



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

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**GEOLOGIA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL ÁREA  
COMPOSTELA, NAYARIT, MÉXICO; Y SU RELACIÓN CON EL  
OCCIDENTE DEL CINTURÓN VOLCÁNICO TRANS-MEXICANO**

Tesis que presenta

**Vivian Ruiz Mendoza**

Para obtener el grado de

**Doctora en Geociencias Aplicadas**

Director de Tesis

**Dr. Sanjeet Kumar Verma**

San Luis Potosí, S.L.P., 19 de enero del 2022.



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**GEOLOGIA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL ÁREA COMPOSTELA, NAYARIT, MÉXICO; Y SU RELACIÓN CON EL OCCIDENTE DEL CINTURÓN VOLCÁNICO TRANS-MEXICANO**” presentada para obtener el Grado de Doctor(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Vivian Ruiz Mendoza** y aprobada el **diecinueve de enero del dos mil veintidós** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. Sanjeet Kumar Verma**

Director de Tesis

---

**Dr. Pablo Dávila Harris**

Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. Aaron Martin**

Miembro del Comité Tutorial

---

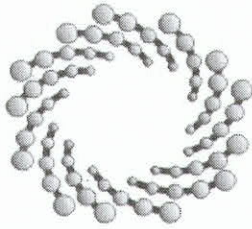
**Dr. José Ramón Torres Hernández**

Miembro del Comité Tutorial



## Créditos institucionales

- Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Sanjeet Kumar Verma.
- Al Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN) del Instituto Potosino de investigación Científica y Tecnológica, A.C., por el empleo de sus equipos mayores: Difractómetro de Rayos X Smartlab Rigaku y Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X, ZXS PRIMUS II Rigaku, ambos en el laboratorio Rigaku, bajo la coordinación de la M. en C. Beatriz Adriana Rivera Escoto.
- En la realización de esta investigación la autora recibió una beca académica por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. 270565) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- El apoyo económico para análisis químicos y trabajo de campo por: The Newton Advanced Fellowship award- The Royal Society, UK. [NA160116] bajo la coordinación del Dr. Sanjeet Kumar Verma y Dra. Tiffany L. Barry.
- The Open University, Milton Keynes, United Kingdom.
- Unidad de Geocronología, CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, España.



**IPICYT**

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

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 023 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 19 días del mes de enero del año 2022, se reunió a las 10:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. Aaron James Martin</b> _	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Pablo Dávila Harris</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Ramón Torres Hernández</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>UASLP</b>
<b>Dr. Sanjeet Kumar Verma</b> _	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

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

**DOCTORA EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó la C.

**Vivian Ruiz Mendoza**

sobre la Tesis intitulada:

*Geología, geoquímica y geocronología del área Compostela, Nayarit, México; y su relación con el occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. Sanjeet Kumar Verma** \_

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLA**

Dándose por terminado el acto a las 11:45 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 19 días del mes de enero de 2022.

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

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



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

## Dedicatoria

*A mis hijos Diego y Xanat,  
a mi esposo Stephen de Wit,  
a Nilo y Uma.*

*“A fin de alcanzar la verdad,  
es necesario una vez en la vida  
poner todo en duda,  
hasta donde sea posible”*

*Cogito, ergo sum*

*–René Descartes–*

## **Agradecimientos**

### **Institucionales:**

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. por abrir sus puertas y ser parte de su comunidad estudiantil.

Al Dr. Sanjeet Kumar Verma por confiar en este proyecto y pese a las dificultades en campo, se continuó trabajando y hoy se finaliza.

Al Dr. Pablo Dávila Harris, Dr. Aaron Martin y Dr. José Ramón Torres Hernández, por sus observaciones, correcciones y retroalimentaciones, cada semestre en los comités tutorales y en la edición de esta tesis.

A la M. en C. Beatriz Adriana Rivera Escoto, por su apoyo y asesoría con los equipos de Difracción de RX y el Espectrómetro de RX.

A Víctor Mata y Gerson Vázquez de la Biblioteca del IPICYT, por su apoyo en la búsqueda de información, en especial con publicaciones de los 70's.

A mis compañeros: Dr. Pradip Kumar Singh y Dr. Darío Torres Sánchez, por su apoyo y asesoría en la preparación de muestras en el laboratorio de Geología del IPICYT. Así como al Ing. Salvador Martínez e Ing. Michelle Arreola en la preparación de estas mismas.

A la comunidad en general del IPICYT y al comité estudiantil, en la organización de seminarios, cursos y exposiciones en los cuales tuve oportunidad de participar y enriquecer mi perfil académico.

### **Personales:**

A mi padre Raúl Ruiz Ramos por sembrar la semilla de la escuela, que germinó en la Ingeniería, floreció en la maestría y ahora se cosecha con el Doctorado. Gracias, papá.

A mis hijos Diego y Xanat, por ser la luz que ha guiado mi camino y ser increíblemente ustedes mismos.

A mi esposo Stephen de Wit por ser mi mentor, amigo, ayudante y colega. Durante nuestro recorrido profesional, hemos tenido interesantes discusiones geológicas donde tu concluyes en una idea y yo en otra; por ejemplo: la mineralización en Compostela es de 21 Ma y yo digo que es de 5 Ma. Eres mi geólogo favorito.

A mi amiga y colega Ing. Hitamar Xochihua por su valiosa amistad y apoyo en este camino geológico, siendo mujeres.

A mi amigo y colega M. en C. Aurelio España Pinto y a su familia por su inigualable amistad, apoyo y confianza.

A mis amigos Mercedes y Marcelo Curiel de Compostela, fueron una gran ayuda y apoyo en las visitas realizadas al campo. Gracias por su amistad.

Al Ing. Héctor Chávez Polina por permitir el acceso al área de estudio y su apoyo en el campo para terminar de muestrear los basaltos. Al Dr. José Ramón Torres Hernández ya que después de las dificultades en campo, no perdió su interés en el área y regresamos a terminar y al Dr. Sanjeet Kumar Verma por brindarme esta oportunidad. Gracias.

## Contenido

Constancia de aprobación de la tesis.....	ii
Créditos institucionales .....	iii
Acta de Examen.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Contenido.....	viii
Índice de Tablas .....	xiii
Índice de Figuras.....	xiv
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxiii

## Introducción

<b>1. Panorama general de la disertación</b>	1
1.1 Localización del área Compostela	3
1.2 Antecedentes del área Compostela	6
1.3 Objetivos	8
1.4 Hipótesis	9
1.5 Esquema de la tesis	10
Referencias	12

## Capítulo 1

<b>Contexto geológico y tectónico del cinturón volcánico Trans-Mexicano</b>	15
1. Cinturón volcánico Trans-Mexicano y evolución geológica	17
1.1 Arco del Mioceno medio al tardío (~19 – 10 Ma)	18



1.2 Mioceno tardío Episodio máfico	19
1.3 Volcanismo silíceo del Mioceno tardío y volcanismo bimodal del Plioceno temprano	20
1.4 Arco del Plioceno tardío al Cuaternario	21
2. Cinturón volcánico Trans-Mexicano y evolución tectónica	24
2.1 Sistema de fallas Pochotitán o Provincia del Golfo Extensional	27
2.2 Sistema de fallas a lo largo del límite Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco	27
2.3 Sistema de fallas a lo largo del norte del Bloque Jalisco	30
2.4 Breve descripción del Bloque Jalisco y la Sierra Madre Occidental	30
3. Sistemas volcánicos del graben San Pedro-Ceboruco, rift Tepic-Zacoalco	32
3.1 Tepetiltic y Ceboruco estratovolcanes poligenéticos	32
3.2 Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande (SCVC)	32
3.3 Cadena volcánica del Norte (NVC)	33
3.4 Cadena volcánica del Sur (SVC)	33
Referencias	35

## **Capítulo 2**

<b>1. Geología del área Compostela</b>	<b>37</b>
1.1 Riolitas (Toba lítica y Toba bandeada)	42
1.2 Andesitas	47
1.3 Basalto andesitas (posteriormente clasificado como basalto traquiandesita)	49
1.4 Depósitos de pómez —Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande (?)	52
1.5 Depósitos de piroclastos —Volcán Tepetiltic(?)	53
<b>2. Geología estructural del área Compostela</b>	<b>56</b>
Referencias	66

## Capítulo 3

### Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela

<b>area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting</b>	<b>67</b>
1. Introduction	68
2. Tectonic and geological framework	70
3. Volcanic lithologies	73
3.1 Rhyolite	74
3.2 Andesite	74
3.3 Basaltic andesite (later classified as basaltic trachyandesite)	74
4. Materials and methods	75
4.1 Sampling	75
4.2 Mineral analysis by XRD	76
4.3 Whole-rock major and trace element analysis	76
4.4 Rb-Sr and Sm-Nd isotope systematics	77
4.5 $^{40}\text{Ar}/^{49}\text{Ar}$ geochronology	79
5. Results	79
5.1 Petrography and mineralogy	79
5.1.1 Basaltic trachyandesite	80
5.1.2 Andesite	81
5.2 Whole-rock major oxides, trace and rare earth elements	82
5.3 Sr-Nd isotopic data	93
5.4 $^{40}\text{Ar}/^{49}\text{Ar}$ geochronology	95
6. Discussion	97
6.1 $^{40}\text{Ar}/^{49}\text{Ar}$ geochronology	97
6.2 Petrogenesis	99
6.2.1 Crustal contamination	99
6.2.2 Implications for the magma source	101
6.3 Tectonic setting and geodynamic implications	103
7. Conclusions	105
8. References	106

## Capítulo 4

### Mineralogía y geoquímica de las riolitas del área Compostela, noroeste del graben

<b>San Pedro-Ceboruco, rift Tepic-Zacoalco, México.</b>	111
1. Introducción	112
2. Marco geológico y tectónico	114
3. Litología del área de estudio	117
4. Materiales y métodos	118
4.1 Muestreo	118
4.2 Mineralogía de arcillas por difracción de rayos-X (XRD)	119
4.3 Análisis de roca total y elementos traza	119
4.4 Análisis de isótopos de Rb-Sr y Sm-Nd	120
5. Resultados	120
5.1 Petrografía	120
5.2 Mineralogía por difracción de rayos-X (XRD)	122
5.3 Geoquímica de elementos mayores, traza y tierras raras	122
5.3.1 Geoquímica de elementos mayores	128
5.3.2 Índice de alteración usando elementos mayores	130
5.3.3 Normalización condrita y manto primitivo	133
5.3.4 Diagramas multi-elementos	134
5.4 Isótopos de Rb-Sr	136
6. Discusión	137
7. Conclusiones	138
8. Referencias	139

## Capítulo 5

### Conclusiones

Conclusiones particulares del área Compostela	143
Conclusiones generales del área Compostela	146

## ANEXOS

### Capítulo 2

<b>Anexo I.</b> Tabla de descripciones de muestras recolectadas en campo	149
<b>Anexo II.</b> Descripciones petrográficas con foto de muestras de mano	151
<b>Anexo III.</b> Análisis mineral con Pelcon Point Counter para dos muestras de basalto andesita y tres para andesita	161
<b>Anexo IV.</b> Estereogramas de fallas y orientación de estratigrafía de la secuencia de riolitas y de los depósitos de piroclastos—Volcan Tepetitlic	166

### Capítulo 3

<b>Anexo I.</b> Portada del artículo publicado y figuras suplementarias del artículo publicado	170
<b>Figure S1(a-b).</b> Morimoto's diagram ( <a href="#">Morimoto, 1988</a> ) for pyroxenes in the basaltic andesites (later the basaltic trachyandesites) and andesites	171
<b>Figure S2.</b> $K_2O_{(adj)}-SiO_{2(adj)}$ diagram of <a href="#">Peccerillo and Taylor (1976)</a> for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area	172
<b>Figure S3.</b> $TiO_{2(adj)}-SiO_{2(adj)}$ diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area	173
<b>Anexo II.</b> Resultados de Análisis por difracción de rayos-X (XRD)	174

### Capítulo 4

<b>Anexo I.</b> Resultados de análisis por difracción de rayos-X (XRD)	180
--	-----

# Índice de Tablas

## Capítulo 1

<b>Diagrama 1.</b> Principales eventos geológicos y tectónicos del cinturón volcánico Trans-Mexicano. En color amarillo los eventos más representativos que involucran el área Compostela	16
---	----

## Capítulo 2

<b>Tabla 1.</b> Estratigrafía del área Compostela. Las unidades que se presentan en esta estratigrafía corresponden a las observadas en campo y su correlación con las edades que se encuentran en la literatura y las obtenidas en esta investigación	55
--	----

<b>Tabla 2.</b> Datos estructurales de las fallas medidas en campo y breve descripción del afloramiento en donde se encuentran estas fallas. Los puntos de campo que tienen asterisco corresponden a los datos obtenidos en los depósitos de piroclastos correspondientes al Volcán Tepetitlic (?). Las coordenadas se encuentran en UTM y la elevación en metros. Elev—Elevation	58
---	----

<b>Tabla 3.</b> Datos estructurales de la orientación de estratificación de los afloramientos de las secuencias de riolitas y de los depósitos de piroclastos correspondientes al Volcan Tepetitlic. Los puntos que tienen asterisco corresponden a los datos obtenidos en los depósitos de piroclastos correspondientes al Volcán Tepetitlic (?). Las coordenadas se encuentran en UTM y la elevación en metros. Elev—Elevation	58
--	----

## Capítulo 3

<b>Table 1.</b> Petrographic descriptions of intermediate volcanic rocks from the Compostela area. Mineral identification data obtained by X-ray powered diffraction (XRD)	80
--	----

<b>Table 2.</b> Major elements geochemistry and CIPW norms of intermediate volcanic rocks from the Compostela area	83
--	----

<b>Table 3.</b> Trace and rare elements geochemistry of intermediate volcanic rocks from the Compostela area	87
--	----

<b>Table 4.</b> Sr-Nd isotopic compositions of the intermediate volcanic rocks from the Compostela area	94
---	----

<b>Table 5.</b> Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the intermediate volcanic rocks from the Compostela area	94
---	----

## Capítulo 4

<b>Tabla 1.</b> Descripciones petrográficas de las riolitas e identificación mineral obtenido de la difracción de rayos-X (XRD) en el área de estudio	123
---	-----

<b>Tabla 2.</b> Geoquímica de elementos mayores y norma CIPW de las riolitas del área de estudio. Se uso el programa propuesto por <a href="#">Verma et al., (2013)</a>	124
---	-----

<b>Tabla 3.</b> Geoquímica de elementos traza y tierras raras REE de las riolitas del área de estudio	126
---	-----

<b>Tabla 4.</b> Índice de alteración (AI) de las dos secuencias de riolitas identificadas en el área de estudio y el resumen de la intensidad de alteración ( <a href="#">Gifkins et al., 2005</a> )	132
--	-----

<b>Tabla 5.</b> Composición isotópica Sr y Nd de las riolitas en el área de estudio	136
---	-----

# Índice de Figuras

## Introducción

**Figura 1.** Mapa tectónico general del sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y localización del área Compostela (recuadro rojo). Los triángulos numerados son las principales estructuras volcánicas dentro del rift Tepic-Zacoalco y el rift de Colima: 1—Sierra La Primavera, 2—Volcán Tequila, 3—Volcán Ceboruco, 4—Volcán Tepetiltic, 5—Volcán Sanganguey, 6—Volcán Las Navajas, 7—Volcán San Juan y 8—Volcán Colima-Nevaldo. La línea intermitente representa el límite del cinturón volcánico Trans-Mexicano (TMVB). Los límites del bloque Jalisco están definidos por los rifts de Tepic-Zacoalco y Colima y por la trinchera Centroamericana. Modificado de Frey et al., (2014) 4

**Figura 2.** Mapa que muestra los eventos geológicos y fallas extensionales en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y rift Tepic-Zacoalco. Delimitación aproximada del graben San Pedro-Ceboruco (recuadro amarillo-azul). Localización del área Compostela (recuadro rojo) dentro de este graben. Estratovolcanes Cuaternarios: LP—La Primavera, TEQ—Volcán Tequila, CE—Volcán Ceboruco, TE—Volcán Tepetiltic, SA—Volcán Sanganguey, LN—Volcán Las Navajas, SJ—Volcán San Juan. Principales estructuras tectónicas en el rift Tepic-Zacoalco: PV—goben Puerto Vallarta, PB-SR—goben Plan de Barrancas-Santa Rosa, SM—*half*-goben San Marcos. Modificado de Ferrari et al., (2003) 5

## Capítulo 1

**Figura 3.** Locación del cinturón volcánico Trans-Mexicano (color gris) dividido en tres sectores: occidental, central y oriental. La provincia geológica de la Sierra Madre Occidental (color rosa) se describe en 2.4 Breve descripción del Bloque Jalisco y la Sierra Madre Occidental. Modificado de Gómez-Tuena et al., (2007) y Frey et al., (2007) 18

**Figura 4.** Episodios reconocidos en la evolución geológica del cinturón volcánico Trans Mexicano; **(a)** Arco del Mioceno Medio al tardío (~19-10 Ma); **(b)** Episodio máfico del Mioceno tardío; **(c)** Volcanismo silíceo (~7.5-5 Ma) y bimodal (5-3 Ma) y volcanismo con calderas identificadas (LZ—Los Azufres; AM—Amealco; AZ—Amazcala; HU—Huichapan; A—Agustinos); **(d)** Arco del Plioceno tardío al Cuaternario (CVMG—Campo volcánico Michoacán-Guanajuato). La línea negra intermitente muestra el episodio máfico del Mioceno tardío en **(c)** y **(d)**. Modificado de Gómez-Tuena et al., (2007) 23

**Figura 5.** Mapa tectónico simplificado del occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano, se muestra en color rosa los contornos de la profundidad del *slab* (km), así como la edad y la velocidad de convergencia (cm/yr) de la placa de Rivera y la placa de Cocos en la placa Norteamericana. Modificado de Díaz-Bravo et al., (2014). TZR—Rift Tepic-Zacoalco, TMVB—Trans Mexican Volcanic Belt 25

**Figura 6.** Localización de las tres principales estructuras del rift Tepic-Zacoalco, en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano: **(a)** Sistema de Fallas Pochotitán o Provincia del Golfo Extensional (recuadro azul); **(b)** Sistema de fallas a lo largo del límite de la Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco (recuadro verde) al límite noroeste de este sistema de fallas se encuentra el área Compostela (recuadro rojo). **(c)** Sistema de fallas a lo largo del norte del Bloque Jalisco (recuadro naranja). Estructuras volcánicas cuaternarias: LP—La Primavera, TEQ—Volcán Tequila, CE—Volcán Ceboruco, TE—Volcán Tepetiltic, SP—Caldera San Pedro, SA—Volcán Sanganguey, LN—Volcán Las Navajas, SJ—Volcán San Juan. Estructuras tectónicas del Mioceno tardío al Cuaternario: PFS—Sistema de fallas Pochotitán, ME—goben Mecatán, PV—goben Puerto Vallarta, AC—*half*-goben Amatlán de cañas, PB—SR graben Plan de Barrancas-Santa Rosa, AM—falla Ameca, SM—falla San Marcos, TE—falla Techaluta (*half*-goben Sayula). Modificado de Ferrari y Rosas-Elguera, (2000) 26

**Figura 7.** Mapa estructural del graben Compostela-Ceboruco compuesto por el graben Compostela, depresión San Pedro y el graben Ceboruco. Al límite noroeste del graben San Pedro-Ceboruco el área Compostela (recuadro rojo). Sistemas volcánicos reconocidos en el graben San Pedro-Ceboruco: volcanes poligenéticos Tepetiltic y Ceboruco;

SCVC—Complejo volcánico San Pedro-Cerro grande, NVC—Cadena volcánica del Norte y SVC—Cadena volcánica del Sur. Modificado de Ferrari y Rosas-Elguera (2000) 29

**Figura 8.** Sistemas volcánicos reconocidos en el graben San Pedro-Ceboruco. Volcanes poligenéticos Ceboruco y Tepetitlic y depósitos de piroclastos; Cadena Volcánica del Norte, representada por tres series; Serie Transicional (Hi-Ti), Serie sub-alcalina transicional (Low-Ti) y Serie Na-alcalina; Cadena Volcánica del Sur, representada por una serie sub-alcalina (Low-Ti), y el Complejo Volcánico San Pedro-Cerro Grande (SCVC), representado por rocas adakiticas y basaltos enriquecidos en Nb. Por último, magmatismo del Plioceno. El área Compostela (recuadro rojo) se encuentra al límite noroeste de este graben. Modificado de Petrone (2010). V—Volcán 34

## Capítulo 2

**Figura 9.** Vista panorámica del área Compostela al centro. Al lado izquierdo y al fondo se alcanza a distinguir el volcán Sanganguey y al lado derecho el Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. El volcán Tepetitlic no se observa en la foto ya que se encuentra al este del área Compostela 38

**Figura 10. (a)** Geología del área Compostela. Las estrellas rosas muestran la locación de las muestras de la unidad de riolitas (Toba lítica y Toba bandeada). Los cuadros verdes la locación de las muestras de la unidad de andesitas. Los círculos azules la locación de las muestras de basalto-andesita. Los círculos amarillos representan la locación de las muestras con edad XAL-32 (Riolita) y XAL-33 (Andesita) reportadas por Frey et al., (2007). La línea morada es la Sección Transversal con dirección SW-NE. SCVC—Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande, F—Falla, Seq—Secuencia. Modificado de Servicio Geológico Mexicano, (2007), Carta Xalisco F13-D31 40

**Figura 10. (b).** Sección SW-NE representativa de las unidades geológicas del área Compostela. En esta sección se observa como la unidad de basalto andesita corta y cubre discordantemente a la Toba lítica, aparentemente controlada por la falla La Víbora. La unidad de andesita cubre las partes bajas topográficamente. Los depósitos de piroclastos del Volcán Tepetitlic (?) cubren discordantemente la secuencia 2 de Toba bandeada al NE de la sección. SCVC—Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande, F—Falla, Seq—Secuencia 41

**Figura 11. (a)** Afloramiento representativo de la secuencia 1 de la toba lítica (CxLT) en el área Compostela en la zona del Tejamanil, el color crema es característico en esta secuencia. **(b)** Al sur de la zona de Tajitos la toba lítica se observa con feldespatos alterados y presenta menos diseminación de óxidos de hierro. **(c)** Afloramiento que muestra el contacto entre la toba lítica y el basalto andesita en la zona de La Mesa. La línea blanca intermitente muestra el contacto aproximado entre estas dos unidades. **(d)** En la zona de Miravalles la toba lítica se observa más diseminación de óxidos de hierro 43

**Figura 12. (a)** Foto que muestra texturas de esferulitas (color blanco) y **(b)** Texturas de fiamme son parte de la toba bandeada. **(c)** Toba bandeada ligeramente alterada, en este afloramiento se tomó la muestra COM-04A 44

**Figura 13. (a)** Afloramiento de la toba bandeada (FbT), la línea negra punteada muestra la orientación del bandeamiento ( $\sim 242^\circ/28^\circ$ ). **(b)** Afloramiento de la toba bandeada que muestra ligera oxidación entre los bandeamientos, orientación ( $334^\circ/47^\circ$ ) 45

**Figura 14. (a-b)** Fotomicrografías de las muestras COM-01 y COM-02 representativas de la toba lítica, se observa la textura porfídica, con fenocristales de feldespatos. Algunos de estos feldespatos se encuentran remplazados por minerales arcillosos (copos de sericita) y cuarzo, estos en una matriz fina de cuarzo, piroxenos (clino-estantita) y vidrio. **(c-d)** Fotomicrografías de las muestras COM-04D y COM-04G representativas de la toba bandeada, donde se distinguen fenocristales de feldespatos e intercrecimientos radiales de cuarzo, en una matriz de cuarzo, piroxenos y vesículas. Fld—Feldespatos, Qz—Cuarzo, Px—Piroxenos, Vs—Vesículas, gl—vidrio, NX—Nícoles cruzado 46

**Figura 15. (a)** Foto que muestra parte del afloramiento de la lava de andesita al noreste del área y se alcanza a observar a simple vista fenocristales de plagioclasas, en una matriz más afanítica. **(b)** Afloramiento de andesitas al suroeste del área se observa una matriz más homogénea y microlítica 47

**Figura 16. (a)** Afloramiento de andesitas al sureste del área Compostela. **(b)** Afloramiento de andesitas que se extiende al noroeste del área con orientación ( $165^\circ/23^\circ$ ) y **(c)** Contacto aparente entre andesitas y toba lítica 48

**Figura 17. (a)** Fotomicrofotografía de la muestra COM-03E representativa de las andesitas, se observan plagioclasas y piroxenos en una matriz afanítica casi fluida de plagioclasas y minerales opacos. Esta muestra se localiza al noreste del área Compostela. **(b)** Fotomicrofotografía de la muestra COM-07C representativa de las andesitas al suroeste del área Compostela, donde también se observan plagioclasas, piroxenos y vesículas en una matriz microlítica representada por plagioclasas y minerales opacos. Plg—Plagioclasas, Px—Piroxenos, Vs—Vesículas, NII—Nícoles paralelos 49

**Figura 18. (a)** Foto que muestra el contacto entre la unidad de basalto andesita y la toba lítica al centro del área Compostela. **(b)** Foto que muestra el frente de lava de basalto andesita al noroeste del área 50

**Figura 19. (a)** Parte del afloramiento del dique basalto andesítico en la zona de Miravalles. La línea intermitente blanca muestra aproximadamente la orientación ( $322^{\circ}/13^{\circ}$ ) de este dique. **(b)** Afloramiento del dique basalto andesítico a 350 m al NE del anterior 51

**Figura 20.** Fotomicrofotografía de la muestra COM-06J representativa de los basaltos andesitas. Los minerales presentes son plagioclasas, clinopiroxenos, vesículas y minerales opacos. Plg—Plagioclasas, Px—Piroxenos, Vs—Vesículas, Op—Minerales opacos, NII—Nícoles paralelos 51

**Figura 21. (a)** Afloramiento de depósitos de pómez posiblemente de los depósitos de pómez Cuastecomate relacionados con el complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. **(b)** Depósitos de pómez, no consolidados con fragmentos líticos 52

**Figura 22. (a)** Depósitos de piroclastos —Volcán Tepetitlic (?), en la base se tienen a las tobas polimícticas, la línea intermitente blanca muestra el contacto entre este estrato y arriba de este los depósitos de toba fina. Por último, la línea intermitente corta blanca el contacto entre la toba fina y toba lítica. **(b)** Afloramiento al suroeste de la Zona de Tajitos representado por intercalaciones de ceniza fina y toba 53

**Figura 23.** Localización del área Compostela en el graben San Pedro-Ceboruco. Las edades en millones de años (Ma) son del magmatismo del plioceno reportadas por [Frey et al., 2007](#). Los sistemas reconocidos en el graben se encuentran en la Figura 8 y la litología del área Compostela en la Figura 10. Modificado de [Ferrari y Rosas-Elguera \(2000\)](#) 57

**Figura 24.** Mapa que muestra la localización de los puntos de campo para las fallas normales (color verde) y para la orientación de la estratificación (color naranja). **(a)** Estereograma del primer grupo de fallas N-S/E. **(b)** Estereograma del segundo grupo de fallas NW-SE/N, **(c)** Estereograma de cuatro fallas con diferente orientación E-W/S, N-S/W, NE-SW/NW, NW-SE/SW. **(d)** Estereograma de la orientación de estratificación, el primer grupo NW-SE/SW, el segundo grupo NE-SW/SE y el tercero NW-SE/N. Los números en cada polo representan los puntos de campo. La litología se presenta en la figura 10. F—Falla 60

**Figura 25.** Afloramientos que representan al primer grupo de fallas N-S/E. **(a)** Afloramiento de toba bandeada, punto de campo 314, falla normal ( $348^{\circ}/64^{\circ}$ ). **(b)** Afloramiento de toba lítica, punto de campo 444, falla normal ( $358^{\circ}/59^{\circ}$ ) y estratificación ( $051^{\circ}/26^{\circ}$ ). La línea azul intermitente marca aproximadamente el rumbo de las fallas y la línea negra punteada la orientación de la estratificación 61

**Figura 26.** Afloramientos que representan al segundo grupo de fallas NW-SE/N. **(a)** Punto de campo 404 cortado por una falla normal ( $280^{\circ}/90^{\circ}$ ) y **(b)** Punto de campo 415 falla normal ( $310^{\circ}/40^{\circ}$ ), ambos en la toba lítica. **(c)** Punto de campo 433, falla a la izquierda ( $276^{\circ}/68^{\circ}$ ) y falla a la derecha  $287^{\circ}/72^{\circ}$ , la orientación de la estratificación de la toba bandeada en este punto ( $277^{\circ}/17^{\circ}$ ). La línea azul intermitente marca aproximadamente el rumbo de las fallas y la línea negra punteada la orientación de la estratificación 62

**Figura 27.** Afloramiento de depósitos de piroclastos que representan los puntos de campo 340, 342, 344 y 345. **(a)** Falla normal ( $304^{\circ}/57^{\circ}$ ) y estratificación de estos depósitos ( $130^{\circ}/20^{\circ}$ ). **(b)** Punto 342, falla normal ( $133^{\circ}/64^{\circ}$ ) y **(c)** Punto de campo 312, falla normal ( $090^{\circ}/58^{\circ}$ ). Línea azul intermitente marca la falla y línea negra punteada la orientación de la estratificación 63

**Figura 28.** Afloramiento de toba bandeada en el punto de campo 425, falla normal ( $178^{\circ}/87^{\circ}$  y  $222^{\circ}/90^{\circ}$ ). La línea azul intermitente marca aproximadamente la falla 64



### Capítulo 3

**Figure 1.** Schematic tectonic map shows the location of the Compostela area (red square) south of Tepic in the western sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt (WTMVB, modified after [Frey et al., 2014](#)). TMVB, Trans-Mexican Volcanic Belt; T, Tepic city; V, Veracruz city 69

**Figure 2.** Regional geology of the western sector of Trans Mexican Volcanic Belt and tectonic depressions of the Tepic-Zacoalco Rift (TZR). The Compostela area lies inside the San Pedro-Ceboruco (SPC) Graben (dashed line). The main volcanic centers are: SJ, San Juan volcano; LN, Las Navajas volcano; SA, Sanganguey volcano; TE, Tepetiltic volcano; CE, Ceboruco volcano; TEQ, Tequila volcano; LP, La Primavera caldera. The main tectonic structures are: PV, Puerto Vallarta Graben; SPC, San Pedro-Ceboruco Graben; AC, Amatlán de Cañas; PB, Plan de Barrancas Graben; SR, Santa Rosa Graben; SM, San Marcos 71

**Figure 3.** Principal volcanic systems recognized in the San Pedro-Ceboruco Graben. Compostela area is in the red square. V, volcano 72

**Figure 4.** Local Geology of the Compostela area, showing sample location. SCVC, San Pedro-Cerro Grande Volcanic Complex; TE, Tepetiltic volcano 73

**Figure 5.** Schematic stratigraphic column of the volcanic rocks from the Compostela area. CxLt, Crystal lithic tuff; FbT, Flow banded tuff; PLt, Polymictic lithic tuff; Ft, Fine tuff; Lt, Lithic tuff; SCVC, San Pedro-Cerro Grande Volcanic Complex 75

**Figure 6.** Field photographs and microphotographs (in cross-polarized light) of the volcanic rocks from the Compostela area. (a) Field photograph of the basaltic andesite (later the basaltic trachyandesites); (b) and (c) Basaltic andesite display porphyritic texture, with phenocrysts of plagioclase + pyroxene + vesicles within hyalopilitic groundmass. Some plagioclases display sieve texture and pyroxenes zonation along the rims. (d) Field photograph of the andesite; (e) and (f) Andesites displays porphyritic texture with phenocrysts of plagioclase + pyroxene + vesicles within hypocrystalline groundmass. Few plagioclases show sieve texture and zonation around the rim. Pl, plagioclase; Px, pyroxene; Vs, vesicle 81

**Figure 7.** Total Alkali-Silica (TAS; [Le Bas et al., 1986](#)) classification diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area 91

**Figure 8 (a, b).** Chondrite-normalized rare earth elements (REE) plot for the intermediate volcanic rocks from Compostela area. Chondrite values for normalization were taken from [McDonough and Sun \(1995\)](#) 92

**Figure 9 (a, b).** Primitive-mantle normalized multielement diagram for the intermediate volcanic rocks from Compostela area. Values were taken from [McDonough and Sun \(1995\)](#) 93

**Figure 10.** The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectrum and respective isotope isochron diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area. See text for discussion 96

**Figure 11.** Schematic representation of the geochronologic ages from literature within errors bars for San Pedro-Ceboruco Graben and the new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages COM-07Fa (green square), COM-06C (blue circle) and COM-06J (blue circle reported in this study. Ages from the literature represented by colored circles: yellow circle-[Ferrari & Rosas-Elguera \(2000\)](#); purple circle-[Petrone, et al., \(2001\)](#); green circle-[Ferrari et al., \(2003\)](#); pink circle-[Frey, et al., \(2004\)](#); white circle-[Frey et al. \(2007\)](#) 98

**Figure 12.** Schematic representation of the geology of the SPC Graben with the local geology of the Compostela area. The new ages  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages; COM-07Fa (green square), COM-06C and COM-06J (blue circles) reported in this study. Ages from the literature represented by colored circles: yellow circle-[Ferrari & Rosas-Elguera \(2000\)](#); purple circle-[Petrone et al., \(2001\)](#); green circle-[Ferrari et al., \(2003\)](#); pink circle-[Frey et al., \(2004\)](#); white circle-[Frey et al., \(2007\)](#) 99

**Figure 13 (a)**  $MgO_{(adj)}$  versus  $\epsilon_{Nd(i)}$  diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area; **(b)** Sr versus  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{(i)}$  assimilation and fractional crystallization model for the volcanic rocks from the Compostela area. Values of assimilated wall rock ( $C_A$ ) were taken from [Verma \(2000\)](#). AFC, assimilation, and fractional crystallization; FC, fractional crystallization 101

**Figure 14.** Conventional Sr-Nd isotope diagram for the basaltic trachyandesite and andesite rocks from the Compostela area. Trace the ‘Downgoing slab’ is from [Verma \(2000\)](#) 102

**Figure 15 (a)** Nb/Yb versus  $TiO_{2adj}/Yb$  diagram for the basaltic trachyandesite apparently derived from OIB-like with a mantle component. **(b)** Nb/Yb versus Th/Yb diagram for the basaltic andesite, low-Si and high-Si andesite rocks display an interaction between mantle and continental crust. MORB, Mid-Ocean Ridge; E-MORB, Enriched Mid-Ocean Ridge; N-MORB, Normal Mid-Ocean Ridge; OIB, Ocean Island Basalt 103

**Figure 16 (a, b).** Bivariate trace elements diagrams of the La versus La/Nb and Nb versus La/Nb; the basaltic trachyandesite (transitional series) relates to a rift magma and the basaltic andesite, low-Si and high-Si andesites (subalkaline series) relates to a subduction magma. (c) Immobile trace elements based multidimensional discrimination diagram for the basaltic trachyandesites, basaltic andesite, low-Si and high-Si andesites (subalkaline series) ([Verma & Verma, 2013](#)) from the Compostela area. CA, continental arc; Col, collision; CR + CI, combined Continental Rift and Ocean Island 104

**Figure 17.** Schematic tectonic model depicting the possible origin of the intraplate and/or OIB and subduction-related magmas. WTMVB, western sector of Trans Mexican Volcanic Belt; Tepic Zacoalco Rift; JB, Jalisco Block; SPC, San Pedro-Ceboruco Graben; V, volcano 105

## Capítulo 4

**Figura 1. (a)** Mapa tectónico y principales firmas magmáticas identificadas en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y la localización del área de estudio (recuadro rojo). Estratovolcanes: 1–caldera La Primavera; 2–Tequila; 3–Ceboruco; 4–Tepetitlic; 5–Sanganguey; 6–Las Navajas y 7–San Juan. TMVB–Trans Mexican Volcanic Belt; PRR–Pacific Rivera Rise; TFZ–Tamayo Fault Zone; RFZ–Rivera Fracture Zone; MAT–Middle America Trench 115

**Figura 1. (b)** Mapa geológico-estructural del área Compostela-Ceboruco. En el recuadro rojo se encuentra el área de estudio. Las series identificadas se agrupan en los cuatro sistemas identificados. Volcanes poligenéticos Ceboruco y Tepetitlic, la Cadena Volcánica del Norte, la cadena Volcánica del Sur y el complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. SCVC–Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. Las edades son referidas en el texto. Modificado de [Ferrari & Rosas-Elguera 2000 y Petrone, 2010](#) 116

**Figura 2.** Litología del área de estudio representada por el volcanismo silíceo del Plioceno de 4.97 Ma (círculo amarillo, edad reportada por [Frey et al., 2007](#)) y localización de las muestras de la Toba lítica y Toba bandeada. En esta área se encuentran la zona mineralizada Nuevo Milenio. TE–Volcán Tepetitlic; SCVC–Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. Modificado del [Servicio Geológico Mexicano \(2007\), Carta Xalisco F13-D31](#) 118

**Figura 3 (a-f).** Laminas petrográficas de la toba lítica (COM-01B, COM-01C y COM-02) y la toba bandeada (COM-04C, COM-04D y COM-04G). Se agregan los valores calculados del índice de alteración para cada una de las muestras. La descripción se encuentra en el texto. AI–Índice de alteración; Fld–Feldespatos; S–Sericita; Qz–Cuarzo; G–vidrio; Py–Pirita; B–Biotita; Vs–Vesículas 121

**Figura 4. (a)** Diagrama MALI (Índice modificado cal–alcalino:  $Na_2O+K_2O-CaO$ , [Frost & Frost, 2001](#)) para la secuencia de la toba lítica y la toba bandeada. **(b)** Relación  $N_2O_{adj}$  contra  $K_2O_{adj}$ , la toba lítica son altamente potásicas mientras que la toba bandeada es potásica. **(c)** Relación  $SiO_{2adj}$  contra  $Al_2O_{3adj}$  la toba lítica aumenta su contenido de aluminio con respecto a la toba bandeada. **(d)**  $SiO_{2adj}$  contra Fe-index ( $Fe-index = (FeO_{adj} + 0.9Fe_2O_{3adj}) / (FeO_{adj} + 0.9Fe_2O_{3adj} + MgO_{adj})$ ), la toba lítica muestra un ligero enriquecimiento en fierro y la toba bandeada es férrica 128

**Figura 5. (a)** Diagrama composicional  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra ASI (Índice de saturación de aluminio=  $\text{Al}/(\text{Ca}-1.67\text{P}+\text{Na}+\text{K})$ ); Frost & Frost, 2008). **(b)** Diagrama composicional A/KN ( $\text{Al}/\text{K}+\text{N}$  molar) contra A/CKN ( $\text{Al}/\text{Ca}+\text{K}+\text{Na}$  molar); MacDonald, 1974. Ambas secuencias de toba lítica y toba bandeada son peraluminosas 129

**Figura 6. (a)** Diagrama ternario An-Ab-Or se identifican para la toba lítica y la toba bandeada feldespatos que corresponden a sanidinos. **(b)** Diagrama de Morimoto (1988) la toba lítica tiene clinopiroxenos que se agrupan en clino-estantita, mientras que para la toba bandeada se agrupan en clino-ferrosilita 130

**Figura 7. (a)** Diagrama de  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra AI (Índice de alteración). La línea intermitente marca el límite entre la alteración hidrotermal y el metamorfismo o diagénesis regional. Se observa la toba lítica presenta valores  $<60$  indicando que estas rocas pasan por un proceso de alteración hidrotermal, mientras que la toba bandeada se encuentra menos afectada por esta alteración. **(b)** Diagrama Índice de alteración (AI) contra  $\text{Na}_{2}\text{O}_{\text{adj}}$  se observa que la toba lítica tiene una intensidad de alteración de fuerte a intensa, mientras que la toba bandeada tiene una intensidad de alteración de débil a moderada, que se asocia a los minerales de reemplazamiento que se observan tanto en la petrografía como en la difracción de Rayos-X (XRD). Modificado de Large et al., (2001); Gifkins, C. et al., (2005) 133

**Figura 8. (a)** Elementos de tierras raras (REE) normalizados a condrita (McDonough & Sun, 1995). La toba lítica presenta un patrón enriquecido en LREE con respecto a HREE mientras que la toba bandeada muestra un fraccionamiento a lo largo de LREE con un enriquecimiento en HREE que la diferencia de la toba lítica. **(b)** Normalización del manto primitivo (McDonough & Sun, 1995) la toba lítica presenta anomalías de Nb, Ta y Sr, mientras que la toba bandeada tiene una anomalía más marcada de Ba, Sr y Eu 134

**Figura 9. (a)** Diagrama  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra Nb, la toba lítica se agrupa en el campo de arco volcánico (VAG+COLG+ORG) mientras que la toba bandeada se agrupa en el campo de intraplaca (WPG+ORG). Este mismo agrupamiento se observa en **(b)** Diagrama  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra Ta y **(c)** Diagrama (Y+Nb) contra Rb. WPG–Whitin-plate granite; COLG–Collision granite; ORG–Ocean ridge granite 135

**Figura 10. (a)** Diagrama multidimensional usando los elementos traza inmóviles (Verma et al., 2015). La toba lítica se agrupa en el campo de un margen de arco volcánico. **(b)** Diagrama multidimensional usando elementos mayores e inmóviles. La toba bandeada se agrupa en el campo de un margen de intraplaca (Verma et al., 2015). Elementos mayores valores ajustados= ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , FEO, MNO, MGO, CAO,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , y  $\text{P}_2\text{O}_5$ ); elementos traza inmóviles (La, Ce, Sm, Yb, Nb, Ni, Th, V, Y, y Zr) 136

## RESUMEN

En el sector occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, subduce mayormente la placa de Rivera bajo la placa Norte Americana. Los eventos geológicos y tectónicos en este sector ocurren durante el Mioceno tardío hasta el Cuaternario y se conforman por diferentes pulsos de actividad volcánica, asociados al desarrollo del rift Tepic-Zacoalco. Este rift se conforma por tres sistemas de fallas, uno de importancia en esta investigación es el sistema de fallas a lo largo del límite de la Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco, donde se encuentra el graben San Pedro-Ceboruco y el área Compostela.

La geología del área Compostela está representada por riolitas que se dividen en dos secuencias: toba lítica (Seq1) y toba bandeada (Seq2), ambas ligeramente alteradas; una unidad de andesitas que rellenan los valles al noreste y sureste del área; una unidad de basalto traquiandesita, producto de un dique alimentador que corta y cubre discordantemente a la toba lítica; y por último depósitos de pómez y de piroclastos, que corresponden a la actividad volcánica del complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande y del Volcán Tepetiltic, respectivamente. Petrográficamente, la toba lítica y toba bandeada presentan una textura porfídica, el arreglo mineral se conforma por fenocristales de [feldespatos (sanidinos) + cuarzo] en una matriz de [cuarzo + piroxenos (clino-ferrosilita y clino-enstatita) + vidrio]. Ambas secuencias muestran una ligera alteración hidrotermal; los feldespatos alteran a minerales arcillosos [illita + moscovita] y los piroxenos a clorita. Las unidades de basalto-andesita y andesita también presentan una textura porfídica, con un arreglo mineral de fenocristales de [Plagioclasas ± Piroxenos] en una matriz de [Plagioclasas ± Piroxenos ± Minerales Opacos ± Vesículas]. La mayoría de los piroxenos identificados son Clino-ferrosilita.

Estructuralmente se tiene dos sistemas de fallas normales en el área de estudio. El primero tiene una orientación N-S con echado al E y el segundo con orientación NW-SE con echado al N. Estos sistemas de fallas se encuentran cortando a la toba lítica, la toba bandeada y a los depósitos de piroclastos. En cuanto a la orientación del bandeamiento se tienen tres orientaciones. El primero tiene una orientación NW-SE con echado al SW presente en los depósitos de piroclastos del Volcán Tepetitlic. El segundo NE-SW con echado al SE en la secuencia de la toba lítica y el tercero NW-SE con echado al N representa mayormente a la secuencia de la toba bandeada.

La composición de las rocas intermedias consiste en una serie transicional (basalto traquiandesitas) con valores [52.72-53.94 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.69-2.53 wt% MgO] y una serie subalcalina con Low-Si [55.11-60.94 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.79-2.74 wt% MgO] y High-Si [61.60-62.71 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.36-0.80 wt% MgO]. El basalto traquiandesita muestra un ligero enriquecimiento en las tierras raras ligeras relativo a las tierras raras pesadas [(La/Yb)<sub>N</sub>= 5.81-8.07] y casi nula la anomalía Eu. Las andesitas muestran un enriquecimiento en los elementos litófilos de gran-ion (Ba, K) con anomalías de Nb (Th/Ce) y Ti. Los radios de <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0.703519-0.703882) para el basalto traquiandesita muestra un ligero agrupamiento comparado con el basalto andesita <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0.704073) con valores positivos de εNd(t) +5.6 y +3.4, respectivamente. La combinación de los radios geoquímicos y los diagramas de discriminación multidimensionales indican que el basalto traquiandesita fue generado en un ambiente de rift y/o OIB-type, mientras que las andesitas fueron generadas de un ambiente de subducción.

La composición de la toba lítica tiene valores de [63.63-68.77 wt% SiO<sub>2</sub>], un índice alcalino modificado de [5.30-10.66 wt% MALI] y un índice de alteración de [78.43-99.30 AI]. Mientras que la toba bandeada tiene valores de [70.79-75.58 wt% SiO<sub>2</sub>], un índice alcalino modificado [6.79-8.82 wt% MALI] y un índice de alteración de [56.00-69.44 AI]. Ambas secuencias son

férricas y peraluminosas. La toba lítica tiene un ligero enriquecimiento en las tierras raras ligeras con respecto a las tierras raras pesadas  $[(La/Yb)_N = 5.58-9.89]$  y con una anomalía nula de Eu. A diferencia de la toba bandeada que muestra un ligero enriquecimiento en las tierras raras pesadas, anomalía negativa de Eu y anomalía (positiva/negativa) de Ce. En ambas secuencias se tiene un enriquecimiento en (Rb y K) y reducción en (Ba y Sr) y (Nb y Ta). Las relaciones geoquímicas de  $SiO_2$  vs Nb,  $SiO_2$  vs Ta e Y vs Nb, indican que la toba lítica deriva posiblemente de una cámara magmática que se originó en un ambiente de arco volcánico durante un periodo de baja actividad tectónica, y la toba bandeada de una cámara magmática que se originó en un ambiente tectónico de intraplaca durante la fase extensional en el Plioceno.

Por último, la toba lítica en el área Compostela se correlaciona con la erupción ignimbrítica (4.97 Ma) que se desarrolla a lo largo del Rift Tepic-Zacoalco y forma parte del graben San Pedro-Ceboruco. Posterior a este evento se tiene el desarrollo de actividad volcánica, representado por conos de escoria, flujos de lava y algunos domos que se asocian al complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande, al Volcán Tepetiltic y al Volcán Ceboruco. Todos estos eventos siguen la misma orientación NW-SE del rift. Algunos de estos eventos dentro del área Compostela corresponden a la unida de andesita que se encuentra rellenando los valles al noreste (2.25 Ma) y suroeste (2.42 Ma) y la colada de lava de basalto andesita (basalto traquiandesitas) (1.05 y 1.07 Ma) que cubre a la secuencia de la toba lítica. Los eventos más juveniles en el área Compostela están representados por los depósitos de pómez que se relacionan con la actividad del complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande (~280 ka) y los depósitos de piroclastos a la actividad del volcán Tepetiltic (~236 ka).

**Palabras clave:** occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano, rift Tepic-Zacoalco, graben San Pedro-Ceboruco, rocas intermedias, rocas félsicas,  $^{40}Ar/^{39}Ar$  geocronología, isótopos Sm-Nd.

## ABSTRACT

In the western sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt, the Rivera plate subducts mostly under the North American plate. The geological and tectonic events in this sector that occur during the late Miocene to the Quaternary are formed by different pulses of volcanic activity associated with the development of the Tepic-Zacoalco rift. This rift is formed by three fault systems, one of importance in this research is the fault system along the boundary of the Sierra Madre Occidental and the Jalisco Block, where the San Pedro-Ceboruco graben and Compostela area is located.

The geology of the Compostela area is represented by rhyolites that are divided into two sequences: lithic tuff (Seq1) and banded tuff (Seq2), both slightly altered. The andesite unit fills the valleys to the northeast and southwest of the area, followed by a basaltic andesite unit (later classified as basaltic trachyandesite). This unit is product of a feeder dike that cuts and discordantly covers the lithic tuff. Finally, pumice and pyroclastic deposits, which correspond to the volcanic activity of the San Pedro-Cerro Grande volcanic complex and the Tepetitlic Volcano, respectively. Petrographically, the lithic tuff and banded tuff present a porphyritic texture, the mineral arrangement is formed by phenocrysts of [feldspars (sanidines) + quartz] in a matrix of [quartz + pyroxenes (clino-ferrosilite and clino-enstatite) + glass]. Both sequences show slight hydrothermal alteration, feldspars alter to clay minerals [illite + muscovite] and pyroxenes to chlorite. The basalt andesite and andesite units also show a porphyritic texture, with a mineral arrangement of phenocrysts of [Plagioclase ± Pyroxenes] in a matrix of [Plagioclase ± Pyroxenes ± Opaque Minerals ± Vesicles]. Most of the pyroxenes identified are Clino-ferrosilite.

Structurally there are two normal fault systems in the study area. The first one has a N-S orientation with E dip and the second one has a NW-SE orientation with N dip. These fault

systems are cutting the lithic tuff, the banded tuff, and the pyroclastic deposits. There are three orientations of the bedding. The first has a NW-SE orientation with a SW dip present in the pyroclastic deposits of the Tepetitlic Volcano. The second NE-SW with SE dip in the lithic tuff and the third NW-SE with north dip represents mostly banded tuff.

The composition of the intermediate volcanic rocks consists of transitional series (basaltic trachyandesite) with values of [52.72-53.94 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.69-2.53 wt% MgO] and a subalkaline series with Low-Si [55.11-60.94 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.79-2.74 wt% MgO] and High-Si [61.60-62.71 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.36-0.80 wt% MgO]. The basaltic trachyandesites show a slight enrichment in light rare earth elements relative to heavy rare earth elements [(La/Yb)<sub>N</sub>= 5.81-8.07] with negligible Eu anomaly. The andesites are enriched in large-ion lithophile elements (Ba, K) with anomalies of Nb (Th/Ce) and Ti. The <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0.703519-0.703882) ratios for the basaltic trachyandesites show a slight clustering compared to the basaltic andesite <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0.704073) with positive εNd(t) values of +5.6 and +3.4 respectively. Geochemical ratios and multidimensional discrimination diagrams indicate that the basaltic trachyandesite were generated from rift and/or OIB-type environment, whereas the andesites were generated from the slab of a subduction environment.

The compositions of the lithic tuff sequence have values of [63.63-68.77 wt% SiO<sub>2</sub>], a modified Alkali lime index [5.30-10.66 wt% MALI] and an alteration index [78.43-99.30 AI]. While the banded tuff sequence has values of [70.79-75.58 wt% SiO<sub>2</sub>], a modified Alkali lime index [6.79-8.82 wt% MALI] and an alteration index [56.00-69.44 AI]. Both sequences are ferroan and peraluminous. The lithic tuff has a slight enrichment in light rare earth elements with respect to high rare earth elements [(La/Yb)<sub>N</sub>= 5.58-9.89] and null Eu anomaly. In contrast, the banded tuff shows a slight enrichment in high rare earth elements, with negative Eu anomaly and



(positive/negative) Ce anomaly. In both sequences there is an enrichment in (Rb and K) and reduction in (Ba and Sr) and (Nb and Ta). The geochemical ratios of SiO<sub>2</sub> vs Nb, SiO<sub>2</sub> vs Ta and Y vs Nb, shows that the lithic tuff was derived from a silicic magma that originated in a volcanic arc margin, during a period of low tectonic activity and the banded tuff from a silicic magma that originated in an intraplate margin during an extensional faulting since the Pliocene.

Finally, the lithic tuff in the Compostela area correlates with the ignimbrite flare-up (4.97 Ma) that developed along the Tepic-Zacoalco Rift and is part of the San Pedro-Ceboruco graben. This event was followed by the development of volcanic activity, represented by scoria cones, lava flows, and some domes associated with the San Pedro-Cerro Grande volcanic complex, the Tepetiltic Volcano, and the Ceboruco Volcano. All these events follow the NW-SE trend of the rift. Some of these events within the Compostela area correspond to the andesite unit that fills the valleys to the northeast (2.25 Ma) and southwest (2.42 Ma), and the basalt andesite (basaltic trachyandesites) lava flow (1.05-1.07 Ma) that covers the lithic tuff sequence. The youngest events in the Compostela area are represented by pumice deposits that are related to the activity of the San Pedro-Cerro Grande volcanic complex (~280 ka) and pyroclastic deposits to the activity of the Tepetiltic volcano (~236 ka).

**Key words:** western Trans-Mexican volcanic belt, Tepic-Zacoalco rift, San Pedro-Ceboruco graben, intermediate rocks, felsic rocks, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating, Sm-Nd isotopes.

## INTRODUCCIÓN

### 1. Panorama general de la disertación

La provincia geológica más representativa del centro de México es el cinturón volcánico Trans-Mexicano, el cual ha sido dividido en tres sectores por presentar diferentes rasgos geológicos y tectónicos. Uno de estos sectores y de importancia en esta investigación es el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano que ha sido objeto de numerosas investigaciones en cuanto su evolución geológica y tectónica; ya que en este sector se desarrolla un margen convergente que involucra principalmente la subducción de la placa de Rivera en la placa Norteamericana a lo largo del oeste de la trinchera Centroamericana. El resultado de esta subducción es un arco magmático continental que se limita al norte por la Sierra Madre Occidental y al sur por el Bloque Jalisco con una orientación predominante WNW-ESE, que corresponde al sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano. En este sector la parte frontal del arco está representada por volcanismo Na-alcálido y la mitad posterior por domos félsicos y centros monogenéticos de composición máfico-intermedios (volcanismo bimodal), así como lavas con afinidad de intraplaca y transicionales (Ferrari et al., 2003). Posterior a este volcanismo durante el Cuaternario se desarrollan siete centros volcánicos que se localizan en la parte posterior del arco cinco de ellos de composición andesita-dacita: San Juan, Sanganguey, Tepetitlic, Ceboruco, Tequila, mientras que La Sierra Primavera de composición riolítica y el volcán Las Navajas es per alcalino (Frey et al., 2014).

Algunas de las primeras publicaciones que abarcan la evolución geológica de este sector occidental, corresponden al reconocimiento geológico de la parte oeste-central del estado de

Nayarit por [Gastil, et al., \(1978\)](#), con respecto a la composición geoquímica de la evolución magmática en el occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano [Luhr et al., \(1989\)](#) identifican rocas calcoalcalinas, y alcalinas, mientras que [Verma & Nelson \(1989\)](#) hacen análisis de isotopos de Sr-Nd y elementos traza en la evolución de magmas alcalinos y calcoalcalinos en este sector. [Gómez-Tuena et al., \(2007\)](#) hacen una extensa revisión geológica y tectónica de los tres sectores; occidental, central y oriental del cinturón volcánico Trans-Mexicano. Mientras que [Frey et al., \(2007\)](#) mencionan que el volcanismo a lo largo del rift Tepic-Zacoalco está representado por una erupción de Ignimbritas como evidencia del *rifting* o rompimiento entre el bloque Jalisco y la placa Norteamericana. Así, [Petrone et al., \(2014\)](#) relacionan este volcanismo voluminoso riolítico con acumulados gabroicos en este sector occidental. [Díaz-Bravo et al., \(2014\)](#) tratan de identificar el origen del magmatismo de intraplaca en el occidente del cinturón volcánico Trans Mexicano y [Gómez-Tuena et al., \(2014\)](#) contribuyen con la petrogénesis de andesitas de dos volcanes representativos: Tequila y Sanganguey en este sector.

En cuanto a la evolución tectónica [Righter et al., \(1995\)](#) mencionan la superposición de la subducción y el rift continental como dos regímenes tectónicos desarrollados en el Cenozoico tardío, al occidente del cinturón volcánico Mexicano. [Pardo & Suárez \(1993 y 1995\)](#) y [Yang et al., \(2009\)](#), interpretan la geometría, la velocidad de subducción y los límites de la placa de Rivera bajo el bloque Jalisco al Occidente de México y [Urrutia-Fucugauchi & González-Morán \(2006\)](#) describen el patrón estructural del sector noroeste del rift Tepic-Zacoalco y su implicación tectónica con el bloque Jalisco. Por otra parte, [Ferrari & Rosas-Elguera \(2000\)](#) contribuyen con una revisión en la distribución y tiempo de la deformación del occidente de México con enfoque en el rift Tepic-Zacoalco, e indican que el inicio de la extensión del rift va desde el Mioceno tardío con una evidente deformación antes del Cuaternario, identificando tres

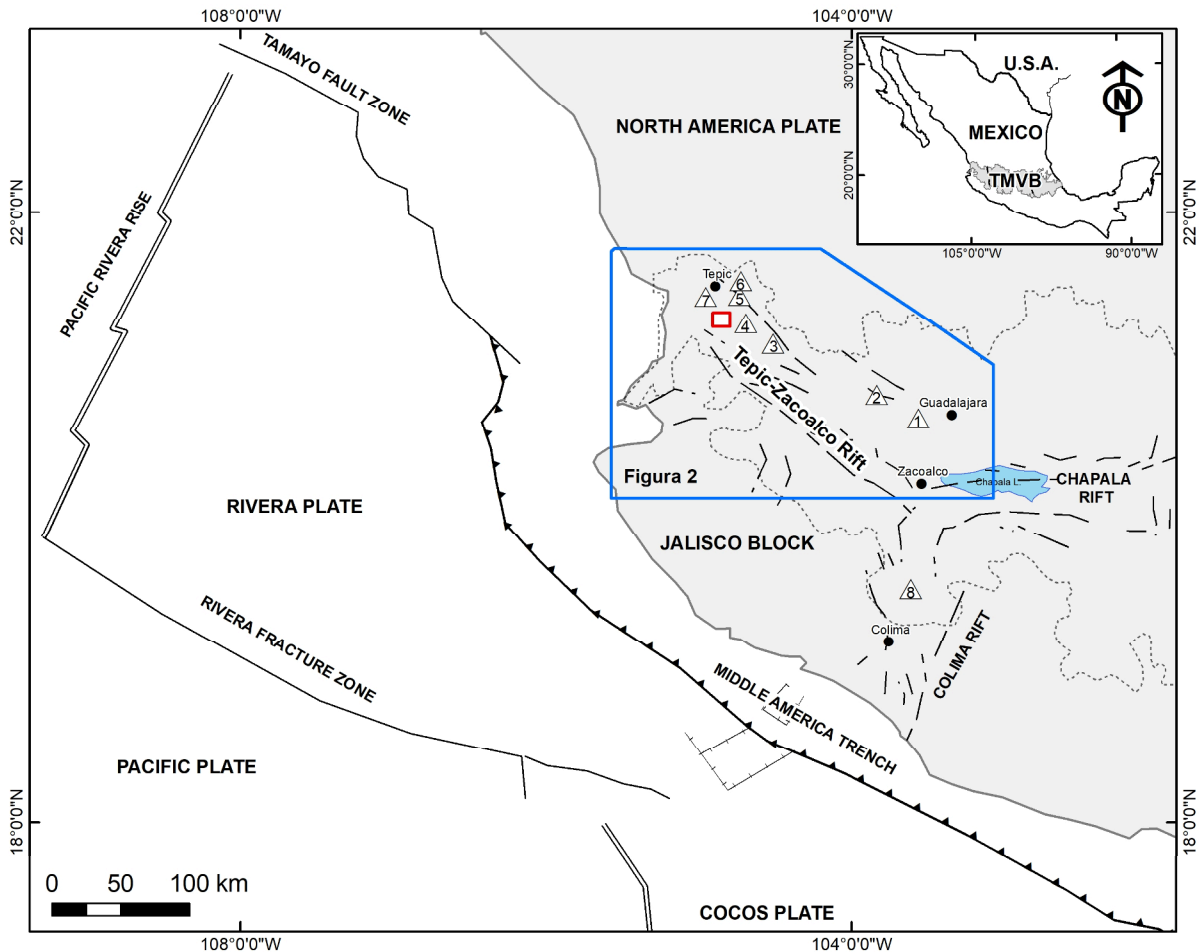
sistemas de fallas con diferentes estructuras que los conforman; una de estas estructuras el graben San Pedro-Ceboruco. Este graben ha sido producto de diversas publicaciones: [Petrone et al., \(2001\)](#) reportan seis nuevas edades K-Ar e identifican cuatro sistemas volcánicos dentro de este; [Ferrari et al., \(2003\)](#) hacen un estudio detallado de la geología y [Petrone et al., \(2003\)](#) explican la inusual coexistencia entre magmatismo de subducción y magmatismo de intraplaca dentro de este graben. Continuando, [Frey et al., \(2004\)](#) reportan edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  del volcanismo de este mismo graben y [Petrone et al., \(2006\)](#) describen el volcanismo y evolución magmática en este complejo, posteriormente [Petrone & Ferrari, \(2008\)](#) reconocen una asociación espacio-temporal entre rocas adakiticas y basaltos enriquecidos en Nb y por último, [Petrone, \(2010\)](#) describe los procesos magmáticos de los cuatro sistemas volcánicos reconocidos dentro del graben San Pedro-Ceboruco.

En esta investigación el área Compostela se localiza al límite noroeste del graben San Pedro-Ceboruco, estructura principal del rift Tepic-Zacoalco del sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano, por lo tanto, se busca complementar con nuevos datos geológicos, petrográficos, geoquímicos de roca total (elementos mayores, traza y tierras raras), así como de isótopos de Sr-Nd y geocronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , más evidencia sobre el ambiente tectónico de las rocas que afloran en esta área y así contribuir en el conocimiento de la evolución geodinámica del sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y su relación en espacio-tiempo con el rift Tepic-Zacoalco.

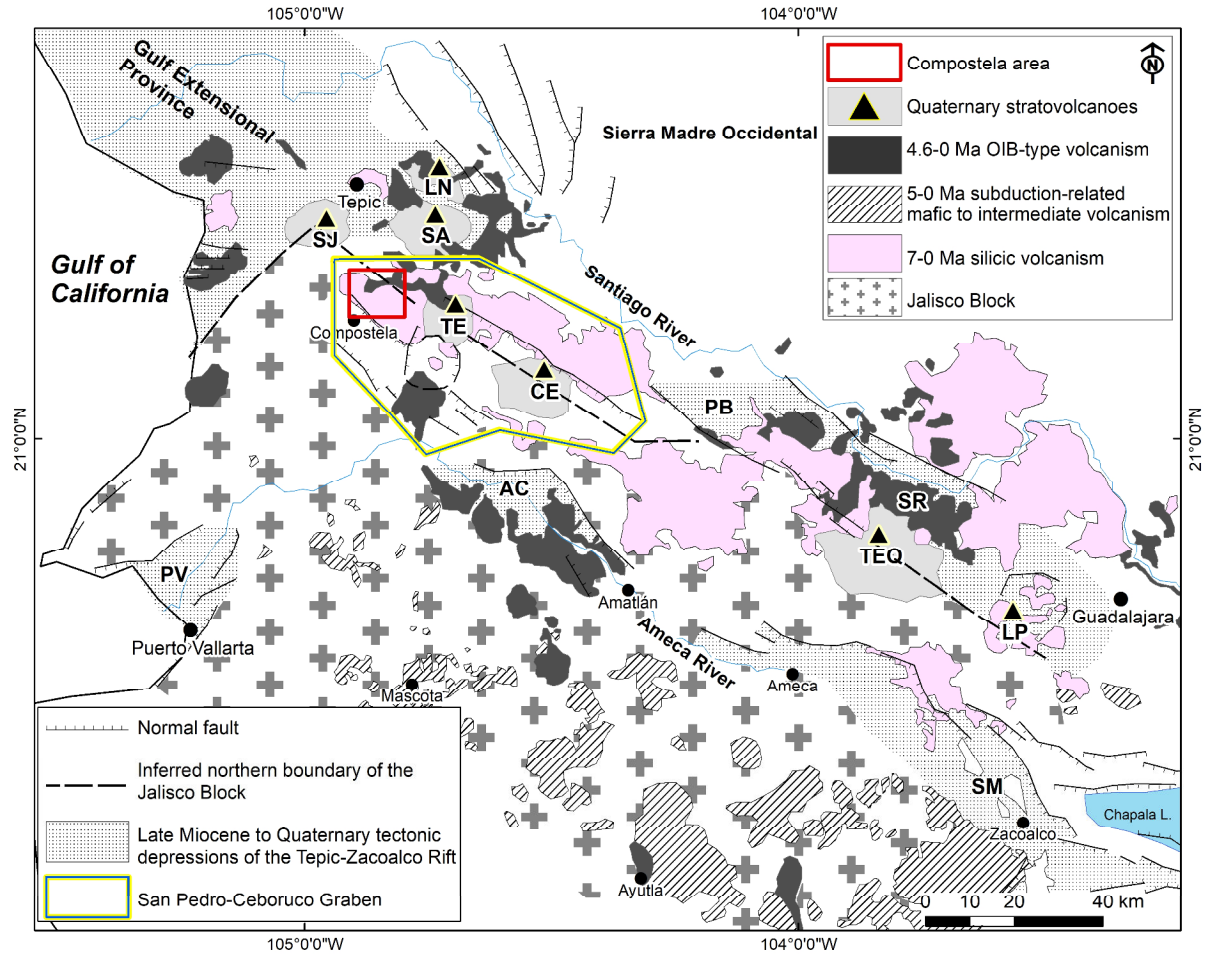
### **1.1 Localización del área Compostela**

El área Compostela abarca 123 km<sup>2</sup>, se localiza en el estado de Nayarit al sur de la ciudad de Tepic, en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y el rift Tepic-Zacoalco, ambos con orientación predominante WNW-ESE. Sin embargo, dentro del rift Tepic-Zacoalco,

se encuentra el graben San Pedro-Ceboruco y el área Compostela se encuentra al límite noroeste de este graben (**Figura 1 y 2**). En la sección **3. Sistemas volcánicos del graben San Pedro-Ceboruco, rift Tepic-Zacoalco** se describe con más detalle la geología de los cuatro sistemas volcánicos reconocidos dentro de este graben.



**Figura 1.** Mapa tectónico general del sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y localización del área Compostela (recuadro rojo). Los triángulos numerados son las principales estructuras volcánicas dentro del rift Tepic-Zacoalco y el rift de Colima: 1—Sierra La Primavera, 2—Volcán Tequila, 3—Volcán Ceboruco, 4—Volcán Tepetitlic, 5—Volcán Sanganguey, 6—Volcán Las Navajas, 7—Volcán San Juan y 8—Volcán Colima-Nevaldo. La línea intermitente representa el límite del cinturón volcánico Trans-Mexicano (TMVB). Los límites del bloque Jalisco están definidos por los rifts de Tepic-Zacoalco y Colima y por la trinchera Centroamericana. Modificado de [Frey et al., \(2014\)](#).



**Figura 2.** Mapa que muestra los eventos geológicos y fallas extensionales en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y rift Tepic-Zacoalco. Delimitación aproximada del graben San Pedro-Ceboruco (recuadro amarillo-azul). Localización del área Compostela (recuadro rojo) dentro de este graben. Estratovolcanes Cuaternarios: LP—La Primavera, TEQ—Volcán Tequila, CE—Volcán Ceboruco, TE—Volcán Tepetitlic, SA—Volcán Sanganguey, LN—Volcán Las Navajas, SJ—Volcán San Juan. Principales estructuras tectónicas en el rift Tepic-Zacoalco: PV—graben Puerto Vallarta, PB-SR—graben Plan de Barrancas-Santa Rosa, SM—*half*-graben San Marcos. Modificado de Ferrari et al., (2003).

## 1.2 Antecedentes del área Compostela

La base geológica con la que se construyeron los mapas para el reconocimiento geológico del área Compostela fueron las Cartas geológico-mineras del [Servicio Geológico Mexicano \(SGM\)](#), Tepic [F138](#) escala 1:250,000, Xalisco [F13-D31](#) y Compostela [F13-D41](#) ambas a escala 1:50,000 y sus correspondientes datos vectoriales de cada carta, de igual manera se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) del Estado de Nayarit por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La base geológica se construyó con el sistema WGS 84 (World Geodetic System) y para el trabajo en campo en el área de estudio, se contó con el permiso del Ing. Héctor Chávez Polina gerente de la compañía minera Rochester Resources Ltd. durante el 2018 y 2019 para tener acceso a ciertas áreas que son parte de la concesión minera de la compañía que opera en esa área.

Dentro del área Compostela y con referencia en la Carta geológica Xalisco se encuentra la zona mineralizada Nuevo Milenio que ha sido clasificada como un depósito epitermal de baja sulfuración. Esta zona mineralizada ha sido trabajada a pequeña escala en la extracción de oro y plata desde la época colonial y el primer reconocimiento geológico-minero a semidetalle dentro de la zona Nuevo Milenio denominada área San Francisco, fue realizada por [Aguilar-Nogales y Cedillo-Calvillo, \(1983\)](#) por parte del anterior Consejo de Recursos Minerales (CRM) ahora Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Cabe destacar que este tipo de depósitos epitermales se encuentran asociados generalmente a arcos volcánicos subaeriales y a intrusiones de magmas calcoalcalinos en el rango de basalto andesita a andesita o dacita a riolita ([Cooke & Simmons, 2000](#)), relacionados en márgenes convergentes; subducción de placa oceánica-continental u oceánica-oceánica, o asociados a rifts tras arco ([Camprubí & Albinson, 2006](#)). Otros rasgos volcánicos con las que se pueden asociar

estos depósitos son secuencias de riolitas con piroclastos, piroclastos soldados, flujos asociados a ignimbritas, calderas o complejos de calderas, y a otros sistemas de cinturones volcánicos alrededor del mundo (Guilbert & Park, 1986).

En el reporte elaborado por Aguilar-Nogales y Cedillo-Calvillo, (1983) se describen las unidades geológicas representativas como: pórfidos dacíticos y andesíticos (Eoceno), brechas y tobas riolíticas-ignimbritas donde se emplaza la mineralización (Oligoceno-Mioceno), derrames basálticos (Plioceno), depósitos de Piamonte, terrazas de basaltos (Pleistoceno), aluvión y suelos residuales (Holoceno). Las edades relativas de estas unidades fueron por observaciones de campo y posición estratigráfica. Los rasgos estructurales de fallamiento y fracturamiento predominantes que afectan principalmente a las tobas riolíticas-ignimbritas tienen una orientación NW-SE y NE-SW.

En la compilación de las grandes provincias metalogénicas y épocas de México realizada por Antoni Camprubí, (2009) y en la actualización de estas provincias Antoni Camprubí, (2013) menciona la zona de Nuevo Milenio como un depósito epitermal de baja sulfuración con edad relativa por correlación con la geología adyacente de  $\leq 21$  Ma. Esta edad corresponde a la riolita-ignimbrita reconocida en el trabajo de Aguilar-Nogales y Cedillo-Calvillo, (1983) donde se está emplazando la mineralización.

Sin embargo, Frey et al., (2007) reportan a lo largo del rift Tepic-Zacoalco una erupción ignimbrítica durante el Plioceno, a diferencia de la edad del Oligoceno de  $\leq 21$  Ma reportada por Aguilar-Nogales y Cedillo-Calvillo (1983), y Camprubí (2013, 2009) por posición estratigráfica. Por lo tanto, para la unidad de riolitas identificada en el área Compostela es importante definir si estas pertenecen a esa erupción ignimbrítica reportada por los autores antes mencionados.



Para las rocas de composición máfico e intermedias los datos geocronológicos a zonas adyacentes al área Compostela reportados por [Frey et al., \(2007\)](#), [Petroni et al., \(2001\)](#) y [Ferrari, et al., 2003](#) se encuentran entre el Plioceno tardío al presente con la última erupción del volcán Ceboruco. Esta actividad se desarrolla a lo largo del graben San Pedro-Ceboruco, estructura que pertenece al rift Tepic-Zacoalco. Sin embargo, dentro del área Compostela las unidades de andesita y basalto andesita la edad es definida por posición estratigráfica. Además, que estas dos unidades no son reportadas en la literatura, pero si en reportes técnicos y en la carta geológica Xalisco F13-D31.

Por lo tanto, las principales tres unidades reconocidas en el área: riolitas, andesitas y basalto andesitas, es importante contextualizarlas en espacio y tiempo, así como definir su relación dentro del graben San Pedro-Ceboruco en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano.

### **1.3 Objetivos**

El área Compostela se localiza en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano, donde mayormente subduce la placa de Rivera en la placa Norteamericana. En este sector se tienen identificados cuatro sistemas volcánicos que pertenecen al graben San Pedro-Ceboruco y magmatismo silíceo del Plioceno. Sin embargo, el área Compostela cubre una mínima fracción al límite noroeste de este gran complejo volcánico y tectónico; del cual no se tienen suficientes datos geoquímicos, petrográficos, isotópicos y geocronológicos de las tres unidades que afloran en el área: riolitas, andesitas y basalto-andesitas. Entonces, el objetivo de

esta investigación es caracterizar geológica, geoquímica y geocronológicamente estas tres unidades; por lo tanto, se desglosan los siguientes objetivos específicos:

i.- Conocer la relación estratigráfica y estructural de las tres unidades geológicas: riolita, andesita y basalto andesita.

ii.- Conocer el ambiente tectónico y petrogénesis de estas tres unidades geológicas. En base a la petrología, química mineral, geoquímica de roca total, elementos traza, tierras raras e isótopos de Sm-Nd.

iii.- Definir el tiempo para las unidades de andesitas y basalto andesitas con geocronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .

#### **1.4 Hipótesis**

En el área Compostela se tienen identificadas tres unidades geológicas que son: 1) extensa unidad de riolita, 2) unidad de andesitas que cubre los valles al noreste y suroeste del área y 3) unidad de basalto andesita que se localizan en la parte central del área, por lo cual se desarrollan dos hipótesis.

Hipótesis uno: La unidad de riolita identificada en el área Compostela es continuidad de la erupción ignimbrítica originada a lo largo del rift Tepic-Zacoalco reportado por [Frey et al., \(2007\)](#)

Hipótesis dos: Las unidades de andesita y basalto andesita fueron originadas durante el volcanismo del occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano.

## 1.5 Esquema de la Tesis

La tesis se divide en cinco capítulos, donde se da respuesta al objetivo general y a los objetivos específicos anteriormente planteados. El **capítulo uno** engloba el contexto geológico y tectónico regional del cinturón volcánico Trans-Mexicano. Aquí se describen los cuatro episodios en la evolución geológica de esta provincia, la cual es dividida a su vez en tres sectores: occidental, central y oriental, por presentar diferentes rasgos geológicos y tectónicos. Mientras que en el contexto tectónico se describe principalmente al sector occidental de cinturón volcánico Trans-Mexicano; ya que en este sector es donde converge mayormente la placa de Rivera en la Norteamericana, y donde se encuentra el rift Tepic-Zacoalco. En este rift se tienen agrupados tres sistemas de fallas, uno de importancia en esta investigación es el sistema a lo largo del límite de la Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco, donde se encuentra el graben San Pedro-Ceboruco y el área Compostela.

En el **capítulo dos** se describe la geología del área Compostela constituida principalmente por rocas de composición intermedia como basalto andesitas (posteriormente clasificadas como basalto traquiandesitas), andesitas y rocas de composición félsicas, donde se identificaron dos secuencias representadas por una toba lítica y una toba bandeada, por último, depósitos de pómez y de piroclastos que representan la actividad volcánica del complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande y del Volcán Tepetiltic. Además, se integran los datos estructurales de 19 fallas normales y 13 de la orientación de la estratificación, ambos obtenidos en la toba lítica, en la toba bandeada y en los depósitos de piroclastos. Estos datos sirvieron para elaborar estereogramas e identificar dos sistemas de fallas normales; el primero N-S con echado al N y el segundo NW-SE con echado al N y un grupo de cuatro fallas con diferentes rumbos y echados. De igual manera se identificaron tres orientaciones de estratificación; el primero NW-SE con echado al SW, el

segundo NE-SW con echado al SE y el tercero NW-SE con echado al N en las unidades antes mencionadas. Con respecto a la composición química de las unidades de basalto andesita, andesita y las secuencias de toba bandeada y toba lítica permitió desarrollar dos publicaciones que se presentan en el **capítulo tres** para las rocas de composición intermedia y el **capítulo cuatro** para las rocas félsicas.

El **capítulo tres** se describe la geología, petrología, geoquímica de roca total de elementos mayores, traza y tierras raras, isótopos de Sm-Nd y geocronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de las lavas basálticas y andesíticas en el área Compostela. La concentración de los elementos mayores en roca total se obtuvo por fluorescencia de rayos-X (XRF) y de los elementos traza y tierras raras por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los análisis isotópicos Sm-Nd ayudaron a identificar la fuente del magma de las lavas basálticas y andesíticas y la geocronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  el tiempo en el cual estas lavas se originaron.

En el **capítulo cuatro** se describe la geología, petrología, geoquímica de roca total de elementos mayores, traza y tierras raras, química mineral por difracción de rayos-X e isótopos de Sm-Nd en las rocas de composición silícea representadas por las secuencias de toba lítica y toba bandeada. Ambas secuencias presentan una ligera alteración argílica, donde los feldspatos potásicos son alterados a minerales arcillosos. Los análisis geoquímicos de roca total de elementos mayores, traza y tierras raras, permitieron distinguir ambas secuencias, así como su petrogénesis. Usando la relación de índice de alteración (AI) versus  $\text{SiO}_{2(\text{adj})}$  y AI versus  $\text{Na}_2\text{O}_{(\text{adj})}$  se obtuvo que ambas secuencias son alteradas por un proceso hidrotermal que se relaciona con la actividad volcánica presente en el área.

En el **capítulo cinco** se hace la conclusión particular y general de los resultados obtenidos de esta investigación de la geología, geoquímica y geocronología de las rocas que afloran en el

área Compostela y su relación con la evolución del occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano.

## Referencias

Aguilar-Nogales, M y Cedillo-Calvillo, R. (1983). Evaluación Geológico-Minera preliminar del área San Francisco, Municipios de Compostela y San Pedro Lagunillas, en el Estado de Nayarit. *Consejo de Recursos Minerales*. Archivo Técnico 180063, p 1-38. Servicio Geológico Mexicano. Archivo técnico histórico. Estado Nayarit, Municipio Compostela, código [1883CECR0001](#). Incluye 21 mapas.

Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58 (1), 27-81. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a2>

Camprubí, A. (2009). Major metallogenic provinces and epochs of Mexico: SGA News, 25, 1-20.

Camprubí, A. (2013). Tectonic and Metallogenic History of Mexico. In Tectonics, Metallogeny, and Discovery: The North American Cordillera and Similar Accretionary Settings. *Society of Economic Geologist, Special Publications 17*, 201-243. <https://doi.org/10.5382/sp.17.06>

Cooke, D. R and Simmons, S.F. (2000). Characteristics and Genesis of Epithermal Deposits. In Gold in 2000. *SEG Review*, 13, 221-244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13>

Díaz-Bravo, B. A., Gómez-Tuena, A., Ortega-Obregón, C., & Pérez-Arvizu, O. (2014). The origin of intraplate magmatism in the western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geosphere*, 10 (2), 340-373. <https://doi.org/10.1130/GES00976.1>

Ferrari, L., Petrone, C.M., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., Manetti, P., & Venegas-Salgado, S (2003). Geology of the San Pedro-Ceboruco Graben, Western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Geociencias Geológicas*, 20 (3), 165-181.

Ferrari y Rosas-Elguera (2000). Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: Tepic-Zacoalco rift revised. In H. Delgado-Granados, G. Aguirre-Díaz, & J.M. Stock, (Eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico* 334 (1-23). Boulder, Colorado: Geological Society of America, Special Paper. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.41>

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, & Delgado-Granados, H. (2004). Magma eruption rates constrained by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology and GIS for the Ceboruco-San Pedro volcanic field, western Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America* 116 (3-4), 259-276. <https://10.1130/B25321.1>

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Delgado-Granados, H., & Carmichael, I.S.E. (2007). A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of

rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(1–2), 49-64. <https://doi.org/10.1130/B25950.1>

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Nelson, S. A., Delgado-Granados, H., Mastin, L., & Wineberg, D. (2014).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Volcan Tepetitlic, western Mexico: Implications for the origin of zoned rhyodacite-rhyolite liquid erupted explosively from an andesite stratovolcano after a prolonged hiatus. *Bulletin of the Geological Society of America*, 126(1–2), 16-30. <https://doi.org/10.1130/B30790.1>

Gastil, G., Krummenacher, D., & Jensky, W. A. (1978). Reconnaissance geology of west-central Nayarit, Mexico. *Geological Society of America Maps and Chart Series MC-24*, scale 1:200,000, 1-8.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. In: S.A. Alaniz-Álvarez, & A.F. Nieto-Samaniego (Eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 422(129–181), Geological Society of America, Special Paper. <https://doi.org/10.11330/2007.2422805>

Gómez-Tuena, A., Diaz-Bravo, B., Vázquez-Duarte, A., Pérez-Arvizu, O., & Mori, L. (2014). Andesite petrogenesis by slab-derived plume pollution of a continental rift. In A. Gomez-Tuena, S. M. Straub, & G.F. Zellmer (Eds.) *Orogenic Andesites and Crustal Growth* 385(65–101). Geological Society, London, Special Publications. <https://doi.org/10.1144/SP385.4>

Guilbert, J. M., & Park, C.F. (1986). The geology of ore deposits. W.H. Freeman and Company, 985.

Luhr, J. F., Allan, J. F., Carmichael, I. S. E., Nelson, S.A., & Hasenaka, T. (1989). Primitive calc-alkaline and alkaline rock types from the Western Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research*, 94(B4), 4515-4530. <https://doi.org/10.1029/JB094iB04p04515>

Pardo, M., & Suárez, G. (1993). Steep subduction geometry of the Rivera Plate beneath the Jalisco Block in western Mexico. *Geophysical Research Letters*, 20(21), 2391-2394. <https://doi.org/10.1029/93GL02794>

Pardo, M., & Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7), 12357-12373. <https://doi.org/10.1029/95jb00919>

Petrone C.M., Tagami, T., Francalanci, L., Matsumura, A., & Sudo, M. (2001). Volcanic systems in the San Pedro-Ceboruco graben (Nayarit, Mexico) in the light of new K-Ar geochronological data. *Geochemical Journal*, 35, 77-88. <https://doi.org/10.2343/geochemj.35.77>

Petrone, Francalanci, L., Carlson, R.W., Ferrari, L., & Conticelli, S. (2003). Unusual coexistence of subduction-related and intraplate-type magmatism: Sr, Nd and Pb isotope and trace element data from the magmatism of the San Pedro-Ceboruco graben (Nayarit, Mexico). *Chemical Geology*, 193, 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00229-2).

Petrone, C.M., Francalanci, L., Ferrari, L., Schaaf, P., & Conticelli, S. (2006). The San Pedro-Cerro Grande volcanic complex (Nayarit, México): Inferences on volcanology and magma evolution. In C. Siebe, J.L. Macias, and G.J. Aguirre-Díaz (Eds.), *Neogene-Quaternary*

*continental margin volcanism: A perspective from México* 402(65-98). Geological Society of America, Special Paper (402). [https://doi.org/10.1130/2006.2402\(03\)](https://doi.org/10.1130/2006.2402(03)).

Petrone, C.M. & Ferrari, L. (2008). Quaternary adakite—Nb-enriched basalt association in the western Trans-Mexican Volcanic Belt: is there any slab melt evidence? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156, 73-86. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0274-9>.

Petrone, C. M. (2010). Relationship between monogenetic magmatism and stratovolcanoes in western Mexico: The role of low-pressure magmatic processes. *Lithos*, 119(3-4), 585-606. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.012>.

Petrone, C.M., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L. (2014). Petrogenesis and geodynamic significance of silicic volcanism in the western Trans-Mexico Volcanic Belt: role of gabbroic cumulates. *Contributions to Mineral and Petrology*, 167, 1006. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1006-6>.

Righter, K., Carmichael, I. S. E., Becker, T. A., & Renne, P. R. (1995). Pliocene to Quaternary volcanism and tectonics at the intersection of the Mexican Volcanic Belt and the Gulf of California. *Bulletin of Geological Society of America*, 107(6), 612–626. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<0612:PQVAFA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<0612:PQVAFA>2.3.CO;2).

Servicio Geológico Mexicano (1998). Carta Geológico-Minera Tepic F13-8, Nayarit y Jalisco. 1:250,000. Segunda edición, Servicio Geológico Mexicano, (SGM).

Servicio Geológico Mexicano (2006). Carta Geológico-Minera Compostela F13-D41, Nayarit y Jalisco. 1:50,000. Primera edición, Servicio Geológico Mexicano, (SGM).

Servicio Geológico Mexicano (2007). Carta Geológico-Minera Xalisco F13-D31, Nayarit. 1:50,000. Primera edición, Servicio Geológico Mexicano, (SGM).

Urrutia-Fucugauchi, J., & González-Morán, T. (2006). Structural pattern at the northwestern sector of the Tepic-Zacoalco rift and tectonic implications for the Jalisco block, western Mexico. *Earth Planets and Space*, 58, 1303-1308. <https://doi.org/10.1186/BF03352625>.

Verma, S. P., & Nelson, S. A. (1989). Isotopic and trace element constraints on the origin and evolution of alkaline and calc-alkaline magmas in the northwestern Mexican Volcanic belt. *Journal of Geophysical Research*, 94(B4), 4531-4544. <https://doi.org/10.1029/JB094iB04p04531>.

Yang, T., Grand, S. P., Wilson, D., Guzmán-Speziale, M., Gómez-González, J. M., Domínguez-Reyes, T. & Ni, J. (2009). Seismic structure beneath the Rivera subduction zone from finite-frequency seismic tomography. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01302. <https://doi.org/10.1029/2008JB005830>.

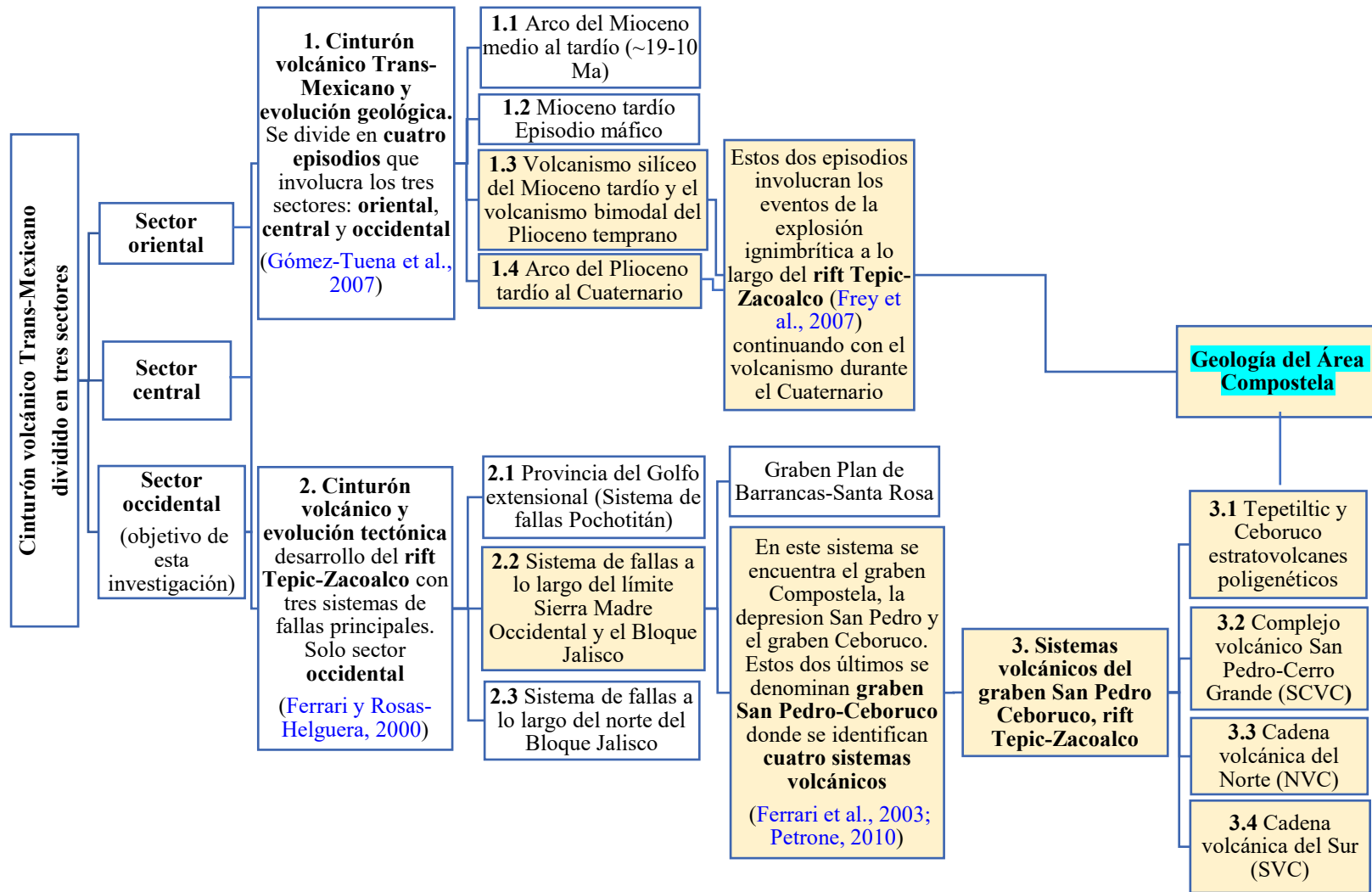
## CAPÍTULO 1

### **Contexto geológico y tectónico regional del cinturón volcánico Trans-Mexicano**

En esta sección se hace una síntesis de la evolución geológica y tectónica del cinturón volcánico Trans-Mexicano, que inicia desde el Mioceno medio hasta el presente. El trabajo más representativo sobre la evolución geológica del cinturón volcánico Trans-Mexicano es realizado por Gómez-Tuena y colaboradores en el 2007. En este trabajo el cinturón volcánico es dividido en tres sectores: occidental, central y oriental; y lo hacen de acuerdo con los rasgos geológicos y tectónicos que presenta cada sector, además de caracterizar en cuatro episodios su evolución geológica.

Como se ha mencionado con anterioridad el área Compostela se encuentra en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano, donde el rift Tepic-Zacoalco es la estructura tectónica principal que corre a lo largo de este sector. A su vez este rift es dividido en tres estructuras debido a su cinemática y locación (Ferrari y Rosas-Helguera, 2000). Una de estas estructuras y de importancia para este trabajo es el graben Compostela-Ceboruco que se conforma del graben Compostela, la depresión San Pedro y el graben Ceboruco. La depresión San Pedro y el graben Ceboruco se denominan como el graben San Pedro-Ceboruco y en este se han identificado cuatro sistemas volcánicos que siguen la misma orientación NW-SE del rift Tepic-Zacoalco, donde la mayor actividad volcánica en estos sistemas ha sido desde el Cuaternario hasta el presente (Ferrari et al., (2003); Petrone, (2010)). El **diagrama 1** resume los principales eventos geológicos y tectónicos del cinturón volcánico Trans-Mexicano que tienen relación con el área Compostela de importancia para esta investigación.



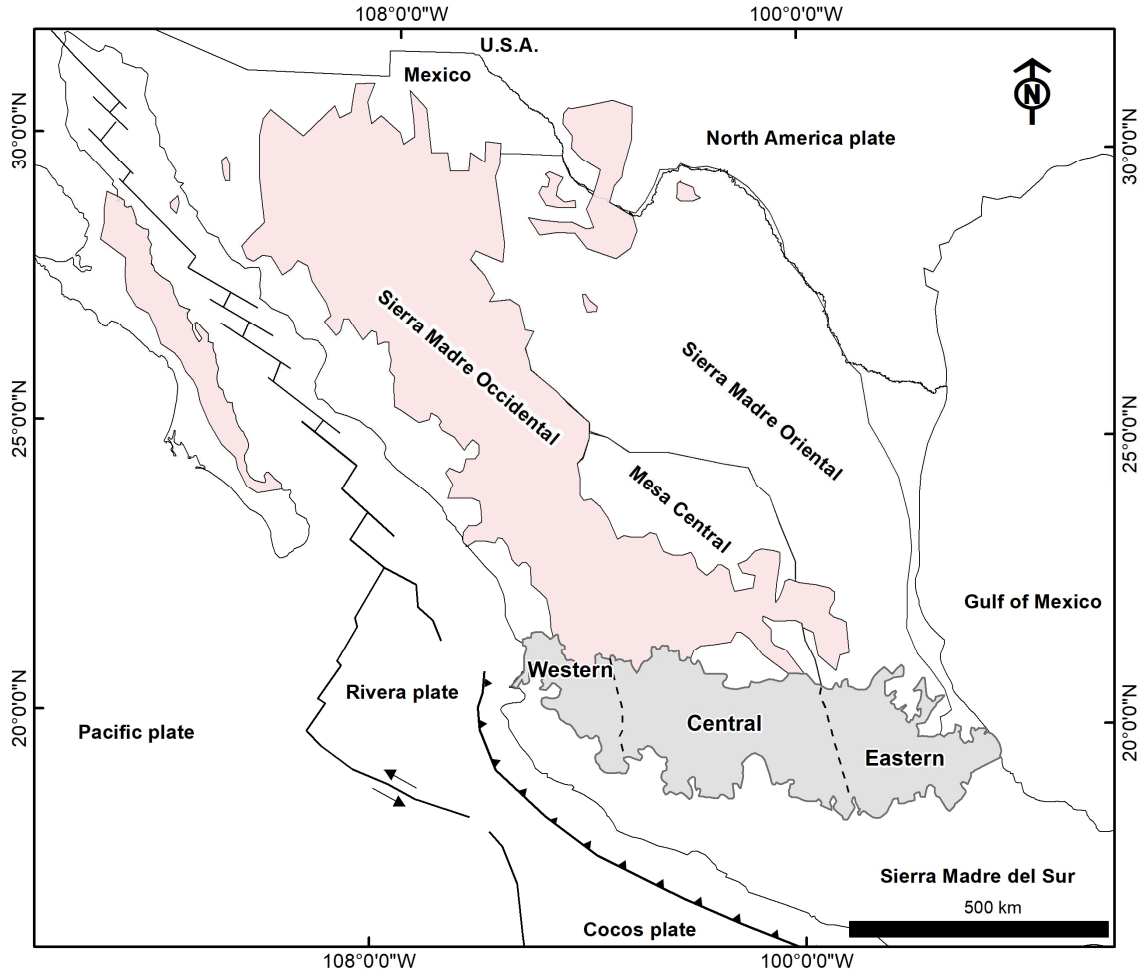


**Diagrama 1.** Principales eventos geológicos y tectónicos del cinturón volcánico Trans-Mexicano. En color amarillo los eventos más representativos que involucran el área Compostela.

## 1. Cinturón volcánico Trans-Mexicano y evolución geológica

El cinturón volcánico Trans-Mexicano es la provincia geológica más característica de la parte central de México particularmente por su orientación que se relaciona con la subducción de la Placa Rivera y Cocos debajo de la Placa Norteamericana; y se define como un arco magmático, constituido por cerca de 8,000 estructuras volcánicas y pocos cuerpos intrusivos. Esta provincia tiene una extensión de aproximadamente 1,000 km y espesores que varían de 80 a 230 km. Esta extensión abarca desde la costa del Pacífico Mexicano en San Blas, Nayarit y la Bahía de Banderas, Jalisco hasta la costa del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978; Gómez-Tuena et al., 2007). Debido a su geometría y emplazamiento transversal sobre las provincias geológicas de la Sierra Madre Occidental, Mesa Central y Sierra Madre Oriental es por el cual ha recibido el término de cinturón volcánico Trans-Mexicano, que se divide en tres sectores: **occidental**, **central** y **oriental** por presentar diferentes rasgos geológicos y tectónicos (Gómez-Tuena et al., 2007). (Figura 3)

El **sector occidental** tiene una orientación WNW-ESE, se localiza desde la costa del Pacífico y la triple unión que se forma con la intersección de los rifts Tepic-Zacoalco, Chapala y Colima. El **sector central** con orientación E-W, se localiza entre la triple unión antes mencionada y el sistema de fallas de Taxco-San Miguel de Allende. Por último, el **sector oriental** con la misma orientación que el sector central, que se encuentra entre el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y el Golfo de México. (Gómez-Tuena et al., 2007).



**Figura 3.** Locación del cinturón volcánico Trans-Mexicano (color gris) dividido en tres sectores: occidental, central y oriental. La provincia geológica de la Sierra Madre Occidental (color rosa) se describe en 2.4 Breve descripción del Bloque Jalisco y la Sierra Madre Occidental. Modificado de [Gómez-Tuena et al., \(2007\)](#) y [Frey et al., \(2007\)](#).

La evolución geológica del cinturón volcánico Trans-Mexicano se divide en cuatro episodios (**Figura 4a-d**). A continuación, se hace una síntesis de estos episodios:

### 1.1 Arco del Mioceno medio al tardío (~19 – 10 Ma)

Al centro de México, en el Mioceno medio inicia la actividad del arco volcánico Trans-Mexicano con una orientación E-W (**Figura 4a**). Los remanentes de esta actividad se encuentran en el **sector central** del frente volcánico del arco, representados por los complejos volcánicos de

las Sierras de Mil Cumbres y de Angangueo en el estado de Michoacán y las secuencias de lavas basálticas y andesíticas de Malinalco y Tenancingo en el Estado de México, consideradas como la actividad inicial del cinturón volcánico Tras-Mexicano entre 19.5 y 16 Ma. Posterior a esta actividad, el volcanismo migra lejos de la trinchera, formando estratovolcanes y conos de lava con edades alrededor de 13 a 10 Ma. Algunos ejemplos: Palo Huérfano, La Joya y El Zamorano localizados a lo largo de los bordes de los estados de Querétaro y Guanajuato, Cerro Grande en el Estado de Puebla, la Sierra Guadalupe y otros centros volcánicos al noroeste de la Ciudad de México y el campo volcánico Apan entre la Ciudad de México y Pachuca, Hidalgo.

Otros remanentes de episodios volcánicos de composición plutónica y cuerpos subvolcánicos gabroicos a dioríticos con edades de alrededor 15 y 11 Ma se encuentran al extremo oriental del cinturón volcánico Trans-Mexicano en el área de Palma Sola, Veracruz. Una hipótesis sobre la continuidad en la migración del arco lejos de la trinchera es el emplazamiento de rocas volcánicas de composición similar a las adakitas que se encuentran desde Querétaro hasta Palma Sola, Veracruz. (Gómez-Tuena et al., 2007). Algunos otros centros volcánicos del Mioceno medio se encuentran en Nayarit en las proximidades de la desembocadura del Golfo de California y es posible sea el extremo sur del arco de Comondú, a lo largo del lado este de la península de Baja California, con edades que se encuentran entre 30 y 12 Ma.

## **1.2 Mioceno tardío Episodio máfico**

En el Mioceno tardío el arco volcánico cambia repentinamente su patrón de migración hacia el Este, y se emplazan al norte del arco anterior lavas máficas que se extienden desde Nayarit hasta Veracruz. (Figura 4b).

Este episodio es representado por lavas basálticas fisúrales que frecuentemente forman mesetas extendidas (*trapps*) con edades alrededor de 11 a 8.9 Ma en Nayarit; de 11 a 8 Ma al norte de Guadalajara, en los Altos de Jalisco y en el área Cotija en Michoacán; y edades alrededor de 9-7 Ma en el estado de Querétaro y en el área de Pathé, Hidalgo. Continuando en el área de Tlanchinol-Huejutla, hasta la costa del Golfo de México al norte de Veracruz (Tántima-Álamo) con edades entre 7.5-6.5 Ma. Las rocas volcánicas emplazadas entre el Golfo de California y en la parte occidental de Hidalgo en el área de Pathé, muestran firmas de subducción mientras que en la parte Este de Hidalgo y Norte de Veracruz firmas de intraplaca ([Gómez-Tuena et al., 2007](#)).

### **1.3 Volcanismo silíceo del Mioceno tardío y volcanismo bimodal del Plioceno temprano**

Durante el Mioceno tardío y Plioceno temprano, el volcanismo en el arco decrece y llega a ser más evolucionado en su composición, generando grandes volúmenes de ignimbritas y complejos de domos dacíticos, productos de calderas regionales que se emplazan al sur del episodio máfico anterior (**Figura 4c**).

En el **sector occidental** del cinturón volcánico Trans-Mexicano los volúmenes de flujos riolíticos e ignimbritas se exponen entre Santa María del Oro y Plan de Barrancas; otros productos como domos exógenos y flujos piroclásticos se encuentran entre la Presa de Santa Rosa y San Cristóbal al norte de Guadalajara. Las edades varían desde 7.5 a 3 Ma, mientras que la edad más representativa es de alrededor de 5 Ma. Después de este periodo silíceo, el volcanismo máfico ocurre alrededor de Guadalajara y al norte del rift de Colima, representado por pequeños volúmenes de flujos de lavas alcalinas con carácter de intraplaca que se emplazan alrededor de los 5.5 Ma y continúan durante el Plioceno temprano. La asociación o

emplazamiento entre lavas alcalinas y riolitas es comúnmente denominada bimodal y ocurren en la parte trasera del arco (Gómez-Tuena et al., 2007).

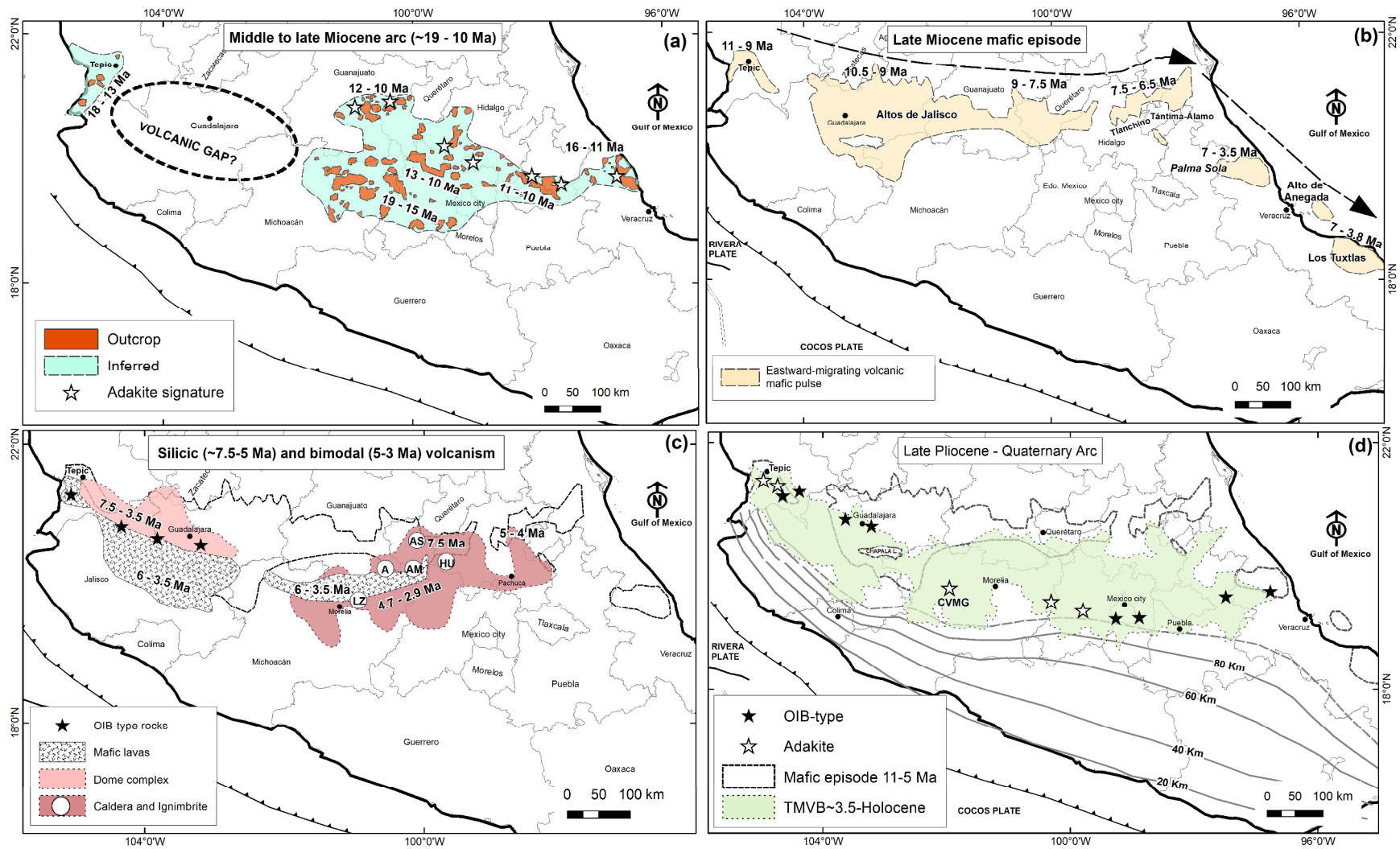
El **sector central** del cinturón volcánico Trans-Mexicano, es dominado por grandes calderas de ignimbritas y tobas de flujo de ceniza, que cubren varias decenas de kilómetros cúbicos que se distribuyen sobre miles de kilómetros cuadrados, siendo las principales: Amazcala, Amealco, Huichapan, Los Azufres, Zitácuaro, Apaseo y Los Agustinos, con edades que van alrededor de los 7 a 4 Ma. En esa misma región se encuentran flujos de lavas máficas e intermedias con edades de alrededor de 6 a 3.4 Ma, expuestas con una orientación WSW-ENE, que comúnmente se encuentran interbandeadas con las ignimbritas antes mencionadas. Mientras que en el **sector oriental** del cinturón volcánico Trans-Mexicano, se han reportado depósitos de flujos piroclásticos con edades de alrededor de 4.9-4.5 Ma que también se encuentran interbandeados y cubiertos por lavas basálticas que constituyen también una asociación bimodal (Gómez-Tuena et al., 2007) como en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano.

#### 1.4 Arco del Plioceno tardío al Cuaternario

El volcanismo silíceo y bimodal fue remplazado por un arco basáltico y andesítico, a principios y finales del Plioceno (**Figura 4d**). En el **sector occidental** del cinturón volcánico Trans-Mexicano, se encuentra un segundo pulso de volcanismo de intraplaca que inicia alrededor de 3.6 Ma y volcanismo con firmas de subducción que se encuentran en la parte noreste del arco. Durante el Plioceno tardío, el frente volcánico es dominado por los campos volcánicos monogenéticos: Mascota, Los Volcanes, San Sebastián y Atenguillo. En este sector la mayoría de los grandes estratovolcanes fueron construidos durante el Cuaternario, como el complejo volcánico de Colima que se encuentra al sur del sector occidental y en un rift independiente con un volumen alrededor de 700 km<sup>3</sup> mientras que los de menor volumen de 100 km<sup>3</sup> son: Tequila,

Ceboruco, Tepetitlic, Sanganguey, Las Navajas, y San Juan, estos estratovolcanes tienen una alineación a lo largo de un sistema de fallas WNW-ESE que define el límite norte del Bloque de Jalisco (Gómez-Tuena et al., 2007).

En el **sector central** del cinturón volcánico Trans-Mexicano, se encuentra el complejo volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) que cubre una amplia región desde el lago de Chapala y occidente de Querétaro, con 1000 conos monogenéticos y pocos domos de composición intermedia y silíceo, además de otros 400 centros poligenéticos como pequeños volcanes escudo. El inicio de esta actividad volcánica es alrededor del 2.8 Ma. Durante el Pleistoceno medio al Holoceno conos monogenéticos se encuentran alineados a lo largo de estructuras tectónicas, así como otros complejos de domos dacíticos del Cuaternario se emplazan a las afueras de las calderas de Los Azufres y Zitácuaro en Michoacán. (Gómez-Tuena et al., 2007). En el **sector oriental** del cinturón volcánico Trans-Mexicano, el volcanismo se reanuda alrededor de 3.7 Ma hacia la parte oeste de la cuenca de la ciudad de México, con el emplazamiento de centros volcánicos poligenéticos como la Sierra de las Cruces, de edad igual al norte de la ciudad de México, el campo volcánico Apan. Sin embargo, la actividad volcánica en este sector se desarrolla durante el Cuaternario. El volcanismo máfico está representado por el campo volcánico Sierra Chichinautzin y Apan, así como alrededor de la cadena volcánica del Pico de Orizaba-Cofre de Perote, estos dos últimos volcanes y el volcán La Malinche de menos de 1 Ma. Y el volcanismo de composición más evolucionada como; Acozulco, la caldera Los Humeros, el centro silíceo Las Cumbres y los domos aislados masivos Las Derrumbadas, Cerro Pinto y Cerro Pizarro en el estado de Puebla. (Gómez-Tuena et al., 2007).



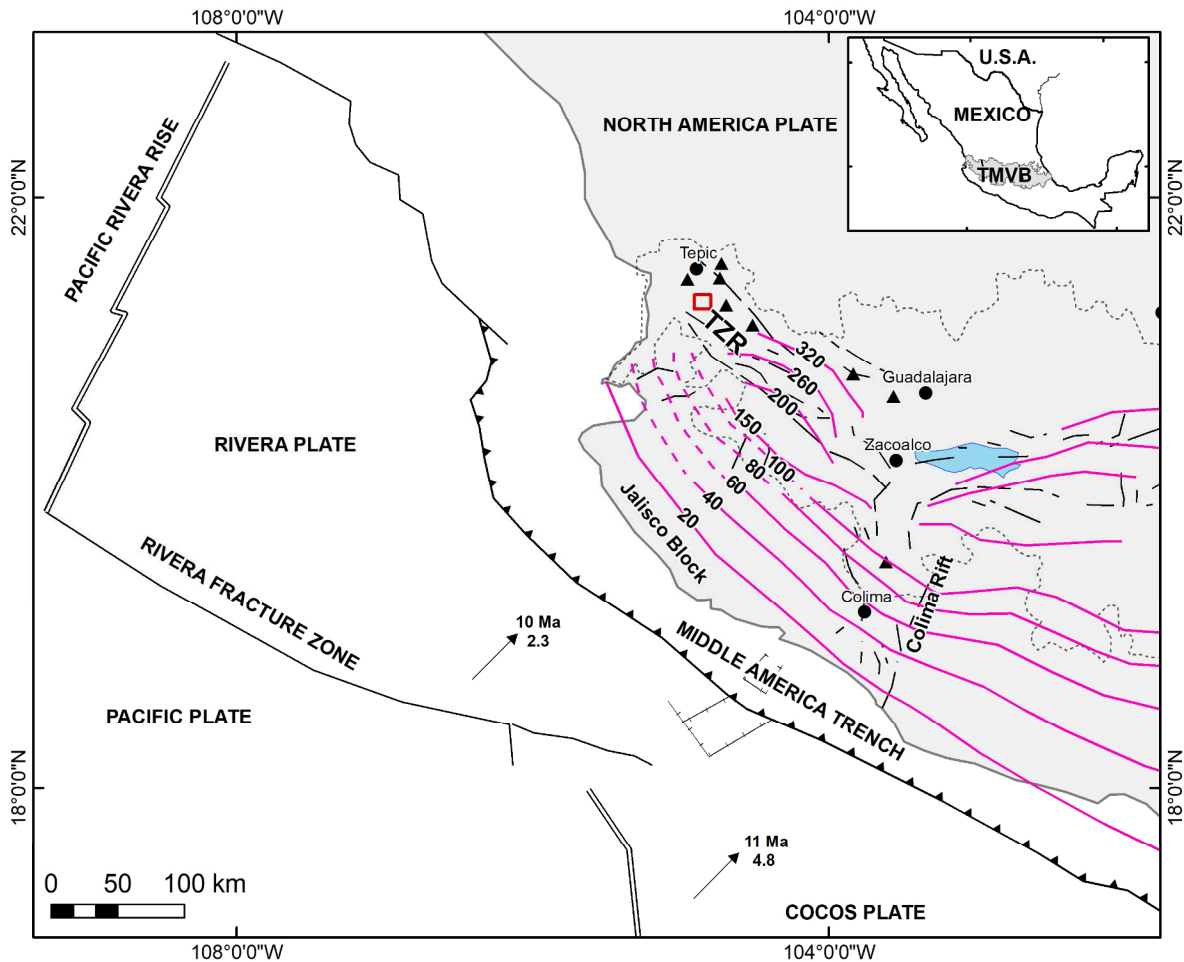
**Figura 4.** Episodios reconocidos en la evolución geológica del cinturón volcánico Trans Mexicano; **(a)** Arco del Mioceno Medio al tardío (~19-10 Ma); **(b)** Episodio máfico del Mioceno tardío; **(c)** Volcanismo silíceo (~7.5-5 Ma) y bimodal (5-3 Ma) y volcanismo con calderas identificadas (LZ—Los Azufres; AM—Amealco; AZ—Amazcala; HU—Huichapan; A—Agustinos); **(d)** Arco del Plioceno tardío al Cuaternario (CVMG—Campo volcánico Michoacán-Guanajuato). La línea negra intermitente muestra el episodio máfico del Mioceno tardío en **(c)** y **(d)**. Modificado de [Gómez-Tuena et al., \(2007\)](#).



## 2. Cinturón volcánico Trans-Mexicano y su evolución tectónica

El cinturón volcánico Trans-Mexicano se encuentra actualmente en un régimen extensional (Gómez-Tuena et al., 2007) y se relaciona con la subducción de la placa de Rivera y Cocos en la placa Norteamericana. Sin embargo, el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano comprende solo la subducción de la placa de Rivera bajo la placa Norteamericana a lo largo del oeste de la trinchera centroamericana (Figura 5). La subducción de la placa de Rivera tiene un ángulo de ( $>50^\circ$ ) y comienza alrededor de los 9 Ma (Pardo y Suárez, 1993;1995). Se ha demostrado por tomografía sísmica que a la profundidad de 150 km existe una brecha que incrementa con la profundidad entre la placa de Rivera y Cocos debajo del rift de Colima, además de un cambio más pronunciado en la subducción de la placa de Rivera con un rumbo este-oeste a diferencia de la placa de Cocos que es más horizontal hacia el este (Yang et al., 2009).

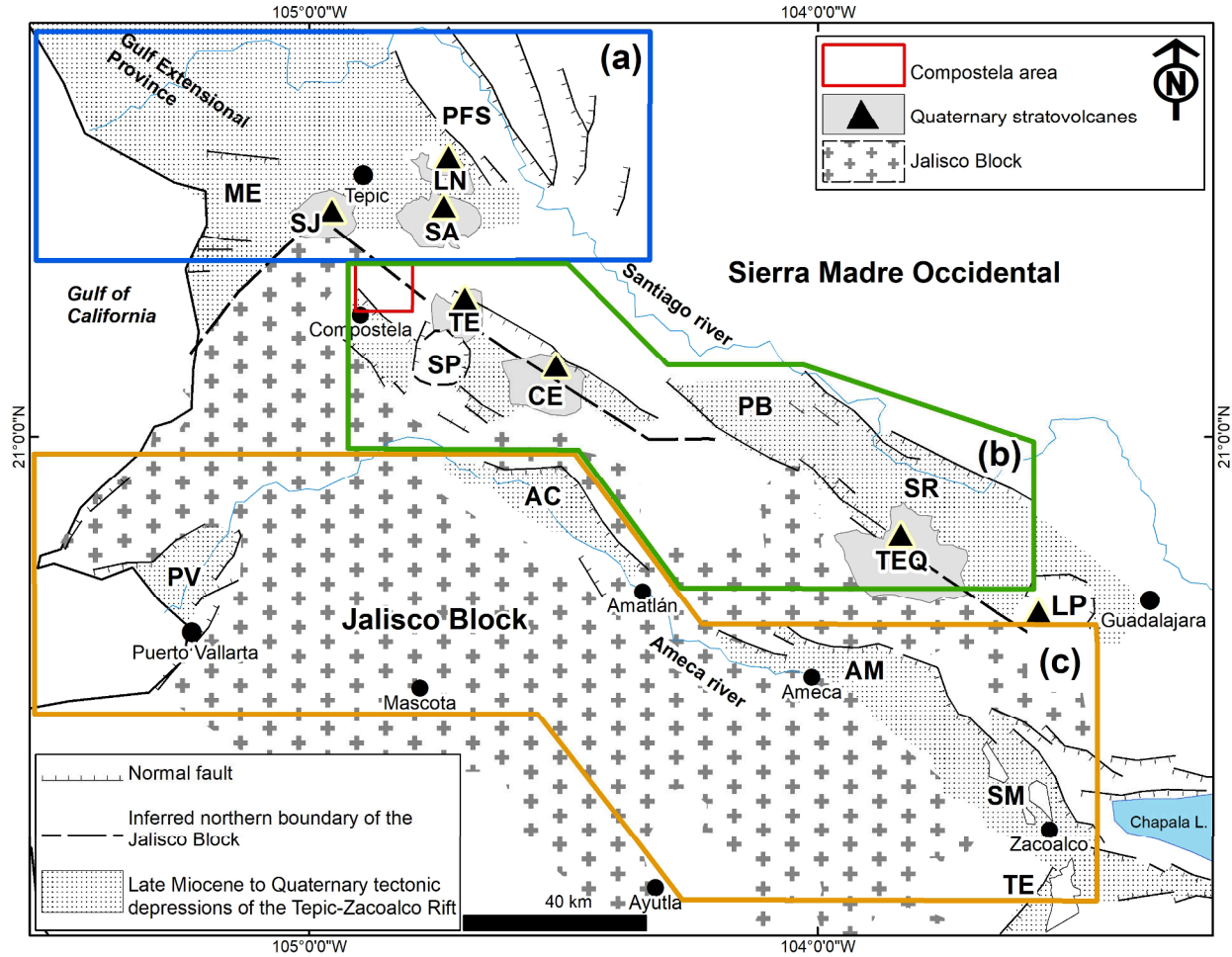
En el **sector occidental** del cinturón volcánico Trans-Mexicano se sobrepone la estructura del rift Tepic-Zacoalco que es parte de un punto triple que se intercepta aproximadamente a 50 km al SSW de la ciudad de Guadalajara y se extiende al NW hacia la costa del Pacífico, cerca de la ciudad de Tepic, en Nayarit (Frey et al., 2007). El rift Tepic-Zacoalco consiste en varios sistemas de fallas, grabens y *half*-grabens, con diferente geometría y edad, con una orientación predominante WNW-ESE. Este régimen tectónico ha sido extensional desde el Mioceno tardío y su deformación es más evidente antes del Cuaternario.



**Figura 5.** Mapa tectónico simplificado del oeste del cinturón volcánico Trans-Mexicano, se muestra en color rosa los contornos de la profundidad del *slab* (km), así como la edad y la velocidad de convergencia (cm/yr) de la placa de Rivera y la placa de Cocos en la placa Norteamericana. Modificado de [Díaz-Bravo et al., \(2014\)](#). TZR—Rift Tepic-Zacoalco, TMVB—Trans Mexican Volcanic Belt.

Este rift representa una zona de deformación de intraplaca que reactiva el límite tectónico entre el Bloque Jalisco y la Sierra Madre Occidental, este límite sigue un patrón en zig-zag bajo los estratovolcanes de San Juan, Tepetitlic, Ceboruco y Tequila (**Figura 6**). A su vez, este rift se divide en tres estructuras principales de acuerdo con su cinemática y locación ([Ferrari y Rosas-Elguera, 2000](#)). Estas estructuras son: 1) Sistema de fallas Pochotitán o Provincia del Golfo

Extensional, 2) Sistema de fallas a lo largo del límite Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco, y 3) Sistema de fallas a lo largo del norte del Bloque Jalisco. (Figura 6a-c)



**Figura 6.** Localización de las tres principales estructuras del rift Tepic-Zacoalco, en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano: (a) Sistema de Fallas Pochotitán o Provincia del Golfo Extensional (recuadro azul); (b) Sistema de fallas a lo largo del límite de la Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco (recuadro verde) al límite noroeste de este sistema de fallas se encuentra el área Compostela (recuadro rojo). (c) Sistema de fallas a lo largo del norte del Bloque Jalisco (recuadro naranja). Estructuras volcánicas cuaternarias: LP—La Primavera, TEQ—Volcán Tequila, CE—Volcán Ceboruco, TE—Volcán Tepetitlic, SP—Caldera San Pedro, SA—Volcán Sanganguey, LN—Volcán Las Navajas, SJ—Volcán San Juan. Estructuras tectónicas del Mioceno tardío al Cuaternario: PFS—Sistema de fallas Pochotitán, ME—graben Mecatán, PV—graben Puerto Vallarta, AC—half-graben Amatlán de cañas, PB—SR graben Plan de Barrancas-Santa Rosa, AM—falla Ameca, SM—falla San Marcos, TE—falla Techaluta (half-graben Sayula). Modificado de Ferrari y Rosas-Elguera, (2000).

## 2.1 Sistema de fallas Pochotitán o Provincia del Golfo Extensional

Consiste en una serie de fallas normales que cortan la meseta de flujos de ceniza de la Sierra Madre Occidental a la latitud de la ciudad de Tepic, con un desplazamiento vertical que puede exceder los 2000 m. La actividad del sistema de fallas Pochotitán está comprendida entre 12 a 9 Ma y representa la terminación al sur de la “Provincia extensional del Golfo” acompañado de la apertura del Golfo de California en el Mioceno tardío. Este sistema agrupa el Graben de Mecatán y el sistema de fallas normales en la costa de Nayarit (**Figura 6a**). El graben de Mecatán, se localiza en la costa oeste de Tepic, y consiste varias fallas normales con orientación E-W, con escarpes de 300 a 140 m. La actividad volcánica del Cuaternario tardío no es afectada por este graben, lo que sugiere que la activación de estas fallas fue en el Mioceno tardío y Pleistoceno temprano. El sistema de fallas normales en la costa de Nayarit se localiza al oeste-noroeste de Tepic. Es un sistema de fallas menores con apenas decímetros de desplazamiento, con una orientación oeste-suroeste-este-noreste. [Ferrari y Rosas-Elguera, \(2000\)](#) sugieren que esta región está sujeta a una leve extensión pero que la deformación ha ido disminuyendo en el Mioceno tardío y Plioceno.

## 2.2 Sistema de fallas a lo largo del límite Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco

Este sistema tiene dos grandes estructuras extensionales: el graben Plan de Barrancas-Santa Rosa y el graben Compostela-Ceboruco que se desarrollan a lo largo del límite entre el Bloque Jalisco y la Sierra Madre Occidental. (**Figura 6b**)

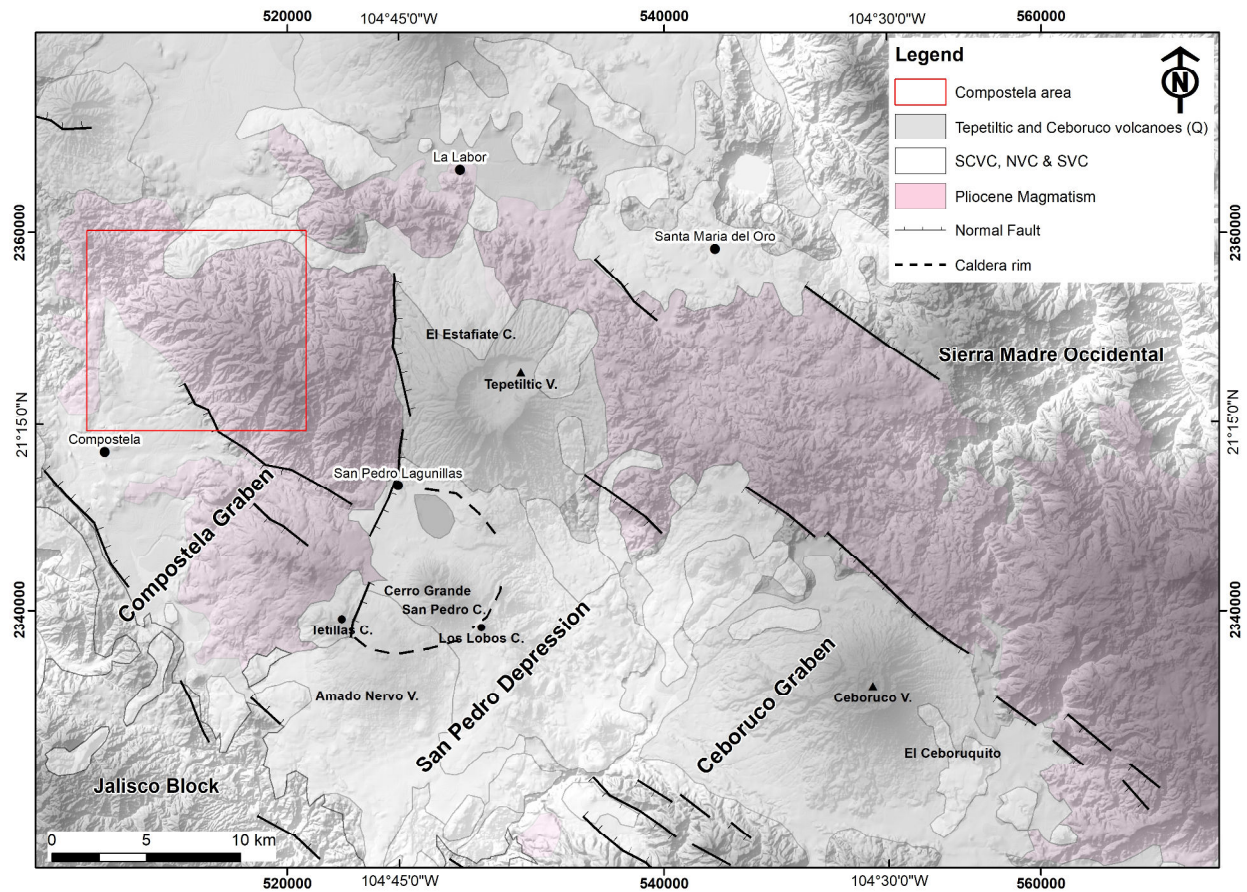
El graben Plan de Barrancas-Santa Rosa, es una amplia depresión de 20 km, formada al norte por la falla Santa Rosa-Cinco Minas y la falla Plan de Barrancas al sur, ambas con una orientación NW-SE. La falla Santa Rosa-Cinco Minas se conforma por varias fallas normales NW-SE y el cañón del Río Santiago en el área de Santa Rosa sigue una zona de falla mostrando

varios indicadores cinemáticos de deslizamiento (*dip-slip*). Esta deformación afecta flujos de ceniza riódacíticos de la Sierra Madre Occidental con un desplazamiento aproximado de 450 m que inició en el Plioceno temprano. Basaltos alcalinos y flujos de lavas basálticas rellenan esta depresión, y las fallas encontradas en estos eventos son limitadas al Plioceno y Pleistoceno temprano.

Por otra parte, la falla Plan de Barrancas está conformado por varias fallas normales con orientación NW-SE con echados al NE: Estas fallas afectan al granito que pertenece al Bloque Jalisco y flujos de ceniza de la Sierra Madre Occidental. La activación del Plan de Barrancas inició en el Plioceno temprano y el mayor movimiento antes del Plioceno tardío y estos trazos de fallas coinciden con chimeneas del volcán de Tequila y otros conos de ceniza. La reactivación de la falla Plan de Barrancas es en el Cuaternario por fallas normales con un desplazamiento vertical de 50 m al noroeste del Volcán de Tequila ([Ferrari y Rosas-Elguera, 2000](#)).

El graben Compostela-Ceboruco se divide en tres estructuras: el graben Compostela al oeste, la depresión San Pedro y el graben Ceboruco al este (**Figura 7**). El graben Compostela está formado por dos fallas normales NW-SE que bordean una depresión de 10 km de ancho, al norte cortan un complejo riolítico de 4.9 Ma ([Frey et al., 2007](#)), al sur cortan flujos de ceniza del Cretácico y parte del granito del Bloque Jalisco. En la parte central del graben un domo riolítico de 2.3 Ma es cortado por fallas normales NNE-SSW y NE-SW, que desplazan verticalmente la parte este del graben y forman la depresión donde se desarrolla la caldera de San Pedro ([Gastil et al., 1978](#); [Ferrari y Rosas-Elguera, 2000](#)). Aparentemente, esta depresión tiene un desplazamiento vertical de menos de 1100 m, y se hace en dos periodos; el primero de 600 m en el Plioceno temprano y el segundo de 500 m en el Plioceno tardío-Pleistoceno temprano ([Ferrari y Rosas-Elguera, 2000](#))

La depresión donde se encuentra el graben Ceboruco es de 1800 m y se desarrolló al inicio del Mioceno tardío, en el área del Volcán Ceboruco, las fallas que rodean esta depresión se encuentran ocultas en rocas más jóvenes. Otro sistema de fallas que conforman este graben se encuentran al norte del Volcán Ceboruco y son fallas normales con echados al SW. Estas fallas se relacionan con una fase extensional en el Plioceno temprano con un desplazamiento vertical de 900 m y cortan una secuencia de riolitas e ignimbritas de 4.6-4.2 Ma, mientras que rocas del Plioceno tardío se encuentran en la base de la depresión del Volcán Ceboruco (Gastil et al., 1978; Richter et al., 1995; Ferrari y Rosas-Elguera, 2000).



**Figura 7.** Mapa estructural del graben Compostela-Ceboruco compuesto por el graben Compostela, depresión San Pedro y el graben Ceboruco. Al límite noroeste del graben San Pedro-Ceboruco el área Compostela (recuadro rojo). Sistemas volcánicos reconocidos en el graben San Pedro-Ceboruco: volcanes poligenéticos Tepetitlic y Ceboruco; SCVC—Complejo volcánico San Pedro-Cerro grande, NVC—Cadena volcánica del Norte y SVC—Cadena volcánica del Sur. Modificado de Ferrari y Rosas-Elguera (2000).

### **2.3 Sistema de fallas a lo largo del norte del Bloque Jalisco**

Este sistema de fallas se conforma por tres depresiones en el Bloque Jalisco: el *half*-graben Amatlán de Cañas, el sistema de fallas Ameca-San Marcos y el graben Puerto Vallarta. (**Figura 6c**). El *half*-graben Amatlán de Cañas está limitado al norte por una falla normal lítrica de 40 km de longitud, que hace una curva producto posible de la reactivación de una estructura del basamento. Este *half*-graben se pudo haber formado antes del emplazamiento de la meseta basáltica de 3.4 Ma y pudo ocurrir un ligero movimiento normal en el Cuaternario.

El sistema de fallas de Ameca-San Marcos limita al norte las depresiones de Ameca y Zacoalco, está conformado por tres segmentos: falla Ameca, Ahuisculco-Acatlán y falla San Marcos. Con orientaciones predominantes NW-SE, y echados S y SW. Este sistema de fallas es el único en el rift Tepic-Zacoalco que muestra evidencia de actividad tectónica del Pleistoceno medio al tardío. El graben Puerto Vallarta [Ferrari y Rosas-Elguera, \(2000\)](#) lo consideran por estar en el mismo marco tectónico extensional que forma parte del rift Tepic-Zacoalco. El sistema de fallas en este graben tienen una orientación NE-SW dentro de complejos plutónicos de 85 Ma. Su edad no ha sido bien establecida y estos autores especulan su posible desarrollo en la fase final de la separación de Baja California de la placa Norteamericana durante el Mioceno tardío y Plioceno temprano.

### **2.4 Breve descripción del Bloque Jalisco y la Sierra Madre Occidental**

Como se menciona anteriormente el rift Tepic Zacoalco reactiva el límite tectónico entre la provincia geológica de la Sierra Madre Occidental al norte y el terreno tectono-estratigráfico del Boque Jalisco al sur. La Sierra Madre Occidental, es una provincia que se extiende desde el sur de los Estados Unidos hasta el rift Tepic-Zacoalco, esta provincia cubre un área de ~296,000 km<sup>2</sup>

(Figura 3) y es la provincia volcánica silíceo más larga del mundo. Este volcanismo silíceo es parte del resultado de la cristalización fraccionada de basaltos derivados del manto debido a la subducción de la placa Farallón al occidente de México en el Oligoceno y Mioceno temprano (Ferrari et al., 2000; Frey et al., 2007). La parte norte de esta provincia tiene un espesor que excede 1 km y la parte sur un espesor de 800 m. Los principales productos volcánicos en esta provincia van desde basaltos a riolitas, dominando ignimbritas riolíticas con un rango de edades de 45 a 18 Ma con volcanismo joven de 34 a 18 Ma principalmente en la parte sur de la provincia, representado por tobas de flujo de ceniza soldadas y en menor cantidad flujos de lava andesítica (Ferrari et al., 2000). Sin embargo, en la parte media del rift Tepic-Zacoalco se han reportado cuatro edades de 21 a 18 Ma, por lo que se asume que parte del sur de la Sierra Madre Occidental se encuentra dentro de este rift (Frey et al., 2007).

Mientras que el Bloque Jalisco es un terreno tectono-estratigráfico que se encuentra al límite sur del rift Tepic-Zacoalco y al este se limita por el rift de Colima (Figura 5). Está constituido principalmente de depósitos volcánicos y volcanoclásticos, así como de secuencias sedimentarias marinas, e intrusiones de plutones que consisten en granitos, granodioritas, y tonalitas que forman un gran batolito individual y posiblemente sean el basamento del Bloque Jalisco. Estas rocas al sureste se encuentran ligeramente metamorfoseadas y al noroeste aumenta su metamorfismo. Al oeste del Bloque Jalisco se tiene una secuencia turbidítica intercalada con rocas volcánicas; en la parte central se tienen flujos de tobas de ceniza riolítica y andesitas; y al sureste se tienen calizas y areniscas posiblemente de edad Mesozoica (Ferrari et al., 2000). Las edades en el Bloque Jalisco van desde el Cretácico tardío al Eoceno representado por los plutones antes descritos, así como la ocurrencia de campos volcánicos lamprofiricos (Plioceno-Cuaternario) que se encuentran sobre las unidades del Cretácico (Frey et al., 2007).



### **3. Sistemas volcánicos del graben San Pedro-Ceboruco, rift Tepic-Zacoalco**

En el rift Tepic-Zacoalco, se encuentra el graben San Pedro-Ceboruco y dentro de este se han reconocido cuatro sistemas volcánicos (**Figura 8**) que siguen las orientaciones predominantes NW-SE del rift Tepic-Zacoalco (Ferrari et al., (2003); Petrone, (2010)). A continuación, se hace una breve descripción de estos:

#### **3.1 Tepitiltic y Ceboruco estratovolcanes poligenéticos**

El volcán Tepitiltic y el Ceboruco se encuentran al límite de los flancos del graben San Pedro-Ceboruco siguiendo la misma orientación del rift Tepic-Zacoalco. Estos dos volcanes durante su actividad ha sido efusiva y explosiva, constituidos por andesitas con productos de composición riódacita, riolita o dacita. La actividad del volcán Tepitiltic está comprendida alrededor de 0.5 Ma (Frey et al., 2014) mientras que la del volcán Ceboruco de 0.37 Ma (Petrone et al., 2003) con su última erupción en 1870 DC (Nelson, 1980; Petrone et al., 2003).

#### **3.2 Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande (SCVC)**

Se encuentra en la parte central del graben y está firmado por domos, flujos de lava y depósitos de piroclásticos que se limitan en el Cuaternario (Petrone et al., 2006). La formación de la caldera en este complejo volcánico se divide en dos episodios. El primero, consiste en el desarrollo de la pre-caldera, donde se formaron domos de composición adakítica (Petrone, 2010) y depósitos de piroclásticos al terminar la formación de la caldera alrededor de 1.6-0.5 Ma (Ferrari et al., 2000; Petrone et al., 2001; Petrone et al., 2003). El segundo episodio, consiste en la erupción de la post-caldera representada por basaltos con alto contenido de Nb (*Nb-enriched*) del volcán escudo Amado Nervo (Petrone et al., 2006; Petrone y Ferrari, 2008), y domos de

dacita y riolita junto con flujos de lava que se emplazan alrededor de 0.29-0.037 Ma, a través de la intracaldera y chimeneas en los alrededores (Frey et al., 2004; Petrone et al., 2003).

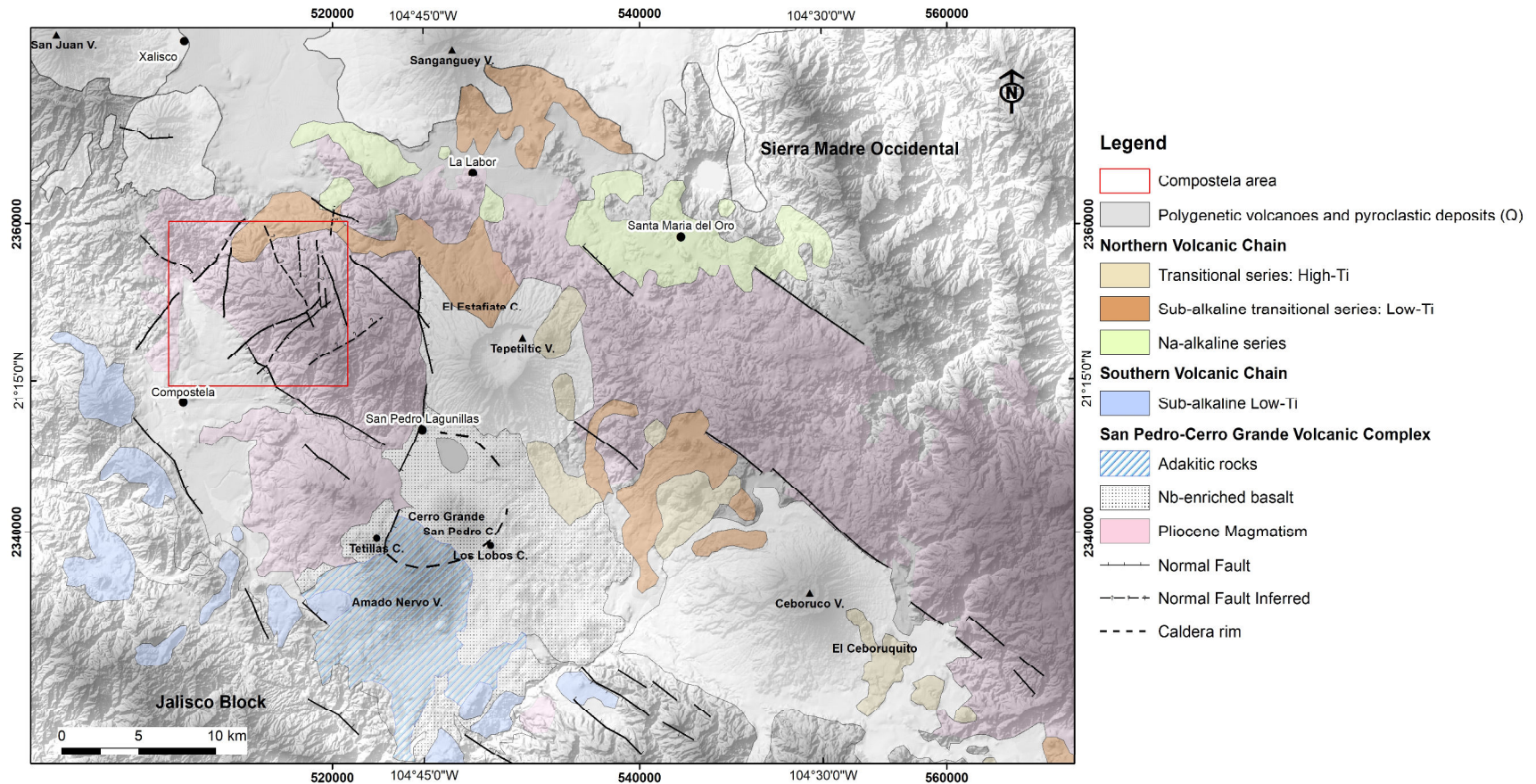
### 3.3 Cadena volcánica del Norte (NVC)

Consiste en una serie de centros volcánicos monogenéticos mayormente conos de escoria asociados con flujos de lava, seguidos por domos. Algunos de estos centros volcánicos se asocian con la actividad volcánica que marcan los flancos de los volcanes Ceboruco y Tepetitlic. La edad del magmatismo en esta cadena es limitada por numerosas edades, sin embargo, el magmatismo monogenético más evidente es de 11-4 ka (Sieron and Siebe, 2008; Petrone, 2010). Petrone et al., 2003 y Petrone, 2010 identifican tres diferentes series en esta cadena: i) una serie Na-alcalina con altos contenidos de  $\text{TiO}_2$  (1.9-2.5 wt%), son basaltos alcalinos, representados por conos de escoria, ii) una serie transicional alto  $\text{TiO}_2$  (High-Ti), son rocas que van de andesita basáltica a riolita, asociados a conos de escoria y domos y iii) una serie sub-alcalina-transicional baja  $\text{TiO}_2$  (Low-Ti), rocas que van desde andesita basáltica a andesita, representadas por conos de escoria.

### 3.4 Cadena volcánica del Sur (SVC)

Consiste en conos de escoria asociados con flujos de lava y pocos domos. En esta cadena solo se tiene identificada una serie sub-alcalina de bajo  $\text{TiO}_2$  (Low-Ti), similar a la cadena norte con rocas que van de andesita basáltica a dacita (Petrone et al., 2010) y la única edad reportada en esta cadena es de un magma monogenético de 2.53 Ma (Petrone et al., 2001).

Ambas cadenas tiene una orientación NNW-SSE, limitando tanto al norte como al sur los bordes del graben San Pedro-Ceboruco.



**Figura 8.** Sistemas volcánicos reconocidos en el graben San Pedro-Ceboruco. Volcanes poligenéticos Ceboruco y Tepetitlic y depósitos de piroclastos; Cadena Volcánica del Norte, representada por tres series; Serie Transicional (Hi-Ti), Serie sub-alkalina transicional (Low-Ti) y Serie Na-alkalina; Cadena Volcánica del Sur, representada por una serie sub-alkalina (Low-Ti), y el Complejo Volcánico San Pedro-Cerro Grande (SCVC), representado por rocas adakíticas y basaltos enriquecidos en Nb. Por último, magmatismo del Plioceno. El área Compostela (recuadro rojo) se encuentra al límite noroeste de este graben. Modificado de [Petroni \(2010\)](#). V—Volcán.

## Referencias

Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2(2), 172-187.

Diaz-Bravo B.A., Gómez-Tuena, A., Ortega-Obregón, C., & Pérez-Arvizu, O. (2014). The origin of intraplate magmatism in the western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geosphere*, 10(2), 340–373. <https://doi.org/10.1130/GES00976.1>

Ferrari y Rosas-Elguera (2000). Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: Tepic-Zacoalco rift revised. In H. Delgado-Granados, G. Aguirre-Diaz, & J.M. Stock, (Eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico 334* (1-23). Boulder, Colorado: Geological Society of America, Special Paper. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.41>

Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas-Salgado, S., & Romero-Rios, F. (2000). Geology of the western Mexican Volcanic Belts and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. In H. Delgado-Granados, G. Aguirre-Diaz, & J.M. Stock, (Eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico 334* (65-83). Boulder, Colorado: Geological Society of America, Special Paper. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.65>

Ferrari, L., Petrone, C.M., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., Manetti, P., & Venegas-Salgado, S (2003). Geology of the San Pedro-Ceboruco Graben, Western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Geociencias Geológicas*, 20 (3), 165-181.

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, & Delgado-Granados, H. (2004). Magma eruption rates constrained by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology and GIS for the Ceboruco-San Pedro volcanic field, western Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America* 116 (3-4), 259-276. <https://10.1130/B25321.1>

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Delgado-Granados, H., & Carmichael, I.S.E. (2007). A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(1–2), 49-64. <https://doi.org/10.1130/B25950.1>

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Nelson, S. A., Delgado-Granados, H., Mastin, L., & Wineberg, D. (2014).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Volcán Tepetitlic, western Mexico: Implications for the origin of zoned rhyodacite-rhyolite liquid erupted explosively from an andesite stratovolcano after a prolonged hiatus. *Bulletin of the Geological Society of America*, 126(1–2), 16-30. <https://doi.org/10.1130/B30790.1>

Gastil, G., Krummenacher, D., & Jensky, W. A. (1978). Reconnaissance geology of west-central Nayarit, Mexico. *Geological Society of America Maps and Chart Series MC-24*, scale 1:200,000, 1-8.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. In: S.A. Alaniz-Álvarez, & A.F. Nieto-Samaniego (Eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 422(129–181), Geological Society of America, Special Paper. <https://doi.org/10.1130/2007.2422805>

Nelson, S. A. (1980). Geology and Petrology of Volcan Ceboruco, Nayarit, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 91(Part II), 2290-2431. <https://doi.org/10.1130/GSAB-P2-91-2290>

Pardo, M., & Suárez, G. (1993). Steep subduction geometry of the Rivera Plate beneath the Jalisco Block in western Mexico. *Geophysical Research Letters*, 20(21), 2391-2394. <https://doi.org/10.1029/93GL02794>

Pardo, M., & Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7), 12357-12373. <https://doi.org/10.1029/95jb00919>

Petrone C.M., Tagami, T., Francalanci, L., Matsumura, A., & Sudo, M. (2001). Volcanic systems in the San Pedro-Ceboruco graben (Nayarit, Mexico) in the light of new K-Ar geochronological data. *Geochemical Journal*, 35, 77-88. <https://doi.org/10.2343/geochemj.35.77>

Petrone, Francalanci, L., Carlson, R.W., Ferrari, L., & Conticelli, S. (2003). Unusual coexistence of subduction-related and intraplate-type magmatism: Sr, Nd and Pb isotope and trace element data from the magmatism of the San Pedro-Ceboruco graben (Nayarit, Mexico). *Chemical Geology*, 193, 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00229-2).

Petrone, C.M., Francalanci, L., Ferrari, L., Schaaf, P., & Conticelli, S. (2006). The San Pedro-Cerro Grande volcanic complex (Nayarit, México): Inferences on volcanology and magma evolution. In C. Siebe, J.L. Macias, and G.J. Aguirre-Díaz (Eds.), *Neogene-Quaternary continental margin volcanism: A perspective from México* 402(65-98). Geological Society of America, Special Paper (402). [https://doi.org/10.1130/2006.2402\(03\)](https://doi.org/10.1130/2006.2402(03)).

Petrone, C.M. & Ferrari, L. (2008). Quaternary adakite—Nb-enriched basalt association in the western Trans-Mexican Volcanic Belt: is there any slab melt evidence? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156, 73-86. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0274-9>.

Petrone, C. M. (2010). Relationship between monogenetic magmatism and stratovolcanoes in western Mexico: The role of low-pressure magmatic processes. *Lithos*, 119(3-4), 585-606. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.012> Richter et al., 1995

Sieron, K., & Siebe, C. (2008). Revised stratigraphy and eruption rates of Ceboruco stratovolcano and surrounding monogenetic vents (Nayarit, Mexico) from historical documents and new radiocarbon dates. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(2), 241-264. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.04.006>

Yang, T., Grand, S. P., Wilson, D., Guzmán-Speziale, M., Gómez-González, J. M., Domínguez-Reyes, T. & Ni, J. (2009). Seismic structure beneath the Rivera subduction zone from finite-frequency seismic tomography. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01302. <https://doi.org/10.1029/2008JB005830>.

## CAPÍTULO 2

### 1. Geología del área Compostela

El primer reconocimiento geológico cerca del área Compostela fue realizado por el Consejo de Recursos Minerales, ahora Servicio Geológico Mexicano (SGM) por (Aguilar-Nogales y Cedillo-Calvillo, 1983) con la evaluación geológica-minera preliminar del área San Francisco, en los Municipios de Compostela y San Pedro Lagunillas, en el estado de Nayarit. En este trabajo se hace la evaluación de varias obras mineras con el fin de determinar reservas de interés económico, donde la mineralización está representada por un sistema de vetas de sulfuros de plata y oro libre en una ganga de cuarzo, óxidos de fierro y manganeso. La orientación predominante de estas vetas es NW-SE y se emplazan en la unidad volcánica de composición riolítica aparentemente de edad del Oligoceno (Aguilar-Nogales y Cedillo-Calvillo, 1983). Los depósitos minerales que se encuentran en el área San Francisco y Nuevo Milenio se clasifican como epitermales de baja sulfuración (Camprubí, 2009; 2013) con una edad relativa de  $\leq 21$  Ma.

Sin embargo, las observaciones que se han realizado en esta investigación la unidad de riolitas expuestas en el área Compostela coinciden con la erupción ignimbrítica de 4.97 Ma reportada por Frey, et al., (2007). Esta erupción ignimbrítica se extiende a lo largo del rift Tepic-Zacoalco, y se tiene un área inferida expuesta de  $\sim 2030$  km<sup>2</sup> con espesores de  $\sim 200$  a  $>500$  m, con edades de 5 a 3 Ma que reflejan los inicios del *rifting* entre el Bloque Jalisco y la Placa Norteamericana. Esta erupción ignimbrítica está mayormente representada por tobas riolíticas de flujos de ceniza, lavas y domos riolíticos, asociadas con basaltos High-Ti del Plioceno (Frey, et al., 2007).

Otras unidades identificadas en el área son basaltos y andesitas que solo se reportan por posición estratigráfica aparentemente de edad del Pleistoceno. Por lo tanto, es importante definir con que eventos del occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano se encuentran relacionadas estas tres unidades: riolitas, basalto y andesitas dentro del área Compostela.

El área Compostela abarca 123 km<sup>2</sup>, se localiza al sur de la ciudad de Tepic, en Nayarit, cerca del poblado de Compostela (ver **Figura 1**). Las principales estructuras volcánicas cercanas al área son: al este el Volcán Tepetiltic, al suroeste el Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande y ~20 km el Volcán Ceboruco, estos tres conforman el graben San Pedro-Ceboruco. Más al noreste del área está el Volcán Sanganguey y al noroeste el Volcán San Juan (**Figura 8 y 9**).



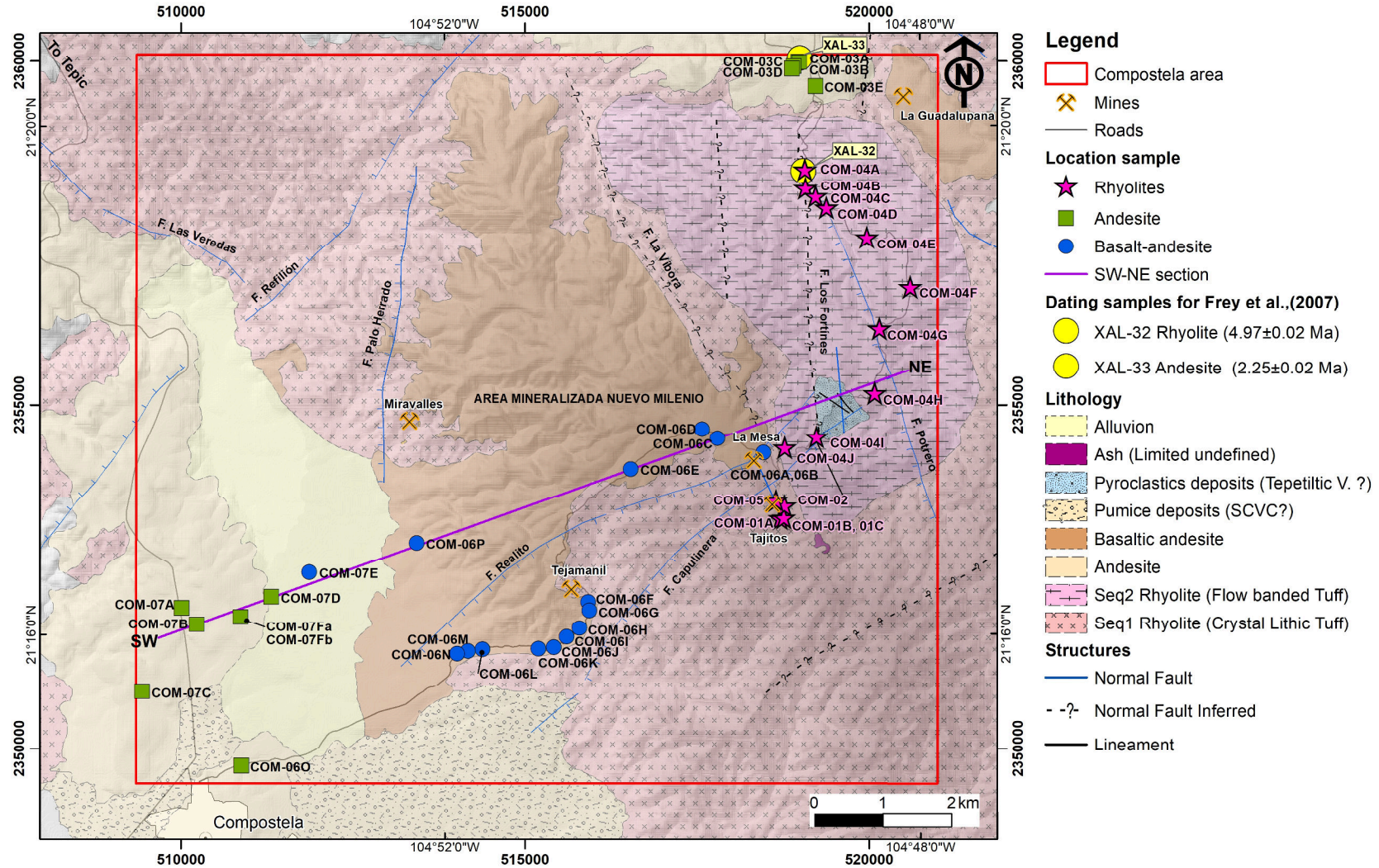
**Figura 9.** Vista panorámica del área Compostela al centro. Al lado izquierdo y al fondo se alcanza a distinguir el volcán Sanganguey y al lado derecho el Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. El volcán Tepetiltic no se observa en la foto ya que se encuentra al este del área Compostela.

En esta área se han identificado las siguientes unidades geológicas. Primero una unidad de riolitas, que es la más predominante en el área (~56%) y corresponde a la erupción ignimbrítica reportada por [Frey, et al., \(2007\)](#), descrita anteriormente en el segundo párrafo de esta sección. Sin embargo, esta unidad se ha dividido en dos secuencias por presentar diferentes texturas: toba lítica (secuencia 1) y toba bandeada (secuencia 2). Una unidad de andesitas que se encuentran en la periferia al noreste y suroeste del área (~7%); al centro se tiene una unidad de flujos de lava de basalto andesita (~23%) que corta y cubre discordantemente a la toba lítica. Además, al límite suroeste del área depósitos de pómez (~4%) provenientes del complejo volcánico San Pedro-

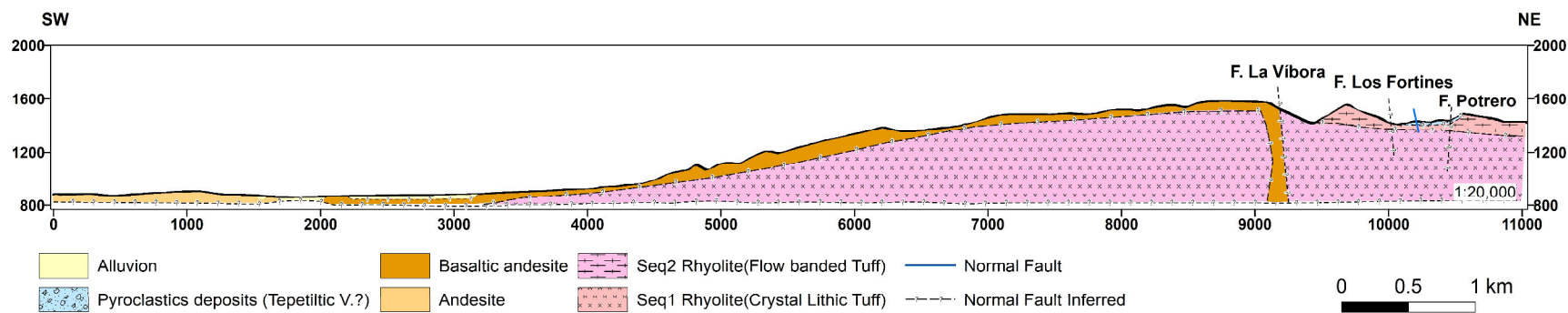
Cerro Grande (SCVC) y al este del área se encuentran depósito de piroclastos que abarcan (~0.4%) probablemente provenientes del Volcán Tepetiltic. Finalmente, se tiene aluvión (~9%) representado por suelos de uso agrícola.

En la **figura 10a-b** se muestra la geología y una sección transversal SW-NE de las unidades representativas del área Compostela.





**Figura 10. (a)** Geología del área Compostela. Las estrellas rosas muestran la ubicación de las muestras de la unidad de riolitas (Toba lítica y Toba bandeada). Los cuadros verdes la ubicación de las muestras de la unidad de andesitas. Los círculos azules la ubicación de las muestras de basalto-andesita. Los círculos amarillos representan la ubicación de las muestras con edad XAL-32 (Riolita) y XAL-33 (Andesita) reportadas por Frey et al., (2007). La línea morada es la Sección Transversal con dirección SW-NE. SCVC—Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande, F—Falla, Seq—Secuencia. Modificado de Servicio Geológico Mexicano, (2007), Carta Xalisco F13-D31.



**Figura 10. (b)** Sección SW-NE representativa de las unidades geológicas del área Compostela. En esta sección se observa como la unidad de basalto andesita corta y cubre discordantemente a la Toba lítica, aparentemente controlada por la falla La Vibora. La unidad de andesita cubre las partes bajas topográficamente. Los depósitos de piroclastos del Volcán Tepetitlic (?) cubren discordantemente la secuencia 2 de Toba bandeada al NE de la sección. SCVC—Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande, F—Falla, Seq—Secuencia.

### 1.1 Riolitas (Toba lítica y Toba bandeada)

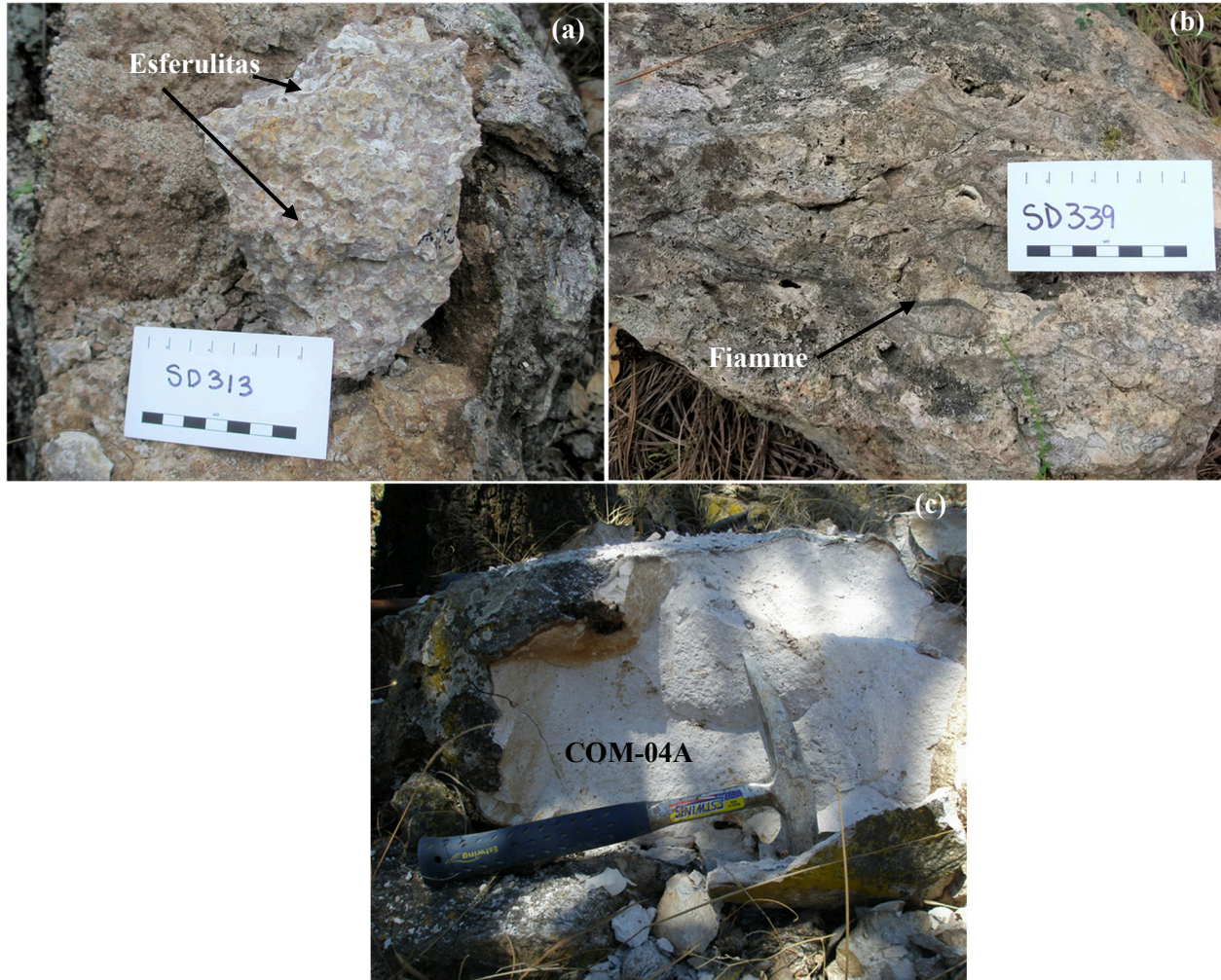
Esta unidad de riolita se encuentra con mayor distribución en el área Compostela y se divide en dos secuencias por presentar diferentes texturas. La primera secuencia es una toba lítica (Crystal Lithic Tuff—CxLT) y la segunda es una toba bandeada (Flow banded—FbT) (**Figura 10a-b**). Al noreste del área se encuentra la toba bandeada (FbT) que cubre parte de la toba lítica. Sin embargo, el contacto entre estas dos secuencias no es muy evidente en campo al noroeste del área.

La Toba lítica (CxLT) es la que cubre mayormente el área Compostela y está representada por cuerpos masivos. Los minerales que se observan a simple vista son feldespatos, cuarzo, fragmentos de litoclastos (~5 mm) y pequeños parches de oxidación en una matriz fina ligeramente silíceo, algunas veces se distinguen texturas de fiamme. En esta toba lítica es común observar alteración argílica, que consiste en el reemplazamiento de feldespatos por minerales arcillosos y un ligero enriquecimiento en sílice. Esta alteración se observa en las zonas donde se encuentran varios trabajos mineros como: Tejamanil, Tajitos, La Mesa y Miravalles que corresponden al área Mineralizada Nuevo Milenio (**Figura 10a y 11a-b**). En la zona de La Mesa es donde se observa el contacto de la toba lítica y con el dique de basalto andesita (**Figura 10b y 11c**). Esta toba lítica en las zonas de Tejamanil, Tajitos y La Mesa presenta las mismas características antes descritas, a diferencia de la zona de Miravalles, donde se observa esta misma toba lítica de color gris claro con más óxidos de fierro disseminados y cuarzo (**Figura 11d**).



**Figura 11.** (a) Afloramiento representativo de la secuencia 1 de la toba lítica (CxLT) en el área Compostela en la zona del Tejamanil, el color crema es característico en esta secuencia. (b) Al sur de la zona de Tajitos la toba lítica se observa con feldespatos alterados y presenta menos diseminación de óxidos de hierro. (c) Afloramiento que muestra el contacto entre la toba lítica y el basalto andesita en la zona de La Mesa. La línea blanca intermitente muestra el contacto aproximado entre estas dos unidades. (d) En la zona de Miravalles la toba lítica se observa más diseminación de óxidos de hierro.

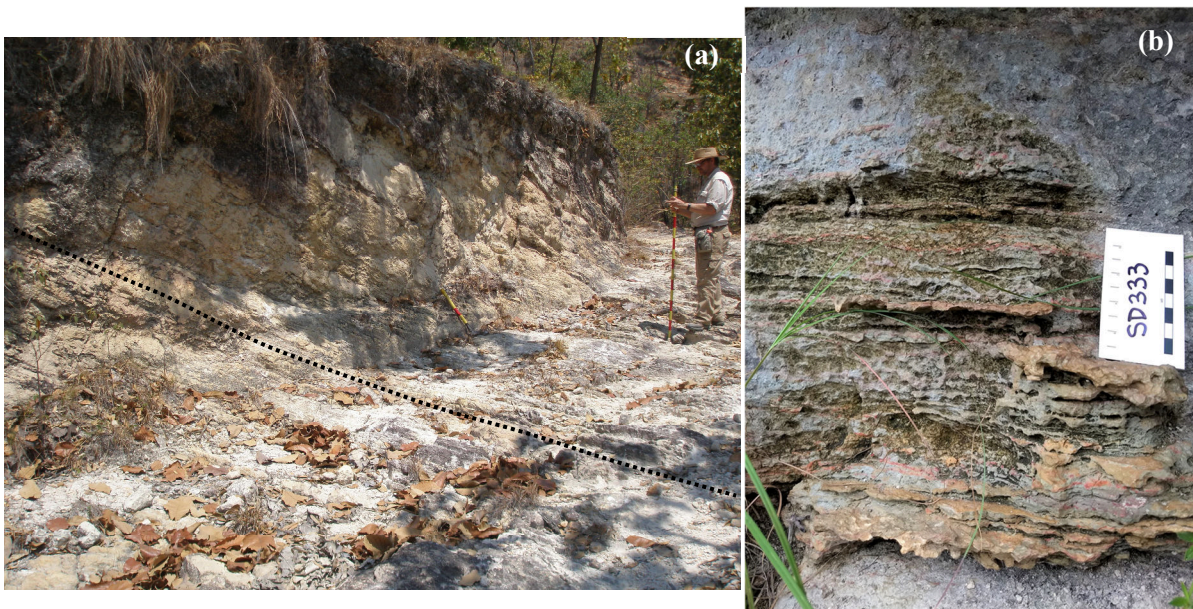
La toba bandeada (FbT) está representada por cuerpos masivos en flujos y bandeados (~1 mm a 5mm), con algunas texturas de devitrificación como esferulitas y texturas de fiamme (Mc Phie et al., 1993) en una matriz gris afanítica (Figura 12a-b) y cubren discordantemente a la toba lítica al noreste del área Compostela, el contacto entre estas dos secuencias no es muy claro en campo. Por lo regular esta toba bandeada es de color gris claro a blanco y algunos bandeamientos se observan ligeramente oxidados. En otros afloramientos más al noreste del área la toba bandeada es de color blanco, donde es posible distinguir feldespatos ligeramente alterados y algunos bandeamientos muestran un ligero enriquecimiento en sílice (Figura 12c).



**Figura 12.** (a) Foto que muestra texturas de esferulitas (color blanco) y (b) Texturas de fiamme son parte de la toba bandeada. (c) Toba bandeada ligeramente alterada, en este afloramiento se tomó la muestra COM-04A.

En esta área se tomaron las muestras COM-04A a COM-04D y aproximadamente a unos 20 m de la muestra COM-04A se localiza la muestra XAL-32 que reporta Frey et al., (2007) y clasifican como tobas de flujo de ceniza con edad de 4.97 Ma, formando parte del límite noroeste del rift Tepic-Zacoalco.

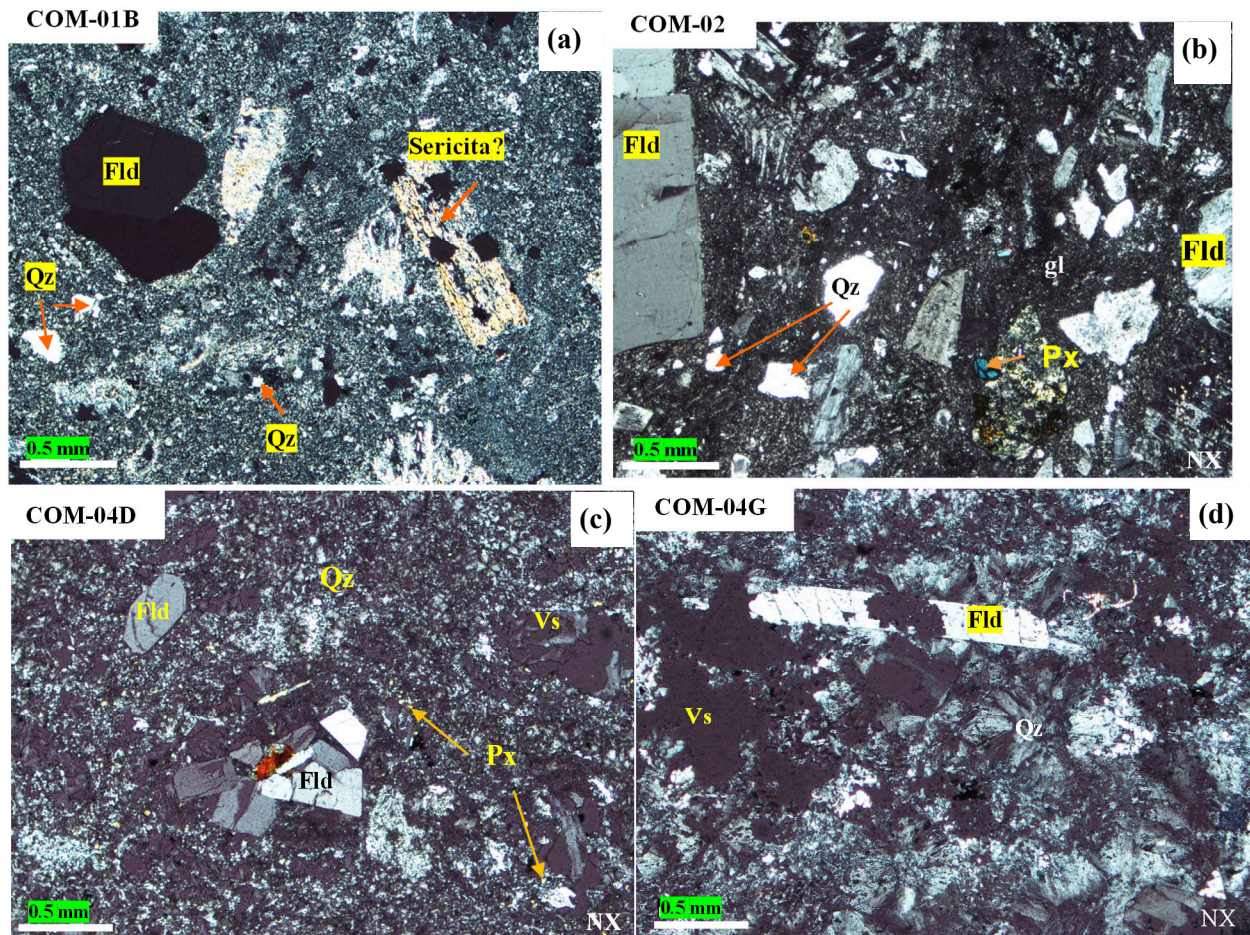
En la sección de Geología estructural del área Compostela se va a tratar con más detalle la orientación de la estratificación de la toba bandeada y la toba lítica. En la **Figura 13a-b** se tienen ejemplos de estos afloramientos de toba bandeada.



**Figura 13.** (a) Afloramiento de la toba bandeada (FbT), la línea negra punteada muestra la orientación del bandeamiento ( $\sim 242^{\circ}/28^{\circ}$ ). (b) Afloramiento de la toba bandeada que muestra ligera oxidación entre los bandeamientos, orientación ( $334^{\circ}/47^{\circ}$ ).

Al microscopio se observa tanto en la secuencia de toba lítica y toba bandeada una textura porfídica. El arreglo mineral en la toba lítica está conformado de fenocristales de feldespatos alterados, esta alteración se observa como copos de sericita dentro de los feldespatos y cuarzo en una matriz microlítica de cuarzo, piroxenos y vidrio. Los piroxenos en esta secuencia son clinostantita (**Figura 14a-b**).

En la toba bandeada se tienen un arreglo mineral conformado por fenocristales de feldespatos, cuarzo y vesículas en una matriz ligeramente recrystalizada con cuarzo y escasos piroxenos. Estos piroxenos son mayormente clino-ferrosilitas en ambas secuencias. **(Figura 14c-d).**



**Figura 14. (a-b)** Fotomicrografías de las muestras COM-01 y COM-02 representativas de la toba lítica, se observa la textura porfídica, con fenocristales de feldespatos. Algunos de estos feldespatos se encuentran remplazados por minerales arcillosos (copos de sericita) y cuarzo, estos en una matriz fina de cuarzo, piroxenos (clino-estantita) y vidrio. **(c-d)** Fotomicrografías de las muestras COM-04D y COM-04G representativas de la toba bandeada, donde se distinguen fenocristales de feldespatos e intercrecimientos radiales de cuarzo, en una matriz de cuarzo, piroxenos y vesículas. Fld—Feldespatos, Qz—Cuarzo, Px—Piroxenos, Vs—Vesículas, gl—vidrio, NX—Nícoles cruzados.

## 1.2 Andesitas

Esta unidad está representada por lavas andesíticas que se encuentran rellenando los valles al noreste y suroeste del área Compostela, aunque el origen de estas lavas no se encuentra bien expuesto en campo (**Figura 10a-b**). En general las andesitas que se encuentran al noreste y suroeste son de color verde oscuro, donde se observan a simple vista minerales de plagioclasas (3-5mm), piroxenos ligeramente oxidados (1-2mm) y algunas vesículas. Sin embargo, las andesitas que afloran al noreste del área presentan una matriz más afanítica y fenocristales más grandes de plagioclasas que las que se encuentran al suroeste con una matriz más homogénea en el tamaño de los fenocristales (**Figura 15a-b**).

Al noreste del área se recolectaron las muestras COM-03A a COM-03E y aproximadamente 50 m de la muestra COM-03A se encuentra la muestra XAL-33 de composición andesítica con una edad de 2.25 Ma ([Frey et al., 2007](#)).



**Figura 15. (a)** Foto que muestra parte del afloramiento de la lava de andesita al noreste del área y se alcanza a observar a simple vista fenocristales de plagioclasas, en una matriz más afanítica. **(b)** Afloramiento de andesitas al suroeste del área se observa una matriz más homogénea y microlítica.

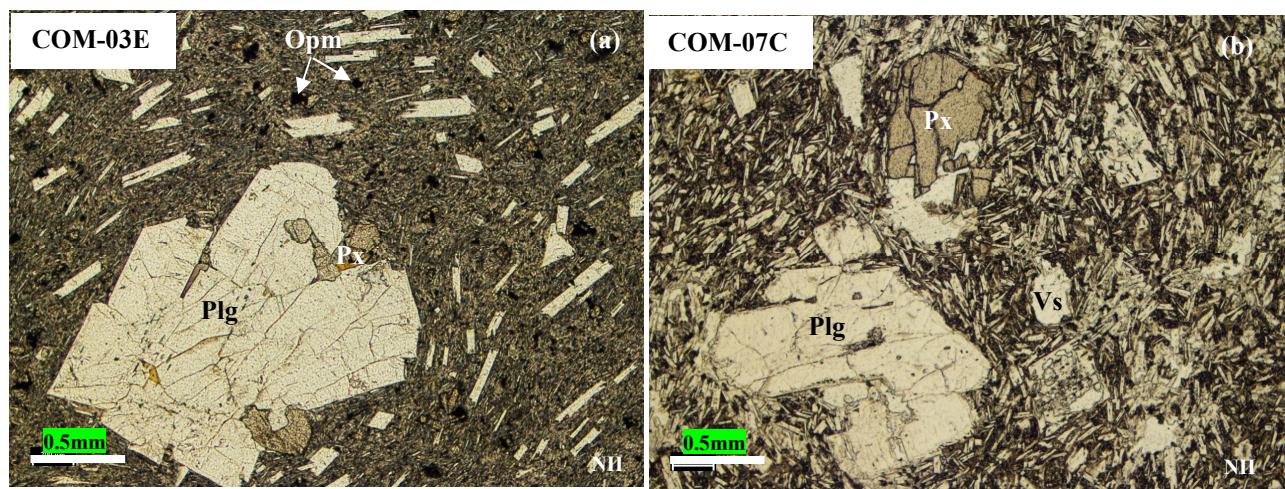


De las andesitas que se encuentran al suroeste del área se tomaron las muestras COM-06O y COM-07A a COM-07Fb y con estas se obtuvo un fechamiento. La continuidad de estas andesitas se extiende hacia el noroeste del área Compostela y tienen una orientación ( $165^{\circ}/23^{\circ}$ ). En esta zona se encuentra aparentemente el contacto con la toba lítica por la carretera que conduce a la ciudad de Tepic (**Figura 16a-c**).



**Figura 16.** (a) Afloramiento de andesitas al sureste del área Compostela. (b) Afloramiento de andesitas que se extiende al noroeste del área con orientación ( $165^{\circ}/23^{\circ}$ ) y (c) Contacto aparente entre andesitas y toba lítica.

Al microscopio en general las andesitas muestran una textura porfídica, con un arreglo mineral de fenocristales de feldespatos y piroxenos en una matriz de plagioclasas, piroxenos, vidrio, minerales opacos y vesículas. Los piroxenos mayormente identificados son clinoferrrosilita. Además, se observa que las andesitas que se encuentran al noreste del área Compostela tienen una matriz más afanítica a diferencia de las andesitas que se encuentran al suroeste donde se observa una matriz más microlítica (**Figura 17a-b**).



**Figura 17.** (a) Fotomicrofotografía de la muestra COM-03E representativa de las andesitas, se observan plagioclasas y piroxenos en una matriz afanítica casi fluida de plagioclasas y minerales opacos. Esta muestra se localiza al noreste del área Compostela. (b) Fotomicrofotografía de la muestra COM-07C representativa de las andesitas al suroeste del área Compostela, donde también se observan plagioclasas, piroxenos y vesículas en una matriz microlítica representada por plagioclasas y minerales opacos. Plg—Plagioclasas, Px—Piroxenos, Vs—Vesículas, NII—Nícoles paralelos.

### 1.3 Basalto andesitas (posteriormente clasificado como basalto traquiandesita)

La unidad de basalto andesitas está representada por una colada de lava que surge de un dique alimentador que corta y cubre discordantemente a la toba lítica. Este dique aparentemente es controlado por la Falla La Víbora con orientación NW-SE. En la zona La Mesa (**Figura 10a-b**) es donde se encuentra la salida efusiva de esta lava, formando una meseta que continua hacia

el suroeste y noroeste siguiendo la topografía de la toba lítica. En esta zona se seleccionaron las muestras para hacer fechamiento de esta unidad.

Aproximadamente a 7 km al noroeste del área se puede observar otro frente de lava de basalto andesita, que corresponde a otro cuerpo efusivo (**Figura 18a-b**). En general estas lavas de basalto andesita son de color verde oscuro, en una matriz afanítica y con presencia de



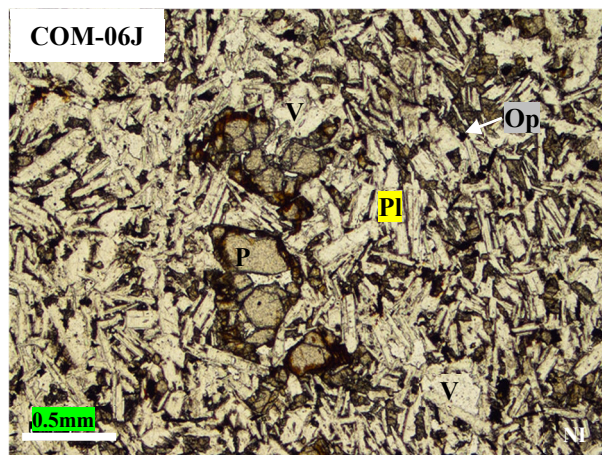
**Figura 18.** (a) Foto que muestra el contacto entre la unidad de basalto andesita y la toba lítica al centro del área Compostela. (b) Foto que muestra el frente de lava de basalto andesita al noroeste del área.

En la zona de Miravalles se encuentran diques aparentemente de la misma composición que la colada de lava, son de color negro a verde con un ligero bandeamiento de 1mm a 1cm y textura afanítica. Uno de estos diques tiene una orientación ( $322^{\circ}/13^{\circ}$ ) y el otro dique se encuentra aproximadamente 350 m del anterior (**Figura 19a-b**).



**Figura 19.** (a) Parte del afloramiento del dique basalto andesítico en la zona de Miravalles. La línea intermitente blanca muestra aproximadamente la orientación ( $322^{\circ}/13^{\circ}$ ) de este dique. (b) Afloramiento del dique basalto andesítico a 350 m al NE del anterior.

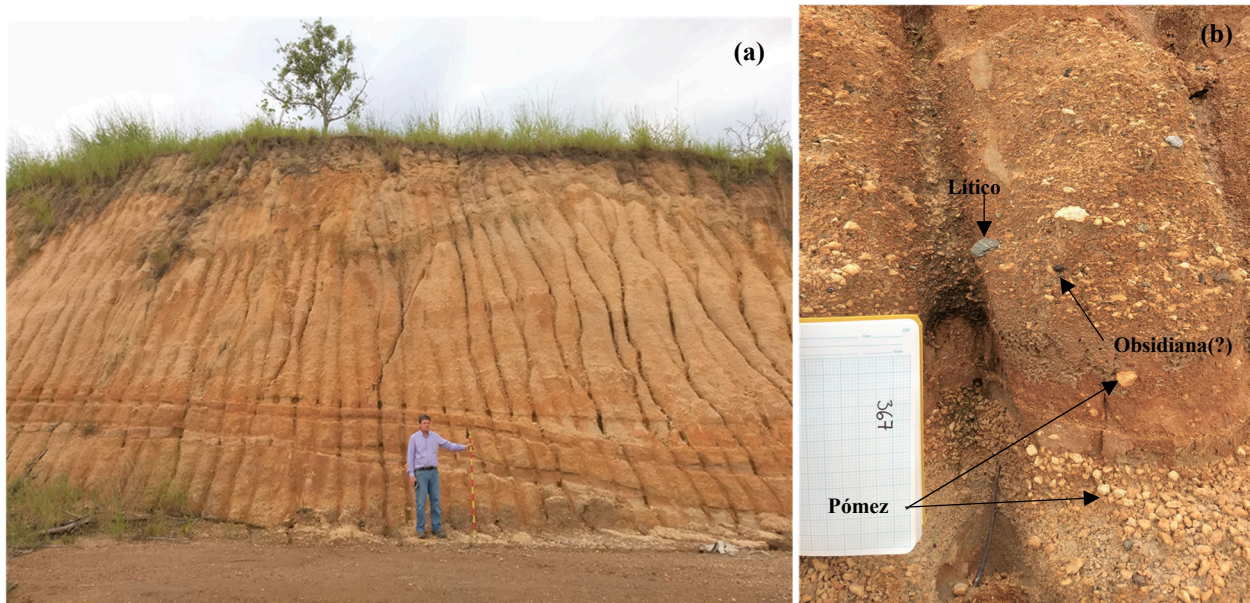
Al microscopio estas muestras presentan una textura porfídica, representada por plagioclasas, clinopiroxenos, vesículas en una matriz con textura hialopilitica de plagioclasas, clinopiroxenos y minerales opacos. La mayoría de los clinopiroxenos identificados son clinoferrosilita (**Figura 20**).



**Figura 20.** Fotomicrofotografía de la muestra COM-06J representativa del basalto andesitas. Los minerales presentes son plagioclasas, clinopiroxenos, vesículas y minerales opacos. Plg—Plagioclasas, Px—Piroxenos, Vs—Vesículas, Op—Minerales opacos, NII—Nícoles paralelos.

#### 1.4 Depósitos de pómez—Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande (?)

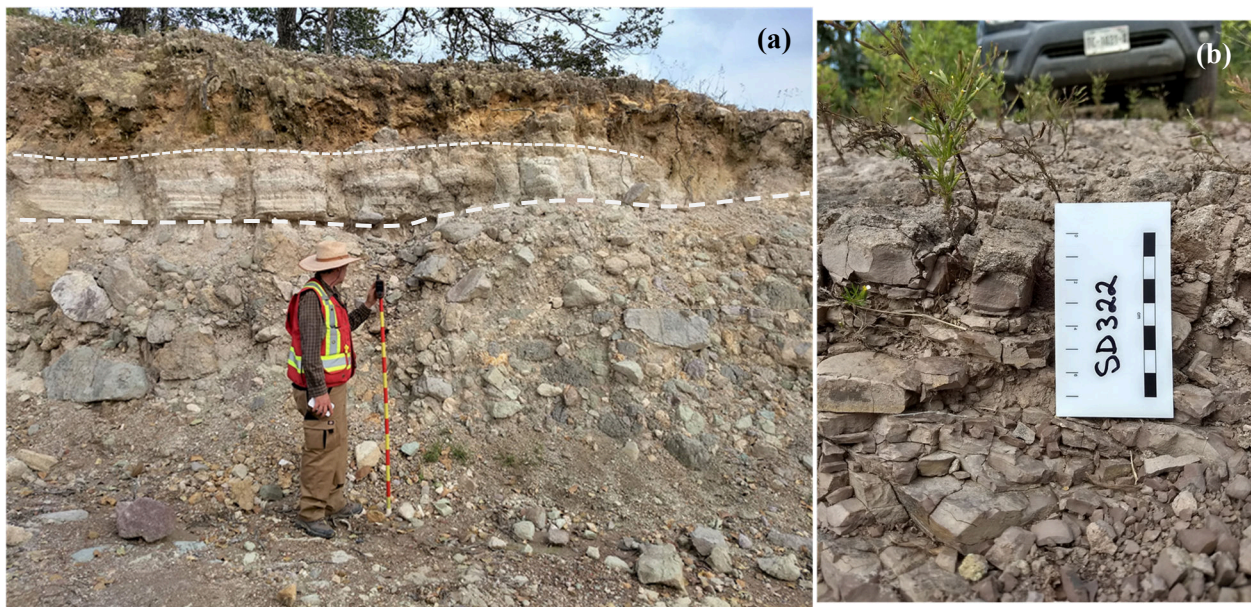
Estos depósitos de pómez se encuentran al suroeste del área Compostela (**Figura 10a**). Están representados por cuerpos masivos de pómez retrabajados de color crema, pobremente clasificados con fragmentos polilíticos, no consolidados, en una matriz de ceniza (**Figura 21a-b**). Estos depósitos posiblemente se pueden correlacionar con los depósitos de pómez Cuastecomate que reportan [Petrone et al., \(2006\)](#) como depósitos plinianos de caída, que consiste en una secuencia alternante de caída de pómez y capas de ceniza, representados por clastos de pómez blanca (<10 cm de diámetro) con variable contenido de cristales e inversamente gradado con fragmentos líticos dacíticos, riolíticos y menos abundantes lavas de andesita, producto del desarrollo del complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande de ~280 ka. Estos depósitos de pómez Cuastecomate se encuentran al sureste del Volcán Amado Nervo y aproximadamente a 26 km al sureste a del área Compostela.



**Figura 21. (a)** Afloramiento de depósitos de pómez posiblemente de los depósitos de pómez Cuastecomate relacionados con el complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. **(b)** Depósitos de pómez, no consolidados con fragmentos líticos.

### 1.5 Depósitos de piroclastos— Volcán Tepetiltic (?)

Estos depósitos de piroclastos se encuentran hacia al este de la zona La Mesa (**Figura 10a**). Están representados por estratos de tobas líticas polimícticas, sin consolidar y los clastos líticos muy poco ordenados. Concordante a este estrato se tienen depósitos de toba fina de color crema, sin consolidar, con distintos planos de estratigrafía. Posterior a este estrato se tiene una toba lítica de color crema compuesta por clastos líticos polimícticos angulares, con pómez, sin consolidar y distintos planos de estratificación. Por último, y en una pequeña área al suroeste de la zona de Tajitos y con un límite no bien definido se tienen depósitos de ceniza de color rojiza, con una textura afanítica con intercalaciones de ceniza fina y toba (**Figura 22a-b**) Estos depósitos distales posiblemente puedan correlacionarse con las etapas explosivas de actividad volcánica tipo pliniana del Volcán Tepetiltic alrededor de ~236 ka (Frey et al, 2014) que se encuentra al noreste del área Compostela.



**Figura 22.** (a) Depósitos de piroclastos —Volcán Tepetiltic (?), en la base se tienen a las tobas polimícticas, la línea intermitente blanca muestra el contacto entre este estrato y arriba de este los depósitos de toba fina. Por último, la línea intermitente corta blanca el contacto entre la toba fina y toba lítica. (b) Afloramiento al suroeste de la Zona de Tajitos representado por intercalaciones de ceniza fina y toba.

Por último, se tiene el desarrollo de suelos de uso agrícola producto del intemperismo de los basaltos al noroeste del área Compostela.

La **Tabla 1** muestra la estratigrafía local del área Compostela de las unidades que se observaron en campo. Algunas de estas unidades se pueden correlacionar con las edades que se encuentran en la literatura. La unidad de riolitas es descrita como una toba silíceo de flujos de ceniza de edad 4.97 Ma (Frey et al., 2007). Esta unidad se puede correlacionar con la secuencia de la toba bandeada observada en campo, además por la cercanía de la toma de estas muestras con la edad reportada. Sin embargo, de la toba lítica que se encuentra cubriendo al noroeste y sureste del área no se tomaron muestras para fechamiento, ya que esta unidad se encuentra alterada y en esta secuencia es donde se encuentra emplazada la mineralización por vetas en la zona de Miravalles, El Tejamanil, La Mesa y Tajitos.

La unidad de andesitas se encuentra al noreste y suroeste del área. Sin embargo, las andesitas que se encuentran al noreste tienen una edad reportada de 2.25 Ma (Frey et al., 2007) y como se describió anteriormente difieren un poco en la textura de su matriz con respecto a las andesitas al suroeste. En esta investigación el fechamiento que se obtuvo de estas andesitas es de 2.42 Ma. De igual manera se obtuvo el fechamiento para la unidad de basalto andesita de 1.05 Ma. Lo que indica que estos eventos son relativamente cortos en el tiempo y con un ligero cambio en su composición química de las andesitas al noreste y suroeste del área.

Los resultados geoquímicos y fechamientos de las unidades de andesita y basalto-andesita se encuentran en la publicación “Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting” en el Capítulo 3. Y los correspondientes a la toba lítica y toba bandeada en la publicación

“Mineralogía y geoquímica de las rocas volcánicas félsicas del área Compostela, noroeste del graben San Pedro-Ceboruco, rift Tepic-Zacoalco, México” en el Capítulo 4.

Los depósitos de pómez se pueden correlacionar con los depósitos de Pómez del Cuastecomate de ~280 ka (Petrone et al., (2006), que corresponden al desarrollo del complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande y los depósitos de piroclastos se pueden correlacionar con la actividad proveniente del Volcán Tepetitlic con edad de ~236 Ka (Frey et al., 2014).

Local Geology	Units	Description	Age
	Alluvion	Recent soils	
	Ash	Ash. Aphanitic texture, red matrix, very fine sand, ash to 1-2cm and tuff non welded, very coarse sand, poorly sorted, with lithic fragments. Intercalation of fine ash and tuff.	~236 ka (Frey et al., 2014)
	Lt	Angular, polymictic lithic clasts, with pumice, pale cream, unconsolidated, distinct planar stratification. Lithic tuff.	
	Ft	Sand size particles granular texture, pale cream, unconsolidated, distinct planar stratification. Fine tuff.	
	PLt	Angular, polymictic lithic clasts, pale cream, unconsolidated, very poorly sorted, Debris flow (?). Polymictic lithic tuff.	
	Pumice SCVC(?)	Massive, very poorly sorted, with polyolithic fragments. [Cuastecomate Pumice Deposits (?)]	~280 ka (Petrone et al., 2006)
	Basaltic andesite	Aphanitic texture, grey color with some vesicles.	This study 1.05±0.15 Ma and 1.07±0.17 Ma
	Andesite	Porphyritic texture, dark, hypocrystalline, crystals of plagioclase and pyroxene.	2.25±0.02 Ma (Frey et al., 2007) This study 2.42±0.36 Ma
	Sequence 2 FbT	Flow banded Tuff, pale cream to pink, spherulites and nodular devitrification texture.	4.97±0.02 Ma (Frey et al., 2007)
	Sequence 1 CxLT	Crystal Lithic Tuff, grey, massive, non welded, coarse grained and porphyritic texture with quartz eyes and kaolinized feldspar clasts. Mineralized zones Miravalles, Tejamanil, La mesa y Tajitos.	

**Tabla 1.** Estratigrafía del área Compostela. Las unidades que se presentan en esta estratigrafía corresponden a las observadas en campo y su correlación con las edades que se encuentran en la literatura y las obtenidas en esta investigación.

En el **Anexo I** se tiene la Tabla de las muestras recolectadas en campo con locación, descripciones de los afloramientos y los análisis que se realizaron a algunas de estas muestras. En el **Anexo II** se tienen 19 descripciones petrográficas con su respectiva foto de muestra de mano y por último en el **Anexo III** se tiene el conteo mineral petrográfico de dos muestras de basalto andesita y tres de andesita, para los porcentajes de minerales presentes en estas rocas.

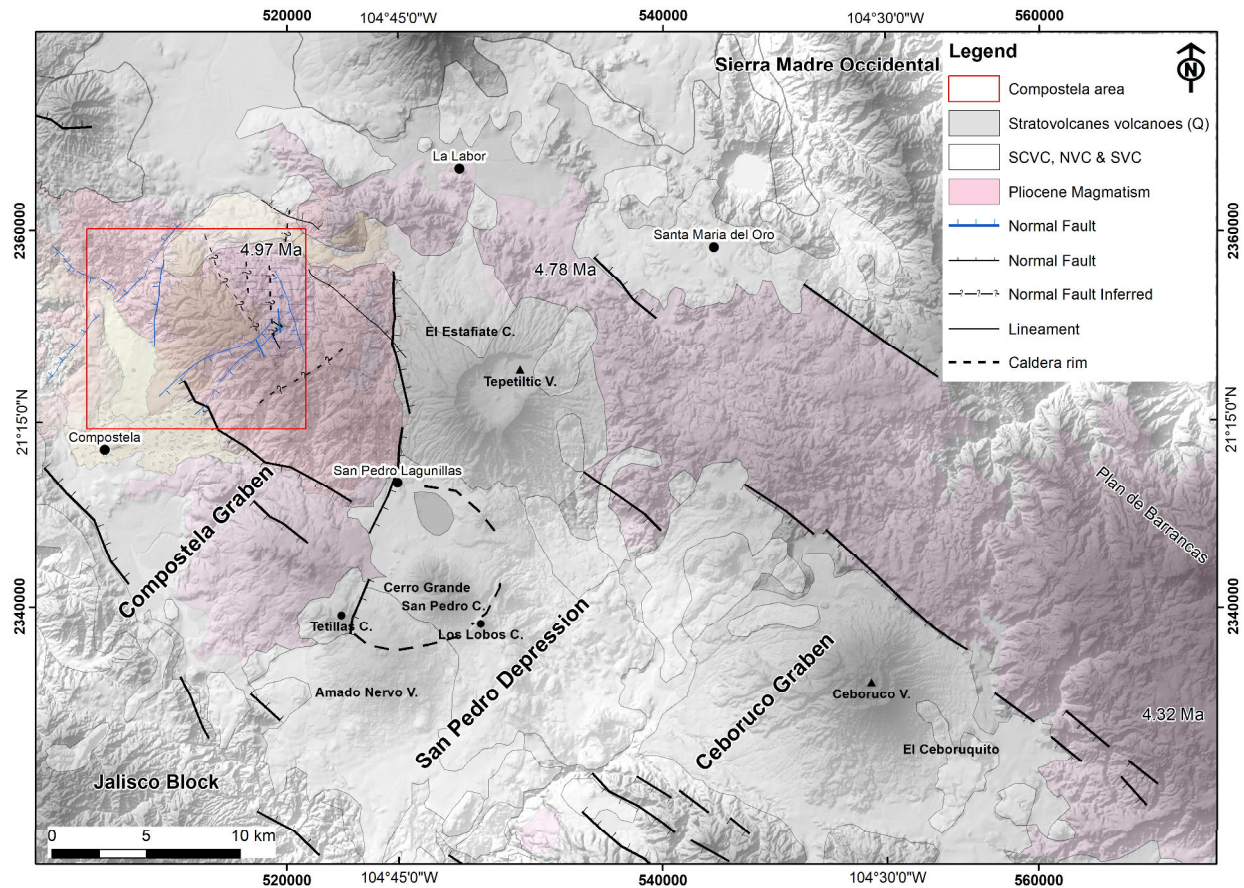


Las muestras que no fueron utilizadas en las publicaciones se ocuparon para dar continuidad a las unidades de toba lítica, toba bandeada, y del basalto andesita para conformar el mapa geológico del área Compostela. De los depósitos de piroclastos y pómez no se tomaron muestras por las limitantes de la investigación.

## 2. Geología estructural del área Compostela

El área Compostela se encuentra al límite noroeste del graben San Pedro-Ceboruco y al norte del Graben Compostela. Este último está formado por dos fallas normales NW-SE, que forman una depresión de 10 km de ancho y al norte cortan a la explosión ignimbrítica de 4.97 Ma ([Frey et al., 2007](#)) donde se ubica el área Compostela. La continuidad de estas ignimbritas ocurre a lo largo del sistema de fallas normales NW-SE con echados al NE que conforman la falla del Plan de Barrancas y del graben Compostela-Ceboruco. Además de delimitar el Bloque Jalisco al sur y la Sierra Madre Occidental al norte en esta parte del Rift Tepic-Zacoalco (**Figura 23**).

En la parte central donde se forma la depresión de la caldera de San Pedro, se tienen fallas normales con orientación NNE-SSW y NE-SW que provocan este desplazamiento vertical de menos de 1100 m: Este desplazamiento se hace en dos periodos, el primero de 600 m en el Plioceno temprano y el segundo de 500 m en el Plioceno tardío-Pleistoceno temprano ([Ferrari y Rosas-Elguera, 2000](#)). Esto parece indicar que el área Compostela se encuentra en un pequeño horst, debido a este desplazamiento vertical provocado por las fallas NE-SW que forman la depresión de San Pedro al este y sureste del área, y la falla NW-SE al sur que forma el graben Compostela (**Figura 23**).



**Figura 23.** Localización del área Compostela en el graben San Pedro-Ceboruco. Las edades en millones de años (Ma) son del magmatismo del plioceno reportadas por [Frey et al., 2007](#). Los sistemas reconocidos en el graben se encuentran en la Figura 8 y la litología del área Compostela en la Figura 10. Modificado de [Ferrari y Rosas-Elguera \(2000\)](#).

Dentro del área Compostela se obtuvieron datos de fallas normales aparentemente secundarias a las fallas inferidas como Falla Los Fortines y Falla La Víbora, así como también datos de la orientación de la estratificación de la toba lítica, la toba bandeada y de los depósitos de piroclastos provenientes del Volcán Tepetitlic. Todos estos datos se representan como puntos de campo y se encuentran en la **Figura 24**.

En la **Tabla 2 y 3** se resumen estos puntos, 19 para fallas normales y 13 para la orientación de la estratificación, respectivamente. Además, se indica en que afloramiento se encuentran estas estructuras y en algunos de estos puntos de campo se tiene una o varias fallas que fueron medidas y, por lo tanto, pueden tener varios datos.

ID	Field Point Faults	UTM E	UTM N	Elev(m)	Strike	Dip	Estructure	Brief description of outcrop
1	292	518713	2353348	1671	340	80	Fault	Rhy tuff with alteration Fld (arg+)
2	312*	519595	2355099	1480	90	58	Fault	Pyroclastic deposits (Secondary fault)
3	314	519292	2354587	1517	348	64	Fault	Rhy flow (Secondary fault)
4	328	519570	2353808	1696	331	90	Fault	Rhy flow
5	342*	519597	2355102	1483	133	82	Fault	Pyroclastic deposit
6	342*	519597	2355102	1483	314	64	Fault	Pyroclastic deposit
7	342*	519597	2355102	1483	286	55	Fault	Pyroclastic deposit
8	345*	519496	2355023	1480	304	57	Fault	Pyroclastic deposits
9	404	512022	2357041	836	280	90	Fault	Rhy tuff sloped
10	404	512022	2357041	836	290	50	Fault	Rhy tuff sloped
11	404	512022	2357041	836	300	62	Fault	Rhy tuff sloped
12	406	511974	2356929	847	284	64	Fault	Rhy tuff
13	415	514667	2359873	903	310	40	Fault	Rhy tuff, with lithoclasts
14	425	518523	2359064	1046	178	87	Fault	Rhy flow
15	425	518523	2359064	1046	222	90	Fault	Rhy flow
16	430	518464	2356646	1345	270	49	Fault	Rhy flow bedding
17	433	518524	2356282	1395	287	72	Fault	Rhy flow bedding
18	433	518524	2356282	1395	276	68	Fault	Rhy flow bedding
19	444	516725	2348891	1014	358	59	Fault	Rhy flow and tuff

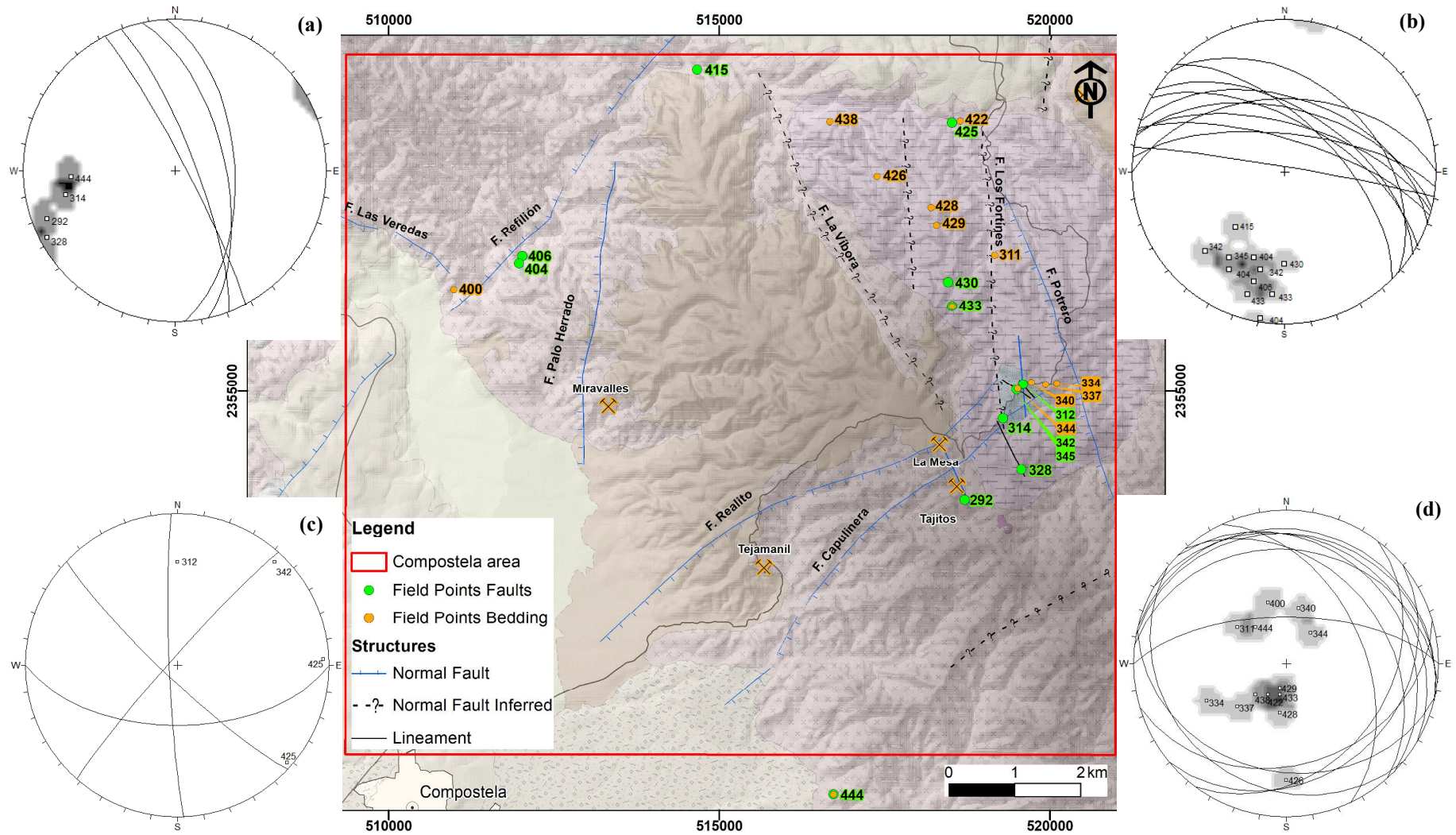
**Tabla 2.** Datos estructurales de las fallas medidas en campo y breve descripción del afloramiento en donde se encuentran estas fallas. Los puntos de campo que tienen asterisco corresponden a los datos obtenidos en los depósitos de piroclastos correspondientes al Volcán Tepetitlic (?). Las coordenadas se encuentran en UTM y la elevación en metros. Elev—Elevation.

ID	Field point Bed	UTM E	UTM N	Elev(m)	Strike	Dip	Estructure	Brief description of outcrop
1	311	519166	2357053	1189	39	33	Bedding/Foliation	Rhy flow foliated and high fracturing, exolution textures and bubble gas
2	334	520105	2355116	1439	334	47	Bedding	Flow foliated and more welded, same that SD333
3	337	519935	2355096	1458	317	36	Bedding/Foliation	Flow foliated, grey to red matrix, less welded
4	340*	519720	2355130	1478	105	30	Bedding	Pyroclastic deposits, and intercalations of ash tuff.
5	344*	519511	2355033	1471	130	20	Bedding	Pyroclastic deposit with polyolithic clasts.
6	400	510986	2356535	818	75	35	Bedding	Rhy tuff, green matrix and lithoclasts, very poorly sorted
7	422	518643	2359088	1059	300	20	Bedding	Rhy flow bedding
8	426	517389	2358246	1196	270	64	Bedding	E-W, Rhy flow banded
9	428	518203	2357781	1226	277	27	Bedding	Rhy flow bedding
10	429	518286	2357514	1287	283	12	Bedding	Rhy flow bedding
11	433	518524	2356282	1395	277	17	Bedding	Rhy flow bedding
12	438	516671	2359081	1044	311	23	Bedding	Rhy flow
13	444	516725	2348891	1014	51	26	Bedding	Rhy tuff

**Tabla 3.** Datos estructurales de la orientación de estratificación de los afloramientos de las secuencias de riolitas y de los depósitos de piroclastos correspondientes al Volcán Tepetitlic. Los puntos que tienen asterisco corresponden a los datos obtenidos en los depósitos de piroclastos correspondientes al Volcán Tepetitlic (?). Las coordenadas se encuentran en UTM y la elevación en metros. Elev—Elevation.

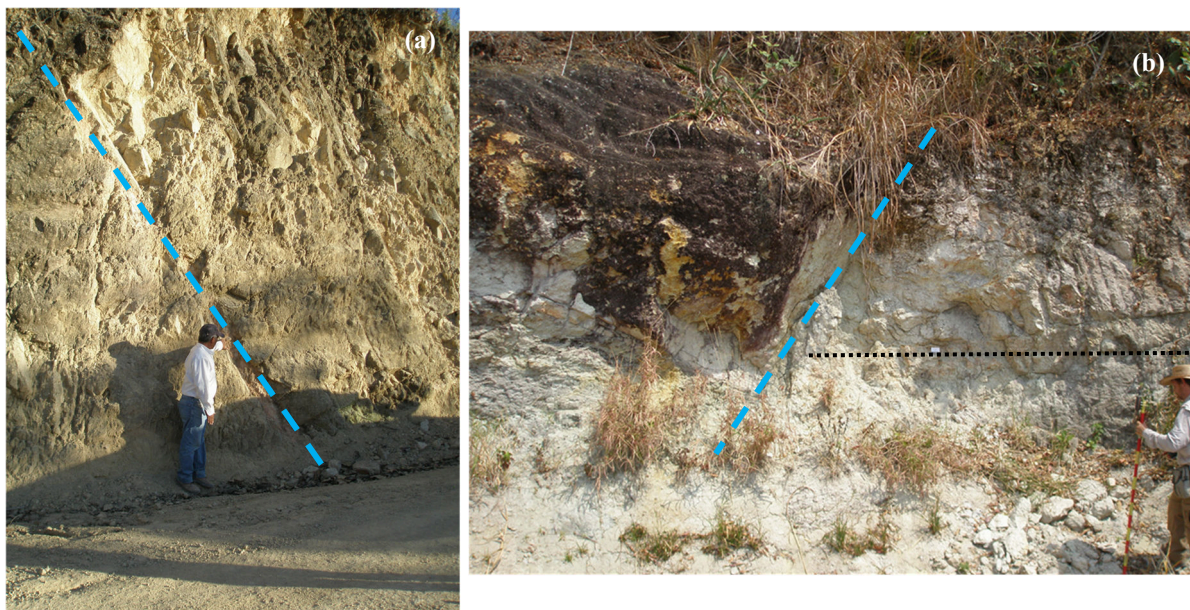
Estos datos sirvieron para construir estereogramas tanto para las fallas como la orientación de la estratificación. En los estereogramas para las fallas se identificaron dos sistemas principales y un grupo de cuatro fallas con diferentes orientaciones y rumbos (**Figura 24a-c**). El primer sistema de fallas con orientación casi N-S y echado hacia el E, representado por toba lítica con los puntos 292 y 444, y toba bandada con los puntos 314 y 328 (**Figura 24a**). El segundo grupo tiene una orientación NW con echado al N, representa a los depósitos de piroclastos con los puntos 342 y 345; la toba lítica con los puntos 404, 406 y 415; y con la toba bandeada con los puntos 430 y 433. (**Figura 24b**). El grupo de cuatro fallas con orientaciones variadas son en los depósitos de piroclastos y en la toba bandeada. Con orientación E-W y echado al S el punto 312 y NW-SE con echado al SW el punto 342; y con orientación N-S con echado al W y NE-SW con echado al NW ambas en el punto 425 (**Figura 24c**).

Con la orientación de la estratificación se identificaron tres grupos (**Figura 24d**). El primero tiene una orientación NW-SE con echado al SW, representa a los depósitos de piroclastos con los puntos 312, 340, 342, 344 y 345. El segundo una orientación NE-SW con echado al SE, representa a la toba lítica con los puntos 400 y 444, solo el 311 representa a la toba bandeada, en este punto es posible que esta orientación sea producto del desplazamiento del bloque donde se obtuvo el dato ya que se encuentra cerca de la Falla Los Fortines. El tercero tiene una orientación NW-SE con echado al N, representan a la toba bandeada con los puntos 334, 337, 422, 426, 428, 429, 433 y 438.



**Figura 24.** Mapa que muestra la localización de los puntos de campo para las fallas normales (color verde) y para la orientación de la estratificación (color naranja). **(a)** Estereograma del primer grupo de fallas N-S/E. **(b)** Estereograma del segundo grupo de fallas NW-SE/N, **(c)** Estereograma de cuatro fallas con diferente orientación E-W/S, N-S/W, NE-SW/NW, NW-SE/SW. **(d)** Estereograma de la orientación de estratificación, el primer grupo NW-SE/SW, el segundo grupo NE-SW/SE y el tercero NW-SE/N. Los números en cada polo representan los puntos de campo. La litología se presenta en la figura 10. F—Falla.

Los puntos 314 y 444 son ejemplos de afloramientos cortados por el primer grupo de fallas N-S con echados al E. El punto de campo 314 (**Figura 24** y **Figura 25a**) representado por la toba bandeada, se encuentra al sur y al límite de la Falla Los Fortínes y el punto 444 (**Figura 24** y **Figura 25b**) representado por la toba lítica se encuentra al sur y fuera del área Compostela. En este punto se tiene la orientación de la estratificación NE-SW con echado al SE y este sirvió como control para dar continuidad a esta toba que se encuentra mayormente distribuida en el área y es la base de la toba bandeada.

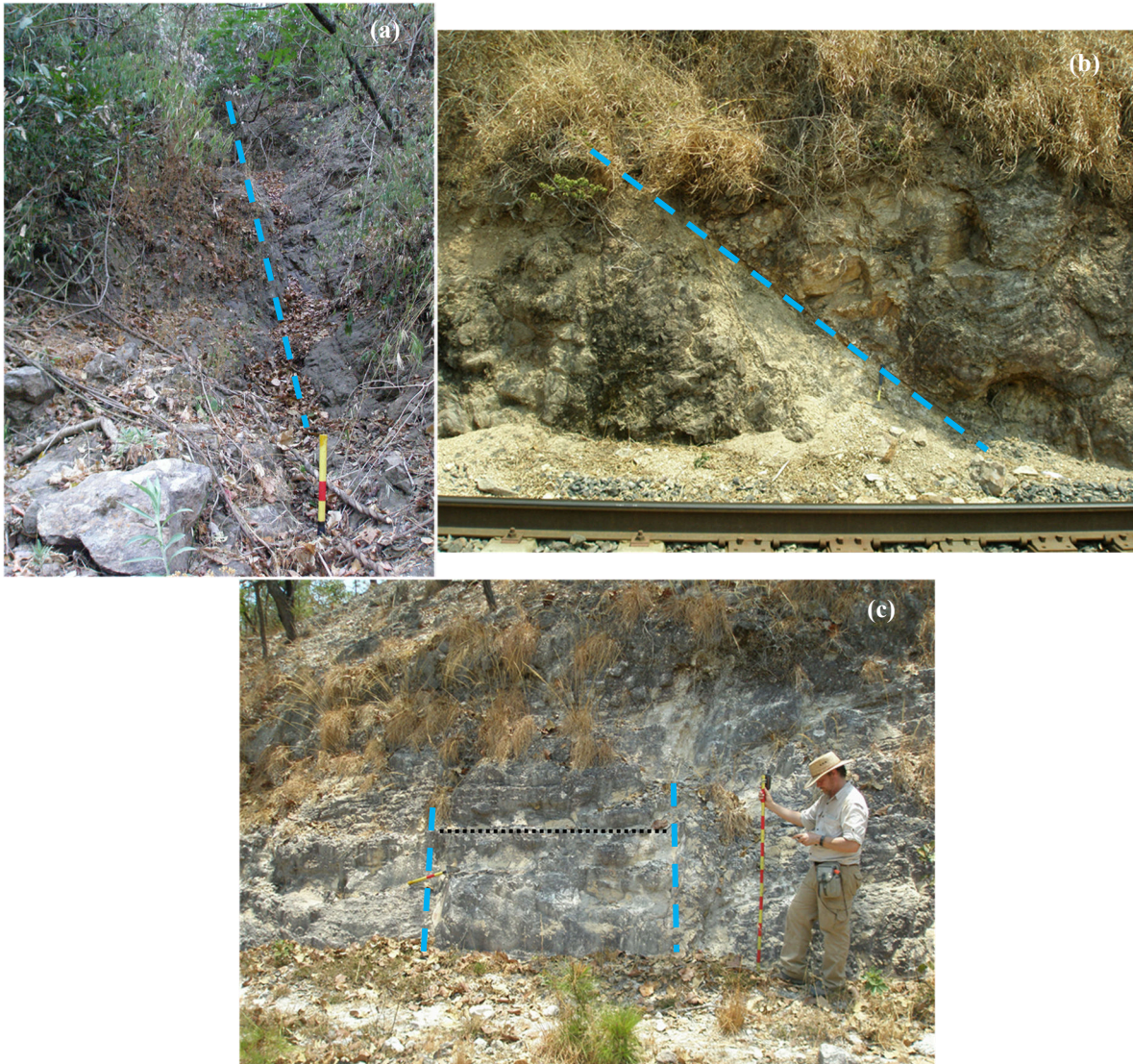


**Figura 25.** Afloramientos que representan al primer grupo de fallas N-S/E. **(a)** Afloramiento de toba bandeada, punto de campo 314, falla normal ( $348^{\circ}/64^{\circ}$ ). **(b)** Afloramiento de toba lítica, punto de campo 444, falla normal ( $358^{\circ}/59^{\circ}$ ) y estratificación ( $051^{\circ}/26^{\circ}$ ). La línea azul intermitente marca aproximadamente el rumbo de las fallas y la línea negra punteada la orientación de la estratificación.

Los afloramientos que muestran fallas normales del segundo grupo NW-SE con echados al N están representados por el punto 404 al este de la Falla Refilión (**Figura 24** y **Figura 26a**), el 415 al norte de la Falla La Víbora (**Figura 24** y **Figura 26b**), que cortan a la toba lítica.

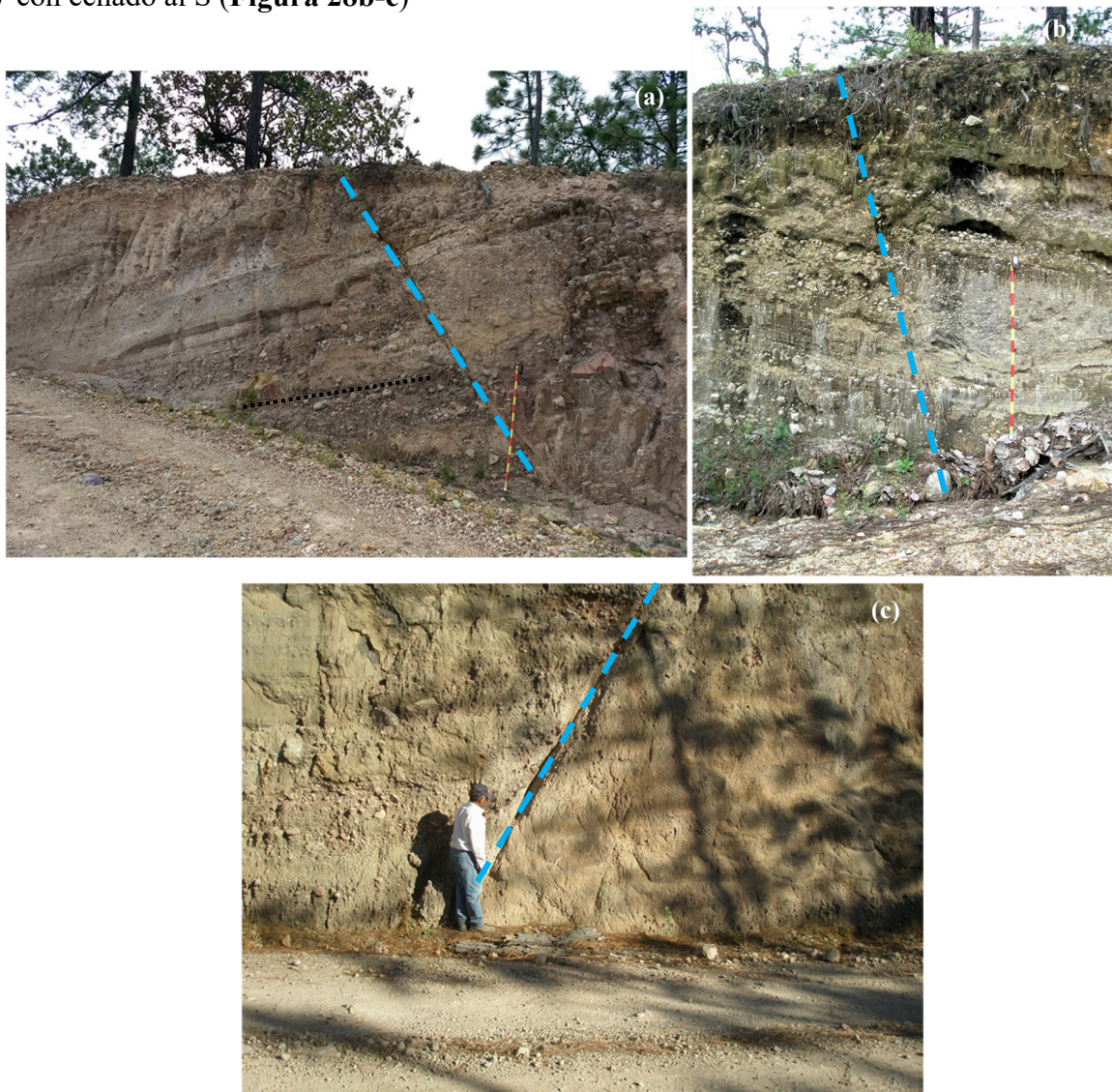
Otros afloramientos que tienen fallas de este segundo grupo son los puntos 430 y 433 que representan a la toba bandeada que se encuentran entre la Falla La Víbora al este y al oeste de la

Falla Los Fortines. Con respecto a la orientación de la estratificación de la toba bandeada en esta zona es NW-SE con echado al N y continua esta misma orientación hasta los puntos 334 y 337 al este de la Falla Los Fortines (**Figura 24** y **Figura 26c**).



**Figura 26.** Afloramientos que representan al segundo grupo de fallas NW-SE/N. **(a)** Punto de campo 404 cortado por una falla normal ( $280^{\circ}/90^{\circ}$ ) y **(b)** Punto de campo 415 falla normal ( $310^{\circ}/40^{\circ}$ ), ambos en la toba lítica. **(c)** Punto de campo 433, falla a la izquierda ( $276^{\circ}/68^{\circ}$ ) y falla a la derecha  $287^{\circ}/72^{\circ}$ ), la orientación de la estratificación de la toba bandeada en este punto ( $277^{\circ}/17^{\circ}$ ). La línea azul intermitente marca aproximadamente el rumbo de las fallas y la línea negra punteada la orientación de la estratificación.

El afloramiento del depósito de piroclastos provenientes del Volcán Tepetiltic se representa con los puntos de campo 340, 342, 344 y 345, tienen una orientación NW-SE con echado al S. El contacto entre la toba bandeada y estos depósitos no es evidente en campo. (**Figura 24 y Figura 27a**). Este afloramiento es cortado por fallas del segundo grupo NW-SE con echados al N y por una falla con esa misma orientación, pero con echado al SW y una falla con orientación más E-W con echado al S (**Figura 28b-c**)



**Figura 27.** Afloramiento de depósitos de piroclastos que representan los puntos de campo 340, 342, 344 y 345. **(a)** Falla normal ( $304^{\circ}/57^{\circ}$ ) y estratificación de estos depósitos ( $130^{\circ}/20^{\circ}$ ). **(b)** Punto 342, falla normal ( $133^{\circ}/64^{\circ}$ ) y **(c)** Punto de campo 312, falla normal ( $090^{\circ}/58^{\circ}$ ). Línea azul intermitente marca la falla y línea negra punteada la orientación de la estratificación.



El otro par de fallas que cortan a la toba bandeada representada por el punto de campo 425 tiene una orientación N-S con echado al W y NE-SW con echado más al NW (**Figura 24 y Figura 28**)



**Figura 28.** Afloramiento de toba bandeada en el punto de campo 425, falla normal ( $178^{\circ}/87^{\circ}$  y  $222^{\circ}/90^{\circ}$ ). La línea azul intermitente marca aproximadamente la falla.

La toba lítica al oeste de la Falla La Víbora tiene una orientación NE-SW con echado al SE y se encuentra cortada por fallas del primer grupo N-S con echado al E y del segundo grupo que es el más predominante en el área con orientación NW-SE con echado al N.

Sin embargo, la orientación de la estratificación de la toba bandeada es NW-SE con echado al N, que también se encuentra afectada por el segundo sistema de fallas con esa misma orientación y rumbo. Además, de que estas fallas son paralelas a la Falla La Víbora. Es evidente que la Falla La Víbora es una estructura principal en el área y posible marca el contacto entre la toba lítica y la toba bandeada en la zona de La Mesa y Tajitos, y que sea responsable del dique

por donde sale la colada de lava de basalto andesita, que cubre discordantemente a la toba lítica. En el campo es evidente que esta colada de lava sigue la pendiente de la toba lítica al noroeste y suroeste de esta. Con respecto a las zonas mineralizadas las vetas que cortan esta toba lítica son predominantemente NW-SE (Aguilar-Nogales y Cedillo-Calvillo, 1983)

Los depósitos de piroclastos provenientes del Volcán Tepetitlic presentan una orientación de la estratificación al NW-SE con echado al SW. Esto parece indicar que se depositaron sobre una estructura preexistente con esa misma orientación, y posteriormente afectados por la activación o reactivación de una falla que los inclinó al SW.

Las fallas que se encontraron con orientación N-S que cortan tanto a la toba lítica y a la toba bandeada se pueden relacionar con los sistemas NNE-SSW y NE-SW, y que forman la depresión de la caldera de San Pedro al este del área Compostela. Con respecto a las fallas que tiene una orientación NW-SE con echado al NE se pueden relacionar con las fallas normales que forman parte del Plan de Barrancas con esa misma orientación y echado. Ambos sistemas aparentemente del Plioceno Temprano. De igual manera, las fallas que se encuentran en los depósitos de piroclastos con esa misma orientación y echado puedan ser producto de la reactivación de esas mismas fallas durante el Cuaternario.

En el **Anexo IV** se encuentran los estereogramas que se realizaron con los datos obtenidos en el campo de las fallas y de la orientación de la estratificación. Estos estereogramas se realizaron con el programa Rocscience Dips versión 5.103, usando la plantilla Schmidt en áreas iguales.

## Referencias

[Aguilar-Nogales, M y Cedillo-Calvillo, R. \(1983\)](#). Evaluación Geológico-Minera preliminar del área San Francisco, Municipios de Compostela y San Pedro Lagunillas, en el Estado de Nayarit. *Consejo de Recursos Minerales*. Archivo Técnico 180063, p 1-38 (21 mapas). Servicio Geológico Mexicano. Archivo técnico histórico. Estado Nayarit, Municipio Compostela, código [1883CECR0001](#). Incluye 21 mapas.

[Camprubí, A. \(2009\)](#). Major metallogenic provinces and epochs of Mexico: *SGA News*, 25, 1-20.

[Camprubí, A. \(2013\)](#). Tectonic and Metallogenic History of Mexico. In *Tectonics, Metallogeny, and Discovery: The North American Cordillera and Similar Accretionary Settings. Society of Economic Geologist, Special Publications 17*, 201-243. <https://doi.org/10.5382/sp.17.06>

[Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Delgado-Granados, H., & Carmichael, I.S.E. \(2007\)](#). A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(1–2), 49-64. <https://doi.org/10.1130/B25950.1>

[Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Nelson, S. A., Delgado-Granados, H., Mastin, L., & Wineberg, D. \(2014\)](#).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Volcan Tepetitlic, western Mexico: Implications for the origin of zoned rhyodacite-rhyolite liquid erupted explosively from an andesite stratovolcano after a prolonged hiatus. *Bulletin of the Geological Society of America*, 126(1–2), 16-30. <https://doi.org/10.1130/B30790.1>

[Mc Phie, J., Doyle, M., Allen, R. \(1993\)](#). *Volcanic Textures*. CODES, Hobart, 196 p.

[Petrone, C.M., Francalanci, L., Ferrari, L., Schaaf, P., & Conticelli, S. \(2006\)](#). The San Pedro-Cerro Grande volcanic complex (Nayarit, México): Inferences on volcanology and magma evolution. In C. Siebe, J.L. Macias, and G.J. Aguirre-Díaz (Eds.), *Neogene-Quaternary continental margin volcanism: A perspective from México 402*(65-98). Geological Society of America, Special Paper (402). [https://doi.org/10.1130/2006.2402\(03\)](https://doi.org/10.1130/2006.2402(03)).

[Servicio Geológico Mexicano \(2007\)](#). Carta Geológico-Minera Xalisco F13-D31, Nayarit. 1:50,000. Primera edición, Servicio Geológico Mexicano, (SGM).

## **CAPÍTULO 3**

### **Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting**

Presentación de la investigación publicada

Este artículo se publicó en el Geological Journal y participo activamente como primera autora. En el anexo del Capítulo 3 se muestra la portada de la publicación y tres figuras suplementarias.

Mi contribución en esta investigación se resume como sigue:

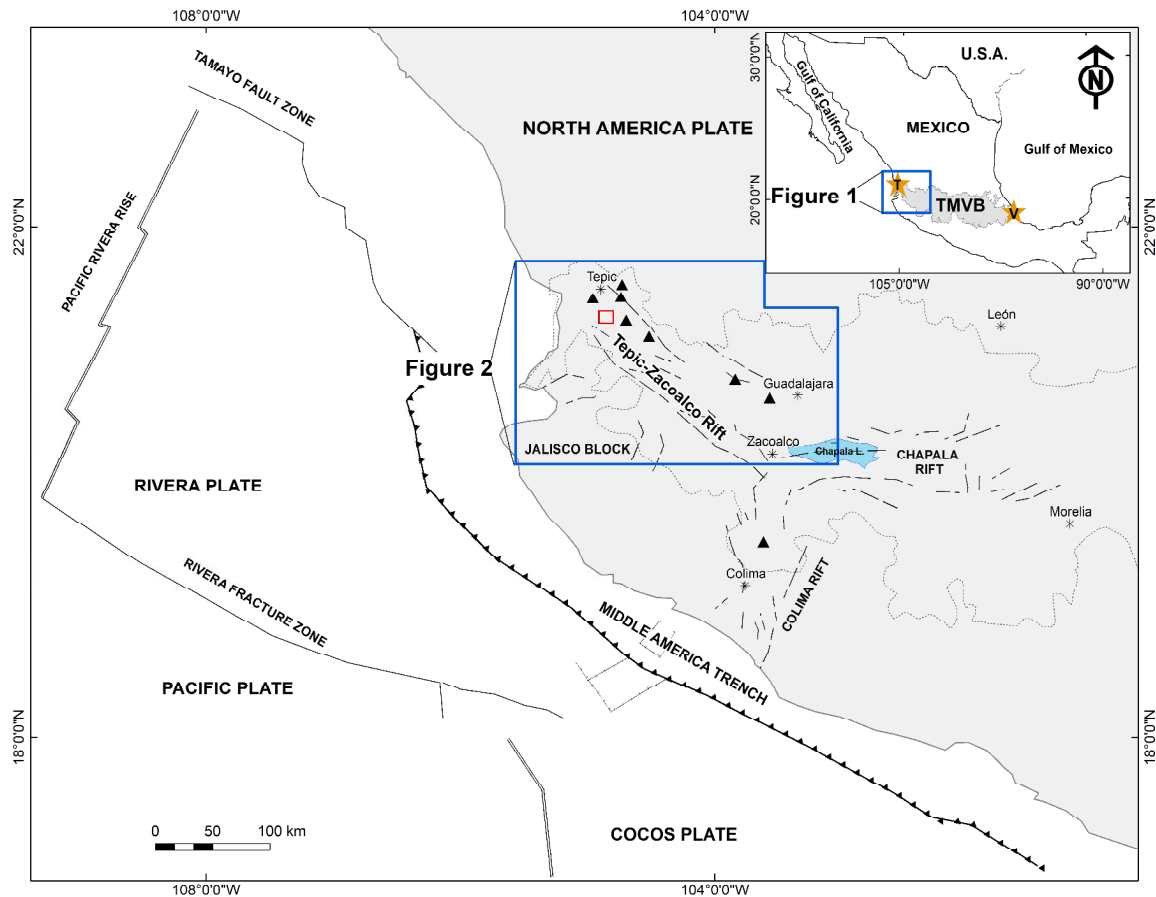
1. Trabajo en campo, elaboración de mapas geológicos y recolección de muestras
2. Preparación de muestras y análisis experimentales
3. Calculación de datos, tablas, figuras y preparación de diagramas
4. Interpretación de datos y redacción del trabajo

## **Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting**

### **1. Introduction**

The Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB; also named as Mexican Volcanic Belt-MVB) is described as a Miocene to Recent E-W oriented volcanic province that extends approximately 1000 km long from Tepic to Veracruz (**Figure 1**), and about 200-500 km wide and contains ~8000 volcanic structures ([Andreani, et al., 2008](#); [Verma, 2015](#)). The TMVB has been divided by several authors (i.e., [Ferrari, et al., 2012](#); [Verma, 2015](#); [Verma, et al., 2016](#)) in three main sectors: western, central, and eastern. The geodynamic evolution of the TMVB is very complex due to their significant differences in geochemical, isotopic, and geochronological composition of the volcanic rocks, as well as tectonic setting. Several kinds of models (subduction-related, plume-related, continental rifting, and strike-slip faulting) have been proposed by several researchers for the origin and evolution of the TMVB ([Díaz-Bravo, et al., 2014](#); [Ferrari, et al., 2000](#); [Frey et al., 2014](#); [Gómez-Tuena, et al., 2007](#); [Petrone, et al., 2014](#); [Verma & Nelson, 1989](#); [Verma, et al., 2016](#)) and an extensional tectonic regime is developed in the triple rift system known as Tepic-Zacoalco Rift, Colima Rift and Chapala Rift (TZR-CR-ChR) ([Frey, et al., 2007](#); [Luhr, et al., 1985](#)).

At the western sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt (WTMVB) the Rivera Plate and northern part of the Cocos Plate are subducting (**Figure 1**; [Yang et al., 2009](#)) and the triple rift system TZR-CR-ChR on land is active (**Figure 1**; [Selvans, et al., 2011](#)), which have been causing that the Jalisco Block drift westward towards the Pacific Ocean (**Figure 2**; [Frey et al., 2007](#); [Pacheco et al., 1999](#)).



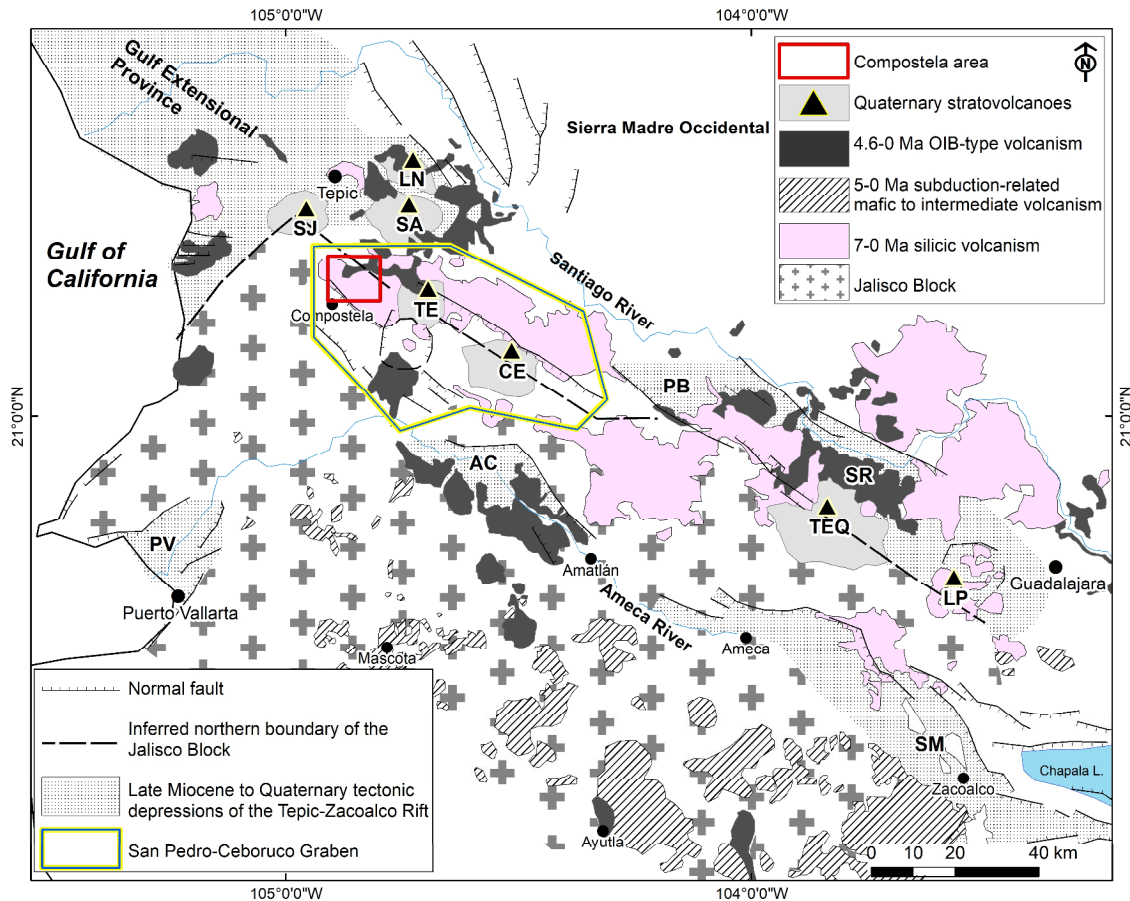
**Figure 1.** Schematic tectonic map shows the location of the Compostela area (red square) south of Tepic in the western sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt (WTMVB, modified after Frey et al., 2014). TMVB, Trans-Mexican Volcanic Belt; T, Tepic city; V, Veracruz city

The WTMVB has been extensively studied (i.e., Crummy et al., 2014; Luhr, 2000; Luhr & Carmichael, 1980; Nelson, 1980; Verma et al., 2016), nevertheless, there is remaining detailed geochemical studies in some areas from the WTMVB. This is the case of the Compostela area (study area  $\sim 123 \text{ km}^2$ ) that is located south of the city of Tepic (**Figure 1**) and is mainly characterized by different volcanic lithologies. In addition, geologically, the study of the Compostela area is also important due to a complex tectonic setting between active subduction and continental extension, resulting in the emplacement of a wide variety of volcanic rock types

(i.e., basalt, andesite, dacite, trachyte, and rhyolite). Therefore, in this study we report new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages along with whole-rock geochemistry and Rb–Sr and Sm–Nd isotopes data from the intermediate volcanic rocks. Furthermore, this study contributes to a better understanding of the role of magma evolution and its relationships to tectonic features and volcanic activity in the WTMVB and TZR.

## 2. Tectonic and geological framework

The western sector of the TMVB consists of a continental magmatic arc (Gómez-Tuena et al., 2007) related to the subduction of the young Rivera Plate (~10 Ma) that is dipping at ~50° (Pardo & Suárez, 1993) beneath the North American Plate. In this sector the extensional tectonic regime of the TZR forms a ~50 km wide, NW-trending corridor, extending ~250 km from south of Guadalajara to the Pacific coast near the city of Tepic (Frey et al., 2007) (**Figure 2**). The TZR is defined by extensional deformation that produced several discontinuous grabens of different ages; during late Miocene (12–9 Ma), continuing through the early Pliocene (5.5–3.5 Ma), and decreasing in the Quaternary (Ferrari & Rosas-Elguera, 2000). The San Pedro-Ceboruco (SPC) graben is part of the TZR (**Figure 2**) where four volcanic systems are recognized: (1) the polygenetic stratovolcanoes Tepetitlic and Ceboruco; (2) the San Pedro-Cerro Grande Volcanic Complex (SCVC); (3) the Northern Volcanic Chain (NVC) and (4) the Southern Volcanic Chain (SVC) (Ferrari et al., 2003; Petrone, 2010).

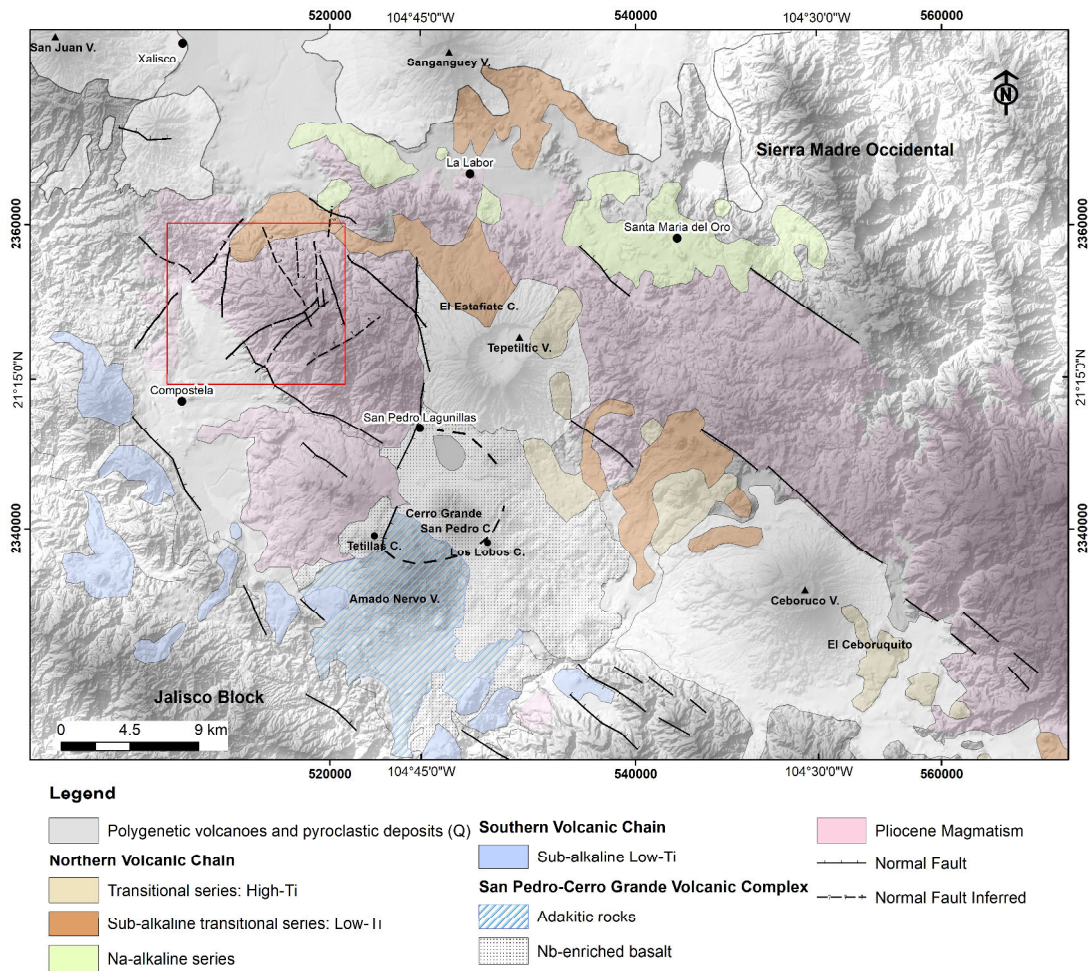


**Figure 2.** Regional geology of the western sector of Trans Mexican Volcanic Belt and tectonic depressions of the Tepic-Zacoalco Rift (TZR). The Compostela area lies inside the San Pedro-Ceboruco (SPC) Graben (dashed line). The main volcanic centers are: SJ, San Juan volcano; LN, Las Navajas volcano; SA, Sanganguey volcano; TE, Tepetitlic volcano; CE, Ceboruco volcano; TEQ, Tequila volcano; LP, La Primavera caldera. The main tectonic structures are PV, Puerto Vallarta Graben; SPC, San Pedro-Ceboruco Graben; AC, Amatlán de Cañas; PB, Plan de Barrancas Graben; SR, Santa Rosa Graben; SM, San Marcos

These volcanic systems can be correlated with the following units from the Compostela area (**Figure 3**). The effusive and explosive volcanic periods from Tepetitlic volcano and the caldera collapse in the SCVC; the volcanic activity of the Tepetitlic volcano around 0.5 Ma was followed by a Plinian event, in a narrow time interval ca. 560–450 Ka (Frey et al., 2014). The magmatic series identified in the NVC and SVC systems can be correlated to the basaltic andesite and andesite rocks in the Compostela area. The NVC system consist of a Na-alkaline series, transitional High-Ti series, and sub-alkaline transitional Low-Ti series (Petrone, et al.,



2003) and is represented by the alignment of monogenetic volcanic centers, which are mainly scoria cones associate with lava flows, and secondarily by domes. Some of these volcanic centers are linked with the volcanic activity of the flanks Ceboruco and Tepetitlic volcanoes (Petrone, 2010). The age of the magmatic series in the NVC system is constrained by numerous ages from 0.51 Ma to present (Ferrari et al., 2003), with the most evident monogenetic magmatism being quite young 11–4 ka (Petrone, 2010). The SVC system consists of aligned sub-alkaline Low-Ti series scoria cones, lava flows and domes (Petrone, 2010). This activity started at 2.52 Ma (Petrone, 2010) and possibly continued until 0.43 Ma (Ferrari et al., 2003). NNW-SSE trend following the northeast and southeast borders of the SPC Graben, respectively.



**Figure 3.** Principal volcanic systems recognized in the San Pedro-Ceboruco Graben. Compostela area is in the red square. V, volcano

### 3. Volcanic lithologies

The local lithologies in the Compostela area includes rhyolites, andesite, and basaltic andesite, (Figure 4, and 5).

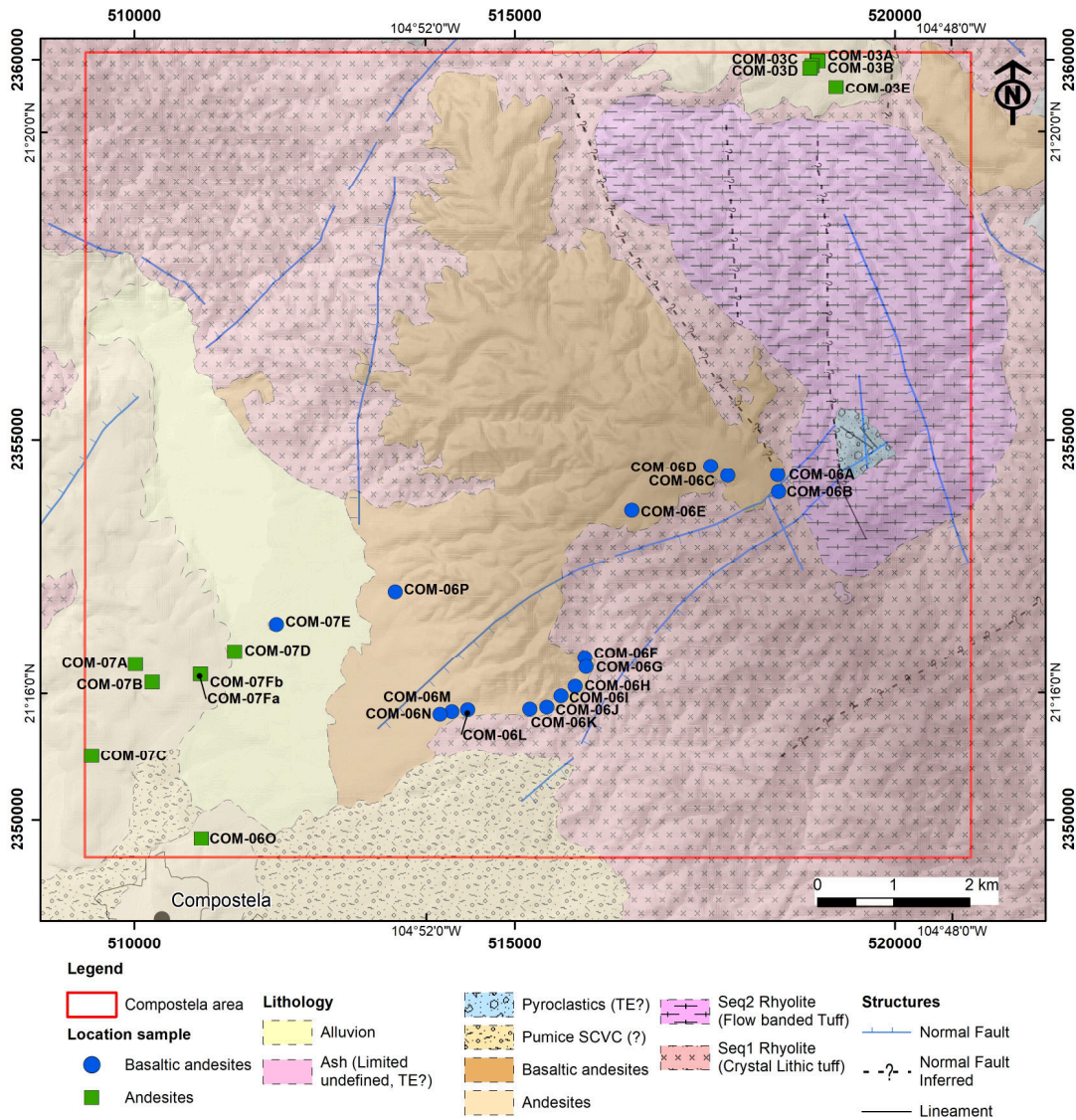


Figure 4. Local Geology of the Compostela area, showing sample location. SCVC, San Pedro-Cerro Grande Volcanic Complex; TE, Tepetitlic volcano.

### **3.1 Rhyolite**

Based on the field observations, rhyolite was divided into two sequences: crystal lithic tuff (CxLT) and flow banded tuff (FbT). The CxLT has a porphyritic texture with a grey and green color matrix with lithoclasts ~5 mm and phenocrysts of plagioclase, potassic feldspar and quartz within a very fine ash matrix. The FbT has foliated flow texture, some spherulites, and grey aphanitic matrix. In some outcrops, the flow-banded tuff has oxidized bands of ~1 mm to 5 cm.

### **3.2 Andesite**

In the northeast and southwest part of the study area, the sequence of crystal lithic tuff of rhyolites is overlain by andesite lavas. In both the northeast and the southwest the contact between the two units is poorly exposed. At the northeast and southwest, the andesite lavas are found in topographic lows and have an estimated thickness of ~140 to 60 m, respectively. The location of the volcanic feeders for both andesite lavas is not exposed. Both andesite lavas have a porphyritic texture with phenocrysts of plagioclase (3-5 mm), scarce pyroxene (1-2 mm), with some vesicles within an aphanitic matrix.

### **3.3 Basaltic andesite (later classified as basaltic trachyandesite)**

In the center of the study area, basaltic andesite lava flows cut and cover extensive sequences of crystal lithic tuff. The basaltic andesite lava erupted via a feeder dyke which apparently follows a NW-SE oriented normal fault. In this area the lava flow has a thickness at around ~7 m. The southwest basaltic andesites form a plateau and follow the topography of the sequences of crystal lithic tuff. About ~7 km to the northwest of this principal basaltic andesite lava flows another lava flow is found with thickness of roughly ~10 m. For this basaltic andesite

lava flow the source in the field has not been identified. The basaltic andesites are aphanitic, dark green and in some parts display vesicles.

Local Geology	Units	Description
	Alluvion	Recent soils
	Ash	Ash. Aphanitic texture, red matrix, very fine sand, ash to 1-2cm and tuff non welded, very coarse sand, poorly sorted, with lithic fragments. Intercalation of fine ash and tuff.
	Lt	Angular, polymictic lithic clasts, with pumice, pale cream, unconsolidated, distinct planar stratification. Lithic tuff.
	Ft	Sand size particles granular texture, pale cream, unconsolidated, distinct planar stratification. Fine tuff.
	PLt	Angular, polymictic lithic clasts, pale cream, unconsolidated, very poorly sorted, Debris flow (?). Polymictic lithic tuff.
	Pumice SCVC(?)	Massive, very poorly sorted, with poly lithic fragments.
	Basaltic andesite	Aphanitic texture, grey color with some vesicles.
	Andesite	Porphyritic texture, dark, hypocrySTALLINE, crystals of plagioclase and pyroxene.
	Sequence 2 FbT	Flow banded Tuff, pale cream to pink, spherulites and nodular devitrification texture.
	Sequence 1 CxLT	Crystal Lithic Tuff, grey, massive, non welded, coarse grained and porphyritic texture with quartz eyes and kaolinized feldspar clasts.

**Figure 5.** Schematic stratigraphic column of the volcanic rocks from the Compostela area. CxLt, Crystal lithic tuff; FbT, Flow banded tuff; PLt, Polymictic lithic tuff; Ft, Fine tuff; Lt, Lithic tuff; SCVC, San Pedro-Cerro Grande Volcanic Complex

## 4. Materials and methods

### 4.1 Sampling

Twenty-eight samples (**Figure 4**) including sixteen basaltic andesites and twelve andesites from the Compostela area were collected. Two basaltic andesite and three andesite samples were selected for thin section examination. The powders of these samples were analyzed using X-ray diffraction for mineral identification. Geochemical and whole rock analysis were completed for all twenty-eight samples by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) for trace elements and press pellets for X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) for whole rock. Sr–Nd isotope analysis was completed on one andesite and three basaltic andesite samples.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$

radiometric age dates were obtained for the same andesite used for Sr–Nd isotope analysis and two basaltic andesite samples. The selection of the samples for Sr–Nd isotope analysis  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  geochronology was in the basis of their stratigraphic position. The samples COM-06C and COM-06E were collected from the feeder dike from the basaltic andesite flows and COM-06J as well as COM-06P were collected within the topographic lows where basaltic andesite was deposited. The basaltic andesite COM-07Fa was collected in the topographic low, which hosts this massive body.

#### **4.2 Mineral analysis by X-Ray Diffraction (XRD)**

XRD was used to identify mineral species for the selected samples for petrography including two basaltic andesites (COM-06C and COM-06J) and three andesites (COM-03E, COM-07C and COM-07Fa). The powdered samples were analyzed by XRD at the Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICYT, San Luis Potosi, Mexico using a SmartLab Rigaku, equipped with a copper tube, a scintillation detector of NaI and silicon strip detector D/teX Ultra high velocity. The diffractometer was operated at 40kV and 44mA and the data was collected between 5 and 90 (2theta scale). The diffraction patterns were searched and/or matched with the PDXL-2 software.

#### **4.3 Whole-rock major and trace element analysis**

The pressed pellets were analyzed for major elements oxides by XRF using a Rigaku ZXS Primus II model (rhodium X-ray tube; 4kW) in the Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICYT, San Luis Potosi, Mexico. The sample preparation, analytical procedure, accuracy, and precision followed the detailed methods of [Verma et al., \(2018\)](#), [Verma et al., \(2021\)](#) and [Torres-Sánchez et al., \(2019\)](#). The precision and accuracy were considered <3% for

major elements and CIPW norm calculations were obtained from the IgRocs (Verma & Rivera-Gómez, 2013). Trace and rare earth elements were analyzed by Thermo Scientific quadrupole ICP-MS in the University of Leicester, UK using three standards (BCR-1, AGV-1, JG-3) for calibrate the analytical data quality.

#### 4.4 Rb–Sr and Sm–Nd isotope systematics

Four samples (COM-06C, COM-06E, COM-06P, and COM-7Fa) were selected for the Rb–Sr and Sm–Nd isotopic analyses. These samples were the same samples selected for the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. The isotopic analysis was performed at the Centro de Geocronología y Geoquímica Isotópica from the Universidad Complutense de Madrid, Spain. These analyses were performed in whole-rock powders using  $^{87}\text{Rb}$ – $^{84}\text{Sr}$  and  $^{150}\text{Nd}$ – $^{149}\text{Sm}$  tracer by Isotope Dilution-Thermal Ionization Mass Spectrometry (ID-TIMS). Samples were weighted in Teflon® vessels, with enriched spike solution ( $^{84}\text{Sr}$ – $^{87}\text{Rb}$  and  $^{149}\text{Sm}$ – $^{150}\text{Nd}$  - Oak Ridge) and dissolved in 5 ml of ultrapure HF and 3 ml of ultrapure  $\text{HNO}_3$  (Merck-Suprapur™). The PFA-vessels were placed into an oven for 65 hours at 120°C temperature. After that time, cold vials were evaporated on a heat plate at 120°C. Once samples were completely dried, 1 ml of  $\text{HNO}_3$  (Merck-Suprapur™) were added and place back over the heat plate for evaporation at 120°C. Then, 4 ml of 6N distilled HCl 6N were added to the dried samples and placed in an oven overnight at 120°C. Samples were evaporated and remains were dissolved in 3 ml of distilled and titrated 2.5 N HCl. After that, samples were centrifuged at 4000 r.p.m. for 10 minutes, in order to separate the dissolved fraction from the residue if any.

Chromatographic separation of the Rb and Sr was performed using cation exchange resin DOWEX 50W-X12 200-400 mesh (previously calibrated). Resulting fractions were collected in clean vials and placed over a hot plate to dry out at about 80°C. On the other hand, chromatographic separation of the total group of REE was performed using cation exchange resin DOWEX 50W-X8 200-400 mesh (previously calibrated).

REE fractions recovered from the previous chromatographic stage were dried completely before dissolve again in 200 µL HCl 0.18N. These solutions were passed through a new chromatographic step (Ln-Resin). The result is a complete separation between the Nd (using 0.3N HCl as eluent) and the Sm (using 0.4N HCl as eluent) fractions of the samples, being ready for the subsequent analysis in the mass spectrometer (TIMS).

Dried Rb samples were dissolved with 1 µl of 1M phosphoric acid and loaded on a simple filament of Ta. The Rb analyses were performed in an IsotopX-Phoenix (TIMS) following a static multi-collection method for 100 cycles, with a stable intensity of 1V in the mass  $^{87}\text{Rb}$ . Sr samples were dissolved in 1 µl of 1M phosphoric acid and loaded, together with 2 µl of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , onto a single filament of Re. Sr analyses were performed on an IsotopX-Phoenix (TIMS) following a dynamic multi-collection method for 160 cycles, with a stable beam intensity of 3V in the mass  $^{88}\text{Sr}$ . Possible  $^{87}\text{Rb}$  interferences were corrected in the Sr analysis and the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio was normalized in order to correct for mass fractionation, taking into account a reference value of  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ . NBS 987 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710248 \pm 0.000003$ ). NBS 1982. *National Bureau of Standards Certificate of Analysis. Standard Reference Material 987*) data have been used to correct the samples ratios, attending to the standard drift, and considering the standard certified value. Analytical error (2STD) has been checked for the ratios provided  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 1\%$ , and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.01\%$ . Sr procedural blanks were always below 0.5 ng.

#### 4.5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology

The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age was determined for three selected samples and dating were performed at The Open University, UK. The basaltic samples were crushed, washed, and groundmass basalt pieces (fragments) were separated. Groundmass fractions were leached in acetone and de-ionized water for one hour in an ultrasonic bath. Following the leaching the samples were wrapped in AL-foil and dried on a hotplate prior to irradiation.

The samples were irradiated at the McMaster Nuclear Reactor of McMaster University, Canada for 101 hours in the cadmium-shielded position 8D. After irradiation, samples and standards were loaded in an ultra-high vacuum system and a 1059nm CSI fibre laser was focussed into the sample chamber and was used to step-heat basalt at The Open University, UK following analytical procedures of [Torres-Sánchez et al., \(2020\)](#).

## 5. Results

### 5.1 Petrography and mineralogy

Two representative samples of basaltic trachyandesite (COM-06C and COM-06J) and three andesites (COM-03E, COM-07C and COM-07Fa) were selected for petrography and mineral identifications by XRD (**Table 1** and **Figure 6a–f**). The quantitative mineral identification and percentage were determined by the Reference Intensity Ratio (RIR) method ([Hubbard & Snyder, 1988](#)). Pyroxene compositions was able to plot using the Morimoto's diagram ([Morimoto, 1988](#)).



**Table 1.** Petrographic descriptions of intermediate volcanic rocks from the Compostela area. Mineral identification data obtained by X-ray diffraction (XRD)

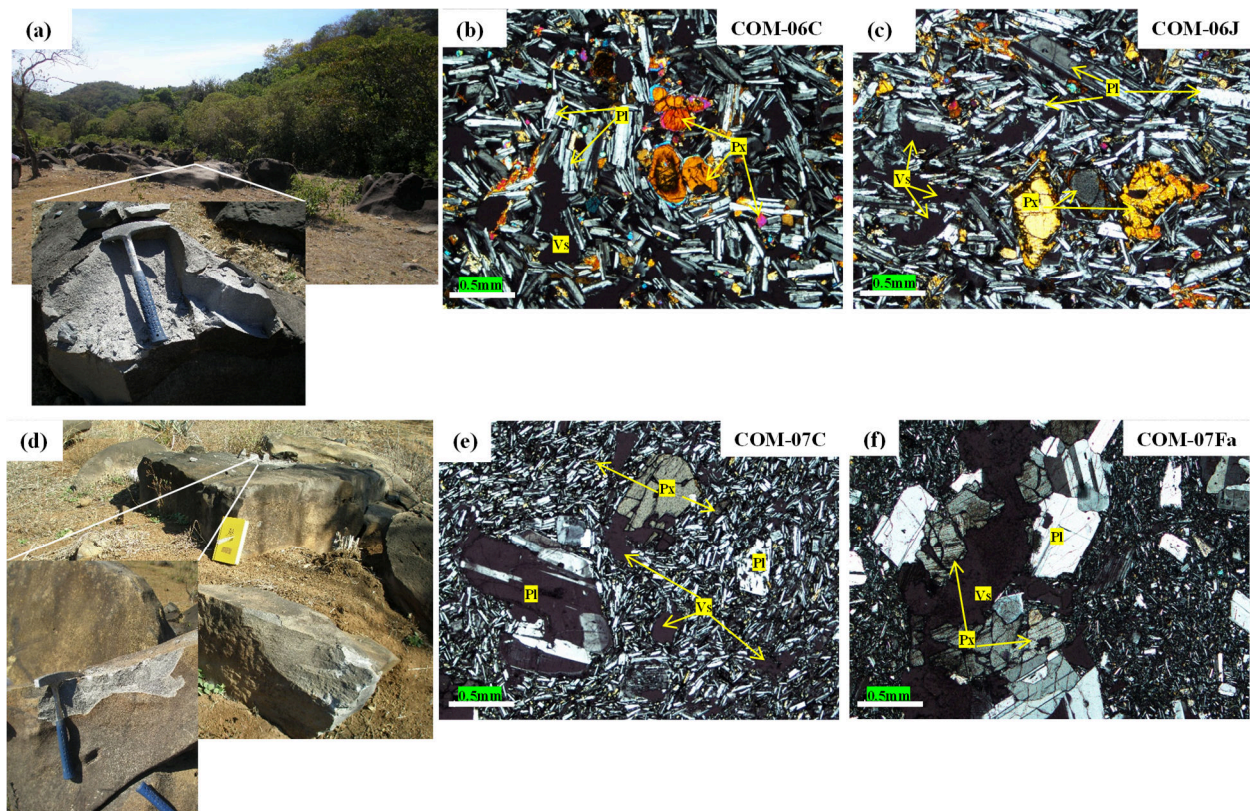
Sample	Long. (W)	Lat. (N)	Lava type	Descriptions	Minerals (%) (by XRD)
COM-06C	104° 49' 42.1"	21° 7' 32.8"	Basaltic trachyandesite	20% Ph (Pl+Px+Vs), 70% gms (Pl+Px) and 5% Opaque minerals	Labradorite (65), Anorthite (19), Ferrosilite (9)
COM-06J	104° 51' 04.8"	21° 15' 53.9"	Basaltic trachyandesite	25% Ph (Pl+Px+Vs), 70% gms (Pl+Px) and 5% Opaque minerals	Labradorite (44), Ferrosilite (31), Anorthite (23)
COM-03E	104° 48' 52.5"	21° 20' 19.2"	Andesite	15% Ph (Pl+Px), 82% gms (Pl+Px+glass), and less 3% Opaque minerals	Anorthite (54), Labradorite (21), Ferrosilite (25)
COM-07C	104° 54' 32.6"	21° 15' 33.2"	Andesite	15% Ph (Pl+Px+Vs), 82% gms (Pl+Px+glass) and 3% Opaque minerals	Labradorite (54), Ferrosilite (31), Anorthite (14)
COM-07Fa	104° 53' 42.9"	21° 16' 08.3"	Basaltic andesite	15% Ph (Pl+Px+Vs), 82% gms (Pl+Px +glass) and less 1% Opaque minerals	Labradorite (65), Anorthite (24), Enstatite (5)

*Note: XRD- X-ray powered diffraction; Ph-phenocrysts are defined as >0.3mm; gms-groundmass; Pl-Plagioclase; Px-Pyroxene; Vs-Vesicles.*

### 5.1.1 Basaltic trachyandesite

The basaltic trachyandesite samples show a porphyritic texture with 20% plagioclases and 5% clinopyroxenes phenocrysts and vesicles within a groundmass (70%) of plagioclase, clinopyroxene and 5% of opaque minerals (**Figure 6b–c**). Plagioclase phenocrysts are very fine to fine (0.4-1mm), euhedral to subhedral and display albite and Carlsbad twinning. The clinopyroxene phenocrysts are fine-grained ~0.4-0.6 mm, anhedral with some of them displaying zonation along the rims with high birefringence. The groundmass is very fine 0.2 mm, with hyalopilitic texture, with plagioclase and subhedral pyroxene microlites, and sparse accessory opaque minerals. Quantitative mineral composition identified by XRD in both samples were plagioclase (87-84%), and ferrosilite (16-13%). It was not possible to identify the opaque minerals due to the fine fractions were not quantitative using this method (**Table 1**). In the

Morimoto's diagram (Morimoto, 1988), most of the clinopyroxenes for sixteen basaltic trachyandesite samples are identified as (clino) ferrosilite (Figure S1a).



**Figure 6.** Field photographs and microphotographs (in cross-polarized light) of the volcanic rocks from the Compostela area. (a) Field photograph of the basaltic andesite (later the basaltic trachyandesites); (b) and (c) Basaltic andesite display porphyritic texture, with phenocrysts of plagioclase + pyroxene + vesicles within hyalopilitic groundmass. Some plagioclases display sieve texture and pyroxenes zonation along the rims. (d) Field photograph of the andesite; (e) and (f) Andesites displays porphyritic texture with phenocrysts of plagioclase + pyroxene + vesicles within hypocrySTALLINE groundmass. Few plagioclases show sieve texture and zonation around the rim. Pl, plagioclase; Px, pyroxene; Vs, vesicle

### 5.1.2 Andesite

The andesite samples (Table 1; Figure 6e–f) have a porphyritic texture with 10% phenocrysts of plagioclase and 5% clinopyroxene and vesicles with 82% groundmass of plagioclase and clinopyroxene microlites, glass, and 3% opaque minerals. The plagioclase phenocrysts are very fine 0.4 mm, euhedral to subhedral, and display albite and Carlsbad twinning. Some phenocrysts have disequilibrium sieve textures and zonation around the rim.

Clinopyroxene phenocrysts are very fine 0.2-0.6 mm and display rounded shapes. The groundmass is hypocrySTALLINE, consisting of plagioclase and clinopyroxene microlites with glass and opaque minerals. This groundmass texture is common in lava flows (Díaz-Bravo et al., 2014). XRD for three samples, the quantitative mineralogical assemblage (Table 1) is plagioclase (88-87%), and ferrosilite (13-12%), and orthopyroxene in sample (COM-07Fa) is identified as plagioclase (82%), and ferrosilite (18%), respectively. In the Morimoto's diagram (Morimoto, 1988), clinopyroxenes for eleven andesites samples are classified as (clino) ferrosilite, except one sample as enstatite (Figure S1b).

## 5.2 Whole-rock major oxides, trace and rare earth elements

A total of twenty-eight volcanic rock samples were analyzed for major and trace element compositions, (summarized in Table 2 and 3) All data was processed using IgRoCS software (Verma & Rivera-Gómez, 2013) for the magma classification and adjustment of Fe-oxidation on anhydrous basis. Thus, adjusted data have been used in this work.

In the total alkalis vs. silica diagram (TAS; Le Bas, et al., 1986; Figure 7); most of the samples have an intermediate composition. These intermediate volcanic rocks are grouped between the alkaline and subalkaline series fields and are defined as transitional series in the basaltic trachyandesites field. Andesites belong to the subalkaline series, which are divided with respect to the contents of SiO<sub>2</sub>: a single basaltic andesite sample (55.11 wt% SiO<sub>2</sub>), Low-Si andesites (58.22–60.94 wt% SiO<sub>2</sub>) and High-Si andesites (61.60–62.71 wt% SiO<sub>2</sub>). These andesites display an evolutionary trend from basaltic andesite to High-Si andesites.

**Table 2.** Major elements geochemistry and CIPW norms of intermediate volcanic rocks from the Compostela area.

Sample Rock (TAS)	COM-06A Basaltic trachyandesite	COM-06B Basaltic trachyandesite	COM-06C Basaltic trachyandesite	COM-06D Basaltic trachyandesite	COM-06E Basaltic trachyandesite	COM-06F Basaltic trachyandesite	COM-06G Basaltic trachyandesite
Long. (W)	104° 49' 19.4"	104° 49' 19.0"	104° 49' 42.1"	104° 49' 49.9"	104° 50' 25.9"	104° 50' 47.5"	104° 50' 46.9"
Lat. (N)	21° 17' 33.1"	21° 17' 26.0"	21° 17' 32.8"	21° 17' 37.0"	21° 17' 18.2"	21° 16' 15.3"	21° 16' 11.3"
SiO <sub>2</sub>	51.523	52.756	53.199	53.003	52.920	53.344	53.008
TiO <sub>2</sub>	1.555	1.319	1.346	1.384	1.502	0.892	1.327
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.621	24.915	23.431	23.031	20.369	26.304	24.445
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	7.188	5.208	5.786	6.183	7.673	3.601	5.184
MnO	0.138	0.121	0.128	0.134	0.150	0.094	0.116
MgO	1.783	1.096	1.455	1.710	2.486	0.688	1.218
CaO	8.194	7.716	7.477	7.720	7.702	7.779	7.666
Na <sub>2</sub> O	2.575	2.865	3.130	3.207	3.604	2.899	3.018
K <sub>2</sub> O	2.272	2.470	2.373	2.301	1.834	2.884	2.686
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.432	0.594	0.561	0.480	0.581	0.792	0.571
LOI	0.970	0.319	0.468	0.273	0.608	0.145	0.190
SiO <sub>2adj</sub>	52.728	53.471	54.039	53.711	53.871	53.881	53.628
TiO <sub>2adj</sub>	1.592	1.337	1.367	1.403	1.529	0.901	1.343
Al <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	23.150	25.253	23.801	23.339	20.735	26.569	24.731
Fe <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	1.564	1.264	1.408	1.501	1.871	0.871	1.256
FeO <sub>adj</sub>	5.212	3.612	4.022	4.288	5.345	2.489	3.589
MnO <sub>adj</sub>	0.141	0.122	0.130	0.135	0.152	0.095	0.117
MgO <sub>adj</sub>	1.825	1.110	1.478	1.733	2.531	0.695	1.233
CaO <sub>adj</sub>	8.386	7.821	7.595	7.823	7.840	7.857	7.756
Na <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	2.635	2.904	3.180	3.250	3.669	2.929	3.053
K <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	2.325	2.504	2.411	2.332	1.867	2.913	2.717
P <sub>2</sub> O <sub>5adj</sub>	0.442	0.602	0.569	0.486	0.591	0.800	0.577
Sum <sub>adj</sub>	100	100	100	100	100	100	100
Q	6.366	8.639	7.529	5.826	3.831	8.927	7.025
Or	13.743	14.797	14.248	13.782	11.030	17.212	16.057
Ab	22.295	24.571	26.904	27.500	31.047	24.780	25.835
An	38.715	34.868	33.962	35.635	34.593	33.756	34.705
C	2.109	4.987	3.514	2.408	0.000	6.227	4.048
HyM	4.545	2.766	3.682	4.316	6.213	1.731	3.070
HyF	5.911	3.606	4.205	4.567	5.938	2.539	3.551
Hy	10.456	6.372	7.887	8.883	12.150	4.271	6.621
Ol	0	0	0	0	0	0	0
Mt	2.267	1.833	2.041	2.176	2.712	1.263	1.821
Il	3.023	2.539	2.597	2.664	2.904	1.711	2.550
Ap	1.024	1.395	1.319	1.126	1.370	1.853	1.337
Mg#	38.427	35.402	39.585	41.874	45.775	33.233	37.978
FeO <sup>t</sup> /MgO	3.628	4.277	3.578	3.254	2.777	4.709	3.828

Sample Rock (TAS)	COM-06H Basaltic trachyandesite	COM-06I Basaltic trachyandesite	COM-06J Basaltic trachyandesite	COM-06K Basaltic trachyandesite	COM-06L Basaltic trachyandesite	COM-06M Basaltic trachyandesite	COM-06N Basaltic trachyandesite
Long. (W)	104° 50' 52.0"	104° 50' 58.3"	104° 51' 04.8"	104° 51' 12.7"	104° 51' 40.9"	104° 51' 48.2"	104° 51' 53.6"
Lat. (N)	21° 16' 02.9"	21° 15' 58.8"	21° 15' 53.9"	21° 15' 53.1"	21° 15' 52.9"	21° 15' 52.1"	21° 15' 50.9"
SiO <sub>2</sub>	53.396	52.839	52.723	53.112	53.323	52.817	53.593
TiO <sub>2</sub>	1.030	1.053	1.233	1.228	1.062	1.231	1.067
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.166	24.983	24.770	23.717	25.608	25.522	25.023
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	3.708	4.612	4.928	5.392	3.961	4.531	4.583
MnO	0.103	0.115	0.114	0.113	0.096	0.110	0.106
MgO	0.828	1.141	1.225	1.514	0.746	1.098	1.224
CaO	7.869	7.868	7.747	7.790	7.698	7.970	7.592
Na <sub>2</sub> O	3.069	3.269	3.293	3.606	2.881	3.171	3.353
K <sub>2</sub> O	2.698	2.554	2.433	2.373	2.776	2.505	2.530
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.721	0.738	0.684	0.692	0.778	0.684	0.726
LOI	-0.059	0.235	0.254	-0.029	0.376	-0.098	-0.215
SiO <sub>2</sub> adj	53.769	53.470	53.377	53.580	54.065	53.192	53.890
TiO <sub>2</sub> adj	1.037	1.065	1.248	1.239	1.077	1.239	1.073
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> adj	26.349	25.281	25.077	23.926	25.965	25.703	25.162
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> adj	0.894	1.118	1.195	1.303	0.962	1.093	1.104
FeO <sub>adj</sub>	2.555	3.194	3.414	3.723	2.749	3.123	3.154
MnO <sub>adj</sub>	0.103	0.117	0.116	0.114	0.097	0.111	0.106
MgO <sub>adj</sub>	0.834	1.155	1.240	1.528	0.756	1.106	1.231
CaO <sub>adj</sub>	7.924	7.961	7.843	7.859	7.805	8.027	7.635
Na <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	3.090	3.308	3.334	3.637	2.921	3.194	3.372
K <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	2.717	2.584	2.463	2.394	2.814	2.523	2.544
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> adj	0.726	0.747	0.692	0.698	0.789	0.689	0.730
Sum <sub>adj</sub>	100	100	100	100	100	100	100
Q	8.115	6.117	6.293	4.323	9.468	6.694	6.903
Or	16.055	15.273	14.554	14.148	16.632	14.911	15.033
Ab	26.148	27.990	28.212	30.777	24.718	27.022	28.532
An	34.568	34.616	34.386	34.431	33.568	35.319	33.105
C	5.656	4.355	4.324	2.732	5.810	4.774	4.728
HyM	2.077	2.876	3.089	3.805	1.883	2.754	3.065
HyF	2.431	3.397	3.435	3.925	2.653	2.990	3.303
Hy	4.509	6.273	6.524	7.730	4.537	5.743	6.368
Ol	0	0	0	0	0	0	0
Mt	1.297	1.620	1.732	1.889	1.395	1.584	1.600
Il	1.970	2.023	2.371	2.353	2.045	2.354	2.038
Ap	1.682	1.731	1.604	1.617	1.828	1.597	1.692
Mg#	36.784	39.194	39.305	42.248	32.905	38.694	41.023
FeO <sup>t</sup> /MgO	4.028	3.637	3.620	3.204	4.780	3.714	3.370

(Continued)

Sample Rock (TAS)	COM-06P Basaltic trachyandesite	COM-07E Basaltic trachyandesite	COM-03A Andesite	COM-03B Andesite	COM-03C Andesite	COM-03D Andesite	COM-03E Andesite
Long. (W)	104° 52' 14.0"	104° 53' 08.2"	104° 49' 01.3"	104° 49' 00.7"	104° 49' 03.5"	104° 49' 04.4"	104° 48' 52.5"
Lat. (N)	21° 16' 43.4"	21° 16' 29.5"	21° 20' 30.8"	21° 20' 30.5"	21° 20' 28.6"	21° 20' 27.5"	21° 20' 19.2"
SiO <sub>2</sub>	52.403	53.458	60.901	59.744	60.672	61.308	60.044
TiO <sub>2</sub>	1.247	1.174	0.781	0.677	0.746	0.775	0.728
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.617	24.012	20.441	22.883	21.391	20.472	21.757
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>†</sup>	4.053	5.176	4.447	3.176	3.990	4.039	3.363
MnO	0.119	0.112	0.089	0.042	0.080	0.060	0.078
MgO	0.735	1.415	0.784	0.347	0.692	0.702	0.597
CaO	8.118	7.865	4.163	2.803	4.254	4.430	4.870
Na <sub>2</sub> O	2.853	3.298	3.499	2.663	3.256	3.220	2.761
K <sub>2</sub> O	2.739	2.318	2.698	3.051	2.847	2.799	3.256
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.674	0.661	0.244	0.298	0.248	0.266	0.260
LOI	-0.038	0.010	1.203	2.849	1.035	1.154	1.333
SiO <sub>2adj</sub>	52.799	53.948	62.330	62.597	61.990	62.711	61.608
TiO <sub>2adj</sub>	1.257	1.184	0.799	0.709	0.762	0.792	0.747
Al <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	26.818	24.231	20.920	23.976	21.85	20.940	22.324
Fe <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	0.978	1.251	1.090	0.797	0.977	0.990	0.827
FeO <sub>adj</sub>	2.795	3.574	3.114	2.277	2.790	2.827	2.361
MnO <sub>adj</sub>	0.120	0.113	0.091	0.044	0.082	0.061	0.080
MgO <sub>adj</sub>	0.741	1.428	0.802	0.363	0.707	0.719	0.613
CaO <sub>adj</sub>	8.179	7.937	4.260	2.936	4.347	4.531	4.997
Na <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	2.875	3.328	3.581	2.790	3.327	3.293	2.833
K <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	2.760	2.339	2.762	3.197	2.909	2.863	3.341
P <sub>2</sub> O <sub>5adj</sub>	0.679	0.667	0.250	0.312	0.254	0.272	0.267
Sum <sub>adj</sub>	100	100	100	100	100	100	100
Q	7.673	6.660	19.640	27.072	20.392	21.136	20.303
Or	16.310	13.822	16.320	18.891	17.189	16.919	19.745
Ab	24.327	28.162	30.303	23.610	28.151	27.868	23.973
An	36.144	35.019	19.502	12.528	19.908	20.703	23.048
C	5.854	3.390	4.892	11.335	5.938	4.836	5.600
HyM	1.845	3.557	1.998	0.905	1.762	1.790	1.527
HyF	2.471	3.783	3.667	2.435	3.209	3.178	2.568
Hy	4.315	7.339	5.665	3.340	4.971	4.968	4.094
Ol	0	0	0	0	0	0	0
Mt	1.418	1.814	1.580	1.156	1.416	1.435	1.198
Il	2.386	2.249	1.518	1.346	1.447	1.505	1.419
Ap	1.573	1.545	0.580	0.723	0.588	0.630	0.619
Mg#	32.088	41.595	31.464	22.149	31.128	31.180	31.632
FeO <sup>†</sup> /MgO	4.961	3.291	5.106	8.239	5.186	5.174	5.066

(Continued)

Sample Rock (TAS)	COM-06O Andesite	COM-07A Andesite	COM-07B Andesite	COM-07C Andesite	COM-07D Andesite	COM-07Fb Andesite	COM-07Fa Basaltic andesite
Long. (W)	104° 53' 42.5"	104° 54' 12.5"	104° 54' 04.9"	104° 54' 32.6"	104° 53' 27.3"	104° 53' 42.9"	104° 53' 42.9"
Lat. (N)	21° 14' 57.8"	21° 16' 12.8"	21° 16' 04.9"	21° 15' 33.2"	21° 16' 18.0"	21° 16' 08.3"	21° 16' 08.3"
SiO <sub>2</sub>	60.108	57.395	56.830	58.223	58.666	57.099	54.329
TiO <sub>2</sub>	0.523	0.605	0.594	0.611	0.691	0.623	0.699
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.642	24.286	24.938	22.997	21.281	23.129	23.415
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	3.651	3.570	3.484	3.945	4.631	4.404	5.262
MnO	0.081	0.084	0.083	0.093	0.099	0.094	0.107
MgO	0.921	0.895	0.773	1.126	1.406	1.493	2.711
CaO	5.463	5.968	5.630	6.335	6.345	6.759	8.292
Na <sub>2</sub> O	3.380	2.879	2.590	2.846	3.109	2.831	2.782
K <sub>2</sub> O	1.927	2.157	2.071	2.015	1.946	1.757	1.230
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.205	0.218	0.222	0.210	0.211	0.207	0.168
LOI	0.458	1.067	1.663	0.846	0.920	0.889	0.413
SiO <sub>2adj</sub>	60.948	58.695	58.618	59.351	59.844	58.229	55.111
TiO <sub>2adj</sub>	0.531	0.619	0.613	0.623	0.705	0.635	0.709
Al <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	22.958	24.837	25.722	23.442	21.708	23.587	23.752
Fe <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	0.887	0.874	0.861	0.963	1.131	1.076	1.135
FeO <sub>adj</sub>	2.533	2.498	2.459	2.752	3.232	3.073	3.782
MnO <sub>adj</sub>	0.082	0.086	0.086	0.095	0.101	0.096	0.109
MgO <sub>adj</sub>	0.934	0.916	0.797	1.148	1.435	1.522	2.750
CaO <sub>adj</sub>	5.539	6.103	5.807	6.458	6.473	6.893	8.411
Na <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	3.427	2.944	2.671	2.901	3.172	2.887	2.822
K <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	1.953	2.206	2.137	2.054	1.985	1.791	1.248
P <sub>2</sub> O <sub>5adj</sub>	0.208	0.223	0.229	0.214	0.215	0.211	0.170
Sum <sub>adj</sub>	100	100	100	100	100	100	100
Q	19.408	17.948	20.574	18.122	16.564	16.368	9.982
Or	11.544	13.035	12.627	12.136	11.730	10.587	7.375
Ab	28.997	24.909	22.603	24.546	26.839	24.425	23.880
An	26.122	28.824	27.314	30.640	30.705	32.821	40.616
C	5.633	7.043	9.005	5.218	3.088	4.870	2.873
HyM	2.327	2.281	1.986	2.589	3.573	3.792	6.850
HyF	3.194	3.003	2.950	3.405	4.023	3.883	5.037
Hy	5.522	5.283	4.936	6.264	7.596	7.675	11.887
Ol	0	0	0	0	0	0	0
Mt	1.285	1.268	1.248	1.396	1.640	1.559	1.645
Il	1.008	1.175	1.164	1.183	1.339	1.207	1.347
Ap	0.482	0.516	0.530	0.495	0.499	0.488	0.395
Mg#	39.670	39.518	36.631	42.646	44.171	46.894	56.452
FeO <sup>t</sup> /MgO	3.565	3.588	4.055	3.153	2.963	2.655	1.746

**Table 3.** Trace and rare earth elements geochemistry of intermediate volcanic rocks from the Compostela area.

Sample Rock (TAS)	COM-06A Basaltic trachyandesite	COM-06B Basaltic trachyandesite	COM-06C Basaltic trachyandesite	COM-06D Basaltic trachyandesite	COM-06E Basaltic trachyandesite	COM-06F Basaltic trachyandesite	COM-06G Basaltic trachyandesite
Long. (W)	104° 49' 19.4"	104° 49' 19.0"	104° 49' 42.1"	104° 49' 49.9"	104° 50' 25.9"	104° 50' 47.5"	104° 50' 46.9"
Lat. (N)	21° 17' 33.1"	21° 17' 26.0"	21° 17' 32.8"	21° 17' 37.0"	21° 17' 18.2"	21° 16' 15.3"	21° 16' 11.3"
La	26.857	28.458	32.511	36.277	32.462	25.290	27.016
Ce	53.112	54.225	53.973	57.969	58.971	50.636	53.742
Pr	6.684	6.913	7.088	7.962	8.193	6.401	6.516
Nd	26.262	28.544	29.149	33.056	32.446	25.051	26.613
Sm	5.903	5.901	6.116	7.294	7.384	5.512	5.657
Eu	2.182	2.165	2.340	2.856	2.931	2.072	2.134
Gd	5.687	6.216	6.721	9.228	8.628	5.423	5.889
Tb	0.838	0.947	0.983	1.318	1.334	0.813	0.815
Dy	4.947	5.544	6.013	8.577	8.281	4.815	5.010
Ho	0.887	1.080	1.202	1.848	1.590	0.888	0.923
Er	2.628	3.045	3.509	5.380	4.780	2.671	2.649
Tm	0.380	0.480	0.524	0.740	0.690	0.364	0.374
Yb	2.273	2.625	3.026	4.240	3.788	2.302	2.296
Lu	0.384	0.443	0.504	0.743	0.625	0.367	0.381
Ba	566.560	637.687	625.569	583.206	614.969	530.512	593.868
Cr	59.380	69.851	72.279	86.837	67.727	56.913	67.136
Cs	0.191	0.241	0.226	0.247	0.131	0.108	0.224
Hf	5.475	5.646	5.679	5.729	5.830	5.366	5.648
Nb	25.114	26.978	26.207	26.412	27.662	24.403	27.579
Pb	5.082	5.175	4.970	4.845	5.044	5.035	5.215
Rb	18.537	21.622	20.245	21.857	13.720	19.136	22.096
Sc	20.973	21.107	22.112	20.799	20.497	19.606	19.374
Sr	820.411	729.462	715.449	683.466	687.090	767.988	711.423
Ta	1.509	1.636	1.628	1.624	1.748	1.520	1.697
Th	2.628	3.038	2.891	2.833	3.037	2.510	2.965
U	0.729	0.781	0.796	0.811	0.736	0.685	0.847
V	196.599	186.926	184.358	192.353	182.270	190.621	174.063
Y	24.288	30.214	41.717	62.366	46.755	23.835	25.536
Zr	210.760	221.343	222.925	216.907	220.290	201.815	217.419
W	0.429	0.258	0.322	0.519	0.741	0.463	0.356
La/Nb	1.069	1.054	1.240	1.373	1.173	1.036	0.979

(Continued)



Sample No. Rock (TAS)	COM-06H Basaltic trachyandesite	COM-06I Basaltic trachyandesite	COM-06J Basaltic trachyandesite	COM-06K Basaltic trachyandesite	COM-06L Basaltic trachyandesite	COM-06M Basaltic trachyandesite	COM-06N Basaltic trachyandesite
Long. (W)	104° 50' 52.0"	104° 50' 58.3"	104° 51' 04.8"	104° 51' 12.7"	104° 51' 40.9"	104° 51' 48.2"	104° 51' 53.6"
Lat. (N)	21° 16' 02.9"	21° 15' 58.8"	21° 15' 53.9"	21° 15' 53.1"	21° 15' 52.9"	21° 15' 52.1"	21° 15' 50.9"
La	24.813	26.515	27.652	26.265	26.465	25.126	24.981
Ce	51.871	50.976	50.702	54.077	51.997	52.325	51.383
Pr	6.393	6.495	6.705	6.726	6.836	6.459	6.495
Nd	25.664	25.903	25.752	27.680	27.550	26.811	26.396
Sm	5.471	5.702	5.740	5.690	5.824	5.725	5.495
Eu	2.057	2.110	2.103	2.179	2.071	2.060	2.135
Gd	5.745	5.615	5.733	5.796	5.959	5.546	5.597
Tb	0.821	0.879	0.851	0.857	0.908	0.836	0.844
Dy	4.612	4.907	4.990	4.885	4.930	4.906	4.813
Ho	0.921	0.964	0.936	0.949	0.997	0.946	0.905
Er	2.543	2.716	2.689	2.756	2.849	2.656	2.671
Tm	0.362	0.371	0.378	0.410	0.432	0.438	0.464
Yb	2.286	2.231	2.408	2.300	2.425	2.392	2.381
Lu	0.380	0.351	0.393	0.407	0.399	0.390	0.382
Ba	550.313	525.860	521.478	578.182	581.241	563.034	562.063
Cr	60.232	60.429	58.818	60.544	57.350	60.860	60.570
Cs	0.100	0.067	0.070	0.085	0.087	0.097	0.087
Hf	5.321	5.434	5.159	5.518	5.396	5.406	5.404
Nb	24.771	25.503	25.721	26.722	24.260	25.813	24.162
Pb	4.652	4.331	4.450	5.570	4.141	5.848	4.530
Rb	17.765	18.761	16.120	17.833	18.790	17.155	19.889
Sc	21.338	21.161	21.635	21.322	20.765	20.492	19.458
Sr	768.802	764.240	761.160	802.708	742.877	773.388	767.728
Ta	1.494	1.620	1.572	1.540	1.415	1.548	1.468
Th	2.574	2.505	2.585	2.791	2.632	2.765	2.689
U	0.705	0.705	0.703	0.723	0.692	0.729	0.708
V	192.199	197.341	198.029	195.253	179.101	190.565	191.267
Y	23.222	25.622	28.064	25.465	25.814	23.904	23.148
Zr	202.942	198.896	202.105	210.533	199.138	199.804	199.674
W	0.366	0.395	0.339	0.461	0.143	0.159	0.324
La/Nb	1.001	1.039	1.075	0.982	1.090	0.973	1.033

(Continued)

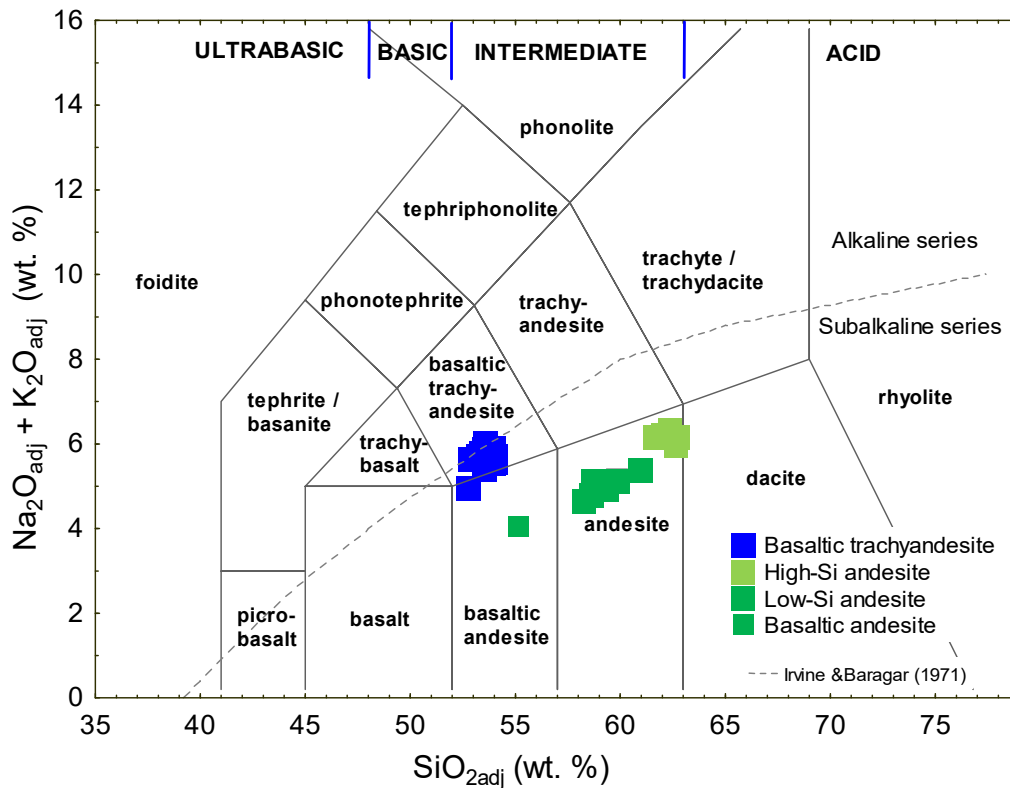
Sample No. Rock (TAS)	COM-06P Basaltic trachyandesite	COM-07E Basaltic trachyandesite	COM-03A Andesite	COM-03B Andesite	COM-03C Andesite	COM-03D Andesite	COM-03E Andesite
Long. (W)	104° 52' 14.0"	104° 53' 08.2"	104° 49' 01.3"	104° 49' 00.7"	104° 49' 03.5"	104° 49' 04.4"	104° 48' 52.5"
Lat. (N)	21° 16' 43.4"	21° 16' 29.5"	21° 20' 30.8"	21° 20' 30.5"	21° 20' 28.6"	21° 20' 27.5"	21° 20' 19.2"
La	27.601	24.230	52.776	91.143	129.010	59.580	23.724
Ce	55.313	48.881	77.538	220.724	72.229	87.619	46.809
Pr	6.901	6.184	21.188	48.820	34.852	21.625	5.887
Nd	28.010	26.011	92.061	266.146	161.076	109.595	24.625
Sm	5.922	5.272	23.673	77.591	33.852	30.727	5.105
Eu	2.220	1.963	6.612	22.764	8.827	10.030	1.730
Gd	6.101	5.670	28.339	97.385	50.123	41.770	5.004
Tb	0.886	0.848	4.340	15.670	7.557	6.165	0.733
Dy	5.159	4.597	27.174	108.508	47.216	38.553	4.315
Ho	1.010	0.941	5.544	23.647	11.458	7.989	0.844
Er	2.959	2.652	16.845	77.340	34.753	23.436	2.397
Tm	0.475	0.439	2.535	12.215	4.914	3.471	0.410
Yb	2.511	2.363	15.036	80.449	28.639	20.916	2.155
Lu	0.404	0.409	2.468	12.960	5.062	3.498	0.371
Ba	608.374	559.781	985.276	1305.788	1156.494	1057.490	1011.243
Cr	75.360	50.754	21.200	4.265	13.818	102.550	16.487
Cs	0.145	0.116	0.795	0.568	0.554	0.462	0.778
Hf	5.760	4.879	7.545	6.251	5.801	5.516	5.501
Nb	28.710	22.866	10.325	9.621	9.215	9.408	9.212
Pb	4.733	4.171	8.584	12.713	9.594	8.541	9.009
Rb	19.449	19.085	48.872	44.944	42.551	40.812	44.587
Sc	21.460	20.075	17.558	11.621	12.280	13.591	12.794
Sr	709.648	759.833	549.977	453.061	544.511	556.942	554.021
Ta	1.755	1.481	2.330	0.938	0.766	0.693	0.660
Th	3.176	2.582	3.366	3.532	3.562	3.566	3.511
U	0.739	0.606	0.859	0.881	0.869	0.900	0.887
V	187.344	175.393	124.802	91.119	104.852	104.653	100.322
Y	27.640	23.548	157.060	641.097	325.910	216.082	21.759
Zr	214.437	191.269	192.244	194.092	190.659	187.830	187.821
W	0.443	0.106	0.639	0.980	0.639	0.670	0.445
La/Nb	0.961	1.059	5.111	9.473	14	6.332	2.575

(Continued)

Sample No. Rock (TAS)	COM-06O Andesite	COM-07A Andesite	COM-07B Andesite	COM-07C Andesite	COM-07D Andesite	COM-07Fb Andesite	COM-07Fa Basaltic andesite
Long. (W)	104° 53' 42.5"	104° 54' 12.5"	104° 54' 04.9"	104° 54' 32.6"	104° 53' 27.3"	104° 53' 42.9"	104° 53' 42.9"
Lat. (N)	21° 14' 57.8"	21° 16' 12.8"	21° 16' 04.9"	21° 15' 33.2"	21° 16' 18.0"	21° 16' 08.3"	21° 16' 08.3"
La	25.992	50.021	83.478	57.356	38.614	30.663	15.563
Ce	39.994	60.106	65.294	41.714	45.321	30.833	24.063
Pr	6.870	18.012	32.718	12.898	8.952	6.533	3.762
Nd	27.773	81.654	143.208	52.527	38.293	27.421	15.295
Sm	5.291	21.672	31.966	10.648	8.749	5.940	3.611
Eu	2.026	6.297	9.112	3.124	2.975	2.030	1.440
Gd	5.362	21.179	33.755	11.994	11.193	7.477	3.856
Tb	0.720	3.191	5.033	1.749	1.552	1.045	0.552
Dy	4.305	17.841	29.829	10.643	9.607	6.544	3.667
Ho	0.822	3.396	6.053	2.181	1.949	1.380	0.677
Er	2.245	9.409	17.896	6.291	5.684	4.099	2.024
Tm	0.373	1.396	2.523	0.932	0.818	0.567	0.268
Yb	2.155	8.370	15.767	5.235	4.580	3.197	1.672
Lu	0.337	1.290	2.654	0.876	0.798	0.572	0.253
Ba	512.523	714.234	823.418	689.718	730.057	632.935	433.384
Cr	6.959	57.802	48.622	74.348	53.281	115.039	178.551
Cs	0.143	0.406	0.467	0.421	0.415	0.311	0.302
Hf	4.149	4.082	3.831	3.385	3.712	3.234	2.787
Nb	3.707	6.218	5.890	5.200	5.722	4.843	4.114
Pb	5.403	6.513	6.283	5.802	6.030	4.862	4.023
Rb	12.675	31.562	24.267	27.429	27.859	22.726	14.539
Sc	10.484	14.609	14.704	13.748	14.213	15.273	19.187
Sr	1131.086	676.059	631.733	675.369	668.822	674.660	750.743
Ta	0.692	0.610	0.477	0.413	0.437	0.367	0.481
Th	2.138	2.474	2.441	2.188	2.326	1.877	1.132
U	0.585	0.609	0.592	0.577	0.583	0.493	0.333
V	123.875	124.456	108.144	108.521	111.807	113.494	152.109
Y	26.957	76.034	144.243	56.733	57.640	56.425	26.273
Zr	125.995	127.622	131.688	127.041	124.034	120.055	100.222
W	0.348	0.820	0.322	0.295	0.478	0.241	0.167
La/Nb	7.011	8.044	14.172	11.03	6.748	6.331	3.782

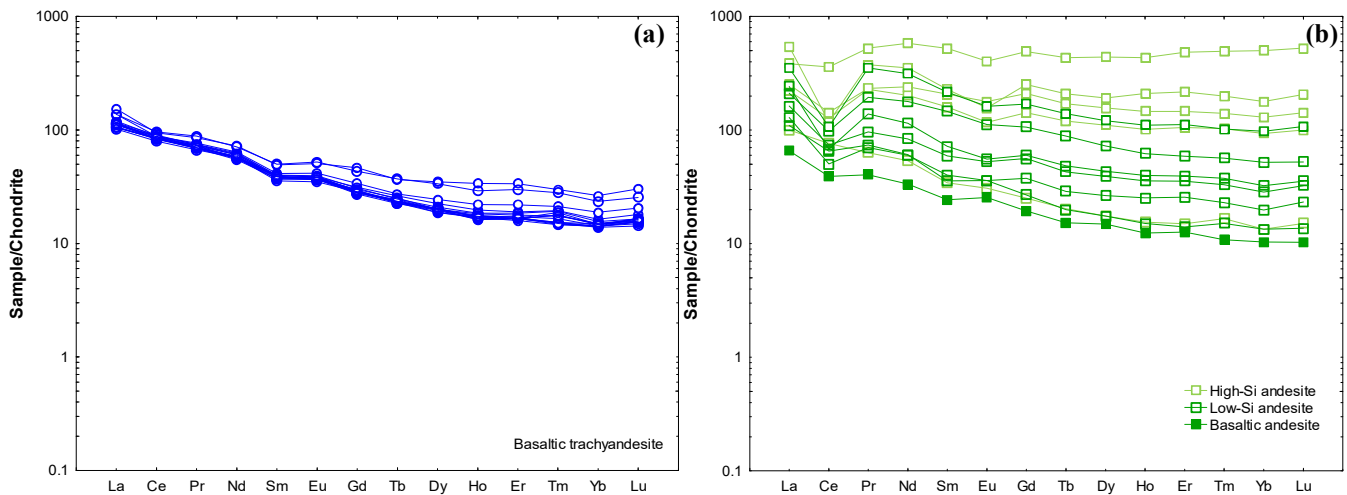
On the  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  diagram (**Figure S2**; Rickwood, 1989), basaltic trachyandesites are plotted in the field of high-K. The basaltic andesite sample plot in the medium-K, the Low-Si andesites plot along the boundary between medium-K and High-Si andesites plot in the high-K field. Andesites samples display the same evolutionary trend as in TAS diagram.

On a  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{TiO}_2$  diagram (**Figure S3**), basaltic trachyandesites display a vertical trend and the andesites display a slightly horizontal trend from the basaltic andesite, through the Low-Si andesites to High-Si andesites. For all samples, the  $\text{TiO}_2$  values are low with respect to the mafic rocks in the NVC and SVC with much higher  $\text{TiO}_2$  values of (1.6 wt%) reported by Petrone et al., (2003).

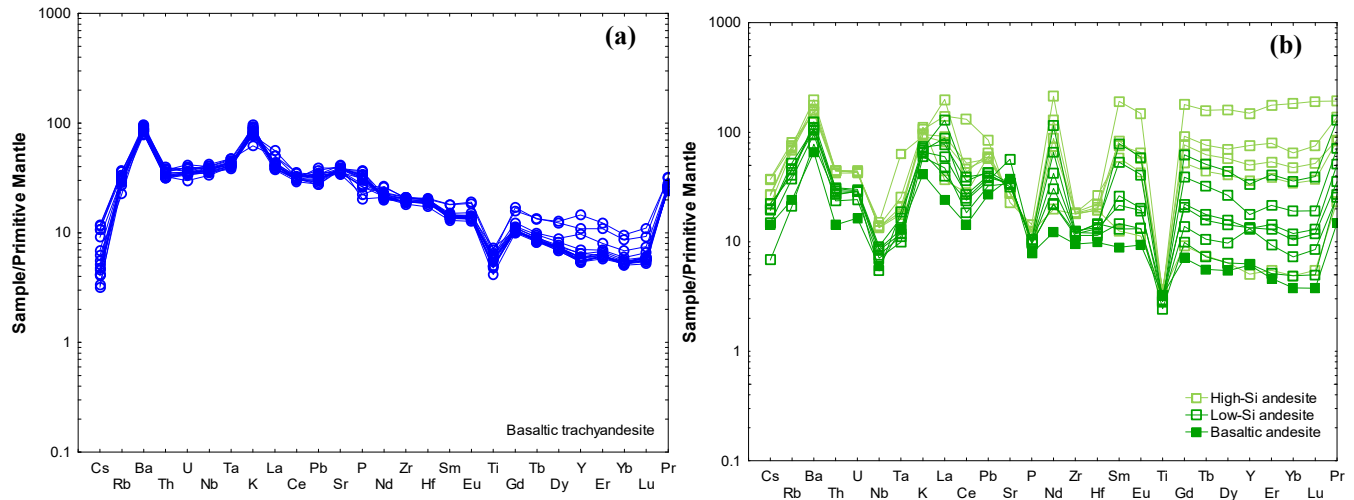


**Figure 7.** Total Alkali-Silica (TAS; Le Bas et al., 1986) classification diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area

On a chondrite-normalized diagram (McDonough & Sun, 1995; **Figure 8a**, **Table 3**), the basaltic trachyandesites are characterized by enriched LREE patterns relative to HREE [(La/Yb)<sub>N</sub> = 5.81–8.07], with weak to negligible Eu anomalies (Eu/Eu\* = 1.06–1.16). The basaltic andesites display slightly enriched LREE patterns to HREE [(La/Yb)<sub>N</sub> = 6.32] with a positive Eu anomaly (Eu/Eu\* = 1.16). The High and Low-Si andesites display fractionated REE patterns, [(La/Yb)<sub>N</sub> = 3.59–8.19] with slightly positive Eu anomalies (Eu/Eu\* = 0.83–1.14, **Figure 8b**). In a primitive mantle-normalized multi-element diagram (McDonough & Sun, 1995; **Figure 9a**), the basaltic trachyandesites show pronounced enrichment in LILE, but negligible depletion in Nb (Nb/Nb\* = 0.52–0.62) and negative Ti (Ti/Ti\* = 0.39–0.74), anomalies, typical for OIB-like basalts. The basaltic andesites and Low-Si and High-Si andesites show enrichment in large-ion lithophile elements (LILE), along with negative Nb-Ta, P and Ti anomalies, typical for arc-related magmas (**Figure 9b**).



**Figure 8 (a, b).** Chondrite-normalized rare earth elements (REE) plot for the intermediate volcanic rocks from Compostela area. Chondrite values for normalization were taken from McDonough & Sun (1995)



**Figure 9 (a, b).** Primitive-mantle normalized multielement diagram for the intermediate volcanic rocks from Compostela area. Values were taken from [McDonough & Sun \(1995\)](#)

### 5.3 Sr–Nd isotopic data

Three basaltic trachyandesite and one basaltic andesite samples were further analyzed for whole-rock Sr–Nd isotope compositions. The basaltic trachyandesite display initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of 0.703519–0.703882 and positive  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of +5.5 to +5.6 (**Table 4**). The basaltic andesite exhibit comparatively little high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of 0.704073 and positive  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of +3.4 (**Table 4**). Initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values were calculated to  $t = 1.05$  Ma for the basaltic trachyandesites and  $t = 2.42$  Ma for the basaltic andesites, respectively (**Table 4**).

**Table 4.** Sr and Nd isotopic compositions of the intermediate volcanic rocks from the Compostela area.

Sample	Rock type	Age (Ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$	$\epsilon\text{Nd}_t$
COM-06C	BTA	1.05	19.72	2608.14	0.0219	0.703883	2	0.703882	5.01	24.41	0.1242	0.512919	5	0.512918	<b>5.6</b>
COM-06E	BTA	1.05	12.19	2462.51	0.0143	0.703520	3	0.703519	6.16	28.66	0.1299	0.512913	2	0.512912	<b>5.5</b>
COM-06P	BTA	1.05	15.77	2403.39	0.0190	0.703618	3	0.703617	4.83	22.87	0.1278	0.512917	1	0.512916	<b>5.6</b>
COM-7Fa	A	2.42	12.63	2686.78	0.0000	0.704074	3	0.704073	2.33	12.66	0.1111	0.512807	2	0.512805	<b>3.4</b>

**Notes:** Reports values for  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$  are age corrected with their respectively age sample. For calculations  $\epsilon\text{Nd}_t$  CHUR we use the values taken from Faure (1977) for  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51263$  and  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1960$ . The  $\pm 2\sigma$  errors for individual instruments are multiplied by  $10^6$  for Sr and Nd. BTA–Basaltic trachyandesites, A–Andesite.

**Table 5.** Results of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the basaltic trachyandesite and andesite rocks in the Compostela area.

Sample	Material dated*	$^{39}\text{Ar}$ (%)	Isochrone (Ma)	Isochrone MSWD	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_t$	Plateau age (Ma)	Plateau MSWD	Steps used
<b>Basalt trachyandesite</b> COM-06C	gms	71.8	$1.35 \pm 0.32$	0.84	$285.8 \pm 8.1$	$1.05 \pm 0.15$	0.43	7-13
COM-06J	gms	100	$1.25 \pm 0.47$	1.19	$289 \pm 20$	$1.07 \pm 0.17$	1.16	13
<b>Andesite</b> COM-7Fa	gms	100	$2.53 \pm 0.85$	1.08	$297.0 \pm 9.3$	$2.42 \pm 0.36$	1.00	13

**Notes:** All errors reported as  $2\sigma$ . Material dated\*: gms-groundmass. MSDW-mean square of weighted deviates. Monitor was biotite mineral standard GA1550 (99.73Ma).

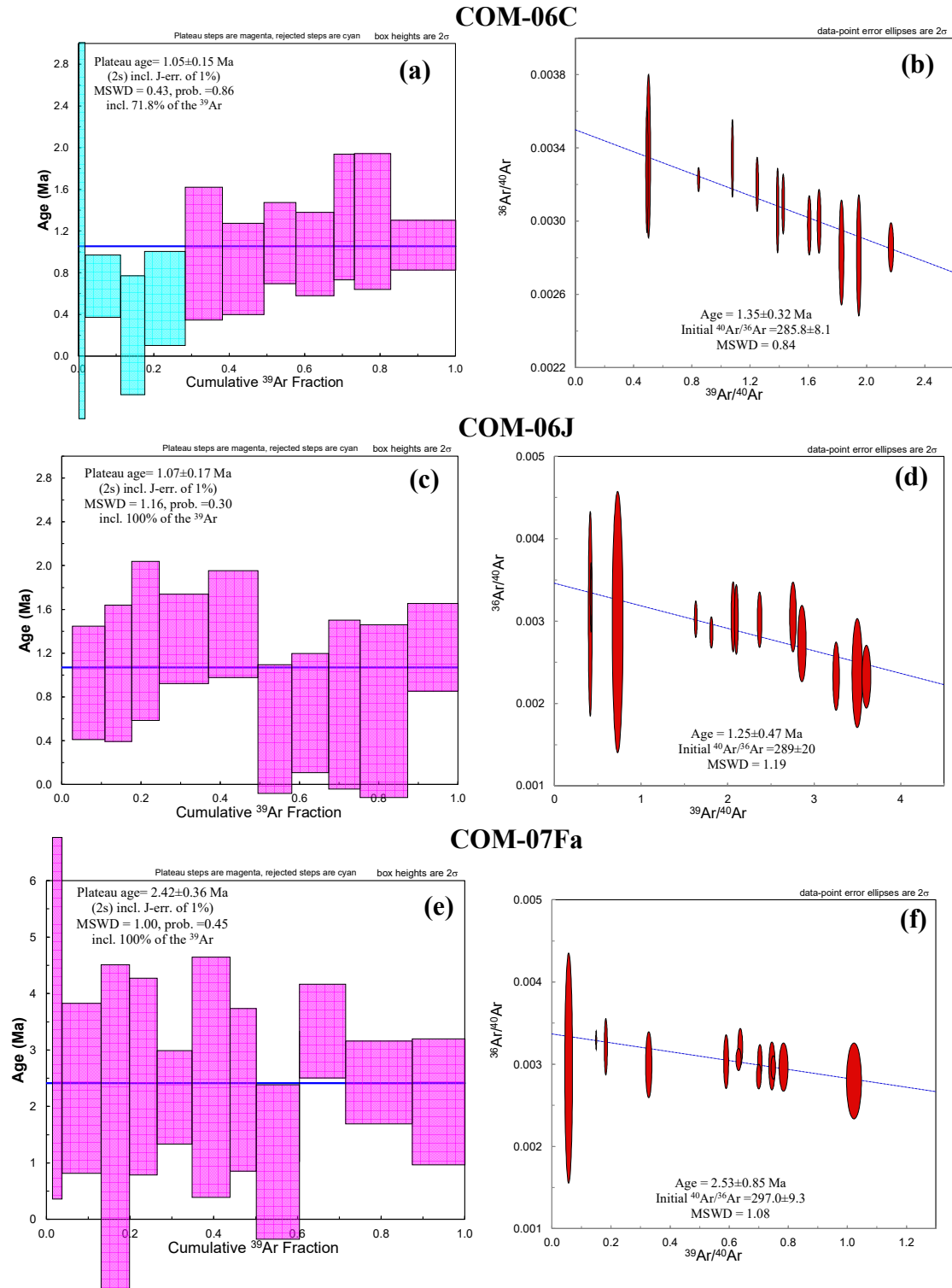
#### 5.4 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology

A total of three samples was collected for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating COM-06C and COM-06J belong to the basaltic trachyandesites and COM-7Fa belong to the basaltic andesite (**Table 5**). The whole-rock fragments of the samples are used for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. The results indicate two different age intervals 1.05 for basaltic trachyandesite and 2.42 Ma for basaltic andesite (**Figure 10a–f** and **Table 5**). The groundmass fraction of sample COM-06C shows a plateau age of  $1.05 \pm 0.15$  Ma (**Figure 10a**). This plateau contains 71.8% of the  $^{39}\text{Ar}$  released during the step-heating. The inverse isochron plot from this data calculates to and an age of  $1.35 \pm 0.32$  Ma (**Figure 10b**). The inverse isochron plot calculation of the  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ratio is slightly sub-atmospheric Ar,  $285.8 \pm 8.1$  (compared to the atmospheric Ar ratio of 298.56 Ma, [Lee et al., 2006](#)).

COM-06J has a plateau age of  $1.07 \pm 0.17$  Ma (**Figure 10c**). This plateau contains all 13 steps of the step-heating experiment. The inverse isochron correlation plot from this data (**Figure 10d**) gives an age within error of the plateau age at  $1.25 \pm 0.47$  Ma and a  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  intercept within error of atmospheric Ar ( $289 \pm 20$  Ma). The isochron age from this sample could not be considered reliable due to the spread of error display; nevertheless, the more robust age to consider for this sample is the plateau age.

$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  analyses of groundmass from the basaltic andesite sample COM-07Fa gives a plateau age of  $2.42 \pm 0.36$  Ma (**Figure 10e**) produced from all 13 steps of the step-heating experiment. The inverse isochron correlation plot (**Figure 10f**) calculates an age of  $2.53 \pm 0.85$  Ma and an atmospheric  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  intercept value of  $297.0 \pm 9.3$  Ma.





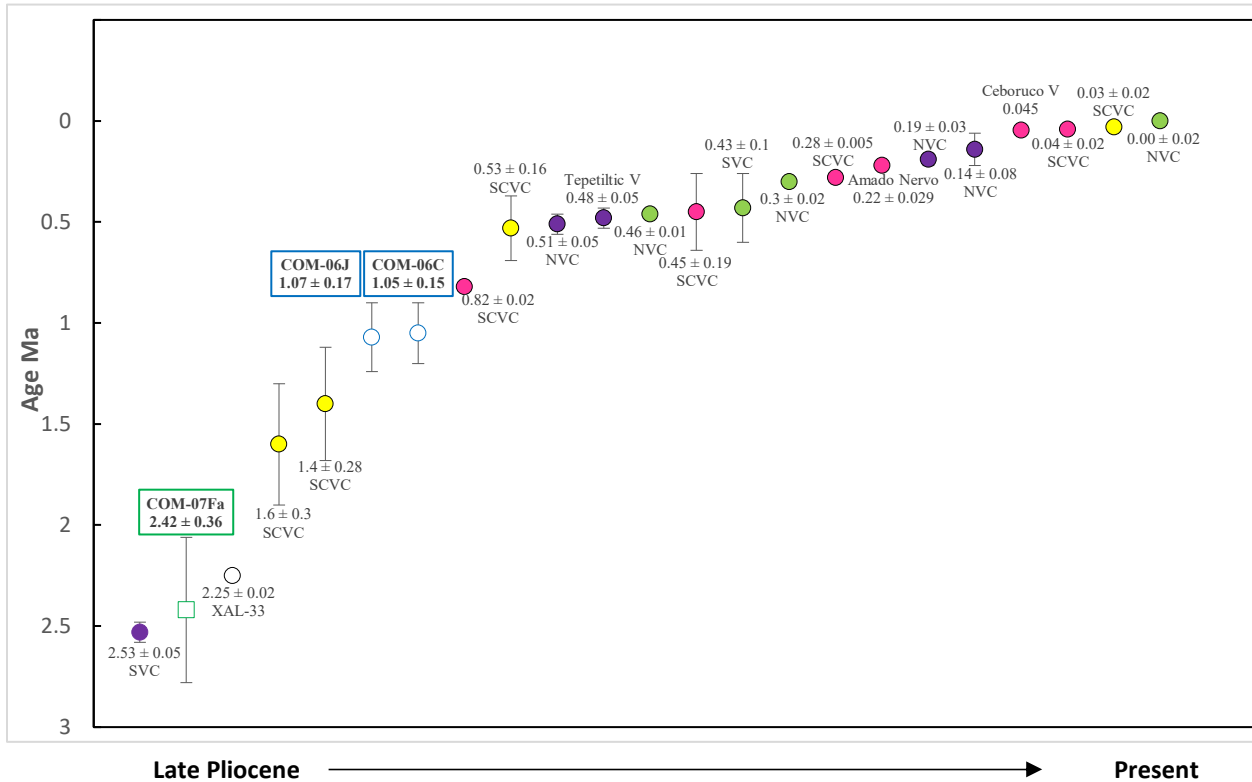
**Figure 10.** The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectrum and respective isotope isochron diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area. See text for discussion

## 6. Discussion

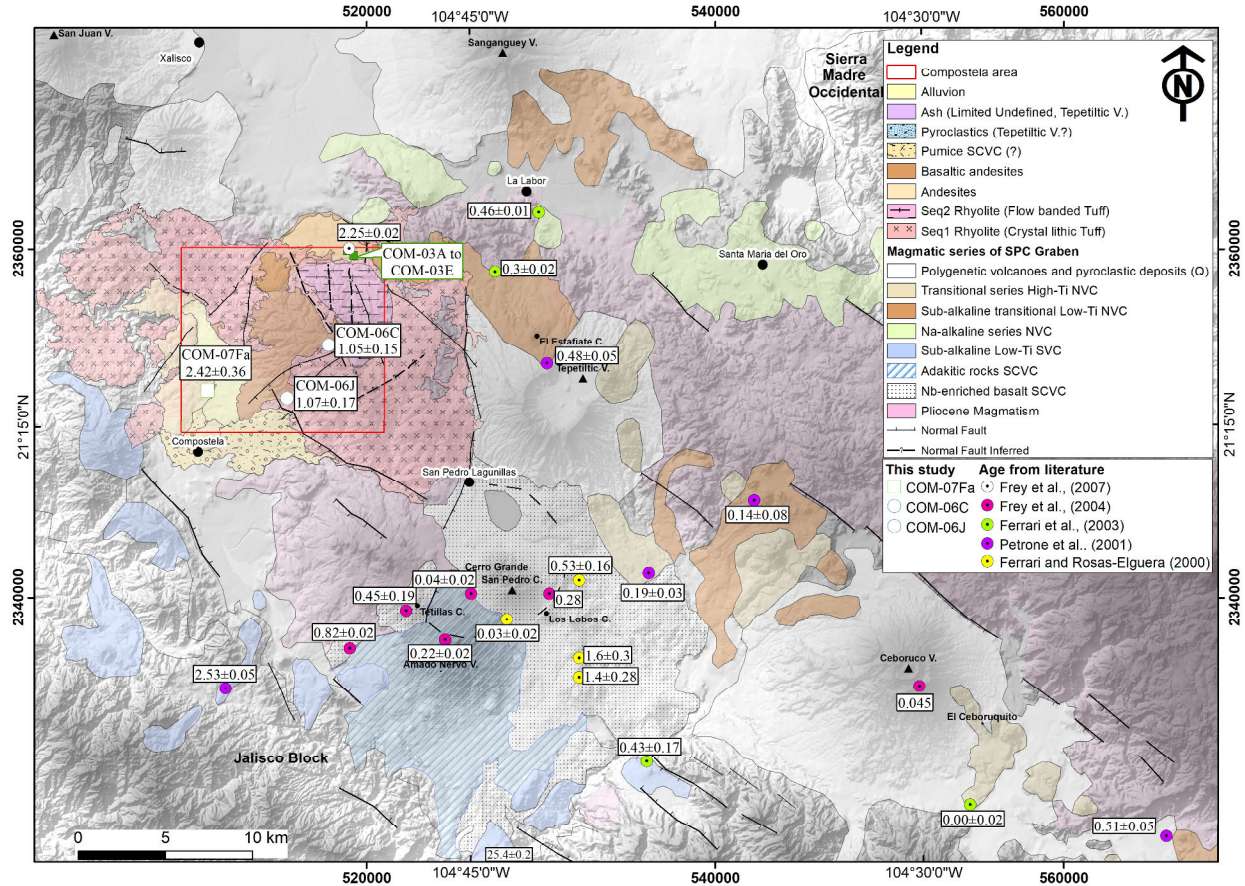
### 6.1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology

The major volcanic activity of the SPC graben, which is a part of TZR started around the late Pliocene and was continuous to the present (**Figure 11**). The borders of the SPC graben follows a NW-SE trend of the NVC and SVC. The volcanic activity of the SVC represented by scoria cones, lava flows, and domes started at 2.53 Ma and possibly continued until 0.43 Ma, represented by scoria cones, lava flows and domes. The monogenetic volcanic activity in the NVC was started during 0.51 Ma and continues to the present ([Ferrari et al., 2003](#)). It has been linked with the volcanic activity of the flanks of Ceboruco and Tepetitlic volcanoes ([Petrone, 2010](#)). However, [Frey et al., \(2007\)](#) reported an age of 2.25 Ma, which could be correlated with the beginning of volcanic activity of the NVC, because it follows the same NW-SE trend and compositionally correlates with the sub-alkaline transitional Low-Ti series distinguished by [Petrone et al., \(2003\)](#). In the Compostela area, the ages for the basaltic trachyandesites are younger than the andesites (**Figure 11**). The calculated ages for the basaltic trachyandesites COM-06C is  $1.05 \pm 0.15$  Ma from lavas erupted via a feeder dyke that cuts and covers discordantly the crystal lithic tuff. While sample COM-06J with an age of  $1.07 \pm 0.17$  Ma is from subaerial flows deposited where the topography lows. The new ages reported here extend the constrained ages for the NVC from the volcanic activity around 0.51 Ma and continued to the present ([Ferrari et al., 2003](#)) that follow the WNW trend of the cinder cones and domes of the flanks of Tepetitlic and Ceboruco volcanoes ([Petrone, 2010](#)). The andesitic lavas represented by basaltic andesite have a calculated age of  $2.42 \pm 0.36$  Ma. This age correlates with the volcanic activity at the SVC at  $2.53 \pm 0.05$  Ma ([Petrone, et al., 2001](#)) represented by scoria cones, lava

flows and domes. In this study, the andesites in the northeast part of the Compostela area were not dated. Frey et al. (2007) have already dated these andesites at  $2.25 \pm 0.02$  Ma (Figure 12).



**Figure 11.** Schematic representation of the geochronologic ages from literature within errors bars for San Pedro-Ceboruco Graben and the new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages COM-07Fa (green square), COM-06C (blue circle) and COM-06J (blue circle reported in this study). Ages from the literature represented by colored circles: yellow circle-Ferrari & Rosas-Elguera (2000); purple circle-Petroni, et al., (2001); green circle-Ferrari et al., (2003); pink circle-Frey, et al., (2004); white circle-Frey et al. (2007)



**Figure 12.** Schematic representation of the geology of the SPC Graben with the local geology of the Compostela area. The new ages  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ar ages; COM-07Fa (green square), COM-06C and COM-06J (blue circles) reported in this study. Ages from the literature represented by colored circles: yellow circle-Ferrari & Rosas-Elguera (2000); purple circle-Petrone et al., (2001); green circle-Ferrari et al., (2003); pink circle-Frey et al., (2004); white circle-Frey et al., (2007)

## 6.2 Petrogenesis

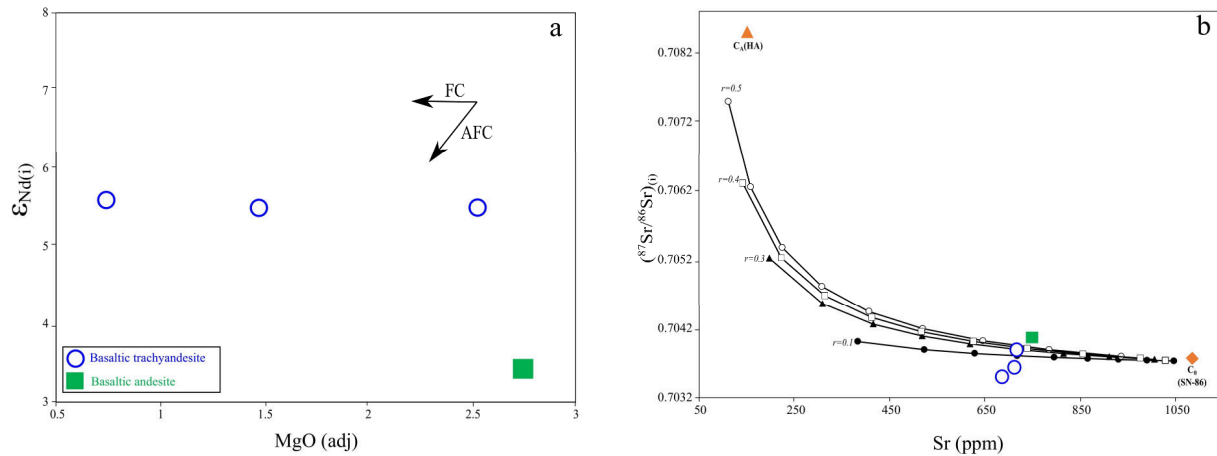
### 6.2.1 Crustal contamination

Crustal contamination could be due to addition of subducted pelagic sediments to the mantle source region (source contamination) and/or to assimilation of crustal material during ascent of mantle-derived magma (Davidson & Harmon, 1989; James, 1981). This caused a change in the chemical composition of the primary magma, which could be explained by a combined process

of crystal fractionation and assimilation. A small amount of crustal contamination has been used to explain the assimilation and fractional crystallization (AFC) processes in both the Mexican Volcanic Belt (MVB) and TMVB (Verma, 1983; Verma & Dobson, 1987; Verma & Nelson, 1989).

In this study, the low negative trending between  $\epsilon_{Nd(i)}$  values and MgO contents in the basaltic andesite rock suggests that small levels of fractionation were associated with crustal contamination (**Figure 13a**). Nevertheless, the basaltic trachyandesite samples display a flat trend that suggest fractionation of the evolved rocks (**Figure 13a**). For a better understanding of the processes that involved the evolution of the basaltic trachyandesites and andesites from the Compostela area, a quantitative treatment was carried out to determine the AFC processes. The model was developed following the equations proposed by DePaolo (1981). Isotopic and trace concentrations of a calc-alkaline basalt (SN-86, SiO<sub>2</sub> = 50.5 % m/m) taken from Verma & Nelson (1989), were considered as initial magma (C<sub>0</sub>), for assimilated wall rock (C<sub>A</sub>), a hypothetical assimilant (HA) proposed by Verma (2000). A mineralogical arrangement of 0.65Plg + 0.2Cpx + 0.08Ol + 0.05Mt + 0.01Opx + 0.01Amp was considered for the fractional crystallization process. The partition coefficients used for this model were taken from McKenzie & O'Nions, (1991) and Villemant et al., (1981). Isotope AFC model (**Figure 13b**) was calculated considering ratios for r=0.1, r= 0.3, r=0.4, r=0.5 for the assimilation to the fractional crystallization, as well as the fraction of magma remaining F = 0.9 to 0.1. The AFC model displays that basaltic trachyandesite and basaltic andesite samples experience low degrees of assimilation (r > 0.1) of the assimilated wall rock combined with fractional crystallization. The model reveals ~40% of assimilation from the assimilated wall rock. This can be correlated with the small amount of sieved textures found in the mineral analysis (**Figure 6f**). The finding of the

low degree of assimilation in calc-alkaline volcanic rocks from this area is consistent with the results of Verma & Nelson (1989), which suggest that most of the contamination occurs in deeper levels of the crust, below the level of magma chambers, where most of the fractionation occurs (Verma & Nelson, 1989).

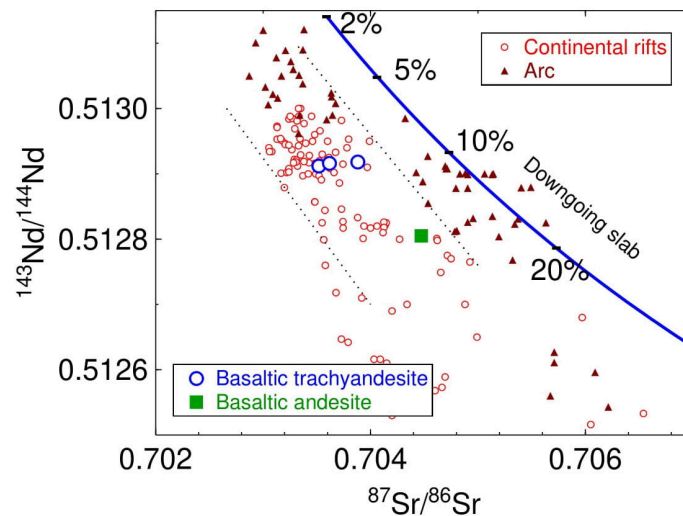


**Figure 13 (a)**  $\text{MgO}_{(\text{adj})}$  versus  $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$  diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area; **(b)** Sr versus  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  assimilation and fractional crystallization model for the volcanic rocks from the Compostela area. Values of assimilated wall rock ( $C_A$ ) were taken from Verma (2000). AFC, assimilation, and fractional crystallization; FC, fractional crystallization

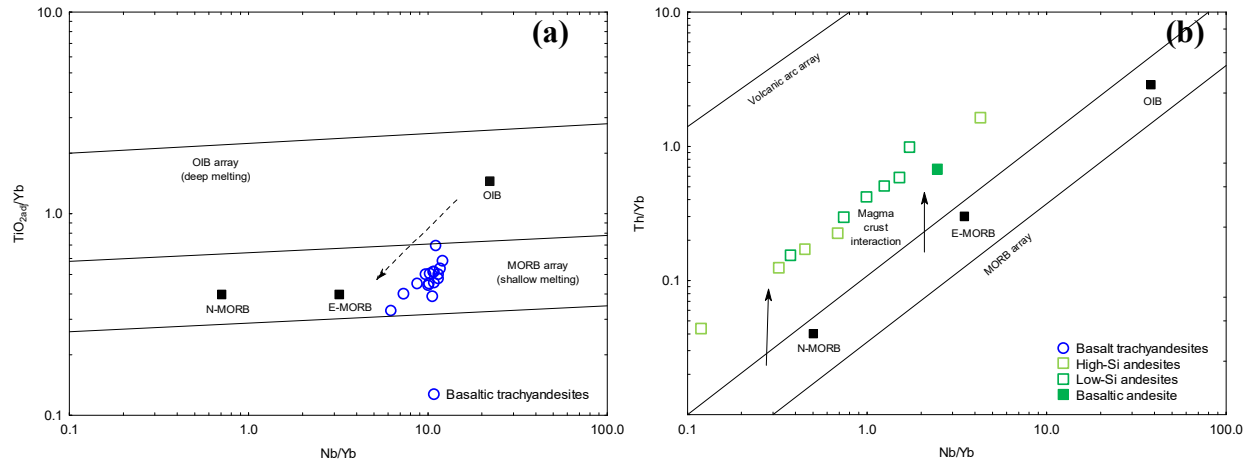
## 6.2.2 Implications for the magma source

On a conventional Sr-Nd isotope diagram (**Figure 14**), the basaltic trachyandesite and basaltic andesite samples plot within the mantle array. The basaltic trachyandesites exhibit higher  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios suggesting a predominantly mantle component of the parent magma without any evidence of subduction component involved in the petrogenesis (**Figure 14**). The continental rift rocks plot mainly within and close to the mantle array (**Figure 14**). The island arc rocks plot from the mantle array towards the trace of the “Downgoing slab” as is the case of all other arcs. The basaltic trachyandesites plot mainly to mantle array and

related with a continental rift into the WTMVB (**Figure 14**). The basaltic andesite (COM-07Fa) displays lower  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and higher  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values suggesting that mantle-lower crust component may be involved in the evolution with a subduction component (**Figure 14**). This basaltic andesite (COM-07Fa) plots close to the “Downgoing slab” that is related with the subduction magmatism along the western sector of the TMVB (WTMVB). Moreover, the bivariate diagram Nb/Yb vs  $\text{TiO}_2/\text{Yb}$  (**Figure 15a**; Pearce, 2008) shows that the basaltic trachyandesites were derived from a plume-ridge interaction from the OIB-type to the MORB source and indicates a mantle component involved in the magma generation (**Figure 15a**; Pearce, 2008). The Nb/Yb vs Th/Yb diagram (**Figure 15b**; Pearce, 2008) displays a MORB-like mixed source (mantle-crust) for the andesites (**Figure 15b**), which may have been derived from a subducted slab and/or subducted sediments.



**Figure 14.** Conventional Sr-Nd isotope diagram for the basaltic trachyandesite and andesite rocks from the Compostela area. Trace the ‘Downgoing slab’ is from Verma (2000)



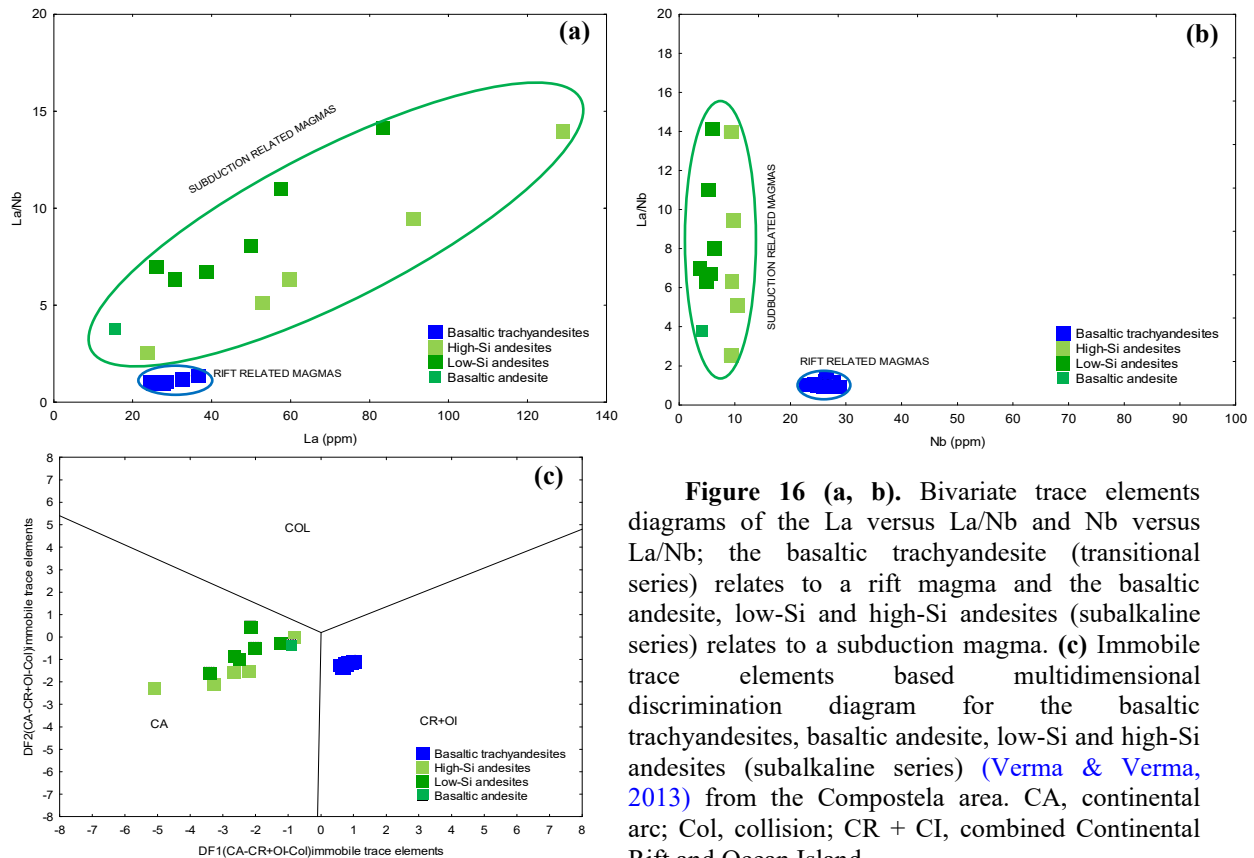
**Figure 15** (a) Nb/Yb versus  $TiO_{2adj}/Yb$  diagram for the basaltic trachyandesite apparently derived from OIB-like with a mantle component. (b) Nb/Yb versus Th/Yb diagram for the basaltic andesite, low-Si and high-Si andesite rocks display an interaction between mantle and continental crust. MORB, Mid-Ocean Ridge; E-MORB, Enriched Mid-Ocean Ridge; N-MORB, Normal Mid-Ocean Ridge; OIB, Ocean Island Basalt

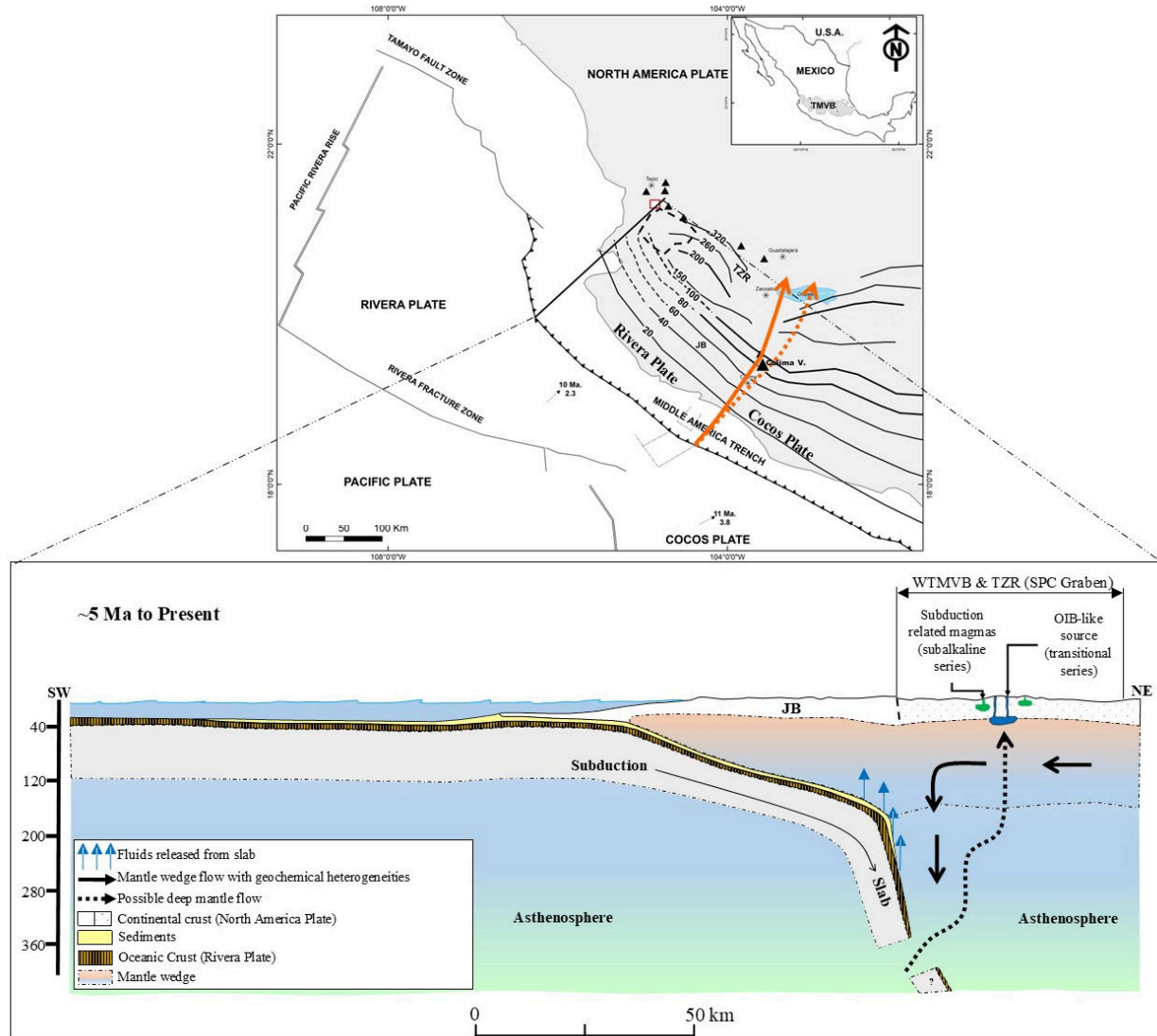
### 6.3 Tectonic setting and geodynamic implications

The geochemical evidence indicates that magmas that produced the andesitic lavas show a subduction related tectonic regime with high ratios of La/Nb (Barth, et al., 2000) and the basaltic trachyandesites originated in an intraplate regime with low ratios of La/Nb (Sun & McDonough, 1989; Figure 16a–b). In addition, we tested multi-dimensional discrimination diagrams, which were based on the Linear Discriminant Analysis (LDA) and log-ratio transformation (Verma, 2010). In this discrimination diagram (Figure 16c), basaltic andesite and andesite rocks were discriminated as arc related (continental arc (CA) by Verma & Verma, 2013) and the basaltic trachyandesites were discriminated as within–plate (combined continental rift and Ocean Island (CR + OI) by Verma & Verma, 2013). Figure 17 presents a schematic illustration of the Rivera Plate and the Cocos Plate are subducting beneath the Jalisco Block in the WTMVB, the solid and interrupted orange line shows approximately the slab separation between the Rivera and Cocos



Plate close to the Colima Volcano. This separation increases in size at depth; therefore, the Rivera Plate subducts more steeply than Cocos's Plate into the continent (North American Plate). This observation supports the argument that the young and small Rivera Plate has rolled back toward the trench in the WTMVB. In the **Figure 17** the section of the subduction zone of the Rivera Plate at ~5 Ma to present shows that the Rivera Plate's slab increased and rolled back that induced fluid from the asthenosphere into the mantle wedge, which is responsible for the mantle mixing and magma generation such as mixed volcanism -subduction, rifting, and OIB. Furthermore, volcanism of OIB-like basalts (transitional series) is a result of rising in the mantle wedge and andesitic composition (sub-alkaline series) is a subduction of shallow slab of Rivera Plate. In the Compostela area, the basaltic trachyandesite, and andesite rocks represent these two signatures, and the tectonic structure that allowed these magmas to rise to the surface is the SPC graben within the TZR.





**Figure 17.** Schematic tectonic model depicting the possible origin of the intraplate and/or OIB and subduction-related magmas. WTMVB, western sector of Trans Mexican Volcanic Belt; Tepic Zacoalco Rift; JB, Jalisco Block; SPC, San Pedro-Ceboruco Graben; V, volcano

## 7. Conclusions

New geochemical, isotopic, and geochronological data for the Quaternary intermediate volcanic rocks presented in this study present to the following conclusions:

1. New geochemical and isotopic data for the Compostela volcanic rocks provide insight regarding the petrogenesis and mantle source of the basaltic trachyandesite and andesite

- rocks. Compositionally, these volcanic rocks are of the high-K calc-alkaline to medium-K calc-alkaline.
2. Modeling of trace element and isotope ratios suggest that the assimilation and fractional crystallization has operated during the evolution of basaltic trachyandesite and andesite rocks.
  3. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data presented in this study clearly shows that the studied rocks were erupted in two discrete episodes of 1.07–1.05 Ma and 2.42 Ma, respectively.
  4. Trace element geochemistry, isotopic data, and plate tectonic model indicate that both rifting, and subduction appear to be taking place in the origin of basaltic trachyandesite and andesite rocks.

## 8. References

- Andreani, L., Le Pichon, X., Rangin, C., & Martínez-Reyes, J. (2008). The southern Mexico block: main boundaries and new estimation for its Quaternary motion. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 179, 209–223.
- Barth, M.G., McDonough, W.F., & Rudnick, R.L. (2000). Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chemical Geology*, 165, 197–213.
- Crummy, J.M., Savov, I.P., Navarro-Ochoa, C., Morgan, D.J., Wilson, M. (2014). High-K mafic Plinian eruptions of Volcan de Colima, Mexico. *Journal of Petrology*, 55, 2155–2192.
- Davidson, J.P., & Harmon, R.S. (1989). Oxygen isotope constraints on the petrogenesis of volcanic arc magmas from Martinique, Lesser Antilles. *Earth and Planetary Science Letters* 95, 255–270.
- DePaolo, D.J. (1981). Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53, 189–202.
- Díaz-Bravo, B.A., Gómez-Tuena, A., Ortega-Obregón, C., & Pérez-Arvizu, O. (2014). The origin of intraplate magmatism in the western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geosphere*, 10, 340–373.

Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C.M., & Manetti, P. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 318, 161-185.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149.

Ferrari, L., Petrone, C.M., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., ... & Venegas-Salgado, S. (2003). Geology of the San Pedro-Ceboruco Graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, 165-181.

Ferrari, L., & Rosas-Elguera J. (2000). Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: Tepic-Zacoalco rift revised. In H. Delgado-Granados, G. Aguirre-Díaz, J.M. Stock, (Eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico* 334 (pp 1-23). Boulder, Colorado, USA: Geological Society of America, Special Paper.

Frey, H.M., Lange, R.A., Hall, C.M., & Delgado-Granados, H. (2004). Magma eruption rates constrained by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology and GIS for the Ceboruco-San Pedro volcanic field, western Mexico. *Geological Society of America. Bulletin*, 116, 259-276.

Frey, H.M., Lange, R.A., Hall, C.M., Delgado-Granados, H., & Carmichael, I.S.E. (2007). A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 49-64.

Frey, H.M., Lange, R.A., Hall, C.M., Nelson, S.A., Delgado-Granados, H., Mastin, L., & Wineberg, D. (2014).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Volcan Tepetitlic, western Mexico: Implications for the origin of zoned rhyodacite-rhyolite liquid erupted explosively from an andesite stratovolcano after a prolonged hiatus. *Geological Society of America Bulletin*, 126, 16-30.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. In: S.A. Alaniz-Álvarez, & A.F. Nieto-Samaniego (Eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 422(129-181), Geological Society of America, Special Paper.

Hubbard, C. R., & Snyder, R. L. (1988). RIR-measurement and use in quantitative XRD. *Powder Diffraction*, 3, 74-77.

James, D. E. (1981). The combined use of oxygen and radiogenic isotopes as indicators of crustal contamination. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 9, 311-344.

Le Bas, M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen, A., & Zanettin, B. (1986). A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.

Lee, J-Y., Marti, K., Severinghaus, J.P., Kawamura, K., Yoo, H-S., Lee, J.B., & Kim, J.S. (2006). A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 4507-4512.

Luhr, J.F. (2000). The geology and petrology of Volcán San Juan (Nayarit, México) and the compositionally zoned Tepic Pumice. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95, 109–156.

Luhr, J.F., & Carmichael, I.S.E. (1980). The colima volcanic complex, Mexico. I. Postcaldera andesites from volcán colima. *Contributions Mineralogy Petrology*, 71, 343–372.

Luhr, J.F., Nelson, S.A., Allan, J.F., & Carmichael, I.S.E. (1985). Active rifting in southwestern Mexico: manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*, 13, 54–57.

McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.

McKenzie, D., & O’Nions, R.K. (1991). Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32, 1021–1091.

Morimoto, N. (1988). Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39, 55–76.

Nelson, S.A. (1980). Geology and petrology of Volcan Ceboruco, Nayarit, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 2290–2431.

Pacheco, J.F., Mortera-Gutiérrez, C.A., Delgado, H., Singh, S.K., Valenzuela, R.W., Shapiro, N.M., ... & Gutiérrez-Moguel, E. (1999). Tectonic significance of an earthquake sequence in the Zacoalco half-graben, Jalisco, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 557–565.

Pardo, M., & Suárez, G. (1993). Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco Block in western Mexico. *Geophysical Research Letters*, 20, 2391–2394.

Pearce, J.A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100, 14–48.

Petrone, C.M. (2010). Relationship between monogenetic magmatism and stratovolcanoes in western Mexico: The role of low-pressure magmatic processes. *Lithos*, 119, 585–606.

Petrone, C.M., Francalanci, L., Carlson, R.W., Ferrari, L., & Conticelli, S. (2003). Unusual coexistence of subduction-related and intraplate-type magmatism: Sr, Nd and Pb isotope and trace element data from the magmatism of the San Pedro-Ceboruco graben (Nayarit, Mexico). *Chemical Geology*, 193, 1–24.

Petrone, C.M., Orozco-Esquivel, T., & Ferrari, L. (2014). Petrogenesis and geodynamic significance of silicic volcanism in the western Trans-Mexico Volcanic Belt: role of gabbroic cumulates. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167, 1006.

Petrone, C.M., Tagami, T., Francalanci, L., Matsumura, A., & Sudo, M. (2001). Volcanic systems in the San Pedro-Ceboruco graben (Nayarit, Mexico) in the light of new K-Ar geochronological data. *Geochemical Journal*, 35, 77–88.

Rickwood, P. C. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22, 247–263.

Selvans, M.M., Stock, J.M., DeMets, C., Sanchez, O., & Marquez-Azua, B. (2011). Constraints on Jalisco block motion and tectonics of the Guadalajara triple junction from 1998-2001 campaign GPS data. *Pure and applied geophysics*, 168, 1435–1447.

Sun, S.S., & McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London, Special Publications*, 42, 313–345

Torres-Sánchez, D., Verma, S.K., Verma, S.P., Velasco-Tapia, F., & Torres-Hernández, J.M. (2019). Petrogenetic and tectonic implications of Oligocene–Miocene volcanic rocks from the Sierra de San Miguelito complex, central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 95, 102311.

Torres-Sánchez, D., Verma, S.K., Barry, T., Verma, S.P., & Torres-Hernández, J.M. (2020).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and petrogenesis of the Sierra de San Miguelito Volcanic Complex, Mesa Central, Mexico. *Lithos* 370–371, 105613.

Verma, S.K., Torres-Sánchez, D., Hernández-Martínez, K.R., Malviya, V.P., Singh, P.K., Torres-Hernández, J.R., Rivera-Escoto, B.A. (2021). Geochemistry of Eocene felsic volcanic rocks from the Mesa Virgen-Calerilla, Zacatecas, Mexico: Implications for the magma source and tectonic setting. *Geological Journal*, in press, DOI: 10.1002/gj.4133.

Verma, S. P. (1983). Magma genesis and chamber processes at Los Humeros caldera, Mexico -- Nd and Sr isotope data. *Nature* 301, 52–55.

Verma, S.P. (2000). Geochemical evidence for a lithospheric source for magmas from Los Humeros caldera, Puebla, Mexico. *Chemical Geology*, 164, 35–60.

Verma, S.P. (2010). Statistical evaluation of bivariate, ternary and discriminant function tectonomagmatic discrimination diagrams. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19, 185–238.

Verma, S.P. (2015). Origin, evolution, and tectonic setting of the eastern part of the Mexican Volcanic Belt and comparison with the Central American Volcanic Arc from conventional multielement normalized and new multidimensional discrimination diagrams and discordancy and significance tests. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24, 111–164.

Verma, S. P., & Dobson, P. F. (1987). Sr, Nd, O and Pb isotopic evidence for complex petrogenetic evolution of silicic lavas in the Los Azufres Volcanic Field, Michoacan, Mexico (abstract). *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 68, p. 1520.

Verma, S.P., & Nelson, S.A. (1989). Isotopic and trace element constraints on the origin and evolution of alkaline and calc-alkaline magmas in the northwestern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research*, 94, 4531–4544.

Verma, S.P., Pandarinath, K., & Rivera-Gómez, M.A. (2016). Evaluation of the ongoing rifting and subduction processes in the geochemistry of magmas from the western part of the Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American earth Sciences*, 66, 125–148.

Verma, S.P., & Rivera-Gómez, M.A. (2013). Computer programs for the classification and nomenclature of igneous rocks. *Episodes*, 36, 115–124.

Verma, S.P., & Verma, S.K. (2013). First 15 probability-based multi-dimensional discrimination diagrams for intermediate magmas and their robustness against post-emplacement compositional changes and petrogenetic processes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22, 931–995.

Verma, S.P., Verma, S.K., Rivera-Gómez, M.A., Torres-Sánchez, D., Díaz-González, L., Amezcua-Valdez, A., ... Pandarinath, K. (2018). Statistically coherent calibration of X-ray fluorescence spectrometry for major elements in rocks and minerals. *Journal of Spectroscopy*, 1–13.

Villemant, B., Jaffreziec, H., Joron, J.L., & Treuil, M. (1981). Distribution coefficients of major and trace elements-Fractional crystallization in the alkali basalt series of Chaine-Des-Puys (Massif Central, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 1997–2016.

Yang, T., Grand, S. P., Wilson, D., Guzmán-Speziale, M., Gómez-González, J. M., Domínguez-Reyes, T., & Ni, J. (2009). Seismic structure beneath the Rivera subduction zone from finite-frequency seismic tomography. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01302.

## **CAPÍTULO 4**

### **Mineralogía y geoquímica de las riolitas del área Compostela, noroeste del graben San Pedro-Ceboruco, rift Tepic-Zacoalco, México.**

Presentación del trabajo de investigación a publicar

Mi contribución en esta investigación se resume como sigue:

1. Trabajo en campo, elaboración de mapas geológicos y recolección de muestras
2. Preparación de muestras y análisis experimentales
3. Calculación de datos, tablas, figuras y preparación de diagramas
4. Interpretación de datos y redacción del trabajo



## **Mineralogía y geoquímica de las riolitas del área Compostela, noroeste del graben San Pedro-Ceboruco, rift Tepic-Zacoalco.**

### **1. Introducción**

En el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano subduce mayormente la Placa de Rivera en la Placa Norteamérica formando un arco magmático continental (Gómez-Tuena et al., 2007) y a lo largo de este sector se desarrolla el rift Tepic-Zacoalco que forma parte de los primeros estadios del rifting entre el Bloque Jalisco y la placa Norte americana (Frey et al., 2014). En este sector occidental se desarrollan grandes volúmenes de volcanismo silíceo, principalmente en la parte trasera del arco. El origen de este volcanismo silíceo es el resultado de la fusión parcial de complejos gabroicos que se formaron en la corteza media debido a la alta densidad de Fe-enriquecido del volcanismo basáltico del Mioceno tardío (Petrone et al., 2014). Posterior a este volcanismo basáltico de 11–8.5 Ma, inicia el volcanismo silíceo de 7.5–3.5 Ma, seguido por un segundo periodo de 4.9–2.9 Ma que se asocia a domos riolíticos e ignimbritas coexistiendo con volcanismo basáltico. Los primeros pulsos de actividad silícea fueron durante un periodo de baja actividad tectónica y durante la fase extensional entre el Bloque Jalisco y Norte América en el Plioceno favoreció la erupción de estos magmas silíceos y en menor cantidad el de lavas máficas (Petrone et al., 2014).

Una estructura que forma parte del rift Tepic-Zacoalco es el graben San Pedro-Ceboruco. En este graben se han reconocido cuatro sistemas volcánicos: Los estratovolcanes poligenéticos Tepetiltic y Ceboruco, el complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande, la cadena volcánica del Norte y la cadena volcánica del Sur (Petrone, 2010), que se sobreponen en el volcanismo silíceo del Plioceno. El área de estudio se encuentra al noroeste del graben San Pedro-Ceboruco, en esta área se encuentra parte de la actividad volcánica silícea de 4.97 Ma seguido por lavas de

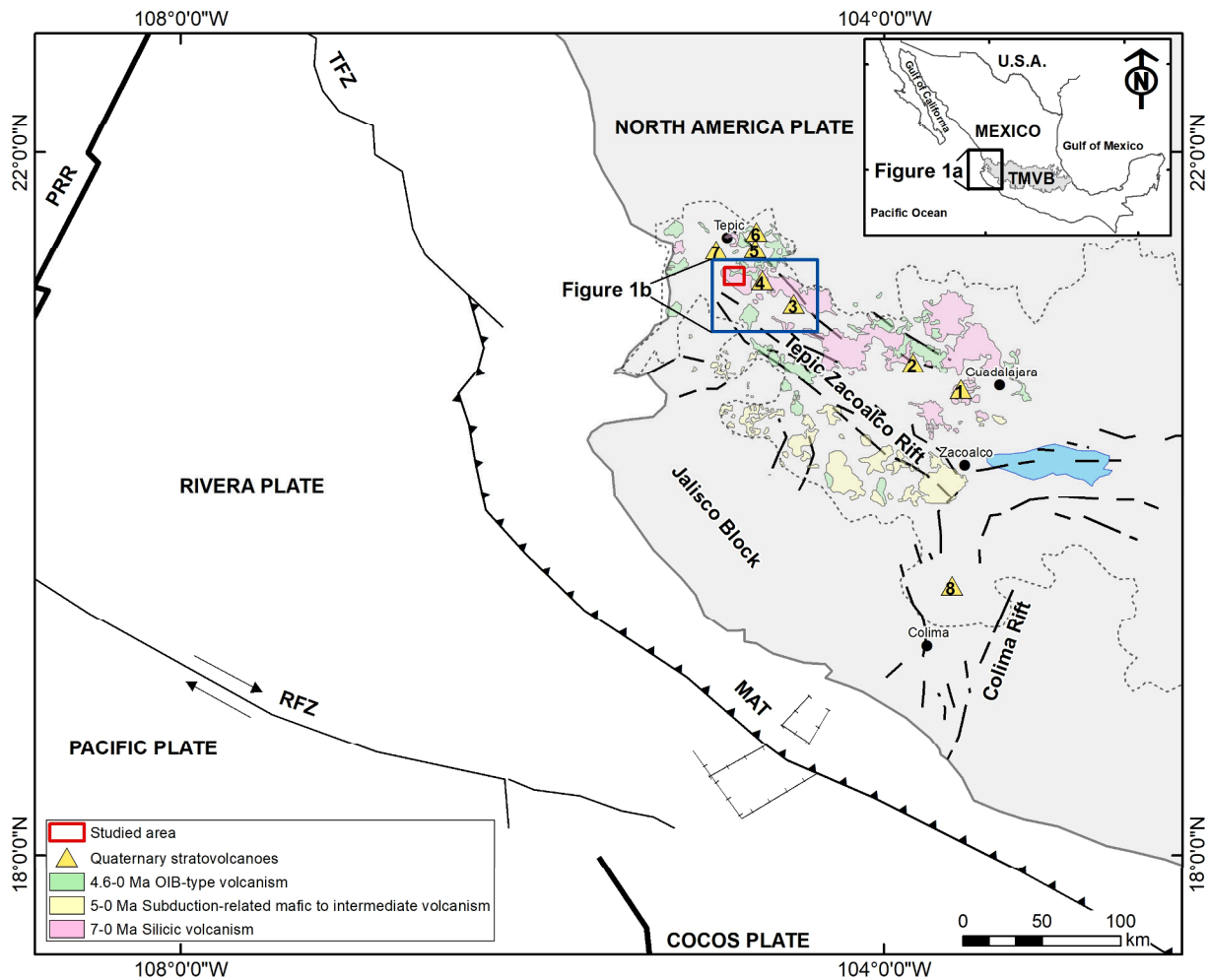
composición andesítica de 2.25–2.42 Ma, y de basaltos traquiandesitas de 1.05–1.07 Ma (Frey et al., 2007; Ruiz-Mendoza et al., 2021). Para finalizar con la actividad del complejo volcánico San Pedro-Cerro grande de ~280 Ka (Petrone et al., 2006) y del volcán Tepetitlic ~236 Ka (Frey et al., 2014). Sin embargo, en el área de estudio, se encontró que esta actividad silíceo se divide en dos secuencias por presentar diferentes texturas. La primera es una secuencia de tobas líticas, seguido por una secuencia de tobas bandeadas. Además, dentro del área de estudio se encuentra la zona mineralizada Nuevo Milenio que se caracteriza por vetas de cuarzo con sulfuros de plata (Aguilar-Nogales & Cedillo-Calvillo, 1983) que se emplaza en la secuencia de tobas líticas y es clasificado como un depósito epitermal de baja sulfuración (Camprubí, 2009; 2013). Este tipo de depósitos se encuentran asociados a arcos volcánicos subaeriales y a intrusiones de magmas calcoalcalinos (Cooke & Simmons, 2000) relacionados a márgenes convergentes, subducción de placa oceánica-continental u oceánica-oceánica, o a rifts tras arco (Camprubí & Albinson, 2006). Como es el caso del sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano donde se tiene un margen convergente con el desarrollo de arcos volcánicos subaeriales y un rift en la parte trasera del arco. Por lo tanto, en esta investigación se presentan nuevos datos petrográficos, mineralógicos, geoquímica de roca total y elementos traza, así como datos de Sm–Nd, tanto de la secuencia de toba lítica y de la toba bandeada, para definir su naturaleza y ocurrencia; e identificar si estas secuencias sufrieron algún proceso de alteración que modificara su mineralogía o textura principal por la actividad volcánica cercana.

## 2. Marco geológico y tectónico

En el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano se desarrolla el rift Tepic-Zacoalco. Este rift es una zona extensional que forma parte de un punto triple que se intercepta a ~50 km al SSW de la ciudad de Guadalajara y se extiende al NW hacia la costa del Pacífico, cerca de la ciudad de Tepic, Nayarit. Este rift refleja los estados iniciales del desprendimiento entre el Bloque de Jalisco y la Placa Norteamericana, donde se desarrolla una voluminosa explosión de ignimbritas durante el Plioceno que se encuentran falladas por un sistema NW, produciendo desplazamientos verticales de hasta 500 m (Frey et al., 2007). Después de este periodo silíceo se tiene el emplazamiento de volcanismo máfico representado por pequeños volúmenes de flujos de lavas de intraplaca y volcanismo relacionado con subducción. Por último, durante el Cuaternario se desarrollan los grandes estratovolcanes de composición intermedia como son: Tequila, Ceboruco, Tepetitlic, Sanganguey, San Juan. Mientras que los últimos episodios de volcanismo riolítico están representados por la caldera La Primavera y el volcán Las Navajas ambos en los límites noroeste y sureste del rift (Petrone et al., 2014) (Figura 1a).

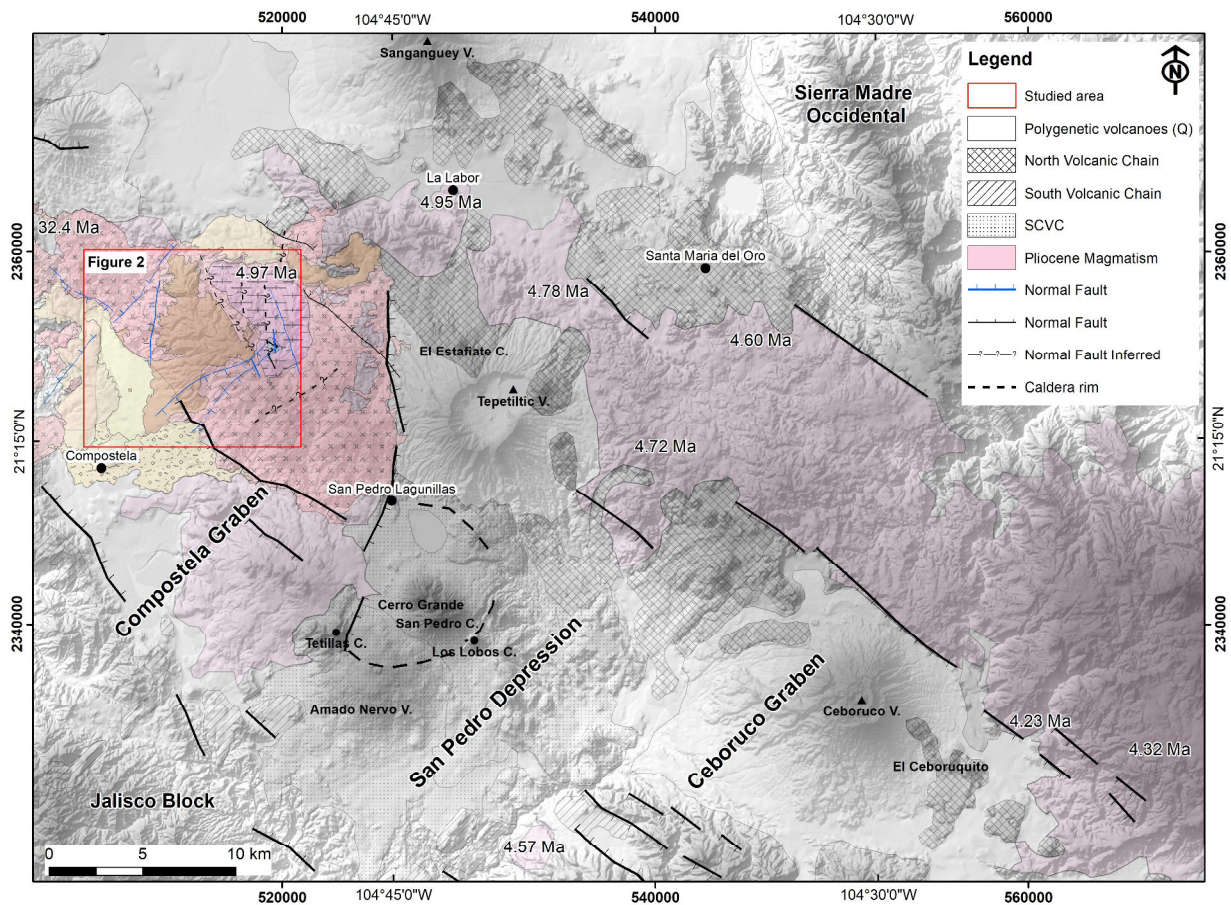
Dentro del rift Tepic-Zacoalco se encuentra el graben Compostela-Ceboruco, que se divide en tres estructuras: el graben Compostela, la depresión de San Pedro y el graben Ceboruco. El graben Compostela se forma por dos fallas normales NW-SE que bordean una depresión de 10 Km de ancho (Ferrari y Rosas-Elguera, 2000) y que cortan al norte parte de las ignimbritas de 4.9 Ma (Frey et al., 2007), y al sur cortan flujos de ceniza y parte del granito del Bloque Jalisco. En la parte central del graben se desarrolla la depresión de la caldera de San Pedro debido al desplazamiento vertical producto de fallas normales NNE-SSE y NE-SW. Esta depresión se forma en dos periodos. La primera en el Plioceno Temprano con un desplazamiento de 600 m y el segundo en el Plioceno tardío-Pleistoceno temprano de 500 m. El graben Ceboruco se desarrolló

al inicio del Mioceno tardío, en el área del Volcán Ceboruco y es una depresión de 1800 m que es rodeado por fallas que se encuentran ocultas por rocas más jóvenes. Al norte del Volcan Ceboruco se encuentran fallas normales con echados al SW que se relacionan con la fase extensional del Plioceno temprano con un desplazamiento vertical de 900 m y cortan una secuencia de ignimbritas de 4.6 y 4.2 Ma (Ferrari y Rosas-Elguera, 2000) (Figura 1b)



**Figura 1 (a)** Mapa tectónico y principales firmas magmáticas identificadas en el sector occidental del cinturón volcánico Trans-Mexicano y la localización del área de estudio (recuadro rojo). Estratovolcanes: 1–caldera La Primavera; 2–Tequila; 3–Ceboruco; 4–Tepetitlic; 5–Sanganguey; 6–Las Navajas y 7–San Juan. TMVB–Trans Mexican Volcanic Belt; PRR–Pacific Rivera Rise; TFZ–Tamayo Fault Zone; RFZ–Rivera Fracture Zone; MAT–Middle America Trench

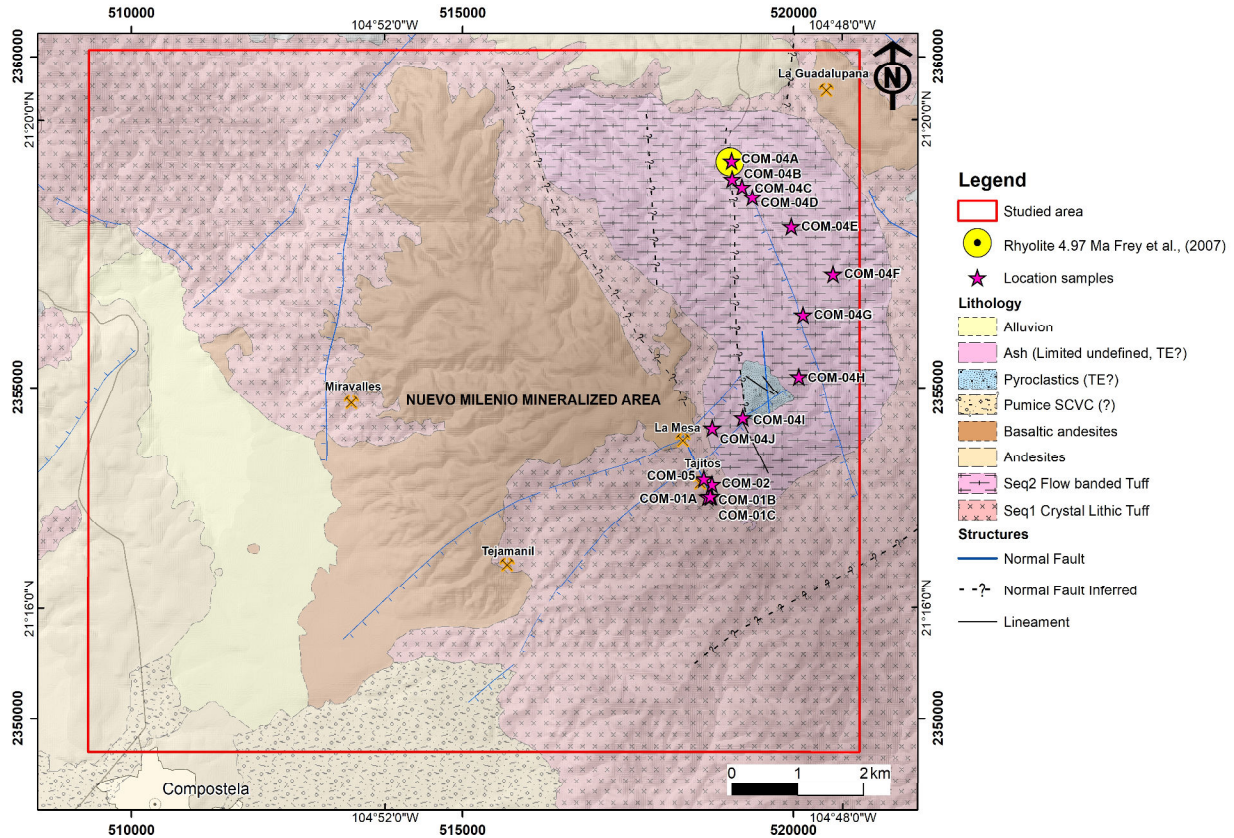
El graben que se forma entre la depresión de San Pedro y el volcán Ceboruco es denominado como el graben San Pedro-Ceboruco y es donde se ha identificado cuatro sistemas volcánicos que se sobreponen al magmatismo silíceo del Plioceno. Estos sistemas son: 1.- Los volcanes poligenéticos Ceboruco y Tepetitlic y depósitos de piroclastos; 2.- La Cadena Volcánica del Norte, representada por tres series: Serie Transicional, (High-Ti), Serie subalcalina transicional (Low-Ti) y una serie Na-alcalina; 3.- La Cadena Volcánica del Sur, representada por una serie subalcalina (Low-Ti) y 4.- El complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande (SCVC) (Petrone, 2010).



**Figura 1 (b)** Mapa geológico-estructural del área Compostela-Ceboruco. En el recuadro rojo se encuentra el área de estudio. Las series identificadas se agrupan en los cuatro sistemas identificados. Volcanes poligenéticos Ceboruco y Tepetitlic, la Cadena Volcánica del Norte, la cadena Volcánica del Sur y el complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. SCVC–Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. Las edades son referidas en el texto. Modificado de Ferrari & Rosas-Elguera 2000 y Petrone, 2010

### 3. Litología en el área de estudio

Dentro del área de estudio se tiene identificada una unidad de riolitas que pertenecen al magmatismo del Plioceno de 4.97 Ma (Frey et al., 2007). Esta unidad se divide en dos secuencias por presentar diferentes texturas de formación: Toba lítica y Toba bandeada, y cubren mayormente el área de estudio. La toba lítica está representada por cuerpos masivos donde se distinguen a simple vista feldespatos, cuarzo y fragmentos de litoclastos (~5 mm), con pequeños parches de oxidación en una matriz ligeramente silíceo y algunas veces se observan texturas de fiamme. La toba bandeada está representada por cuerpos en flujos y bandeados donde se distinguen texturas de devitrificación como esferulitas y algunas texturas de fiamme, dentro de una matriz afanítica, en algunos bandeamientos se observa una ligera oxidación. Ambas secuencias presentan un ligero grado de alteración ya que tienen una apariencia blanquecina y un reemplazamiento penetrante en la roca por minerales silíceos (Thompson, et al., 1996) por ejemplo; los cristales de feldespatos están siendo reemplazados por minerales arcillosos de color blanco pálido con un ligero enriquecimiento en sílice. Como ya se mencionó con anterioridad en esta área de estudio se encuentra la zona mineralizada Nuevo Milenio, donde se ubican las minas Miravalles, Tajitos, La Mesa y Tejamanil, representada por vetas de cuarzo con sulfuros de plata que se emplazan en la secuencia de la toba lítica. Al noreste y suroeste del área de estudio se tiene una unidad de andesitas que cubre discordantemente a la toba lítica. Al centro del área se encuentra una unidad de basalto traquiandesita que corta y cubre discordantemente a esta misma toba lítica, para finalizar con depósitos de pómez y de piroclastos correspondientes a la actividad del complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande y del Volcán Tepetitlic que cubren una pequeña área de la toba bandeada (Ruiz-Mendoza, et al., 2021). (Figura 2).



**Figura 2.** Litología del área de estudio representada por el volcanismo silíceo del Plioceno de 4.97 Ma (círculo amarillo, edad reportada por Frey et al., 2007) y localización de las muestras de la Toba lítica y Toba bandeada. En esta área se encuentran la zona mineralizada Nuevo Milenio. TE–Volcán Tepetitlic; SCVC–Complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. Modificado del Servicio Geológico Mexicano (2007), Carta Xalisco F13-D31.

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Muestreo

Se recolectaron quince muestras, cinco corresponden a la secuencia de la toba lítica y diez a la toba bandeada en el área de estudio. Se seleccionaron tres muestras de la toba lítica y tres muestras de la toba bandeada para la petrología. Para la identificación de minerales arcillosos por difracción de rayos-X (XRD) se seleccionaron los polvos de cuatro muestras de la toba lítica y nueve muestras de la toba bandeada. Para los análisis geoquímicos de roca total y de elementos traza se completaron para las 15 muestras colectadas. Para roca total se realizaron pastillas prensadas para la espectrometría de fluorescencia de rayos-X (XRF) y para elementos traza por

espectrometría de masas de plasma acoplado (ICP-MS). Se realizaron análisis de Sr-Nd en tres muestras seleccionadas de toba bandeada.

#### **4.2 Mineralogía de arcillas por difracción de rayos-X (XRD)**

Se uso difracción de rayos-X para la identificación de minerales arcillosos de cuatro muestras de la toba lítica y diez de la toba bandeada (Tabla 1). Se prepararon catorce polvos de muestras que fueron tamizados en las mallas #200 (75  $\mu\text{m}$ ) y #230 (63  $\mu\text{m}$ ). Obtenidos estos polvos fueron preparados con una gota de Etilenglicol ( $\text{CH}_2\text{OH}$ )<sub>2</sub>, para la orientación de las arcillas. Este método consiste en agregar una gota de Etilenglicol al polvo de la muestra en la lámina de preparación y posteriormente analizarse en el XRD. Cada uno de los polvos de las catorce muestras fueron preparadas con este método y fueron analizados con un SmartLab Rigaku, equipado con un tubo de cobre, con un detector de centelleo de NaI y un detector con tiras de silicon D/teX Ultra alta velocidad. El difractómetro fue operado a 40 kV y 44 mA y los datos fueron colectados entre 5 y 90 (2 theta scale) en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICyT, San Luis Potosí, México. Los patrones de difracción fueron buscados y emparejados con el software PDXL-2.

#### **4.3 Análisis de Roca total y elementos traza**

Se prepararon quince pastillas prensadas que fueron analizadas para elementos mayores con un XRF usando un Rigaku ZXS Primus II model (rhodium X-Ray tube; 4 kW) en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICyT, San Luis Potosí, México. La preparación de las muestras, el procedimiento analítico, la exactitud y precisión siguieron los métodos detallados de [Verma et al., \(2018\)](#), [Verma et al., \(2021\)](#) y [Torres-Sánchez et al., \(2019\)](#). La precisión y la exactitud fueron considerados <3% para los elementos mayores y las



calculaciones de la norma CIPW fueron obtenidos de IgRocks ([Verma & Rivera-Gómez, 2013](#)). Los elementos traza y tierras raras fueron analizados en ALS, Chemex de Mexico en Canadá.

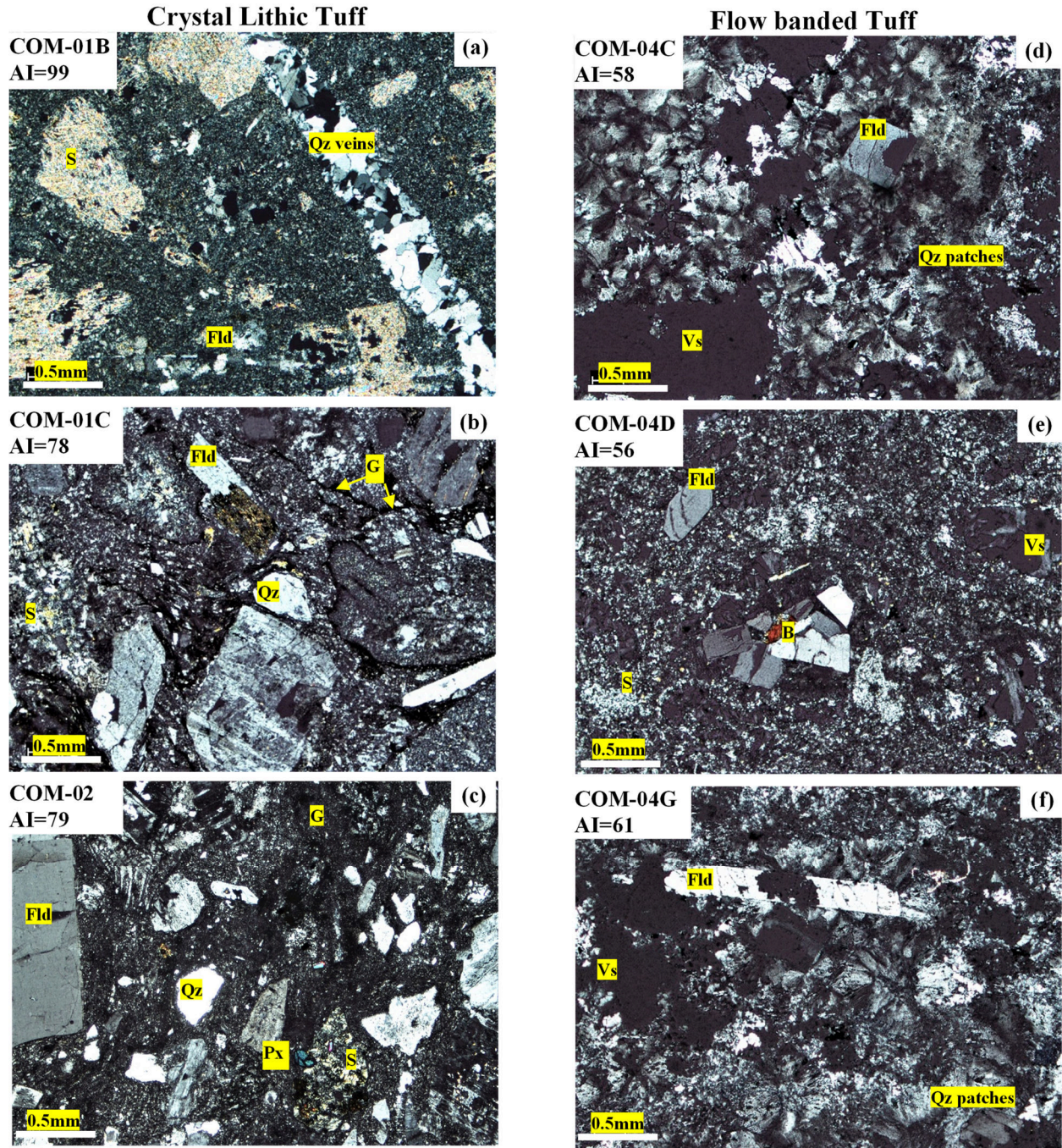
#### **4.4 Análisis de isótopos de Rb-Sr y Sm-Nd**

Tres muestras de la toba bandeada fueron seleccionadas para los análisis isotópicos de Rb-Sr y Sm-Nd. Los análisis isotópicos fueron realizados en el Centro de Geocronología y Geoquímica Isotópica en la Universidad Complutense de Madrid, España. La metodología con la que se realizaron estos análisis se describe en [Ruiz-Mendoza et al., \(2021\)](#).

### **5. Resultados**

#### **5.1 Petrografía**

Las observaciones obtenidas en la petrografía indican que tanto la toba lítica como la toba bandeada muestran un ligero grado de alteración al no ser claras las texturas primarias u originales de formación de estas tobas. En la toba lítica se distingue ligeramente una textura porfírica en una matriz que muestra devitrificación, recristalización y sericitización. Está constituida principalmente por fenocristales de feldspatos euhedrales, algunos de estos se encuentran ligeramente reemplazados por minerales arcillosos que se encuentran en escamas de sericita y el cuarzo se encuentra formando parches concéntricos dentro de la matriz ([McPhie et al., 1993](#); [Gifkins, C. et al., 2005](#)). En algunas muestras de la toba lítica se tienen vetillas de cuarzo (**Figura 3a**), estas muestras fueron recolectadas cerca de la mina Tajitos. En otras muestras se distinguen fragmentos líticos ligeramente angulosos, pobremente ordenados, con bordes que se reemplazan por vidrio criptocristalino y la presencia de piritita (**Figura 3b-c**). En general, la matriz de la toba lítica muestra una textura afanítica, ligeramente recristalizada y reemplazada con escamas de sericita.



**Figura 3a-f.** Laminas petrográficas de la toba lítica (COM-01B, COM-01C y COM-02) y la toba bandeada (COM-04C, COM-04D y COM-04G). Se agregan los valores calculados del índice de alteración para cada una de las muestras. La descripción se encuentra en el texto. AI-Índice de alteración; Fld-Feldespatos; S-Sericita; Qz-Cuarzo; G-vidrio; Py-Pirita; B-Biotita; Vs-Vesículas.

En la toba bandeada se distingue una matriz micropoikilitica con una matriz ligeramente recristalizada y sericitizada, con intercrecimientos radiales de cuarzo y algunas veces como parches concéntricos (**Figura 3d y f**). En algunas muestras se observa una textura porfirítica con agregados cristalinos de feldespatos, que también se encuentran reemplazado por sericita en una matriz ligeramente recristalizada y sericitizada (**Figura 3e**).

### **5.2 Mineralogía por difracción de rayos-X (XRD)**

En la **Tabla 1** se resumen las descripciones petrográficas y la identificación mineralógica por difracción de rayos-X (XRD). La toba lítica consiste principalmente de minerales de cuarzo, micas blancas (illita, moscovita), feldespatos (sanidino, ortoclasa) y pirita. Como minerales arcillosos que se encuentran reemplazando a los feldespatos illita (sericita), moscovita y a los clinopiroxenos, clorita. La identificación de la pirita en las muestras COM-02 y COM-05 corresponden a la toba lítica donde se emplaza la mineralización que se encuentran cerca de la mina Tajitos. La mineralogía identificada en la toba bandeada corresponde a feldespatos (sanidino), cuarzo, micas blancas (illita, moscovita), como minerales que reemplazan a los feldespatos y clinopiroxenos (clinoferrosilita). Esta mineralogía coincide con las observaciones petrográficas.

### **5.3 Geoquímica de elementos mayores, traza y tierras raras**

La composición química de elementos mayores, traza y tierras raras de catorce muestras se resumen en la **Tabla 2** y **Tabla 3**. Estos datos se procesaron usando el programa IgRoCS ([Verma & Rivera-Gómez, 2013](#)) para la clasificación del magma y el ajuste de la oxidación de Fe-en la base anhidra. En este trabajo se utilizaron los valores ajustados de catorce muestras, de las quince

obtenidas ya que la muestra (COM-04I) se encuentra cerca de una falla y su característica física es polvo y no roca como las demás muestras.

**Tabla 1.** Descripciones petrográficas de riolitas e identificación mineral obtenido de la difracción de rayos-X (XRD) en el área de estudio.

Sample	Long. (W)	Lat. (N)	Type Texture	Descriptions	Minerals (%) (By XRD)
COM-01A	104° 49' 10.6"	21° 16' 54.5"	Rhyolite CxLT	No petrography	Illite (68), Quartz (18), Muscovite (12), Orthoclase (0.9), Ferrosilite (0.6)
COM-01B	104° 49' 08.7"	21° 16' 54.9"	Rhyolite CxLT	30% gms (Fld+Qz), 40% Ph (Fld+Qz), 5% quartz veins. Fld lightly altered to sericite	Quartz (75), Muscovite (16), Illite (4), Ferrosilite (3), Orthoclase (2),
COM-01C	104° 49' 09.3"	21° 16' 54.8"	Rhyolite CxLT	40% gms (Gl+Tf+S), 60% Ph (Fld+Lithic fragments). Fld lightly altered to sericite	No XRD
COM-02	104° 49' 08.5"	21° 17' 00.6"	Rhyolite CxLT	60% gms (devitrification glass and lightly welded), 30% Ph (Lt+Fld+Qz+Py). Fld lightly altered to sericite	Sanidine (44), Chlorite (28), Quartz (16), Ferrosilite (4), Pyrite (3), Muscovite (2)
COM-05	104° 49' 12.6"	21° 17' 03.2"	Rhyolite CxLT	No petrography	Orthoclase (78), Ferrosilite (10), Illite (4), Pyrite (3), Chlorite (2), Quartz (1)
COM-04A	104° 48' 58.0"	21° 19' 39.5"	Rhyolite FbT	No petrography	Muscovite (42), Sanidine (41), Quartz (9), Clinoferrosilite (7)
COM-04B	104° 48' 57.7"	21° 19' 30.7"	Rhyolite FbT	No petrography	Muscovite (45), Sanidine (44), Clinoferrosilite (8), Quartz (3)
COM-04C	104° 48' 52.5"	21° 19' 26.8"	Rhyolite FbT	60% gms (recrystallised+Fld+Qz), 30% Vs	Muscovite (74), Sanidine (21), Clinoferrosilite (3), Illite (0.9)
COM-04D	104° 48' 47.1"	21° 19' 21.4"	Rhyolite FbT	50% gms (recrystallised and sericitized), 30% Ph (Fld+Qz+B), and Vs. Fld lightly altered to sericite	Quartz (50), Sanidine (34), Muscovite (14), Clinoferrosilite (2)
COM-04E	104° 48' 26.7"	21° 19' 07.4"	Rhyolite FbT	No petrography	Sanidine (35), Muscovite (30), Quartz (19), Illite (8), Clinoferrosilite (8)
COM-04F	104° 48' 04.9"	21° 18' 43.8"	Rhyolite FbT	No petrography	Sanidine (64), Quartz (27), Clinoferrosilite (5), Illite (3)
COM-04G	104° 48' 20.5"	21° 18' 24.1"	Rhyolite FbT	70% gms (recrystallised and sericitized+Qz), 5% (Fld+Op), 30% Vs	Sanidine (46), Quartz (21), Muscovite (16), Clinoferrosilite (9), Illite (7)
COM-04H	104° 48' 22.9"	21° 17' 53.6"	Rhyolite FbT	No petrography	Sanidine (48), Quartz (21), Muscovite (15), Clinoferrosilite (12), Illite (5)
COM-04J	104° 49' 08.3"	21° 17' 28.1"	Rhyolite FbT	No petrography	Sanidine (48), Quartz (21), Muscovite (15), Clinoferrosilite (12), illite (5)

Note: Ph-phenocrysts are defined as >0.3mm; gms-groundmass; Fld-Feldspars; Gl-glass; Qz-Quartz; Tf-Tuff; S-Sericite; Lt-Lapilli tuff; Py-Pyrite; Pu-Pumice; Op-Opaque minerals; Vs-Vesicles.

**Tabla 2.** Geoquímica de elementos mayores y norma CIPW de las riolitas del área de estudio. Se uso el programa propuesto por Verma et al., (2013).

Sample	COM-01A	COM-01B	COM-01C	COM-02	COM-05	COM-04A	COM-04B
Rock type	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite
Texture	CxLT	CxLT	CxLT	CxLT	CxLT	FbT	FbT
Long. (W)	104° 49' 10.6"	104° 49' 08.7"	104° 49' 09.3"	104° 49' 08.5"	104° 49' 12.6"	104° 48' 58.0"	104° 48' 57.7"
Lat. (N)	21° 16' 54.5"	21° 16' 54.9"	21° 16' 54.8"	21° 17' 00.6"	21° 17' 03.2"	21° 19' 39.5"	21° 19' 30.7"
SiO <sub>2</sub>	62.344	64.481	61.560	65.222	66.977	72.319	71.068
TiO <sub>2</sub>	0.249	0.229	0.255	0.263	0.209	0.099	0.089
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.657	25.474	22.384	19.070	18.463	15.420	16.650
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	0.502	0.418	1.230	1.534	0.755	2.192	1.722
MnO	0.012	0.009	0.015	0.073	0.019	0.017	0.023
MgO	0.115	0.129	0.134	0.443	0.114	0.001	0.001
CaO	0.008	0.004	0.431	0.477	0.228	0.006	0.015
Na <sub>2</sub> O	0.041	0.032	2.004	1.941	1.691	2.276	2.207
K <sub>2</sub> O	5.849	5.052	8.720	8.783	8.923	4.286	5.051
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.021	0.014	0.093	0.120	0.058	0.007	0.016
LOI	2.806	2.767	1.908	1.231	1.601	2.745	2.213
SiO <sub>2adj</sub>	65.104	67.300	63.633	66.675	68.776	74.964	73.475
TiO <sub>2adj</sub>	0.260	0.239	0.264	0.269	0.214	0.103	0.092
Al <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	27.837	26.587	23.138	19.494	18.959	15.984	17.214
Fe <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	0.139	0.115	0.395	0.487	0.240	0.705	0.553
FeO <sub>adj</sub>	0.347	0.289	0.789	0.973	0.481	1.410	1.105
MnO <sub>adj</sub>	0.013	0.010	0.016	0.075	0.020	0.018	0.024
MgO <sub>adj</sub>	0.120	0.135	0.138	0.453	0.117	0.001	0.001
CaO <sub>adj</sub>	0.008	0.004	0.445	0.488	0.234	0.007	0.016
Na <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	0.043	0.033	2.071	1.984	1.737	2.359	2.282
K <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	6.108	5.273	9.014	8.979	9.163	4.443	5.222
P <sub>2</sub> O <sub>5adj</sub>	0.022	0.015	0.096	0.123	0.059	0.007	0.017
Sum <sub>adj</sub>	100	100	100	100	100	100	100
Q	41.245	46.698	15.872	18.906	22.929	43.388	39.547
Or	36.095	31.160	53.269	53.061	54.147	26.254	30.859
Ab	0.366	0.283	17.526	16.788	14.697	19.960	19.311
An	0.000	0.000	1.580	1.617	0.775	0.000	0.000
C	21.154	20.825	9.394	5.919	5.900	7.295	7.807
HyM	0.298	0.336	0.345	1.129	0.292	0.003	0.003
HyF	0.117	0.057	0.717	1.080	0.367	1.869	1.465
Hy	0.415	0.393	1.061	2.208	0.659	1.872	1.468
Mt	0.201	0.167	0.572	0.706	0.349	1.022	0.801
Il	0.494	0.454	0.501	0.510	0.407	0.196	0.175
Ap	0.015	0.007	0.224	0.285	0.137	0.012	0.028
Mg#	38.063	45.433	23.809	45.347	30.306	0.131	0.166
FeO <sup>t</sup> /MgO	3.945	2.911	8.271	3.115	5.944	1972.132	1549.829

(Continued)

Sample Rock type Texture Long. (W) Lat. (N)	COM-04C Rhyolite FbT 104° 48' 52.5" 21° 19' 26.8"	COM-04D Rhyolite FbT 104° 48' 47.1" 21° 19' 21.4"	COM-04E Rhyolite FbT 104° 48' 26.7" 21° 19' 07.4"	COM-04F Rhyolite FbT 104° 48' 04.9" 21° 18' 43.8"	COM-04G Rhyolite FbT 104° 48' 20.5" 21° 18' 24.1"	COM-04H Rhyolite FbT 104° 48' 22.9" 21° 17' 53.6"	COM-04J Rhyolite FbT 104° 49' 08.3" 21° 17' 28.1"
SiO <sub>2</sub>	71.843	73.582	72.458	71.303	71.950	74.157	68.639
TiO <sub>2</sub>	0.099	0.100	0.096	0.091	0.087	0.105	0.066
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.524	13.449	15.459	16.569	16.003	14.332	19.179
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	2.091	2.101	2.039	1.774	1.675	2.152	1.455
MnO	0.037	0.031	0.016	0.023	0.021	0.021	0.031
MgO	0.001	0.001	0.001	0.011	0.001	0.001	0.001
CaO	0.012	0.008	0.013	0.040	0.005	0.006	0.005
Na <sub>2</sub> O	3.213	3.642	2.990	2.728	3.350	3.207	2.664
K <sub>2</sub> O	4.520	4.645	4.045	4.861	5.334	4.280	4.997
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.006	0.004	0.005	0.007	0.008	0.004	0.012
LOI	2.112	1.348	2.242	1.901	0.918	1.834	2.069
SiO <sub>2adj</sub>	73.912	75.532	74.714	73.292	73.182	75.580	70.799
TiO <sub>2adj</sub>	0.102	0.103	0.099	0.094	0.088	0.107	0.068
Al <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	15.971	13.805	15.940	17.031	16.277	14.607	19.783
Fe <sub>2</sub> O <sub>3adj</sub>	0.667	0.669	0.652	0.566	0.529	0.681	0.466
FeO <sub>adj</sub>	1.335	1.338	1.305	1.132	1.057	1.361	0.931
MnO <sub>adj</sub>	0.038	0.032	0.017	0.024	0.021	0.022	0.032
MgO <sub>adj</sub>	0.001	0.001	0.001	0.012	0.001	0.001	0.001
CaO <sub>adj</sub>	0.012	0.008	0.013	0.041	0.005	0.006	0.005
Na <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	3.305	3.738	3.084	2.805	3.407	3.269	2.747
K <sub>2</sub> O <sub>adj</sub>	4.650	4.768	4.170	4.997	5.425	4.362	5.155
P <sub>2</sub> O <sub>5adj</sub>	0.006	0.004	0.006	0.007	0.008	0.004	0.012
Sum <sub>adj</sub>	100	100	100	100	100	100	100
Q	36.058	34.714	40.018	37.086	31.964	39.049	34.510
Or	27.482	28.179	24.646	29.531	32.059	25.777	30.461
Ab	27.968	31.631	26.092	23.731	28.829	27.660	23.248
An	0.019	0.016	0.028	0.157	0.000	0.006	0.000
C	5.492	2.488	6.342	6.951	4.800	4.506	9.684
HyM	0.003	0.003	0.003	0.029	0.003	0.003	0.003
HyF	1.802	1.794	1.724	1.500	1.398	1.800	1.273
Hy	1.804	1.796	1.727	1.529	1.401	1.802	1.276
Mt	0.968	0.970	0.946	0.820	0.766	0.987	0.675
Il	0.194	0.196	0.188	0.178	0.167	0.204	0.129
Ap	0.015	0.009	0.013	0.016	0.009	0.009	0.009
Mg#	0.137	0.137	0.141	1.805	0.171	0.133	0.197
FeO <sup>t</sup> /MgO	1881.244	1890.303	1834.681	140.611	1506.819	1936.178	1309.282

**Tabla 3.** Geoquímica de elementos traza y tierras raras REE de las riolitas del área de estudio.

Sample	COM-01A	COM-01B	COM-01C	COM-02	COM-05	COM-04A	COM-04B
Rock type	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite
Texture	CxLT	CxLT	CxLT	CxLT	CxLT	FbT	FbT
Long. (W)	104° 49' 10.6"	104° 49' 08.7"	104° 49' 09.3"	104° 49' 08.5"	104° 49' 12.6"	104° 48' 58.0"	104° 48' 57.7"
Lat. (N)	21° 16' 54.5"	21° 16' 54.9"	21° 16' 54.8"	21° 17' 00.6"	21° 17' 03.2"	21° 19' 39.5"	21° 19' 30.7"
La	31.3	19.4	34.7	29.7	27.2	7.8	33.6
Ce	58.1	25.5	37.3	55.4	52.4	46.4	52.9
Pr	6.46	4.91	7.02	6.35	5.86	2.99	11
Nd	24.7	17.5	26.4	22.6	21.5	12.8	39.9
Sm	3.79	3.3	4.42	3.89	3.89	3.76	8.8
Eu	0.64	0.6	0.76	0.6	0.57	0.04	0.07
Gd	2.96	2.98	3.42	3.23	2.97	3.4	7.08
Tb	0.49	0.49	0.58	0.51	0.46	0.8	1.32
Dy	2.59	3.06	3.13	2.95	2.72	6.08	8.02
Ho	0.59	0.67	0.67	0.61	0.55	1.31	1.57
Er	2.02	1.92	2.23	1.78	1.74	4.34	5.22
Tm	0.3	0.3	0.34	0.28	0.29	0.81	0.84
Yb	2.23	2.36	2.54	2.04	1.89	6.05	5.78
Lu	0.35	0.32	0.35	0.3	0.28	0.98	0.75
Ba	245	404	1155	1140	1155	11.5	17.6
Cr	30	30	30	30	40	30	20
Cs	4.1	3.13	4.2	4.98	5.31	1.51	1.99
Hf	5.3	4.8	6.1	6.8	5.1	13.5	13.4
Nb	10.1	8.3	9.9	9.7	9	49.8	46.9
Pb			13	32	25	13	26
Rb	156.5	122	237	259	265	140	151.5
Sc	3	3	4	4	3	1	1
Sr	9.9	8.8	159.5	179	106.5	2.7	2.2
Ta	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	3.5	3.4
Th	11.6	9.83	11.55	11	11.05	18.15	17.05
U	3.61	3.32	3.6	3.55	3.47	4.17	4.78
V	22	15	23	23	20		
Y	17.7	18.6	18.7	17	16.2	25.2	38.2
Zr	197	180	234	257	188	451	427
W	2	6	2	2	2	2	2

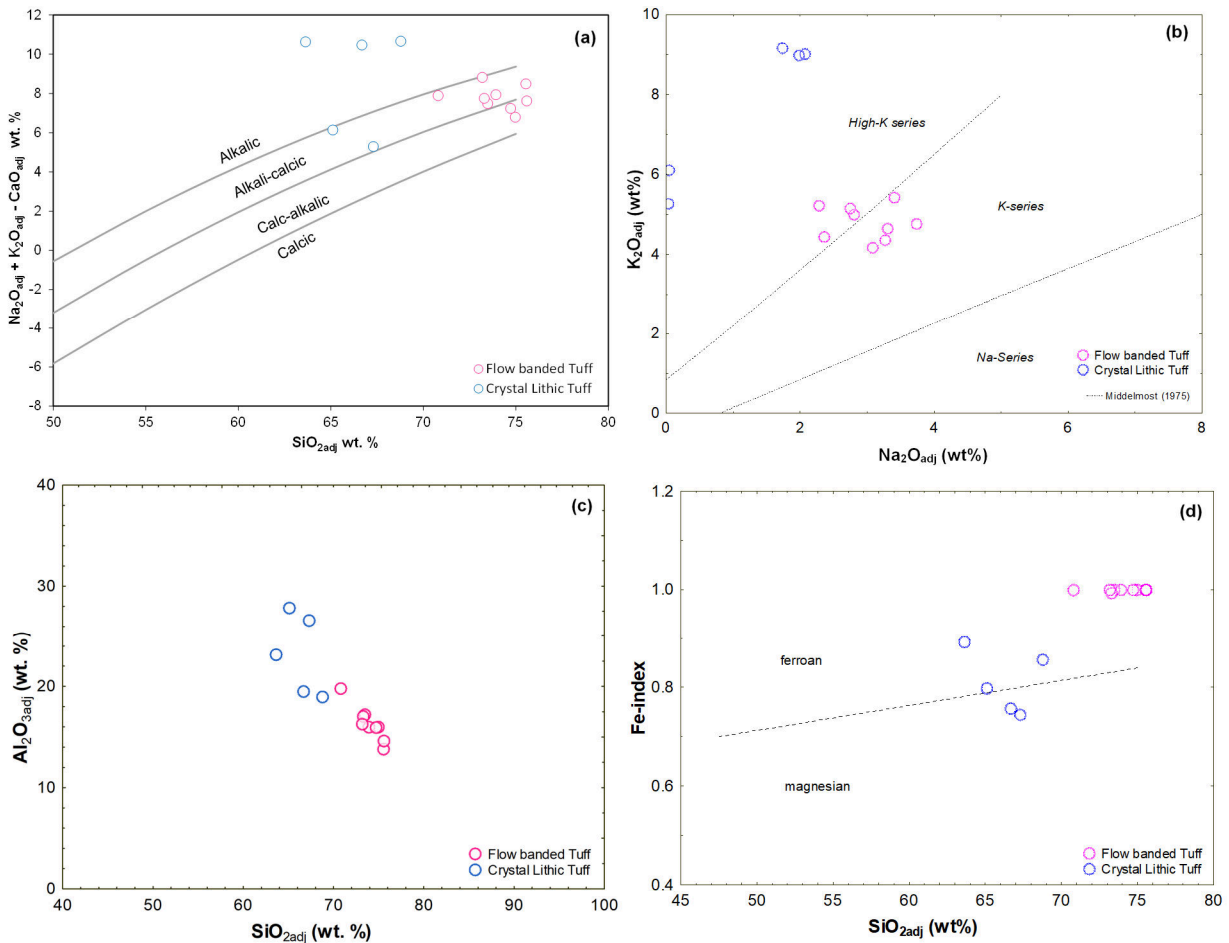
(Continued)

Sample	COM-04C	COM-04D	COM-04E	COM-04F	COM-04G	COM-04H	COM-04J
Rock type	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite
Texture	FbT	FbT	FbT	FbT	FbT	FbT	FbT
Long. (W)	104° 48' 52.5"	104° 48' 47.1"	104° 48' 26.7"	104° 48' 04.9"	104° 48' 20.5"	104° 48' 22.9"	104° 49' 08.3"
Lat. (N)	21° 19' 26.8"	21° 19' 21.4"	21° 19' 07.4"	21° 18' 43.8"	21° 18' 24.1"	21° 17' 53.6"	21° 17' 28.1"
La	11.3	137.5	3.9	9.2	121	9.3	19
Ce	100	120	31.8	59.3	55.3	66	93.6
Pr	3.92	31.8	1.82	3.36	27.2	2.7	6.16
Nd	17.8	122	8	14.4	95.8	9.1	23.9
Sm	5.07	23.1	2.82	3.98	18.2	2.16	6.43
Eu	0.05	0.35	0.03	0.08	0.24	0.04	0.05
Gd	4.92	19.05	2.91	3.73	15	1.79	5.23
Tb	1	2.97	0.69	0.84	2.74	0.46	1.13
Dy	7.49	18.55	5.03	6.02	18.55	3.38	7.4
Ho	1.51	3.62	1.08	1.22	3.68	0.79	1.61
Er	4.81	10.9	3.43	4	11.55	2.88	4.7
Tm	0.78	1.62	0.62	0.69	1.84	0.49	0.79
Yb	5.2	9.99	4.87	4.87	13.1	3.74	5.65
Lu	0.78	1.49	0.78	0.78	1.96	0.56	0.76
Ba	17.1	32	13.8	20	17.8	15.8	29.4
Cr	30	30	30	30	30	20	30
Cs	1.09	1.89	1.3	1.46	1.52	1.57	2.48
Hf	12.8	12.3	13.1	12.8	11.6	13.3	13.3
Nb	49	45.5	46.4	48.5	44.6	47.7	54.9
Pb	21	20	14	19	17	24	36
Rb	144.5	154	129	156.5	151	139.5	164
Sc	1	1	1	1	1	1	1
Sr	2.2	2.4	2.2	4.8	2.1	2.8	1.3
Ta	3.4	3.4	3.4	3.4	3.2	3.4	4
Th	17.7	16.55	16.75	16.85	15.85	16.7	18.5
U	5.19	4.9	3.92	3.93	3.99	4.65	5.96
V						5	
Y	35.2	108.5	20.7	24.5	99	17.9	28.6
Zr	438	407	423	406	399	451	370
W	2	1	3	1	2	1	3



### 5.3.1 Geoquímica de elementos mayores

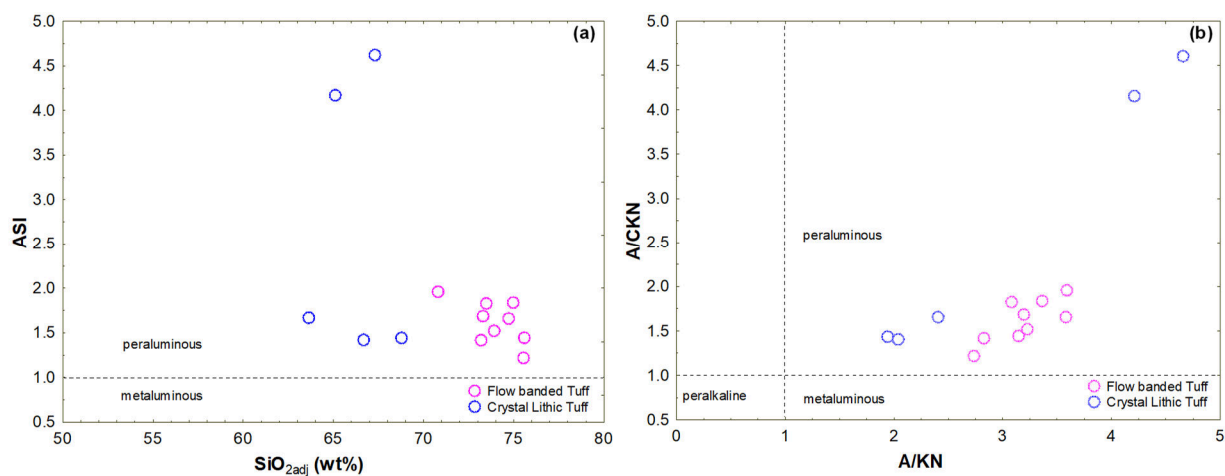
En el diagrama de  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra el índice cal-alcalino modificado (MALI) por Frost & Frost, (2001) (Figura 4a). La toba lítica tienen valores de [63.63–68.77 wt%  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$ ] y [5.30–10.66 wt %  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ ], donde se distinguen dos muestras que se encuentran en el rango alcalino-cálcico y tres en el rango alcalino. Mientras que la toba bandeada tienen valores [70.79–75.58 wt %  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$ ] y [6.79–8.82 wt %  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ ], estas muestras se agrupan en el rango cal-alcalino y alcalino-cálcico. La toba bandeada a diferencia de la toba lítica tiene mayor contenido de sílice.



**Figura 4.** (a) Diagrama MALI (Índice modificado cal-alcalino:  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ , Frost & Frost, 2001) para la secuencia de la toba lítica y la toba bandeada. (b) Relación  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{adj}}$  contra  $\text{K}_2\text{O}_{\text{adj}}$ , la toba lítica son altamente potásicas mientras que la toba bandeada es potásica. (c) Relación  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra  $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{adj}}$  la toba lítica aumenta su contenido de aluminio con respecto a la toba bandeada. (d)  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra Fe-index ( $\text{Fe-index} = (\text{FeO}_{\text{adj}} + 0.9\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{adj}}) / (\text{FeO}_{\text{adj}} + 0.9\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{adj}} + \text{MgO}_{\text{adj}})$ ), la toba lítica muestra un ligero enriquecimiento en hierro y la toba bandeada es férrica.

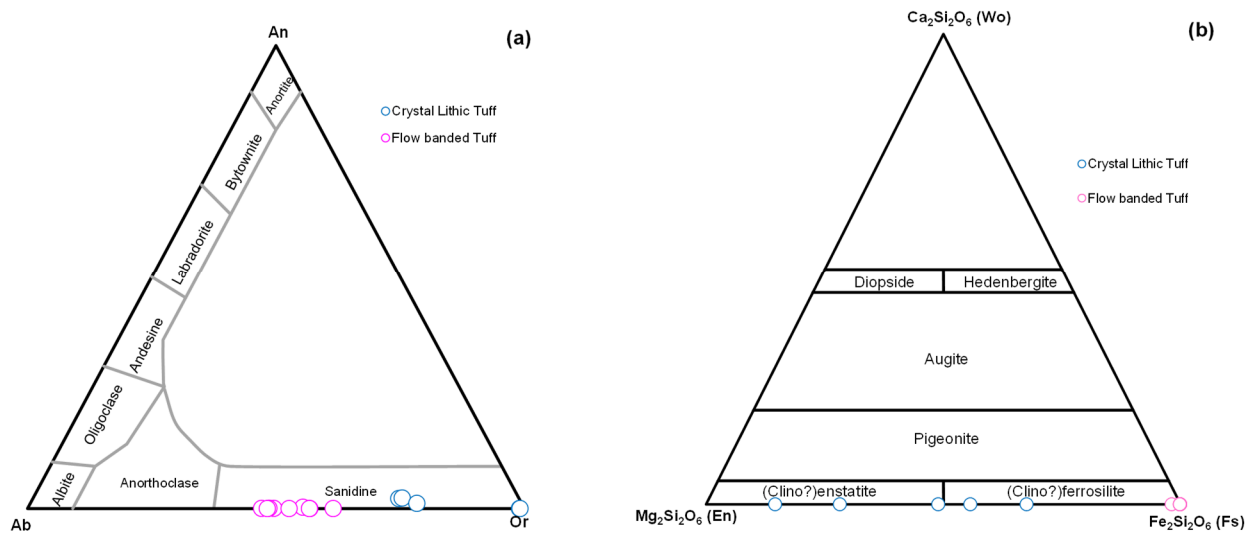
En la relación  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{adj}}$  contra  $\text{K}_2\text{O}_{\text{adj}}$  (**Figura 4b**) se tiene que la toba lítica es altamente potásica mientras que la toba bandeada se encuentra entre la serie potásica y altamente potásica, lo que indica que algunas muestras aumentan su contenido en  $\text{K}_2\text{O}$ . En la relación de  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra  $\text{Al}_2\text{O}_{\text{adj}}$  se tiene que la toba lítica tiene mayor contenido de aluminio a diferencia de la toba bandeada (**Figura 4c**). En el diagrama de índice de Fe (**Figura 4d**) se tiene que tanto la toba lítica como la toba bandeada son férricas, solo dos muestras de la toba lítica son ligeramente magnesianas. En campo esto se puede distinguir con los bandeamientos que se encuentran ligeramente oxidados.

En los diagramas composicionales de  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra el índice de saturación de aluminio (ASI) y de concentraciones molares de los elementos A/KN ( $\text{Al}/\text{K}+\text{Na}$ ) contra A/CKN ( $\text{Al}/\text{Ca}+\text{K}+\text{Na}$ ) ambos por [Frost & Frost, \(2008\)](#) se tiene que tanto la toba lítica y la toba bandeada son peraluminosas (**Figura 5a-b**). La toba lítica tiene menor contenido de aluminio a diferencia de la toba bandeada, como se observa también en el diagrama donde  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra  $\text{Al}_2\text{O}_{\text{adj}}$ .



**Figura 5.** (a) Diagrama composicional  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  contra ASI (Índice de saturación de aluminio =  $\text{Al}/(\text{Ca} + 1.67\text{P} + \text{Na} + \text{K})$ ; [Frost & Frost, 2008](#)). (b) Diagrama composicional A/KN ( $\text{Al}/\text{K}+\text{N}$  molar) contra A/CKN ( $\text{Al}/\text{Ca}+\text{K}+\text{Na}$  molar); [MacDonald, 1974](#). Ambas secuencias de toba lítica y toba bandeada son peraluminosas.

En el diagrama ternario An–Ab–Or (**Figura 6a**). La mayoría de los feldespatos que se encuentran tanto en la toba lítica como en la toba bandeada se agrupan en el campo de los sanidinos. En la identificación de piroxenos con el diagrama de Morimoto (1988) (**Figura 6b**) los clinopiroxenos corresponden a clino-estantita para tres muestras de la toba lítica (COM-01A, COM-01B y COM-02) y dos clino-ferrosilita (COM-01C y COM-05). En la toba bandeada la mayoría de los clinopiroxenos corresponden a clino-ferrosilita.



**Figura 6. (a)** Diagrama ternario An-Ab-Or se identifican para la toba lítica y la toba bandeada feldespatos que corresponden a sanidinos. **(b)** Diagrama de Morimoto (1988) la toba lítica tiene clinopiroxenos que se agrupan en clino-estantita, mientras que para la toba bandeada se agrupan en clino-ferrosilita.

### 5.3.2 Índice de alteración usando elementos mayores

Como se observó en la petrografía y en la mineralogía obtenida por XRD los minerales que constituyen tanto a la toba lítica como a la toba bandeada como los feldespatos se encuentran reemplazados sericita, así como en la matriz, así con una ligera recristalización de cuarzo. Para poder distinguir si estas muestras pasaron por un proceso de alteración, se calculó el Índice de

Alteración (AI) (Large, et al., 2001; Gifkins, C. et al., 2005). Donde AI se calcula con la siguiente formula:

$$AI = \frac{100 (MgO + K_2O)}{MgO + K_2O + CaO + Na_2O}$$

Este índice de alteración indica que sí se tiene un valor alto (<60) se relaciona con una intensa alteración hidrotermal de sericita y clorita. Donde los valores altos se reflejan por los altos contenidos de MgO y K<sub>2</sub>O relativos a CaO y Na<sub>2</sub>O. En contraste, un valor bajo (<30) se relacionan con altos contenidos de CaO y Na<sub>2</sub>O y es debido a una intensa alteración de albita y calcita típica de una alteración diagenética regional o metamorfismo (Gifkins, C. et al., 2005).

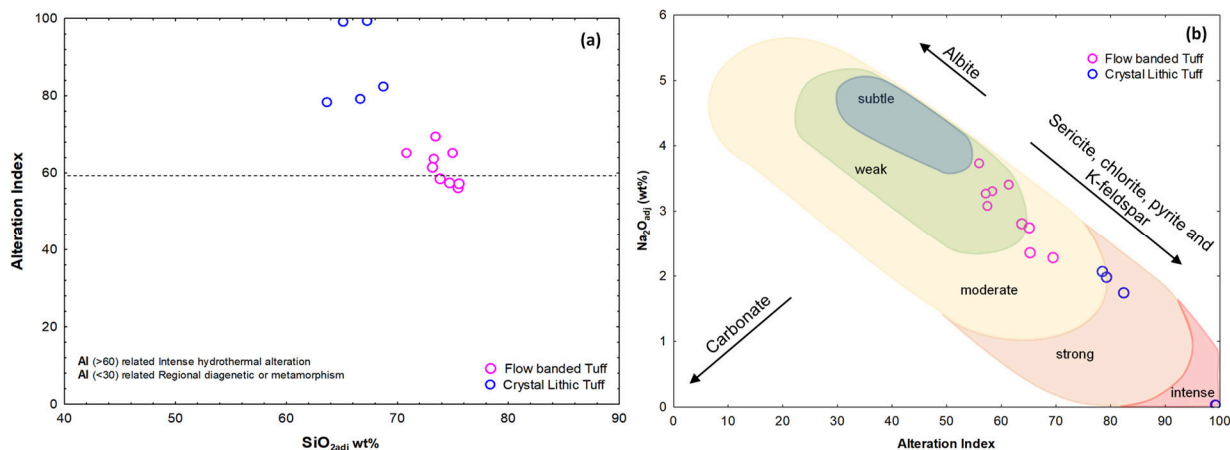
En la **Tabla 4** se muestran los cálculos obtenidos del índice de alteración (AI) y se resume la intensidad de alteración descritos por Gifkins, C. et al., (2005). La intensidad de alteración que se basa en la preservación de la textura original de la roca y se pueden correlacionar con las observadas en la petrografía.

Con los índices de alteración para la toba lítica y la toba bandeada se realizaron los diagramas de SiO<sub>2adj</sub> contra el índice de alteración (AI) y el índice de alteración (AI) contra Na<sub>2</sub>O (Large et al., 2001; Gifkins, C. et al., 2005). En el diagrama de SiO<sub>2adj</sub> contra el índice de alteración (AI) (**Figura 7a**) se tiene que la toba lítica y la toba bandeada tienen un valor <60 en el índice de alteración lo que muestra que ambas tobas son afectadas por alteración hidrotermal. En el diagrama de índice de alteración (AI) contra Na<sub>2</sub>O, se delimitaron los campos de la intensidad de alteración (**Figura 7b**) y se observa una tendencia lineal tanto en la toba lítica como en la bandeada. Donde seis muestras de la toba bandeada tienen una intensidad de alteración débil con valores de [56.00–63.77 AI] a una intensidad moderada con valores de [65.19–69.44 AI]. Con respecto a la toba lítica se tiene una intensidad de alteración de moderada en dos muestras con valores de [78.43–82.47

AI], solo una muestra tiene alteración fuerte [82.47 AI] y dos muestras con intensidad de alteración intensa [99.17–99.30 AI]. Estos índices de alteración se encuentran en la figura 3a-f de las descripciones petrográficas.

**Tabla 4.** Índice de alteración (AI) de las dos secuencias de riolitas identificadas en el área de estudio y el resumen de la intensidad de alteración ([Gifkins et al., 2005](#))

Sample Texture	AI	Alteration intensity
COM-01A (CxLT)	99.17	Intense Not well defined the primary rock texture
COM-01B (CxLT)	99.30	Intense Not well defined the primary rock texture
COM-01C (CxLT)	78.43	Moderate Textures modified, i.e., spherulites, flow banding, some clasts recrystallised
COM-02 (CxLT)	79.23	Moderate Textures modified, i.e., spherulites, flow banding, some clasts recrystallised
COM-05 (CxLT)	82.47	Strong Devitrification, replacement of groundmass, matrix and phenocrysts. Sparces fiamme and clasts outline preserved
COM-04A (FbT)	65.25	Moderate Textures modified, i.e., spherulites, flow banding, some clasts recrystallised
COM-04B (FbT)	69.44	Moderate Textures modified, i.e., spherulites, flow banding, some clasts recrystallised
COM-04C (FbT)	58.37	Weak Good preservation of most textures (groundmass, matrix, and phenocrysts)
COM-04D (FbT)	56.00	Weak Good preservation of most textures (groundmass, matrix, and phenocrysts)
COM-04E (FbT)	57.39	Weak Good preservation of most textures (groundmass, matrix, and phenocrysts)
COM-04F (FbT)	63.77	Weak Textures modified, i.e., spherulites, flow banding, some clasts recrystallised
COM-04G (FbT)	61.39	Weak Good preservation of most textures (groundmass, matrix, and phenocrysts)
COM-04H (FbT)	57.11	Weak Good preservation of most textures (groundmass, matrix, and phenocrysts)
COM-04J (FbT)	65.19	Moderate Textures modified, i.e., spherulites, flow banding, some clasts recrystallised



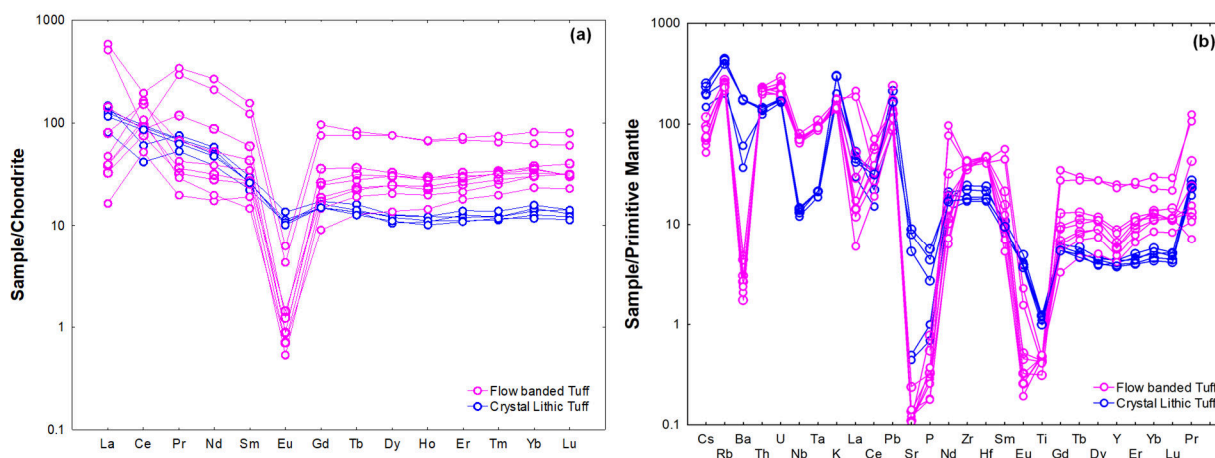
**Figura 7. (a)** Diagrama de SiO<sub>2adj</sub> contra AI (Índice de alteración). La línea intermitente marca el límite entre la alteración hidrotermal y el metamorfismo o diagénesis regional. Se observa la toba lítica presenta valores <60 indicando que estas rocas pasan por un proceso de alteración hidrotermal, mientras que la toba bandeada se encuentra menos afectada por esta alteración. **(b)** Diagrama Índice de alteración (AI) contra Na<sub>2</sub>O<sub>adj</sub> se observa que la toba lítica tiene una intensidad de alteración de fuerte a intensa, mientras que la toba bandeada tiene una intensidad de alteración de débil a moderada, que se asocia a los minerales de reemplazamiento que se observan tanto en la petrografía como en la difracción de Rayos-X (XRD). Modificado de [Large et al., \(2001\)](#); [Gifkins, C. et al., \(2005\)](#).

### 5.3.3 Normalización condrita y manto primitivo

En la normalización de condrita ([McDonough & Sun, 1995](#)) se obtuvo que la toba lítica muestra un enriquecimiento en las tierras ligeras (LREE) a diferencia de las tierras pesadas (HREE) [(La/Yb)<sub>N</sub>=5.58–9.89] y con una anomalía de Eu (Eu/Eu\*= 0.49–0.57). En la toba bandeada se observa un ligero enriquecimiento en las tierras pesadas a diferencia de las tierras ligeras [(La/Yb)<sub>N</sub>= 0.54–9.35] con una anomalía más marcada de Eu (Eu/Eu\*= 0.02–0.06) y anomalías negativas/positivas de Ce (Ce/Ce\*= 0.22–3.63) que puede corresponder a la interacción de fluidos hidrotermales alterando a estas rocas. En este mismo patrón se observan dos muestras (COM-04D y COM-04G) con enriquecimiento tanto en LREE y HREE (**Figura 8a**).

En la normalización del manto primitivo ([McDonough & Sun, 1995](#)) la toba lítica muestra un enriquecimiento en elementos litófilos de grandes-iones (LILE) Rb y K y un ligero empobrecimiento en Ba y Sr con una anomalía de Nb (Nb/Nb\*= 0.12–0.34) y Ta (Ta/Ta\*= 0.18–

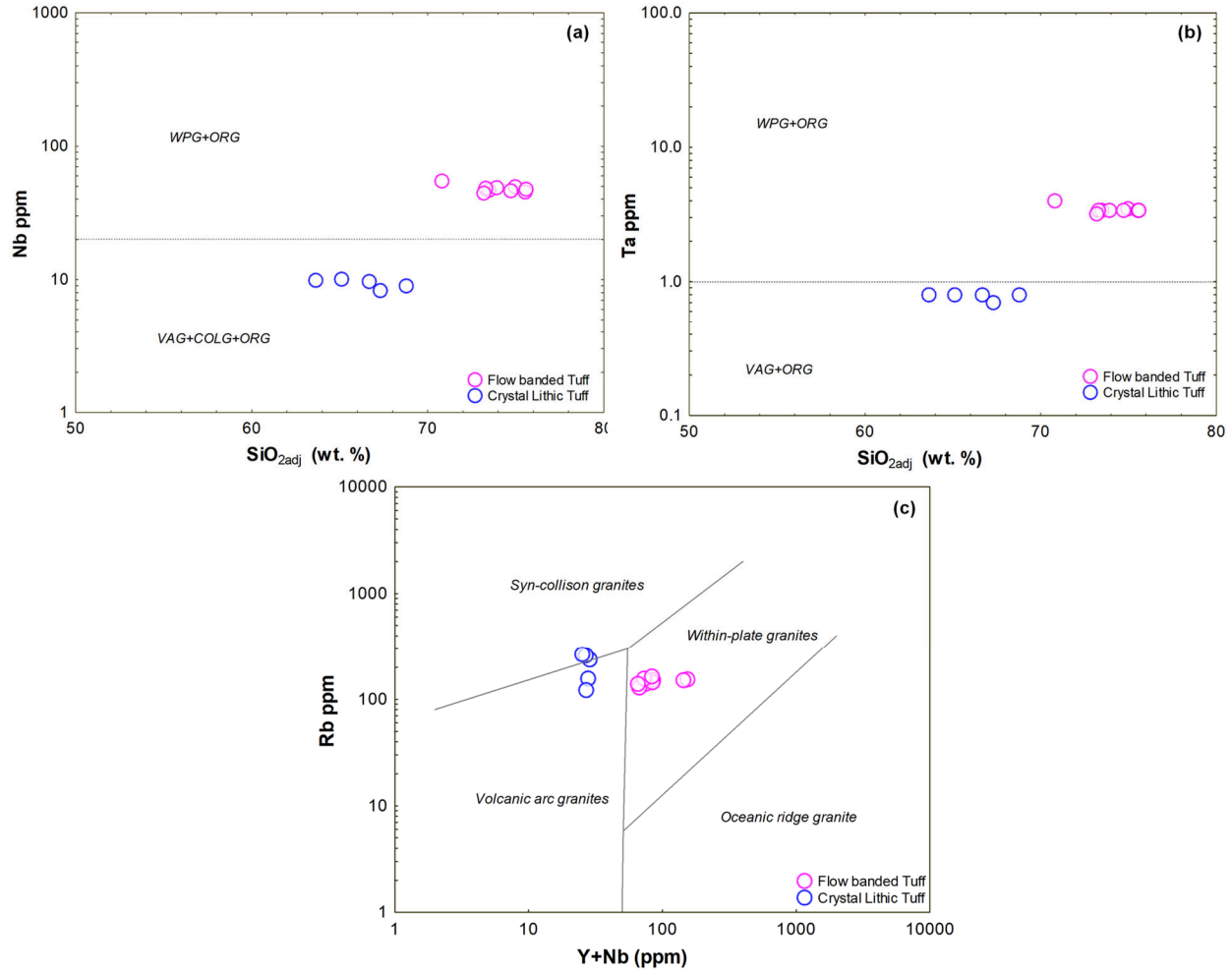
0.50) estos dos últimos elementos son diagnósticos para volcanismo de arco (Pearce, 2014). La toba bandeada también muestra un enriquecimiento en los mismos elementos de Rb y K y empobrecimiento en Ba y Sr. En cuanto al Nb y Ta estos son más enriquecidos a diferencia de la toba lítica (Figura 8b).



**Figura 8. (a)** Elementos de tierras raras (REE) normalizados a condrita (McDonough & Sun, 1995). La toba lítica presenta un patrón enriquecido en LREE con respecto a HREE mientras que la toba bandeada muestra un fraccionamiento a lo largo de LREE con un enriquecimiento en HREE que la diferencia de la toba lítica. **(b)** Normalización del manto primitivo (McDonough & Sun, 1995) la toba lítica presenta anomalías de Nb, Ta y Sr, mientras que la toba bandeada tiene una anomalía más marcada de Ba, Sr y Eu.

### 5.3.4 Diagramas multi-elementos

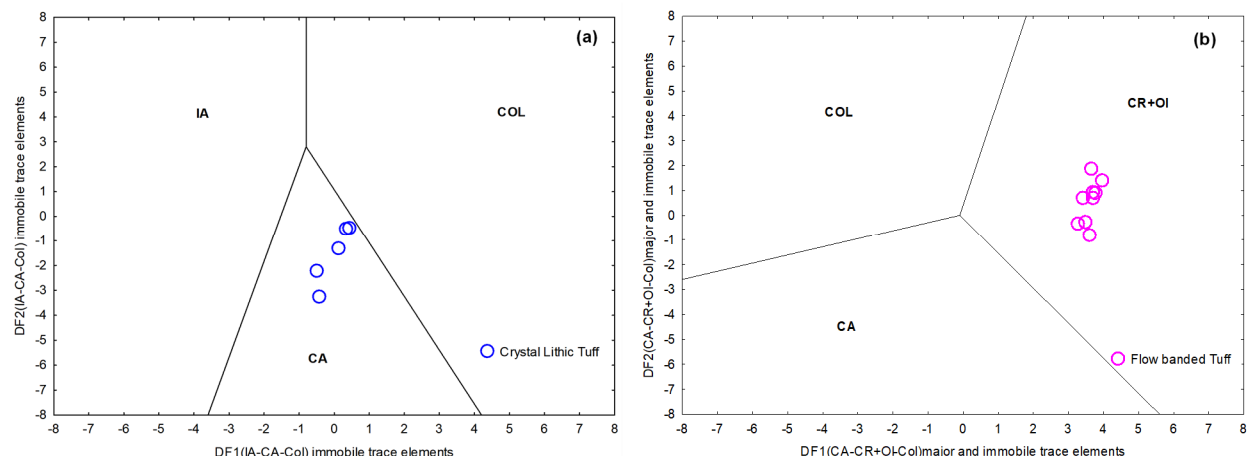
En las relaciones de  $\text{SiO}_2$  contra Nb y Ta (Pearce et al., 1984) (Figura 9a-b) se tiene que la toba lítica evoluciona de un granito que se encuentra en un arreglo de arco volcánico. Mientras que la toba bandeada evoluciona de un granito de intraplaca. En la relación  $(Y + Nb)$  contra Rb se observa el mismo arreglo que en los diagramas de  $\text{SiO}_2$  contra Nb y Ta, tanto para la toba lítica y la toba bandeada (Figura 9c). Esto indica que los granitos de intraplaca provienen de fuentes enriquecidas del manto, el fraccionamiento de los anfíboles ocurre durante la génesis de granitos de arco volcánico y el enriquecimiento de los volátiles enriquecidos en Rb y Ta durante la génesis de granitos syn-colisión (Pearce et al., 1984).



**Figura 9. (a)** Diagrama  $SiO_{2adj}$  contra Nb, la toba lítica se agrupa en el campo de arco volcánico (VAG+COLG+ORG) mientras que la toba bandeada se agrupa en el campo de intraplaca (WPG+ORG). Este mismo agrupamiento se observa en **(b)** Diagrama  $SiO_{2adj}$  contra Ta y **(c)** Diagrama (Y+Nb) contra Rb. WPG–Whitin-plate granite; COLG–Collison granite; ORG–Ocean ridge granite.

Estos diagramas se correlacionaron con los diagramas multidimensionales tectónicos para magmas ácidos e intermedios (Verma et al., 2015). La toba lítica se agrupa en el campo de un margen de arco continental (**Figura 10a**) y la toba bandeada en un margen de intraplaca (**Figura 10b**).





**Figura 10. (a)** Diagrama multidimensional usando los elementos traza inmóviles (Verma et al., 2015). La toba lítica se agrupa en el campo de un margen de arco volcánico. **(b)** Diagrama multidimensional usando elementos mayores e inmóviles. La toba bandeada se agrupa en el campo de un margen de intraplaca (Verma et al., 2015). Elementos mayores valores ajustados=(SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FEO, MNO, MGO, CAO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); elementos traza inmóviles (La, Ce, Sm, Yb, Nb, Ni, Th, V, Y, y Zr).

## 5.4 Isótopos de Rb–Sr

Se obtuvieron tres datos isotópicos de la toba bandeada (Tabla 5). La toba bandeada muestra valores iniciales de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.715497–0.716855) y valores positivos  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  de +3.8 y +4.7. Estos valores fueron calculados con  $t=4.97$  Ma (Frey et al., 2007).

**Tabla 5.** Composición isotópica Sr y Nd de las riolitas en el área de estudio.

Sample	Texture	Age (Ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$	$\epsilon_{\text{Nd}_t}$
COM-04A	FbT	4.97*	129.50	6.99	53.6837	0.719936	3	0.716147	3.28	10.91	0.1816	0.512830	2	0.512823	3.8
COM-04D	FbT	4.97*	136.85	7.95	49.8420	0.719015	4	0.715497	20.03	105.65	0.1146	0.512844	1	0.512839	4.1
COM-04G	FbT	4.97*	138.55	6.39	62.7943	0.721287	6	0.716855	15.46	84.18	0.1110	0.512876	2	0.512872	4.7

**Notes:** Rhy=Rhyolites. Reports values for  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$  are age corrected with their respectively age sample by Frey et al, (2007). For calculations  $\epsilon_{\text{Nd}}$ , CHUR we use the values taken from Faure (1977) for  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51263$  and  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1960$ . The  $\pm 2\sigma$  errors for individual instruments are multiplied by  $10^6$  for Sr and Nd.

## 6. Discusión

La unidad de riolitas que se encuentran en el área de estudio corresponden a la explosión voluminosa ignimbrítica que ocurre a lo largo del rift Tepic Zacoalco con edad de 4.97 Ma (Frey et al., 2007). Sin embargo, las rocas estudiadas en esta investigación se dividen en dos secuencias por presentar diferentes texturas en su formación. La primera secuencia es una toba lítica y la segunda es una toba bandeada. En la secuencia de la toba lítica se tiene el emplazamiento de mineralización por vetas de cuarzo con sulfuros de plata en las zonas de Miravalles, El Tejamanil, La Mesa y Tajitos que modifica la textura principal de la roca y la altera. En los diagramas de Índice de alteración (AI) (Tabla 4 y Figura 7a-b) se observa como la toba lítica aumenta en el grado de alteración con valores de 78.43 a 99.30 AI con una intensidad de alteración de intensa a moderada que se correlacionan con la petrografía donde se observa una matriz con devitrificación, escamas de illita (sericita) y en los cristales de feldespatos se observa este mismo reemplazamiento. Además de que se identificaron otros minerales como: moscovita, que reemplaza a los feldespatos y clorita reemplazando a los clinopiroxenos.

En la toba bandeada se tiene un Índice de alteración de 56.00 a 69.44 AI con una intensidad de alteración de débil a moderada (Tabla 4 y Figura 7a-b). En esta toba bandeada no se reportan zonas mineralizadas, pero puede ser que el ligero grado de alteración que se observa en la petrografía con la recristalización de la matriz, refleje un sistema hidrotermal distal mineralizante que no influye tanto en la toba bandeada como en la toba lítica.

En las relaciones Nb y Ta contra  $\text{SiO}_{2\text{adj}}$  e (Y+Nb) contra Rb (Figura 9a-c) y el diagrama multidimensional para magmas ácidos (Figura 10a) muestran que la toba lítica se emitió a partir de una cámara magmática que se generó en un ambiente de arco volcánico mientras que la toba bandeada se desarrolló en una cámara magmática que se formó en un margen de intraplaca. La

diferencia entre ambas secuencias en cuanto a su origen se puede interpretar de la siguiente manera: En el occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano se tuvieron dos pulsos de volcanismo silíceo relacionados con el *rifting* entre el Bloque Jalisco y la Placa Norteamericana. Este volcanismo inició ~7.5 Ma, después de un pulso mayor de volcanismo máfico en el Mioceno tardío. Este primer pulso de actividad silícea se emplaza en un periodo de baja actividad tectónica, donde el retroceso en la subducción de la Placa de Rivera favorece la fusión por descompresión de magmas máficos que se introducen en la corteza inferior que al ser calentados y fundidos forman magmas silíceos, en este caso complejos gabroicos que aparentemente se forman entre la corteza media e inferior. Mientras que el segundo pulso entre 4.9 y 2.9 Ma se da una fase extensional que favorece la erupción de magmas silíceos y en menor cantidad lavas máficas (Petroni, et al., 2014). Esta extensión se relaciona con el rift Tepic-Zacoalco que inicia en el Mioceno tardío y es más evidente su deformación antes del Cuaternario.

Con los isotopos de Sr-Nd para la toba bandeada se tienen grandes radios de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.715497–0.716855) que puede indicar mayor asimilación de la corteza continental a la vez que estas rocas están pasando por un proceso de alteración de débil a moderado.

## 7. Conclusiones

En el área de estudio se caracterizaron dos secuencias del volcanismo silíceo que se encuentran al noroeste del graben San Pedro-Ceboruco dentro del rift Tepic-Zacoalco, del cual se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se tiene una toba lítica que es alcalino-cálcica y una toba bandeada calcoalcalina. Ambas son férricas y peraluminosas.

- La toba lítica tiene un índice de alteración de intenso a moderado con valores de (78.43 a 99.30 AI) mientras que la toba bandeada tiene un índice de alteración de débil a moderado con valores de (56.00 a 69.44 AI). Lo que indica que ambas tobas pasan por un proceso de alteración hidrotermal que afecta la textura primaria de formación de estas, incluyendo el emplazamiento de vetas de cuarzo con sulfuros de plata en la toba lítica y de que esta alteración sea producto de la actividad volcánica de los alrededores.
- Los minerales de alteración identificados en ambas secuencias que reemplazan tanto a la matriz como a los feldespatos son: illita (sericita)-moscovita y los clinopiroxenos a clorita, y cuarzo, que recristaliza la matriz.
- Los elementos traza inmóviles Nb-Ta e Y-Rb y los diagramas multidimensionales TecDIA indican que el posible origen de estas secuencias es por el “remelting” o fusión parcial de una corteza de composición granítica. Sin embargo, se tienen dos diferentes ambientes de origen en ambas tobas. La toba lítica se generó en un ambiente de arco volcánico que puede corresponder al primer pulso de actividad silíceo relacionada con el retroceso de la Placa de Rivera. Mientras que la toba bandeada se generó en un ambiente de intraplaca que se puede relacionar con la fase extensional entre el Bloque Jalisco y la Placa Norteamericana, representado por el rift Tepic-Zacoalco.

## 8. Referencias

Aguilar-Nogales, M y Cedillo-Calvillo, R. (1983). Evaluación Geológico-Minera preliminar del área San Francisco, Municipios de Compostela y San Pedro Lagunillas, en el Estado de Nayarit. *Consejo de Recursos Minerales*. Archivo Técnico 180063, p 1-38. Servicio Geológico Mexicano. Archivo técnico histórico. Estado Nayarit, Municipio Compostela, código [1883CECR0001](#). Incluye 21 mapas.

Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58 (1), 27-81. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a2>

Camprubí, A. (2009). Major metallogenic provinces and epochs of Mexico: SGA News, 25, 1-20.

Camprubí, A. (2013). Tectonic and Metallogenetic History of Mexico. In Tectonics, Metallogeny, and Discovery: The North American Cordillera and Similar Accretionary Settings. *Society of Economic Geologist, Special Publications 17*, 201-243. <https://doi.org/10.5382/sp.17.06>

Cooke, D. R & Simmons, S.F. (2000). Characteristics and Genesis of Epithermal Deposits. In Gold in 2000. *SEG Review*, 13, 221-244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13>

Gifkins, C. C., Hermann, W. & Large, R. R. (2005). Altered volcanic rocks: a guide to description and interpretation. Centre for Ore Deposits Research, University of Tasmania, 271.

Ferrari & Rosas-Elguera (2000). Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: Tepic-Zacoalco rift revised. In H. Delgado-Granados, G. Aguirre-Diaz, & J.M. Stock, (Eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico 334* (1-23). Boulder, Colorado: Geological Society of America, Special Paper. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.41>

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Delgado-Granados, H., & Carmichael, I.S.E. (2007). A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(1-2), 49-64. <https://doi.org/10.1130/B25950.1>

Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., Nelson, S. A., Delgado-Granados, H., Mastin, L., & Wineberg, D. (2014).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Volcan Tepetitlic, western Mexico: Implications for the origin of zoned rhyodacite-rhyolite liquid erupted explosively from an andesite stratovolcano after a prolonged hiatus. *Bulletin of the Geological Society of America*, 126(1-2), 16-30. <https://doi.org/10.1130/B30790.1>

Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J., & Frost, C.D. (2001). A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42 (11): 2033-2048.

Frost, B.R., & Frost, C.D. (2008). A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology*, 49, 1955-1969. doi:10.1093/petrology/egn054.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. In: S.A. Alaniz-Álvarez, & A.F. Nieto-Samaniego (Eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 422(129-181), Geological Society of America, Special Paper. <https://doi.org/10.11330/2007.2422805>

Large, R.R., Gemmell, J.B., Paulick, H., & Huston, D.L. 2001. The Alteration Box Plot: A simple Approach to Understanding the Relationships between Alteration Mineralogy and Litho-geochemistry Associated with Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology*, 96, 957-971. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.5.957>

MacDonald, R. (1974). Nomenclature and petrochemistry of the peralkaline oversaturated extrusive rocks. *Bulletin of Volcanology*, 38, 498-516. <https://doi.org/10.1007/BF02596896>

McDonough, W. F., & Sun, S.S. (1995). The composition of the Earth, *Chemical Geology*, 120, 223-253.

- Mc Phie, J., Doyle, M., & Allen, R. (1993). *Volcanic Textures*. CODES, Hobart, 196 p.
- Morimoto, N. (1988). Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39, 55-76.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., & Tindle, A.G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the Tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4), 956-983.
- Pearce, J.A. (2014). Geochemical Fingerprinting of the Earth's Oldest Rocks. *Geology*, 42, 175-176. doi: 10.1130/focus022014.1
- Petrone, C. M. (2010). Relationship between monogenetic magmatism and stratovolcanoes in western Mexico: The role of low-pressure magmatic processes. *Lithos*, 119(3-4), 585-606. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.012>.
- Petrone, C.M., Orozco-Esquivel, T., & Ferrari, L. (2014). Petrogenesis and geodynamic significance of silicic volcanism in the western Trans-Mexico Volcanic Belt: role of gabbroic cumulates. *Contributions to Mineral and Petrology*, 167, 1006. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1006-6>.
- Ruiz-Mendoza, V., Verma, S.K., Torres-Sánchez, D., Barry, T.L., Moreno, J.A. & Torres-Hernández, J.R. (2021). Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Geological Journal*, 56, 4401-4428. doi:10.1002/gj.4194
- Servicio Geológico Mexicano (2007). Carta Geológico-Minera Xalisco F13-D31, Nayarit. 1:50,000. Primera edición, Servicio Geológico Mexicano, (SGM).
- Thompson, A.J., Thompson, J.F., & Dunne, K.P. (1996). Atlas of alteration: a field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals. St. John's, Nfld: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division
- Torres-Sánchez, D., Verma, S.K., Verma, S.P., Velasco-Tapia, F., & Torres-Hernández, J.M. (2019). Petrogenetic and tectonic implications of Oligocene–Miocene volcanic rocks from the Sierra de San Miguelito complex, central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 95, 102311.
- Verma, S.P. & Rivera-Gómez, M.A. (2013). Computer programs for the classification and nomenclature of igneous rocks. *Episodes*, 36, 115–124.
- Verma, S.P., Cruz-Huicochea, R., Díaz-González, L., & Verma, K.S. (2015). A new computer program TecDIA for multidimensional tectonic discrimination of intermediate and acid magmas and its application to the Bohemian Massif, Czech Republic. *Journal of Geosciences*, 60, 203–218. doi:10.3190/jgeosci.201
- Verma, S.P., Verma, S.K., Rivera-Gómez, M.A., Torres-Sánchez, D., Díaz-González, L., Amezcua-Valdez, A., ..., Pandarinath, K. (2018). Statistically coherent calibration of X-ray fluorescence spectrometry for major elements in rocks and minerals. *Journal of Spectroscopy*, Article ID 5837214, 1-13, <https://doi.org/10.1155/2018/5837214>.

Verma, S. K., Torres-Sánchez, D., Hernández-Martínez, K.R., Malviya, V.P. Singh, P. K., Torres-Hernández, J.R., & Rivera-Escoto, B.A. (2021). Geochemistry of Eocene felsic volcanic rocks from the Mesa Virgen-Calerilla, Zacatecas, Mexico: Implications for the magma source and tectonic setting. *Geological Journal*, <https://doi.org/10.1002/gj4133>.

## CAPÍTULO 5

### Conclusiones

El resultado de esta investigación apoya a las dos hipótesis planteadas. La unidad de riolitas es continuidad de la erupción ignimbrítica originada a lo largo del rift Tepic-Zacoalco. Sin embargo, se identifican dos secuencias de tobas dentro de esta unidad. Por otra parte, las unidades de basalto traquiandesita y andesita se originaron en dos eventos volcánicos diferentes en el occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano. Estas tres unidades tienen una relación con la evolución geológica y tectónica que ocurre en este sector del cinturón volcánico Trans-Mexicano. Por lo tanto, de cada unidad en el área Compostela, se concluye de forma particular y general.

#### **Conclusiones particulares del área Compostela:**

La geología del área Compostela está representada por tres unidades principales: Primero una unidad de riolita que se divide en dos secuencias por presentar diferentes texturas primarias de formación; toba lítica y toba bandeada. Seguido por lavas de andesita que cubren los valles al noreste y suroeste del área y al centro una colada de lava de basalto traquiandesita que corta y cubre discordantemente a la toba lítica: Finalizando con depósitos de pómez y piroclastos provenientes de la actividad volcánica circundante. Por lo tanto, se desglosan las siguientes conclusiones para cada unidad:

Unidad de riolitas:

- La toba lítica es una serie alcalino-cálcica y la toba bandeada es una serie calcoalcalina, ambas son férricas y peraluminosas. Sin embargo, ambas secuencias de tobas pasan por un proceso de alteración hidrotermal que afecta su textura primaria donde se



identifican los minerales arcillosos de illita (sericita)-moscovita que reemplazan a los feldespatos y clorita a los clinopiroxenos, y una ligera recristalización de cuarzo en la matriz.

- El posible origen de estas dos secuencias es debido a un “*remelting*” o fusión parcial de magmas de composición granítica. Sin embargo, se tienen dos diferentes ambientes de origen en ambas tobas. La toba lítica se generó en un ambiente de arco volcánico que puede corresponder al primer pulso de actividad silícea relacionada con el retroceso de la Placa de Rivera. Mientras que la toba bandeada se generó en un ambiente de intraplaca que se puede relacionar con la fase extensional entre el Bloque Jalisco y la Placa Norteamericana, representado por el rift Tepic-Zacoalco.

Lavas de andesita:

- Es una serie subcalina donde se distinguen dos grupos con respecto a su contenido de SiO<sub>2</sub>: Andesitas de bajo contenido de SiO<sub>2</sub> (Low-Si), son altamente potásicas y se encuentran al suroeste del área. Andesitas de alto contenido de SiO<sub>2</sub> (High-Si) y medianamente potásicas, se encuentran al noreste del área. Ambos grupos con bajo contenido de TiO<sub>2</sub>.
- Ambos grupos derivan de magmas que se desarrollan en un margen de subducción donde la asimilación fraccionada a ocurrido durante la evolución de estas rocas.
- La edad de las andesitas de (Low-Si) en esta investigación son de  $2.42 \pm 0.36$  Ma, mientras que de las andesitas de (High-Si) de  $2.25 \pm 0.02$  Ma (Frey et al., 2007).

Lava de basalto traquiandesita:

- Es una serie transicional, altamente potásica con bajo contenido de TiO<sub>2</sub>.
- Esta lava deriva de un magma que se desarrolló en un ambiente de intraplaca, donde también ocurre una asimilación fraccionada durante la evolución de esta roca.
- La edad de esta lava en esta investigación es de  $1.05 \pm 0.15$  Ma y  $1.07 \pm 0.17$  Ma.

Depósitos de pómez y piroclastos:

- Estos depósitos corresponden a dos eventos volcánicos diferentes. Los depósitos de pómez posiblemente se relacionan con los depósitos de Cuastecomate de ~280 ka ([Petroni et al., 2006](#)), provenientes del complejo volcánico San Pedro-Cerro Grande. Mientras que los depósitos de piroclastos posiblemente se relacionan con la actividad del Volcán Tepetitlic de ~236 ka ([Frey et al., 2014](#)).

Estructuralmente, se identificaron dos sistemas principales de fallamiento y un sistema que agrupa cuatro fallas con diferentes orientaciones. En cuanto a la orientación de la estratificación se identificaron tres grupos. Estos sistemas de fallas y orientación de estratificación se encuentran en la toba lítica, la toba bandeada y en los depósitos de piroclastos del Volcán Tepetitlic.

- Sistema de fallas: El primero N-S con echado hacia el E; el segundo sistema NW con echado al N. El sistema con cuatro fallas con orientaciones diferentes: E-W con echado al S, NW-SE con echado al SW, N-S con echado al W y NE-SW con echado al NW, estas fallas solo afectan a la toba bandeada y a los depósitos de piroclastos.

- Orientación de la estratificación: La orientación de los depósitos de piroclastos es NW-SE con echado al SW. La orientación de la toba lítica NE-SW con echado al SE. La orientación de la toba bandeada NW-SE con echado al N.
- La Falla La Víbora es una estructura principal en el área y posiblemente esta marca el contacto entre la toba lítica y la toba bandeada. Además, puede ser la responsable de la salida de la colada de lava de basalto traquiandesita al centro del área Compostela.

### **Conclusiones generales del área Compostela con relación al occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano**

Al occidente del cinturón volcánico Trans-Mexicano, en la parte trasera de este arco volcánico se desarrolla el rift Tepic-Zacoalco con una orientación NW-SE. Una estructura que forma parte de este rift es el graben San Pedro-Ceboruco. En este graben se han identificado cuatro sistemas volcánicos que siguen la misma orientación del rift Tepic-Zacoalco. El área Compostela se encuentra al límite noroeste de este graben y las unidades geológicas que se encuentran en esta área se relacionan con algunos de estos sistemas volcánicos, por lo cual se concluye lo siguiente:

- La unidad de riolitas que comprende a la toba lítica y la toba bandeada se relacionan con la erupción ignimbrítica de 4.97 Ma reportada por [Frey et al., 2007](#). Y son alteradas por los eventos volcánicos posteriores a estas.
- Se tienen dos lavas de andesitas al noreste y suroeste del área: La lava de andesitas al noreste de High-Si y Low-Ti, se relacionan con la serie sub-alcalina de Low-Ti (andesita basáltica a andesitas), representadas por conos de escoria de la cadena

volcánica del norte de 2.25 Ma y pueden ser los comienzos de su actividad. Las lavas de andesitas al suroeste de Low-Si y Low-Ti, se relacionan con la serie sub-alcálica de Low-Ti (andesita basáltica a dacita), representados por conos de escoria asociados a flujos de lava y algunos domos, que se desarrollan en la cadena volcánica del sur. En esta investigación la edad de estas lavas es de  $2.42 \pm 0.36$  Ma.

- La lava de basalto traquiandesitas se relaciona con la serie transicional de Low-Ti de la cadena volcánica del norte.

Estructuralmente, los sistemas de fallas que se encuentran en el área Compostela se relaciona con el graben San Pedro-Ceboruco y se concluye lo siguiente:

- Las fallas con orientación N-S se pueden relacionar con los sistemas NNE-SSW y NE-SW que forman la depresión de San Pedro.
- Las fallas con orientación NW-SE con echado al NE se pueden relacionar con las fallas normales que forman parte del Plan de Barrancas.
- El área Compostela se encuentra en un pequeño horst debido al desplazamiento vertical provocado por las fallas NE-SW que se forman por la depresión de San Pedro y la falla NW-SE que forma el graben Compostela.
- Ambos sistemas aparentemente son del Plioceno Temprano y una evidente reactivación de las fallas NW-SE durante el Cuaternario.

## **ANEXOS**

### **Capítulo 2**

### **Capítulo 3**

### **Capítulo 4**

## Anexo Capítulo 2

### Anexo I. Tabla de descripciones de muestras recolectadas en campo.

Sample	UTM_E	UTM_N	Long W	Lat N	Elev_m	Lithology	Condition	Description of representative hand sample of outcrop	Rock	Petrography	XRF	ICP-MS	XRD	Isotopes	Dating	Anexo II microphotographies
COM-01A	518713	2353348	104 49 10.6	21 16 54.5	1671	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars lightly alteration (argillic+), siliceous matrix and 0.5% eyes of quartz	Lithic tuff		x	x	x			
COM-01B	518767	2353361	104 49 08.7	21 16 54.9	1663	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars lightly alteration (argillic+), siliceous matrix with quartz veins (<1mm) and 0.5% eyes of quartz	Lithic tuff	x	x	x	x			x
COM-01C	518750	2353357	104 49 09.3	21 16 54.8	1660	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars lightly alteration (argillic +), siliceous matrix with oxidation, 0.5% biotite (?) and 0.5% eyes of quartz	Lithic tuff	x	x	x				x
COM-02	518773	2353535	104 49 08.5	21 17 00.6	1608	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars lightly altered (argillic+ and clorithe+), siliceous matrix with 0.5% eyes of quartz and 2% of pyrite disseminated	Lithic tuff	x	x	x	x			x
COM-03A	518973	2359998	104 49 01.3	21 20 30.8	1077	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix and highly vesicular	Andesite		x	x				
COM-03B	518991	2359990	104 49 00.7	21 20 30.5	1080	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars(altered), microcrystalline groundmass	Andesite		x	x				
COM-03C	518909	2359929	104 49 03.5	21 20 28.6	1078	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars(altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline groundmass and sparsely vesicular	Andesite		x	x				
COM-03D	518884	2359895	104 49 04.4	21 20 27.5	1076	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars(altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix and non-vesicular	Andesite		x	x				
COM-03E	519226	2359641	104 48 52.5	21 20 19.2	1095	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars(altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix	Andesite	x*	x	x	x			x
COM-04A	519071	2358421	104 48 58.0	21 19 39.5	1139	Rhyolite	Altered	Porphyritic, 5% feldspars (altered+ argillic?), cryptocrystalline matrix	Flow banded		x	x	x	x		
COM-04B	519078	2358149	104 48 57.7	21 19 30.7	1155	Rhyolite	Altered	Porphyritic, 5% feldspars (altered+), spherical spherulites (altered argillic?), cryptocrystalline matrix	Flow banded		x	x	x			
COM-04C	519229	2358031	104 48 52.5	21 19 26.8	1174	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars (altered++ , argillic, sericite?) 30% vuggy quartz, cryptocrystalline matrix	Flow banded	x	x	x	x			x
COM-04D	519383	2357864	104 48 47.1	21 19 21.4	1176	Rhyolite	Altered	Porphyritic, 5% feldspars (altered+) 3% biotite?(altered), 1% vuggy quartz, cryptocrystalline oxides matrix	Flow banded	x	x	x	x	x		x
COM-04E	519971	2357433	104 48 26.7	21 19 07.4	1255	Rhyolite	Altered	Porphyritic, 5% feldspars (altered+ argillic?), cryptocrystalline matrix	Flow banded		x	x	x			
COM-04F	520602	2356711	104 48 04.9	21 18 43.8	1305	Rhyolite	Altered	Porphyritic, 5% feldspars (altered+ argillic?), 3% biotite?(altered), cryptocrystalline matrix	Flow banded		x	x	x			
COM-04G	520152	2356103	104 48 20.5	21 18 24.1	1403	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars (altered+), cryptocrystalline matrix lightly banded	Flow banded	x	x	x	x	x		x
COM-04H	520086	2355164	104 48 22.9	21 17 53.6	1451	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars (altered+), cryptocrystalline matrix lightly banded	Flow banded		x	x	x			
COM-04I	519240	2354538	104 48 52.2	21 17 33.2	1522		Altered	Sample near to fault, no hand sample only powder			x	x	x			
COM-04J	518777	2354381	104 49 08.3	21 17 28.1	1581	Rhyolite	Altered	Porphyritic, 5% feldspars (altered+), 3% eyes of quartz, 3% biotite (?), cryptocrystalline matrix lightly banded and oxidized	Flow banded		x	x	x			
COM-05	518653	2353614	104 49 12.6	21 17 03.2	1605	Rhyolite	Altered	Inside mina, porphyritic, 10% feldspars, 5% of Pyrite (desseminated) in silicified matrix	Lithic tuff		x	x	x			
COM-06A	518457	2354535	104 49 19.4	21 17 33.1	1511	Basalt	Unaltered	Dike of basalt, near to mine San Eduardo, aphanitic and 20% of large and irregular vesicles (pillow?)	Basaltic andesite		x	x				
COM-06B	518468	2354315	104 49 19.0	21 17 26.0	1568	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals, 1% vesicles	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06C	517802	2354524	104 49 42.1	21 17 32.8	1595	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals (lightly oxidized), 1% vesicles	Basaltic trachyandesite	x*	x	x	x	x	x	x
COM-06D	517577	2354653	104 49 49.9	21 17 37.0	1576	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals (lightly oxidized), 1% vesicles	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06E	516541	2354073	104 50 25.9	21 17 18.2	1494	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals, 1% vesicles	Basaltic trachyandesite		x	x		x		
COM-06F	515920	2352139	104 50 47.5	21 16 15.3	1057	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals (lightly oxidized)	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06G	515939	2352015	104 50 46.9	21 16 11.3	1051	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06H	515793	2351758	104 50 52.0	21 16 02.9	1029	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x				

Sample	UTM_E	UTM_N	Long W	Lat N	Elev_m	Lithology	Condition	Description rock and hand sample	Rock	Petrography	XRF	ICP-MS	XRD	Isotopes	Dating	Anexo II microphotographies
COM-06I	515609	2351632	104 50 58.3	21 15 58.8	1025	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06J	515422	2351481	104 51 04.8	21 15 53.9	1003	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite	x*	x	x	x		x	x
COM-06K	515196	2351456	104 51 12.7	21 15 53.1	1002	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06L	514383	2351449	104 51 40.9	21 15 52.9	963	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals (altered chlorite+, lightly green)	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06M	514173	2351425	104 51 48.2	21 15 52.1	957	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06N	514018	2351388	104 51 53.6	21 15 50.9	950	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-06O	510880	2349752	104 53 42.5	21 14 57.8	857	Andesite	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Andesite		x	x				
COM-06P	513429	2353000	104 52 14.0	21 16 43.4	921	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x		x		
COM-07A	510014	2352056	104 54 12.5	21 16 12.8	900	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars (lightly altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix	Andesite		x	x				
COM-07B	510233	2351815	104 54 04.9	21 16 04.9	891	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars (lightly altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix and 3% vesicles	Andesite		x	x				
COM-07C	509436	2350839	104 54 32.6	21 15 33.2	882	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars (lightly altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix and 3% vesicles	Andesite	x*	x	x	x			x
COM-07D	511315	2352217	104 53 27.3	21 16 18.0	867	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars (lightly altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix	Andesite		x	x				
COM-07E	511867	2352573	104 53 08.2	21 16 29.5	871	Basalt	Unaltered	Aphanitic, 1% mafic minerals	Basaltic trachyandesite		x	x				
COM-07Fa	510866	2351920	104 53 42.9	21 16 08.3	891	Basalt	Unaltered	Porphyritic, feldspars+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix	Basaltic andesite	x*	x	x	x	x	x	x
COM-07Fb	510866	2351920	104 53 42.9	21 16 08.3	891	Andesite	Unaltered	Porphyritic, feldspars (lightly altered)+pyroxenes in a cryptocrystalline matrix (lightly oxidized)	Andesite		x	x				
COM-08	506699	2352315	104 56 07.5	21 16 21.2	870	Granodiorite	Unaltered	Phaneritic, Plagioclases+feldspars+Quartz+Biotite	Granite	x	x	x			x	x
COM-321	515700	2352300	104 50 55.2	21 16 20.5	1173	Rhyolite	Altered	Alteration Epidote?+chlorite. Porphyritic, feldspars (altered+), eyes of quartz, lithic clasts?, 2% of disseminated pyrite in cryptocrystalline matrix.	Lithic tuff	x	x					x
COM-327	519215	2352813	104 48 53.2	21 16 37.1	1728	Rhyolite	Unaltered	Porphyritic, feldspars, 2% lithic fragments? and tuff?	Lithic tuff	x	x					x
COM-333	520101	2355142	104 48 22.3	21 17 52.8	1441	Rhyolite		Flow foliated Rhy and silification, grey-blue matrix, oxidation 1 to 5 mm aprox, and blocky clasts	Rhyolite		x					
COM-352	513260	2354448	104 52 19.8	21 17 30.5	958	Dike-Basalt?	Unaltered	Aphanitic, black to green color, banded 1mm to 1cm, Dike?	Trachyandesite	x	x					x
COM-354	513266	2354477	104 52 19.6	21 17 31.4	952	Dike-Basalt?	Altered	Aphanitic?, altered feldspars (chlorite+), <1% of mafic minerals in light green matrix, part of dike 352?	Basaltic trachyandesite	x	x					x
COM-356a	513449	2354699	104 52 13.2	21 17 38.6	981	Basalt?	Altered	Porphyritic, feldspars in green matrix	Andesite		x					
COM-356b	513449	2354699	104 52 13.2	21 17 38.6	981	Rhyolite	Altered	Porphyritic, feldspars (altered chlorite?), 1% mafic minerals oxidized in a lightly fluid matrix silicic and oxidized	Lithic tuff	x	x					x
COM-357	513467	2354751	104 52 12.6	21 17 40.3	1015	Dike-Basalt	Altered	Aphanitic, altered (chlorite++) feldspars and mafic minerals in green matrix. Control of dike outcrop	Basaltic trachyandesite	x	x					x
COM-368	516620	2348404	104 50 23.4	21 14 13.8	963	Rhyolite	Weathering?	Porphyritic, feldspars (lightly altered) 1% of mafic minerals in a matrix silicic fluid and oxidized. Outside of the study area	Lithic tuff	x	x					x
COM-411	514867	2356788	104 51 23.9	21 18 46.5	1263	Basalt	Unaltered	Aphanitic	Basaltic trachyandesite		x					
COM-412	514989	2356729	104 51 19.7	21 18 44.6	1260	Basalt	Unaltered	Aphanitic and 1% vesicles	Basaltic trachyandesite		x					
COM-418	514180	2359831	104 51 47.7	21 20 25.5	901	Basalt	Unaltered	Aphanitic, front of lava?	Basalt		x					
COM-424	518602	2359090	104 49 14.2	21 20 01.3	1058	Rhyolite	Altered	Porphyritic, 5% feldspars (altered+ argillic?) cryptocrystalline matrix (lightly pink)	Rhyolite		x					

TAS= Total Alcalis Silice; x\*=Analysis using Pelcon point counter

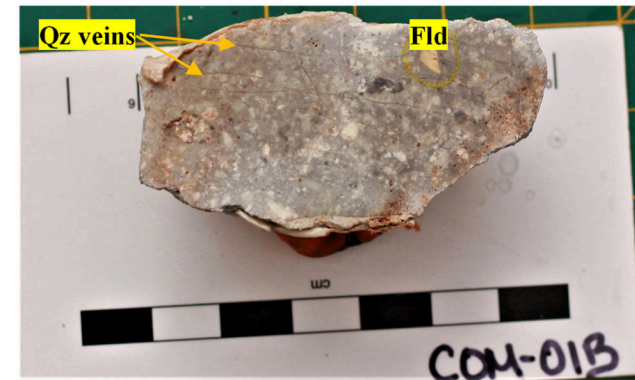
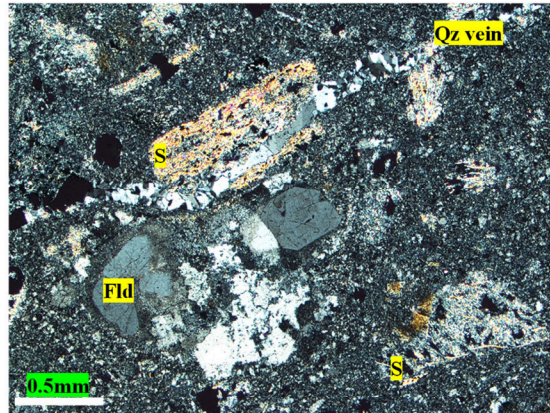
## Anexo II. Descripciones petrográficas con foto de muestras de mano.

### Sample: COM-01B

104° 49' 08.7" W

21° 16' 54.9" N

Rhyolite (CxLT)



### Petrographic description

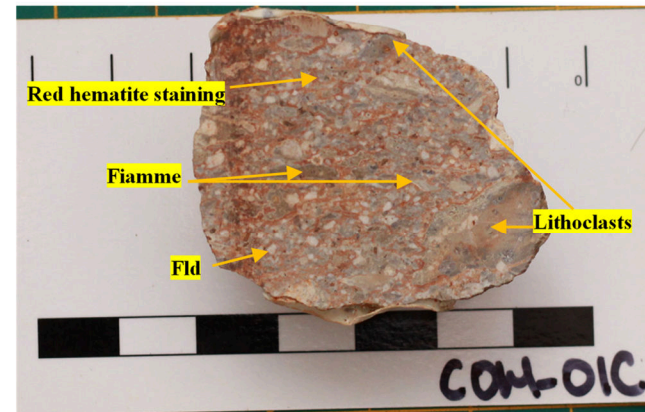
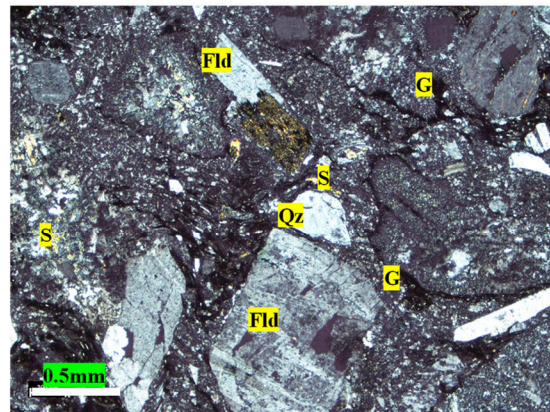
Porphyritic texture, (30%) aphanitic matrix and lightly recrystallized, (40%) phenocryst of feldspars and quartz patches, mostly of feldspars display alteration as sericite flakes, and (5%) quartz veins later. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Qz=Quartz; S=Sericite.

### Sample: COM-01C

104° 49' 09.3" W

21° 16' 54.8" N

Rhyolite (CxLT)



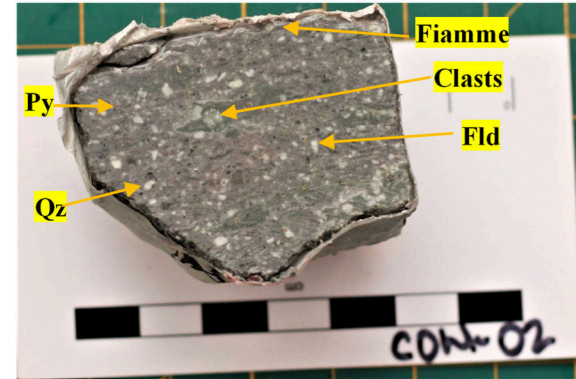
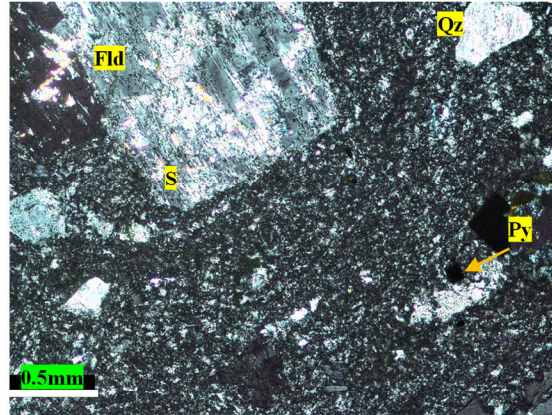
### Petrographic description

Porphyritic texture. (40%) aphanitic matrix devitrification of glass aphanitic tuff <4mm and sericite flakes. (60%) phenocryst by feldspars crystal and (25%) white-angular (2-4mm) and (35%) grey-angular (4mm >20mm) lithic fragments, some fragments with altered rims mostly aphanitic glass and siliceous. Clasts poorly sorted and lightly altered, deformed by compaction with weakly developed bedding, and fiamme textures indicate post depositional welding. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Qz=Quartz; S=Sericite; G=Glass.



**Sample: COM-02**

104° 49' 08.5"W  
21° 17' 00.6" N  
Rhyolite (CxLT)

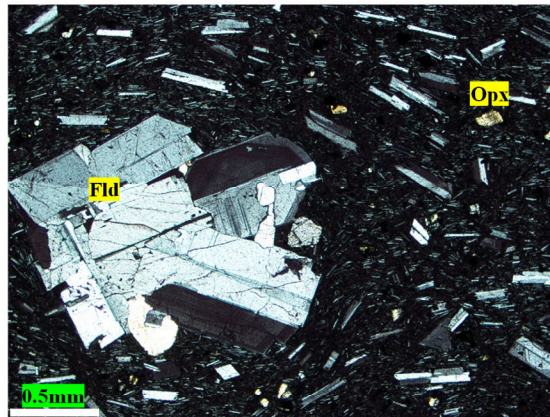


**Petrographic description**

Porphyritic texture. (60%) aphanitic matrix shows devitrification of glass and lightly welded. (30%) very poorly sorted, angular clasts represented by (15%) lapilli tuff, (10%) euhedral to subhedral crystals feldspars (andesite-labradorite), (7%), quartz patches and (<less 1%) pyrite. Some feldspars display lightly altered by and sericite flakes. Microphotography crossed nicols/right photo of hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Qz=Quartz; S=Sericite; Py=Pyrite.

**Sample: COM-03E**

104° 48' 52.5"W  
21° 20' 19.2" N  
Andesite

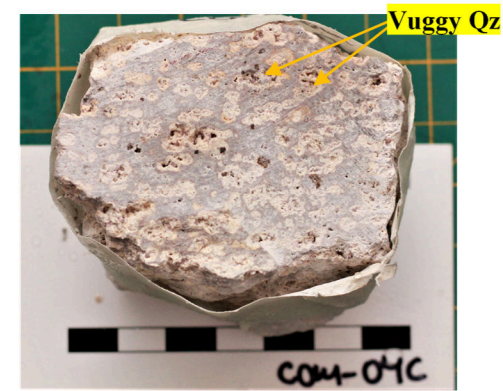
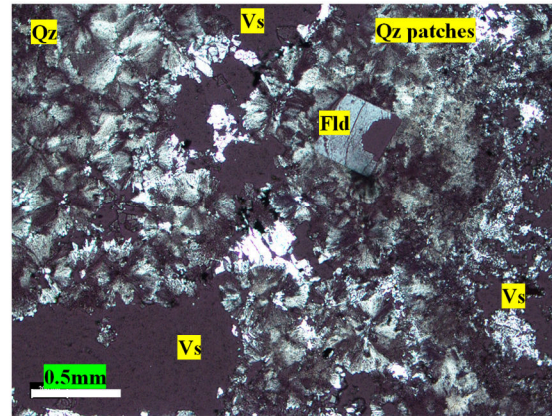


**Petrographic description**

Porphyritic texture. (80%) microcrystalline matrix with (1%) orthopyroxenes and some parts display lightly oxidation from these. (10%) fine crystals euhedral feldspars (andesine?) some are crystalline aggregates. Microphotography Crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Opx=Orthopyroxene.

**Sample: COM-04C**

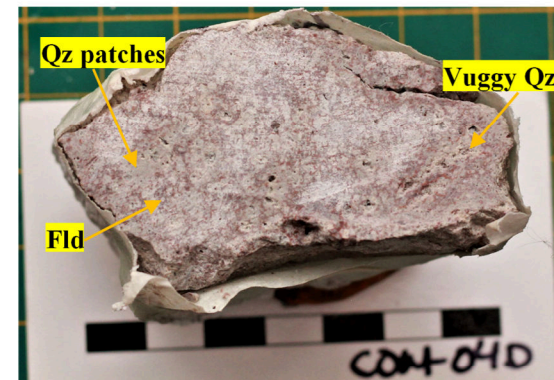
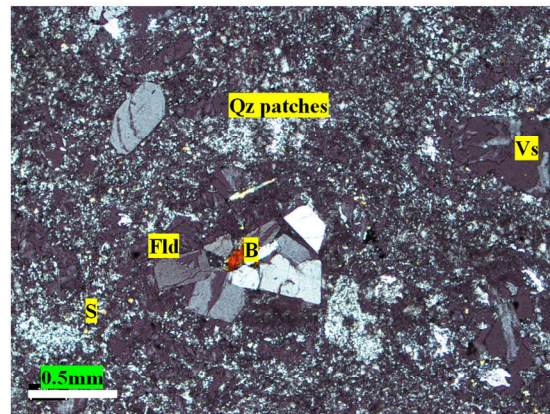
104° 48' 52.5" W  
21° 19' 26.8" N  
Rhyolite (FbT)

**Petrographic description**

Micropoikilitic texture. (60%) matrix lightly recrystallised with some intergrowth radiating quartz and patches, (30%) of vesicles. Microphotography Crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Q=Quartz; Vs=Vesicles.

**Sample: COM-04D**

104° 48' 47.1" W  
21° 19' 21.4" N  
Rhyolite (FbT)

**Petrographic description**

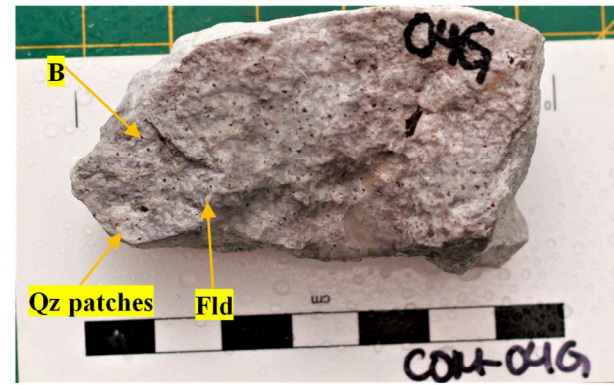
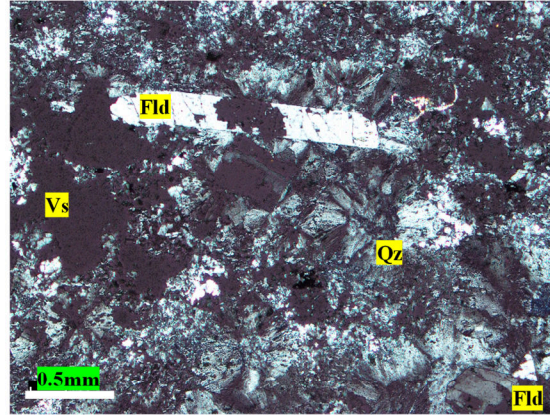
Porphyritic texture. (50%) matrix lightly recrystallised and sericitized. (30%) phenocrysts of feldspars and quartz patches. Some feldspars display alteration (sericite) and forms crystalline aggregates, (10%) vesicles and (< 1%) of biotite. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Vs=Vesicles; S=Sericitite; B=Biotite; Qz=Quartz.

**Sample: COM-04G**

104° 48' 20.5" W

21° 18' 24.1" N

Rhyolite (FbT)

**Petrographic description**

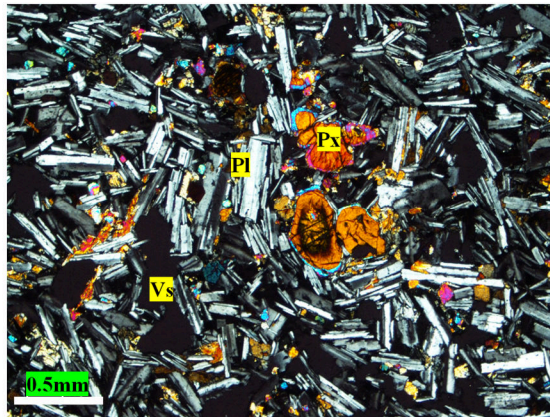
Micropoikilitic texture. Matrix recrystallized and lightly sericitized, intergrown radiating quartz and quartz patches, (30%) vesicles and (1%) opaque minerals. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Qz=Quartz; Vs=Vesicles; B=Biotite.

**Sample: COM-06C**

104° 49' 42.1" W

21° 17' 32.8" N

Basalt trachyandesite

**Petrographic description**

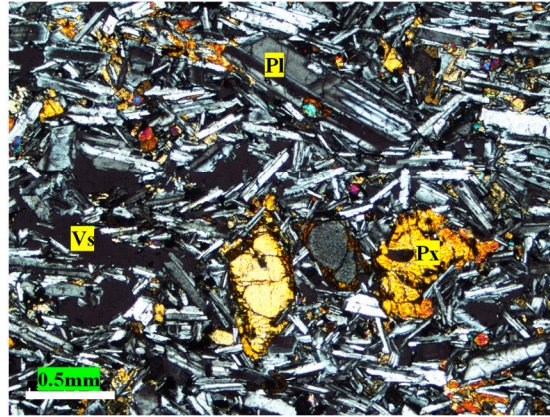
Trachytic texture in the matrix, (50%) microcrystalline matrix, euhedral crystals of andesine (?) and orthopyroxenes, (3%) vesicles, and (2%) oxides of iron. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Px=Pyroxene; Pl=Plagioclase; Vs=Vesicles.

**Sample: COM-06J**

104° 51' 04.8" W

21° 15' 53.9" N

Basalt trachyandesite

**Petrographic description**

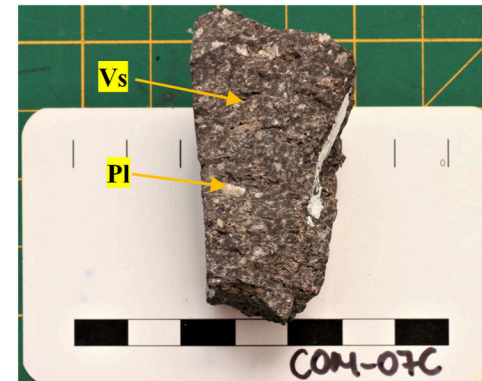
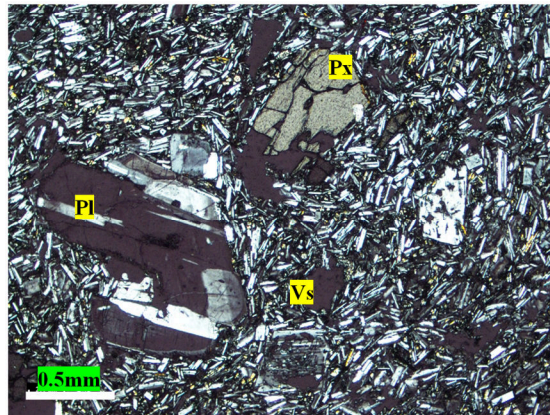
Trachytic texture in the matrix microcrystalline with euhedral crystals of andesine and (20%) of pyroxenes, and (<1%) opaque minerals. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Px=Pyroxenes; Pl=Plagioclase; Vs=Vesicles.

**Sample: COM-07C**

104° 54' 32.6" W

21° 15' 33.2" N

Andesite

**Petrographic description**

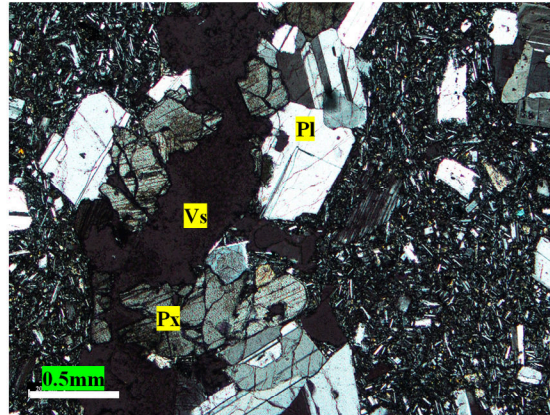
Porphyritic texture, (80%) microcrystalline matrix of feldspars and pyroxenes, (20%) euhedral to subhedral fine crystals of feldspars, some feldspars display a sieve texture and others are in crystalline aggregates, (2%) vesicles and (<1%) pyroxenes. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Px=Pyroxenes; Pl=Plagioclase; Vs=Vesicles.

**Sample: COM-07Fa**

104° 53' 42.9" W

21° 16' 08.3" N

Andesite

**Petrographic description**

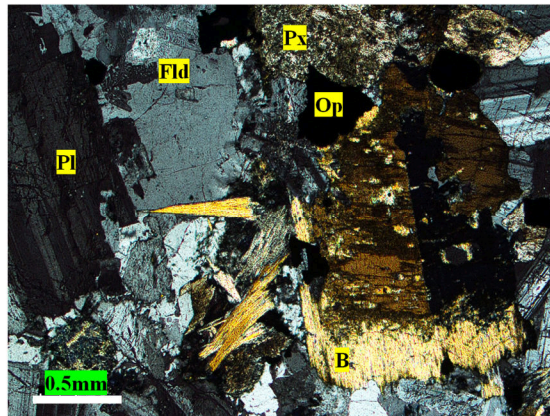
Porphyritic texture. (50%) microcrystalline matrix of feldspars and pyroxenes, (20%) euhedral to subhedral fine crystals of feldspars (andesine) some are crystalline aggregates with pyroxenes, (5%) vesicles and (<1%) opaque minerals. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Pl=Plagioclase; Px=Pyroxenes; Vs=Vesicles.

**Sample: COM-08**

104° 56' 07.5" W

21° 16' 21.2" N

Granite

**Petrographic description**

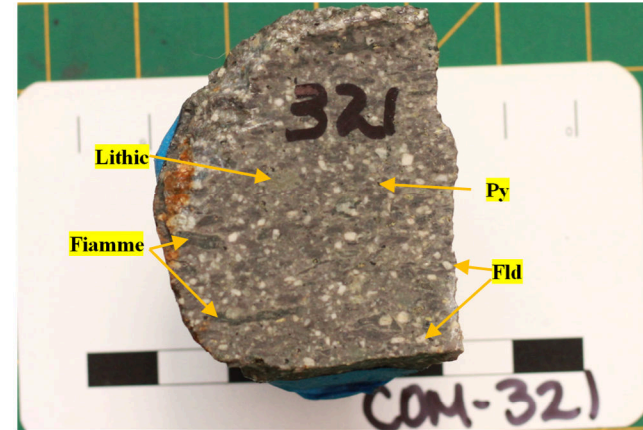
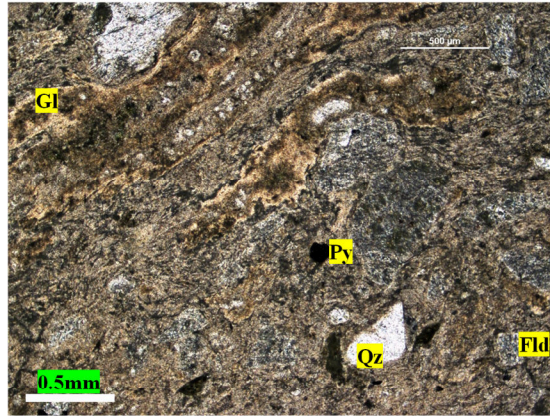
Holocrystalline, euhedral crystals (50%) plagioclases and (20%) feldspars (2:1 Andesine), (15%) brown-biotite-muscovite and amphibole, (15%) quartz and (1%) magnetite. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Pl=Plagioclase; Px=Pyroxenes; B=Biotite; Op=Opaque minerals.

**Sample: COM-321**

104° 50' 55.2" W

21° 16' 20.5" N

Rhyolite (CxLT)



**Petrographic description**

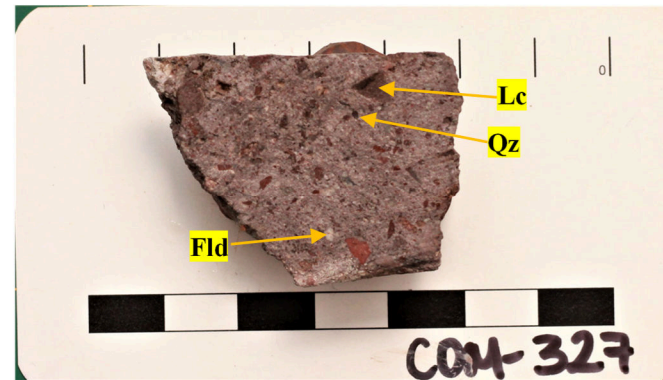
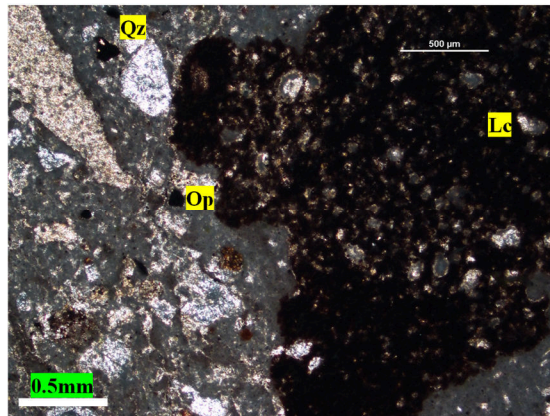
Crystal lithic tuff-banded flow, (40%) matrix glass, (35%) lithic fragments angular and very poorly sorted, (5%) pumice, (20%) feldspar subangular and (<1%) pyrite. Microphotography plane polarised light/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Qz=Quartz; Gl=Glass; Py=Pyrite.

**Sample: COM-327**

104° 48' 53.2" W

21° 16' 37.1" N

Rhyolite (CxLT)



**Petrographic description**

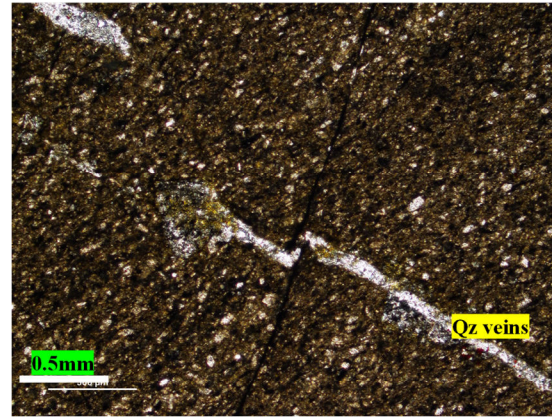
Crystal lithic tuff-banded flow, (50%) matrix glass and (3%) vesicles, (10-15%) lithic clasts very poorly sorted and very angular, (20%) feldspar, (5%) white pumice less 2mm. Microphotography plane polarised light/right photo hand sample, description in Anexo I. Lc=Lithoclasts; Qz=Quartz; Op=Opaque minerals.

**Sample: COM-352**

104° 52' 19.8" W

21° 17' 30.5" N

Andesite dike (?)

**Petrographic description**

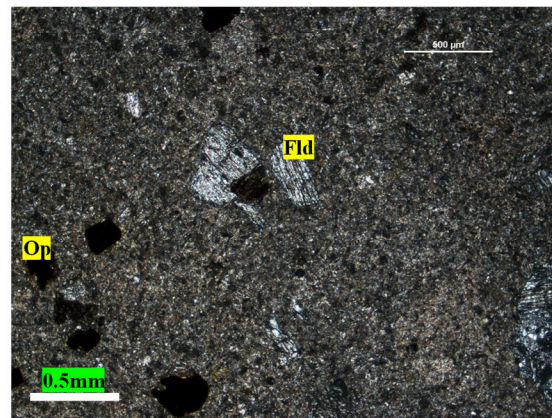
Aphanitic texture. (50%) very fine grain and angular feldspar in a glass matrix, and (1%) veinlets of quartz later. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Qz= Quartz.

**Sample: COM-354**

104° 52' 19.6" W

21° 17' 31.4" N

Andesite (?)

**Petrographic description**

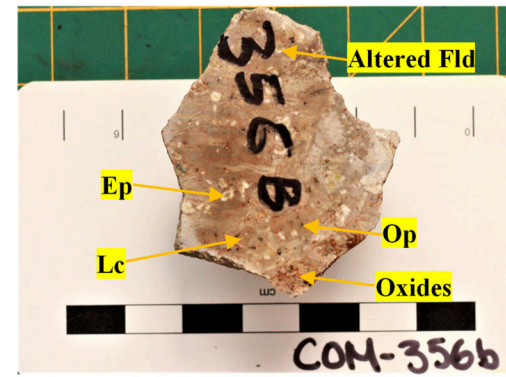
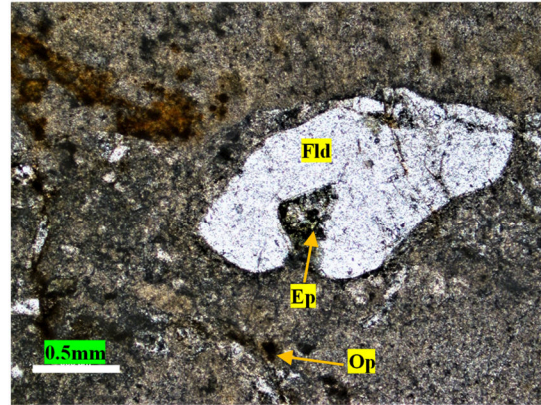
Porphyritic texture. (70%) microcrystalline, recrystallized, and lightly altered matrix (epidote), (15%) amphibole (hornblende?), (3%) feldspars and (1%) hematite. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Op=Opaque minerals.

**Sample: COM-356b**

104° 52' 13.2" W

21° 17' 38.6" N

Rhyolite (CxLT)

**Petrographic description**

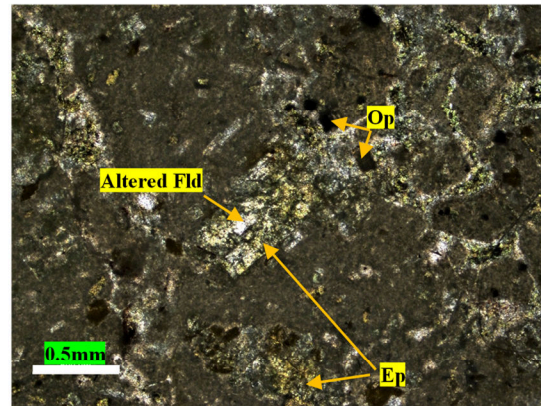
Crystal lithic tuff-banded flow, (40%) recrystallized matrix (glass) with strong silicic and potassic(?) alteration, (35%) lithoclasts with alteration and fine crystals 3mm, and (3%) feldspars, (1%) opaque minerals and epidote (?), and (1%) veins of quartz. Microphotography plane polarised light/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspars; Ep=Epidote; Lc=Lithoclasts; Op=Opaque minerals.

**Sample: COM-357**

104° 52' 12.6" W

21° 17' 40.3" N

Andesite (?)

**Petrographic description**

Porphyritic texture, pervasive weak alteration, and recrystallized matrix (glass) and patches of hematite oxidation, and (10%) of altered feldspars (epidote) and (3%) of opaque minerals. Microphotography crossed nicols/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspars; Op=Opaque minerals; Ep=Epidote.

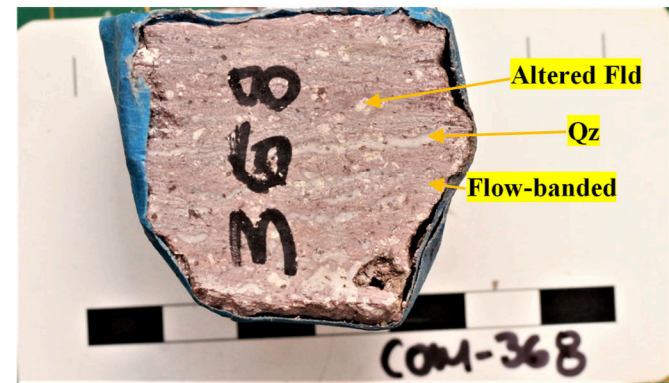
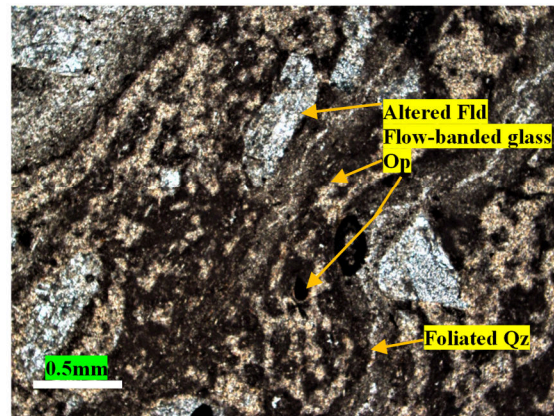


**Sample: COM-368**

104° 50' 23.4" W

21° 14' 13.8" N

Rhyolite (CxLT)

**Petrographic description**

Crystal lithic tuff-banded flow, (25%) quartz very fine foliated quartz, (15%) orthoclase fine crystals and very fine matrix grain and glass banded. Microphotography plane polarised light/right photo hand sample, description in Anexo I. Fld=Feldspar; Qz=Quartz; Op=Opaque minerals.

**Anexo III.** Análisis mineral con Pelcon Point Counter para dos muestras de basalto andesita y tres de andesitas.

**Sample ID: C0M06C**

Number of points (p) and percentage (%) with assigned keys on the Point Counter Keypad:

Total points: 959		Total lines: 15	
7:V	8:Anf	9:Op	-
1 p	0 p	272 p	
0.1 %	0.0 %	28.4 %	
4:Vs	5:Fldk	6:Plg	+
97 p	0 p	329 p	
10.1 %	0.0 %	34.3 %	
1:Ol	2:Qz	3:Cpx	Enter
0 p	0 p	260 p	
0.0 %	0.0 %	27.1 %	
Skip	Triple Skip	Del	
Step Length(mm):	0.5		

Analyzed 2019.09.18

Pelcon Point Counter

**Note:** Ol—Olivine, Qz—Quartz, Cpx—Clinopyroxenes, Vs—Vesicles, Fldk—Feldspars Potassic, Plg—Plagioclases, V—Glass, C0M06C (Basalt trachyandesite) Anf—Amphiboles, Op—Opaque minerals.

**Sample ID: C0M06J**

Number of points (p) and percentage (%) with assigned keys on the Point Counter Keypad:

Total points: 814		Total lines: 12	
7:V 0 p 0.0 %	8:Anf 0 p 0.0 %	9:Op 218 p 26.8 %	-
4:Vs 56 p 6.9 %	5:Fldk 0 p 0.0 %	6:Plg 315 p 38.7 %	+
1:Ol 0 p 0.0 %	2:Qz 0 p 0.0 %	3:Cpx 225 p 27.6 %	Enter
Skip Step Length(mm): 0.5	Triple Skip	Del	

Analyzed 2019.09.18

Pelcon Point Counter

**Note:** Ol—Olivine, Qz—Quartz, Cpx—Clinopyroxenes, Vs—Vesicles, Fldk—Feldspars Potassic, Plg—Plagioclases, V—Glass, C0M06J (Basalt trachyandesite) Anf—Amphiboles, Op—Opaque minerals.

**Sample ID: C0M07C**

Number of points (p) and percentage (%) with assigned keys on the Point Counter Keypad:

Total points: 782		Total lines: 11	
7:V 153 p 19.6 %	8:Anf 0 p 0.0 %	9:Op 9 p 1.2 %	-
4:Vs 106 p 13.6 %	5:Fldk 0 p 0.0 %	6:Plg 260 p 33.2 %	+
1:Ol 1 p 0.1 %	2:Qz 0 p 0.0 %	3:Cpx 253 p 32.4 %	Enter
Skip Step Length(mm): 0.5	Triple Skip	Del	

Analyzed 2019.09.18

Pelcon Point Counter

**Note:** **Ol**—Olivine, **Qz**—Quartz, **Cpx**—Clinopyroxenes, **Vs**—Vesicles, **Fldk**—Feldspars Potassic, **Plg**—Plagioclases, **V**—Glass, **C0M07C (Andesite)**, **Anf**—Amphiboles, **Op**—Opaque minerals.

**Sample ID: C0M07Fa**

Number of points (p) and percentage (%) with assigned keys on the Point Counter Keypad:

Total points: 601		Total lines: 9	
7:V 158 p 26.3 %	8:Anf 0 p 0.0 %	9:Op 56 p 9.3 %	-
4:Vs 28 p 4.7 %	5:Fldk 0 p 0.0 %	6:Plg 180 p 30.0 %	+
1:Ol 0 p 0.0 %	2:Qz 0 p 0.0 %	3:Cpx 179 p 29.8 %	Enter
Skip Step Length(mm): 0.5	Triple Skip	Del	

Analyzed 2019.09.18

Pelcon Point Counter

**Note:** Ol—Olivine, Qz—Quartz, Cpx—Clinopyroxenes, Vs—Vesicles, Fldk—Feldspars Potassic, Plg—Plagioclases, V—Glass, Anf—Amphiboles, Op—Opaque minerals.

COM07Fa (Andesite)

**Sample ID: C0M03E**

Number of points (p) and percentage (%) with assigned keys on the Point Counter Keypad:

Total points: 1280		Total lines: 21	
7:V 263 p 20.5 %	8:Anf 0 p 0.0 %	9:Op 334 p 26.1 %	-
4:Vs 13 p 1.0 %	5:Fldk 0 p 0.0 %	6:Plg 339 p 26.5 %	+
1:Ol 0 p 0.0 %	2:Qz 0 p 0.0 %	3:Cpx 331 p 25.9 %	Enter
Skip Step Length(mm): 0.5	Triple Skip	Del	

Analyzed 2019.09.18

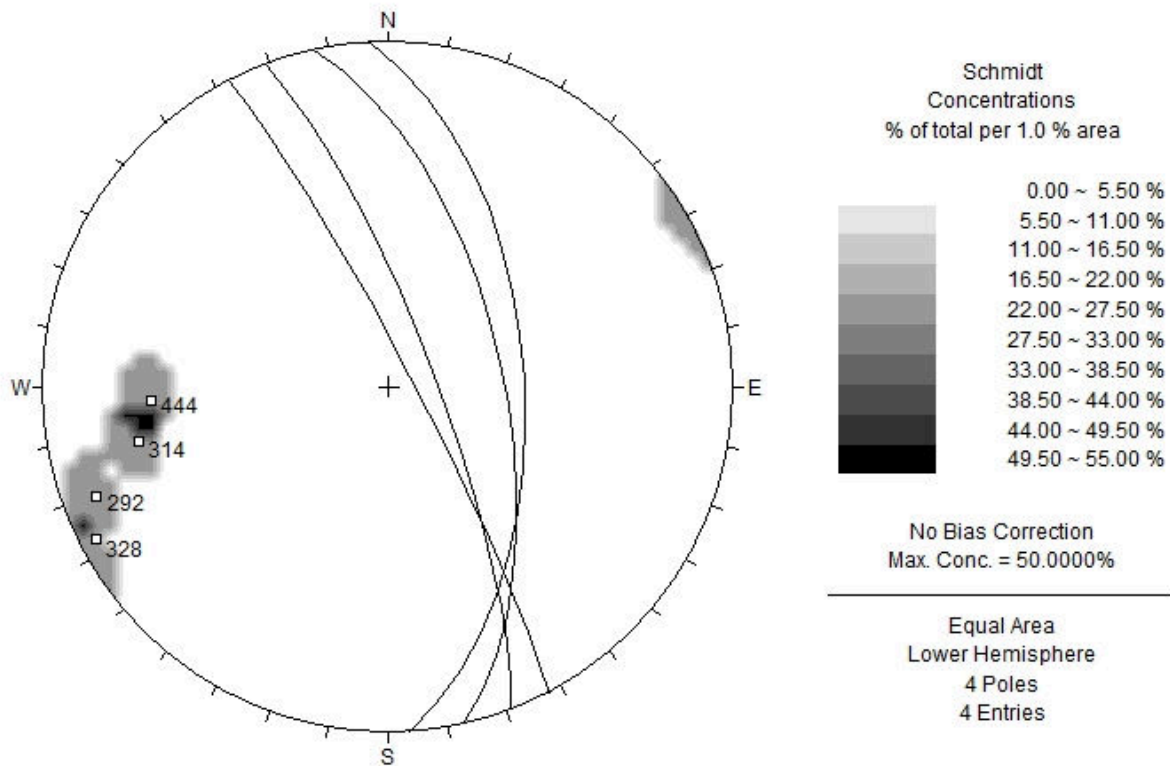
Pelcon Point Counter

Note: **Ol**—Olivine, **Qz**—Quartz, **Cpx**—Clinopyroxenes, **Vs**—Vesicles, **Fldk**—Feldspars Potassic, **Plg**—Plagioclases, **V**—Glass, **Anf**—Amphiboles, **Op**—Opaque minerals.

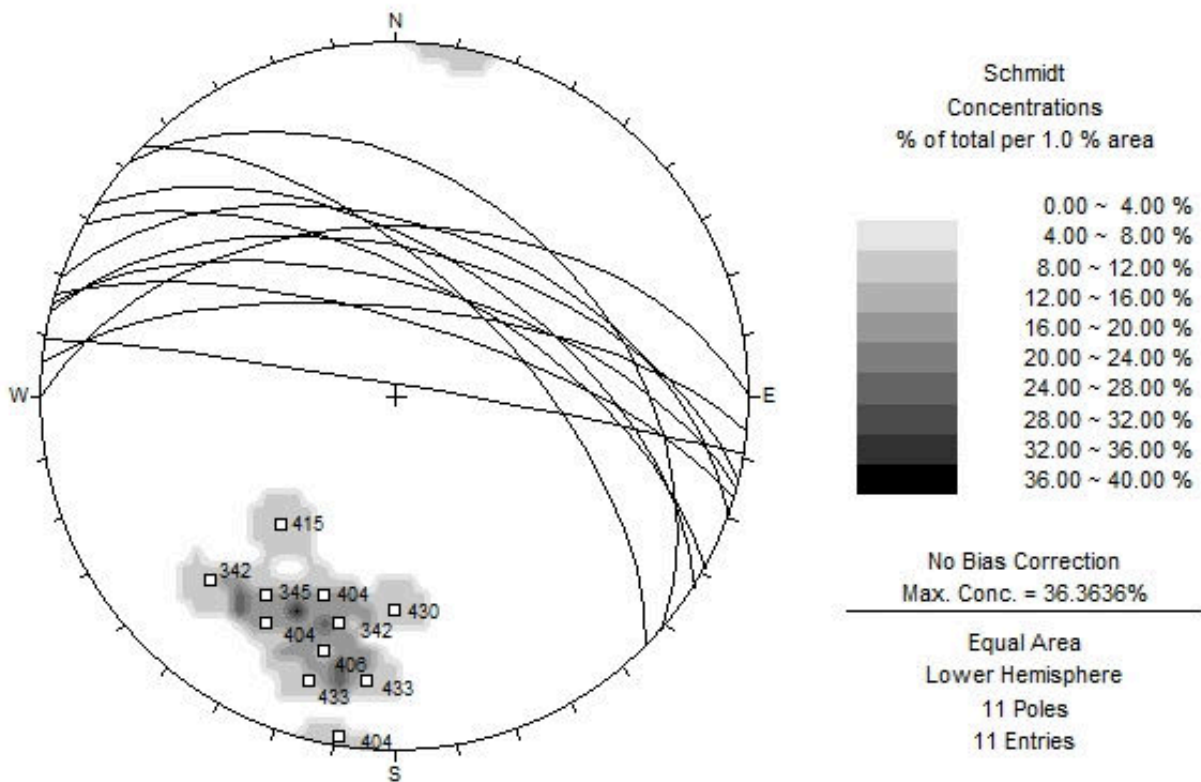
COM03E (Andesite)

**Anexo IV.** Estereogramas de fallas y orientación de estratificación de la toba lítica, toba bandeada y de los depósitos de piroclastos-Volcan Tepetiltic (?).

Estereograma de cuatro fallas de los puntos de campo 292, 314, 328 y 444. Con orientación N-S y echado al E. Se uso plantilla Schmidt, en áreas iguales y se muestran las concentraciones en 50%. Las concentraciones indican donde los polos se encuentran más cercanos al 50% y en el 27.50% los polos un poco más distantes entre sí.

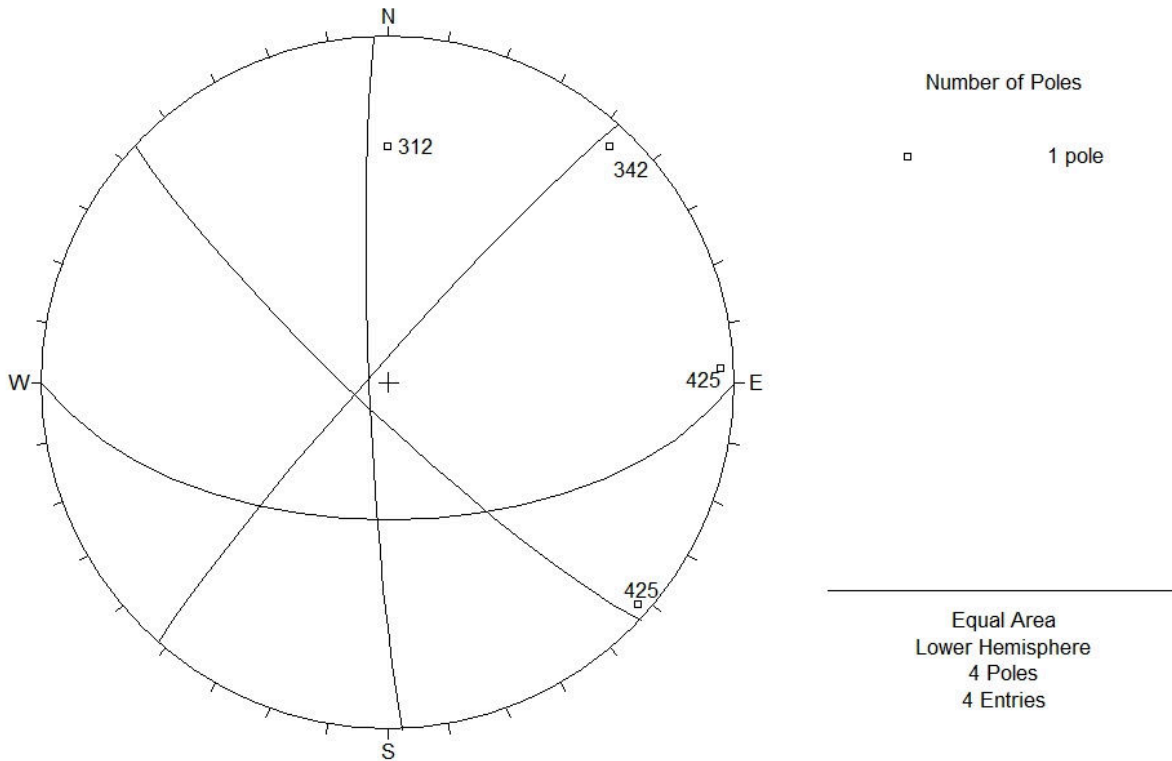


Estereograma de once fallas con orientación NW-SE y echado al N. Los puntos de campo 342, 345, 404, 406, 415, 430 y 433. En algunos de estos puntos se tienen dos o tres fallas a las que se tomaron los datos estructurales y por lo tanto se repite el punto de campo con diferente dato. Se uso plantilla Schmidt en áreas iguales y se muestran las concentraciones en 36.36%. La mayoría de los polos se encuentran distribuidos en el estereograma, y ligeramente se agrupan en el 36.36% los polos 345, 404.

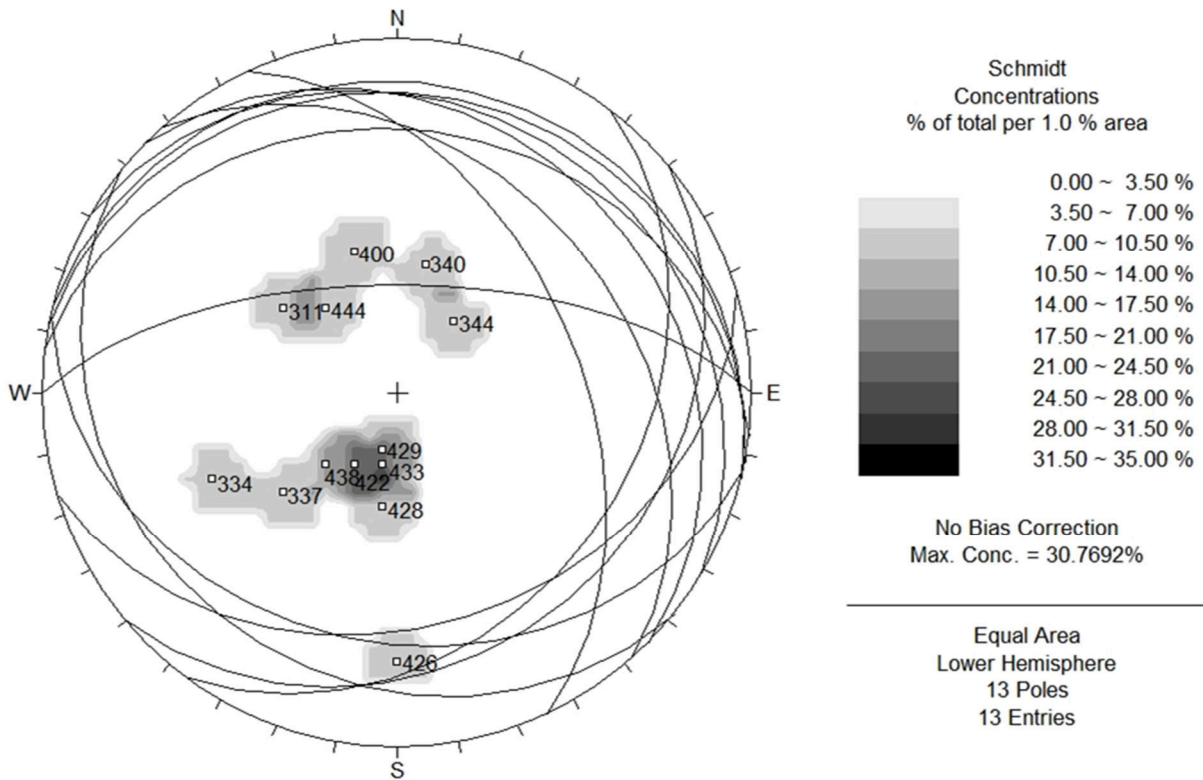




Estereograma con cuatro datos estructurales diferentes. En este estereograma no se tuvieron concentraciones por ser datos diferentes que no se agrupan. Se utilizo la plantilla Schmidt en áreas iguales. En este caso ningún polo se concentra en un área, por lo tanto, no se obtuvieron concentraciones.



Estereograma de la orientación de la estratificación. Los tres sistemas que se encontraron son: NW-SE con echado al SW en depósitos de piroclastos provenientes del Volcán Tepetitlic, puntos de campo 340 y 344. NE-SW con echado al SE dos en toba lítica puntos de campo 400 y 444, y uno en toba bandeada punto de campo 311. NW-SE con echado al N en toba bandeada, puntos de campo 334, 337, 422, 426, 428, 429, 433 y 438. Se uso plantilla Schmidt en áreas iguales y se muestran las concentraciones en 30.76%. La mayoría de los polos 422, 433, 429 y 438 se concentran en 30.76% y los demás polos se distribuyen en las concentraciones de 10.50 a 17.50%.



## Anexo

## Capítulo 3

**Anexo I.** Portada del artículo publicado y figuras complementarias del artículo publicado.

Ruiz-Mendoza, V., Verma, S.K., Torres-Sánchez, D., Barry, T.L., Moreno, J.A. & Torres-Hernández, J.R. (2021). Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Geological Journal*, 56, 4401-4428. doi:10.1002/gj.4194

Received: 6 April 2021 | Accepted: 30 May 2021

DOI: 10.1002/gj.4194

RESEARCH ARTICLE

WILEY

## Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting

Vivian Ruiz-Mendoza<sup>1</sup> | Sanjeet K. Verma<sup>1</sup>  | Darío Torres-Sánchez<sup>1</sup>  |  
Tiffany L. Barry<sup>2</sup>  | Juan A. Moreno<sup>3,4</sup>  | José Ramón Torres-Hernández<sup>5</sup>

<sup>1</sup>División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí, México

<sup>2</sup>School of Geography, Geology and the Environment, University of Leicester, Leicester, UK

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

<sup>4</sup>Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense (UCM), 28040, Madrid, Spain

<sup>5</sup>Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, Mexico

### Correspondence

Sanjeet K. Verma, División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), Camino a la Presa San José 2055, San Luis Potosí, 78216, México.

Email: sanjeet.verma@ipicyt.edu.mx; sanjeet\_vrm@yahoo.com

### Funding information

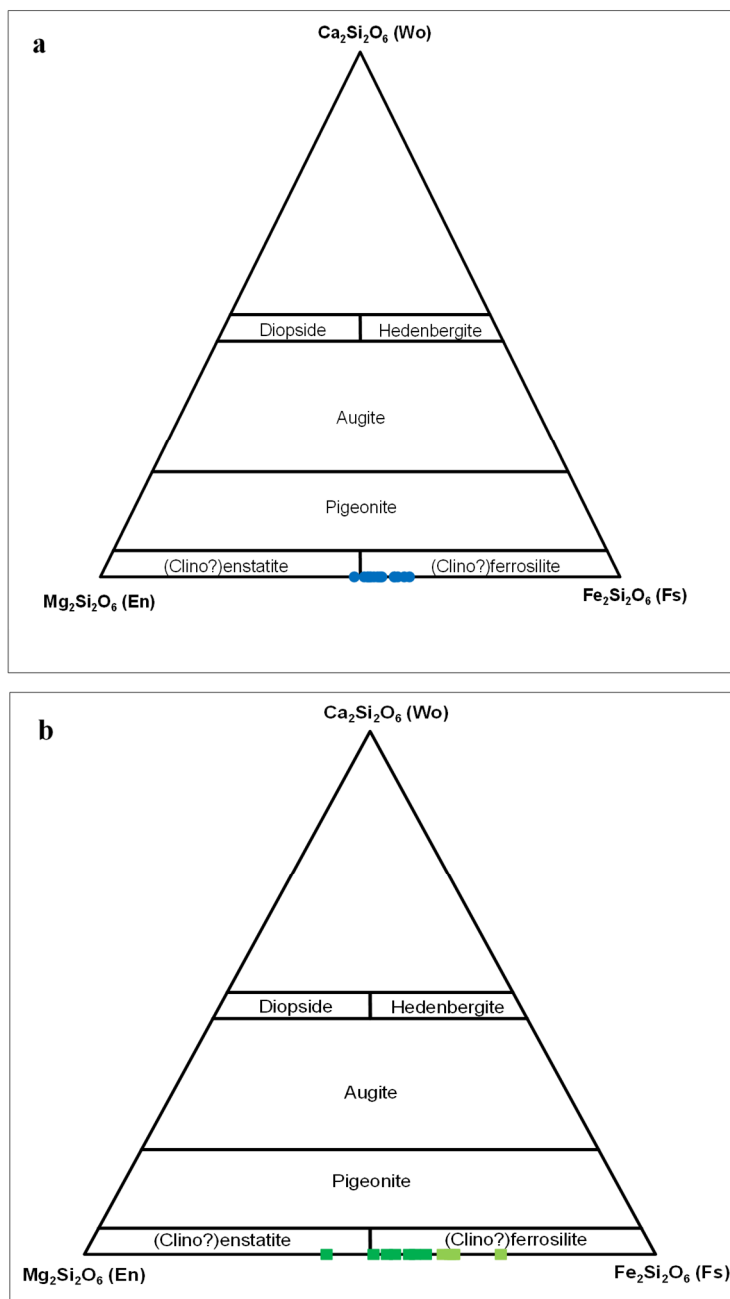
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Grant/Award Number: 270565; Newton Advanced Fellowship award - The Royal Society, Grant/Award Number: NA160116

Handling Editor: I. Somerville

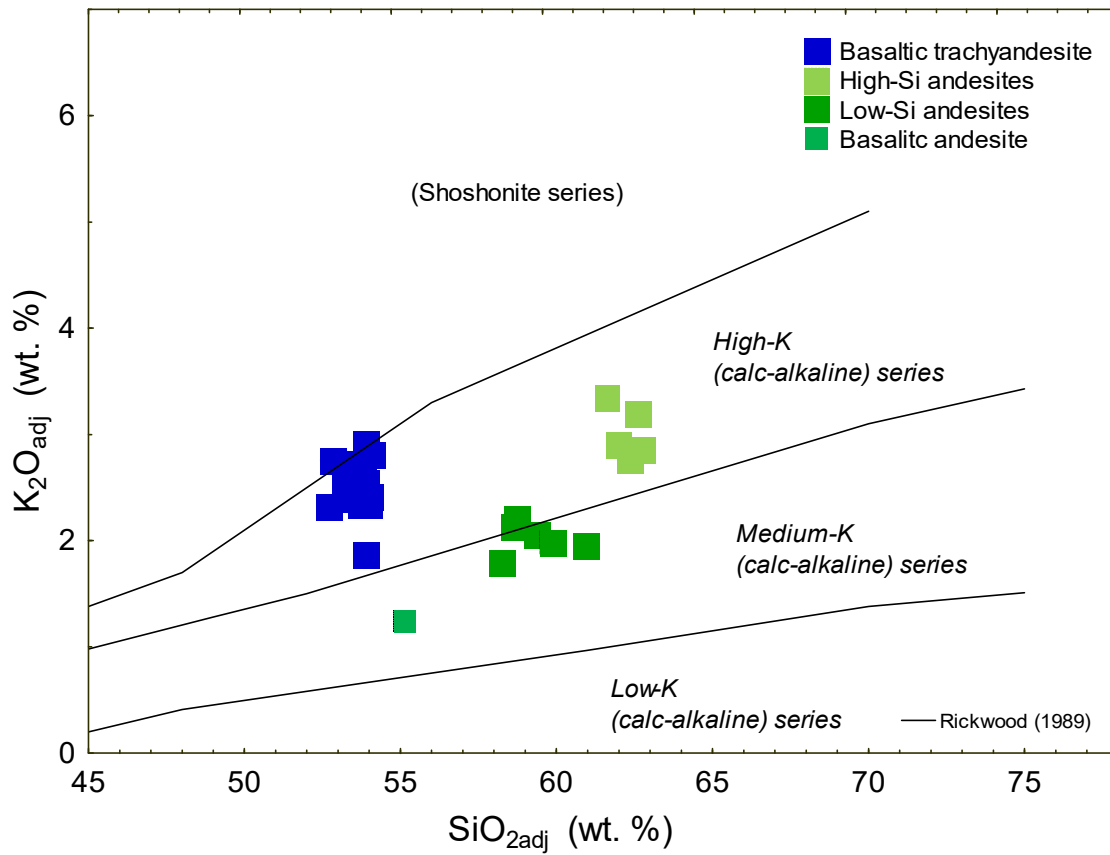
The Compostela area is located in the western Trans-Mexican Volcanic Belt, which consists of volcanic rocks that produced during the Pliocene to Recent volcanism. In this paper, we present petrography, whole-rock major- and trace-element concentrations, Ar–Ar ages, and Sr–Nd isotopic data of volcanic rocks from the Compostela area in the south of the city of Tepic, Nayarit, Mexico. These volcanic rocks are of intermediate composition and belong to the transitional series: basaltic trachyandesites [52.72–53.94 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.69–2.53 wt% MgO] and subalkaline series: low-Si [55.11–60.94 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.79–2.74 wt% MgO] and high-Si [61.60–62.71 wt% SiO<sub>2</sub>; 0.36–0.80 wt% MgO] andesites. The <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of two basaltic trachyandesites yields plateau ages of 1.05 ± 0.15 Ma and 1.07 ± 0.17 Ma and the andesites yielded a plateau age of 2.42 ± 0.36 Ma. These results indicate that the studied rocks were formed during the Pleistocene in two discrete episodes. The basaltic trachyandesites show enriched light rare earth elements patterns relative to high rare earth elements [(La/Yb)<sub>N</sub> = 5.81–8.07] with negligible Eu anomalies. The andesites display enriched large-ion lithophile elements (Ba, K) with anomalies of Nb (Th/Ce) and Ti in the three groups identified in the subalkaline series. The basaltic trachyandesites appear in a tight cluster of initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios (0.703519–0.703882) as compared to the basaltic andesite <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0.704073) and positive ε<sub>Nd</sub>(t) values of +5.6 to +3.4, respectively, indicating that the basaltic trachyandesites were derived from intermediate magmas from a shallow mantle source. Geochemical modelling reveals that both basaltic trachyandesite and andesite rocks were derived by a process of crystal fractionation accompanied by assimilation of crustal rocks at the lower or middle level. Geochemical ratios and multidimensional discrimination diagrams, combined with the cross-section of the subduction zone indicates that basaltic trachyandesites were generated from a rift and/or Ocean Island Basalt-type source, whereas andesites were generated from a slab-derived source in a subduction environment.

### KEYWORDS

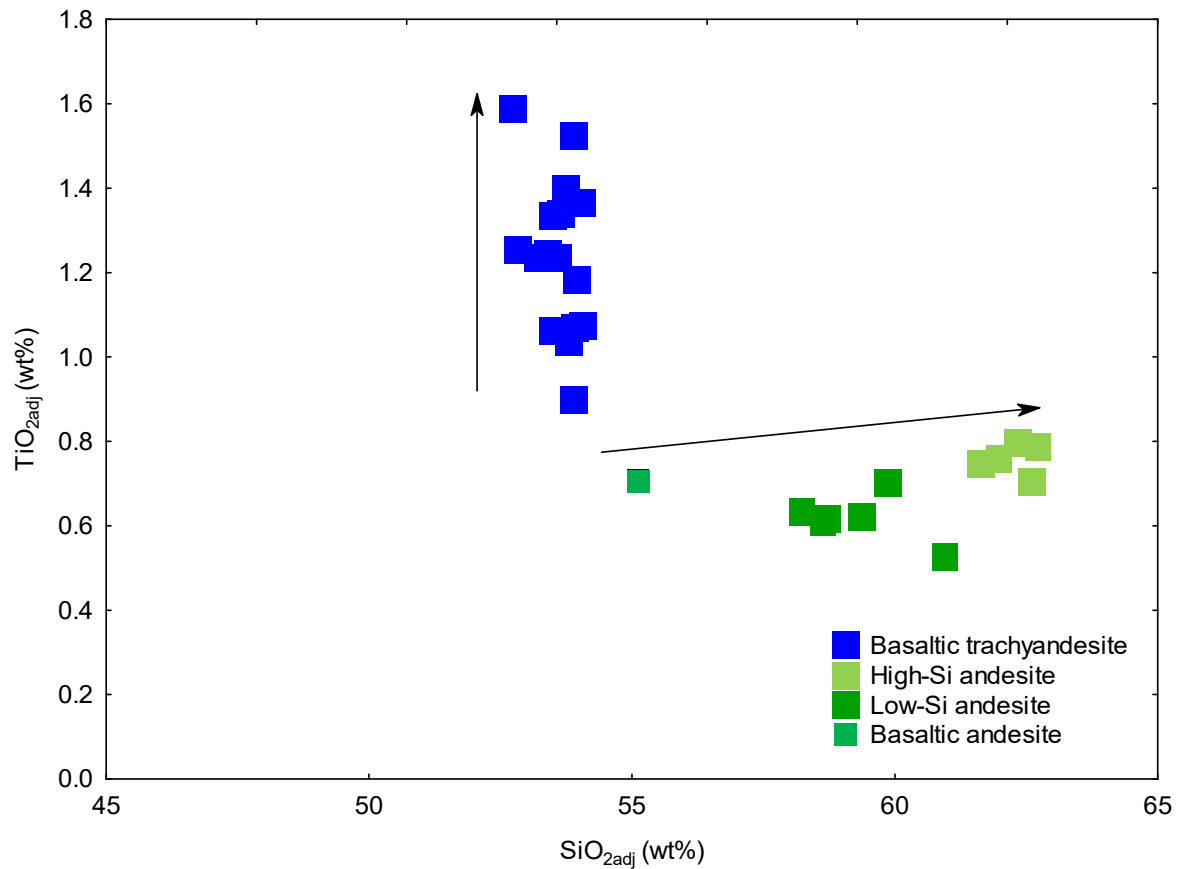
<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating, Compostela, geochemistry, Mexico, petrogenesis, Trans-Mexican Volcanic Belt



**Figure S1(a-b).** Morimoto's diagram (Morimoto, 1988) for pyroxenes in the basaltic andesites (later the basaltic trachyandesites) and andesites.



**Figure S2.**  $\text{K}_2\text{O}_{(\text{adj})}$ - $\text{SiO}_{2(\text{adj})}$  diagram of Peccerillo and Taylor (1976) for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area.



**Figure S3.**  $\text{TiO}_{2(\text{adj})}$ - $\text{SiO}_{2(\text{adj})}$  diagram for the intermediate volcanic rocks from the Compostela area.

#### References:

Morimoto, N. (1988). Nomenclature of Pyroxenes and Petrology, 39, 55-76.

Peccerillo, A., & Taylor, S.R. (1976). Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58, 63-81.

**Anexo II.** Resultados de análisis por difracción de rayos-X (XRD)

Condiciones de medición para todas las muestras analizadas: COM-03E, COM-06C, COM-06J, COM-07C y COM-07Fa.

X-Ray	40 kV , 44 mA	Scan speed / Duration time	4.3726 deg/min
Goniometer	SmartLab	Step width	0.0100 deg
Attachment	Standard	Scan axis	Theta/2-Theta
Filter	Cu K-beta	Scan range	5.0000 - 90.0000 deg
CBO selection slit	BB	Incident slit	1/2deg
Diffracted beam mono.	None	Length limiting slit	10.0mm
Detector		Receiving slit #1	20.000mm
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	20.000mm

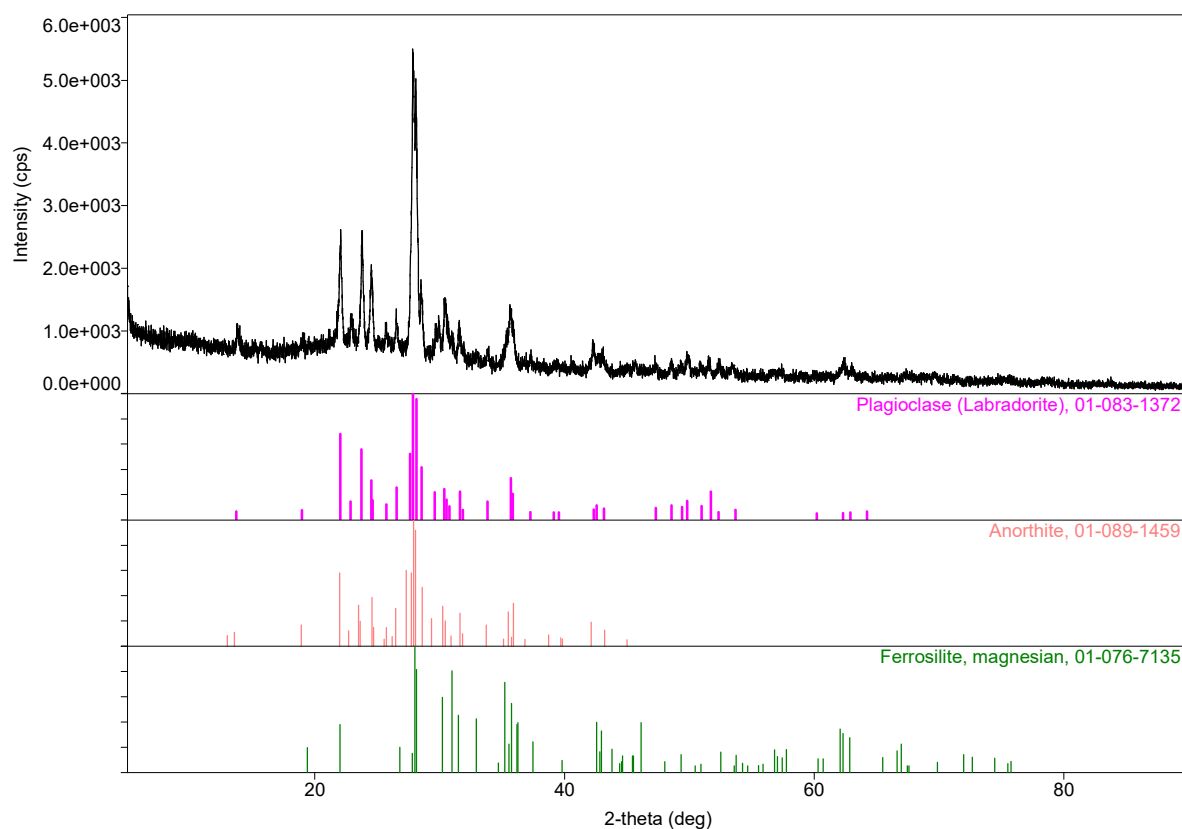
Nota: En la publicación los minerales identificados como labradorita y anortita se agruparon en Plagioclasas.

**Sample: COM-03E–Andesite****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> O <sub>8</sub> )	1.349	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-083-1372
Anorthite	Ca ( Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	1.412	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-089-1459
Ferrosilite, magnesian	( Fe <sub>0.818</sub> Mg <sub>0.156</sub> Ca <sub>0.01</sub> )	2.948	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-076-7135

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> )	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2016)	01-083-1372
Anorthite	Ca ( Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	2 : P-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-089-1459
Ferrosilite, magnesian	( Fe <sub>0.818</sub> Mg <sub>0.156</sub> Ca <sub>0.01</sub> )	61 : Pbca	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-076-7135

**Resultados de análisis cuantitativos**

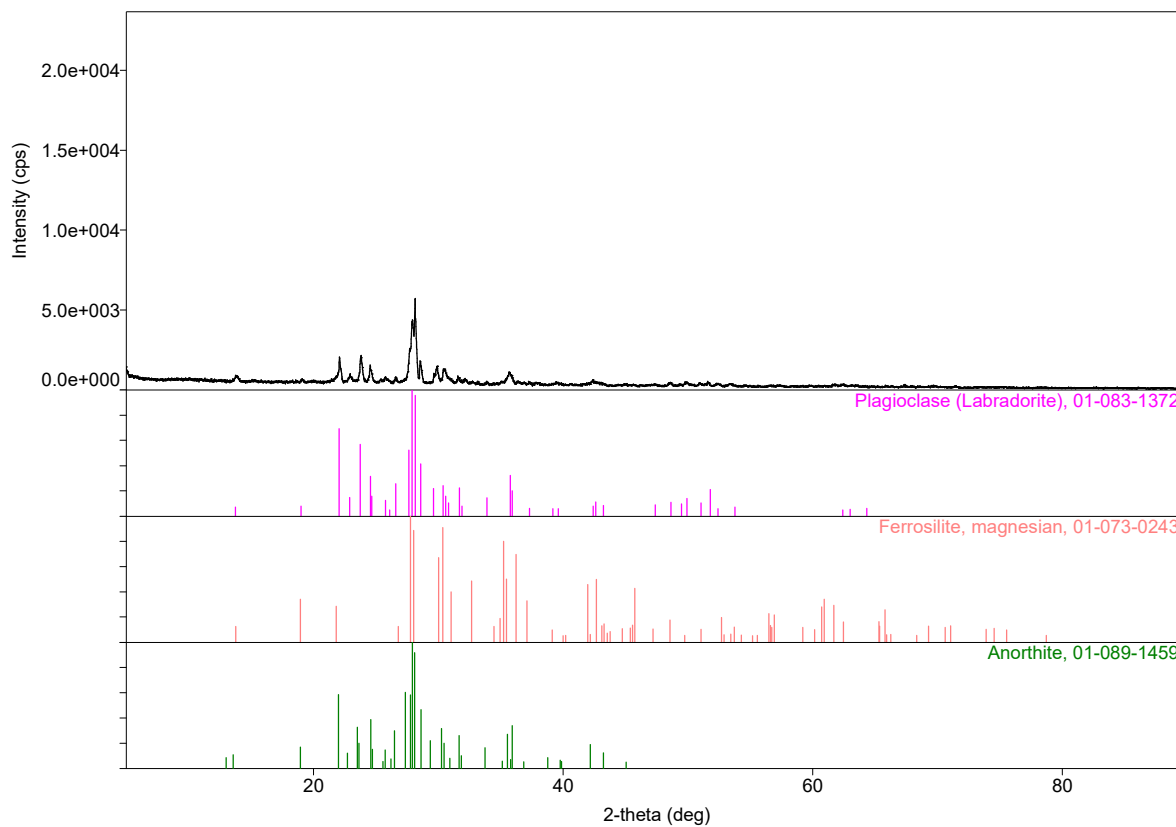
Phase name	Content(%)
Plagioclase (Labradorite)	21.0(14)
Anorthite	54(3)
Ferrosilite, magnesian	25(3)



**Sample: COM-06C**–Basaltic trachyandesite

## Resultados de análisis cualitativos

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> O <sub>8</sub> )	1.028	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-083-1372
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>3.18</sub> Fe <sub>6.66</sub> Ca <sub>0.16</sub> Si O <sub>3</sub>	1.506	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-073-0243
Anorthite	Ca ( Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	0.594	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-089-1459
Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> )	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2016	01-083-1372
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>3.18</sub> Fe <sub>6.66</sub> Ca <sub>0.16</sub> Si O <sub>3</sub>	61 : P <sub>6</sub> ca	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-073-0243
Anorthite	Ca ( Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	2 : P-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-089-1459



## Resultados de análisis cuantitativos

Phase name	Content(%)
Plagioclase (Labradorite)	71.1(10)
Ferrosilite, magnesian	9.7(6)
Anorthite	19.1(8)

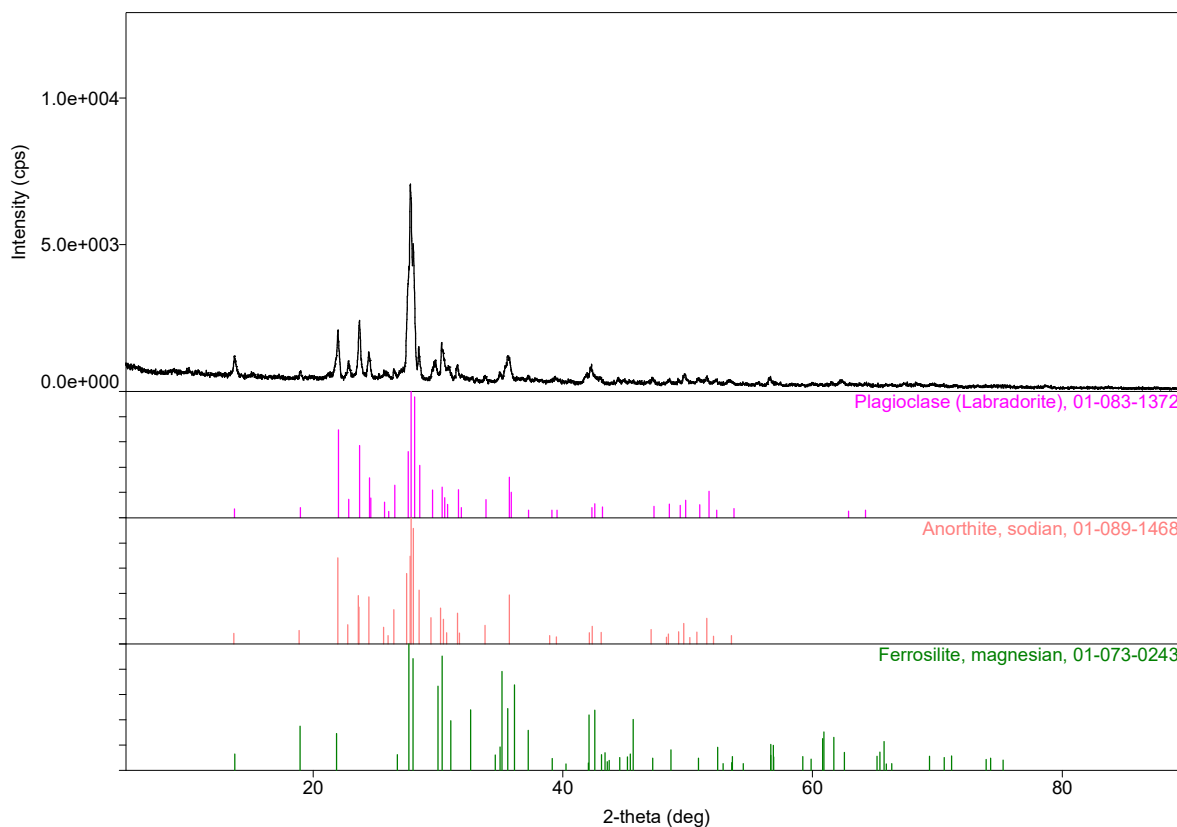
**Sample: COM-06J–Basaltic trachyandesite**

## Resultados de análisis cualitativos

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> O <sub>8</sub> )	1.245	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-083-1372
Anorthite, sodian	( Ca <sub>0.72</sub> Na <sub>0.28</sub> ) ( Al <sub>1.72</sub> Si <sub>0.28</sub> )	1.352	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-089-1468
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	1.579	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-073-0243

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> )	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2016)	01-083-1372
Anorthite, sodian	( Ca <sub>0.72</sub> Na <sub>0.28</sub> ) ( Al <sub>1.72</sub> )	2 : I-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-089-1468
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	61 : Pbca	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-073-0243



## Resultados de análisis cuantitativos

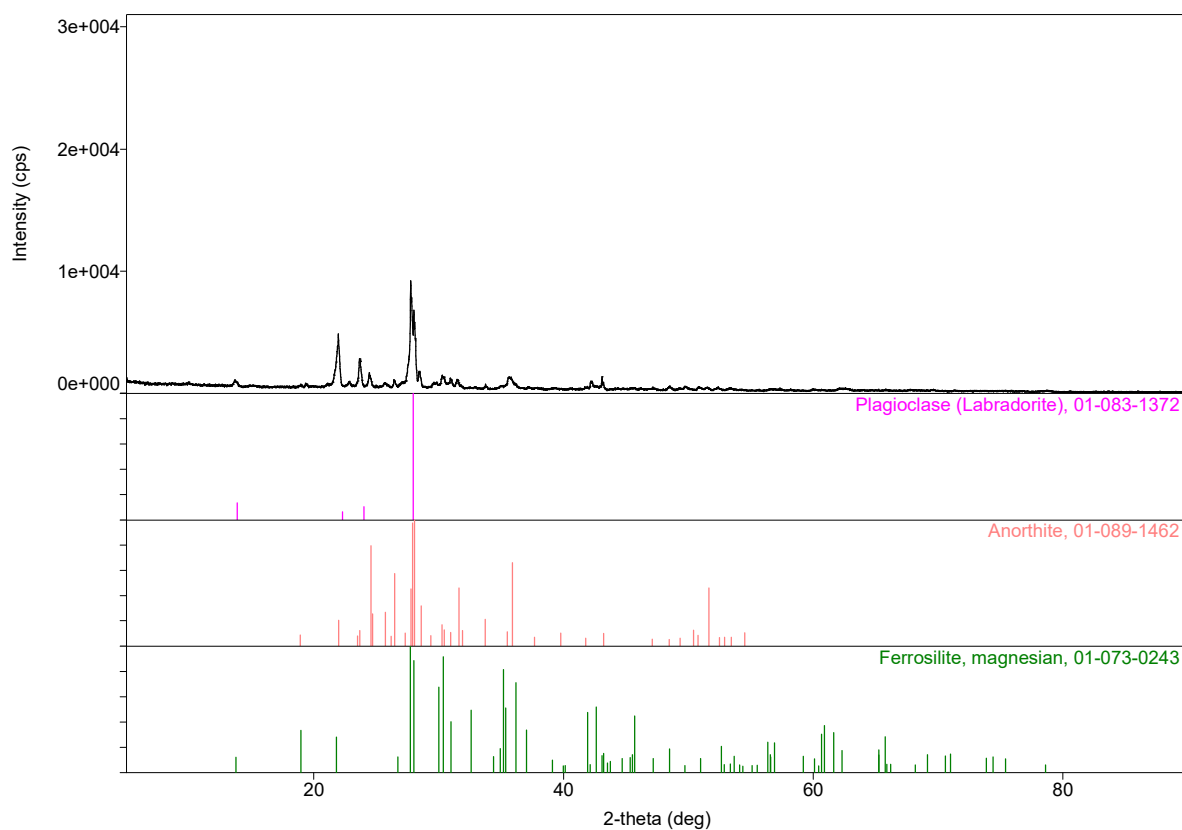
Phase name	Content(%)
Plagioclase (Labradorite)	44.4(10)
Anorthite, sodian	23.8(13)
Ferrosilite, magnesian	31.9(11)

**Sample: COM-07C–Andesite****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca0.68 Na0.30 ( Al1.66 Si2.34 O8 )	1.794	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-083-1372
Anorthite	Ca ( Al2 Si2 O8 )	1.718	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-089-1462
Ferrosilite, magnesian	Mg.318 Fe.666 Ca.016 Si O3	1.985	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-073-0243

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca0.68 Na0.30 ( Al1.66 Si2.34	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2016	01-083-1372
Anorthite	Ca ( Al2 Si2 O8 )	2 : I-1	ICDD (PDF-2 Release 2016	01-089-1462
Ferrosilite, magnesian	Mg.318 Fe.666 Ca.016 Si O3	61 : Pbc	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-073-0243

**Resultados de análisis cuantitativos**

Phase name	Content(%)
Plagioclase (Labradorite)	54(2)
Anorthite	14.6(5)
Ferrosilite, magnesian	31(3)

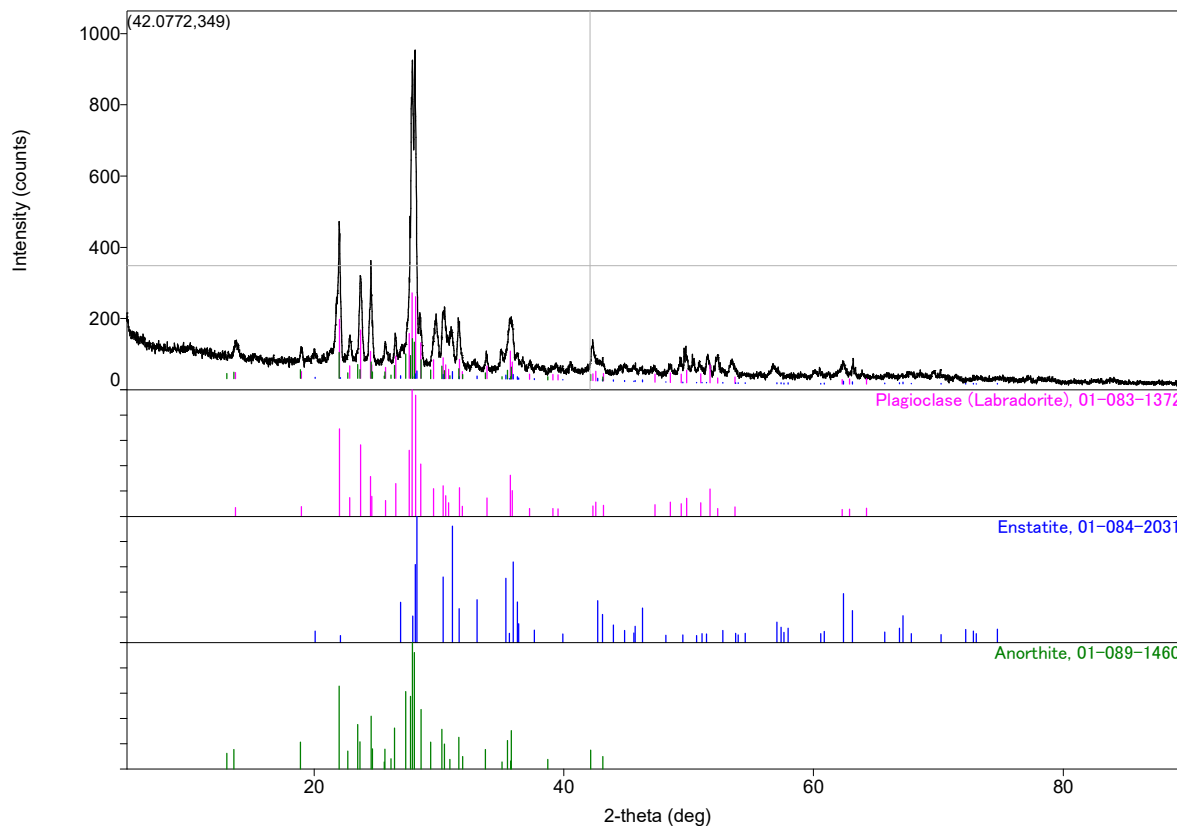
**Sample: COM-07Fa**–Basaltic andesite

## Resultados análisis cualitativos

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase ref. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> O <sub>8</sub> )	1.067	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-083-1372
Enstatite	Mg <sub>1.83</sub> Fe <sub>0.17</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.635	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-084-2031
Anorthite	Ca ( Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	1.815	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-089-1460

Phase name	Formula	Space group	Phase ref. detail	DB card number
Plagioclase (Labradorite)	Ca <sub>0.68</sub> Na <sub>0.30</sub> ( Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> O <sub>8</sub> )	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-083-1372
Enstatite	Mg <sub>1.83</sub> Fe <sub>0.17</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	61 : Pbca	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-084-2031
Anorthite	Ca ( Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	2 : P-1	ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB)	01-089-1460



## Resultados de análisis cuantitativos

Phase name	Content(%)
Plagioclase (Labradorite)	70(5)
Enstatite	5.7(10)
Anorthite	24.4(16)

## Anexo

### Capítulo 4

#### Anexo I. Resultados de análisis por difracción de rayos-X (XRD)

Las condiciones de medición fueron iguales para las muestras analizadas COM-01A, COM-01B, COM-02 y COM-05 que representan a la toba lítica.

X-Ray	40 kV , 44 mA	Scan speed / Duration time	4.4761 deg/min
Goniometer	SmartLab	Step width	0.0100 deg
Attachment	Standard	Scan axis	Theta/2-Theta
Filter	Cu_K-beta	Scan range	5.0000 - 90.0000 deg
CBO selection slit	BB	Incident slit	1/2deg
Diffrected beam mono.	None	Length limiting slit	10.0mm
Detector	D/teX Ultra 250	Receiving slit #1	20.000mm
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	20.000mm

Las condiciones de medición fueron iguales para las muestras analizadas COM-04A, COM-04B, COM-04C, COM-04D, COM-04E, COM-04F, COM-04G, COM-04H y COM-04J que representan a la toba bandeada.

X-Ray	40 kV , 44 mA	Scan speed / Duration time	4.3726 deg/min
Goniometer	SmartLab	Step width	0.0100 deg
Attachment	Standard	Scan axis	Theta/2-Theta
Filter	Cu_K-beta	Scan range	5.0000 - 90.0000 deg
CBO selection slit	BB	Incident slit	1/2deg
Diffrected beam mono.	None	Length limiting slit	10.0mm
Detector	D/teX Ultra 250	Receiving slit #1	20.000mm
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	20.000mm

El único cambio que se tuvo fue en la scan speed/duration time en la toba lítica fue de 4.4761 y en la toba bandeada de 4.3726. Esto puede ser por la naturaleza de la roca.

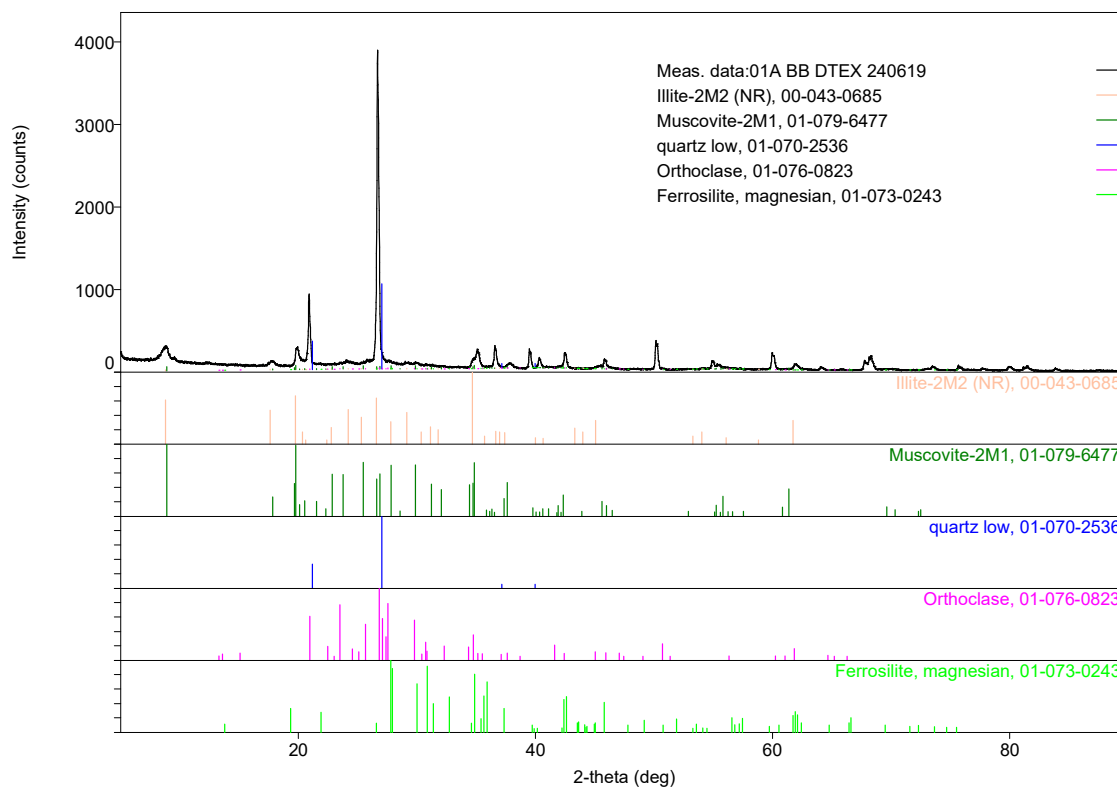
**Nota:** Los minerales de sanidino y ortoclasa corresponden al grupo de los Feldespatos y la tridimita es una variedad de cuarzo

**Sample:COM-01A–Crystal Lithic Tuff (Rhyolite)****Resultado de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Illite-2M2 (NR)	K Al <sub>2</sub> ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	1.983	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-043-0685
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.55</sub> Mg <sub>0.24</sub> Fe <sub>0.21</sub> )	3.159	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-079-6477
quartz low	Si O <sub>2</sub>	3.221	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-2536
Orthoclase	( K <sub>0.94</sub> Na <sub>0.06</sub> ) ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2.967	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-076-0823
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	3.219	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-073-0243

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Illite-2M2 (NR)	K Al <sub>2</sub> ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	00-043-0685
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.55</sub> Mg <sub>0.24</sub> Fe <sub>0.21</sub> )	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-079-6477
quartz low	Si O <sub>2</sub>	154 : P3221	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-2536
Orthoclase	( K <sub>0.94</sub> Na <sub>0.06</sub> ) ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-076-0823
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	61 : Pbc <sub>a</sub>	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-073-0243

**Resultados de análisis cuantitativos**

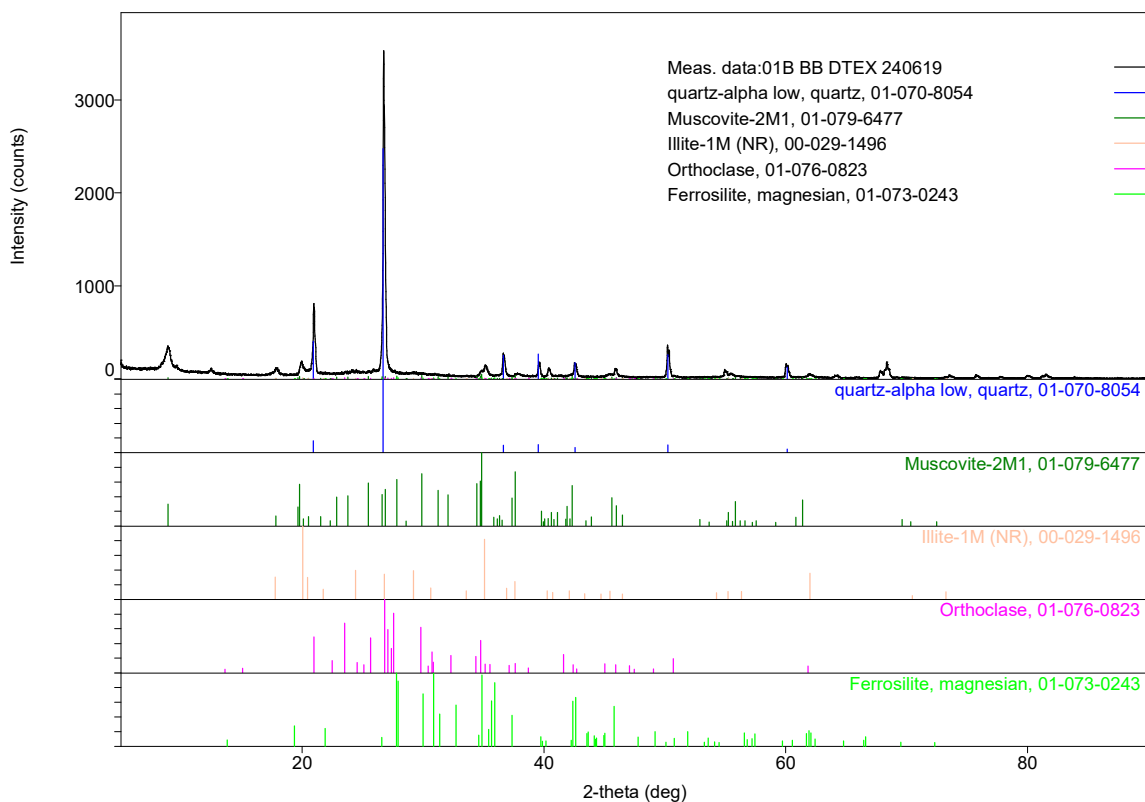
Phase name	Content(%)
Illite-2M2 (NR)	68(2)
Muscovite-2M1	12.4(4)
quartz low	18(3)
Orthoclase	0.9(4)
Ferrosilite, magnesian	0.6(3)

**Sample: COM-01B–Crystal Lithic Tuff (Rhyolite)****Resultado de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	0.888	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.55</sub> Mg <sub>0.24</sub> Fe <sub>0.21</sub> )	1.794	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-079-6477
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	1.748	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-029-1496
Orthoclase	( K <sub>0.94</sub> Na <sub>0.06</sub> ) ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	1.343	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-076-0823
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	2.082	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-073-0243

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-8054
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.55</sub> Mg <sub>0.24</sub> Fe <sub>0.21</sub> )	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-079-6477
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	00-029-1496
Orthoclase	( K <sub>0.94</sub> Na <sub>0.06</sub> ) ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-076-0823
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	61 : Pbca	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-073-0243

**Resultados de análisis cuantitativo**

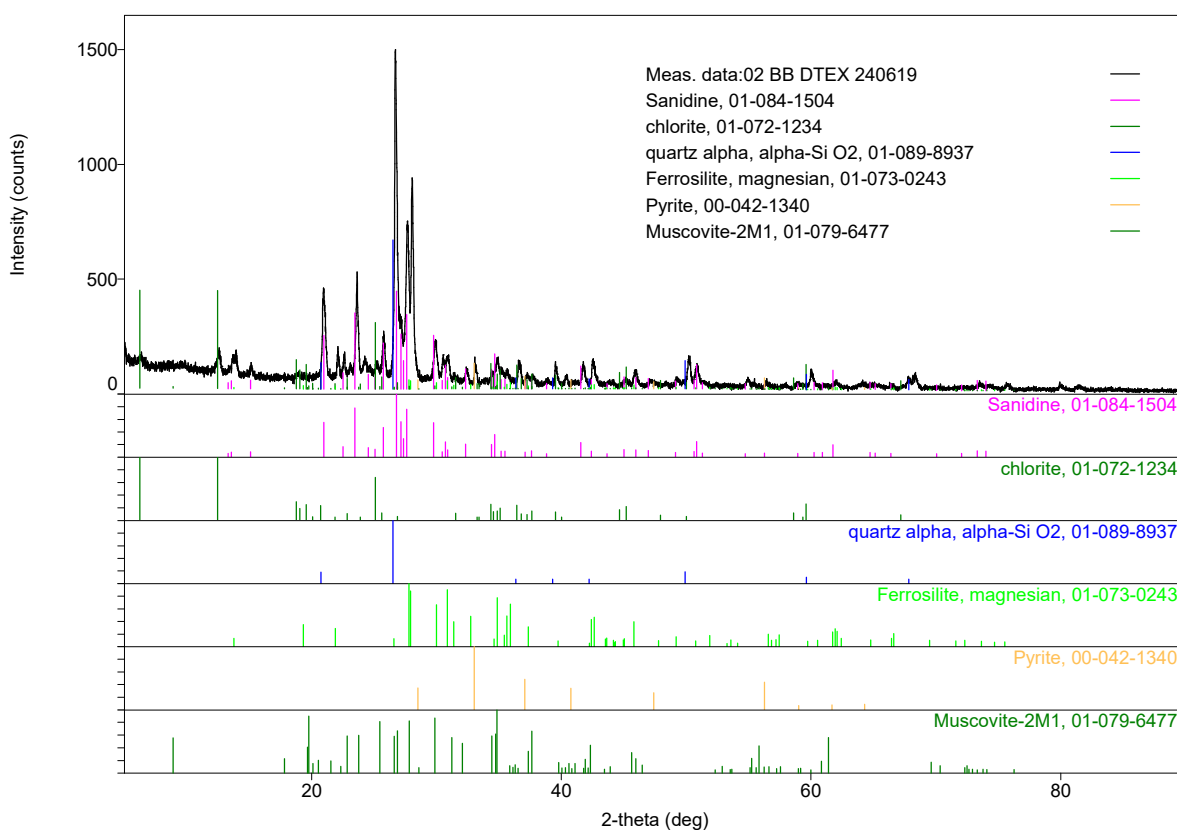
Phase name	Content(%)
quartz-alpha low, quartz	75(4)
Muscovite-2M1	16(3)
Illite-1M (NR)	4(2)
Orthoclase	2.4(19)
Ferrosilite, magnesian	3.1(10)

**Sample: COM-02–Crystal Lithic Tuff (Rhyolite)****Resultado de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.915	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-084-1504
chlorite	Mg <sub>2.5</sub> Fe <sub>1.65</sub> Al <sub>1.5</sub> Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub>	3.021	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-1234
quartz alpha, alpha-Si O <sub>2</sub>	Si O <sub>2</sub>	2.853	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-089-8937
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	1.771	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-073-0243
Pyrite	Fe S <sub>2</sub>	1.572	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-042-1340
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.55</sub> Mg <sub>0.24</sub> Fe <sub>0.21</sub> )	1.869	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-079-6477

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m 1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-084-1504
chlorite	Mg <sub>2.5</sub> Fe <sub>1.65</sub> Al <sub>1.5</sub> Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub>	5 : C121,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-072-1234
quartz alpha, alpha-Si O <sub>2</sub>	Si O <sub>2</sub>	154 : P3221	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-089-8937
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si O <sub>3</sub>	61 : Pbc <sub>a</sub>	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-073-0243
Pyrite	Fe S <sub>2</sub>	205 : Pa-3	ICDD (PDF-2 Release 2018)	00-042-1340
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.55</sub> Mg <sub>0.24</sub> Fe <sub>0.21</sub> )	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-079-6477

**Resultados de análisis cuantitativos**

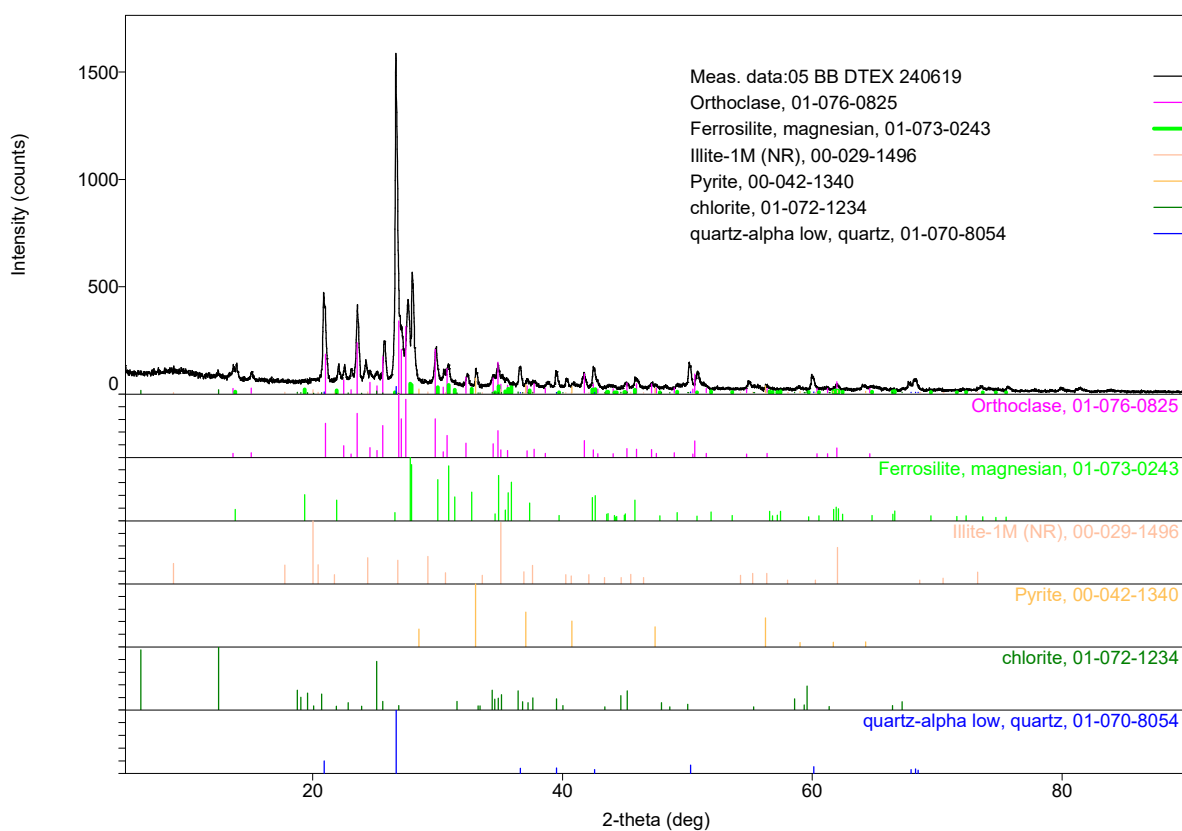
Phase name	Content(%)
Sanidine	44.8(16)
chlorite	28.2(12)
quartz alpha, alpha-Si O <sub>2</sub>	16.1(18)
Ferrosilite, magnesian	4.8(8)
Pyrite	3.4(5)
Muscovite-2M1	2.7(10)



**Sample: COM-05–Crystal Lithic Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Orthoclase	( K <sub>0.88</sub> Na <sub>0.10</sub> Ca <sub>0.009</sub> Ba <sub>0.012</sub> )	0.911	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-076-0825
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	1.756	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-073-0243
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	3.152	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-029-1496
Pyrite	Fe S <sub>2</sub>	1.592	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-042-1340
chlorite	Mg <sub>2.5</sub> Fe <sub>1.65</sub> Al <sub>1.5</sub> Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub>	1.859	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-1234
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	2.913	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Orthoclase	( K <sub>0.88</sub> Na <sub>0.10</sub> Ca <sub>0.009</sub>	2 : C-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-076-0825
Ferrosilite, magnesian	Mg <sub>0.318</sub> Fe <sub>0.666</sub> Ca <sub>0.016</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	61 : Pbca	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-073-0243
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	00-029-1496
Pyrite	Fe S <sub>2</sub>	205 : Pa-3	ICDD (PDF-2 Release 2018	00-042-1340
chlorite	Mg <sub>2.5</sub> Fe <sub>1.65</sub> Al <sub>1.5</sub> Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub>	5 : C121,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-072-1234
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-070-8054

**Resultados de análisis cuantitativos**

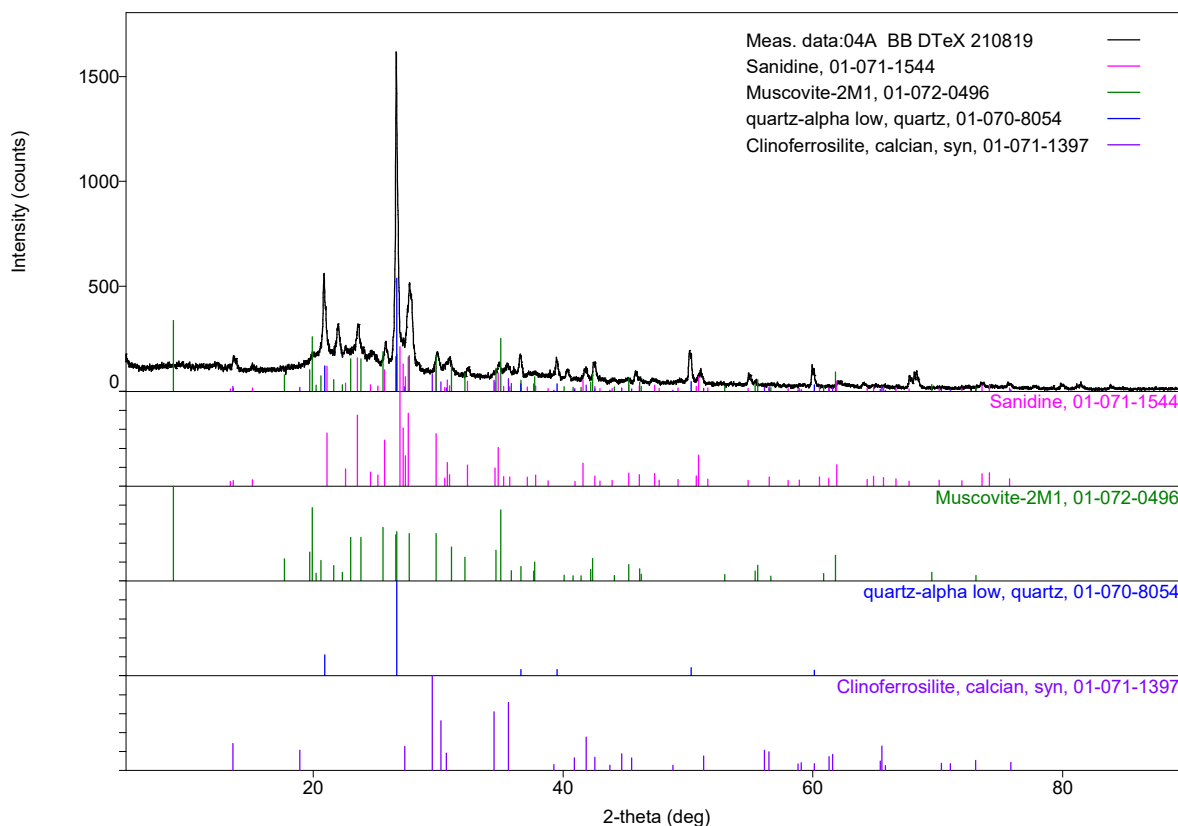
Phase name	Content(%)
Orthoclase	78(3)
Ferrosilite, magnesian	10.6(18)
Illite-1M (NR)	4(2)
Pyrite	3.4(7)
chlorite	2.3(11)
quartz-alpha low, quartz	1(2)

**Sample: COM-04A–Flow banded Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.059	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	1.456	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-0496
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	1.252	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.082	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1544
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-072-0496
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-8054
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1397

**Resultados de análisis cuantitativos**

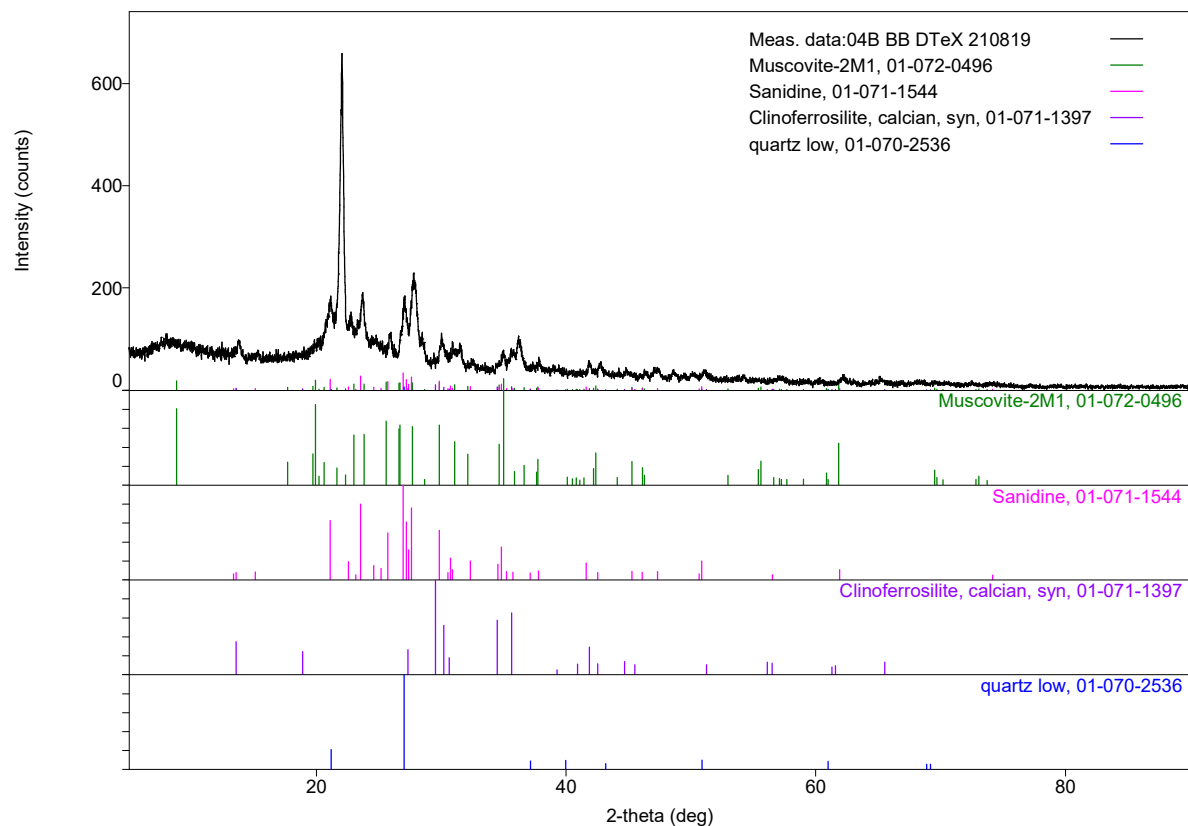
Phase name	Content(%)
Sanidine	41(3)
Muscovite-2M1	42(3)
quartz-alpha low, quartz	9(4)
Clinoferrosilite, calcian, syn	7(2)

**Sample: COM-04B–Flow banded Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Muscovite-2M1	$K ( Al_{1.88} Fe_{0.12} ) ( Si_3 Al ) O_{10}$	2.029	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-0496
Sanidine	$K Al Si_3 O_8$	1.656	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
Clinoferrosilite, calcian, syn	$Fe_{1.5} Ca_{0.5} ( Si O_3 )_2$	1.701	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397
quartz low	$Si O_2$	1.822	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-2536

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Muscovite-2M1	$K ( Al_{1.88} Fe_{0.12} ) ( Si_3 Al ) O_{10}$	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-072-0496
Sanidine	$K Al Si_3 O_8$	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1544
Clinoferrosilite, calcian, syn	$Fe_{1.5} Ca_{0.5} ( Si O_3 )_2$	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1397
quartz low	$Si O_2$	154 : P3221	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-2536

**Resultados de análisis cuantitativos**

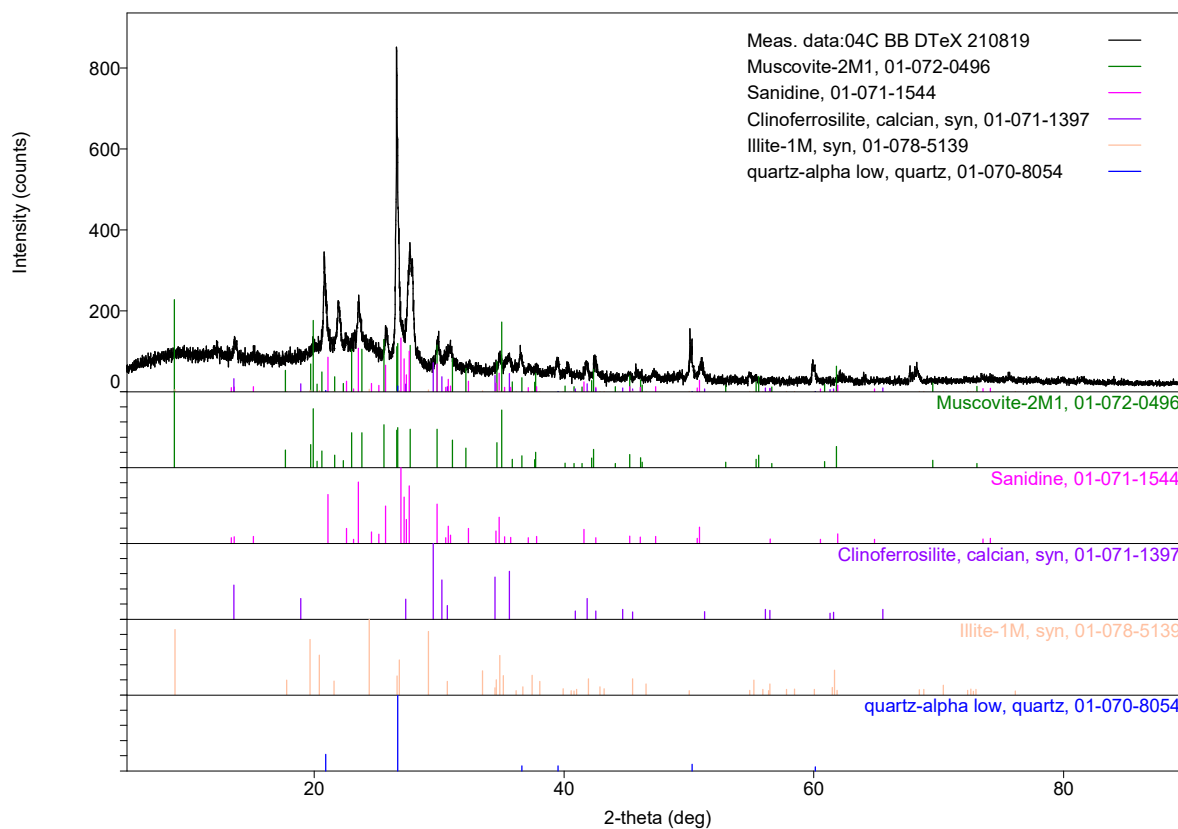
Phase name	Content(%)
Muscovite-2M1	45(7)
Sanidine	44(6)
Clinoferrosilite, calcian, syn	8.0(16)
quartz low	3(9)

**Sample: COM-04C–Flow banded Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Muscovite-2M1	K ( Al1.88 Fe0.12 ) ( Si3 Al ) O10	1.514	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-0496
Sanidine	K Al Si3 O8	2.119	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe1.5 Ca0.5 ( Si O3 )2	3.026	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397
Illite-1M, syn	( K0.72 Na0.05 ) ( Al1.46 Mg0.22	3.005	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-078-5139
quartz-alpha low, quartz	Si O2	1.687	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Muscovite-2M1	K ( Al1.88 Fe0.12 ) ( Si3 Al ) O10	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-072-0496
Sanidine	K Al Si3 O8	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-071-1544
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe1.5 Ca0.5 ( Si O3 )2	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-071-1397
Illite-1M, syn	( K0.72 Na0.05 ) ( Al1.46 Mg0.22	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-078-5139
quartz-alpha low, quartz	Si O2	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-070-8054

**Resultados de análisis cuantitativos**

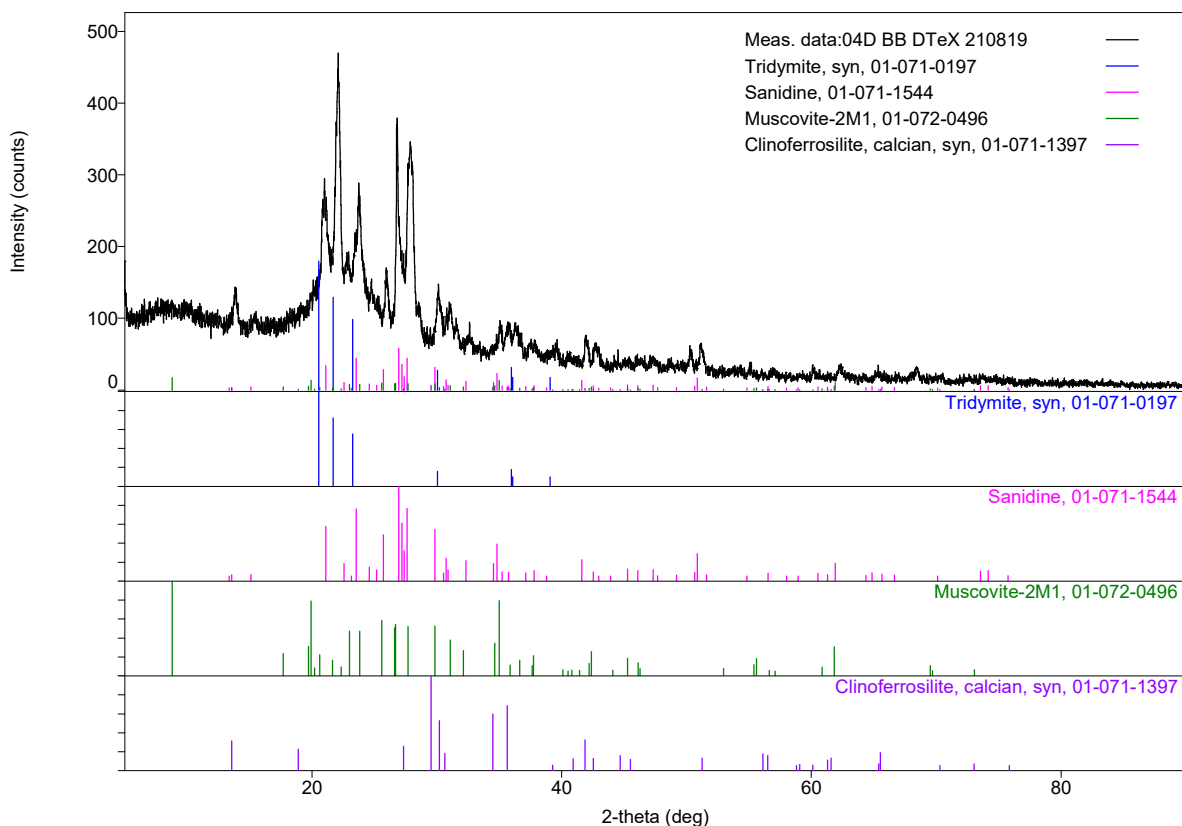
Phase name	Content(%)
Muscovite-2M1	74(3)
Sanidine	21(3)
Clinoferrosilite, calcian, syn	3.9(18)
Illite-1M, syn	0.9(9)
quartz-alpha low, quartz	0(2)

**Sample: COM-04D–Flow banded Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Tridymite, syn	Si O <sub>2</sub>	1.250	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-0197
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.924	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	1.669	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-0496
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2.924	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Tridymite, syn	Si O <sub>2</sub>	9 : C1c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-0197
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1544
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-072-0496
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1397

**Resultados de análisis cuantitativos**

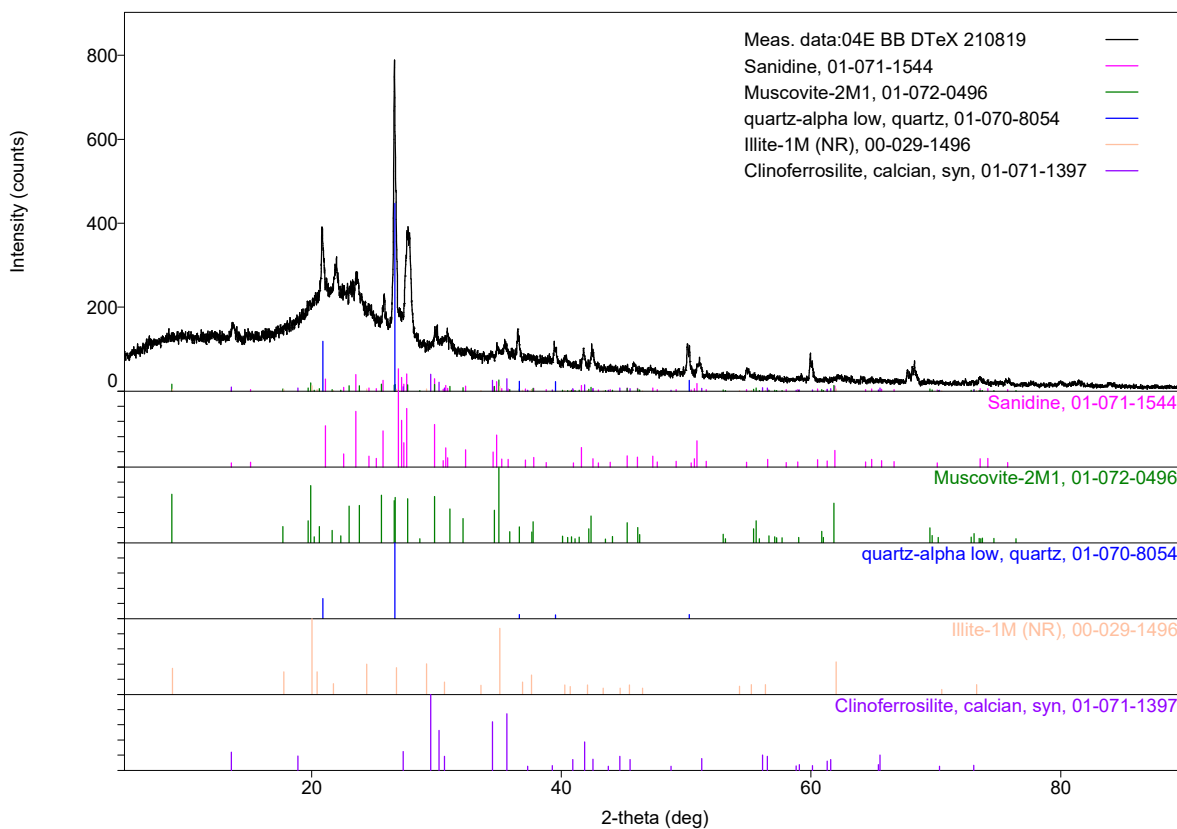
Phase name	Content(%)
Tridymite, syn	50(3)
Sanidine	34(3)
Muscovite-2M1	14(4)
Clinoferrosilite, calcian, syn	2.2(9)

**Sample: COM-04E–Flow banded Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.914	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	2.847	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-0496
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	1.523	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	3.006	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-029-1496
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.618	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1544
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-072-0496
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-8054
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	00-029-1496
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1397

**Resultados de análisis cuantitativos**

Phase name	Content(%)
Sanidine	35(5)
Muscovite-2M1	30(6)
quartz-alpha low, quartz	19(6)
Illite-1M (NR)	8(4)
Clinoferrosilite, calcian, syn	8(3)

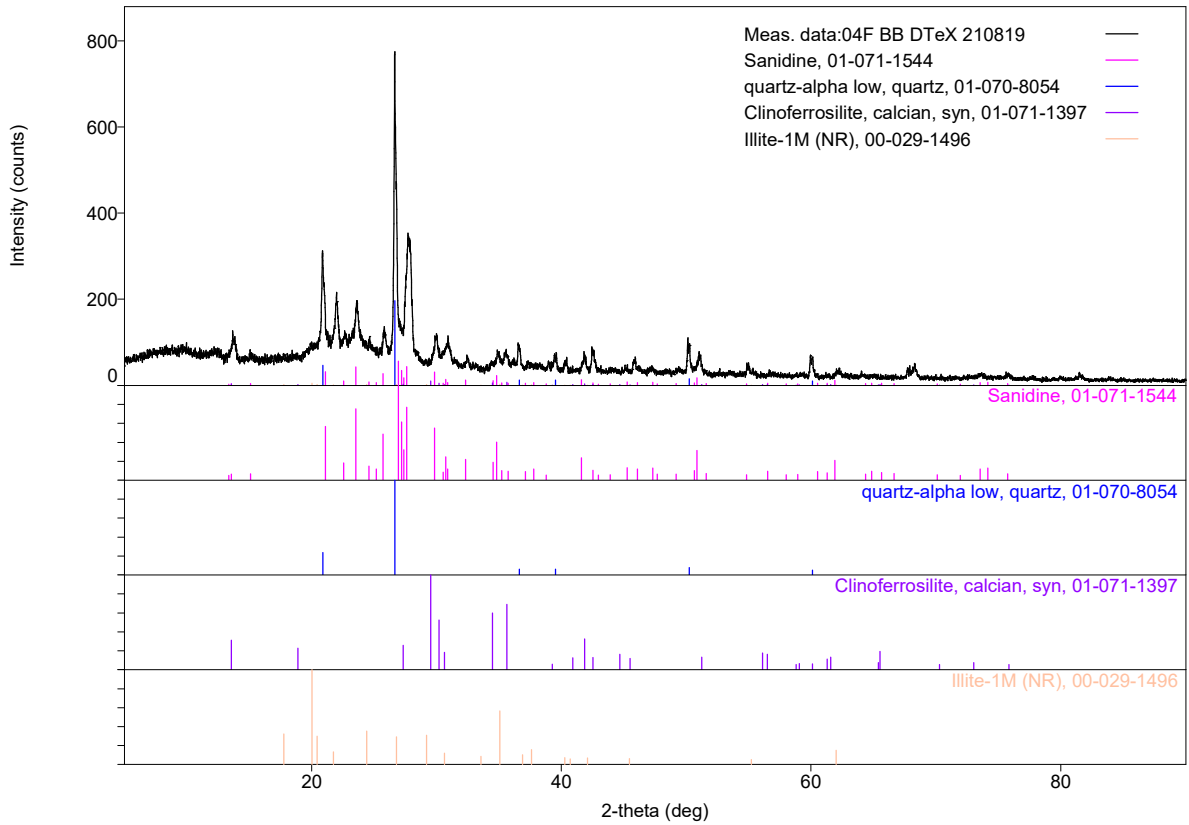
**Sample: COM-04F–Flow banded Tuff (Rhyolite)**

**Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.480	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	1.409	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.544	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	2.086	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-029-1496

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-8054
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1397
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	00-029-1496



**Resultados de análisis cuantitativos**

Phase name	Content(%)
Sanidine	64(7)
quartz-alpha low, quartz	27(8)
Clinoferrosilite, calcian, syn	5(3)
Illite-1M (NR)	3(3)

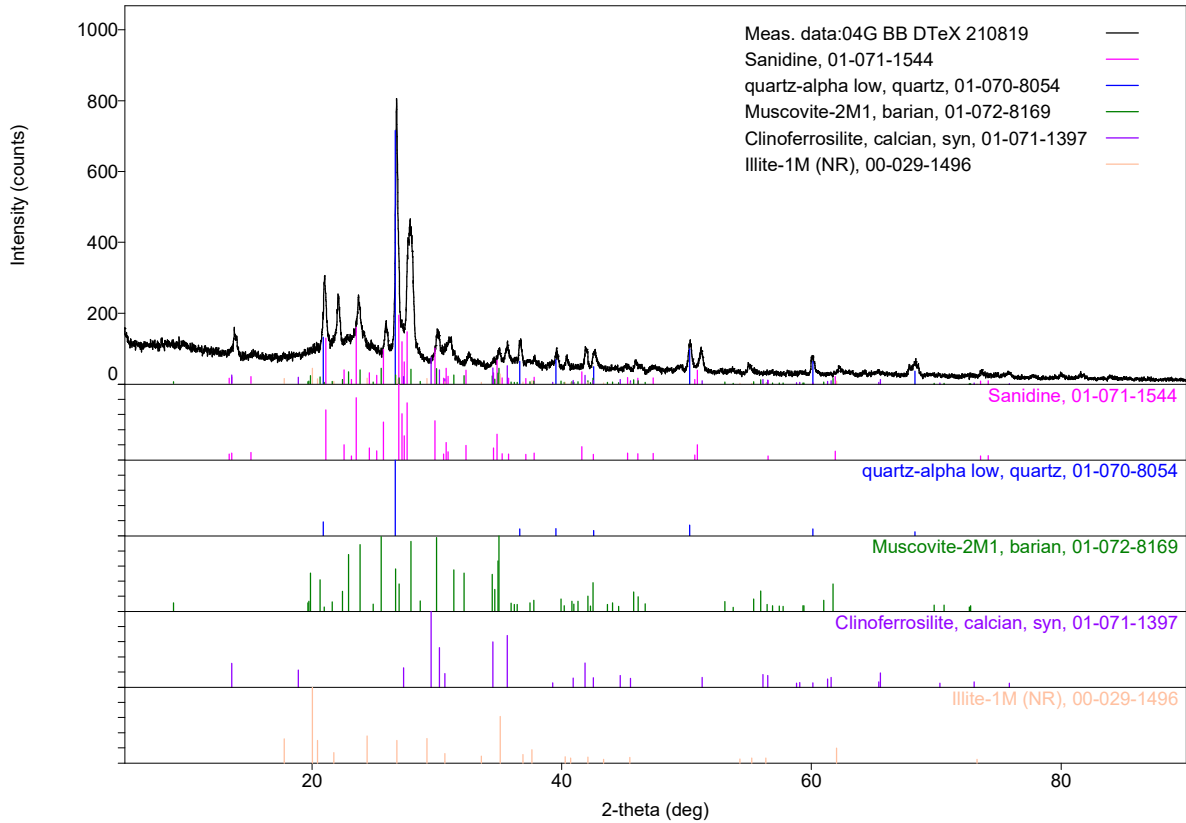
**Sample: COM-04G–Flow banded Tuff (Rhyolite)**

**Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.614	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	1.385	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054
Muscovite-2M1, barian	( K <sub>0.55</sub> Ba <sub>0.32</sub> Na <sub>0.13</sub> ) ( Al <sub>1.97</sub>	2.946	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-8169
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.980	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	3.040	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-029-1496

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-070-8054
Muscovite-2M1, barian	( K <sub>0.55</sub> Ba <sub>0.32</sub> Na <sub>0.13</sub> ) ( Al <sub>1.97</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-072-8169
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	01-071-1397
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018	00-029-1496



**Resultados de análisis cuantitativos**

Phase name	Content(%)
Sanidine	46(5)
quartz-alpha low, quartz	21(7)
Muscovite-2M1, barian	16(2)
Clinoferrosilite, calcian, syn	9.9(19)
Illite-1M (NR)	7(4)

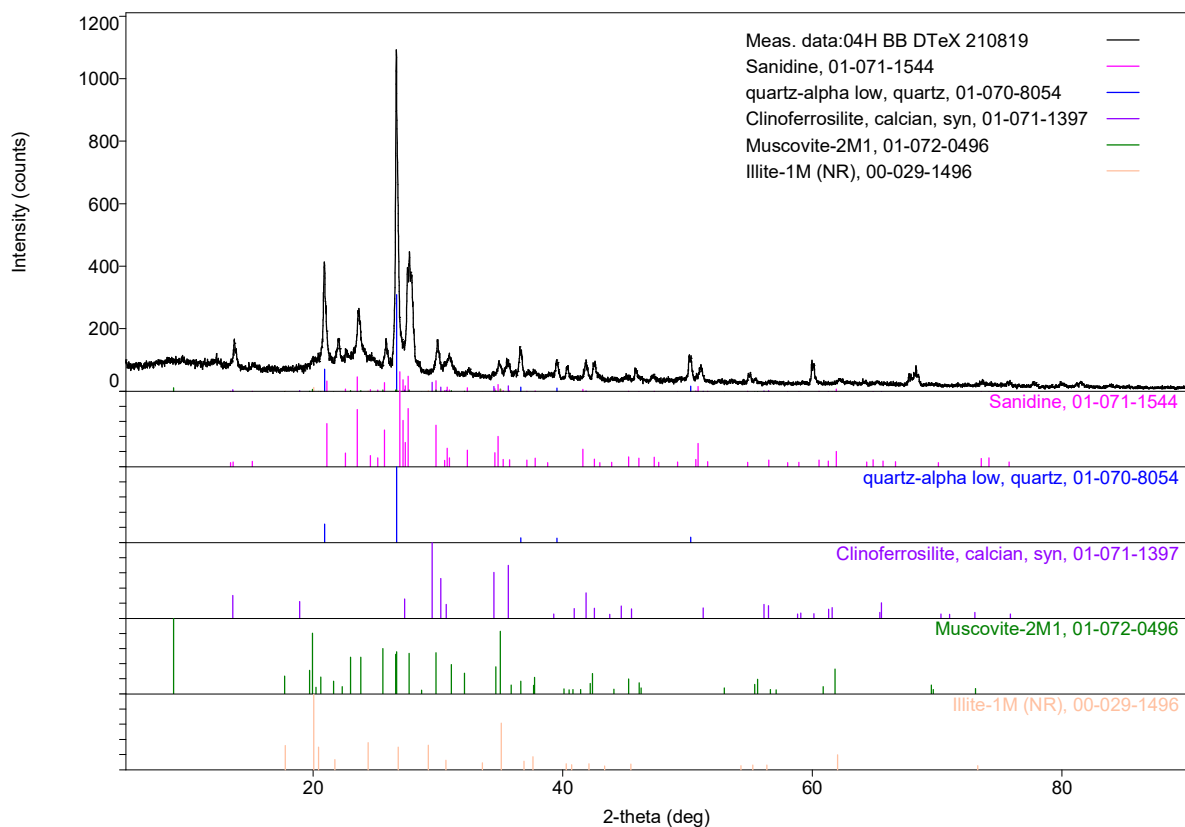


**Sample: COM-04H–Flow banded Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.251	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	2.619	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.691	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	3.017	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-0496
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	3.127	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-029-1496

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-8054
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1397
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-072-0496
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	00-029-1496

**Resultados de análisis cuantitativos**

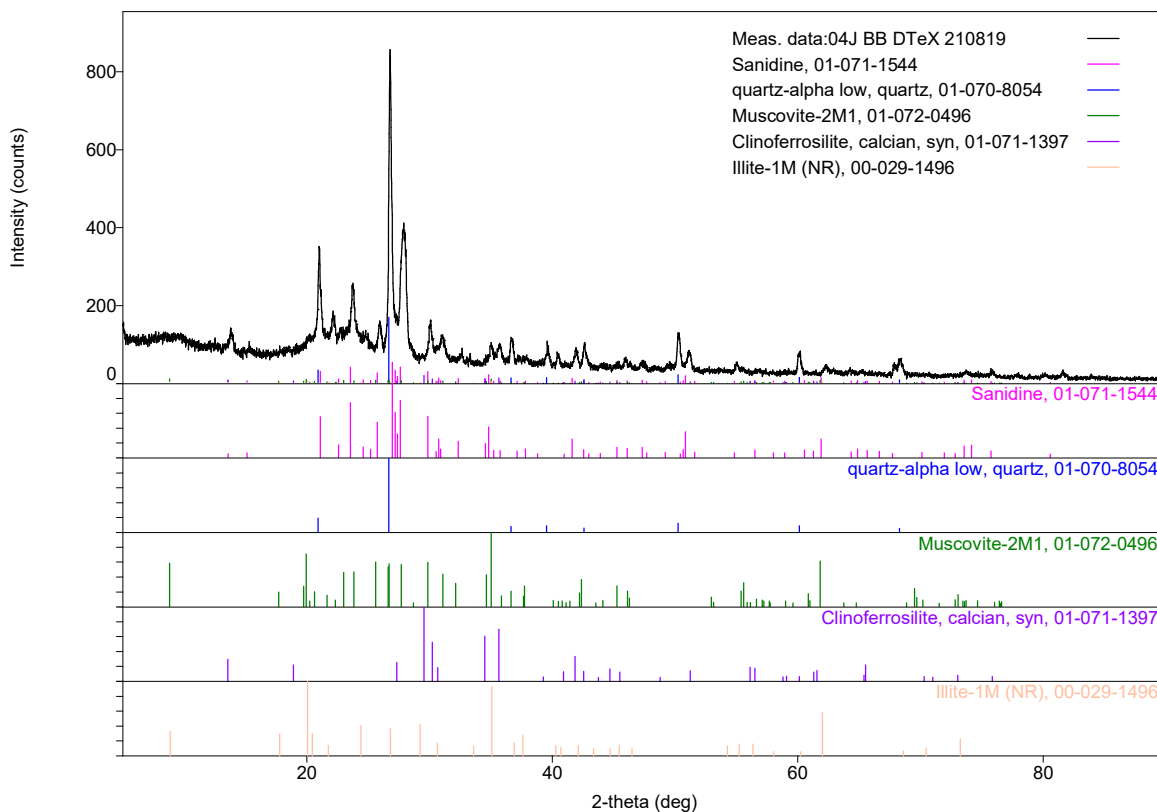
Sin resultados cuantitativos, muy similar a COM-04G y COM-04J

**Sample: COM-04J–Flow banded Tuff (Rhyolite)****Resultados de análisis cualitativos**

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.733	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	2.925	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-070-8054
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	2.943	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-072-0496
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2.943	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	01-071-1397
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	3.064	ICDD (PDF-2 Release 2018 RDB)	00-029-1496

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Sanidine	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1544
quartz-alpha low, quartz	Si O <sub>2</sub>	152 : P3121	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-070-8054
Muscovite-2M1	K ( Al <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-072-0496
Clinoferrosilite, calcian, syn	Fe <sub>1.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> ( Si O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15 : C12/c1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	01-071-1397
Illite-1M (NR)	K <sub>0.7</sub> Al <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	12 : C12/m1,unique-b,cell-1	ICDD (PDF-2 Release 2018)	00-029-1496

**Resultados de análisis cuantitativos**

Phase name	Content(%)
Sanidine	48(11)
quartz-alpha low, quartz	21(11)
Muscovite-2M1	15(8)
Clinoferrosilite, calcian, syn	12(4)
Illite-1M (NR)	5(9)