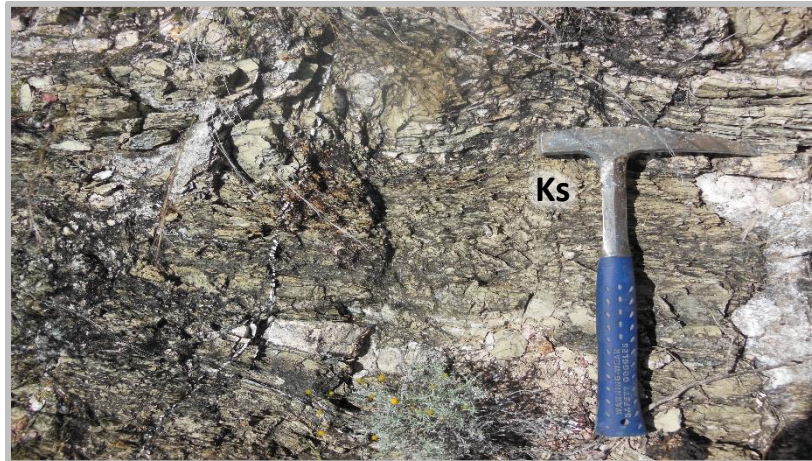


Figura 1.7. Fotografía mostrando detalle de un afloramiento de arenisca y lutita deformada, correspondiente a la unidad indefinida (Ks).

En el área no está expuesta su base, solo está parcialmente intrusionada y cubierta por roca muy intemperizada correspondiente al Intrusivo Palo Verde (Tpv) y la Riodacita del Carmen (Trci), respectivamente.

Basado en la posición estratigráfica para este trabajo la edad es considerada del Cretácico tardío. Presumiblemente esta unidad litológica pudiera ser semejante en edad a las formaciones Caracol Cárdenas y Soyatal.

1.3.3. Formación Cenicera (Pc)

Esta unidad litológica fue originalmente descrita por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1987), en la Hoja Santa María del Río, y posteriormente propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), como Formación Cenicera y la localidad tipo está ubicada en el Arroyo La Cenicera al oriente de Villa de Reyes, S.L.P. En la localidad tipo, la Formación Cenicera consiste de una serie de depósitos clásticos continentales del Paleoceno-Eoceno, formados por sedimentos limo arenoso, conglomerado consolidado a poco consolidado conformado por fragmentos subredondeados de caliza y escaso pedernal negro, sumando un espesor aflorante de 160 m.

En el área de estudio, la unidad litológica está distribuida en pequeños afloramientos en la porción suroccidental, a 2 km al suroriental de Tierra Nueva. Especialmente, en la parte más elevada del Cerro La Silva existen tres afloramientos dispersos; y otro afloramiento está localizado a 3 km al nororiental de Tierra Nueva, localmente al oriente del Cerro Las Cuatas.

La litología es muy similar en los afloramientos ya mencionados. Es decir, la unidad litológica consiste de un conglomerado mal clasificado, con fragmentos redondeados a subredondeados predominantes de 3 a 5 cm con esporádicos de hasta 55 cm, mayormente de caliza (70%), de pedernal y areniscas (20%) y el resto de lutita, cementados en una matriz calcárea. Cabe mencionar que es muy común que presente un enrejado de vetillas de calcita de color blanco (Figura 1.8).

El espesor real de esta unidad es desconocido, pero es posible inferir que es muy delgado por estar la mayoría englobados como grandes colgantes sobre la Riodacita del Carmen.

En el área, la Formación Cenicera está incluida a manera de xenolitos en la Riodacita del Carmen y cubierta localmente sólo por el flujo de lava. Basado en su posición estratigráfica y su edad determinada por palinología, ha sido asignada una edad del Paleoceno-Eoceno (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982).

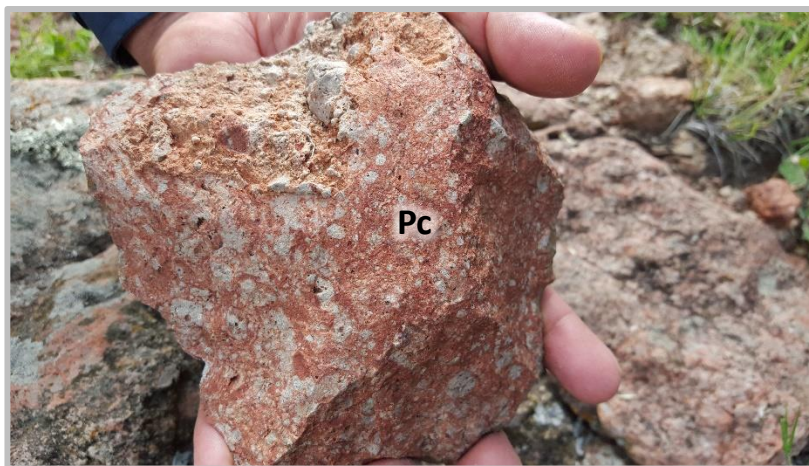


Figura 1.8. Fotografía mostrando detalle de conglomerado, incluyendo clastos de caliza con esporádicos fragmentos de pedernal, correspondiente a la Formación Cenicera (Pc).

1.3.4. Riodacita Del Carmen (Prc)

La Riodacita del Carmen fue descrita informalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1983) en la Carta Melchor (F14C24), para referir afloramientos depositados al meridional del poblado del Carmen, siendo su localidad tipo. La Riodacita del Carmen consiste de un derrame lávico con fenocristales de plagioclasa, sanidino y menor cuarzo en una matriz desvitrificada. Estratigráficamente, la unidad volcánica está subyaciendo a la Ignimbrita Santa María y Traquita Ojo Caliente.

La distribución de la Riodacita del Carmen en el área de estudio está concentrada en la porción suroccidental, a los alrededores del municipio de Tierra Nueva, caracterizada por las coloraciones muy marcadas de rosáceo a rojizo (Sangre de Pichón).

La Riodacita del Carmen está dividida en dos miembros. El miembro inferior (Prci) consiste de una roca ígnea de color marrón rosáceo, holocristalina,

inequigranular porfirítica, con 15% de fenocristales incluyendo sanidino, plagioclasa, cuarzo y local biotita de forma euhedral a anhedral. La matriz es microcristalina de composición félsica, caracterizada por el fuerte diaclasamiento vertical (Figura 1.9).



Figura 1.9. Fotografía mostrando las características litológicas del miembro inferior de la Riodacita del Carmen (Prci), mejor conocida como “Sangre de Pichon”.

El miembro superior (Prcs) consiste de una roca ígnea de color marrón a grisáceo, textura merocristalina inequigranular porfirítica, constituida por sanidino, plagioclasa de forma euhedral a subhedral. La matriz está compuesta de un agregado félsico microcristalino con pequeños gránulos de hierro diseminados. Las evidencias de campo distintivas son la gran cantidad de pliegues de flujo, vetillas rellenas de cuarzo secundario y ópalo (Tristán-González, 1987). En el pozo perforado en Tierra Nueva fue estimado un espesor de 278 m.

En la zona suroccidental, el contacto entre el miembro inferior y superior, está expuesto entre el septentrional de Tierra Nueva y meridional de la comunidad Tepetates en el Cerro La Virgen. La unidad está cubierta discordantemente por casi todas las rocas de la región. Para este trabajo, la unidad fue datada por el método U-Pb y la edad determinada fue de 30.91 ± 0.60 Ma, donde el espesor aflorante es de aproximadamente 100 m. Sin embargo, la relación de campo demuestra que el Intrusivo Palo Verde está intrusionando a la Riodacita del Carmen.

1.3.5. Intrusivo Palo Verde (Ppv)

En la hoja Salitrera, S.L.P., Labarthe-Hernández *et al.*, (1984), nombraron informalmente a una roca intrusiva, localizada en la comunidad de Palo Verde, como Intrusivo Palo Verde (Figura 1.10). Ésta consiste de una roca de color gris a marrón tenue, holocristalina, fanerítica, con un 30% de fenocristales de ortoclasa, plagioclasa y ferromagnesianos como pequeños fenocristales de biotita, hastingsita, riebeckita y accesorios de monazita, xenotima, apatito y fluorita esporádica.

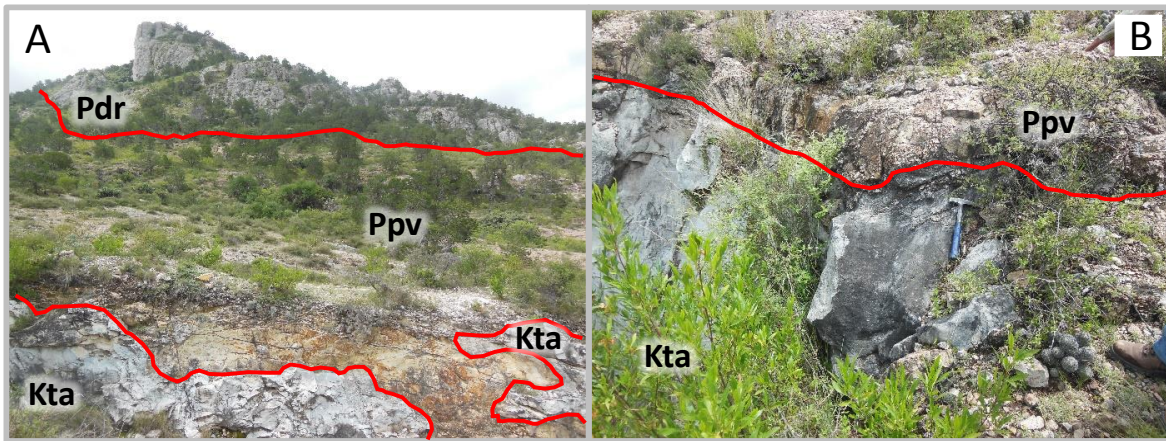


Figura 1.10. Fotografía A) Panorámica de la localidad tipo del Intrusivo Palo de (Ppv). B) Detalle del contacto entre el intrusivo y la caliza de la Formación El Abra. El Intrusivo Palo Verde aflora en la porción central abarcando considerablemente la mayor parte del área de estudio.

La roca es de composición félsica, color verdoso probablemente por presencia de clorita, así como local presencia de arcillas remplazando feldespatos. La roca presenta fenocristales feldespato alcalino principalmente, menor proporción de feldespato plagioclasa y ojos de cuarzo. El feldespato alcalino tiene tamaño entre medio y fino (2 mm a < 1 mm) y de apariencia subhedral. El feldespato plagioclasa su tamaño es fino (< 1 mm) y apariencia subhedral. El cuarzo varía de tamaño entre medio y fino (2 mm a < 1 mm), y forma anhedral a subhedral, con bordes redondeados y reabsorbidos semeando apariencia de ojos de cuarzo. Otros minerales accesorios incluyen biotita de tamaño fino (< 1 mm) de forma anhedral; así como la muscovita de forma euhedral y tamaño es medio (5 mm a 2 mm),

además, local ferromagnesianos que pudiera ser hornblenda riebeckita (anfíbol), turmalina, con textura xenolítica y orbicular (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984).

El cuerpo ígneo intrusivo varía en composición mineralógica y textural. En la parte central, la roca es fanerítica, inequigranular porfírica, mientras que hacia los extremos; los fenocristales varían de 2-3 mm.

El Intrusivo Palo Verde emplazó a las formaciones El Abra (Kta), Caracol (Ksc) y la Cenicera (Pc), así como a las unidades volcánicas del Oligoceno Temprano – Medio, incluyendo: La Riodacita del Carmen (Prc), La Ignimbrita El Órgano (Por), La Ignimbrita Santa María (Pis) y la Serie Potrerillo (Pdp) (Figura 1.3).

En el área de estudio, Tristán-González *et al.*, (2009) reportaron edades isotópicas para el Intrusivo Palo Verde, y lo clasificaron como sienita. Específicamente, la datación isotópica determinada mediante el método de K-Ar, indicó cristalización durante el Oligoceno Tardío (31.5 ± 0.7 Ma). Además, en el presente trabajo, resultados de datación isotópicas sobre circones usando el método U-Pb, para una muestra colectada al meridional del área estudiada (*i.e.* 2.5 km al meridional de la comunidad Tableros), aportó una edad ligeramente más antigua de 32.42 ± 0.49 Ma, confirmando que la edad de cristalización del plutón ocurrió durante el Oligoceno Medio.

1.3.6. Ignimbrita Santa María (Pis)

La Ignimbrita Santa María fue descrita informalmente por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1981), en la cartografía geológica de la Hoja Santa María (F14C14). Posteriormente, ésta fue propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), considerando su localidad y sección tipo en los cerros inmediatamente al septentrional de Santa María del Río. Esta localidad consiste de un flujo de cenizas riolítica, con sus zonas de cristalización bien definidas.

En el área de estudio, la unidad litológica está distribuida en la porción noroccidental, localmente aflora en el Cerro Viejo y en las laderas de la Mesa Salsipuedes sobre los arroyos Santa María y Yerbabuena. La Ignimbrita Santa María consiste de un flujo de ceniza riolítica bien soldada. La roca es de color gris

claro, con 10-25% de fenocristales de cuarzo anhedral y sanidino euhedral de 2 a 3 mm, con abundantes cristales de óxidos de fierro, soportados en matriz desvitrificada con pómez colapsada y algunos líticos de 2 a 3 cm de color marrón rojizo.

El espesor registrado en la Mesa Salsipuedes es del orden de 320 m. En la parte correspondiente al área de estudio, la Ignimbrita Santa María subyace concordantemente al miembro inferior de la Serie Potrerillo (Pdpi) y discordantemente a la Traquita Ojo Caliente (Poc) e intrusionada por el Intrusivo Palo Verde (Ppv). La edad está dada por su posición estratigráfica y resultado isotópico, Tristán-González *et al.*, (2009) determinaron 32.5 ± 0.8 y 31.3 ± 0.7 Ma para esta unidad litológica.

1.3.7. Ignimbrita El Órgano (Por)

Esta unidad litológica fue descrita informalmente con el nombre de Ignimbrita El Órgano por Labarthe-Hernández *et al.*, (1984). Grasel (1979) la había nombrado también informalmente como "*Yellow Unit*". El nombre de Ignimbrita El Órgano fue adoptado del Cerro El Órgano, localizado al nororiente de la mina Las Cuevas, ubicada en el municipio de Villa de Zaragoza, S.L.P., donde consiste de un flujo de cenizas soldado de composición riolítica.

En el área de estudio, la Ignimbrita El Órgano consiste de un flujo de cenizas bien soldado de composición riolítica con sus zonas de enfriamiento bien definidas, dividida en dos miembros. El miembro inferior (Pori) marcada por el menor contenido de cuarzo y el miembro superior (Pors) es caracterizado por exhibir una morfología de columnas. La separación de los miembros está definida por un vitrófido lenticular que marca el cambio de la unidad de enfriamiento (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984) (Figura 1.11).

Específicamente, el miembro inferior (Pori) está constituido por una roca de color gris pardo a rosáceo, con un 25% de fenocristales de cuarzo subhedral a anhedral y sanidino euhedral de 3 a 4 mm, embebidos en una matriz desvitrificada; con predominante pómez bien colapsada y local líticos de color marrón; hacia la

cima presenta una estructura brechosa con cavidades de diversos tamaños. El espesor es difícil de medir, pero la estimación del espesor en base a un perfil geológico correspondiente a la porción nororiental del área de estudio y donde aflora únicamente este miembro, da como resultado 140 m de espesor.

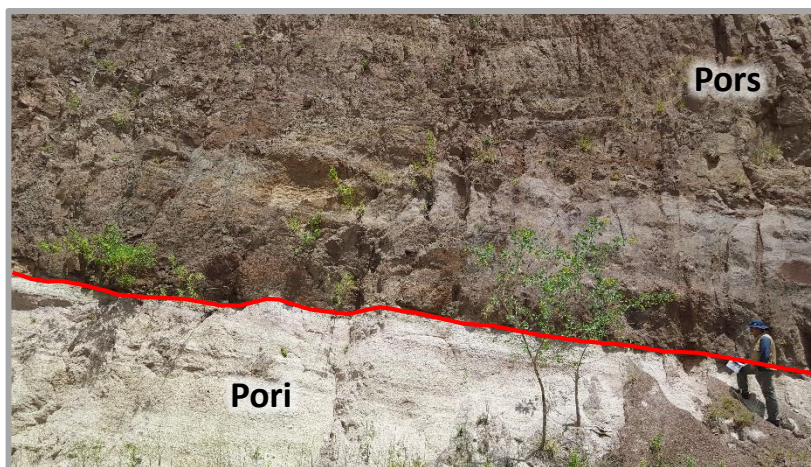


Figura 1.11. Fotografía mostrando el miembro inferior (Pori) en contacto con el miembro superior (Pors) de la unidad Ignimbrita El Órgano.

El miembro superior (Pors) consiste de una roca de color marrón tenue o grisáceo, con 15 a 20 % de fenocristales de cuarzo anhedral y sanidino euhedral de 2 a 3 mm, muchos de ellos rotos, soportados en matriz desvitrificada, con abundante pómez colapsada y líticos de color marrón rojizo, morfológicamente caracterizado por su estructura columnar (Figura 1.12). El espesor en la intersección del Río Santa María y el Río El Desmonte ubicado en la porción suroriental del área estudiada perteneciente al Estado de Guanajuato es de 420 m.

En la porción nororiental del área de estudio aflora el miembro inferior en las partes bajas del Cerro Los Barbechos principalmente sobre los arroyos La Soledad, El Tecolote, Nogalitos y Milpillas. El miembro superior aflora únicamente en la porción suroriental del área de estudio perteneciente al Estado de Guanajuato, localmente en las faldas del Cerro El Guajolote, sobre los arroyos La Cañada del Guaje, El Desmonte y Santa María.

Esta unidad litológica sobreyace discordantemente a las unidades Ignimbrita Santa María (Pis) y Serie Potrerillo (Pdp). Tristán-González *et al.*, (2009) determinaron 31.7 ± 0.5 Ma, para esta unidad litológica.

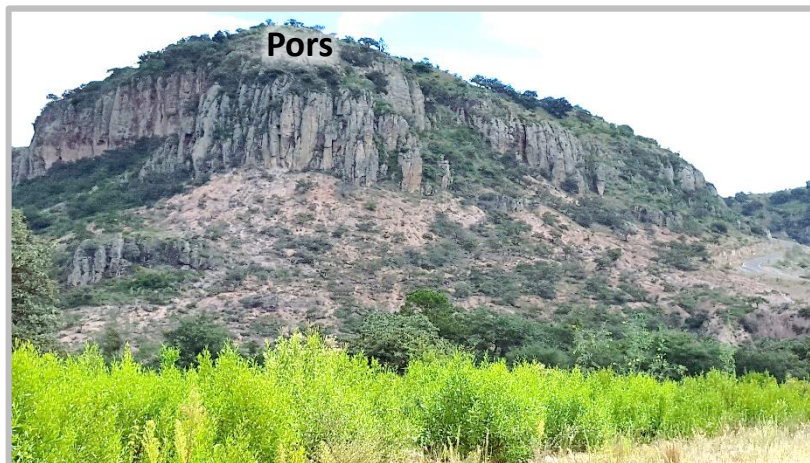


Figura 1.12. Fotografía mostrada panorámica del miembro superior de la unidad Ignimbrita El Órgano (Pors), caracterizada por su estructura columnar.

1.3.8. Serie Potrerillo (Pdp)

Grasel (1979) describió formalmente por primera vez la Serie Potrerillo, como "*Purple Unit*". Posteriormente, en la Hoja Salitrera (F14C15) Labarthe-Hernández *et al.*, (1984), designaron el presente nombre.

Esta serie consiste de dos miembros, siendo el inferior dacítico y el superior andesítico. Ambos miembros están rellenando la Caldera Milpa Grande. La localidad tipo está ubicada en las cercanías de la comunidad de Potrerillo en el camino Salitrera a San José de Albuquerque, S.L.P.

El miembro inferior (Pdpi) aflora en la porción nororiental del área de estudio en las inmediaciones de las comunidades La Laborcilla, Estancia de San Juan y Milpillás. En la parte suroriental del área de estudio, la unidad litológica está expuesta en la Mesa de las Flores y en las rancherías Paso de la Luz, Xoconostle, La Trinidad, La Minita y La Higueras que morfológicamente corresponde a la periferia de la Caldera San Antón (Figura 1.13), y un pequeño afloramiento al noroccidental del área de estudio, localmente a los alrededores de las comunidades El Badillo y Villagrana.



Figura 1.13. Fotografía mostrando panorámica de la zona sureste del área de estudio, con vista al norte. Además, puede apreciarse la porción noroeste de la Caldera San Antón, donde es expuesto el afloramiento más representativo del miembro inferior de la unidad Serie Potrerillo encima de la Ignimbrita El Órgano.

El miembro superior (Pdps) está expuesto en la porción nororiental del área de estudio, localmente en el Cerro Los Barbechos y sus alrededores. El miembro inferior (Pdpi) consiste de varios flujos lávicos de diferentes espesores, todos ellos separados entre sí por vitrófido negro y vidrio vesicular.

En general, la unidad litológica consiste de una roca de color marrón rojizo, holocristalina, inequigranular, porfirítica con 10-15% de fenocristales de 3-5 mm, incluyendo sanidino, plagioclasa y cuarzo. La unidad litológica presenta gran cantidad de pliegues de flujo y zonas de formación de esferulitas con diámetros promedio de 4 cm (Figura 1.14). Las zonas de fuente son encontradas a lo largo del arco y caracterizadas por un intenso brechamiento, vitrófidos con planos de fluidez vertical, vetas de calcedonia, así como formación de gran cantidad de esferulitas, Tristán-González (1987). En la porción suroriental de La Mesa de las Flores, esta unidad litológica exhibe un espesor de 250 m.



Figura 1.14. Fotografía mostrando zona de esferulitas. Éstas presentan diámetros que varían de 1 a 4 cm.

El miembro superior (Pdps) consiste de un paquete de varios flujos de lava de composición andesítica, algunos de composición dacítica hacia su base y flujos basálticos hacia la cima. La roca es de color marrón oscuro, con un 5-10% de fenocristales de plagioclasa de 1 a 3 mm, regular cantidad de biotita, en una matriz vítrea hacia las bases y desvitrificada en sus partes centrales. La parte más basáltica consiste de una roca holocristalina, inequigranular, ligeramente porfirítica y vesicular. Los fenocristales son principalmente de plagioclasa zonada y en menor proporción el piroxeno (augita?) con fenocristales de tamaño promedio de 1.5 mm. La matriz es afanítica y compuesta principalmente de microlitos de plagioclasa y olivino (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984). El espesor aflorante medido al NW de Barbechos es de 300 m.

En la Hoja Salitrera Labarthe-Hernández *et al.*, (1984), consideran que la Serie Potrerillo forman una estructura dómica post-caldera que descansa sobre la Ignimbrita del Órgano o Ignimbrita Santa María.

La Serie Potrerillo sobreyace discordantemente al Intrusivo Palo Verde (Ppv) a la Riodacita del Carmen (Prc), a la Ignimbrita del Órgano (Tor) y es intrusionada en una de sus márgenes por el gran dique de Lobos (Tdr). La edad es basada por posición estratigráfica, debido a que ésta sobreyace discordantemente a la Ignimbrita del Órgano (Tor) y a la Ignimbrita Santa María.

1.3.9. Traquita Ojo Caliente (Poc)

Esta unidad litológica fue originalmente descrita informalmente por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1980), en la Hoja Santa María del Río (F14C14) y propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982). La localidad tipo está situada en el poblado de Ojo Caliente, S.L.P., conformada de un derrame lávico de color gris claro a marrón rojizo de textura holocristalina, microporfirítica y marcados pliegues de flujo.

En la zona de estudio, la unidad volcánica está distribuida como aislados y pequeños remanentes en el cuadrante suroccidental, y el más representativo es el afloramiento que corona La Mesa Salsipuedes (Figura 1.15).

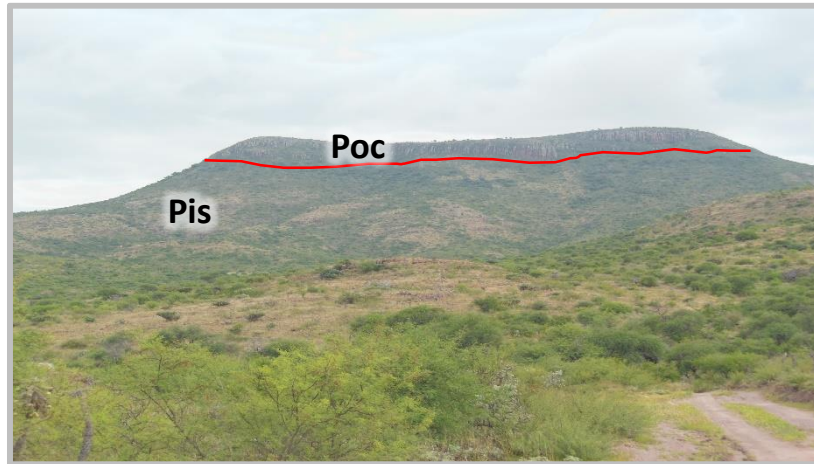


Figura 1.15. Fotografía mostrando panorámica del afloramiento de la unidad Traquita Ojo Caliente (Poc) depositada encima de la Ignimbrita Santa María (Pis), imagen capturada al occidente del área de estudio, en La Mesa Salsipuedes.

La Traquita Ojo Caliente consiste de una roca de color marrón rojizo, textura merocristalina, inequigranular porfirítica. La unidad litológica está constituida por plagioclasa, piroxeno, y minerales opacos. La plagioclasa ocurre en fenocristales de 2 a 3 mm de largo y como microlitos orientados al azar; algunos fenocristales de plagioclasa con numerosas inclusiones de vidrio. Una textura distintiva de esta

unidad litológica es la presencia de pliegues de flujo, vesículas rellenas de calcedonia y esferulitas de 1 a 2 cm de diámetro desarrolladas hacia la base.

La Traquita Ojo Caliente está suprayaciendo a la Ignimbrita Santa María (Pis). Tristán-González *et al.*, (2009) en dos muestras diferentes obtuvieron una edad similar de 31.8 ± 0.7 Ma.

1.3.10. Andesita Estanco (Pae)

La Andesita Estanco fue descrita informalmente por primera vez en la Hoja Salitrera (F14C15) por Labarthe-Hernández *et al.*, (1984), donde consiste de una secuencia de flujos de lavas de composición andesítica, cuya mejor exposición está al meridional del poblado Estanco.

La distribución de la Andesita Estanco en el área de estudio, está reducida a pequeños afloramientos en la esquina noroccidental del área. Esta unidad litológica fue arrojada por pequeñas fuentes (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984). En el área de estudio, la Andesita Estanco consiste de flujos de lava andesítica, intercalados con delgados horizontes de basalto vesicular. La andesita es una roca de color gris oscuro con aislados fenocristales de plagioclasa de 1 a 2 mm, en una matriz de microlitos de vidrio y plagioclasa (Figura 1.16).



Figura 1.16. Fotografía mostrando detalle del flujo lávico correspondiente a la unidad (Pae), expuesta al suroriente del área a 1.5 km al septentrional del poblado Tierra Nueva.

El espesor es muy variable pero no excede más de 20 m. El contacto es reconocido por un vitrófido negro de aproximadamente 4 m de espesor, que ocurre encima de la Traquita Ojo Caliente.

La edad de la Andesita Estanco está dada por su posición estratigráfica. La unidad volcánica sobreyace a la Traquita Ojo Caliente, por lo tanto, ha sido asignada una edad de Oligoceno tardío (Chatiano).

1.3.11. Domos Riolíticos (Pdr)

Este trabajo fue focalizado en la caracterización petrogenética de domos riolíticos, asignándole la nomenclatura (Pdr). Estos pertenecen a la unidad Riolita San Miguelito, que informalmente fue descrita por primera vez en la cartografía de la Hoja San Luis Potosí (F14A84) por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978) y propuesta formalmente como formación por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), considerando su localidad tipo en la estribación septentrional de la Sierra de San Miguelito. En la localidad tipo consiste de un derrame lávico de composición riolítica, de color gris claro, matriz desvitrificada, textura porfirítica, con un 15-20% de fenocristales de cuarzo y sanidino, así como intensa formación de pliegues de flujo (Labarthe-Hernández y Tristán-González 1978).

Esta unidad litológica está distribuida de manera aislada en la porción centro del área de estudio, donde está caracterizada por una serie de domos aglutinados y aislados, emplazados a lo largo de estructuras coronando a las rocas más antiguas, pero algunos de los domos sólo son restos de cuellos volcánicos.

Los afloramientos más sobresalientes corresponden a domos aglutinados, ubicados al nororiental de la población La Ordeñita, localmente conocida como el Cerro El Divisadero; así como al oriente de Tierra Nueva en el Cerro El Pulque y el Cerro Viejo; y sobre el lineamiento del Río Armadillo existe un domo conocido localmente como el Cerro El Temeroso, que está coronando las unidades más antiguas.

Finalmente, los domos riolíticos aglutinados y aislados son distribuidos siguiendo un patrón semicircular correspondiente a la periferia del curvilineamiento denominado Palo Verde-Santa Rosa, ubicado dentro de los límites de la caldera Milpa Grande. De acuerdo a Hernández-García (2015), éstos delimitan la margen noroccidental de una posible caldera denominada San Antón (Figura 1.17) que en su porción noroccidental coincide con la traza “dique Lobos” donde fueron emplazados domos riolíticos.

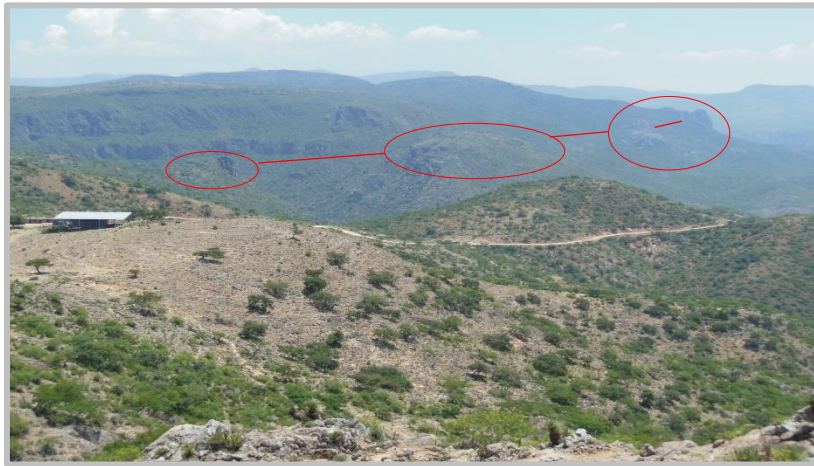


Figura 1.17. Fotografía mostrando panorámica con vista al sur, los círculos rojos muestran una serie de domos emplazados sobre una falla con rumbo N 30° E, que coincide con el perímetro noroccidental de la caldera San Antón.

Esta zona de domos coincide posiblemente con la separación de las dos calderas ya mencionadas asumiendo que sean calderas anidadas; o bien la otra posibilidad es que sea una sola caldera, y la zona referida represente la zona central.

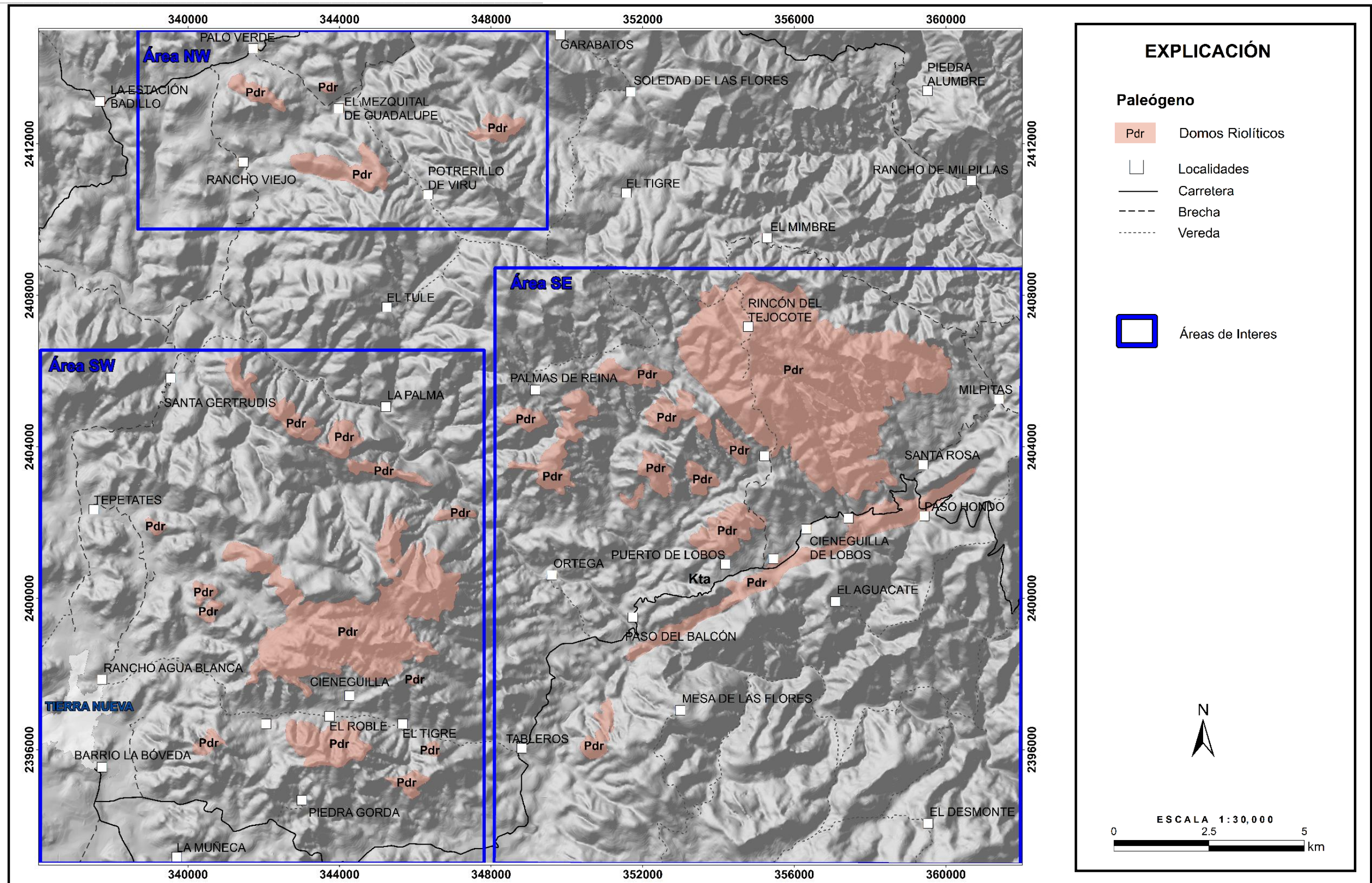


Figura 1.18. Mapa litológico-estructural mostrando las zonas de domos riolíticos de la unidad (Pdr).

Zona Noroccidental

La zona noroccidental está conformada por domos situados entre los poblados Palo Verde y Rancho Viejo principalmente, donde aflora una roca ígnea extrusiva félsica, apariencia leucocrática, estructura merocrystalina, formada por fenocristales inequigranulares en matriz vítrea a microcristalina (Figura 1.18). La roca presenta estructura amigdaloides aunque parecen en algunas partes como líticos, así como fenocristales de cuarzo, feldespatos alcalinos y feldespatos plagioclasa. El cuarzo es de tamaño fino y forma subhedral. El mineral accesorio es de color oscuro de manera muy esporádica y tamaño fino (< 1 mm).

El espesor es muy variable. Al oriente del área de estudio en el Cerro Viejo aflora 300 m y al occidente en “El Divisadero” está expuesta 400 m de roca, siendo los afloramientos más representativos del área de estudio. En la porción suroccidental, los domos riolíticos (Pdr) están sobreyaciendo a la Riodacita del Carmen (Prc).

En la Hoja San Luis Potosí (F14A84), la edad de los Domos Riolíticos está basada por la datación del método K-Ar, que es de 30.0 ± 1.5 Ma., situándola en el Oligoceno Tardío (Chatiano). En éste trabajo de investigación fueron datadas dos muestras, usando el método U-Pb y las rocas corresponden a dos afloramientos: 1) muestra colectada al oriente del área de estudio, en La Ordeñita “Cerro El Divisadero”, aportó un resultado de 31.65 ± 0.60 Ma, y 2) muestra colectada al suroccidental del área de estudio al oriente de Tierra Nueva “Cerro Piedras Coloradas, resultando en 31.87 ± 0.86 Ma.

Zona Suroccidental

La zona suroccidental está conformada por domos situados entre los poblados Tierra Nueva, La Cieneguilla, El Roble, El Tigre, Tunamansa y La Palma (Figuras 1.18, 19, 20). En la zona predomina una roca ígnea extrusiva leucocrática con estructura merocrystalina, formada por fenocristales inequigranulares que flotan en una matriz vítrea a microcristalina.

La roca es gris tenue a morado pardo, con fenocristales de cuarzo, feldespato alcalino y feldespato plagioclasa. El cuarzo es de tamaño grueso a fino (*i.e.* 1 cm a < 1 mm), y forma subhedral. El feldespato alcalino incluye ortoclasa y sanidino, tamaño medio a fino (*i.e.* 2 mm a < 1 mm), y apariencia anhedral a subhedral. El feldespato y plagioclasa son de forma anhedral, y tamaño fino (*i.e.* > 1 mm). Los minerales accesorios incluyen un mineral oxidado de color marrón de tamaño fino.

El domo ubicado en el Cerro Viejo presenta una etapa explosiva, representada por un paquete ignimbrítico que fue distribuido hacia el septentrional y nororiente. Esta roca es un flujo de cenizas bien soldado, de color marrón rojizo; textura holocristalina, inequigranular porfirítica, con 20 a 25% de fenocristales de sanidino, cuarzo y plagioclasa que son de 2 a 4 mm de diámetro, forma euhedral a subhedral excepto el cuarzo que tiene forma redondeada con bordes corroídos. Los óxidos de hierro están en forma de gránulos diseminados en la matriz (Tristán-González, 1987).

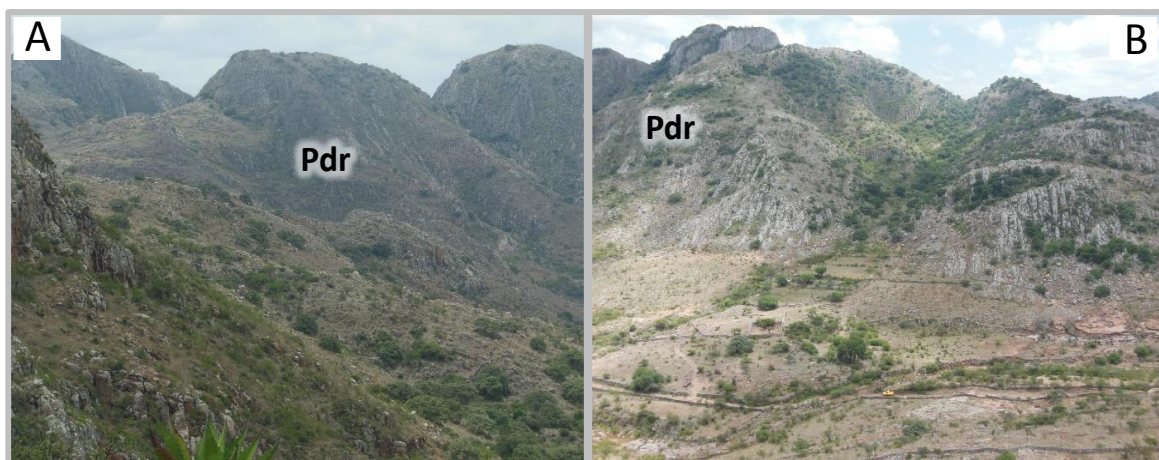


Figura 1.19. Panorámicas de aglutinamiento de domos riolíticos. A) Localizados en el Cerro El Pulque. B) Ubicados en el Cerro Piedras Coloradas, al oriente de Tierra Nueva.



Figura 1.20. Aspecto de domos riolíticos aislados localizados en la porción suroccidental. A) Ubicado en la localidad Tableros, B) Ubicado en la localidad El Tigre.

Zona Suroriental

La zona suroriental está conformada por los domos situados entre los poblados Lobos, Ordeñita, Peñas Blancas, El Divisadero y Santa Rosa (Figura 1.18). Estos domos pueden ser aglutinados como los expuestos en El Divisadero y algunos grupos de domos aglutinados en menor escala (Figura 1.21). Esporádicamente, domos aislados están en el entorno del poblado Peñas Blancas, todos varían en magnitud y con un fuerte desarrollo de diaclasamiento (Figura 1.22).

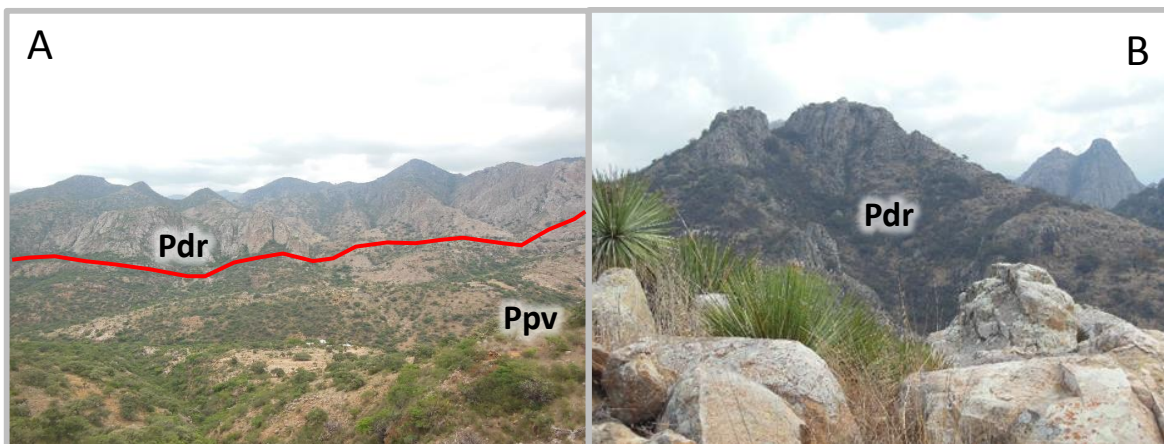


Figura 1.21. Panorámicas de los domos aglutinados ubicados en la porción oriente del área de estudio, localmente en el Divisadero. A) Con vista al septentrional y B) Con vista al oriente.



Figura 1. 22. Panorámicas de los domos aislados, ubicados localmente al occidente de Santa Rosa. A) Domo El Pino, B) Domo Santa Rosa I.

Debido a la erupción de una etapa explosiva de estos domos, a los alrededores de las estructuras volcánicas es común encontrar remanentes de ignimbritas. En general, en ésta zona aflora una roca ígnea extrusiva con estructura merocristalina, formada por fenocristales inequigranulares que están flotando en una matriz microcristalina, y por la proporción de minerales claros y oscuros es considerada leucocrática. La roca contiene fenocristales de cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa como principales minerales. El cuarzo es de tamaño medio a fino (*i.e.* 2 mm a < 1 mm), y forma subhedral. El feldespato alcalino consiste de fenocristales de sanidino y ortoclasa con tamaño medio a fino de apariencia anhedral a subhedral. El feldespato plagioclasa presenta forma anhedral y, de tamaño medio a fino. El principal mineral accesorio es biotita que existe de manera muy esporádica y tamaño fino (*i.e.* < 1 mm).

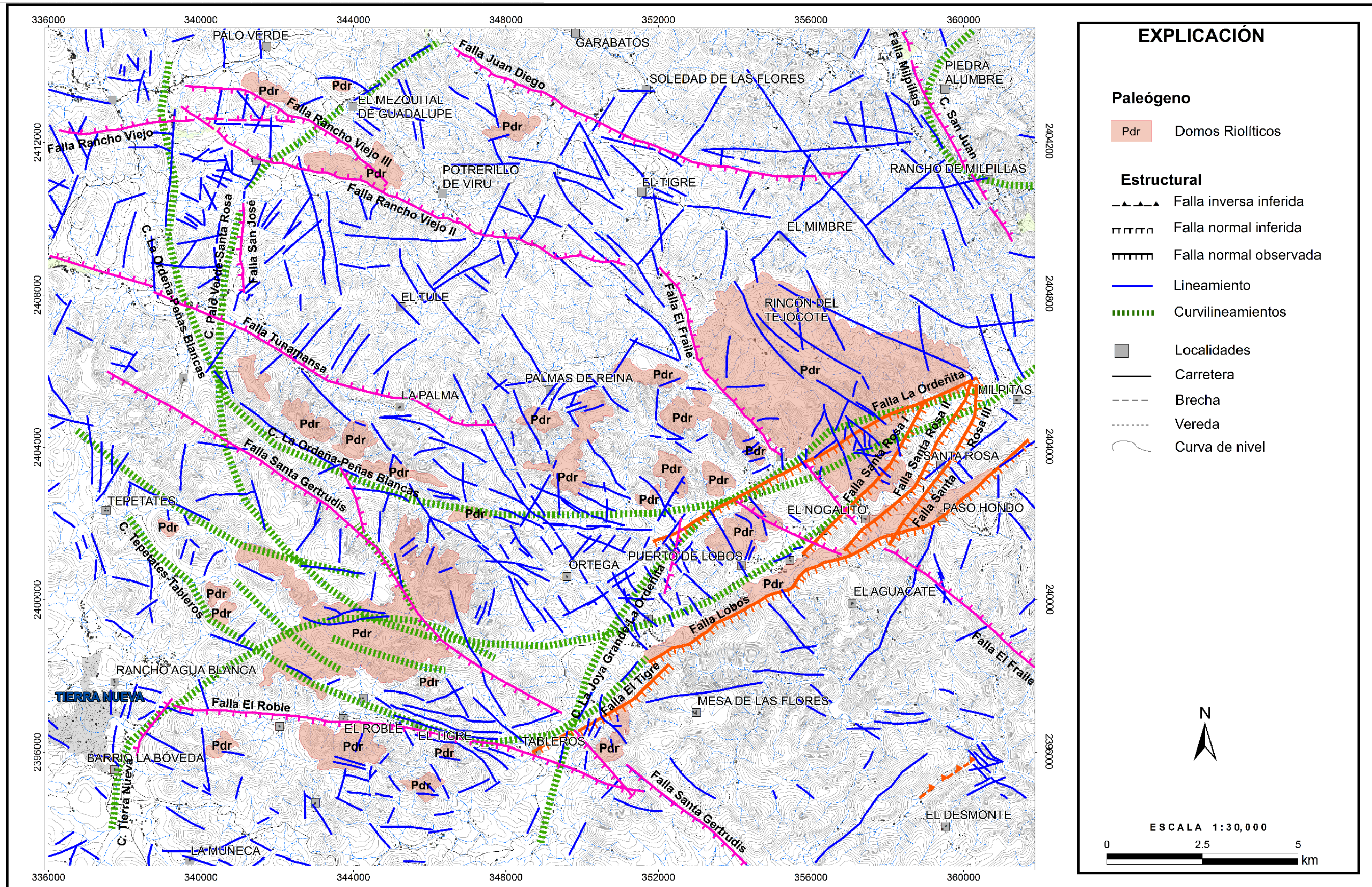


Figura 1.23. Mapa estructural del área de estudio, que está sobrepuesto sobre la litología.

1.4. Estructural

En el área de estudio fueron documentadas estructuras tectónicas que han sido atribuidas a por lo menos tres principales eventos de deformación. Las principales estructuras reconocidas directamente en campo y aquellas que fueron interpretadas con la ayuda de imágenes de satélite y el efecto epipolar, que son determinantes en el marco estructural del área de estudio están mostradas en la Figura 1.23.

El primer evento de deformación corresponde a los efectos de la Orogenia Laramide, sucedida a fines del Cretácico y principios del Paleógeno, ocasionando plegamientos y cabalgaduras con vergencia al nororiental. Mientras, el segundo evento de deformación corresponde a un régimen extensional ocurrido en el Paleógeno, que generó fallamiento de tipo normal, en algunos casos con componente lateral (Figuras 1.24, 25 y 26), conformando una morfología paralela de dirección NW-SE y bloques desiguales, semejantes al arreglo de la provincia “*Basin and Range*”. Finalmente, el tercer evento de deformación corresponde a una serie de eventos ígneos que dieron lugar a la formación de calderas convergentes, conformando estructuras semicirculares.



Figura 1.24. Fotografías mostrando el detalle de la falla Rancho Viejo, con vista al oriente.

En general, durante esta investigación, dos principales sistemas de fallas fueron identificados. El primero de ellos está orientado con un rumbo aproximado

NW 65° SE. Este sistema está representado por las fallas Juan Diego, Rancho Viejo I, Rancho Viejo II, Rancho Viejo III, Tuna Mansa, Santa Gertrudis y El Roble, ubicadas en la porción septentrional, occidental y meridional-centro del área de estudio. Las fallas antes descritas, por sus direcciones de buzamiento, constituyen conjuntos de bloques escalonados, tanto en dirección NE como en dirección SW, formándose así un pilar o *horst* entre las fallas Tuna Mansa y Santa Gertrudis, y un bloque hundido o graben entre las fallas Rancho Viejo II y Juan Diego. Este sistema sirvió como zona de debilidad para el emplazamiento de estructuras dómicas aglutinadas de composición félsica (Figura 1.28). Aunque este primer sistema es el de mayor edad, ocasionalmente corta y desplaza estructuras pertenecientes al sistema más reciente, lo cual puede ser producto de un proceso de reactivación de las fallas más antiguas.



Figura 1.25. Fotografías exhibiendo obras mineras que están labradas sobre la traza de la falla Rancho Viejo II, ubicada en la porción noroeste del área de estudio. A) Mostrando el espejo de falla y B) Otro detalle de la traza de falla.

El segundo sistema principal presenta un rumbo general NE 60° SW y representado por las fallas La Ordeñita, Santa Rosa I, Santa Rosa II, Santa Rosa III Lobos y El Tigre, ubicadas en la porción oriente y centro-meridional del área de estudio (Figura 1.27). El elemento estructural más notable de este sistema es la falla Lobos, con un rumbo aproximado NE 45° SW, ubicada en la porción oriental del área. Esta estructura es una falla de tipo normal que tiene un corrimiento longitudinal de al menos 10 km y pone en contacto tectónico al Intrusivo Palo Verde con

depósitos volcánicos de la Serie Potrerillo. La Falla Lobos sirvió como zona de debilidad para el emplazamiento de un dique y de domos de composición riolítica (Figura 1.23).



Figura 1.26. Fotografías mostrando la falla Santa María, en la porción meridional del área de estudio sobre el Río Santa María. A) Panorámica exhibiendo el desplazamiento de los bloques y B) Acercamiento de la estructura.



Figura 1.27. Fotografías mostrando el detalle de la falla Santa Rosa I, ubicada en la porción suroriental del área de estudio.

Además, algunos curvilineamientos están presente en el área de estudio, llegando incluso a coincidir con estructuras de los sistemas mencionados, como es el caso de la falla Lobos. Éstos han sido denominados: San Juan, Palo Verde-Santa Rosa, La Ordeñita-Peñas Blancas, Tepetates-Tableros, La Joya Grande- La

Ordeñita (considerada como límite noroccidental de la caldera San Antón) y Tierra Nueva, con diámetros de hasta 10 km (Figura 1.23).

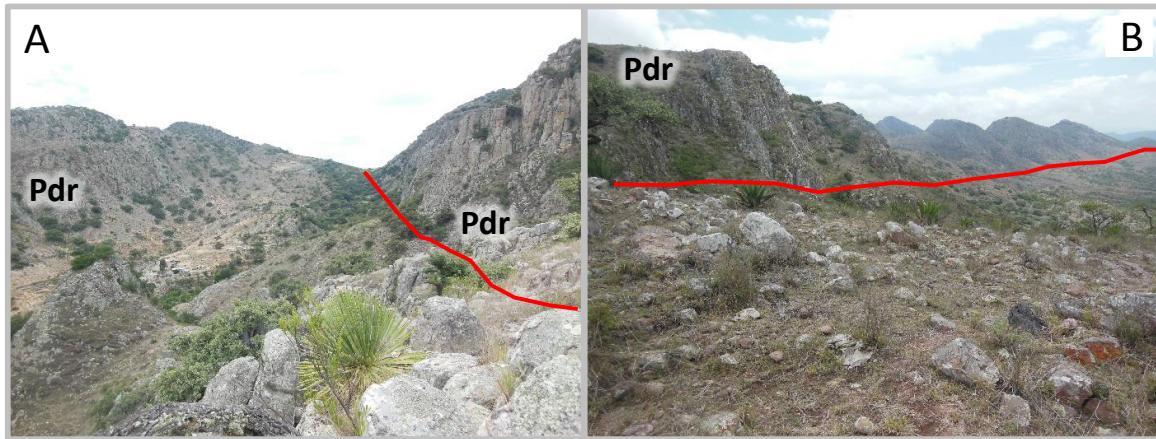


Figura 1.28. Fotografías mostrando la traza de falla y el emplazamiento de los domos riolíticos (Pdr). A) Falla El Fraile, en la localidad La Ordeñita y B) Falla Santa Gertrudis, en la localidad La Cieneguilla.

1.4.1. Análisis estructural

Los datos documentados en campo e imágenes satelitales fueron graficados en el *software Stereonet 9.5* y *FaultKin 7.5*, con la finalidad buscar tendencias representativas y la relación con los domos riolíticos. El resultado representado en un diagrama de roseta permite visualizar las fallas, fracturas y lineamientos predominantes (Figura 1.29). En el área de estudio, dos zonas fueron diferenciadas de manera estratégica considerando límites estructurales, denominadas zona norponiente y suroriente, y las estructuras están marcadas por diferentes colores según el sistema al que pertenecen.

La zona norponiente está caracterizada por la presencia del sistema de fallas NW-SE, principalmente, el cual es de régimen distensivo o extensional. Los diagramas de círculos mayores y polos y de densidad de polos muestran que las fallas de este sistema tienen basculamientos tanto al NE como al SW, predominando ligeramente los buzamientos hacia el SW (Figura 1.29A). Además, el diagrama de campo de esfuerzos sugiere que el vector de mayor compresión σ_1 tiene una dirección 297° e

inclinación de 59° y el vector σ_3 está orientado 032° e inclinación de 03° . El vector σ_2 presenta una dirección 124° , con un basculamiento de 30° (Figura 1.29A). El campo de esfuerzos antes descrito corresponde a un régimen normal, propio del evento distensivo o de relajación posterior a la compresión laramídica. La roseta muestra un vector principal orientado a 296° (Figura 1.29C).

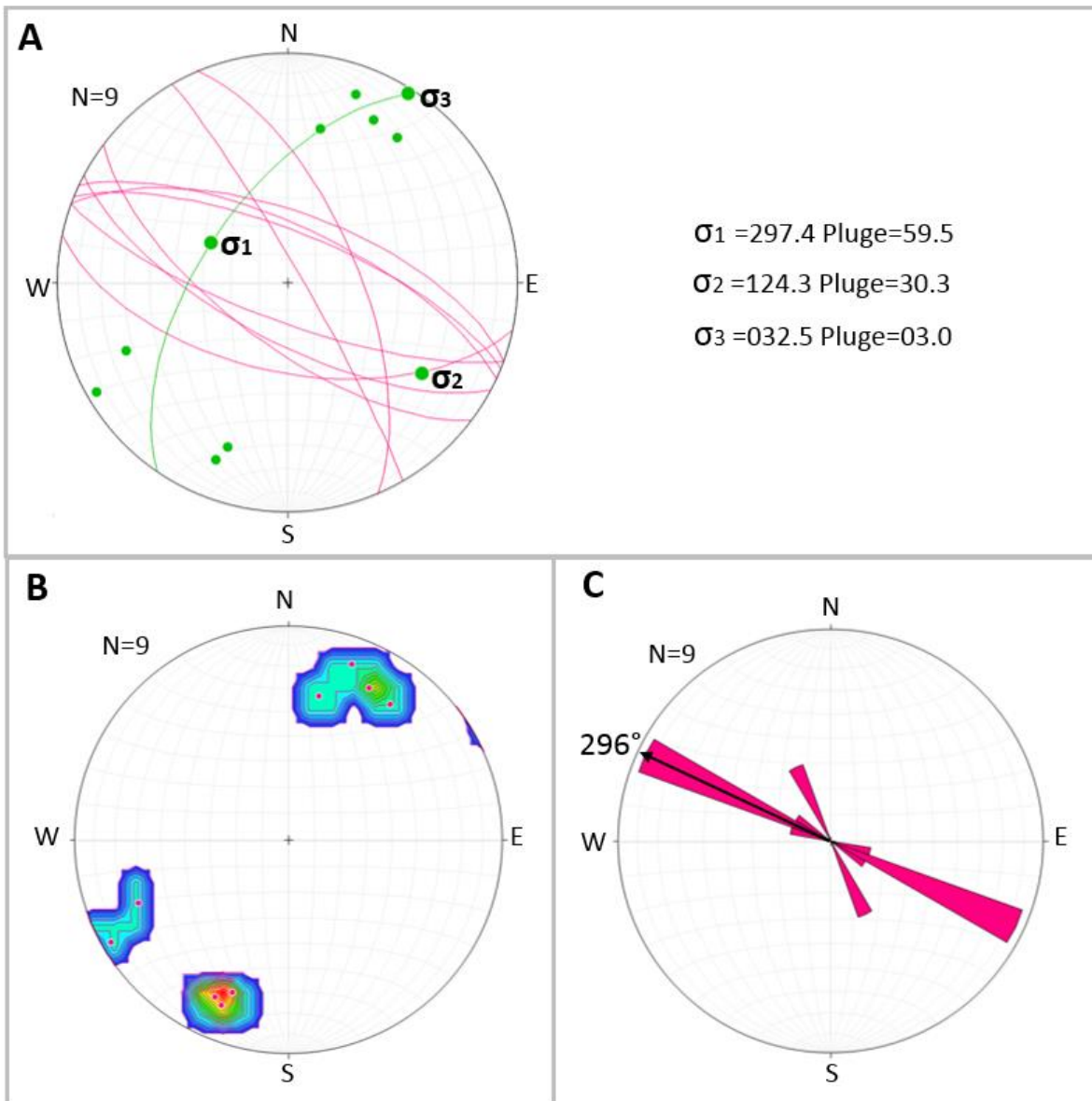


Figura 1.29. Diagramas mostrando la tendencia del patrón de fallas de la Zona Norponiente. A) Círculos mayores, polos de densidades y campo de esfuerzo. B) Densidades de los polos. C) Roseta.

La zona Suroriente presenta principalmente fallas pertenecientes al sistema NE-SW. Los diagramas de círculos mayores y de densidad de polos permiten apreciar que los basculamientos de los planos de falla pertenecientes a dicho sistema se dirigen principalmente hacia el SE.

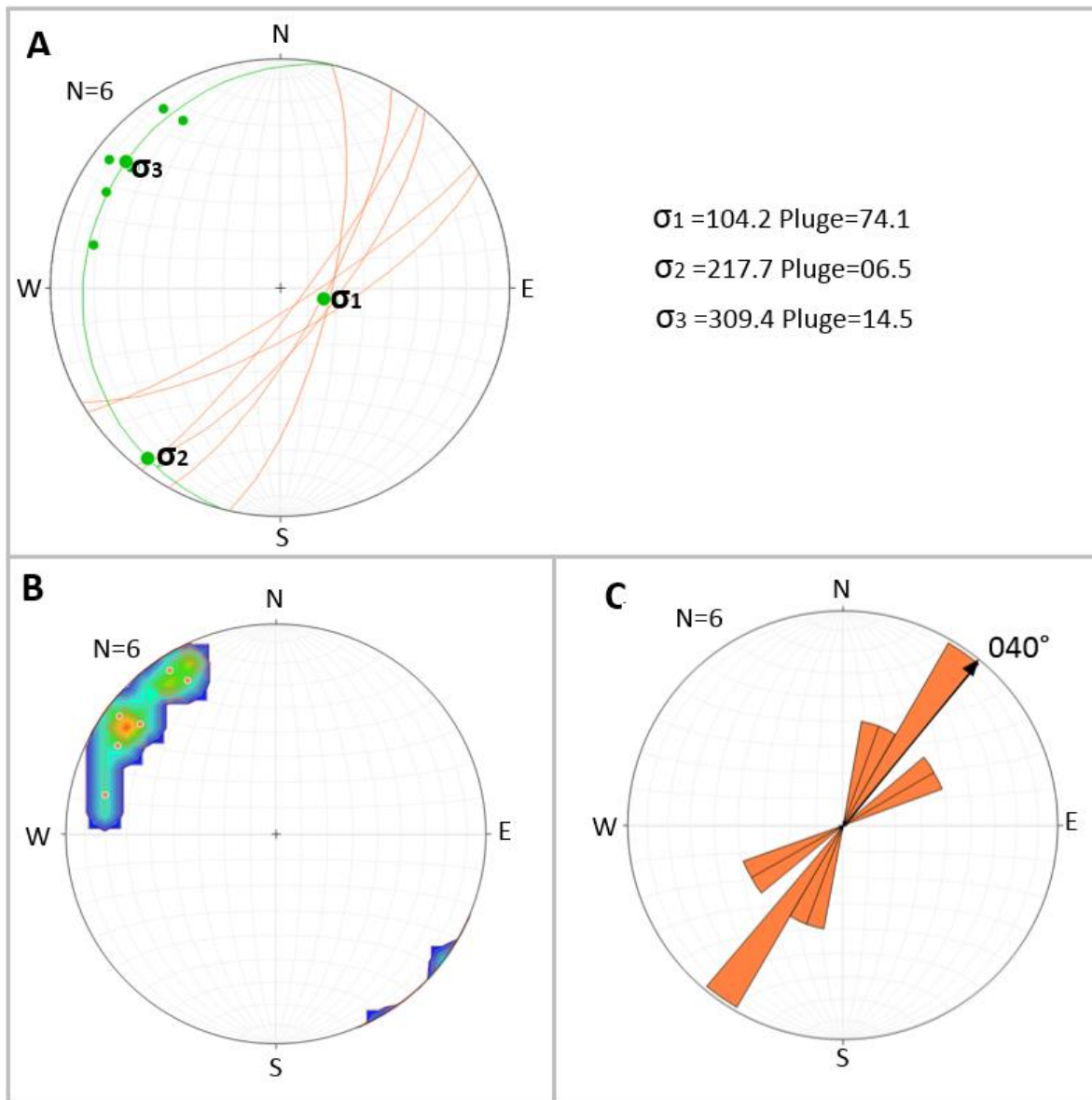


Figura 1.30. Diagramas del sistema de fallas de la Zona Suroriente. A) Círculos mayores, polos de densidades y campo de esfuerzo. B) Densidades de los polos. C) Roseta.

En el diagrama de campo de esfuerzos muestra que el vector σ_1 (máxima compresión) está orientado a 104.2° con inclinación de 74° , y el vector σ_3 con dirección 309° e inclinación de 14° . El vector σ_2 presenta un rumbo de 217° con basculamiento de 06° (Figura 1.30A). El campo de esfuerzos como fue descrito representa un régimen normal (extensional) y corresponde al sistema de fallas que delimitan a los bloques del colapso de la Caldera San Antón (Figura 1.30A, B). La roseta muestra un vector principal orientado 40° (Figura 1.30C).

Finalmente, una roseta de fracturas con la totalidad de 412 lineamientos estructurales dentro del área de estudio fue realizada, abarcando tanto la zona norponiente como la suroriental. La roseta muestra que las estructuras pertenecientes al sistema NW-SE predominan por sobre otros sistemas, con un vector principal orientado 334° (Figura 1.31)

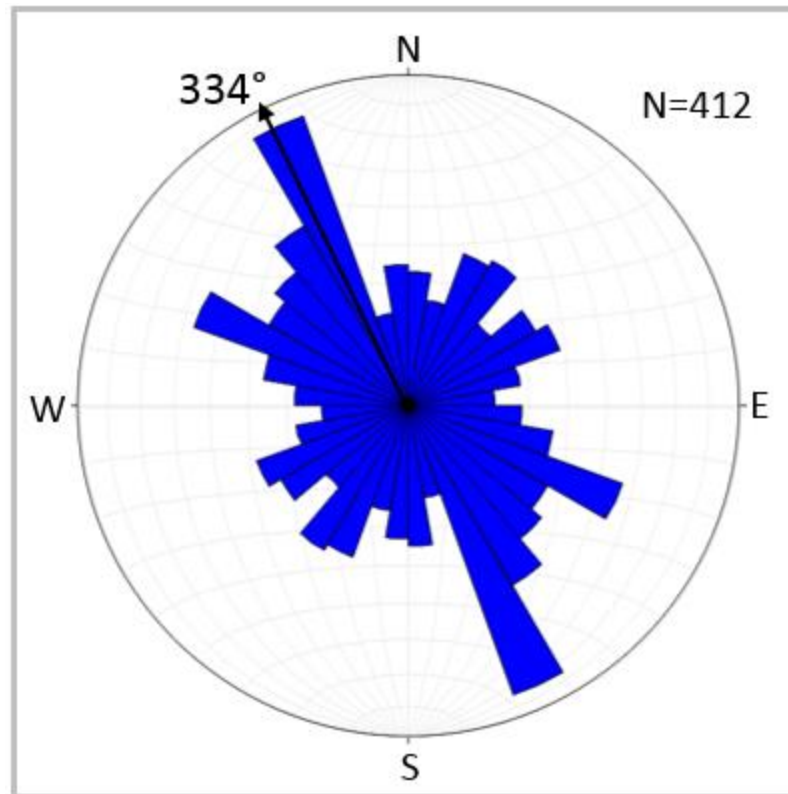


Figura 1.31. Diagrama de roseta, mostrando la tendencia general de lineamientos del área de estudio.

2. PETROGRAFÍA DE LA SECUENCIA ÍGNEA DEL CAMPO VOLCÁNICO DEL RÍO SANTA MARÍA

2.1. Petrografía de Domos Riolíticos (Pdr)

En este trabajo de investigación fueron delimitadas tres zonas (noroccidental, suroccidental y suroriental) con la finalidad de explicar los resultados del estudio petrográfico (Figura 2.1, 2, 3) y los cuales están sintetizados en la Tabla 2.1.

Zona noroccidental

La zona está conformada por domos aislados y aglutinados, situados entre los poblados Palo Verde y Rancho Viejo. Las muestras colectadas para el análisis petrográfico en esta zona fueron PTN-104, PTN-107 y PTN-090 (Figura 2.1).

Megascópicamente, la roca es de color gris claro a violeta en fractura fresca y corresponde a una roca ígnea extrusiva félsica. La roca está formada por fenocristales inequigranulares principalmente de cuarzo anhedral a subhedral de 2 mm a >1 mm, feldespatos alcalinos anhedral a subhedral de 3 mm >1 mm y feldespatos plagioclasa anhedrales de <1 mm, soportados en una matriz microcristalina. Cabe mencionar que las muestras colectadas en el centro de los domos presentan una matriz microcristalina, en contraste con las muestras colectadas hacia los bordes de los domos donde predomina una matriz ligeramente vítrea.

El análisis bajo el microscopio con luz transmitida permite diferenciar una roca ígnea extrusiva leucocrática, con textura microcristalina y vesicular. La roca está compuesta por cuarzo anhedral (8%), feldespatos alcalinos anhedral a subhedral (6%), plagioclasa subhedral (3%) y minerales opacos subhedrales (2%), soportados por matriz microcristalina a criptocristalina (hasta 81%). Además, la roca contiene venas rellenas de sericita que está reemplazando parcialmente algunos feldespatos alcalinos, así como piroxeno y ambos podrían considerarse como mineral secundario (Figura 2.4). La clasificación petrográfica usando el diagrama QPA indica que estas rocas son de composición riolítica (Figura 2.8).

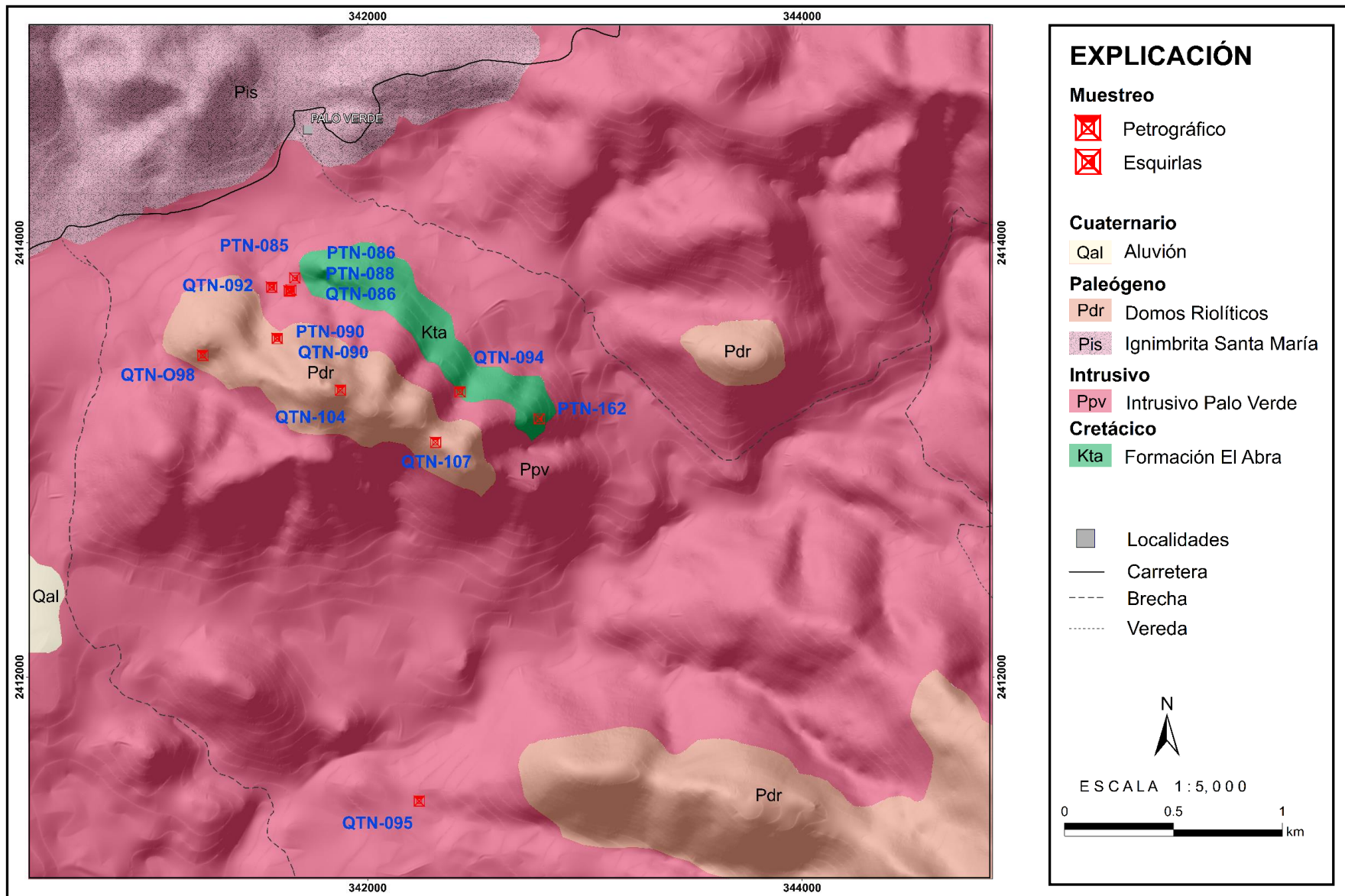


Figura 2.1. Mapa litológico de muestreo correspondiente a la zona noroccidental.

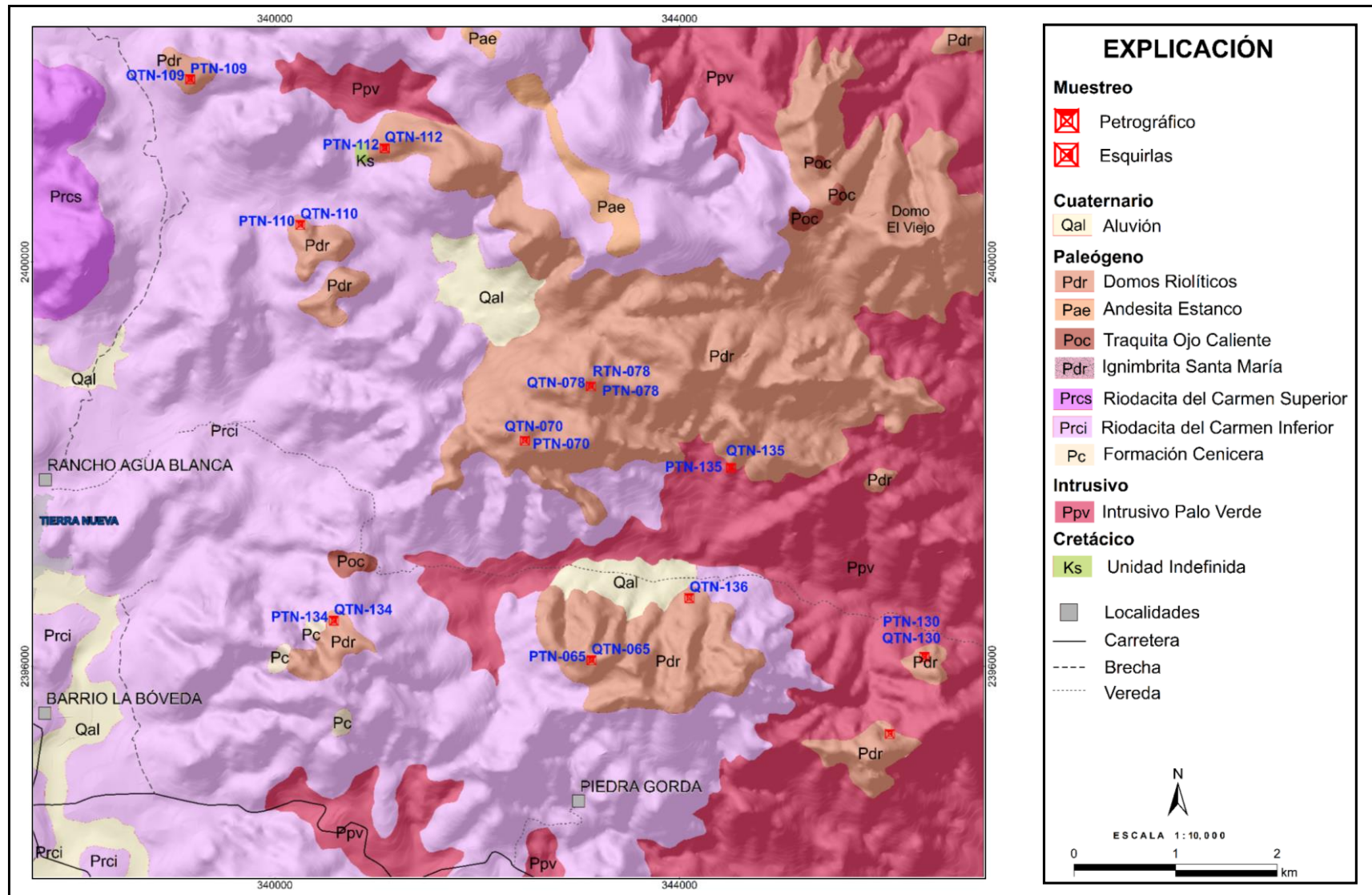


Figura 2.2. Mapa litológico de muestreo correspondiente a la zona suroccidental del área de estudio

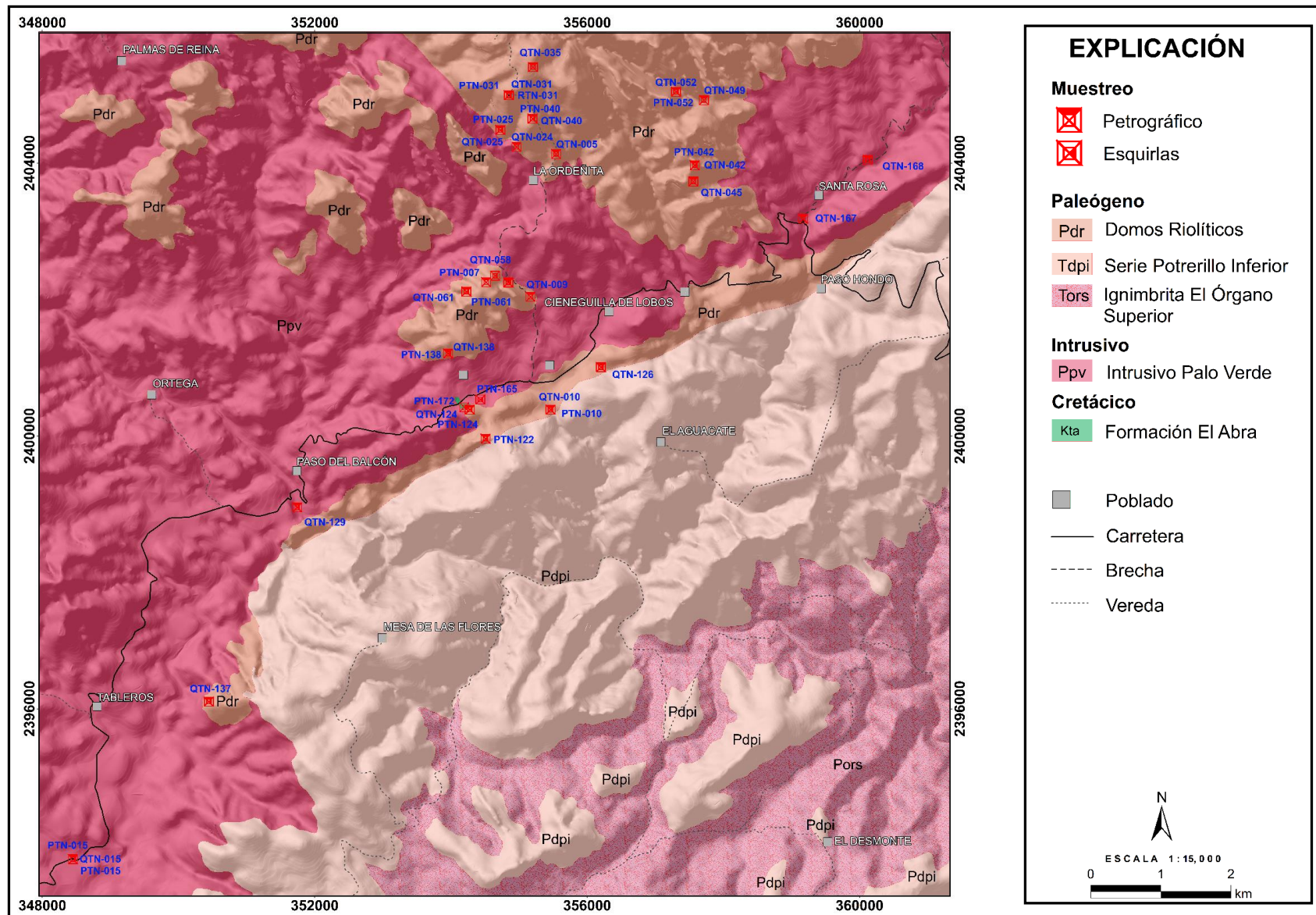


Figura 2.3. Mapa litológico de muestreo correspondiente a la zona suroriental.

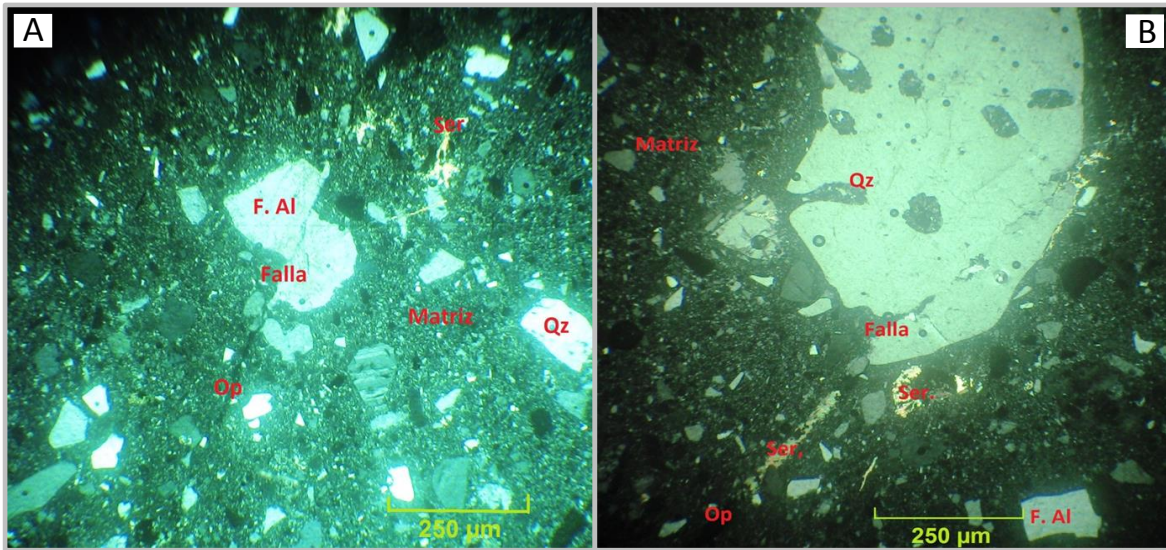


Figura 2.4. Fotomicrografía mostrando la forma de cristales y microfallas, rellenas por sericita. A) Exhibe una matriz microcristalina, además, desplazamiento por microfallas. B) Mostrando la forma de los fenocristales (Qz: cuarzo, Ser: sericita, F. Al: feldespato alcalino), así como microfracturas rellenas de sericita, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada paralela y objetivo de 4X.

Zona suroccidental

La zona abarca los domos situados entre los poblados Tierra Nueva, La Cieneguilla, El Roble, El Tigre, Tuna Mansa y La Palma. Las muestras fueron colectadas sistemáticamente para el estudio petrográfico de los flancos y centro de los domos, identificadas con la clave PTN-065, PTN-070, PTN-078 PTN-109, PTN-110, PTN-112, PTN-130, PTN-133, PTN-134, PTN-135 y PTN-136 (Figura 2.2, 5)

La zona es caracterizada por una serie de domos y restos de sus cuellos. Estos fueron emplazados a lo largo de las fallas El Roble y Santa Gertrudis, así como en los curvilineamientos La Ordeña-Peñas Blancas, Palo Verde-Santa Rosa, y Tepetates-Tableros.

Megascópicamente, las muestras son de color gris claro en fractura fresca y blanquecina en superficie intemperizada. La roca está constituida por fenocristales

de cuarzo anhedral a subhedral de 1 cm a <1 mm, feldespato plagioclasa anhedral >1 mm, feldespato alcalino anhedral a subhedral de 2 mm a < 1 mm, así como local mineral accesorio de color marrón en tamaño de <1 mm; soportados en una matriz microcristalina a vítrea, que corresponde a una roca ígnea extrusiva félsica

Cabe mencionar que el domo denominado “El Viejo” corresponde a la zona suroccidental, fue precedido por una erupción ignimbrítica que se aprecia predominantemente al septentrional y parte del noroccidental. Este consiste de un flujo de cenizas de tono marrón en fractura fresca e intemperizada, con fenocristales euhedrales a subhedrales de sanidino, plagioclasa y cuarzo.

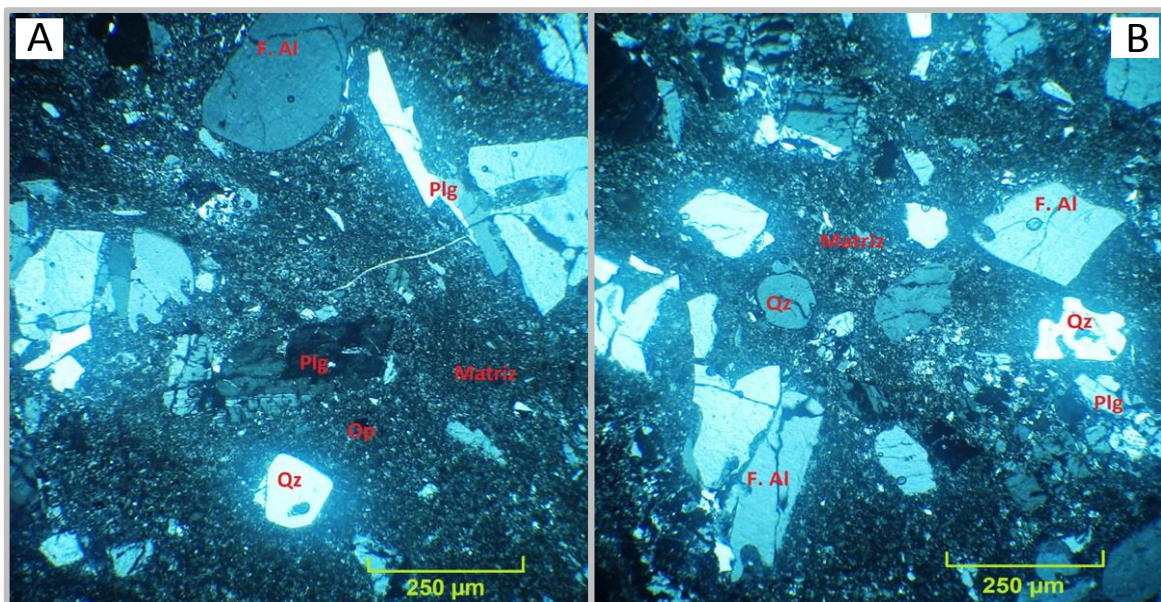


Figura 2.5. Fotomicrografías A y B, mostrando la textura y forma de los cristales fenocristales (Qz: cuarzo, Ser: sericita, F. Al: feldespato alcalino, Plg: plagioclasa), la muestra corresponde al domo Piedras Coloradas, colectada al nororiental del municipio Tierra Nueva, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada paralela y objetivo de 4X.

Petrográficamente, la roca está constituida por cuarzo anhedral a subhedral (13%), feldespato alcalino anhedral a subhedral (7%), plagioclasa subhedral a euhedral (6%) y minerales opacos subhedrales (2%), que están soportados en una

matriz microcristalina (72%). Además, la roca contiene minerales secundarios como piroxeno, así como minerales de alteración hidrotermal en microfracturas rellenas de sericita (Figura 2.5). La clasificación petrográfica usando el diagrama QPA sugiere que estas rocas son riolitas (Figura 2.8).

Zona suroriental

Esta zona es representada por los domos ubicados entre los poblados Lobos, Ordeñita, Peñas Blancas, El Divisadero y Santa Rosa (Figura 2.3). Durante el trabajo de campo fueron colectadas muestras para la caracterización petrográfica (*i.e.* PTN-005, PTN-007, PTN-009, PTN-010, PTN-025, PTN-031, PTN-035, PTN-040, PTN-042, PTN-045, PTN-052, PTN-061, PTN-122, PTN-124, PTN-126, PTN-137 y PTN-138).

La porción suroriental está representada por domos tanto poligenéticos como aglutinados, cuyos cuellos y remanentes de ignimbrita fueron originados por eventos explosivos, caracterizados por estructura columnar debido al desarrollo del diaclasamiento. La zona también es conocida por el estaño que concentrado en fracturas, principalmente en los domos El Divisadero y Lobos, las cuales son evidenciadas por obras mineras.

Esta roca presenta textura microcristalina, constituida por fenocristales de cuarzo anhedral a subhedral de 2 a <1 mm, feldespato alcalino anhedral a subhedral de 2 a <1 mm), feldespato plagioclasa euhedral a subhedral de 2 a <1 mm, local epidota como mineral accesorio <1mm; soportados en una matriz microcristalina. La roca corresponde a una roca ígnea extrusiva leucocrática (Figura 2.6).

Petrográficamente, la muestra presenta textura holocristalina. La constitución de la roca consiste de cuarzo anhedral a subhedral (54%), de feldespato alcalino anhedral a subhedral (22%), plagioclasa anhedral a subhedral (19%) y minerales opacos subhedrales (2%), que están soportados en un 3% de matriz microcristalina a criptocristalina. Las rocas contienen venas con relleno de sericita y piroxeno secundario (*i.e.* epidota y clinozoisita). Esta roca es clasificada como una roca ígnea extrusiva leucocrática (Figura 2.7).

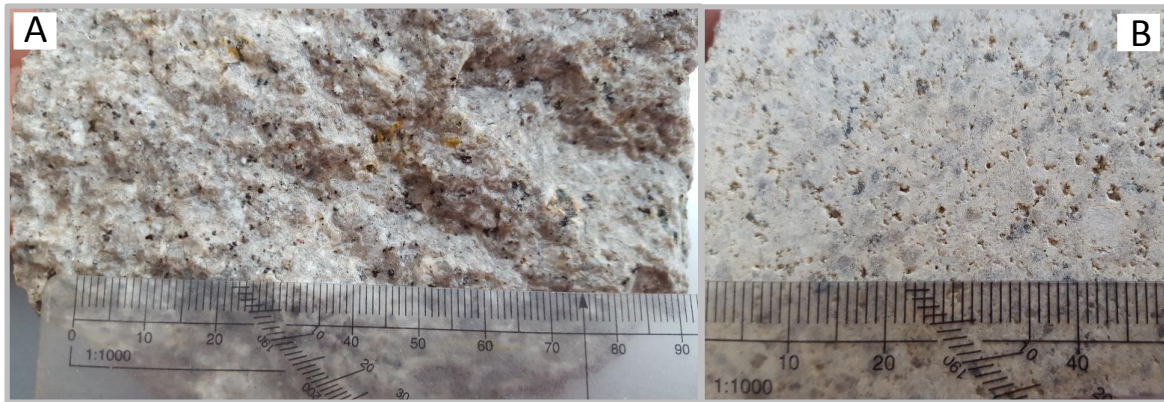


Figura 2.6. Fotografías mostrando detalle de la muestra megascópica del domo Lobos. A) Mostrando detalle textural a nivel megascópico. B) Detalle de muestra pulida, ambas corresponden a la muestra PTN-009, colectada en la porción suroriental en el domo Lobos.

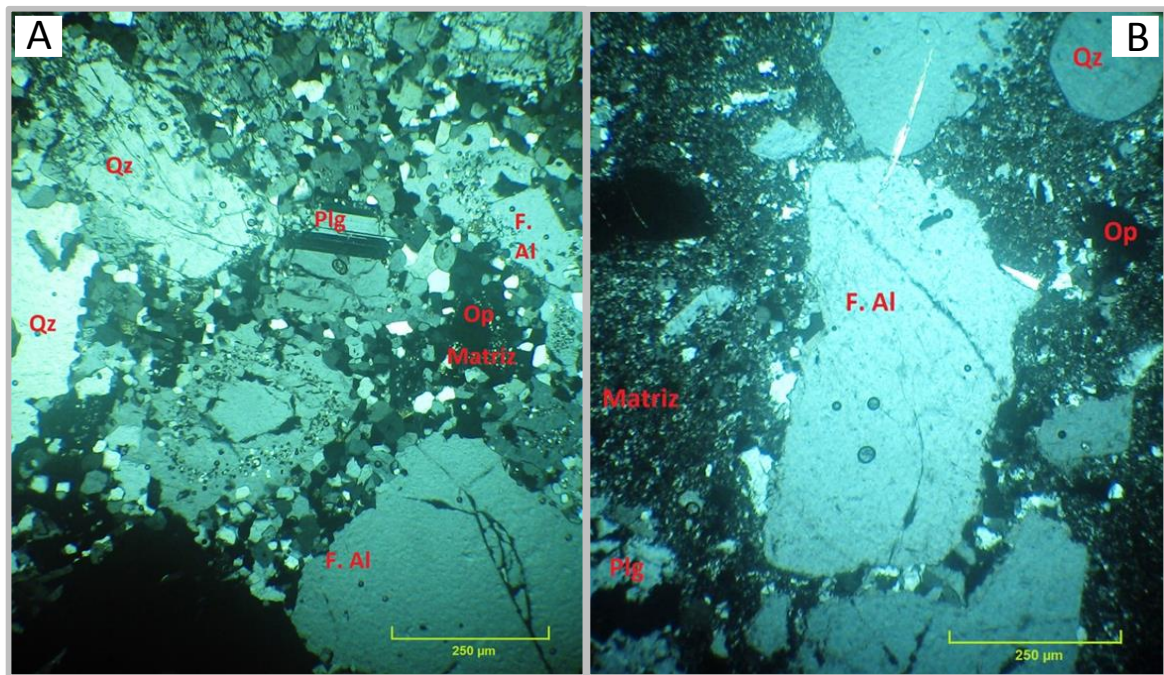


Figura 2.7. Fotomicrografía mostrando las características mineralógicas. A) Mostrando las características mineralógicas (Qz: cuarzo, F. Al: feldespato alcalino, Plg: plagioclase) de la muestras PTN-052, localidad Santa Rosa. B) Corresponde a la muestra PTN-010, localidad Lobos, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada paralela y objetivo de 4X.

Petrográficamente y de acuerdo a la clasificación del diagrama QAP propuesto por la comisión de Streckeisen (1976), estos domos son de composición riolítica con tendencia a dacita. En general, las rocas de la porción suroriental son más ricas en cuarzo en comparación de las rocas de la zona suroccidental (Figura 2.8).

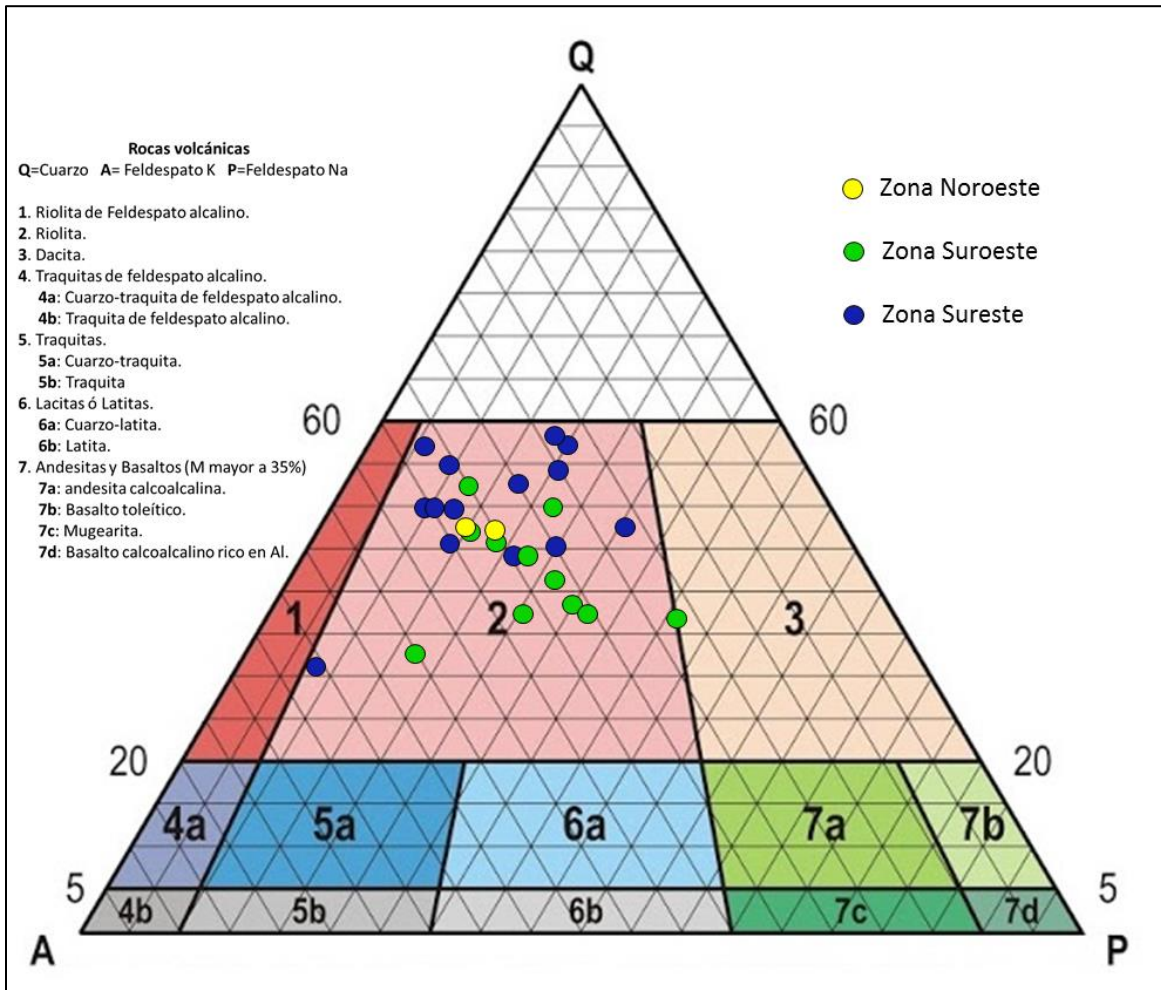


Figura 2.8. Diagrama QAP de clasificación modal de rocas volcánicas (basado en Streckeisen, 1976). Las muestras están diferenciadas por zonas.

2.2. Petrografía del Intrusivo Palo Verde (Ppv)

El plutón aflora en la porción central, cubre gran parte del área de estudio. La mayoría de los afloramientos están alterados supergénicamente. En esta investigación fue realizado estudio petrográfico de dos muestras PTN-015 y PTN-129, que fueron colectadas al meridional del área de estudio. La primera

corresponde al afloramiento ubicado entre las comunidades Los Mezquites y La Joya Grande sobre el camino de terracería que conduce a la comunidad de Tableros, y la segunda muestra fue colectada entre las poblaciones Paso del Balcón y Puerto de Lobos sobre el Rio Santa María (Figura 2.9 y Tabla 2.1).

Megascópicamente, la roca consiste de una roca plutónica de tono gris verdoso en fractura intemperizada y color verde olivo en fractura fresca, con textura porfídica. La roca está constituida por fenocristales de feldespato alcalino (ortoclasa), ojos de cuarzo, minerales oscuros de forma acicular, xenolitos localizados de color gris oscuro (mesocrático y texturalmente es afanítico equigranular).



Figura 2.9. Fotografías mostrando afloramientos del Intrusivo Palo Verde. A) Exhibe el afloramiento donde fue colectada la muestra PTN-015. B) Mostrando la localidad donde fue colectada la muestra PTN-129.

El análisis petrográfico permite decir que el plutón tiene textura porfirítica. Éste conformado por fenocristales de feldespato alcalino anhedral a subhedral de hasta 5 mm (45%), plagioclasas de macla polisintética simple, subhedral de 5 mm (27%), y cuarzo anhedral de 5 mm con textura de reabsorción (15%), biotita primaria anhedral y alterada localmente a clorita (1%), apatito (0.5%) magnetita subhedral e ilmenita acicular (2%), soportados en una masa basal afanítica (Figura 2.10).

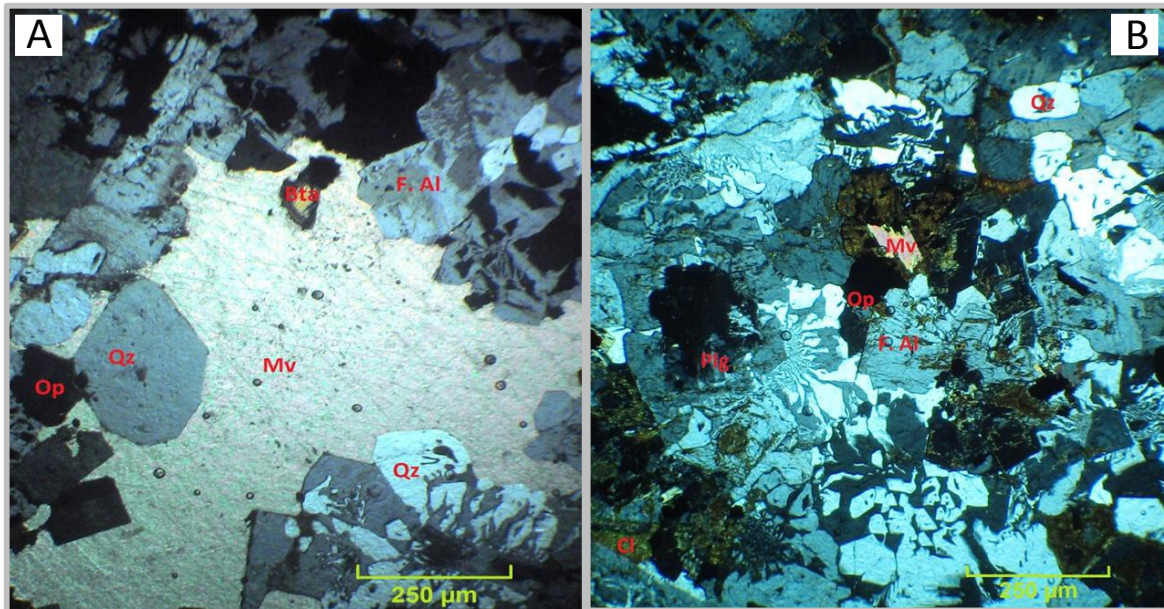


Figura 2.10. Fotomicrografías mostrando la forma de los cristales. A) Mostrando la forma de los fenocristales (Qz: cuarzo, Ser: sericita, F. Al: feldespato alcalino, Plg: plagioclasa. Mv: moscovita). B) Mostrando la forma de los fenocristales y texturas presentes, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada paralela y objetivo de 4X.

De acuerdo a la clasificación del diagrama QAP propuesto por la comisión de Streckeisen (1976), este plutón presenta diferenciación magmática. Las muestras analizadas fueron ploteadas, resultando dos campos distintos es decir sienita-granito (PTN-129) y cuarzo-monzonita (PTN-015) (Figura 2.11).

La clorita está entre los espacios de los cristales, reemplazando a biotita magmática. La sericita está relleno de venas y reemplazando parcialmente algunos cristales de plagioclasa. La calcita secundaria bien cristalizada está localmente reemplazando a fenocristales de plagioclasa, indicando hidrotermalismo post-magmático.

Los resultados petrográficos permiten también identificar ciertas texturas e interpretar procesos hidrotermales. A continuación, están descritas las texturas presentes en la muestra PTN-015 y la interpretación está basada en López y Bellos (2006).

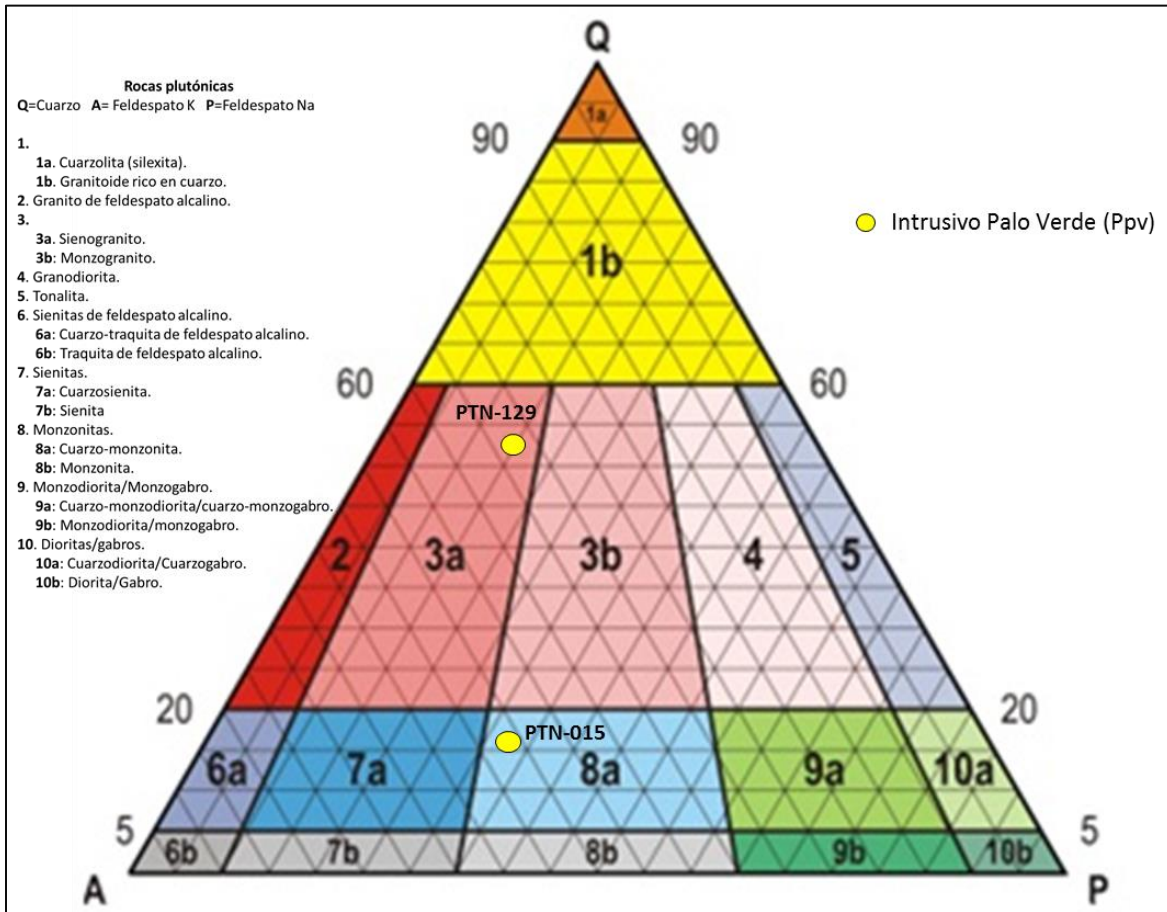


Figura 2.11. Diagrama QAP de clasificación modal de rocas plutónicas (basado en Streckeisen, 1976). Las muestras PTN-015 y PTN-129 están diferenciadas representadas con círculos amarillos, ambas correspondientes al Intrusivo Palo Verde (Ppv).

a) Textura mirmequítica desarrollada en el feldespato potásico de forma vermicular o gusanada, evidenciando interacción de fluidos ricos en Ca y Na (Figura 2.12).

b) Textura pertítica de reemplazamiento desarrollada en feldespato alcalino de grano medio formando “cordones” finos y/o “parches” asociado a la alteración post-magmática (Figura 2.13).

c) Albitización representada en feldespatos alcalinos como “llamas” y/o “manchas” producida probablemente por alteración hidrotermal y la existencia de inclusiones fluidas que afectan el mineral original o bien por alteración química debido a fluidos ricos en Na.

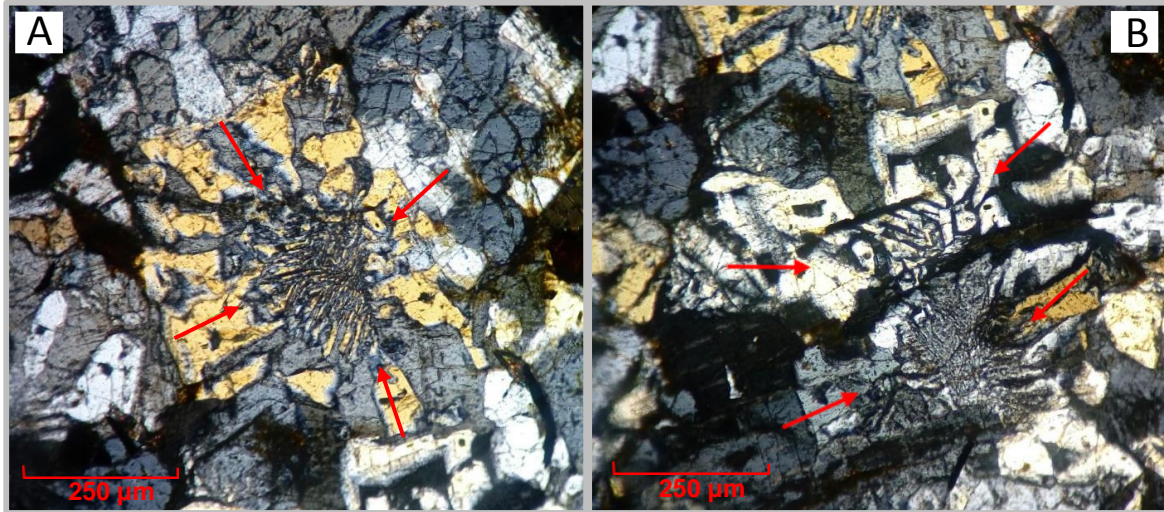


Figura 2.12. Fotomicrografías mostrando las texturas mirmekítica y gráfica.

A) Mostrando la textura mirmekítica. B) Mostrando las texturas gráfica y mirmekítica, tomadas con microscopio óptico de polarización de luz reflejada paralela y objetivo de 4X.

d) Textura gráfica de forma esquelética en los cristales de feldespato alcalino, indicando que el sistema fue sobresaturado en SiO_2 y enriquecido en H_2O , originando sobre-enfriamiento de los fenocristales.

e) Textura simplectítica desarrollada como un acople irregular de cuarzo en la biotita, causada por fluidos ricos en agua entre el contacto de los granos, evidenciando evento de metamorfismo tardío. La roca se clasifica como una cuarzomonzonita. Esto permite inferir que el plutón presenta cristalización simultánea, así como efectos posteriores de hidrotermalismo y metamorfismo posterior a la cristalización.

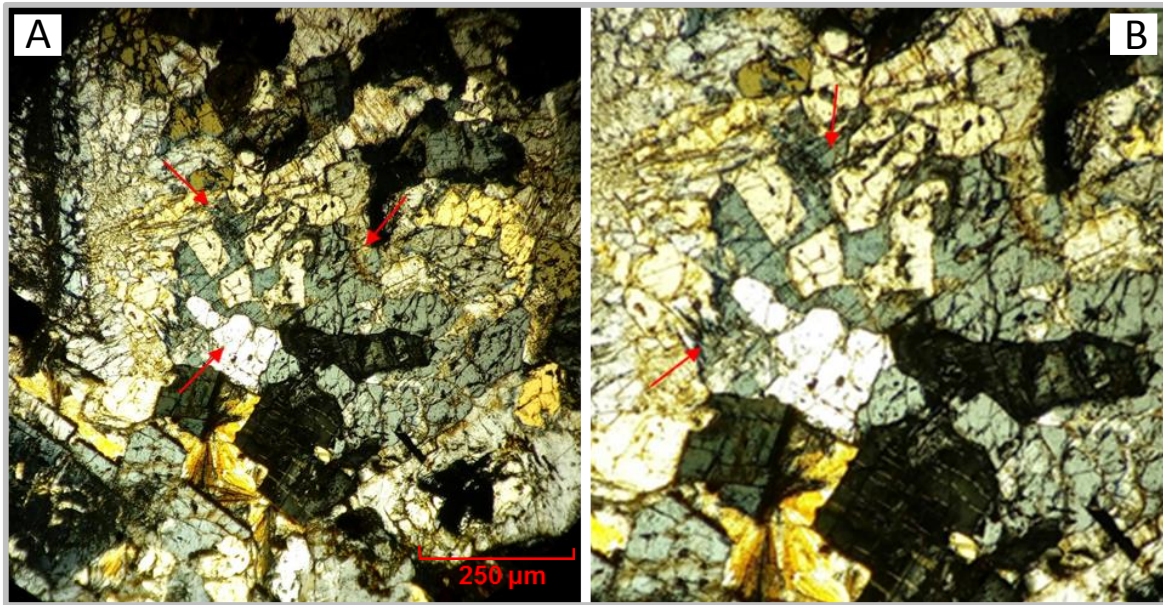


Figura 2.13. Fotomicrografías mostrando la textura perítita. A) Es visible la textura perítita de reemplazamiento o también conocida como albitización. B) Acercamiento de A, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada paralela y objetivo de 4X.

Tabla 2.1. Resumen de características petrográficas de las muestras correspondientes a Domos Riolíticas e Intrusivo Palo Verde.

Muestra	Unidad	Localidad	Zona	Porcentaje de minerales									XL Tamaño	XL Forma	Observaciones
				Qtz	F. Alcalino	Plg	Matriz	Opacos	Ms	Bt	Px	Zrn			
TN-007	Pdr	Lobos	SE	54	22	19	3	2	-	-	-	-	De grueso a fino	Anhedral a subhedral	Qz: redondeados y fracturados. F.Alcalino: Con extinción de enrejado (microclina). La matriz es de microcristalina a criptocristalina.
TN-010	Pdr	Lobos	SE	12	9	3	75	1	-	-	-	-	De grueso a fino	Anhedral a subhedral	La Plg está maclada.
TN-015	Ppv	La Joya Grande	SW	33	39	14	-	-	7	6	-	-	De medio a fino	Anhedral a subhedral	F. Alcalino están fracturados y deformados (Ortoclasa). Ms: Con forma laminar rómbica. Bt: Alterándose a clorita.
TN-025	Pdr	La Ordeñita	SE	15	12	7	65	1	-	-	-	-	De medio a fino	Anhedral a subhedral	Opacos, posible es turmalina. El tipo de matriz es de microcristalina.
TN-031	Pdr	La Ordeñita	SE	15	8	5	70	1	-	-	-	-	De medio a fino	Anhedral a subhedral	El tipo de matriz es de microcristalina a criptocristalina.
TN-040	Pdr	La Ordeñita	SE	9	6	5	77	2	-	-	-	-	De medio a fino	Anhedral a subhedral	El tipo de matriz es de microcristalina.
TN-042	Pdr	Santa Rosa	SE	41	19	26	12	3	-	-	-	-	De medio a fino	Subhedral	El tipo de matriz es de microcristalina a vítrea.
TN-052	Pdr	Santa Rosa	SE	45	19	14	-	1	-	1	-	-	De grueso a fino	Anhedral a subhedral	Muestra muy alterada
TN-060	Pdr	Lobos	SE	17	14	-	18	2	-	-	1	-	De grueso a fino	Anhedral a subhedral	La matriz es de vítrea a microcristalina. Piroxenos en algunas zonas acompañados de apatito.

TN-061	Pdr	Lobos	SE	20	11	3	65	1	-	-	-	-	De medio a fino	Anhedral a Subhedral	La matriz es de microcristalina a vítrea.
TN-062	Pdr	Lobos	SE	5	37	5	15	3	-	-	-	-	Medio	Anhedral a subhedral	El tipo de matriz es de microcristalina a criptocristalina.
TN-065	Pdr	Piedras Coloradas	SW	13	7	10	5	-	-	1	-	-	De medio a fino	Anhedral a subhedral	La biotita es magmática e hidrotermal, la primera es mayor tamaño. El tipo de matriz es criptocristalina.
TN-070	Pdr	El Pulque	SW	11	9	6	72	2	-	-	-	-	De medio a fino	Subhedral a euhedral	El tipo de matriz es de microcristalina.
TN-078	Pdr	El Pulque	SW	13	10	4	75	1	-	-	-	-	Medio	Subhedral	El tipo de matriz es criptocristalina a vítreo.
TN-085	Pdr	Palo Verde	NW	10	5	7	68	2	-	-	-	-	De grueso a medio	Subhedral	La matriz es de microcristalina a criptocristalina a vítrea.
TN-086	Pdr	Palo Verde	NW	13	7	7	77	1	-	-	-	-	De medio a fino	Subhedral	La matriz es microcristalina .
TN-088	Pdr	Palo Verde	NW	9	7	6	72	2	-	-	-	-	De grueso a medio	Subhedral	La matriz es de microcristalina a criptocristalina.
TN-090	Pdr	Palo Verde	NW	8	6	3	80	1	-	-	-	-	Fino	Subhedral	La matriz es de microcristalina a criptocristalina.
TN-109	Pdr	Cerro Las Cuatas	SW	9	6	3	81	2	-	-	-	-	De grueso a medio	Anhedral a subhedral	La matriz es de microcristalina a criptocristalina.
TN-110	Pdr	Cerro Las Cuatas	SW	11	8	2	82	1	-	-	-	-	De grueso a medio	Anhedral a subhedral	La matriz es de microcristalina a criptocristalina a vítrea.
TN-112	Pdr	Cerro Las Cuatas	SW	10	10	9	70	2	-	-	-	-	De grueso a medio	Subhedral	La matriz es de criptocristalina a vítrea.
TN-122	Pdp	Lobos	SE	3	1	7	72	1	-	-	-	-	Medio	Anhedral a subhedral	La matriz es vítrea.

TN-124	Pdr	Lobos	SE	15	8	7	88	1	-	-	-	-	De grueso a fino	Anhedral a subhedral	La matriz es vítrea.
TN-126	Pdr	Lobos	SE	6	4	5	70	1	-	-	-	-	Medio	Subhedral	El tipo de matriz es de microcristalina a criptocristalina.
TN-129	Ppv	Rio Santa María	SE	17	11	1	88	1	-	-	-	-	De medio a fino	Anhedral	El tipo de matriz es vítrea.
TN-130	Pdr	El Tigre	SW	8	12	5	65	1	-	-	-	1	De medio a fino	Anhedral a subhedral	La matriz es de criptocristalina a vítrea.
TN-133	Pdr	El Tigre	SW	8	5	4	75	1	-	-	-	-	De grueso a medio	Subhedral	La matriz es de microcristalina a vítrea.
TN-134	Pdr	Cerro La Silva	SW	13	10	9	77	1	-	-	-	-	Medio	Subhedral	El tipo de matriz es vítrea.
TN-135	Pdr	La Cieneguilla	SW	8	6	5	70	1	-	-	-	1	De grueso a medio	Anhedral a Subhedral	La matriz es de microcristalina a criptocristalina a vítrea.
TN-136	Pdr	La Cieneguilla	SW	7	6	5	80	1	-	-	-	-	De medio a fno	Subhedral	El tipo de matriz es criptocristalina.
TN-137	Pdr	Tableros	SW	4	8	6	80	1	-	-	-	-	De medio a fino	Anhedral a Subhedral	La matriz es criptocristalina a vítrea. Del F. alcalino exhibe fracturas y reemplazadas por serecita.
TN-138	Pdr	Lobos	SE	9	5	1	86	1	-	-	-	1	Medio	Anhedral	La matriz es vítrea. Del F. alcalino exhibe fracturas y reemplazadas por serecita.

3. ANÁLISIS GEOQUÍMICO DE LOS DOMOS RIOLÍTICOS- INTRUSIVO PALO VERDE

El presente análisis es con el propósito de caracterizar, clasificar y entender la evolución magmática de las unidades “Riolita San Miguelito ó Domos Riolíticos (Pdr), así como una roca intrusiva nombrada como Intrusivo Palo Verde (Ppv)”, que conlleve al entendimiento de la patrogénesis de este magmatismo y plutonismo del Oligoceno se emplazó como *stock*, *sills* y domos. Como ha sido referido, estas rocas corresponden al Complejo Volcánico Santa María. Durante el presente estudio fueron colectadas 33 muestras de rocas volcánicas y plutónicas para el análisis de química analítica. Los resultados fueron analizados, graficados e interpretados usando el *software* ioGAS-64, con la finalidad de mostrar gráficos simplificados que expliquen el comportamiento químico de las rocas analizadas.

Los elementos analizados incluyeron óxidos mayores, elementos traza y tierras raras. El análisis químico de elementos mayores fue realizado en el Centro Experimental Chihuahua del Servicio Geológico Mexicano y los resultados están exhibidos en las tablas 3.1a, b y c. El análisis de los elementos traza y tierras raras fueron analizados en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (LGIG), usando la misma fracción de muestra pulverizada en el análisis anteriormente mencionado y los resultados están expuestos en las tablas 3.2a, b, c. Los análisis químicos referidos fueron determinados utilizando un espectrómetro de masas de plasma inducido acoplado (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, o *ICP-MS* por sus siglas en inglés). El método completo de digestión y medición para la obtención de elementos traza y tierras raras es descrito por Almaguer-Rodríguez (2010).

Durante el análisis de los resultados y con la finalidad de entender el comportamiento de las rocas analizadas, estas fueron divididas en cinco grupos que representan zonas con características singulares.

- 1) El grupo 1 es representado por la figura de un círculo de color rosa, que corresponde al conjunto de domos de la porción norponiente del área de estudio.
- 2) El grupo 2 es representado por el círculo de color verde, indicando los domos ubicados en la zona suroccidental.
- 3) El grupo 3 es representado por el círculo de color azul, correspondiente a la zona suroriental.
- 4) El grupo 4 es representado por un cuadrado de color rojo y corresponde a muestras del Intrusivo Palo Verde.
- 5) El grupo 5 es representado por un rombo de color rojo, correspondiente a una muestra de la unidad conocida como Serie Potrerillo.

3.1. Diagramas de variación tipo Harker

Los diagramas Harker (1909), también conocidos como diagramas de variación, fueron utilizados para mostrar las diferencias químicas y las tendencias en la composición de elementos mayores y/o trazas con relación al contenido de SiO_2 , para cada unidad o grupo geológico del área de estudio.

En general, los cinco grupos muestran variaciones químicas. El grupo 1 está caracterizado por mayor contenido en SiO_2 y un bajo contenido en TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO y P_2O_5 , considerándose el fraccionamiento de minerales como rutilo, magnetita, piroxenos, plagioclasa cálcica y apatito. Las muestras del grupo 2 tienen un contenido de SiO_2 de intermedio a alto, y tendencia lineal descendente con respecto TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO y P_2O_5 , sugiriendo una mayor cristalización fraccionada en los minerales que se mencionan con anterioridad.

El grupo 3 es representado por una variación lineal ascendente en K_2O , indicando un mayor contenido en feldespato, y una variación lineal descendente en TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O y P_2O_5 , sugiriendo una disminución en el fraccionamiento de minerales como rutilo, magnetita, piroxenos, plagioclasa y

apatito, que puede ser interpretada como una posible diferenciación magmática (*i.e.* mayor diferenciación, desaparecen minerales máficos principalmente) (Figura 3.1).

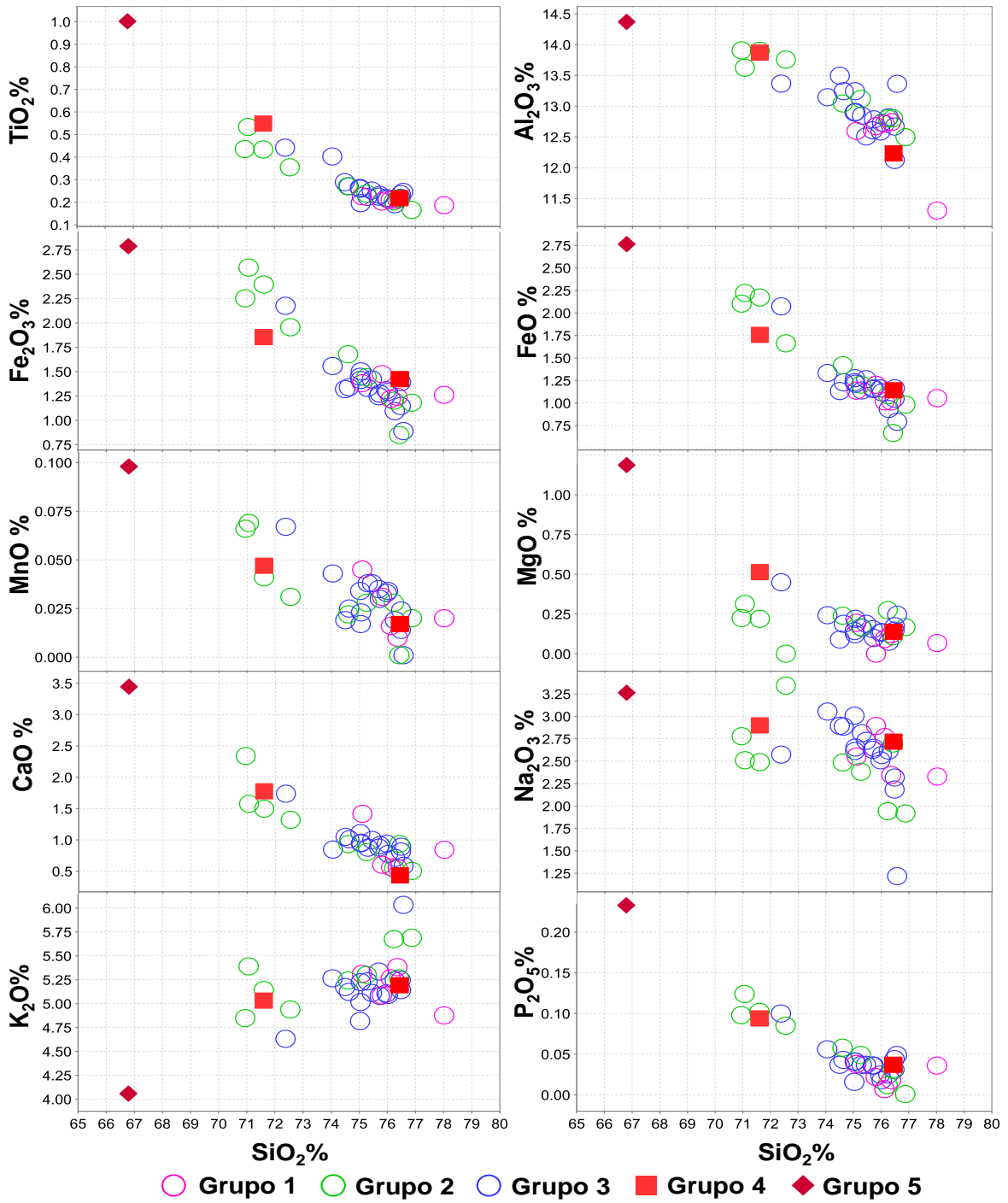


Figura 3.1. Diagrama tipo Harker de elementos mayores, correspondientes al área de estudio.

Tabla 3.1a. Elementos mayores de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES

Muestra	QTN-007	QTN-009	QTN-010	QTN-015	QTN-024	QTN-025	QTN-031	QTN-035	QTN-040	QTN-042	QTN-045	QTN-049
TR	R	R	R	Qmz	R	R	R	R	R	R	R	R
UI	Pdr	Pdr	Pdr	Ppv	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr
Elementos mayores												
SiO ₂	68.98	70.31	71.428	66.825	71.621	72.596	70.826	72.627	71.154	68.805	72.426	70.298
TiO ₂	0.205	0.216	0.206	0.512	0.213	0.204	0.245	0.182	0.276	0.25	0.255	0.383
Al ₂ O ₃	11.491	11.871	11.834	12.945	12.22	12.157	12.499	12.21	12.889	12.209	12.451	12.48
Fe ₂ O ₃	2.308	2.383	2.16	3.554	2.473	2.421	2.674	2.031	2.464	2.496	2.719	2.885
MnO	0.032	0.028	0.013	0.044	0.036	0.033	0.016	0.018	0.018	0.023	0.033	0.041
MgO	0.141	0.093	0.136	0.48	0.156	0.131	0.116	0.072	0.086	0.174	0.138	0.231
CaO	0.8	0.851	0.761	1.658	0.833	0.742	0.892	0.679	1.002	0.932	1.071	0.803
Na ₂ O	2.394	2.46	2.04	2.707	2.675	2.453	2.467	2.493	2.765	2.661	2.904	2.899
K ₂ O	4.863	4.717	4.901	4.696	4.978	4.862	4.735	4.994	4.942	4.723	4.651	4.998
P ₂ O ₅	0.033	0.033	0.029	0.088	0.035	0.017	0.039	0.024	0.035	0.04	0.015	0.053
LOI	0.87	0.85	1.86	2.12	0.9	0.84	1.32	0.76	0.87	0.72	0.41	1.21
Total	92.117	93.812	95.368	95.629	96.14	96.456	95.829	96.09	96.501	93.033	97.073	96.281
Minerales normativos												
<i>qz</i>	37.624	38.516	41.524	30.772	36.579	39.456	38.195	39.154	35.33	35.574	36.233	33.859
<i>or</i>	31.534	30.027	31.008	29.737	30.925	30.086	29.648	30.99	30.576	30.275	28.472	31.114
<i>ab</i>	22.229	22.423	18.48	24.539	23.794	21.738	22.119	22.153	24.496	24.42	25.453	25.842
<i>an</i>	4.121	4.314	3.841	8.197	4.104	3.737	4.42	3.374	4.962	4.735	5.397	3.831
<i>c</i>	1.001	1.346	1.99	0.649	1.052	1.623	1.893	1.601	1.313	1.216	0.756	1.019
<i>hy</i>	1.169	1	1.002	2.154	1.101	1.038	1.082	0.719	0.771	1.221	1.049	1.18
<i>mt</i>	1.809	1.848	1.664	2.689	1.932	1.873	2.052	1.588	1.915	1.943	2.099	2.259
<i>il</i>	0.427	0.442	0.418	1.043	0.425	0.406	0.494	0.363	0.549	0.515	0.501	0.765
<i>ap</i>	0.083	0.083	0.072	0.218	0.086	0.042	0.095	0.058	0.086	0.1	0.037	0.13

El cálculo de elementos mayores es en base anhidra y minerales normativos con el programa SINCLAS (Verma *et al.*, 2002); *qz*, cuarzo; *or*, ortoclasa; *ab*, albita; *an*, anortita; *c*, corindón; *hy*, hiperstena; *mt*, magnetita; *il*, ilmenita; *ap*, apatito.

Tabla 3.1b. Elementos mayores de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES

Muestra	QTN-052	QTN-058	QTN-070	QTN-086	QTN-090	QTN-098	QTN-104	QTN-107	QTN-109	QTN-110	QTN-112
TR	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
UI	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr
Elementos mayores											
SiO ₂	71.815	70.77	71.193	73.551	72.833	74.671	76.215	73.799	70.147	70.11	74.667
TiO ₂	0.207	0.236	0.191	0.222	0.201	0.207	0.183	0.198	0.527	0.343	0.161
Al ₂ O ₃	11.902	11.733	11.954	12.338	12.165	12.46	11.044	12.339	13.45	13.296	12.139
Fe ₂ O ₃	2.459	2.652	2.25	2.591	2.25	2.32	2.377	2.738	4.974	3.677	2.209
MnO	0.031	0.036	0.026	0.044	0.015	0.01	0.02	0.03	0.068	0.03	0.02
MgO	0.126	0.177	0.257	0.191	0.089	0.121	0.066	0.001	0.31	0.001	0.163
CaO	0.89	0.937	0.508	1.388	0.539	0.539	0.823	0.587	1.556	1.277	0.491
Na ₂ O	2.373	2.558	1.815	2.499	2.65	2.295	2.275	2.816	2.479	3.231	1.863
K ₂ O	4.829	4.795	5.3	5.202	5.039	5.263	4.764	4.951	5.32	4.773	5.526
P ₂ O ₅	0.024	0.035	0.011	0.037	0.007	0.018	0.035	0.022	0.122	0.082	0.001
LOI	1.56	1.58	2.53	1.77	1.97	2.8	2.32	2.22	2.22	2.72	2.53
Total	96.216	95.509	96.035	99.833	97.758	100.704	100.122	99.701	101.173	99.54	99.77
Minerales normativos											
qz	39.333	37.34	41.341	36.409	38.283	40.56	43.72	37.958	31.787	31.193	42.342
or	30.186	30.21	33.537	31.386	31.12	31.806	28.821	30.056	31.853	29.188	33.62
ab	21.239	23.075	16.441	21.594	23.439	19.86	19.707	24.48	21.247	28.287	16.23
an	4.505	4.714	2.62	6.782	2.747	2.616	3.942	2.848	7.009	5.998	2.499
c	1.281	0.762	2.5	0.165	1.45	2.096	0.75	1.367	1.092	0.714	2.268
hy	1.082	1.274	1.401	1.143	0.776	0.819	0.79	0.715	1.986	0.911	1.008
mt	1.899	2.06	1.743	2.002	1.769	1.801	1.83	2.138	3.724	2.836	1.714
il	0.416	0.479	0.387	0.431	0.399	0.403	0.355	0.386	1.014	0.674	0.315
ap	0.058	0.086	0.028	0.088	0.016	0.042	0.083	0.051	0.287	0.197	0.002

El cálculo de elementos mayores es en base anhidra y minerales normativos con el programa SINCLAS (Verma *et al.*, 2002); qz, cuarzo; or, ortoclasa; ab, albita; an, anortita; c, corindón; hy, hiperstena; mt, magnetita; il, ilmenita; ap, apatito.

Tabla 3.1c. Elementos mayores de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES

Muestra	QTN-122	QTN-124	QTN-126	QTN-129	QTN-130	QTN-133	QTN-134	QTN-135	QTN-136	QTN-137	QTN-138
TR	D	R	R	Qmz	R	R	R	R	R	R	R
UI	Pdp	Pdr	Pdr	Ppv	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr
Elementos mayores (% en peso)											
SiO ₂	65.37	74.825	73.023	74.895	68.105	69.413	73.708	72.851	75.471	69.17	74.222
TiO ₂	0.981	0.231	0.235	0.214	0.419	0.421	0.233	0.265	0.214	0.422	0.194
Al ₂ O ₃	14.065	11.864	12.745	11.986	13.351	13.475	12.847	12.739	12.645	12.775	12.764
Fe ₂ O ₃	5.735	2.629	1.689	2.639	4.407	4.662	2.726	3.179	1.573	4.283	2.821
MnO	0.096	0.024	0.001	0.017	0.063	0.04	0.028	0.022	0.001	0.064	0.023
MgO	1.162	0.17	0.235	0.136	0.216	0.213	0.164	0.234	0.109	0.43	0.218
CaO	3.373	0.873	0.56	0.425	2.245	1.452	0.787	0.911	0.924	1.661	0.943
Na ₂ O	3.195	2.268	1.162	2.663	2.668	2.414	2.334	2.428	2.665	2.46	2.624
K ₂ O	3.972	5.03	5.755	5.088	4.654	4.985	5.192	5.119	5.198	4.427	5.167
P ₂ O ₅	0.228	0.043	0.047	0.036	0.094	0.099	0.048	0.057	0.031	0.096	0.041
LOI	2.19	1.98	4.32	1.94	2.98	2.22	2.02	1.97	1.05	3.65	1.93
Total	100.367	99.937	99.772	100.039	99.202	99.394	100.087	99.775	99.881	99.438	100.947
Minerales normativos											
qz	23.833	40.983	44.762	39.456	30.516	33.568	38.97	37.519	38.426	34.926	37.047
or	23.981	30.387	35.659	30.689	28.65	30.387	31.327	30.978	31.102	27.373	30.878
ab	27.619	19.614	10.306	22.999	23.515	21.07	20.164	21.036	22.83	21.78	22.457
an	12.573	4.138	2.592	1.911	10.964	6.765	3.669	4.25	4.441	7.969	4.465
c	-	1.231	3.879	1.441	0.07	1.758	2.115	1.724	1.041	1.199	1.25
hy	3.087	1.074	0.929	0.938	1.964	1.917	1.094	1.41	0.442	2.526	1.254
mt	4.042	2.02	1.29	2.064	3.266	3.472	2.093	2.434	1.232	3.155	2.179
il	1.903	0.448	0.467	0.414	0.828	0.824	0.452	0.515	0.412	0.839	0.372
ap	0.54	0.102	0.114	0.086	0.227	0.236	0.114	0.134	0.072	0.232	0.095

El cálculo de elementos mayores es en base anhidra y minerales normativos con el programa SINCLAS (Verma *et al.*, 2002); *qz*, cuarzo; *or*, ortoclasa; *ab*, albita; *an*, anortita; *c*, corindón; *hy*, hiperstena; *mt*, magnetita; *il*, ilmenita; *ap*, apatito.

Tabla 3.2a. Elementos traza y tierras raras de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-OES

Muestra	QTN-007	QTN-009	QTN-010	QTN-015	QTN-024	QTN-025	QTN-031	QTN-035	QTN-040	QTN-042	QTN-045	QTN-049
TR	R	R	R	Qmz	R	R	R	R	R	R	R	R
UG	Pdr	Pdr	Pdr	Ppv	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr
Elementos traza												
Cs	9.07	7.59	6.37	5.35	7.32	10.87	5.70	5.85	8.54	8.85	7.45	8.21
Rb	185.17	188.71	191.59	181.58	181.45	195.08	185.21	192.39	205.42	205.96	190.91	196.79
Ba	1103.64	1307.22	1334.79	1353.81	1274.87	1375.47	1416.29	1216.44	1582.14	1424.32	1340.20	1325.75
Sr	92.59	106.02	104.25	174.25	102.83	103.28	112.95	90.99	143.74	142.83	115.40	110.10
Y	40.12	43.72	51.42	43.43	45.57	45.61	36.46	36.45	52.33	56.46	49.47	45.17
Nb	26.45	27.09	26.06	30.63	23.59	26.47	11.25	18.83	23.09	27.71	28.40	26.04
Th	20.34	18.41	19.23	18.80	18.37	20.72	19.03	15.46	19.67	21.32	20.21	19.14
U	2.44	2.89	3.38	3.84	2.10	2.28	3.61	2.86	4.47	3.86	4.18	2.90
Pb	23.01	28.21	22.09	42.31	30.31	26.14	23.60	25.70	100.26	16.97	24.94	28.96
Ta	1.47	1.42	1.41	1.48	1.36	1.44	1.03	1.26	1.35	1.48	1.50	1.40
Hf	0.67	0.57	2.42	2.10	0.87	0.78	0.41	0.85	1.34	2.64	0.74	2.70
Ni	6.37	6.62	6.48	6.27	6.70	7.34	6.54	6.09	6.45	7.50	6.97	5.37
V	10.34	10.96	16.26	25.59	10.41	10.90	10.02	8.41	14.49	13.51	12.84	17.89
Cr	165.94	184.99	143.37	139.24	165.00	188.12	152.50	160.04	149.69	71.98	191.70	112.32
Co	2.76	2.70	2.66	4.78	2.66	2.82	2.61	2.43	3.01	2.74	3.02	3.83
Tierras Raras												
La	61.37	61.90	78.47	57.69	57.62	56.54	62.84	75.47	68.31	73.61	66.62	65.11
Ce	131.31	124.66	161.01	118.90	121.49	114.32	121.68	144.51	138.27	157.56	140.36	133.33
Pr	15.24	15.24	19.59	14.05	14.14	13.67	14.85	17.57	18.37	18.33	16.39	15.70
Nd	56.79	57.56	72.17	51.68	52.32	49.66	54.81	63.11	69.71	69.07	61.41	58.14
Sm	11.87	12.04	14.75	11.06	11.16	10.58	11.36	12.68	14.96	14.36	13.01	12.24
Eu	1.21	1.49	1.66	1.57	1.32	1.44	1.53	1.47	1.92	1.61	1.53	1.45
Gd	8.49	8.67	10.16	8.34	8.30	8.13	8.19	8.78	10.78	10.67	9.53	9.02
Tb	1.71	1.75	2.14	1.71	1.71	1.71	1.56	1.74	2.40	2.37	2.03	1.94
Dy	7.75	8.32	9.75	8.15	8.40	8.56	7.29	7.62	10.88	11.05	9.33	9.24
Ho	1.60	1.79	2.12	1.75	1.79	1.87	1.51	1.53	2.34	2.42	2.00	1.97
Er	4.32	4.99	6.03	4.83	5.13	5.35	4.16	4.11	6.49	6.87	5.65	5.53
Tm	0.60	0.71	0.87	0.70	0.76	0.79	0.60	0.57	0.92	0.96	0.81	0.80
Yb	3.75	4.48	5.37	4.26	4.68	4.88	3.70	3.38	5.76	6.06	5.03	4.95
Lu	0.51	0.61	0.72	0.57	0.64	0.68	0.50	0.45	0.78	0.82	0.70	0.66

TR, tipo de roca; R, riolita; Qmz, cuarzomonzonita; D, dacita; UG, Unidad Geológica; Pdr, Domo Riolitico; Ppv, Intrusivo Palo Verde; Pdp, Serie Potrerillo; los resultados analíticos están calculados en mg/kg (ppm).

Tabla 3.2b. Elementos traza y tierras raras de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-MS

Muestra	QTN-052	QTN-058	QTN-070	QTN-086	QTN-090	QTN-098	QTN-104	QTN-107	QTN-109	QTN-110	QTN-112
TR	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
UI	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr
Elementos traza											
Cs	7.93	9.03	7.62	6.45	5.87	5.21	3.85	6.14	4.30	7.43	6.96
Rb	175.12	123.95	223.31	192.86	196.37	190.51	168.44	187.14	170.21	169.27	201.75
Ba	1254.80	921.38	1417.79	1342.06	926.62	843.91	801.09	859.41	1754.25	1510.77	1458.24
Sr	119.14	85.52	98.91	111.26	72.51	64.29	71.79	77.00	156.97	141.63	100.20
Y	42.26	21.92	31.69	49.50	20.71	27.14	30.86	68.21	46.87	58.77	28.77
Nb	24.03	16.00	18.24	27.66	22.25	21.44	17.96	21.00	22.56	30.77	22.62
Th	18.51	11.92	22.92	20.74	13.75	18.33	16.81	18.11	15.69	17.77	18.84
U	2.42	1.83	3.24	4.52	2.74	3.10	3.38	3.70	3.41	4.80	3.09
Pb	26.05	28.09	17.78	26.19	23.45	21.25	36.38	22.78	23.15	22.30	25.11
Ta	1.38	1.10	1.33	1.49	1.34	1.31	1.25	1.30	1.32	1.50	1.36
Hf	0.64	0.38	1.63	3.57	2.97	5.86	5.90	0.79	3.75	0.31	1.70
Ni	6.44	4.85	5.85	5.81	7.41	5.04	5.59	5.35	9.38	7.41	6.38
V	11.31	8.18	10.80	10.22	7.79	8.39	6.83	7.34	20.86	17.18	10.06
Cr	156.71	82.30	136.15	129.62	123.47	85.48	95.50	99.64	139.85	170.95	146.87
Co	2.67	2.35	2.42	2.65	2.27	2.36	2.24	2.29	4.87	3.30	2.42
Tierras raras											
La	50.64	40.71	72.25	65.48	29.44	41.29	33.78	36.34	57.97	70.18	60.05
Ce	109.12	82.11	154.03	136.65	44.26	79.26	99.49	103.82	121.89	153.14	123.53
Pr	12.39	9.95	17.49	16.02	5.62	10.56	11.88	9.95	14.20	17.50	14.45
Nd	46.15	36.71	62.91	59.85	19.37	38.18	44.50	36.39	54.62	67.28	53.63
Sm	10.04	7.46	12.34	12.65	3.58	8.26	9.56	8.84	11.92	14.65	10.95
Eu	1.27	0.98	1.39	1.44	0.70	0.80	0.82	0.85	2.20	2.05	1.31
Gd	7.81	5.65	8.59	9.34	3.71	6.10	7.17	8.35	9.05	11.09	7.58
Tb	1.62	0.88	1.63	1.99	0.45	1.12	1.32	2.10	1.91	2.49	1.33
Dy	8.08	4.48	7.37	9.56	3.31	5.70	6.38	11.48	9.00	11.52	6.06
Ho	1.81	0.88	1.46	2.10	0.76	1.20	1.35	2.77	1.97	2.55	1.19
Er	5.14	2.31	4.05	5.94	2.27	3.34	3.67	8.05	5.49	7.29	3.20
Tm	0.76	0.32	0.60	0.87	0.39	0.52	0.55	1.16	0.77	1.07	0.45
Yb	4.79	1.96	3.77	5.41	2.58	3.30	3.40	7.18	4.87	7.01	2.71
Lu	0.65	0.27	0.52	0.73	0.37	0.46	0.46	0.96	0.67	0.99	0.37

TR, tipo de roca; R, riolita; Qmz, cuarzomonzonita; D, dacita; UG, Unidad Geológica; Pdr, Domos Riolíticas; Ppv, Intrusivo Palo Verde; Pdp, Serie Potrerillo; los resultados analíticos están calculados en mg/kg (ppm).

Tabla 3.2c. Elementos traza y tierras raras de las unidades asociadas al CVRSM, medidos con el método ICP-MS

Muestra	QTN-122	QTN-124	QTN-126	QTN-129	QTN-130	QTN-133	QTN-134	QTN-135	QTN-136	QTN-137	QTN-138
TR	Da	R	R	Qmz	R	R	R	R	R	R	R
UI	Pdp	Pdr	Pdr	Ppv	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr	Pdr
Elementos traza											
Cs	4.52	7.10	4.01	6.78	5.41	4.90	6.99	6.25	6.53	3.93	8.05
Rb	138.97	184.00	195.86	193.07	162.59	167.03	195.35	186.64	201.66	148.16	194.51
Ba	1235.30	1499.91	1407.27	1043.18	1664.20	1627.25	1281.27	1382.55	1399.31	1104.11	1649.72
Sr	217.04	111.54	80.21	79.55	166.27	150.75	104.60	106.68	109.74	101.82	121.10
Y	50.15	36.20	44.34	46.04	43.02	45.10	54.82	35.87	51.00	42.36	43.91
Nb	29.44	23.32	23.71	21.15	23.04	28.03	22.18	12.21	20.12	33.29	21.98
Th	15.14	18.79	19.09	20.58	16.53	17.07	20.56	19.87	21.24	15.57	20.50
U	4.10	3.65	3.73	2.96	3.46	3.67	3.17	2.96	3.36	3.05	3.01
Pb	18.88	24.66	22.62	21.68	20.53	21.94	40.54	22.40	24.62	20.98	26.43
Ta	1.39	1.37	1.36	1.36	1.32	1.43	1.38	1.08	1.33	1.48	1.34
Hf	13.76	2.87	4.40	0.96	3.57	6.72	1.45	0.54	1.18	4.83	0.60
Ni	6.27	6.45	4.95	8.35	6.47	6.80	6.49	6.77	6.89	5.89	6.24
V	59.55	17.93	9.79	21.09	16.28	16.96	11.60	11.36	10.87	15.56	11.82
Cr	94.49	175.67	114.72	329.74	124.78	142.58	170.09	195.91	175.36	88.29	161.80
Co	8.96	2.85	1.82	2.84	3.51	3.34	2.61	2.84	2.74	3.87	2.50
Tierras raras											
La	54.49	68.86	66.67	64.03	61.04	59.99	69.87	68.01	72.51	56.73	71.57
Ce	118.52	137.27	141.85	134.29	132.00	127.23	150.45	140.09	151.21	123.00	145.57
Pr	13.71	16.30	16.44	15.50	15.36	14.93	17.33	16.52	17.58	14.30	17.17
Nd	53.06	60.38	61.93	57.75	58.49	55.99	64.19	62.01	65.62	55.18	64.06
Sm	11.72	12.54	12.70	12.24	13.00	12.41	13.63	12.77	13.58	11.79	13.29
Eu	2.07	1.57	1.45	1.34	2.13	1.99	1.46	1.60	1.53	1.80	1.64
Gd	8.91	8.85	9.50	9.35	9.21	9.05	9.95	8.95	9.70	8.76	9.75
Tb	1.94	1.73	1.96	1.89	1.88	1.84	2.21	1.70	2.02	1.79	2.05
Dy	9.15	7.74	8.92	8.88	8.79	8.64	10.41	7.56	9.48	8.31	8.88
Ho	2.03	1.60	1.90	1.95	1.87	1.92	2.22	1.57	2.07	1.74	1.83
Er	5.84	4.36	5.33	5.51	5.17	5.38	6.35	4.17	5.85	4.73	4.88
Tm	0.85	0.62	0.76	0.79	0.74	0.75	0.91	0.59	0.83	0.67	0.68
Yb	5.40	3.85	4.90	4.93	4.66	4.83	5.69	3.62	5.20	4.20	3.97
Lu	0.76	0.51	0.67	0.68	0.64	0.67	0.75	0.50	0.70	0.60	0.53

TR, tipo de roca; R, riolita; Qmz, cuarzomonzonita; D, dacita; UG, Unidad Geológica; Pdr, Domos Riolíticas; Ppv, Intrusivo Palo Verde; Pdp, Serie Potrerillo; los resultados analíticos están calculados en mg/kg (ppm)

3.2. Diagrama de clasificación química

De acuerdo con el diagrama de clasificación TAS usando los límites propuestos por Le Maitre *et al.*, (1989), los grupos 1, 2 y 3 corresponden al campo de la riolita. Sin embargo, existe una variación en SiO₂ para cada uno de los grupos. Por ejemplo, los grupo 2 y 4 presentan dos asociaciones, la primera ubicada en el margen oriental del campo de la dacita y el segundo en el centro del campo de la riolita. Cabe mencionar que todos los grupos corresponden al campo de magmas subalcalinos. El grupo 5 corresponde a una dacita, confirmando los resultados de la petrografía (Figura 3.2A, B); en general, esta roca es considerada es derivada de la fusión parcial de la base de la corteza.

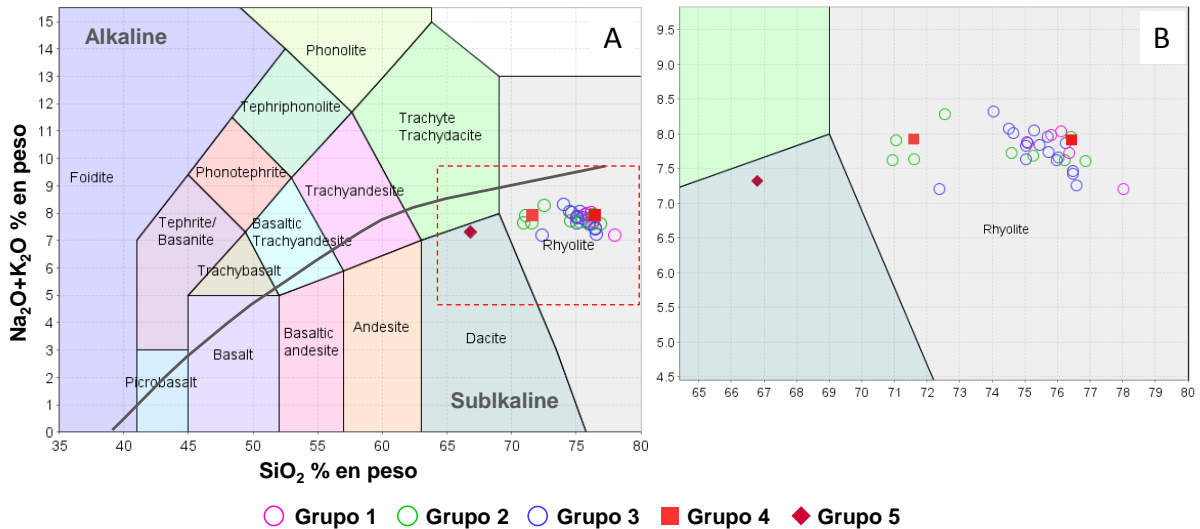


Figura 3.2. Diagrama de TAS (total alcalis vs sílica) por Le Maitre *et al.* (1989). A) Mostrando las características químicas de cada uno de los grupos que corresponden a domos riolíticos (Pdr). B) Acercamiento del campo riolítico, que es donde se concentra la mayoría de las muestras.

La clasificación química de rocas puede ser ratificada usando otros diagramas distintos a los TAS, pero considerando que las rocas pudieron haber sido alteradas de su cristalización original por adición de productos hidrotermales y supergénicos. Por lo tanto, diagramas realizados con el resultado de elementos traza se muestran con la finalidad de corroborar la clasificación química.

El diagrama binario de SiO₂ vs Zr/TiO₂ corroboró una tendencia magmática evolucionada con respecto a los grupos 2 y 3, con variaciones de riolita a riodacita (Figura 3.3), ratificando el resultado del análisis petrográfico y el TAS. Sin embargo, el alto contenido de SiO₂ en el grupo 4, pudiera representar efecto de alteración fílica. El grupo 5 está ubicado dentro del campo de la dacita (Figura 3.3A) confirmando el resultado del diagrama TAS.

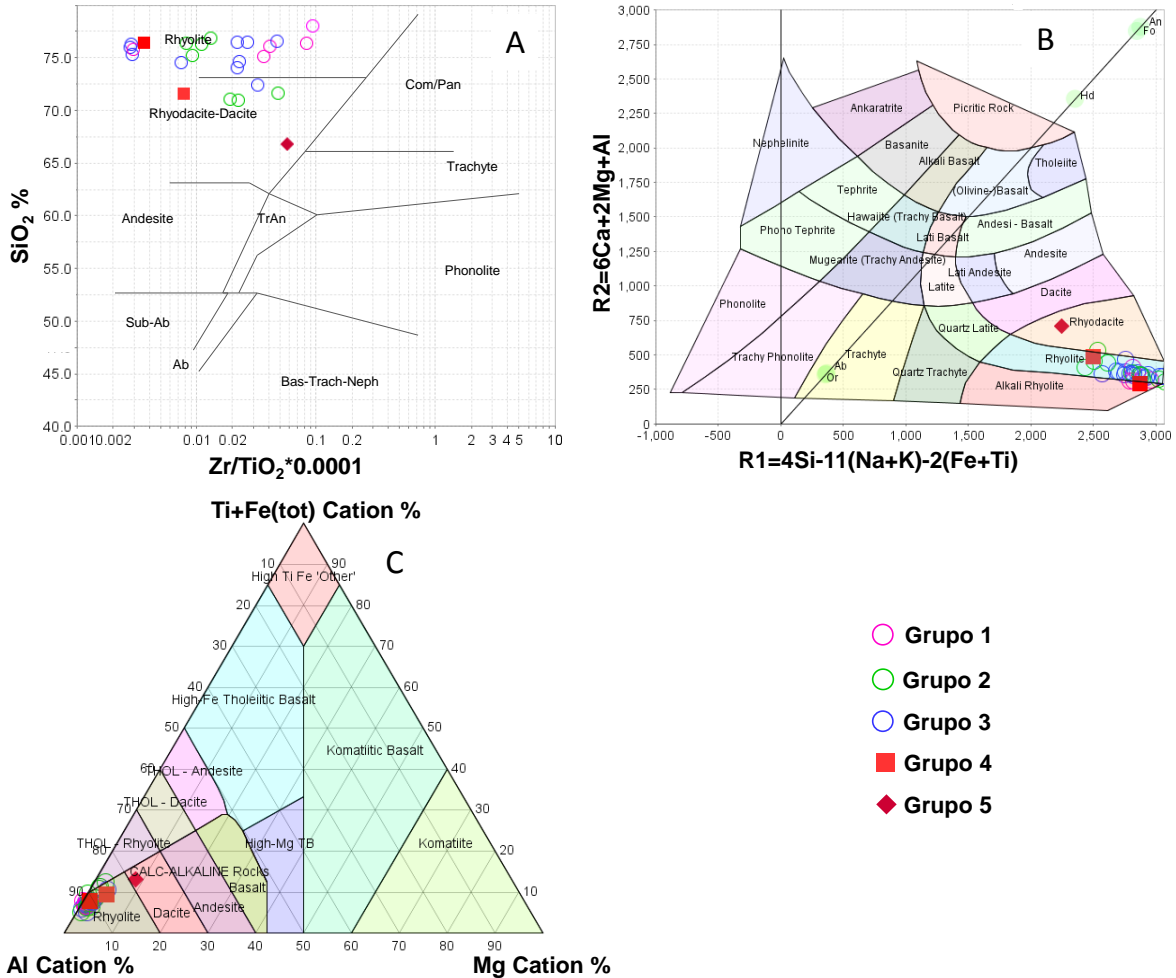


Figura 3.3. Diagrama de clasificación con sílice, elementos mayores y elementos traza. A) Diagrama Zr / TiO₂ * 0,0001-SiO₂ (Winchester y Floyd 1977). B) Diagrama R1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti) / R2= 6 Ca+2Mg+Al (De la Roche *et al*, 1980). C) Diagrama ternario de clasificación de rocas subcalcinas (Ti + Fe-Al-Mg) Jensen, 1976.

El diagrama binario graficado con los elementos traza $R1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$ vs $R2=6Ca+2Mg+Al$, indica que los grupos 1, 2, 3 y 4 están dentro del campo de la riolita, mientras que el grupo 5 es situado en el campo de la Riodacita, casi en el límite con el campo de la dacita, corroborando los anteriores diagramas de clasificación, así como el estudio petrográfico (Figura 3.3B).

Finalmente, el diagrama ternario de clasificación para rocas subalcalinas graficado con los elementos traza $Ti + Fe-Al-Mg$ (Jensen, 1976) fue realizado con la finalidad de complementar y revalidar la composición química de estas rocas. El diagrama demuestra que los grupos 1, 2, 3 y 4 corresponden al campo de la riolita; mientras que el grupo 5 en el campo de la dacita; y todas las muestras corresponden al campo calco-alcalino, confirmando los anteriores diagramas de clasificación química. Cabe mencionar que las rocas calco-alcalinas son relativamente ricas tanto en calcio como en metales alcalinos; por lo tanto, esto puede sugerir que los magmas fueron generados en la corteza continental (Figura 3.3C).

3.3. Diagramas de discriminación

Por otra parte, los diagramas binarios para discriminación de Rb vs $Y + Nb$, Nb vs Y , Rb vs $Yb+Ta$ y Ta vs Yb (Pearce *et al.*, 1984) demuestran que la mayor parte de los especímenes tienen similitud con granitos intraplaca. Sin embargo, las muestras de los grupos 1, 2 y 3 son en menor proporción similares a granito de arco volcánico, sugiriendo que el vulcanismo es propiamente de régimen extensional (Figura 3.4A, B, C y D).

En el diagrama binario de K/Rb vs Rb demostró que todos los grupos muestran una tendencia descendente en K/Rb (Figura 3.5A), indicando afinidad con la corteza superior. El diagrama binario de Sr vs Th indicó que la mayoría de los especímenes presenta una ascendencia en Th , probando interacción con la corteza superior (Figura 3.5B). Mientras que el diagrama Sr/Y vs Y indica que todos los grupos presentan ascendencia en Sr/ Y , indicando alta relación con la corteza (Figura 3.5C).

Finalmente, el diagrama Ba/Nb vs Nb muestra que todos los grupos presentan alto contenido en Nb, indicando que los especímenes son subalcalinos (Figura 3.5D).

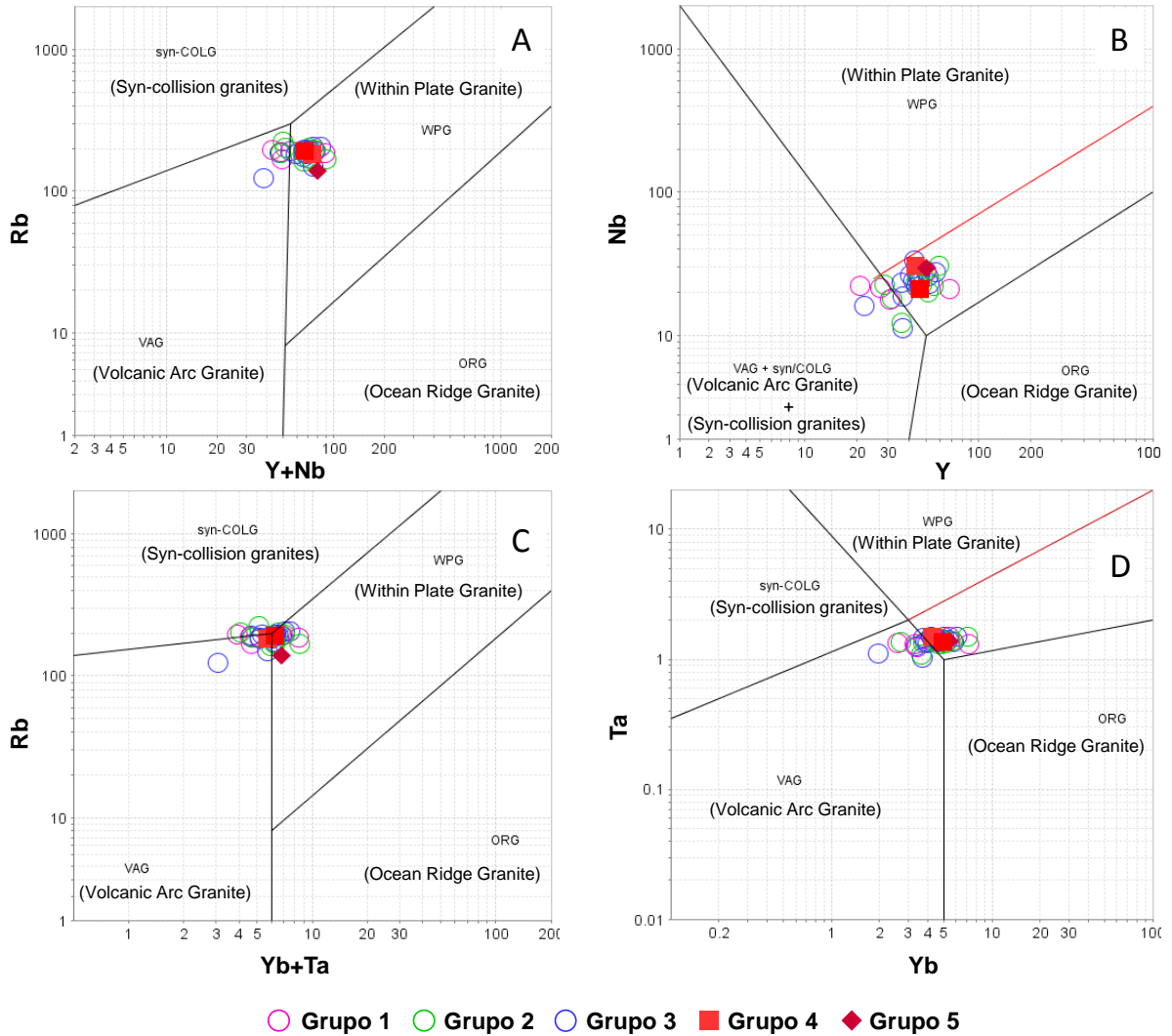


Figura 3.4. Diagramas binarios mostrando que la mayoría de los especímenes se ubican en ambientes tectónicos específicos. A) Rb vs Y + Nb. B) Nb vs Y. C) Rb vs Yb+Ta. D) Ta vs Yb (Campos sugerido por Pearce *et al.*, 1984).

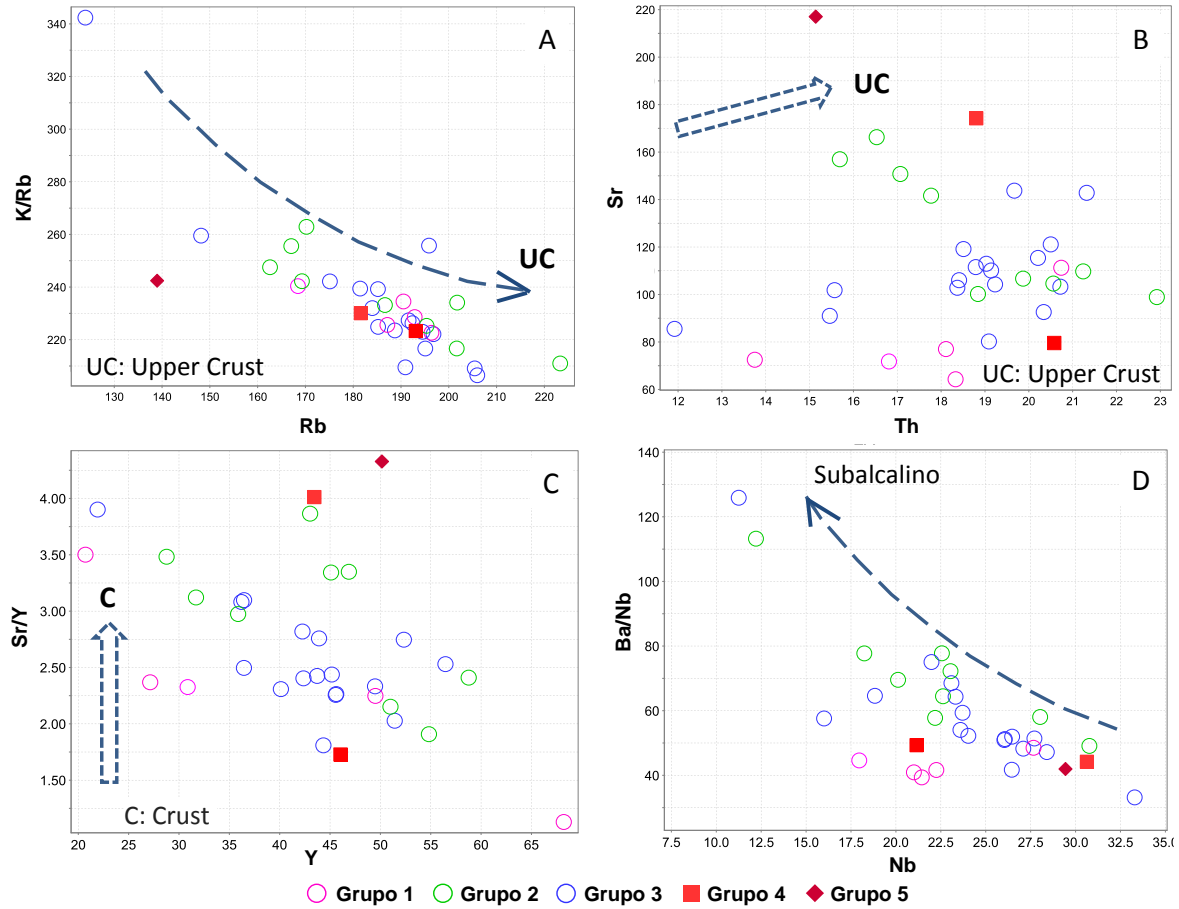


Figura 3.5. Diagramas binarios de elementos traza mostrando la afinidad magmática.

El diagrama binario La/Sm vs Sm muestra que todos los grupos tienen ascendencia en Sm, indicando una asimilación de cristalización fraccionada (Figura 3.6A). El diagrama de Zr/Y vs Zr muestra una ascendencia tanto en Zr/Y como en Zr, indicando que todos los especímenes presentan cristalización fraccionada (Figura 3.6B). El diagrama La/Sm vs Th / Nb muestran una ascendencia en Th/Nb, indicando una asimilación de cristalización fraccionada (Figura 3.6C).

Basado en el resultado de los diagramas anteriormente descritos, podemos interpretar que el magma presenta una cristalización gradual fraccionada. También, esto permite inferir que la mineralización de Sn relacionado a los domos riolíticos, puede ser explicada en términos de fraccionamiento químico, asumiendo que el Sn es un elemento incompatible durante la cristalización del magma granítico, y para

que alcance un factor de enriquecimiento de 20%, es requerido que cristalice alrededor del 96% del magma. Por lo tanto, el estaño debió haberse formado en la fase final de la cristalización de los magmas.

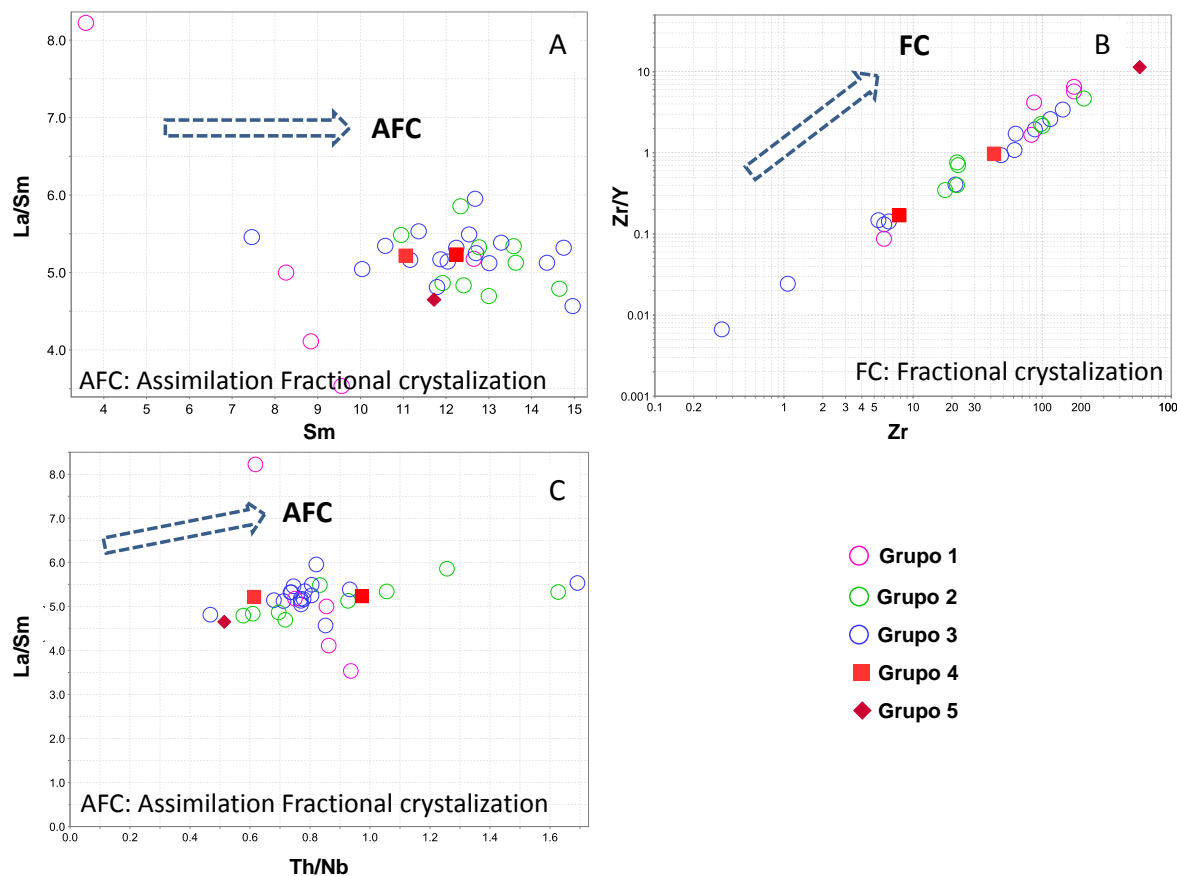


Figura 3.6. Diagramas binarios de elementos traza mostrando la afinidad magmática.

3.4. Elementos REE ó diagramas de araña

Los diagramas REE fueron elaborados con la finalidad de obtener la firma de cuatro grupos de muestras (1, 2, 3 y 4), para determinar la afinidad geológica de las rocas analizadas. Los diagramas REE fueron normalizados a condrita. En general, los gráficos demostraron patrones homogéneos para todos los grupos (Figura 3.7A, B, C y D).

En las primeras dos series de gráficos, los grupos del 1 al 4 son caracterizados por una anomalía pronunciada decreciente y homogénea en tierras raras. Además,

en estos gráficos, todos los grupos exhiben una marcada anomalía negativa de Eu, la cual es una característica típica de una procedencia de una corteza continental antigua o de rocas recicladas. Esto es debido a que en la corteza continental tiene lugar la fusión parcial y la recristalización fraccionada, ambos procesos desarrollan diferenciación de plagioclasas dando como resultado este tipo de anomalía. También, la anomalía negativa de Eu sugiere afinidad composicional a la corteza continental y falta de correlación con la condrita. Además, los grupos son caracterizados por una decreciente y moderada partición en tierras raras, sugiriendo magmas diferenciados (Figura 3.7A, B, C y D).

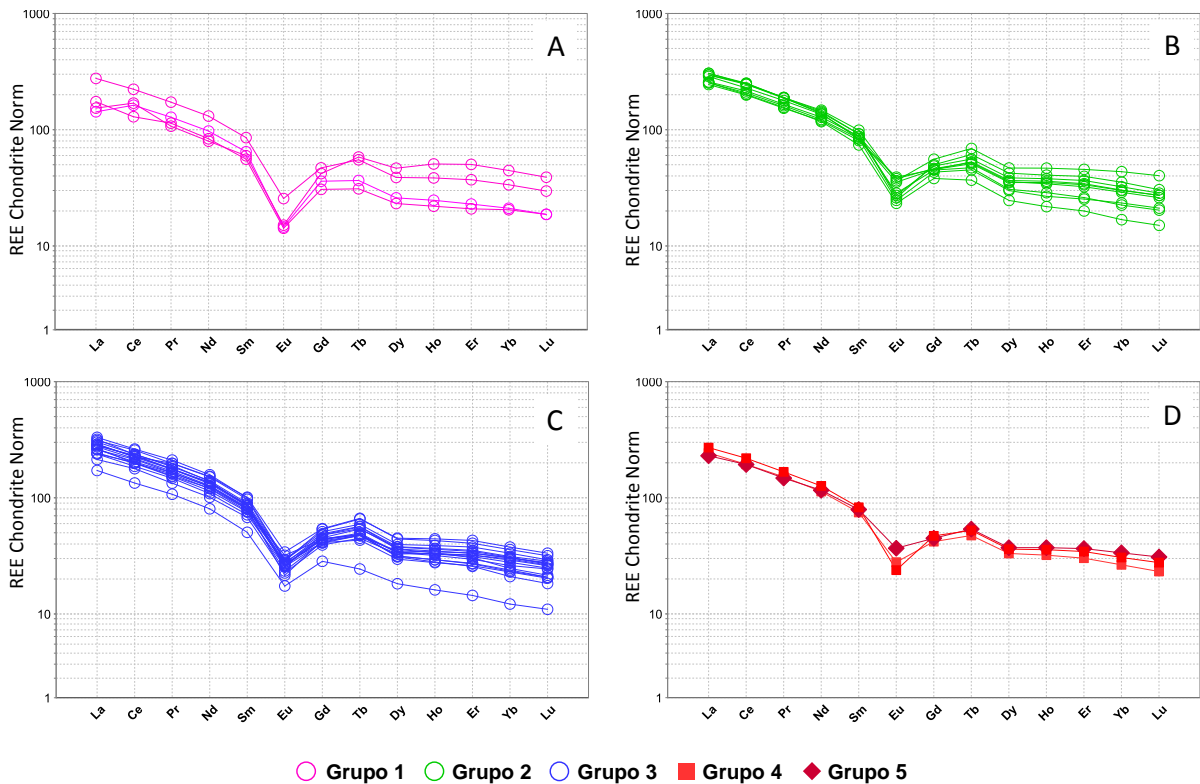


Figura 3.7. Graficas que exhibe diagramas de araña mostrando composiciones REE, normalizados a chondrite (Sun y McDonough, 1995). A) Muestras que corresponden al grupo 1. B) Muestras que corresponden al grupo 2. C) Muestras que corresponden al grupo 3. D) Muestras que corresponden al grupo 4.

4. GEOCRONOLOGÍA

En esta investigación académica-científica, tres unidades litológicas fueron muestreadas para realizar análisis geocronológicos por el método de U-Pb en zircones. Las unidades corresponden a la Riodacita del Carmen (Prc), la Riolita San Miguelito o Domos Riolíticos (Pdr) y el Intrusivo Palo Verde. Las muestras en cuestión son: DTN-300 (Riodacita del Carmen, Prc), DTN-065 (Riolita San Miguelito, Pdr), DTN-031 (Riolita San Miguelito, Pdr), y DTN-015 (Intrusivo Palo Verde, Ppv) (Figura 4.1, 2, 3, 4).

Cabe mencionar que dataciones previas han sido realizadas en zonas aledañas y dentro del área de interés. Tristán-González *et al.*, (2009) colectó la muestra SLP07-03 en la porción noroccidental del área de estudio, correspondiente a la localidad Palo Verde, y que forma parte del Complejo Volcánico Río Santa María. Dicha muestra corresponde a la unidad Intrusivo Palo Verde (Ppv), y clasificada como una sienita. El método de datación usado fue K-Ar y el resultado fue de 31.5 ± 0.7 Ma.

En los complejos volcánicos Pinos (CVP) y Sierra San Miguelito (CVSSM) varias muestras de la unidad Riolita San Miguelito equivalente a Domos Riolíticos en el Complejo Volcánico Santa María (CVSM) correspondiente al occidente del Campo Volcánico del Río Santa María (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984; Tristán-González, 1987; Aguilón-Robles *et al.*, 2004), fueron también datadas por el método K-Ar. Las edades isotópicas del Complejo Volcánico Sierra San Miguelito varían de 30.4 ± 0.5 Ma a 32.7 ± 1.0 Ma. Para el Complejo Volcánico Pinos las edades varían de 28.7 ± 0.8 Ma a 32.0 ± 0.7 Ma.

De acuerdo a las relaciones estratigráficas observadas en campo, las unidades litológicas muestreadas para cronología, la de mayor antigüedad es el Intrusivo Palo Verde. La Riolita San Miguelito ó Domos Riolíticos (Pdr) parece ser la unidad más reciente pues corona a todas las unidades reconocidas dentro del área (Figura 4.2, 3).

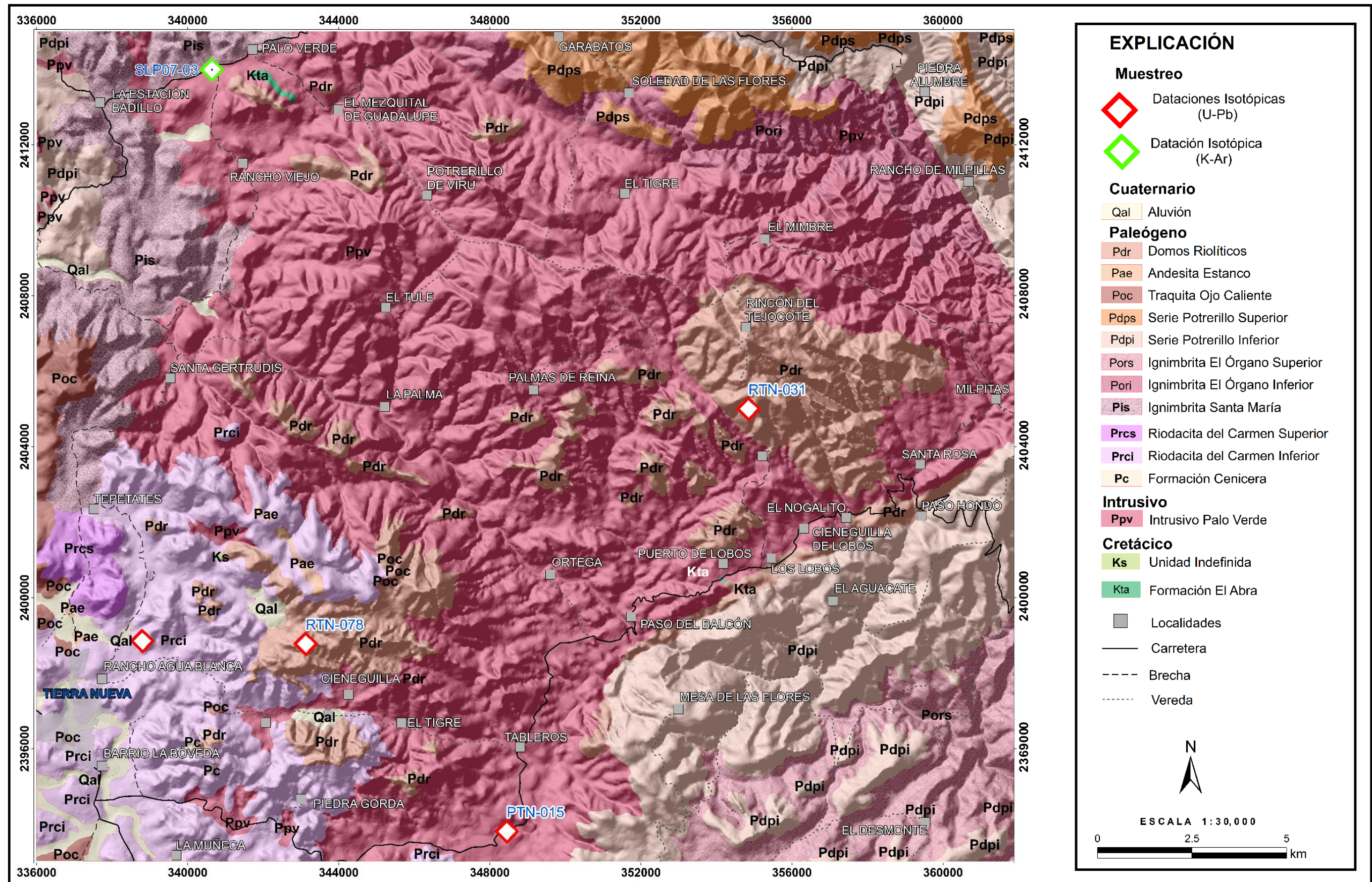


Figura 4.1. Mapa litológico del área de estudio, mostrando también la ubicación de las muestras colectadas para datación geocronológica.

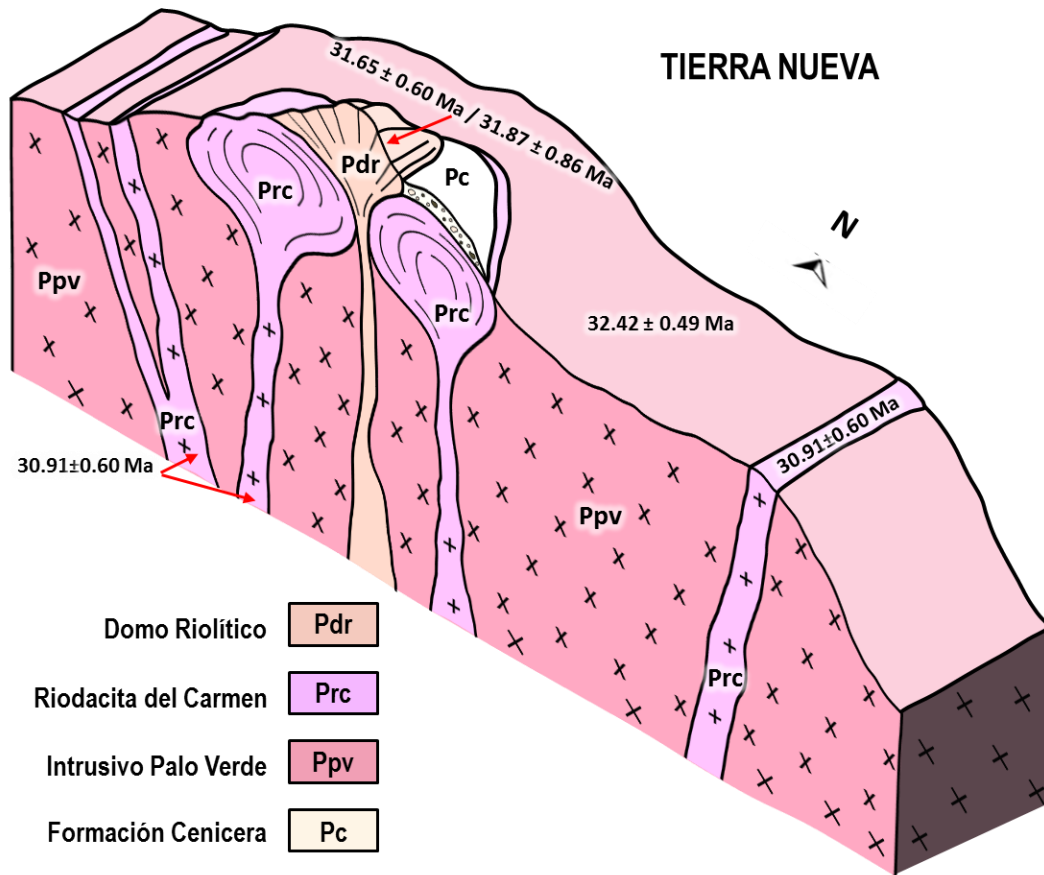


Figura 4.2. Sección esquemática idealizada en 3D de la localidad Tierra Nueva, en el cual es posible apreciar las relaciones estratigráficas entre las tres unidades muestreadas para datación geocronológica. Nótese que el Intrusivo Palo Verde (Ppv) es cortado por la Riodacita del Carmen (Prc) y los domos riolíticos de la Riolita San Miguelito (Pdr) coronan la secuencia de unidades previas, y Formación Cenicera (Pc).

4.1. Procedimiento analítico

Los estudios geocronológicos fueron realizados en el laboratorio especializado del Centro de Geociencia de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Qro.

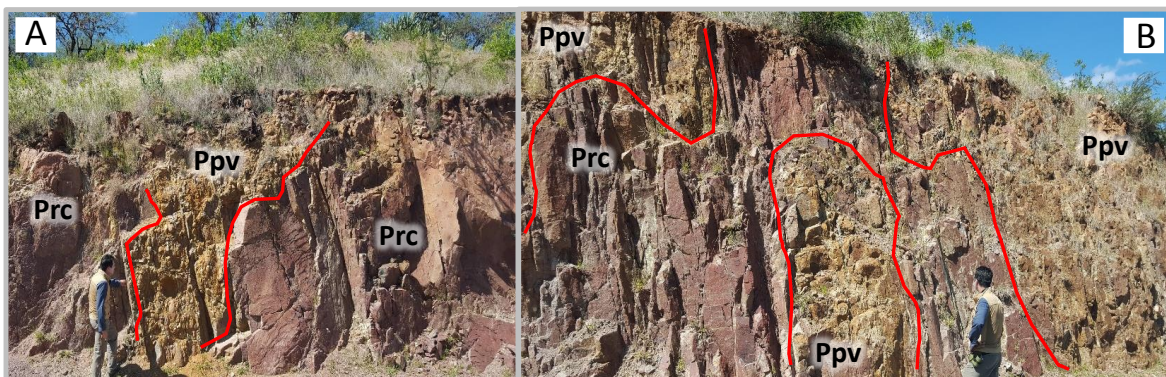


Figura 4.3. Fotografías mostrando las relaciones de corte entre el Intrusivo Palo Verde y la Riodacita del Carmen. A) Relación de corte totalmente vertical. B) Relación de corte irregular.



Figura 4.4. Panorámicas mostrando la unidad Riolita San Miguelito o Doms Riolíticos (Pdr) estratigráficamente por encima del Intrusivo Palo Verde. A) corresponde a domos aglutinados en la localidad La Ordeñita. B) corresponde al domo Las Cuatas, ubicado al nororiental del poblado Tierra Nueva.

El método de datación utilizado fue U-Pb-Th en zircones. Esto debido a que la estructura cristalina del mineral contiene átomos de uranio y torio, pero repele fuertemente los átomos de plomo. Por lo tanto, podemos asumir que el contenido de plomo dentro de la estructura molecular del zircón debe ser de origen radiogénico.

Las muestras colectadas recibieron un tratamiento especial de selección para la separación de zircones. La técnica consistió en pulverización de la roca seleccionada al tamaño 80 μm , seguida de lavado de la muestra pulverizada para separar un concentrado granular que incluía zircones y otros minerales translúcidos. Subsiguientemente, la selección, separación y montaje de por lo menos 35 zircones representativos por cada muestra fue realizado, usando un portaobjetos y bajo el microscopio marca *Leica* (Figura 4.5).

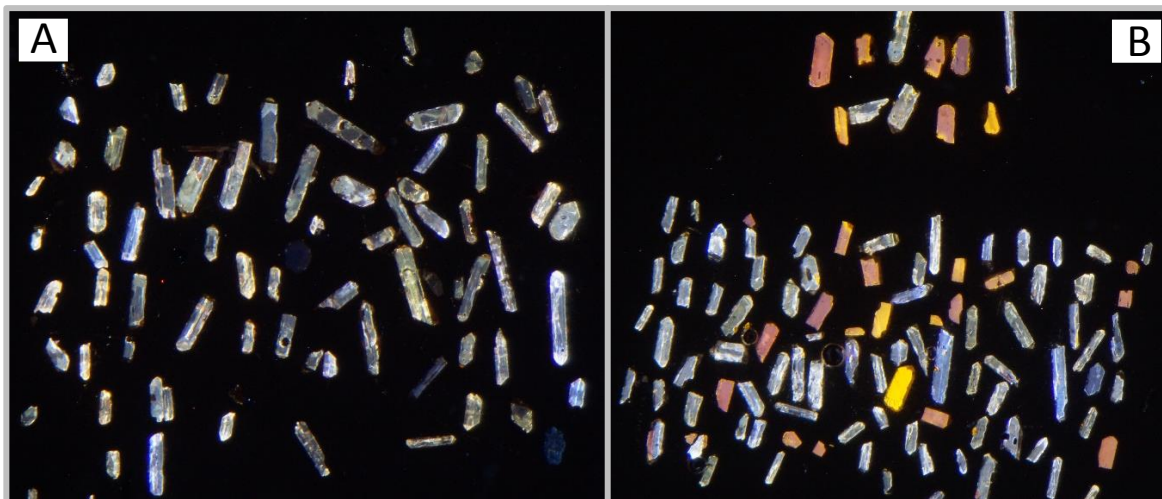


Figura 4.5. Fotomicrográficas mostrando el detalle de los zircones separados. A) Zircones de la muestra RTN-031 y B) Zircones de la muestra RTN-065.

Posterior al proceso anterior, los cristales seleccionados son montados en resina epóxica con subsecuente pulimiento. Después, estos zircones fueron ablacionados de manera alterna y con zircones estándar. El equipo empleado fue un sistema LAM-ICP-MS, en el cual la ablación láser es desarrollada en los cristales de zircón, operando el láser a una longitud de onda de 193 nm con tamaños de punto entre 10 y 75 μm . El desarrollo de la ablación es en una celda con atmósfera de He, en la cual el láser incide con una repetición de 10 Hz y una energía de salida de 32 ~mJ, provocando la nebulización en el punto donde el zircón es analizado. El diámetro del punto de análisis es de ~35 μm , con ~25 μm de profundidad. A través

de un flujo de Ar el material nebulizado es transportado hacia el ICP-MS, donde las mediciones de los diferentes isótopos de U, Th y Pb son obtenidas para cada análisis puntual realizado, con un tiempo de medición de ~90 s.

Las concentraciones de U y Th fueron monitoreadas de acuerdo a un estándar y, una vez calibrado el equipo, zircons estándar con edad previamente conocida son analizados. Los zircons cuya edad es desconocida son analizados de manera alterna con zircons estándar. Los datos obtenidos son reducidos y corregidos para obtener relaciones isotópicas, a través de las cuales es posible obtener gráficas y calcular edades.

La ventaja de este método es la precisión obtenida en el fechamiento, ya que las edades de los zircons estándar utilizados, así como las de las muestras analizadas cuya edad ya es conocida de antemano y son replicadas a la perfección.

4.2. Resultados

El primer ejercicio consistió en 16 dataciones para la muestra DTN-015 correspondiente al Intrusivo Palo Verde (Ppv). La muestra fue colectada en el punto con coordenadas UTM 14Q 348449, 2393797; ubicado entre las comunidades Los Mezquites y La Joya Grande, S. L. P. (Figura 4.1 y Tablas 4.1, 2).

También, 16 y 24 dataciones fueron realizadas para las muestras DTN-031 y DTN-065, respectivamente. La muestra DTN-031 situada al oriente del área de estudio, en la zona de La Ordeñita, Tierra Nueva, SLP., con coordenadas UTM 14Q 354848, 2404997. La muestra DTN-065 está situada al oriente del municipio de Tierra Nueva, en el Cerro Piedras Coloradas, con coordenadas UTM 14Q 343130, 2396061. Ambas muestras corresponden a Domos Riolíticos (Pdr) (Figuras 4.7, 8 y Tablas 4.1, 2).

Finalmente, 17 dataciones fueron ejecutadas para la muestra DTN-300. Ésta es correspondiente a la Riodacita del Carmen (Prc), con coordenadas UTM 14Q 338798, 2398842; ubicada al nororiental de Tierra Nueva, en la población Los Charcos, S. L. P. Figuras 4.1, 9 y Tabla 4.2.

Tabla 4.1. Mostrando los resultados de LAMC-ICP-MS U-Pb en zircones de las muestras DTN-015 y DTN-031.

ANÁLISIS	CORRECTED RATIOS ²											CORRECTED AGES (Ma)									
	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2s abs	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	age (Ma)	±2s	
DTN-015																					
Zircon_04	131	82	0.63	0.0730	0.0250	0.0510	0.0160	0.0050	0.0005	0.0027	0.0005	0.0429	32.4	3.3	50.0	16.0	510.0	740.0	32.4	3.3	
Zircon_05	255	121	0.47	0.0870	0.0180	0.0540	0.0098	0.0050	0.0003	0.0030	0.0005	-0.1614	32.4	2.2	53.2	9.4	1330.0	470.0	32.4	2.2	
Zircon_06	1385	1942	1.40	0.0596	0.0057	0.0403	0.0036	0.0049	0.0002	0.0016	0.0001	-0.2620	31.7	1.1	40.1	3.5	650.0	200.0	31.7	1.1	
Zircon_07	160	109	0.68	0.0850	0.0390	0.0620	0.0260	0.0051	0.0006	0.0024	0.0007	0.0355	33.1	3.6	60.0	24.0	600.0	1000.0	33.1	3.6	
Zircon_09	409	273	0.67	0.0510	0.0100	0.0375	0.0075	0.0051	0.0002	0.0017	0.0002	-0.0147	32.7	1.5	37.2	7.3	200.0	370.0	32.7	1.5	
Zircon_10	313	151	0.48	0.0469	0.0094	0.0319	0.0064	0.0047	0.0003	0.0015	0.0003	0.1902	30.4	1.7	31.7	6.3	-40.0	360.0	30.4	1.7	
Zircon_11	4827	5873	1.22	0.0498	0.0037	0.0337	0.0025	0.0052	0.0001	0.0017	0.0001	0.0415	33.1	0.9	33.6	2.5	170.0	170.0	33.1	0.9	
Zircon_12	69	32	0.46	0.0690	0.0420	0.0330	0.0230	0.0051	0.0007	0.0031	0.0012	-0.1239	32.8	4.3	31.0	23.0	0.0	1100.0	32.8	4.3	
Zircon_13	142	71	0.50	0.0680	0.0280	0.0400	0.0170	0.0051	0.0003	0.0020	0.0005	-0.2155	32.7	2.2	39.0	16.0	-20.0	780.0	32.7	2.2	
Zircon_15	1319	1615	1.22	0.0563	0.0090	0.0354	0.0055	0.0047	0.0002	0.0015	0.0002	-0.2715	30.1	1.3	35.3	5.4	400.0	360.0	30.1	1.3	
Zircon_16	209	103	0.49	0.0470	0.0210	0.0330	0.0160	0.0050	0.0006	0.0017	0.0005	-0.3921	32.1	3.8	33.0	16.0	300.0	1100.0	32.1	3.8	
Zircon_19	2193	3308	1.51	0.0656	0.0079	0.0452	0.0051	0.0049	0.0002	0.0018	0.0001	-0.2359	31.7	1.2	44.9	5.0	710.0	260.0	31.7	1.2	
Zircon_20	132	86	0.65	0.0800	0.0350	0.0580	0.0220	0.0056	0.0006	0.0028	0.0006	-0.0472	36.0	3.5	56.0	21.0	940.0	780.0	36.0	3.5	
Zircon_21	379	237	0.63	0.0830	0.0140	0.0546	0.0086	0.0051	0.0003	0.0024	0.0002	0.0769	33.0	1.9	53.8	8.3	1110.0	400.0	33.0	1.9	
Zircon_23	266	210	0.79	0.0840	0.0200	0.0550	0.0130	0.0054	0.0006	0.0023	0.0005	0.5741	34.9	3.5	54.0	13.0	990.0	520.0	34.9	3.5	
Zircon_24	3550	4456	1.26	0.0518	0.0039	0.0331	0.0025	0.0051	0.0001	0.0016	0.0001	0.2331	32.5	0.8	33.0	2.5	260.0	170.0	32.5	0.8	
DTN-031																					
Zircon_27	131	75	0.57	0.0660	0.0200	0.0380	0.0110	0.0051	0.0004	0.0020	0.0004	-0.1510	32.9	2.5	37.0	11.0	260.0	550.0	32.9	2.5	
Zircon_28	114	49	0.43	0.0670	0.0350	0.0420	0.0210	0.0050	0.0004	0.0030	0.0010	-0.0585	32.0	2.3	41.0	21.0	190.0	960.0	32.0	2.3	
Zircon_29	230	120	0.52	0.0500	0.0160	0.0340	0.0096	0.0048	0.0003	0.0017	0.0002	-0.0427	30.9	2.2	33.4	9.4	110.0	540.0	30.9	2.2	
Zircon_30	69	38	0.55	0.0650	0.0410	0.0320	0.0210	0.0051	0.0005	0.0015	0.0007	-0.0168	32.7	3.2	33.0	21.0	-500.0	1100.0	32.7	3.2	
Zircon_33	132	59	0.45	0.0660	0.0190	0.0500	0.0140	0.0053	0.0005	0.0021	0.0006	-0.2576	34.1	3.1	49.0	13.0	530.0	510.0	34.1	3.1	
Zircon_34	206	91	0.44	0.0530	0.0160	0.0335	0.0093	0.0047	0.0005	0.0019	0.0004	0.0820	30.3	3.0	33.3	9.1	30.0	500.0	30.3	3.0	
Zircon_36	393	207	0.53	0.0470	0.0087	0.0319	0.0061	0.0048	0.0003	0.0015	0.0002	0.0521	30.6	1.6	31.7	6.0	80.0	330.0	30.6	1.6	
Zircon_40	549	219	0.40	0.0669	0.0096	0.0405	0.0066	0.0046	0.0003	0.0023	0.0007	0.2211	29.8	2.1	40.3	6.4	760.0	310.0	29.8	2.1	
Zircon_45	282	130	0.46	0.0514	0.0096	0.0338	0.0059	0.0050	0.0003	0.0019	0.0003	0.1845	32.2	1.8	34.6	5.6	260.0	350.0	32.2	1.8	
Zircon_46	118	55	0.47	0.0510	0.0250	0.0350	0.0160	0.0049	0.0005	0.0018	0.0006	-0.0691	31.7	2.9	34.0	15.0	-260.0	840.0	31.7	2.9	
Zircon_49	199	125	0.63	0.0640	0.0180	0.0367	0.0097	0.0049	0.0005	0.0017	0.0003	-0.1783	31.6	2.9	36.3	9.5	500.0	530.0	31.6	2.9	
Zircon_50	88	56	0.64	0.0730	0.0470	0.0350	0.0200	0.0048	0.0007	0.0015	0.0005	-0.0300	30.9	4.6	34.0	19.0	200.0	1000.0	30.9	4.6	
Zircon_51	269	201	0.75	0.0456	0.0086	0.0315	0.0057	0.0050	0.0003	0.0016	0.0002	0.0852	32.2	2.0	31.4	5.6	-120.0	320.0	32.2	2.0	
Zircon_52	320	274	0.86	0.0680	0.0230	0.0460	0.0140	0.0048	0.0005	0.0018	0.0003	0.0197	30.8	3.4	45.0	14.0	510.0	680.0	30.8	3.4	
Zircon_53	168	84	0.50	0.0720	0.0180	0.0500	0.0110	0.0051	0.0004	0.0022	0.0004	-0.2235	32.5	2.2	49.0	11.0	860.0	490.0	32.5	2.2	
Zircon_55	40	21	0.53	0.0720	0.0430	0.0430	0.0250	0.0053	0.0007	0.0016	0.0009	-0.1559	34.0	4.3	39.0	25.0	-500.0	1100.0	34.0	4.3	

Tabla 4.2. Mostrando los resultados de LAMC-ICP-MS U-Pb en zircones de las muestras DTN-065 y DTN-300.

ANÁLISIS	CORRECTED RATIOS ²											CORRECTED AGES (Ma)								
	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2s abs	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	age (Ma)	±2s
DTN-065																				
Zircon_56	86	36	0.42	0.0550	0.0320	0.0350	0.0200	0.0045	0.0006	0.0015	0.0011	0.1279	29.0	3.9	34.0	20.0	-320.0	930.0	29.0	3.9
Zircon_57	134	105	0.78	0.0500	0.0240	0.0390	0.0170	0.0051	0.0004	0.0018	0.0003	-0.1426	32.5	2.6	38.0	17.0	40.0	810.0	32.5	2.6
Zircon_58	103	46	0.45	0.1230	0.0330	0.0880	0.0220	0.0052	0.0004	0.0033	0.0007	-0.0641	33.6	2.5	86.0	21.0	1360.0	590.0	33.6	2.5
Zircon_59	57	27	0.47	0.0660	0.0460	0.0410	0.0220	0.0048	0.0006	0.0016	0.0009	-0.0961	30.6	3.6	38.0	21.0	-800.0	1200.0	30.6	3.6
Zircon_60	153	68	0.44	0.0560	0.0200	0.0380	0.0120	0.0050	0.0004	0.0021	0.0005	-0.0830	31.9	2.8	40.0	13.0	250.0	540.0	31.9	2.8
Zircon_61	135	56	0.41	0.0630	0.0430	0.0400	0.0270	0.0047	0.0005	0.0024	0.0008	0.4649	30.1	3.2	38.0	26.0	100.0	1300.0	30.1	3.2
Zircon_62	100	61	0.61	0.0730	0.0290	0.0310	0.0120	0.0047	0.0004	0.0018	0.0004	-0.0738	30.1	2.8	33.0	13.0	290.0	710.0	30.1	2.8
Zircon_63	72	30	0.42	0.1180	0.0410	0.0530	0.0160	0.0044	0.0005	0.0023	0.0008	0.1762	28.6	3.2	51.0	15.0	1230.0	770.0	28.6	3.2
Zircon_66	94	56	0.60	0.0700	0.0250	0.0350	0.0120	0.0048	0.0003	0.0018	0.0005	0.0661	30.8	2.2	34.0	12.0	610.0	670.0	30.8	2.2
Zircon_69	54	22	0.41	0.0800	0.0820	0.0410	0.0370	0.0045	0.0007	0.0020	0.0011	0.0143	29.0	4.2	38.0	35.0	-1000.0	2100.0	29.0	4.2
Zircon_70	120	76	0.63	0.1720	0.0380	0.1150	0.0230	0.0060	0.0005	0.0035	0.0005	-0.0828	38.6	3.5	109.0	21.0	2260.0	460.0	38.6	3.5
Zircon_71	113	80	0.71	0.1260	0.0510	0.1160	0.0460	0.0056	0.0006	0.0041	0.0021	-0.3173	36.0	3.9	109.0	40.0	1840.0	820.0	36.0	3.9
Zircon_72	199	107	0.54	0.0970	0.0270	0.0900	0.0190	0.0056	0.0007	0.0045	0.0011	-0.1170	35.9	4.7	87.0	17.0	1500.0	570.0	35.9	4.7
Zircon_73	173	78	0.45	0.0550	0.0170	0.0480	0.0150	0.0051	0.0004	0.0018	0.0005	0.1319	32.7	2.6	47.0	15.0	230.0	570.0	32.7	2.6
Zircon_76	102	61	0.60	0.0430	0.0130	0.0380	0.0120	0.0052	0.0004	0.0019	0.0004	0.0413	33.1	2.3	37.0	12.0	-210.0	490.0	33.1	2.3
Zircon_77	106	64	0.60	0.0750	0.0360	0.0660	0.0270	0.0050	0.0006	0.0032	0.0007	0.1170	31.9	3.9	63.0	25.0	620.0	890.0	31.9	3.9
Zircon_78	115	54	0.47	0.0480	0.0200	0.0340	0.0110	0.0050	0.0004	0.0020	0.0005	0.1749	32.0	2.7	33.0	11.0	-120.0	560.0	32.0	2.7
Zircon_79	189	117	0.62	0.0340	0.0210	0.0320	0.0190	0.0054	0.0007	0.0010	0.0004	0.3581	34.5	4.3	31.0	18.0	-750.0	790.0	34.5	4.3
Zircon_80	355	207	0.58	0.0440	0.0078	0.0311	0.0057	0.0047	0.0002	0.0015	0.0002	0.0518	30.0	1.4	30.9	5.6	-120.0	330.0	30.0	1.4
Zircon_81	132	77	0.58	0.1050	0.0310	0.0720	0.0190	0.0058	0.0005	0.0030	0.0006	-0.1139	37.1	3.1	69.0	18.0	1300.0	620.0	37.1	3.1
Zircon_82	281	131	0.47	0.0640	0.0190	0.0400	0.0120	0.0050	0.0003	0.0020	0.0004	-0.0352	32.3	2.1	39.0	11.0	610.0	650.0	32.3	2.1
Zircon_83	242	106	0.44	0.0630	0.0180	0.0410	0.0110	0.0052	0.0004	0.0019	0.0003	-0.2760	33.3	2.5	40.0	11.0	340.0	540.0	33.3	2.5
Zircon_84	45	29	0.64	0.1300	0.1100	0.0560	0.0660	0.0051	0.0012	0.0013	0.0008	0.3406	32.6	7.9	47.0	63.0	-700.0	2900.0	32.6	7.9
Zircon_85	124	67	0.54	0.0780	0.0260	0.0410	0.0150	0.0051	0.0005	0.0019	0.0004	0.3848	33.0	3.0	43.0	15.0	530.0	650.0	33.0	3.0
DTN-300																				
Zircon_76	79.8	53.3	0.67	0.0490	0.0130	0.0334	0.0091	0.0050	0.0004	0.0016	0.0004	-0.0598	31.9	2.3	33.0	9.0	-140.0	480.0	31.9	2.3
Zircon_77	319	197.1	0.62	0.0509	0.0057	0.0333	0.0032	0.0049	0.0002	0.0017	0.0001	0.0118	31.3	1.2	33.2	3.2	170.0	220.0	31.3	1.2
Zircon_78	470	232	0.49	0.1150	0.0130	0.0833	0.0090	0.0053	0.0003	0.0033	0.0003	0.1809	33.8	1.7	81.1	8.4	1860.0	200.0	33.8	1.7
Zircon_79	515	284	0.55	0.0850	0.0130	0.0539	0.0077	0.0048	0.0003	0.0021	0.0003	0.0773	31.0	1.6	55.0	8.0	1250.0	310.0	31.0	1.6
Zircon_81	98.5	56.2	0.57	0.2750	0.0370	0.2550	0.0280	0.0070	0.0005	0.0084	0.0007	-0.0014	44.8	3.2	233.0	23.0	3260.0	230.0	44.8	3.2
Zircon_82	87.6	44.5	0.51	0.1800	0.0330	0.1280	0.0220	0.0057	0.0004	0.0043	0.0004	0.1813	36.4	2.3	121.0	19.0	2520.0	330.0	36.4	2.3
Zircon_87	74	45	0.61	0.0790	0.0230	0.0500	0.0120	0.0048	0.0006	0.0019	0.0004	-0.2638	30.7	3.7	49.0	11.0	720.0	590.0	30.7	3.7
Zircon_88	95	35.4	0.37	0.1690	0.0390	0.1230	0.0250	0.0055	0.0005	0.0049	0.0007	-0.0675	35.0	3.2	116.0	22.0	2290.0	420.0	35.0	3.2
Zircon_89	190	95.3	0.50	0.0510	0.0120	0.0326	0.0074	0.0049	0.0004	0.0015	0.0003	0.0402	31.4	2.3	32.4	7.3	140.0	480.0	31.4	2.3
Zircon_90	45.3	20.14	0.44	0.0900	0.0290	0.0540	0.0160	0.0049	0.0005	0.0026	0.0007	-0.1363	31.4	3.1	53.0	15.0	750.0	720.0	31.4	3.1
Zircon_91	83.7	51.1	0.61	0.1130	0.0230	0.0830	0.0180	0.0053	0.0004	0.0025	0.0004	0.1530	33.8	2.7	82.0	17.0	1690.0	400.0	33.8	2.7
Zircon_92	405	188.3	0.46	0.0456	0.0059	0.0297	0.0037	0.0047	0.0002	0.0016	0.0002	0.1743	30.3	1.0	29.7	3.7	0.0	240.0	30.3	1.0
Zircon_93	219	161	0.74	0.2340	0.0250	0.1910	0.0170	0.0060	0.0005	0.0052	0.0004	0.3037	38.6	3.1	177.0	15.0	3090.0	150.0	38.6	3.1
Zircon_94	143	69.7	0.49	0.2030	0.0240	0.1890	0.0240	0.0065	0.0004	0.0076	0.0009	0.3130	41.5	2.6	174.0	20.0	2850.0	210.0	41.5	2.6
Zircon_95	85.8	49.5	0.58	0.1950	0.0230	0.1450	0.0160	0.0056	0.0004	0.0048	0.0006	0.2320	35.9	2.4	136.0	14.0	2740.0	200.0	35.9	2.4
Zircon_97	52.6	23.29	0.44	0.4880	0.0630	0.8060	0.0930	0.0121	0.0012	0.0314	0.0040	0.2265	77.2	7.4	594.0	53.0	4200.0	170.0	77.2	7.4
Zircon_98	165	138	0.84	0.2340	0.0240	0.1880	0.0170	0.0060	0.0003	0.0046	0.0005	0.1340	38.7	2.2	177.0	14.0	3100.0	170.0	38.7	2.2

La interpretación de edad de cristalización fue realizada para todas las muestras, en base al diagrama de concordia de Wetherill (1956) y media ponderada, (Figura 4.6, 7,8 y 9).

De las unidades analizadas cronológicamente, el Intrusivo Palo Verde es la unidad más antigua, con una edad aproximada de 32.42 ± 0.49 Ma. Aun cuando las relaciones de campo establecen que la unidad Riodacita del Carmen (Prc) es más antigua que la unidad Riolita San Miguelito (Pdr), el resultado del análisis geocronológico indica que la unidad más joven es la Riodacita del Carmen, con una edad de 30.91 ± 0.60 Ma. El resultado en dos muestras para la Riolita San Miguelito fue 31.65 ± 0.60 y 31.87 ± 0.86 Ma (Figuras 4.6, 7, 8, 9 y 10. Tablas 4.1, 2).

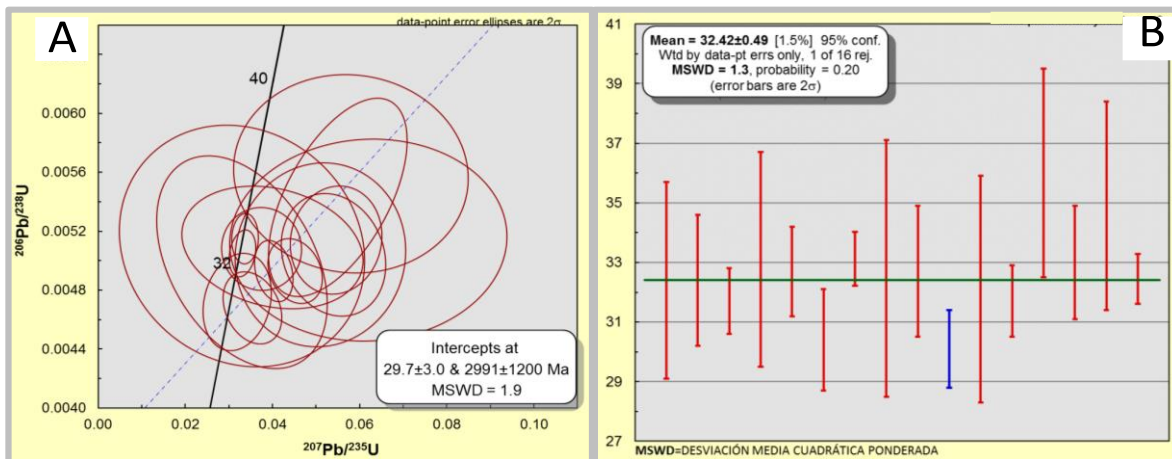


Figura 4.6. Graficas de las edades de los zircons obtenidos de la muestra RTN-015 correspondiente al Intrusivo Palo Verde. A) Diagrama de concordia de Wetherill (1956), mostrando la intersección inferior. B) Diagrama de edad media ponderada, mostrando la distribución de las edades registradas y su margen de error.

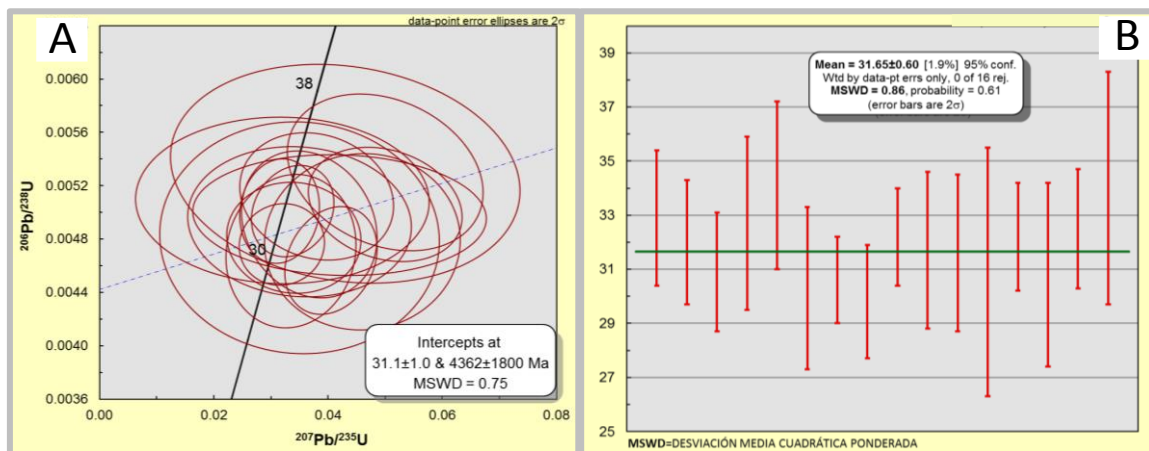


Figura 4.7. Graficas de las edades de los circones obtenidos de la muestra RTN-031 correspondiente a la Riolita San Miguelito. A) Diagrama de concordia de Wetherill (1956) mostrando la intersección inferior. B) Diagrama de edad media ponderada mostrando la distribución de las edades registradas y su margen de error.

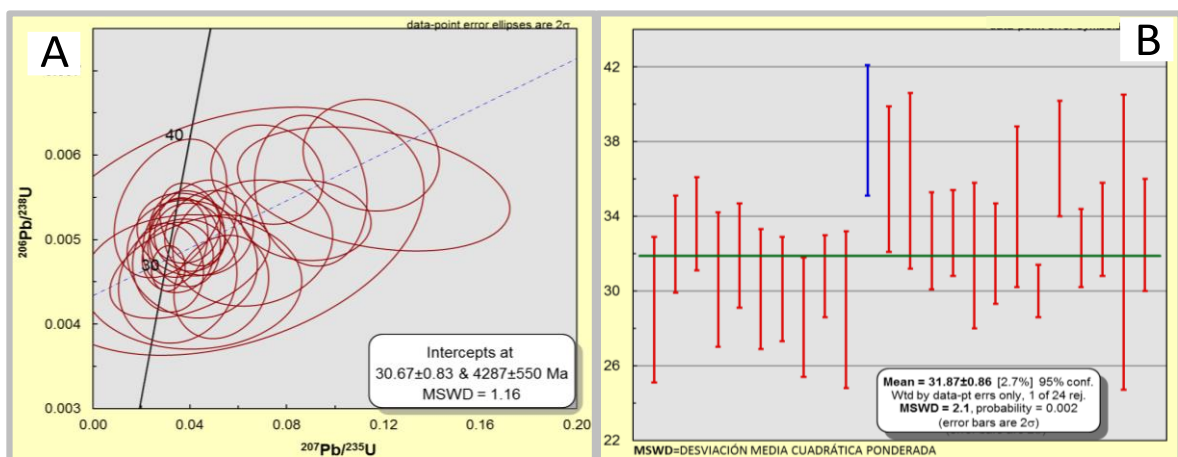


Figura 4.8. Graficas de las edades de los zircones obtenidos de la muestra RTN-065 que corresponde a la unidad Pdr (Domos Riolíticas). A) Diagrama de concordia de Wetherill (1956) mostrando la intersección inferior. B) Diagrama de edad media ponderada donde mostrando la distribución de las edades registradas y su margen de error.

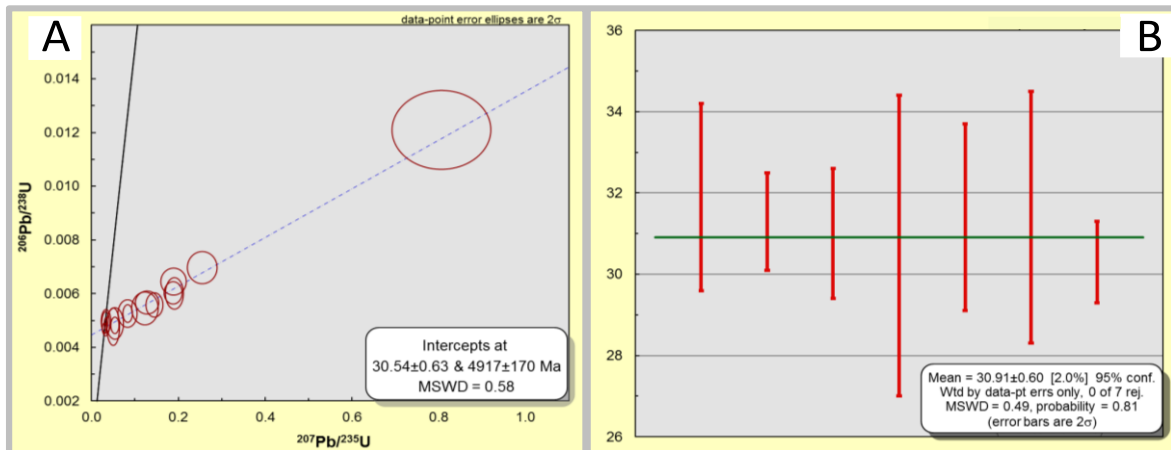


Figura 4.9. Gráficos mostrando edades de zircones y edad ponderada de la muestra RTN-300, correspondiente a la Riodacita del Carmen (Prc). Figura A) Diagrama de concordia de Wetherill (1956) mostrando la intersección inferior. Figura B) Diagrama de edad media ponderada mostrando la distribución de las edades registradas y su margen de error. Nótese que la edad asignada fue 30.91 ± 0.60 Ma, con una confiabilidad del 95%.

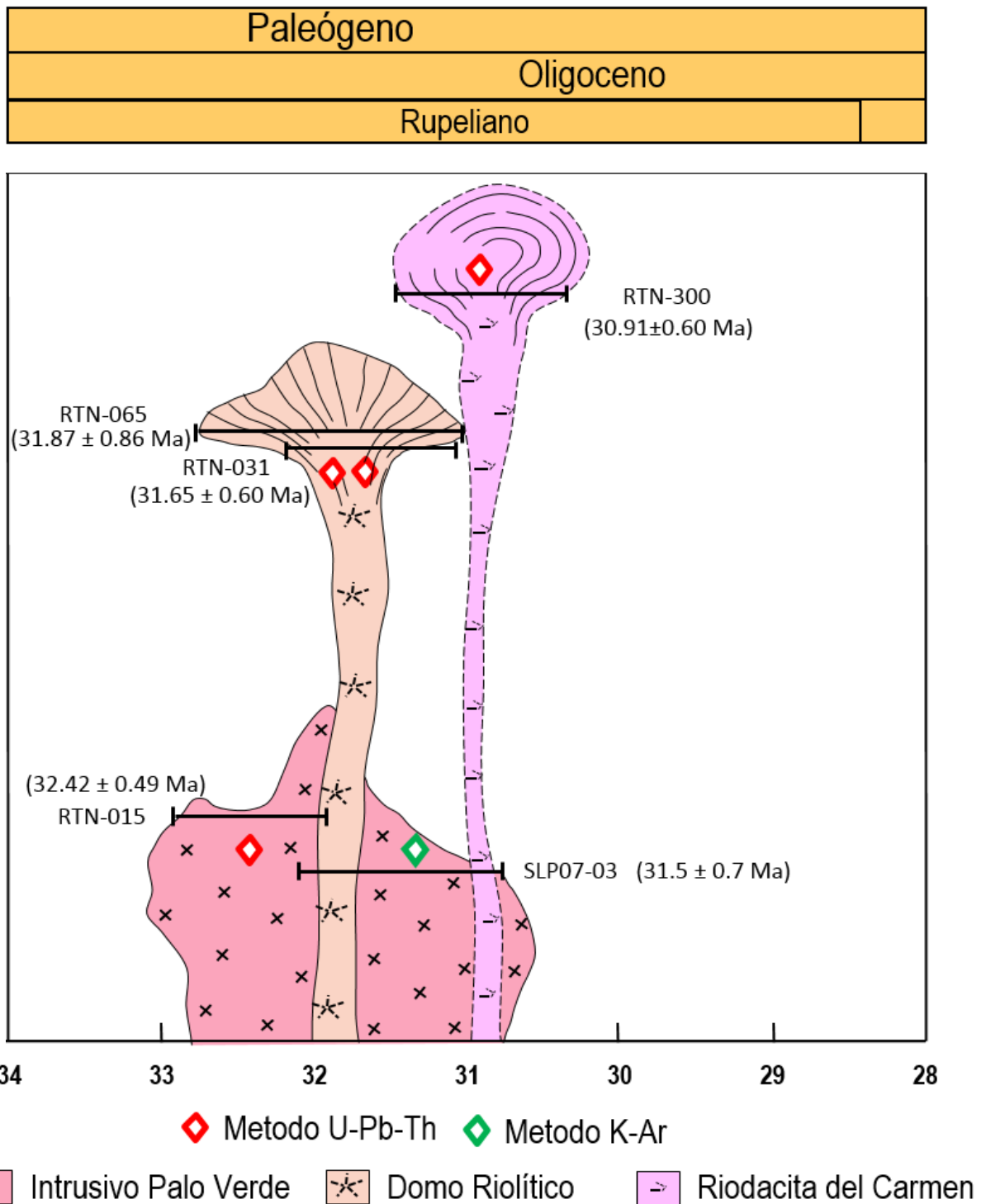


Figura 4.10. Gráfico mostrando la distribución espacial y edades de las muestras datadas. La muestra SLP07-03 fue datada por Tristán-González *et. al.*, (2009).

5. GEOLOGÍA ECONÓMICA

5.1. Alteración hidrotermal y supergénica

El cuerpo Intrusivo Palo Verde presenta aureolas de alteración hidrotermal y supergénica, lo cual es evidencia de hidrotermalismo magmático y posterior meteorización y/o intemperismo. El halo exterior consiste de metasomatismo de contacto y desarrollo de calco-silicatos, así como marmolización en colgantes calcáreo-arcillosos y calcáreos. El hidrotermalismo consiste de zonas de alteración fílica y local alteración potásica dentro del *stock*. A través del tiempo, un proceso de erosión e intemperismo fue desarrollado en las unidades litológicas, evidenciando intensa alteración supergénica en la cúpula del plutón y representado por oxidación y argilización.

El halo de calco-silicatos, marmolización y propilitización está también presente en las rocas calcáreas y volcánicas que son cortadas por el intrusivo. Para el área de estudio fueron mapeadas cinco zonas con alteración (Figura 5.1), clasificadas de la siguiente manera:

- 1) Zona Palo Verde (marmorización, propilitización)
- 2) Zona El Tigre-Peña de San Pedro (alteración fílica)
- 3) Zona La Ordeñita (alteración fílica y potásica)
- 4) Zona Lobos (alteración fílica, silicificación)
- 5) Zona Santa Rosa (alteración fílica, silicificación, oxidación, argilización)

La localidad Palo Verde, ubicada en la porción noroeste del área de estudio, presenta una zona de marmorización y un hornfels (metasomatismo de contacto), debido al emplazamiento del intrusivo a través de una secuencia sedimentaria marina constituida por caliza con horizontes de arenisca. El posterior emplazamiento de los domos félsicos a través de los sedimentos y el plutón, trajo consigo fluidos hidrotermales que generaron una zona de cloritización en la zona de contacto entre la caliza y la roca volcánica que precedió a los domos (Figura 5.2).

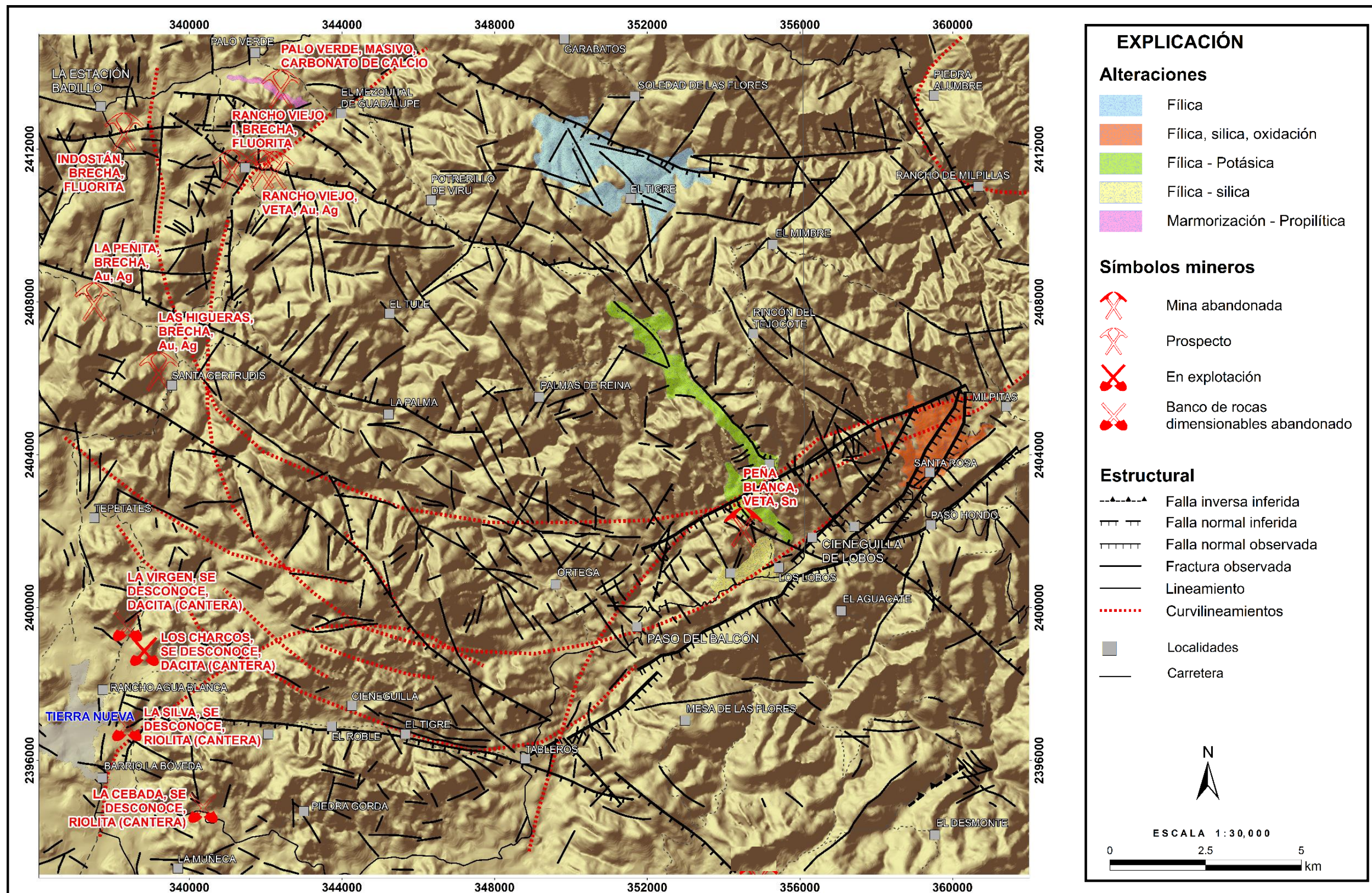


Figura 5.1 Mapa exhibiendo las alteraciones presentes en el área de estudio, así como la relación que existe entre las manifestaciones y la parte estructural.

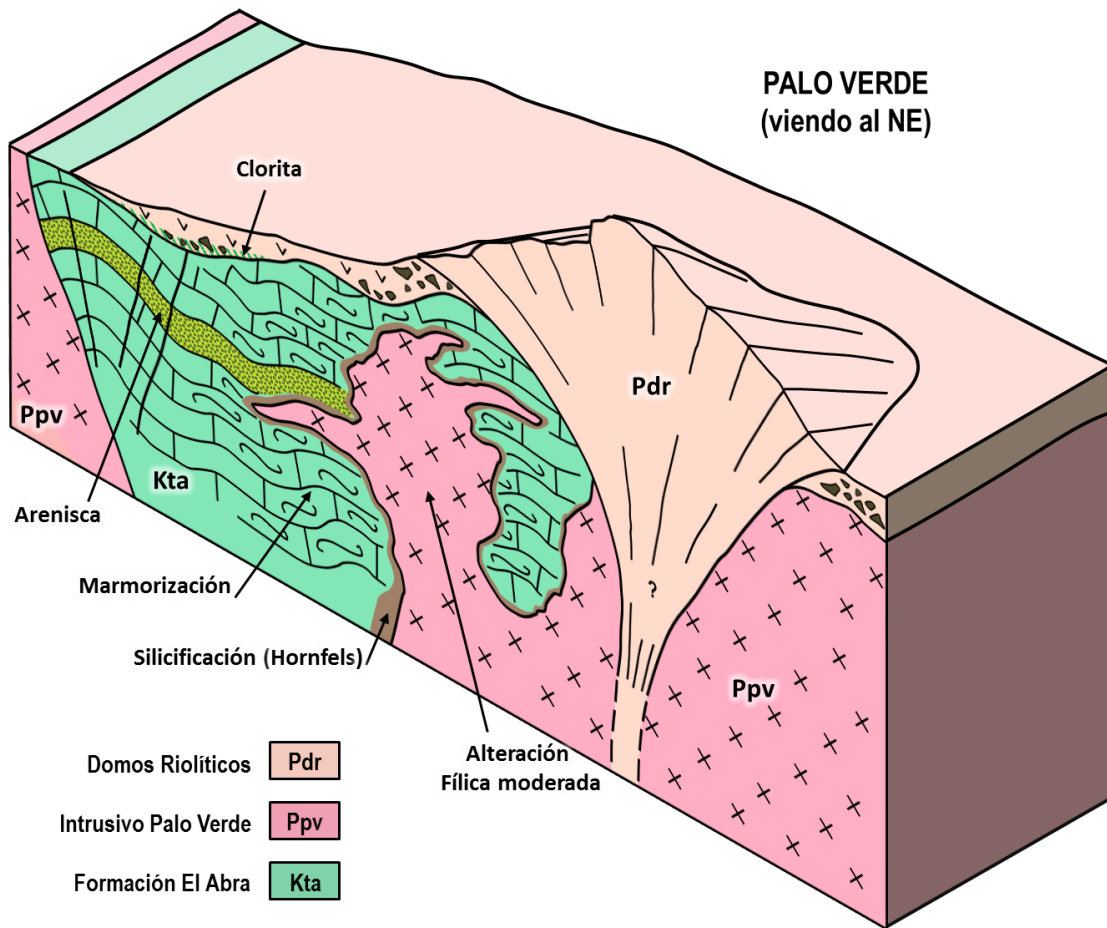


Figura 5.2. Bloque esquemático de la localidad Palo Verde, mostrando las alteraciones presentes, así como el emplazamiento de domos.

Dentro de la zona El Tigre-Peña de San Pedro existe alteración hidrotermal de tipo fílica con intensidad pervasiva, representada por venas tipo “D” desarrolladas en la roca intrusiva con textura porfídica. Las venas “D” están constituidas de cuarzo amorfo, sericita y hematita. Además, la roca intrusiva exhibe diseminación de sericita, limonita y local arcillas. La limonita es producto de oxidación de la pirita o magnetita y su coloración es ocre a rojo-miel, sugiriendo concentración de jarosita y, en menor cantidad de goethita, lo cual indica que la concentración original de sulfuros u óxidos primarios dentro del intrusivo era hasta del 10%. La pirita está completamente reemplazada por minerales de limonita, ocasionando oxidación (jarosita >> goethita) y posiblemente removilización de iones metálicos que pudieran estar concentrados a profundidad con potencial económico, dependiendo de los

niveles freáticos, es decir, la zona presenta alteración supergénica, formándose un *gossan* o casquete de hierro en la cima del *stock* (Figura 5.3, 4).

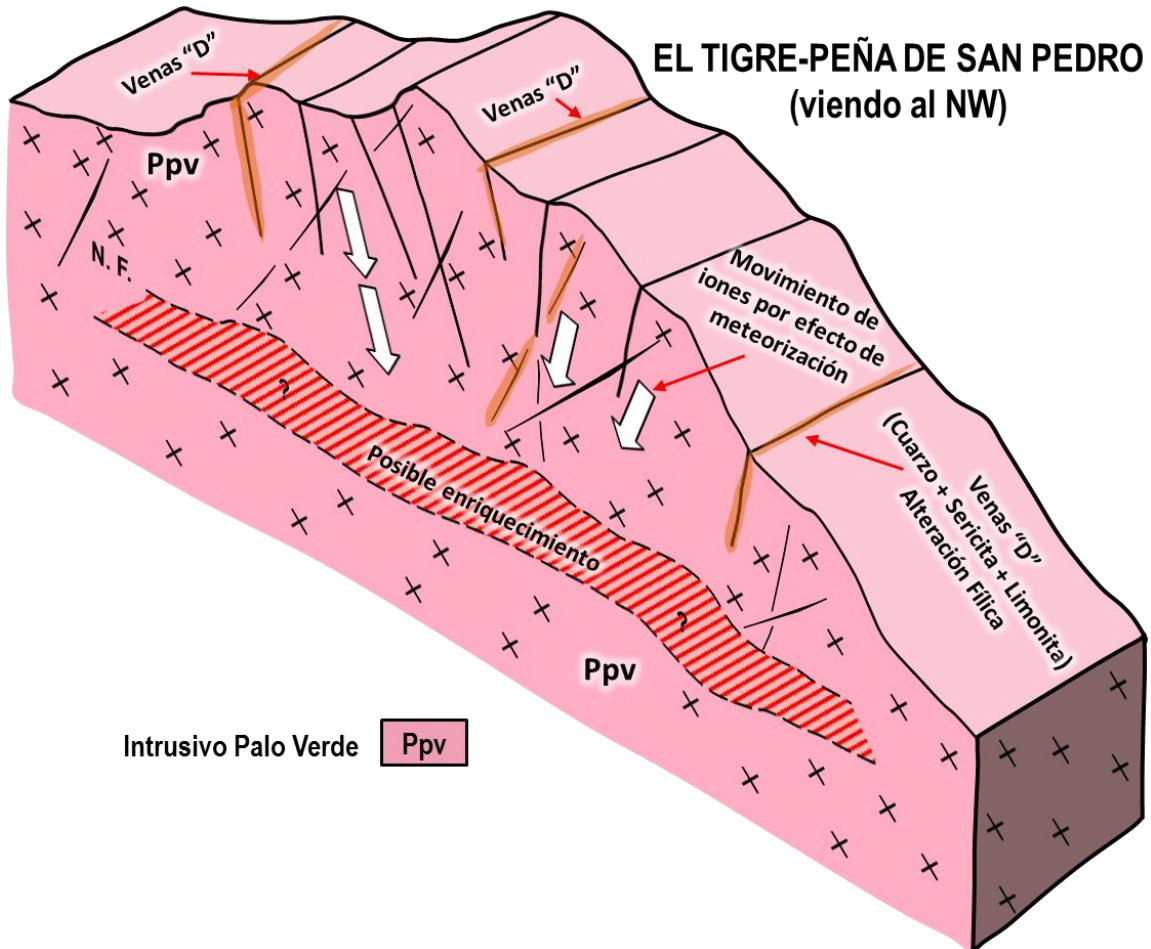


Figura 5.3. Sección esquemática de la localidad El Tigre-Peña de San Pedro, ubicada en la porción septentrional.

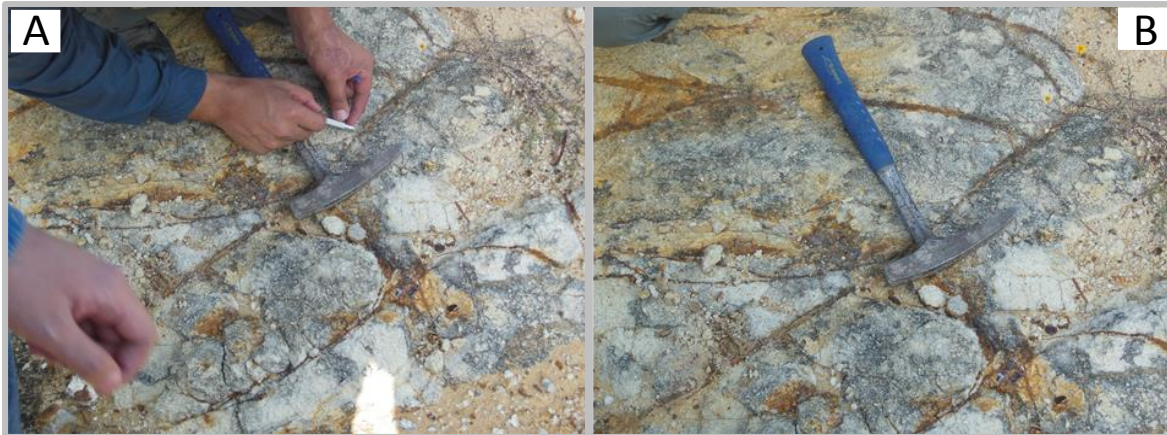


Figura 5.4. Fotografías mostrando alteración fílica representada por venas tipo “D”
A) Venas tipo “D” en la localidad El Tigre-Peña de San Pedro. B) Detalle del afloramiento anteriormente descrito.

En la zona La Ordeñita, el *stock* exhibe alteración fílica moderada, así como alteración potásica a nivel local. La alteración potásica está representada por biotita secundaria y ortoclasa hidrotermal. La alteración fílica está representada por venillas “D” que contienen sericita>>cuarzo>>limonita y, ocasionalmente, forman zonas de *stockwork* oxidado.

Las condiciones geológicas expuestas en el intrusivo erosionado y alterado, sugieren que el intrusivo está en un nivel de erosión cercano a la aureola de alteración potásica.

La alteración supergénica producto de la desintegración de la pirita u óxidos primarios (e.g. magnetita) pudo removilizar mineralización metálica a niveles más profundos y concentrarla a niveles freáticos (Figura 5.4, 5). Además, el emplazamiento de los domos riolíticos debió haber removilizado iones metálicos y productos de alteración hidrotermal dentro del *stock*.

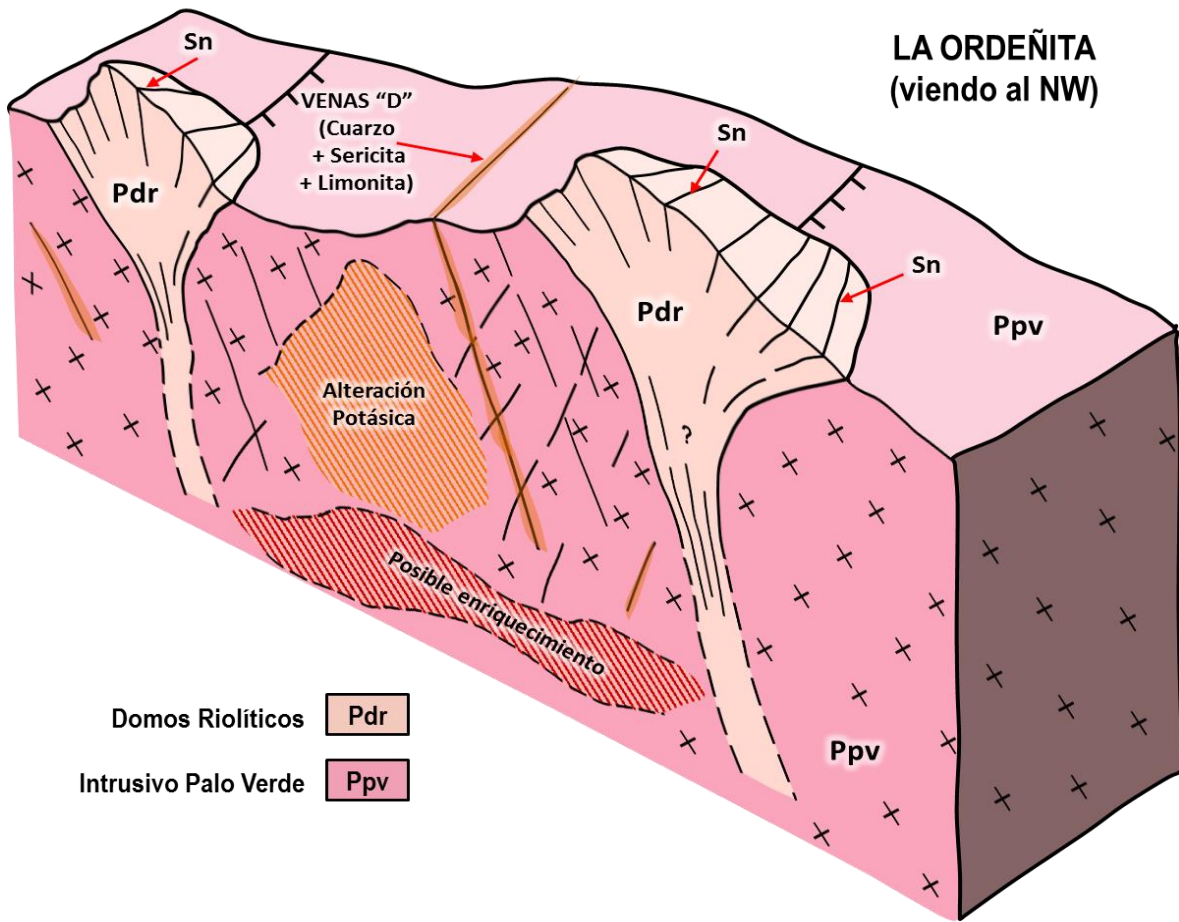


Figura 5.5. Sección esquemática del área La Ordeñita mostrando la relación de alteraciones hidrotermales respecto a los domos félsicos (Pdr).



Figura 5.6. Fotografías mostrando la alteración supergénica y detalle de zonas con *stockwork* oxidado A) Detalle de un *stockwork* oxidado. B) Afloramiento mostrando alteración supergénica.

La zona Lobos está representada por una secuencia de caliza recristalizada con restos de fósiles, afectada por un intrusivo porfídico de composición intermedia a félsica (emplazado en forma de *stock* y *sills*). Los *sills* generan un halo de silicificación y localmente precipitación de óxidos primarios (*i.e.* magnetita) dentro de la caliza. Estos *sills* presentan alteración fílica moderada (sericita >> cuarzo >> limonita), así como cloritización, la cual está desarrollada en los límites de estos cuerpos. Las rocas volcánicas fueron depositadas sobre superficies erosionadas de la secuencia sedimentaria y la roca intrusiva; y localmente en este contacto fue posible apreciar cloritización y silicificación.

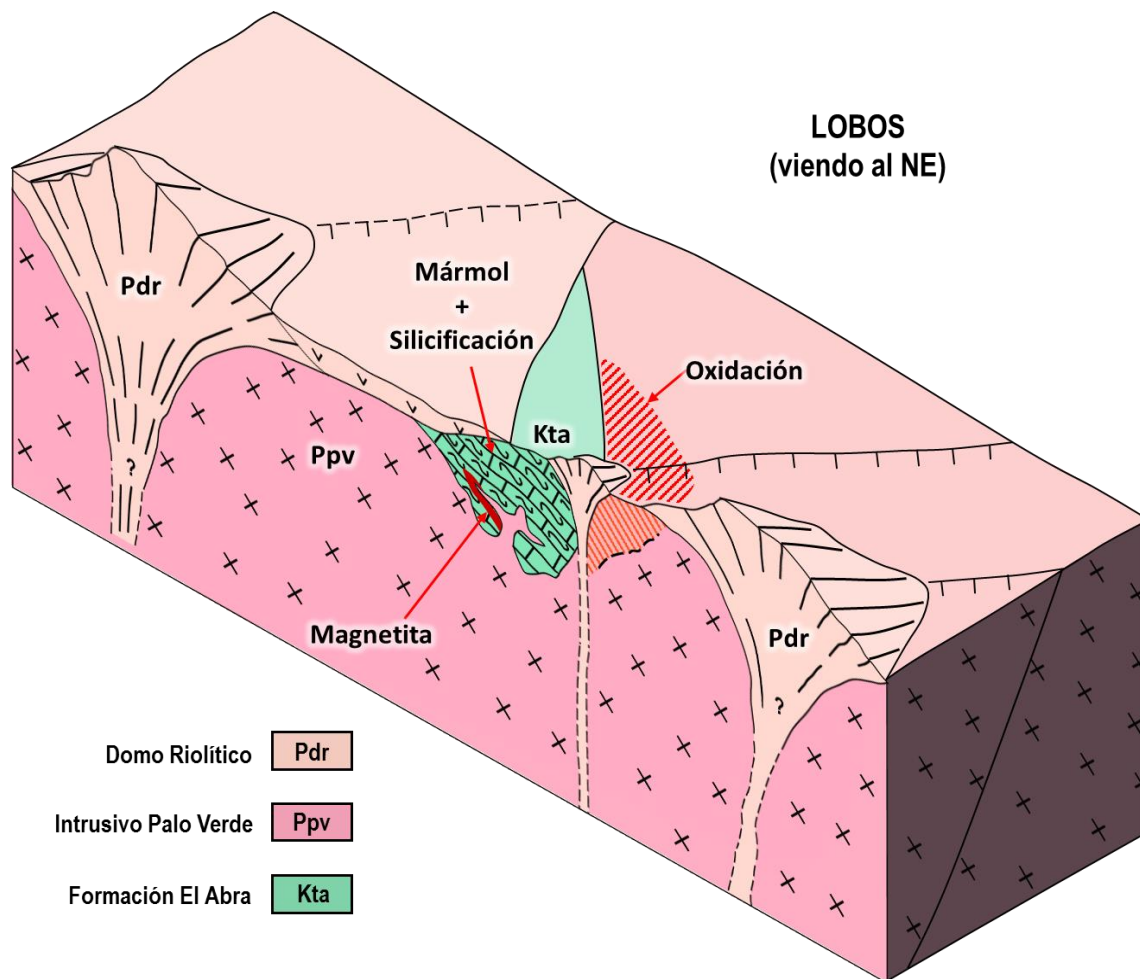


Figura 5.7. Bloque esquemático de la localidad Lobos, situada en la porción suroriental.

Existe oxidación dentro del intrusivo, producto de la desintegración de la pirita diseminada, pero sobre todo rellenando vetas “D” rellenas de sericita y cuarzo (Figura 5.6, 7).

La zona Santa Rosa presenta un amplio afloramiento de pórfido intermedio a félsico, de naturaleza intrusiva y que se manifiesta en forma de un *stock* alterado y erosionado. El pórfido muestra alteración fílica pervasiva, representada por vetas “D” rellenas de cuarzo>>sericita>>limonita; con halos de oxidación hasta de 30 cm, así como diseminación de sericita, pirita oxidada y magnetita. Además, el *stock* es caracterizado por su alto contenido de hematita titanífera (*i.e.* Ilmenita) con textura de exsolución, indicando la cercanía de un sistema de *skarn* (Figura 5.14).

La silicificación está desarrollada a nivel local en el pórfido con presencia de pirita diseminada y oxidación incipiente (Figuras 5.8, 9). Las muestras PTN-300, PTN-300B, PTN-301 y PTN-301B confirman la alteración argílica secundaria, representada por feldespatos remplazados a arcillas (Figuras 5.10, 11, 12, 13).

La alteración supergénica está presente en forma de limonita (jarosita>>goethita) dentro de fracturas y/o diseminado en la roca, así como arcillas diseminadas. El pórfido presenta zonas de *stockwork* de limonita, cuarzo y arcillas. Además, las zonas de silicificación están localmente desarrolladas en el intrusivo y muestran pirita con incipiente oxidación. La alteración supergénica producto de la desintegración de la pirita u óxidos primarios pudo remobilizar mineralización metálica a niveles más profundos, controlados a niveles freáticos (Figura 5.8).

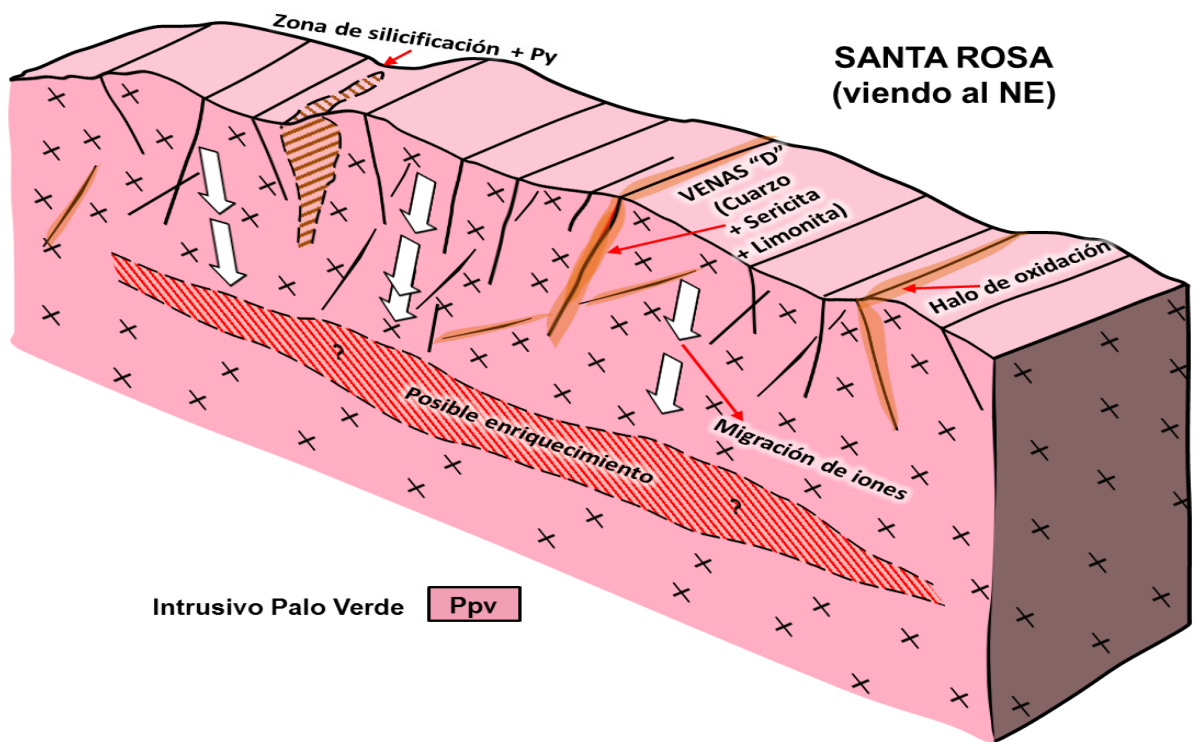


Figura 5.8. Sección esquemática de la localidad Santa Rosa, mostrando las alteraciones. N.F: Nivel Freático



Figura 5.9. Fotografías mostrando alteración en el Intrusivo Palo Verde. A) Afloramiento del Intrusivo Palo Verde mostrando alteraciones fílica, silicificación y oxidación. B) Detalle de una vetilla con relleno de sulfuros y halo de oxidación en la localidad Santa Rosa.

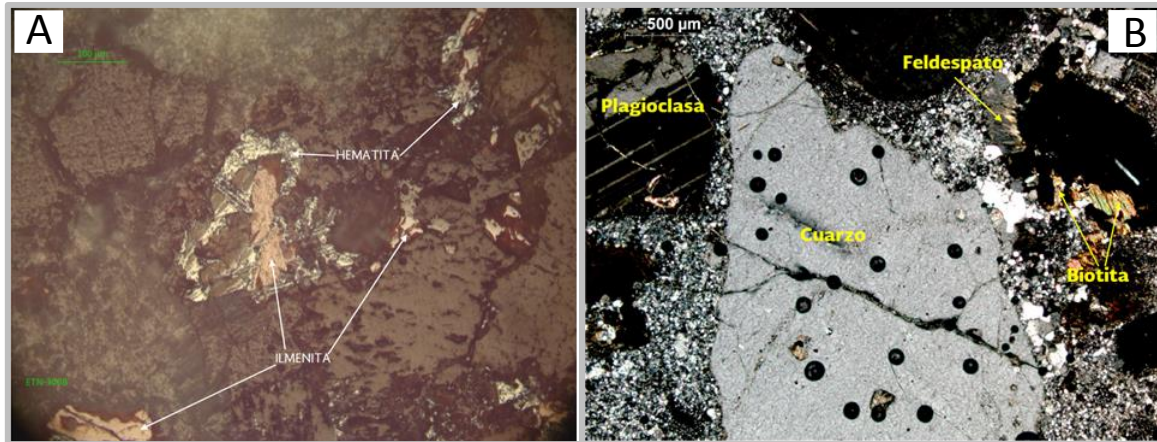


Figura 5.10. Fotomicrografías mostrando detalle de minerales opacos y transparentes en el Ppv. A) Muestra cristales de hematita e Ilmenita asociados, relleno de huecos en la matriz de la roca. B) Son apreciables cristales de cuarzo de bordes reabsorbidos y afectados por microfracturamiento, plagioclasa con maclado polisintético, feldespato de apariencia parda provocada por argilitización y biotita con exfoliación en una dirección, capturadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada paralela y objetivo de 5X y 20X.

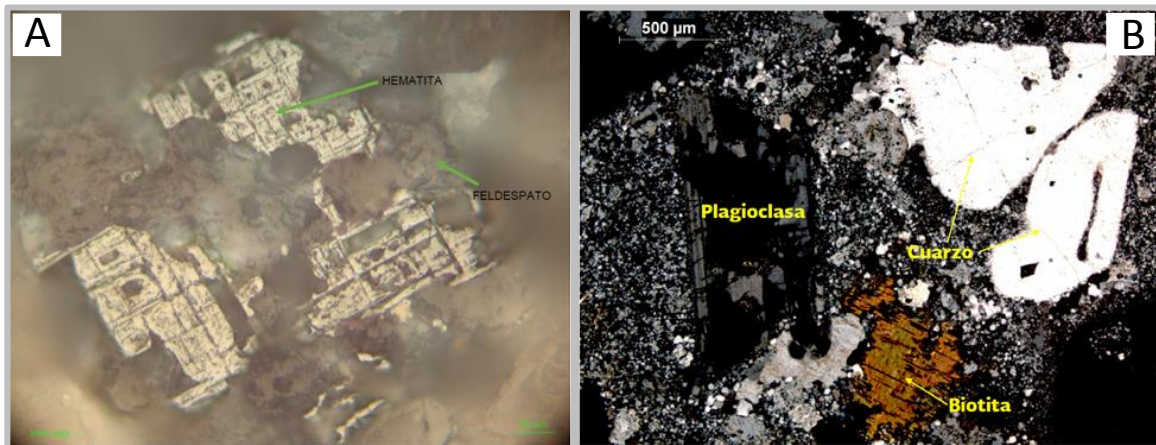


Figura 5.11. Fotomicrografías exhibiendo estructura de minerales del Intrusivo Palo Verde. A) Feldespato reemplazado por hematita titanífera con planos de un clivaje. B) Ojos de cuarzo reabsorbido, biotita y plagioclasa sobre matriz microcristalina con cristales de cuarzo y feldespato, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada y objetivo de 50X y 50X con luz paralela plana.

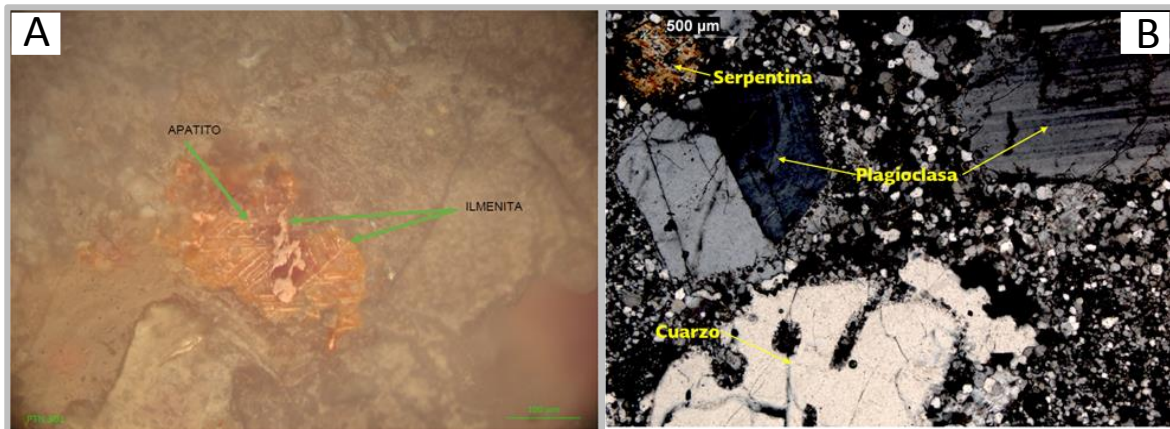


Figura 5.12. Fotomicrografías mostrando detalle de ilmenita y apatito reemplazando a feldespato y cuarzo reabsorbido. A) Ilmenita y apatito reemplazando a feldespato a través los planos de clivaje. B) Fenocristales de plagioclasa con maclado polisintético, cuarzo con bordes reabsorbidos provocados por reacción de inestabilidad y serpentina con tonos de birrefringencia de segundo orden, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada y objetivo de 20X y 5X con luz paralela plana.

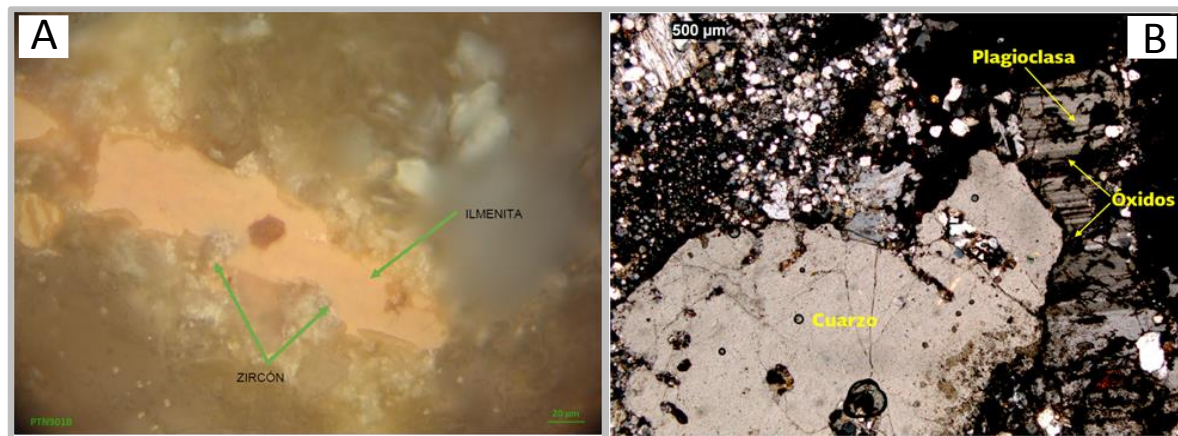


Figura 5.13. Fotomicrografías mostrando ilmenita, zircón, cuarzo y feldespato. A) Cristal de ilmenita y en la parte central una bahía de corrosión, presenta asociación con zircón. B) Exhibe una matriz compuesta por microcristales de cuarzo-feldespato soportando fenocristales de cuarzo reabsorbido y plagioclasa reemplazada parcialmente por óxidos, tomadas con microscopio óptico polarizante de luz reflejada y objetivo de 50X y 5X con luz paralela plana.

5.2. Mineralización (fluorita, estaño, y magnetita)

El potencial económico del área de estudio viene dado por los efectos ocasionados por el Intrusivo Palo Verde y los domos félsicos. Dentro del área de estudio (*i.e.* en la localidad Santa Rosa) la interpretación de imágenes de satélite permite identificar lineamientos estructurales kilométricos, que son interpretados como límites de calderas. Los bordes de dichas calderas constituyen fallas y fracturas que proveen vías permeables para el emplazamiento tanto de pulsos plutónicos y magmáticos (*i.e.* intrusivos y domos, respectivamente), así como como efectos hidrotermales y deposición de mineralización metálica y no metálica en forma diseminada o bien en filones y vetas. Por ejemplo, los domos concentran venas con mineralización de estaño, presumiblemente debido al efecto neumatolítico.



Figura 5.14. Fotografías mostrando metasomatismo de contacto. A) Es posible apreciar una franja de silicificación y *hornfels*. B) Es posible ver un cuerpo intrusivo félsico en forma de *sill* que generó un halo de marmorización en caliza.

La intrusión del plutón Palo Verde originó metamorfismo de contacto o metasomatismo en las rocas sedimentarias que intrusionó durante el emplazamiento. Debido a la naturaleza calcárea de las rocas encajonantes, una aureola de marmorización fue desarrollada en la zona de contacto entre el intrusivo y la secuencia sedimentaria marina cretácica (Figura 5.14). El metasomatismo es

también generador de un halo de *hornfels* caracterizada por minerales calcosilicatados (posible mineralización tipo *skarn*).

El Área Santa Rosa presenta características favorables para la concentración de depósitos auríferos en forma diseminada, con enriquecimiento supergénico concentrados en el nivel freático. Óxidos primarios y local sulfuros están presentes dentro del halo de alteración de calco-silicatos e intrusivo indicando que el Intrusivo Palo Verde es un pórfido productor (Figura 5.15). La meteorización de los óxidos primarios y sulfuros de hierro han ocasionado zonas de limonita, que es posible observar concentrada en fracturas y venas dentro del intrusivo, formando localmente zonas de *stockwork*.



Figura 5.15. Fotografías mostrando vetas tipo “D” y halo de oxidación. A) Intrusivo cortado por venas con hematita, goethita, jarosita y halo de alteración de cuarzo-sericita. B) Detalle del afloramiento descrito.

Los eventos magmáticos posteriores al Intrusivo Palo Verde, representados por los cuerpos hipabisales emplazados en forma de estructuras dómicas y diques ocasionaron hidrotermalismo. Estos cuerpos hipabisales con expresión volcánica pudieron removilizar mineralización previa, ocasionando un enriquecimiento en algunas zonas. Además, éstos pudieron aportar por sí mismos fluidos mineralizantes que precipitaron dentro de los sistemas de fallas y fracturas, dando

lugar a la formación de filones o vetas, así como brechas hidrotermales con potencial de mineralización de estaño, fluorita y metales preciosos (*i.e.* Au-Ag).

Dentro del área de estudio existen obras mineras que son prueba del potencial económico de la zona (Figura 5.1.). Estas manifestaciones minerales son producto del hidrotermalismo ocasionado tanto por el Intrusivo Palo Verde como por los domos félsicos.

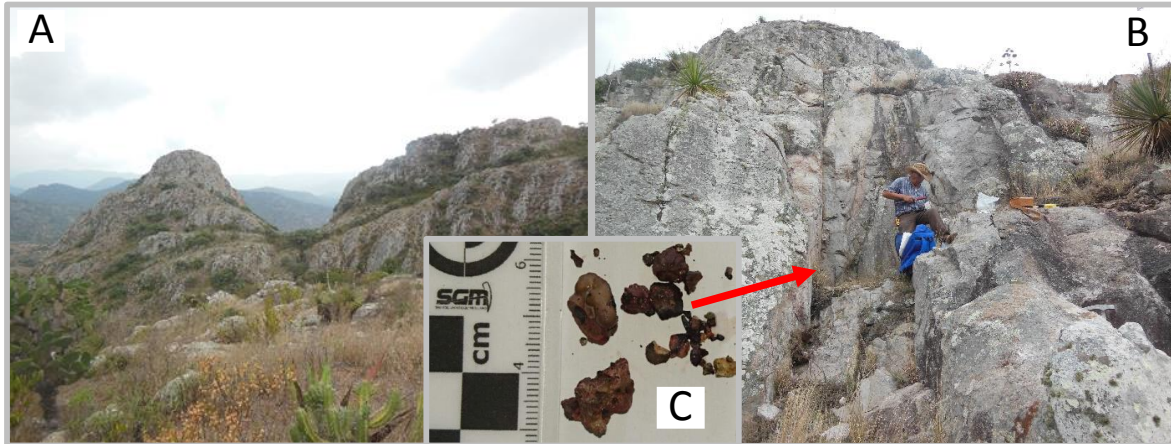


Figura 5.16. Fotografías mostrando domo riolítico y mineralización de estaño. A) Domo de composición riolítica (Pdr). B) Detalle de un afloramiento dentro del domo mostrando diaclasamiento vertical con mineralización de estaño. C) Detalle del estaño.

En la porción suroriental, en la localidad Peña Blanca y El Divisadero, existen pequeñas obras mineras dentro de los domos félsicos. Éstas fueron labradas artesanalmente debido a la presencia de minerales de estaño, que ocurre como relleno de fisuras en la riolita (Figura 5.16).

Al noroeste del área de estudio están localizadas las obras mineras denominadas Rancho Viejo I y Rancho Viejo II con mineralización de fluorita (Figura 5.17). En la primera está expuesta una brecha de borde, es decir, estructura desarrollada en uno de los flancos de un domo riolítico, y en contacto con el Intrusivo Palo Verde. Esta brecha contiene fluorita, calcita, pirolusita, óxidos de hierro y cuarzo amorfo. La obra Rancho Viejo II fue desarrollada siguiendo una veta, correspondiente a la traza de la falla que delimita el contacto entre un domo riolítico

y el intrusivo (Figura 5.18, 19). La veta está conformada por cuarzo calcedónico, pirolusita, óxidos de hierro (jarosita-goethita) y fluorita.



Figura 5.17. Fotografías mostrando veta de fluorita. A) Tajo labrado sobre la traza de la falla Rancho Viejo. B) Vista panorámica del tajo.



Figura 5.18. Fotografías mostrando obras mineras en la localidad Rancho Viejo I. A) Obra minera desarrollada en dirección de la traza de la falla Rancho Viejo I y encajonada en el Intrusivo Palo Verde (Ppv), de la cual fue extraída fluorita. B) Socavón labrado sobre la traza de falla Rancho Viejo I, con las mismas características litológicas.

Por otra parte, el halo de mármol presenta diseminación de óxidos primarios. Estos consisten de magnetita diseminada especular, así como local concentraciones de magnetita fina, evidenciada en la zona de mármol (Figura 5.20).

Esto sugiere que el Intrusivo Palo Verde aportó mineralización metálica depositándola en el halo de metasomatismo y probablemente en el *stock* y diques.

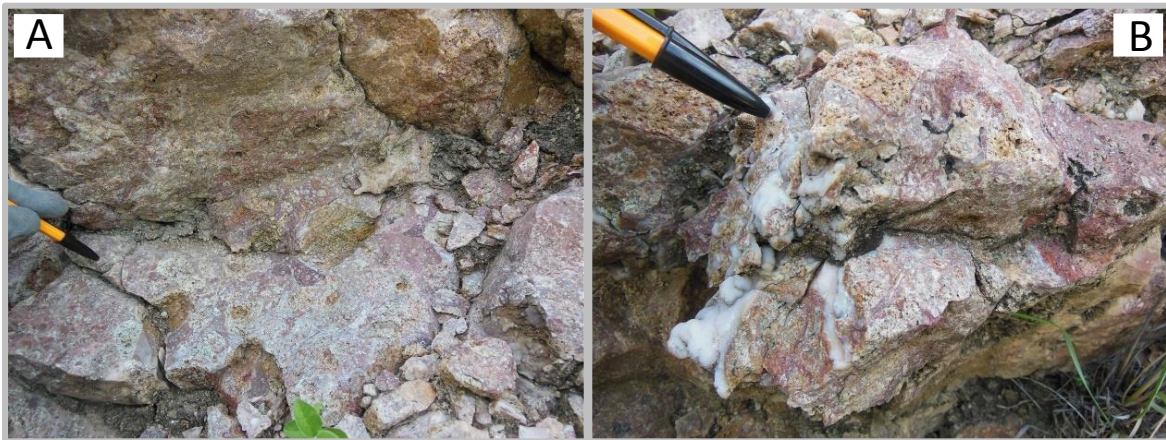


Figura 5.19. Fotografías mostrando brecha de borde. A) Brecha de borde en zona de contacto entre domo riolítico e Intrusivo Palo Verde, la cual presenta fluorita y sílice como cementante. B) Detalle de la brecha, incluyendo cuarzo calcedónico y óxidos de Fe.



Figura 5.20. Fotografías mostrando mármol diseminación de óxidos primarios. A) y B) Mineralización de magnetita diseminada en el halo de mármol dentro de la caliza recristalizada (Kta) en la localidad Lobos.

5.3. Análisis de datos aeromagnéticos

Durante la prospección de yacimientos minerales es necesario la utilización de métodos indirectos como la geofísica. En este estudio fue realizada una interpretación de datos aeromagnéticos auspiciados por del SGM. El campo magnético total es representado por anomalías altas y bajas que representan las características físicas de las unidades litológicas, dependiendo de la susceptibilidad magnética de cada unidad. Por ejemplo, los plutones pueden estar representados por una anomalía negativa al septentrional y una anomalía positiva al meridional.

Otros filtros como reducción al polo y primera derivada vertical permitieron corroborar los rasgos geológicos del subsuelo, infiriendo la distribución y naturaleza de cuerpos plutónicos, rocas volcánicas félsicas a máficas y rocas sedimentarias, así como posibles fallas, esto a partir del contraste de magnetización de los materiales del subsuelo. Lo anterior con la finalidad de interpretar la constitución del subsuelo, que coadyuve a soportar zonas con potencial geo-económico.

Derivado de la interpretación de la información aeromagnética fueron definidos dominios magnéticos. En general, el denominado A, es interpretado como una respuesta magnética de un cuerpo ígneo con dimensiones batolíticas (Figura 5.21). El segundo dominio B, es atribuido a los afloramientos de rocas volcánicas con respuestas suaves y de baja intensidad magnética (*i.e.* rango de 70 a -70 nT) (Figura 5.21). Además, una serie de lineamientos magnéticos (líneas discontinuas en la Figura 5.22) están presentes en el área y son interpretadas como fallas regionales.

El cuerpo batolítico interpretado incluye gran parte del área de estudio, así como zonas aledañas (*i.e.* porciones septentrional y meridional). En la zona sobresale una anomalía provocado por la intrusión plutónica, definida por un alto magnético con anomalía de 140 a -140 nT, delimitada por lineamientos magnéticos, que han sido interpretados como fallas regionales con rumbos NW-SE y NE-SW.

Específicamente, en el área de estudio fueron definidos cuatro dominios magnéticos, los cuales a continuación son descritos: a) Dominio magnético A₁, atribuido a rocas intrusivas de composición félsica a intermedia; b) Este dominio

está constituido por anomalías dipolares y amplias distorsiones magnéticas de bajos gradientes e intensidad, posiblemente correlacionables a cuerpos hipabisales; c) Dominio magnético A₂, atribuido a la respuesta de cuerpos intrusivos intermedios a máficos, definidos por anomalías dipolares de altos gradientes e intensidad; y d) Dominios magnéticos B₁ y B₂, atribuidos a rocas volcánicas félsicas a intermedias (B₁) y a rocas volcánicas intermedias a máficas (B₂). Dos sistemas principales de lineamientos magnéticos fueron definidos dentro del área de estudio. El conjunto de lineamientos predominante es de rumbo NW-SE. El segundo sistema de lineamientos presenta una orientación NE-SW. Estos lineamientos representan fallas de origen profundo y que delimitan estructuras de grandes dimensiones.

Tomando como base la información descrita, pueden definirse zonas prospectivas con potencial económico. Las zonas favorables para exploración minera son generalmente correlacionables a los dominios magnéticos A₁ y A₂, así como sus bordes. Es importante mencionar que las áreas más favorables están presentes principalmente en zonas de contacto así como las zonas entre los Domos Riolífticos e Intrusivo Palo Verde, donde pueden contener depósitos tipo *skarn* o tipo *stockwork*. La ubicación del área de estudio permite hipotizar zonas favorables para la concentración de mineralización, debido a una zona limítrofe entre provincias geológicas, que favoreció el emplazamiento de cuerpos plutónicos y volcánicos. El Ppv ocasionó metasomatismo, alteración hidrotermal, así como diseminación de magnetita, sulfuros de hierro y fluorita. Presumiblemente, el emplazamiento de los domos riolífticos y riódacíticos que cortan a la secuencia sedimentaria e intrusivo, pudieron coadyuvar con la concentración de mineralización. Además, las soluciones hidrotermales que acompañaron a los magmas pudieron haber sido enriquecidos por la removilización de depósitos más antiguos, que se desarrollaron dentro de las provincias Zacatecana y PVSLP. Por otra parte, el diaclasamiento de rocas plutónicas de la unidad Riódacita del Carmen favorece la ocurrencia de lajas volcánicas que son usadas para la obra civil, principalmente en revestimiento de fachadas y pisos.

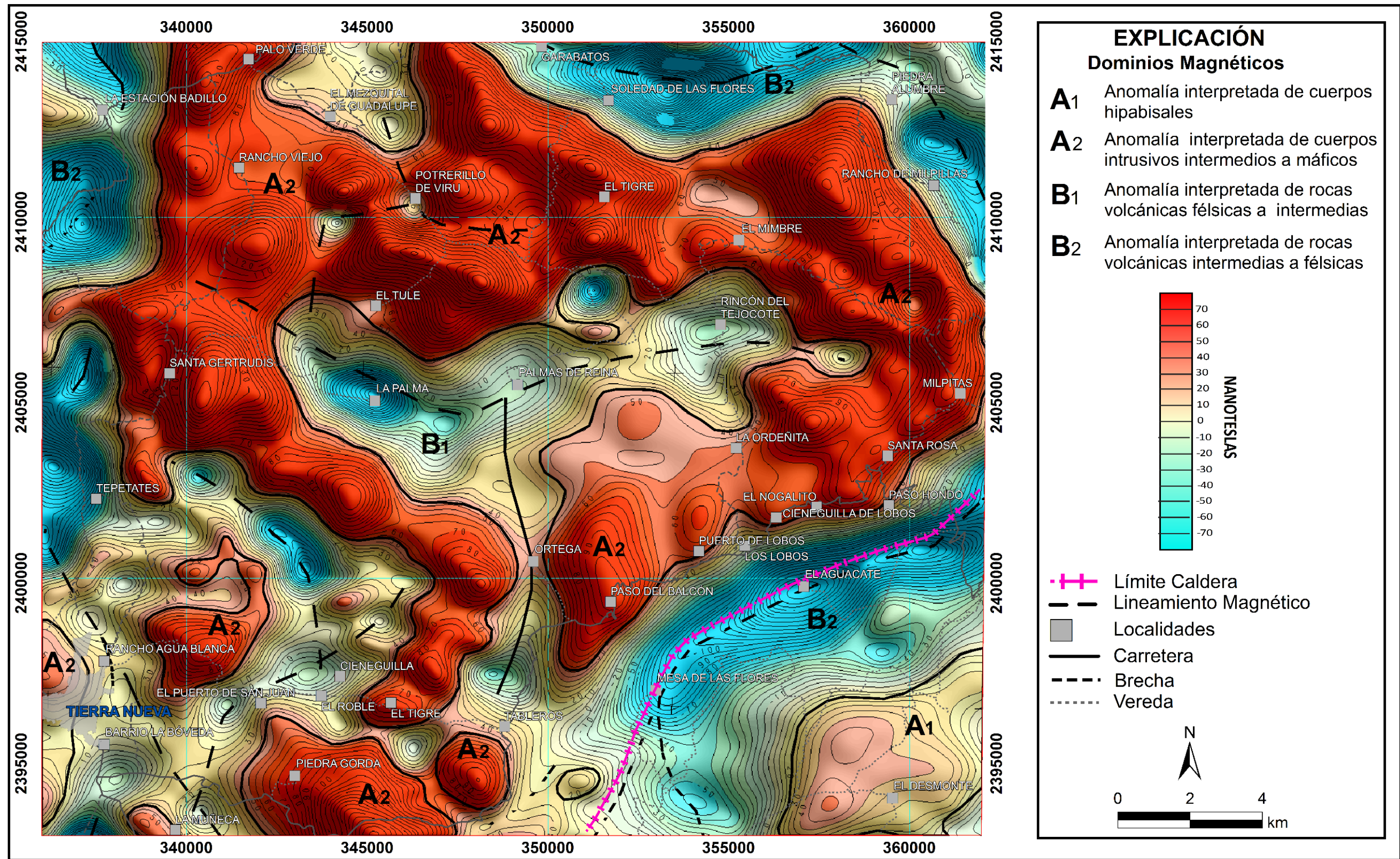


Figura 5.21. Mapa de reducción al polo del campo magnético total. Nótese la distribución de dominios magnéticos A₂ (interpretados como cuerpos plutónicos a profundidad, y que posiblemente son las raíces o fuente de los domos félsicos que tenemos en superficie) B₁ y B₂, así como los lineamientos magnéticos, uno de los cuales coincide con el límite de la caldera San Antón.

6. MODELO DE EMPLAZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DÓMICAS

En la región de estudio, durante el Cretácico Tardío al Paleógeno Temprano, esfuerzos compresivos deformaron y plegaron las rocas que constituyen a la secuencia sedimentaria marina de la provincia Zacatecana y el límite occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP), evento conocido como Orogenia Laramide. Además, otros de los efectos posteriores fue el magmatismo y vulcanismo de la Sierra Madre Occidental (Figura 6.1A, B). La sutura de la junción entre estas provincias (*i.e.* Zacatecanas y PVSLP) favoreció al emplazamiento de magmatismo en forma de *stock*, *sills*, domos, lavas y piroclásticos.

En la zona de estudio es caracteriza por tener varios unidades volcánicas que constituyen el CVRSM. Probablemente, la cámara magmática empezó a vaciarse debido al emplazamiento de la Riodacita del Carmen, depositada en forma de flujos lavicos y domos riodacíticos, considerada precaldérica. Aunque las edades isotópicas obtenidas en esta investigación sugieren que la Riodacita del Carmen es más joven que el Intrusivo Palo Verde, el trabajo de campo ha demostrado que el segundo es posterior, o bien, la riodacita podría representar la parte hipabisal y volcánica del mismo magmatismo que originó Intrusivo Palo Verde (Figura 6.1C).

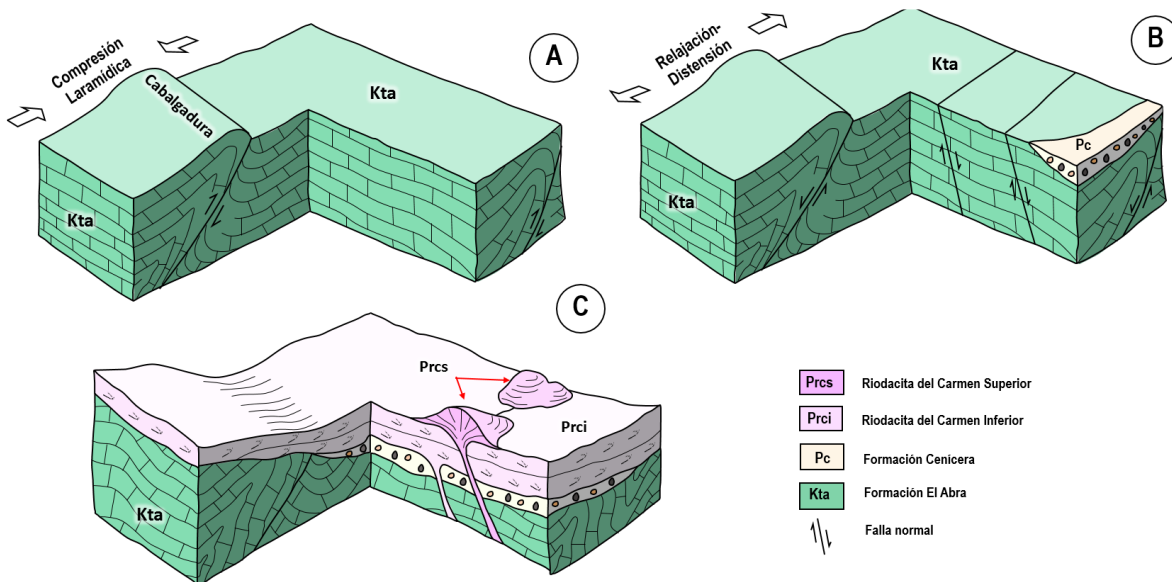


Figura 6.1. Diagramas esquemáticos mostrando la evolución tectónica y modelo de emplazamiento de la unidad precaldérica.

Durante la actividad de la cámara magmática, el material dentro de ella fue presumiblemente expulsado, generando grandes volúmenes de piroclásticos que constituyen la secuencia de tobas e ignimbritas de las unidades litológicas denominados Ignimbrita Santa María y El Órgano. Conforme la cámara magmática fue vaciándose, el techo de la misma colapsó, generando un conjunto de bloques colapsados hacia la porción suroriental del área de estudio, que es considerada el límite noroccidental de la denominada caldera San Antón (Figura 6. 2D, E).

Los límites o bordes entre los bloques colapsados y los bloques estables constituyeron fallas y fracturas. Posteriormente al colapso de la caldera, el flujo de magma continuo a través de dichas fallas, dando origen a flujos y domos dacíticos de la Serie Potrerillo sobre la margen de la Caldera San Antón (Figura 6. 2F).

Consecutivamente, el Intrusivo Palo Verde emplazó el emplazamiento y cristalización durante el Oligoceno a través de la secuencia sedimentaria marina cretácica y afectando a todas las unidades volcánicas (*i.e.* Unidad Cretácica, El Abra y CVSM). Esto ocasiono probablemente plegamiento, fracturamiento, alteración hidrotermal y deposición de mineralización (Figura 6.3). El intrusivo con textura porfídica representa la parte plutónica, aunque puede contener porciones hipabísales.

Finalmente, los domos riolíticos fueron emplazados en los sistemas NW-SE y NE-SW. La extensión regional generó probablemente conductos que fueron aprovechados por la última etapa del vulcanismo con un posible evento de transtensión, seguramente, repetitivos pulsos magmáticos dieron lugar a la serie de domos aglutinados (*i.e.* Pdr; Figura 6.3).

Por otra parte, la interpretación de los lineamientos estructurales resultó en la detección de dos rasgos principales relacionados al emplazamiento de magmas, que formaron domos félsicos. El primero está ubicado en la localidad de Santa Rosa, correspondiente a un lineamiento de orientación aproximada NE 65° SW, con más de 13 km de longitud, que está emparentado a una porción de un lineamiento de mayores dimensiones de geometría circular que continúa hacia la parte suroriental. El otro rasgo es un curvilineamiento situado al noroccidental del primero

con un diámetro aproximado de 10 km, por donde emplazaron magmas en forma de domos localmente aglutinados y aislados. Además, el análisis estructural sugiere que los lineamientos corresponden a posibles límites de calderas, es decir, cámaras magmáticas colapsadas (Figura 6. 2, 3).

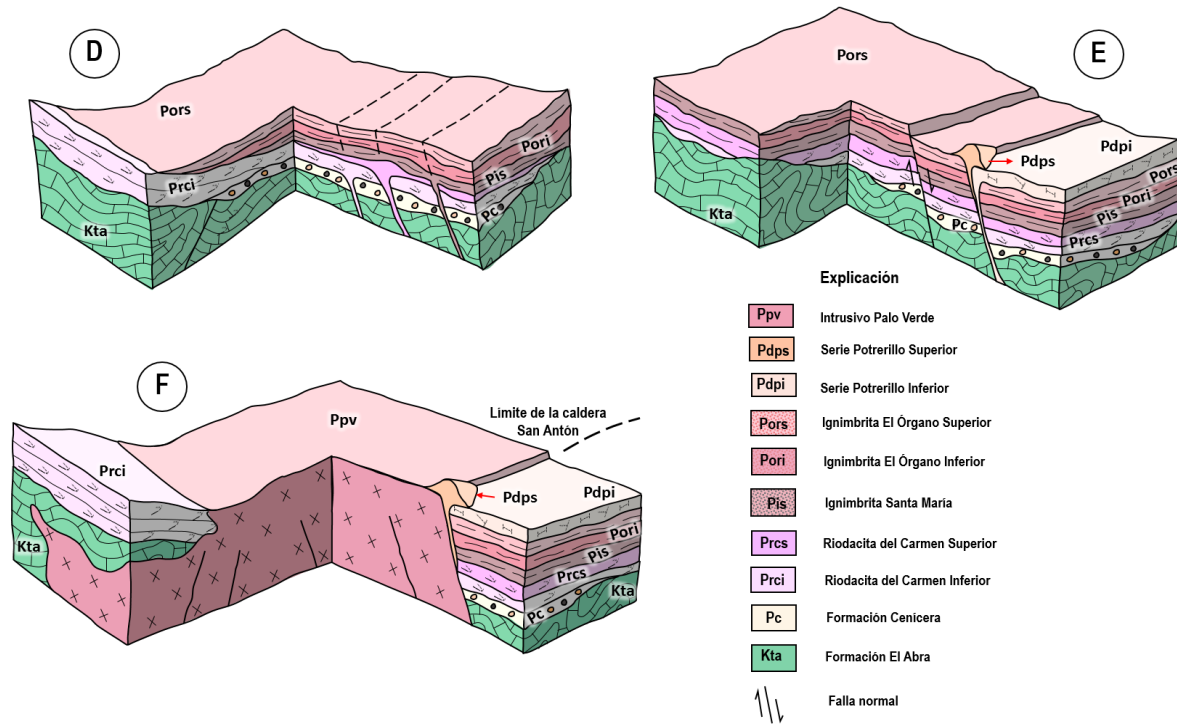


Figura 6.2. Diagramas esquemáticos mostrando la evolución tectónica y modelo de emplazamiento del Intrusivo Palo Verde, domos dacíticos y lavas de la Serie Potrerillo.

Cabe mencionar que los esfuerzos compresivos orientados al NE dieron origen a pliegues y cabalgaduras (fallas inversas con orientadas NW-SE). Asociado a este régimen de compresión, fueron desarrolladas estructuras distensivas en sentido ortogonal al plegamiento (rumbo NE-SW), en forma de fallas normales y grietas de tensión. Durante el Paleógeno ocurrió un proceso de relajamiento de la compresión, reactivándose fallas preexistentes. Esta distensión creó vías de flujo para el vulcanismo piroclástico (Campo Volcánico del Río Santa María) que cubrió de manera discordante a las rocas sedimentarias del Mesozoico.

Además, dichas vías de permeabilidad fueron aprovechadas para el emplazamiento de un cuerpo plutónico de composición cuarzomonzonítica,

denominado Intrusivo Palo Verde con edad de ~32.4 Ma. La actividad volcánica continuó tras el emplazamiento del intrusivo, vaciando la fuente del magmatismo o cámara magmática, con lo cual el techo de la cámara colapsó, a través de las zonas de debilidad (*i.e.* fallas preexistentes NE-SW, así como sus respectivas coalescencias de geometría circular o curvilineamientos), formando series de bloques escalonados que dieron lugar a estructuras de tipo caldera. A finales del Oligoceno, una reactivación de la actividad volcánica originó el emplazamiento de domos félsicos y diques, de composición riódacítica a riolítica, a través de las fallas que delimitan *grabens* y *horts* y bloques de la caldera, considerado como proceso de reactivación. La edad de los últimos eventos descritos es de entre 32 y 31 Ma (Figura 6.3G).

Resultados de química analítica correspondientes a las unidades volcánicas demostraron que durante el transcurso de la actividad magmática, hubo una paulatina disminución de elementos tales como el Fe y Ti, pero aumentó la proporción de sílice (SiO₂). Los mismos resultados sugieren que el magmatismo fue originado por subducción y los magmas pudieron haberse generado en la corteza. El aumento de la cantidad de sílice, sobre todo en los eventos magmáticos más recientes, es importante para el modelo de emplazamiento debido a que explica el desarrollo de cuerpos hipabisales (cristalización a profundidad somera) con geometría cómica. El aumento en la cantidad de sílice en los magmas implica también, un aumento en la viscosidad de los mismos, por lo cual el vulcanismo deja de ser fluido, resultando en el aglutinamiento de domos félsicos, ocurrido dentro y en la periferia de los conductos.

Finalmente, las condiciones de presión y temperatura dadas por la profundidad del emplazamiento, ocasionó cristalización fraccionada del magma. Es decir, minerales primarios tales como el cuarzo llegan a cristalizar, formando cristales euhedrales y de tamaño perceptible al ojo humano, pero no así el resto del magma, que fue sometido a un rápido proceso de enfriamiento y solidificación, ocasionando cristales inmersos en una matriz microcristalina a vítrea, que formó textura porfídica.

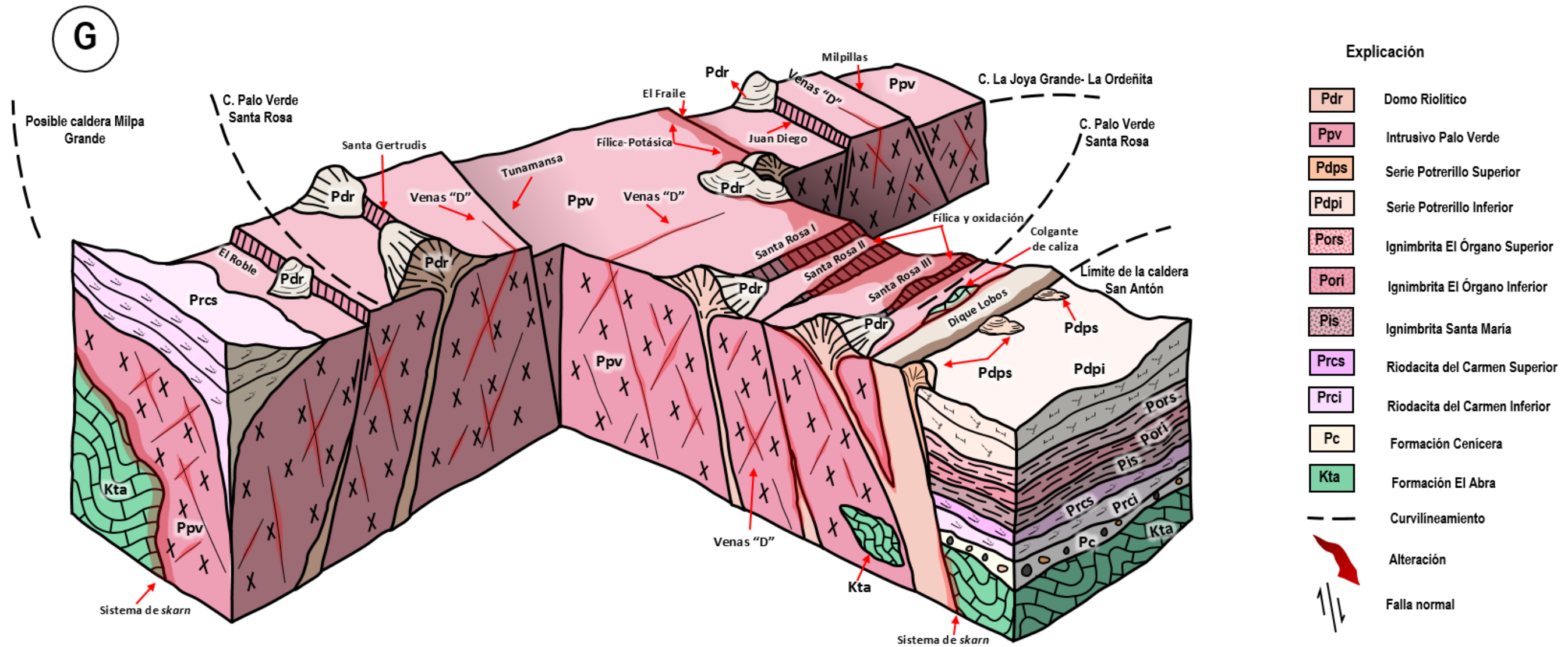


Figura 6.3. Bloque esquemático del emplazamiento de domos riolíticos de la unidad San Miguelito (Pdr) vista hacia el norte. Ésta exhibe el emplazamiento de cuerpos hipabisales (domos y dique félsicos) a través de un sistema de fallas que delimitan bloques, correspondientes a fracturas de colapso de cámara magmática o caldera.

CONCLUSIONES

El área de estudio está ubicada en la porción suroriental de la provincia magmática “Faja Ignimbrítica Mexicana (FIM)”, que corresponde a la zona limítrofe de las provincias Zacatecana y Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP). La base de la litología del área presenta una transición de la secuencia sedimentaria calcárea marina representada por unidades litológicas de carácter calcáreo-pelítico y calcárea (Formación El Abra). Sin embargo, el área presenta pequeños afloramientos de brecha calcárea polimíctica, sugiriendo que estos depósitos pudieron haberse conjuntado en la zona de talud de la PVSLP, por lo tanto, ésta unidad litológica pudiera ser parte a la denominada Formación Tamabra.

La secuencia sedimentaria marina referida fue emplazada y alterada por magmatismo en forma de *stock*, diques, *sills*, y domos, así como cubierta parcialmente por rocas volcánicas. El Ppv emplazó a través de la junción de las provincias geológicas mencionadas, seguido del vulcanismo félsico (Pdr).

El análisis estructural demuestra que el fallamiento extensional pre-magmatismo sirvió como conducto al emplazamiento de cuerpos hipabisales y magmas del Oligoceno. En general, el área presenta dos sistemas principales de fallas y lineamientos (*i.e.* NW-SE y NE-SW). Las estructuras de primer y segundo orden son de carácter regional. Además, en el área existen varios curvilineamientos que en la intersección con fallas presentan domos riolíticos, que presumiblemente delimitan el curvilineamiento denominado “Palo Verde-Santa Rosa”. Los domos riolíticos están asociados a las estructuras de rumbo NW-SE y NE-SW, sugiriendo que el control estructural jugó un rol importante para el emplazamiento de los domos, que representan la finalización del magmatismo que constituye el CVRSM.

Los resultados de petrografía sugieren que los domos volcánicos están mayormente constituidos por cuarzo, ortoclasa y plagioclasa, soportados por matriz micro-cristalina y ligeramente vítrea en los borde, sugiriendo composición riolítica con cierta tendencia a riodacita. Por otra parte, la petrografía del Intrusivo Palo Verde permitió definir que la roca presenta textura porfídica, constituida principalmente por cristales de ortoclasa, plagioclasa y cuarzo con forma subhedral,

ocasionada por alteración hidrotermal, representada por las texturas perfitica y mirmequítica; así como local biotita, clorita, apatito, magnetita e ilmenita, soportados en una masa basal afanítica con presencia de sericita.

Los resultados de química analítica para domos riolíticos, sugieren rocas subalcalinos, con efectos de asimilación de cristalización fraccionada, dando como resultado un campo de riolita y riodacita, corroborando el resultado de petrografía. Además, la química analítica para domos riolíticos e Intrusivo Palo Verde indica que estos magmas fueron generados en la corteza superior, los cuales presentan similitud a granitos de intraplaca y menor proporción a granitos de arco volcánico.

Este magmatismo fue generado durante el Rupeliano. Específicamente, resultados radiogénicos realizados en este estudio de isótopos inestables (U-Pb-Th) sobre zircones correspondientes a las unidades Riodacita del Carmen (Prc), Riolita San Miguelito o Domos Riolíticos (Pdr) y el Intrusivo Palo Verde (Ppv), demostraron que la unidad ígnea más antigua es el Intrusivo Palo Verde con aproximadamente 32.42 ± 0.49 Ma; seguida de los domos Riolita San Miguelito (Pdr) con edad de 31.65 ± 0.60 y 31.87 ± 0.86 Ma; y finalmente la cristalización de los domos de la Riodacita del Carmen (Prc) de 30.91 ± 0.60 Ma. Sin embargo, la relación de campo demuestra que la Riodacita del Carmen fue intrusionada por el plutón Ppv, permitiendo inferir una cristalización seccionada en el Intrusivo Palo Verde, basado en la relación de campo y el rango de error isotópico.

Finalmente, los domos riolíticos presentan una relación particular respecto al Intrusivo Palo Verde. Estos emplazaron a través del plutón mencionado, atravesando por fallas y fracturas, generando silicificación, y presumiblemente removilización de mineralización pre-existente. Lo anterior está evidenciado por alteración hidrotermal filica, así como la mineralización metálica diseminada y ocurrencia de fluorita en estructuras vetiformes en el Intrusivo Palo Verde. Además, los domos félsicos y rocas volcánicas descendientes de estos, presentan fracturas rellenas de casiterita. El Intrusivo Palo Verde presenta zonas con intensa alteración supergénica, que es producto de la meteorización y erosión, pudiendo concentrar zonas de enriquecimiento supergénico.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., López-Doncel, R. A., García-Arreola, M. E., Almaguer-Rodríguez, J. L., Maury, R. C. 2012, Trace elements geochemistry and origin of volcanic units from the San Luis Potosí and Río Santa María volcanic fields, Mexico: the bearing of ICP-QMS data, *Geofísica Internacional* 51-3: p. 293-380.
- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R., Bustos-Gutiérrez, L.A., Carrizales-Aguilar, A., 2004, Carta Geológico-Minera Santa María del Río F14-C14, San Luis Potosí y Guanajuato, escala 1:50,000, Pachuca, Hidalgo, México, Consejo de Recursos Minerales.
- Alencaster, G., Torres-Hernández, R., Tristán-González, M., Barbosa-Gudiño, R., Lopez-Doncel, R., Pons, J. M., Omaña, L. 1999, El Abra Formation in the western part of the Valles-San Luis Potosí Platform (México). Fifth International Congress on Rudists.
- Almaguer-Rodríguez, J.L., 2010, Estudio geoquímico de elementos traza en unidades volcánicas del CVSLP: método ICP-MS (validación del método), Tesis, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería.
- Carrasco, V. B., 1970, La Formación El Abra (Formación El doctor en la Plataforma Valles-San Luis potosí), *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 2.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, La plataforma de Valles-San Luis Potosí: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 23.
- Campa, M. F. y Coney, P. J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, p. 1040-1051.

- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., y Marchal, M., 1980, A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major element analyses--Its relationships with current nomenclature: *Chemical Geology*, v. 29, p. 183-210.
- Goldhammer, R.K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico: Geological Society of America, Special Paper 340, p. 1-58.
- Grasel, P.C., 1979, The Reconnaissance Geology of the Salitrera Mining District, San Luis Potosí, México, University of Houston, Thesis.
- Harker, A., 1909, The natural history of igneous rocks. Methuen, London, p. 258.
- Hernández-García, A.R. 2015, Análisis del posible origen caldérico de los flujos piroclásticos de las Ignimbritas Santa María - El Órgano, a partir de imágenes satelitales, Trabajo Recepcional, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P.
- Jensen, L. S., 1976, A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks, Ontario Division of Mines Miscellaneous Paper 66, p. 22.
- Kellum, W., 1930, Similarity of surface geology in front ranges of Sierra Madre Oriental to subsurface in Mexican south fields: American association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 14.
- Keppie, J., D. y Ortega-Gutiérrez, F, 2010, 1.3–0.9 Ga Oaxaquia (Mexico): Remnant of an arc/back arc on the northern margin of Amazonia: *Journal of South American Earth Sciences*, v.29 p. 21–27.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., 1978, Cartografía Geológica Hoja San Luis Potosí, S.L.P., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico, 66.

- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., 1981, Cartografía Geológica Hoja Santa María del Río: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico no. 67, 32 p.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., 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., Martínez-Ruiz, V. J., 1983, Estudio Geocronológico de la Hoja Melchor, estados de San Luis Potosí y Guanajuato, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 92.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., 1984, Cartografía geológica 1:50 000, Hoja Salitrera, S.L.P, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 94.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Duxson, A., Keller, J., 1989, A Classification of igneous rocks and Glossary of Terms: Recommendation of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematic of Igneous Rocks, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Muir, J. M., 1936, Geology of the Tampico Region, México: American Association of Petroleum Geologist, Tulsa.
- Ortega-Gutiérrez, F., Ruiz, J., y Centeno-García, E., 1995, Oaxaquia, a Proterozoic micro-continent accreted to North America during the Paleozoic: *Geology*, 23, p. 1127- 1130.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* 25, 956–983.

- Rocha-Rocha, M., 2016, Metallogenesis of The Peñasquito polymetallic deposit: A Contribution to the Understanding of the Magmatic Ore System, University of Nevada, Reno. Dissertation.
- Sánchez-Hernández, J. M., Soberanes-Fragoso, B. A., 2001, Carta Geológico-Minera 1:50,000, Hoja La Salitrera, S.L.P., Servicio Geológico Mexicano.
- Sociedad Exploradora Minera S.A de C.V., 1999, Carta Geológico-Minera 1:50000, Hoja Tierra Nueva F14-C25, S.L.P-Guanajuato, Servicio Geológico Mexicano.
- Streckeisen, A.L., 1976, Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: a provisional attempt, Neues Jahrbuch fur Mineralogic, Monatshefte.
- Sun, S. S., Mc Donough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, From Saunders, A. D. y Norry, M. J. (eds), 1989, Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society Special Publication No. 42, pp. 313-345.
- Torres-Hernandez, R., Siebe-Grabach, C., Aguillón-Robles, A. y Rodríguez-Ríos, R., 2014, Geocronología y características geoquímicas de un conjunto de domos riolíticos terciarios en el Campo Volcánico de San Luis Potosí, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 66, núm. 1, 2014, p. 183-197.
- Tristán-González, M., 1987, Cartografía Geológica de la Hoja Tierra Nueva, S.L.P., 1:50 000, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 109.
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., Labarthe-Hernández, G., 2009, Geocronología y distribución espacial

del vulcanismo en el Campo volcánico de San Luis Potosí, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 61, p. 287-303.

Verma, S.P., Sotelo-Rodríguez Z.T., and Torres-Alvarado I.S., 2002 SINCLAS: Standard Igneous Norm and Volcanic Rock Classification System; Computers and Geosciences, v. 28, p. 711-715.

Wetherill, G. W., 1956, Discordant uranium-lead ages: Transactions of the American Geophysical Union, vol. 37, núm. 2, p. 320-326.

Winchester, J.A. y Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, p. 325-343.