

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE  
CARRERA DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN



GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS  
ROCAS GRANÍTICAS AL NOROESTE Y SURESTE DE LA  
CALDERA DE QUETZALTENANGO, QUETZALTENANGO

EDGAR ROBERTO MÉRIDA BOOGHER

COBÁN, ALTA VERAPAZ, ABRIL DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE  
CARRERA DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS  
ROCAS GRANÍTICAS AL NOROESTE Y SURESTE DE LA  
CALDERA DE QUETZALTENANGO, QUETZALTENANGO

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

EDGAR ROBERTO MÉRIDA BOOGHER  
200940318

COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓLOGO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, ABRIL DE 2017

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

### **RECTOR MAGNÍFICO**

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

### **CONSEJO DIRECTIVO**

PRESIDENTE:	Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
SECRETARIO:	Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey
REPRESENTANTE DE DOCENTES:	Lcda. T.S. Floricelda Chiquín Yoj
REPRESENTANTE EGRESADOS:	Lic. Admón. Fredy Fernando Lemus Morales
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES:	Br. Fredy Enrique Gereda Milián PEM. César Oswaldo Bol Cú

### **COORDINADOR ACADÉMICO**

Ing. Francisco David Ruiz Herrera

### **COORDINADOR DE LA CARRERA**

Ing. Geól. Sergio David Morán Ical

### **COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN**

COORDINADOR:	Ing. Geól. Ricardo Enrique Milián de la Cruz
SECRETARIO:	Ing. Geól. Edwin Orlando Yash Asencio
VOCAL:	Ing. Geól. Silvia Friné Cortez Bendfeldt

### **REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO**

Ing. Civil *MSc.* Julio Enrique Reynosa Mejía

### **REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Ing. Geól. Ricardo Enrique Milián de la Cruz

### **ASESOR**

Ing. Geól. *MSc.* Osmín Jared Vásquez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO  
DEL NORTE (CUNOR)  
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz  
PBX: 79 566 600 Ext. 209  
Guatemala, C. A.  
c. c.: [geologiausac@gmail.com](mailto:geologiausac@gmail.com)

Ref. 15-CG-279/2016  
10 de octubre de 2016

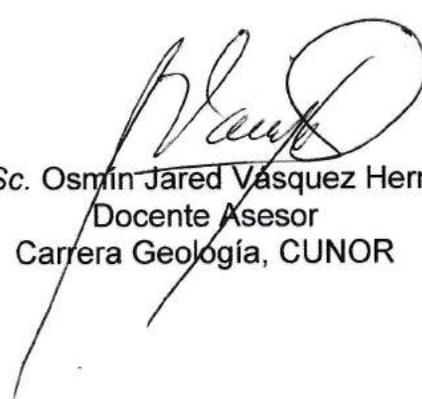
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. EDGAR ROBERTO MÉRIDA BOOGHER**, carné n.º **200940318**, titulado: **“GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS GRANÍTICAS AL NOROESTE Y SURESTE DE LA CALDERA DE QUETZALTENANGO, QUETZALTENANGO”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

  
Ing. M.Sc. Osmin Jared Vásquez Hernández  
Docente Asesor  
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO  
DEL NORTE (CUNOR)  
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

PBX: 79 566 600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

c. e.: [geologiausac@gmail.com](mailto:geologiausac@gmail.com)

Ref. 15-CG-92/2017  
20 de marzo de 2017

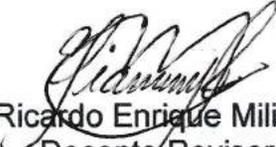
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. EDGAR ROBERTO MÉRIDA BOOGHER**, carné n.º **200940318**, titulado: **“GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS GRANÍTICAS AL NOROESTE Y SURESTE DE LA CALDERA DE QUETZALTENANGO, QUETZALTENANGO”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

  
Ing. Geól. Ricardo Enrique Milián de la Cruz  
Docente Revisor  
Carrera Geología  
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO  
DEL NORTE (CUNOR)  
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

PBX: 79 566 600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

c. e.: [geologiasac@gmail.com](mailto:geologiasac@gmail.com)

Ref. 15-CG-95/2017  
28 de marzo de 2017

Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS GRANÍTICAS AL NOROESTE Y SURESTE DE LA CALDERA DE QUETZALTENANGO, QUETZALTENANGO”**, realizado por el T.U. GEÓL. EDGAR ROBERTO MÉRIDA BOGHER, carné n.º 200940318, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

  
Ing. Julio Enrique Reynosa Mejía  
Comisión Redacción y Estilo  
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

## HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación titulado: GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS GRANÍTICAS AL NOROESTE Y SURESTE DE LA CALDERA DE QUETZALTENANGO, QUETZALTENANGO

f)   
Edgar Roberto Mérida Boogher  
Carné No. 200940318

## **RESPONSABILIDAD**

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: Del estudiante que opta al título, del asesor y del revisor; la Comisión de Redacción y Estilo de cada carrera, es la responsable de la estructura y la forma”.

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2 .4, subinciso 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de Sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio del año 2012.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	v
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	1

### **CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO**

1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	3
1.3 Hipótesis	4
1.3.1 Variables	4
1.4 Antecedentes	4
1.5 Objetivos	11
1.5.1 General	11
1.5.2 Específicos	11
1.6 Ubicación y extensión del área de investigación	11
1.7 Accesos	14
1.8 Marco geológico regional	17
1.8.1 Estratigrafía	18
1.8.2 Geología estructural	23
1.9 Fundamentos y definiciones	29

## **CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA**

2.1	Etapa de recopilación bibliográfica	35
2.2	Etapa de campo	36
2.3	Etapa de laboratorio	36
2.4	Etapa de gabinete	37

## **CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

3.1	Relaciones de campo y cartografía	39
3.1.1	Granodioritas Cantel (Grcn)	39
3.1.2	Granodioritas Zunil (Grzn)	42
3.1.3	Rocas volcánicas indiferenciadas (Qvi)	43
3.1.4	Depósitos piroclásticos Chuitziribal (Qpch)	46
3.1.5	Depósitos aluviales (Qal)	47
3.1.6	Granodioritas Cajolá (Grcj)	48
3.1.7	Cuarcita Cajolá (Czcj)	51
3.1.8	Andesita Cajolá (Ancj)	52
3.1.9	Depósitos piroclásticos Cajolá (Qpcj)	55
3.2	Petrografía	60
3.3	Geoquímica de óxidos mayores y elementos traza	71
3.4	Geocronología	90
3.5	Discusión	95
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>111</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>119</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

1.	Coordenadas UTM de los polígonos de investigación	12
2.	Series de decaimiento U/Pb	30
3.	Composición de elementos mayores y norma CIPW	72
4.	Composición de elementos traza	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Caldera de Quetzaltenango	7
2.	Ubicación del área de investigación	13
3.	Localización de los polígonos de investigación	14
4.	Vías de acceso y distancias	16
5.	Mapa geológico regional	19
6.	Zonas morfo tectónicas de Guatemala	26
7.	Modelo cinemático propuesto de la triple conjunción de placas Norteamérica-Caribe-Cocos	27
8.	Diagrama de concordia	32
9.	Mapa geológico del polígono Cantel	56
10.	Mapa geológico del polígono Zunil	57
11.	Mapa geológico del polígono Cajolá	58
12.	Clasificación modal de las rocas graníticas de Cantel, Zunil y Cajolá	71
13.	Diagrama tipo Harker de óxidos mayores vs. SiO <sub>2</sub>	75
14.	Diagrama R1-R2 (De La Roche <i>et. al.</i> 1980)	76
15.	Diagrama B-A (Modificado por Villaseca <i>et. al.</i> 1998)	78
16.	Clasificación de granitoides (Frost <i>et. al.</i> 2001)	80
17.	Diagrama de REE/Condrito (Boynton, 1984)	81

18.	Diagrama de elementos traza normalizados al manto primitivo (McDonough y Sun, 1995)	83
19.	Diagrama de elementos traza normalizados a la corteza continental (Taylor y McLennan, 1995)	84
20.	Diagrama R1-R2 para discriminación geotectónica (Batchelor y Bowden, 1985)	86
21.	Diagramas para discriminación geotectónica (Pearce <i>et. al.</i> 1984)	87
22.	Modelo de temperatura de fusión de los magmas (Jung y Pfander, 2007)	89
23.	Diagrama de concordia muestra EM-6664-16333-10	91
24.	Edad promedio muestra EM-6664-16333-10	92
25.	Diagrama de concordia muestra EM-6487-16532-2	93
26.	Edad promedio muestra EM-6487-16532-2	94
27.	Diagrama secuencia-tamaño de grano	97
28.	Formación de un arco volcánico continental	101
29.	Clasificación geotectónica de granitoides	104
30.	Reconstrucción paleotectónica y geográfica del norte de Centroamérica	106
31.	Rocas graníticas de la caldera de Quetzaltenango y el complejo volcánico Tacaná	108

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

1.	Afloramientos de granodioritas en Cantel	41
2.	Afloramientos de granodiorita en Zunil	43
3.	Rocas volcánicas indiferenciadas	45
4.	Depósitos piroclásticos de Chuitziribal	46
5.	Depósitos aluviales	47
6.	Afloramientos de granodiorita de Cajolá	49
7.	Contactos fallados de la granodiorita Cajolá	50
8.	Afloramiento de cuarcita Cajolá	51

9.	Afloramientos de andesita Cajolá	53
10.	Alteración hidrotermal en andesita Cajolá	54
11.	Depósitos piroclásticos Cajolá	55
12.	Fragmentos líticos plutónicos	59
13.	Fotomicrografías de las rocas graníticas de Cantel y Zunil	63
14.	Fotomicrografías de la granodiorita de Cajolá	66
15.	Fotomicrografías del dique granófico	67
16.	Fotomicrografía de cuarcita Cajolá	68
17.	Fotomicrografía de diorita del Santa María	69



## LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

CUNOR	Centro Universitario del Norte
ICP-MS	Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado
IGN	Instituto Geográfico Nacional
ka	Mil(es) de años
Ma	Millón(es) de años
SIG	Sistema de información geográfica
U/Pb	Uranio/Plomo (método de datación radiométrica)
UTM	Unidades Transversales de Mercator
WGS	Sistema Geodésico Mundial

## ABREVIATURAS DE MINERALES

Anf	Anfíbol
Bt	Biotita
Kfd	Feldespató potásico
Plg	Plagioclasa
Qz	Cuarzo
Op	Opacos
Rt	Rutilo
Src	Sericita



## RESUMEN

La parte occidental del bloque Chortís, en Guatemala, se compone principalmente de los productos del Arco Volcánico Centroamericano, los cuales cubren el basamento de rocas metamórficas y plutónicas. Estas rocas plutónicas han sido descritas en los alrededores de calderas como Atilán y Quetzaltenango. En la caldera de Quetzaltenango, afloran al noroeste en Cajolá, y al sureste en Cantel y Zunil. Esta investigación presenta nuevos datos sobre la petrografía y geoquímica de estas rocas, así como de su geocronología por vez primera.

Su petrología corresponde a dioritas de andesina+cuarzo+feldespatopotásico+biotita/anfíbol+ortopiroxeno+magnetita, las cuales subyacen a flujos riolíticos, andesíticos y depósitos piroclásticos, en contacto discordante erosivo y sin roca caja observable. La geoquímica corresponde a granitoides predominantemente magnesianos, calcialcalinos, metaluminosos a ligeramente peraluminosos, correspondientes a granitoides de Tipo I cordilleranos y caledonianos según Frost *et. al.*, (2001). Las anomalías negativas de Ta, Nb y Ti les confieren firma de arco volcánico, asociadas a una zona de subducción. La petrogénesis sugiere procesos de fusión de la corteza, diferenciación por cristalización fraccionada y la interacción con fluidos residuales.

La edad según el análisis de U/Pb en circones, de  $12,69 \pm 0,14$  Ma y  $22,87 \pm 0,26$  Ma para las granodioritas de Cajolá y Zunil, respectivamente, encuadra estas rocas en el Mioceno. Las edades y características petrográficas sugieren una correlación consistente con las granodioritas del complejo volcánico Tacaná, ubicado 50 km al NW del área, las cuales a su vez son parte del batolito costero de Chiapas.



## INTRODUCCIÓN

En Guatemala, la más notoria de las manifestaciones de su geología es, sin duda, el arco volcánico. Una cadena de estrato volcanes, domos y calderas, que hacia el occidente se elevan en una zona de altiplano. En este altiplano se encuentra Quetzaltenango, cabecera del departamento homónimo y segunda ciudad más importante del país.

La geología de esta región aún presenta desafíos para su clara comprensión, debido a las relaciones complejas de campo que las antiguas lavas, depósitos piroclásticos y rocas graníticas presentan entre sí. El estudio de estas últimas se ha visto limitado debido a que se exponen a la superficie en ubicaciones remotas, a que no han sido objeto de interés económico, y también a que, a primera vista, su estudio no es tan atractivo como el de los volcanes activos presentes en el área.

La caldera de Quetzaltenango es una estructura volcánica propuesta recientemente, esto, a pesar de que sus alrededores han sido objeto de estudio geológico desde finales del siglo XIX, principalmente los edificios volcánicos. Desde entonces, diversos autores han publicado investigaciones de geología regional, de vulcanología y de geotermia, haciendo la respectiva mención, en mayor o menor medida, de las rocas graníticas en los alrededores de Quetzaltenango. Estas aparecen principalmente en los trabajos realizados desde mediados del siglo pasado, acerca de los depósitos piroclásticos del complejo volcánico Santa María Santiaguito, y sobre la zona geotérmica de Zunil, en donde constituyen el reservorio de los fluidos hidrotermales.

Sin embargo, la descripción de las relaciones de campo, así como de las características físicas y químicas de estas rocas graníticas es limitada, desconociéndose así su historia geológica. Esto dificulta el poder incluirlas en los mapas y modelos geológicos de la región, los cuales son instrumentos indispensables para aplicarse a la gestión de riesgos por desastres naturales, manejo de los recursos naturales y el aprovechamiento económico de los mismos. Estas aplicaciones son de gran interés y beneficio para el desarrollo y bienestar de las comunidades en el país.

En este trabajo se presentan nuevas observaciones de campo, análisis petrográficos y geoquímicos, así como edades por el método U/Pb para las rocas graníticas que afloran en Cajolá, Cantel y Zunil, hacia el noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango, respectivamente. A partir de dichos resultados, se propone su historia geológica y se relacionan con las rocas graníticas presentes en el Complejo Volcánico Tacaná, ubicado hacia el oeste y perteneciente al batolito costero de Chiapas, México.

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cuáles son las características geoquímicas, petrográficas y geocronológicas de las rocas graníticas que afloran al noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango y la relación que guardan entre sí?

### 1.2 JUSTIFICACIÓN

La realización de esta investigación es relevante y conveniente para llenar el vacío del conocimiento que representa este basamento granítico en la historia geológica de la región de Quetzaltenango.

A pesar de que estas rocas en el área de Zunil han sido objeto de interés geotérmico, no se han investigado los aspectos relativos a su origen, edad o implicación geotectónica y la forma en que estas rocas han interactuado con los complejos volcánicos Terciarios y Cuaternarios que las cubren. Las rocas graníticas en el área de Cajolá, no han sido objeto de estudio aún.

En cuanto a la geoquímica, se poseen datos únicamente de xenolitos plutónicos expulsados por las erupciones del volcán Santa María, sin embargo, no profundizan aspectos de su petrogénesis.<sup>123</sup>

Sobre el tema de dataciones radiométricas a rocas graníticas en Quetzaltenango, estas no han sido realizadas previamente, por lo que se pretende llevarlas a cabo, al utilizar el método por Uranio/Plomo en cristales de zircón. A pesar que esta investigación no tenga implicaciones directas en el ámbito social o en la resolución de un problema práctico inmediato, la información que genere servirá para proponer una nueva teoría sobre la edad, el origen y las implicaciones geotectónicas de estas rocas.

### 1.3 HIPÓTESIS

Las rocas graníticas al noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango presentan las mismas características geoquímicas, petrográficas y geocronológicas (origen y edad) entre sí.

#### 1.3.1 VARIABLES

**Dependientes:** Clasificación petroquímica, implicación geotectónica, geocronología. **Independientes:** Petrografía y geoquímica.

---

<sup>1</sup>William Rose. "Santa María, Guatemala: Bimodal soda-rich calc-alkalicstratovolcano". *Journal of volcanology and geothermal research*. 33 (enero 1987): 109-129.

<sup>2</sup> Brad Singer Et. Al., "Tracking open-system differentiation during growth of Santa María volcano, Guatemala". *Journal of Petrology*. 52:12, (septiembre 2011): 2335-2363

<sup>3</sup> Brad Singer Et. Al., "Lying in wait: deep and shallow evolution of dacit beneath Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society, London, Special Publications*. 385 (junio 2013): 209-234.

## 1.4 ANTECEDENTES

La caldera de Quetzaltenango es una estructura geológica que ha sido propuesta por diversos autores. Foley propone que la cuenca de Quetzaltenango, una depresión elíptica de 12 km x 25 km y aproximadamente 500 m de profundidad es parte de una caldera (Figura 1) que se extiende más allá de la depresión, hasta 10 km al norte de la misma.<sup>4</sup>

Sobre los rasgos que permiten identificarla, Foley menciona lo siguiente:

Los rasgos geomorfológicos del área son característicos de una caldera de gran escala y geológicamente joven, que incluyen: i) laderas que la delimitan, con pendientes interiores pronunciadas y pendientes exteriores suavizadas; ii) superficies planas y extensas a la base de estas laderas; iii) la resurgencia de un complejo de caldera, flujo y domo volcánicos a pequeña escala; iv) volcanes jóvenes situados a lo largo del margen estructural de la caldera; v) rasgos lobulares en los márgenes de la caldera, indicando una secuencia de múltiples erupciones y finalmente; vi) la presencia de un sistema geotermal de alta temperatura activo.<sup>5</sup>

Duffield, quien también describe las características físicas de la estructura en mención a través de imágenes satelitales, sugiere que la edad de la caldera, o al menos parte de la misma, estaría en el intervalo de los 84 ka a los 126 ka de antigüedad.<sup>6</sup>

---

<sup>4</sup> Duncan Foley, Et. Al., "Satellites images, digitized topography, and the recognition of the Xela Caldera, Quezaltenango Valley, Guatemala". *Geological Society of America*. 24:7 (enero-1992): 217-233.

<sup>5</sup> Ibid, pp.1.

<sup>6</sup> Wendell Duffield Et. Al., "Oblique synoptic images, produced from digital data, display strong evidence of a "new" caldera in southwestern Guatemala". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 55:3 (marzo 1993):217-224.

Lima y Palma se refieren a la caldera de Quetzaltenango como una expresión de la actividad volcánica explosiva de la región, y la sitúan dentro de un campo de esfuerzo extensional, resultante de la intersección de al menos dos ejes regionales mayores, el *NW-SE* y el *NE-SW*, así como un eje adicional *E-W* formado bajo estos campos de esfuerzos; sobre su edad mencionan que la caldera se formó entre hace 1 Ma y 1.8 Ma durante el Pleistoceno.<sup>7</sup>

Según Williams, las fallas de eje noreste están relacionadas a la falla de Zunil<sup>8</sup>, la cual fue identificada como una zona de desplazamiento “*strike-slip*” lateral izquierda por Stoiber y Carr.<sup>9</sup> Gutiérrez indica que ésta se limita hacia el oeste por la fractura inferida a través del domo Cerro Quemado, el volcán Santa María y el Santiaguito, y hacia el este, por el bloque levantado de la falla Samalá.<sup>10</sup>

Según Foley, el sistema de falla de Zunil consiste de múltiples fallas sub paralelas que definen una zona de hasta 10 km de ancho.<sup>11</sup> Alrededor de la caldera de Quetzaltenango se encuentran también fallas de eje noroeste. Además, Tobías menciona que en el extremo noroeste del valle se localiza la falla de Cajolá con rumbo aproximadamente noroeste-sureste.<sup>12</sup>

---

<sup>7</sup> Enrique Lima y Julio Palma. “The Zunil-II geothermal field, Guatemala, Central America”. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. (mayo-junio 2000): 2133-2138.

<sup>8</sup> Howell Williams. “Volcanic history of the Guatemalan highlands”. *University of California Publications: Geological Sciences*. 38 (marzo 1960): 1-86.

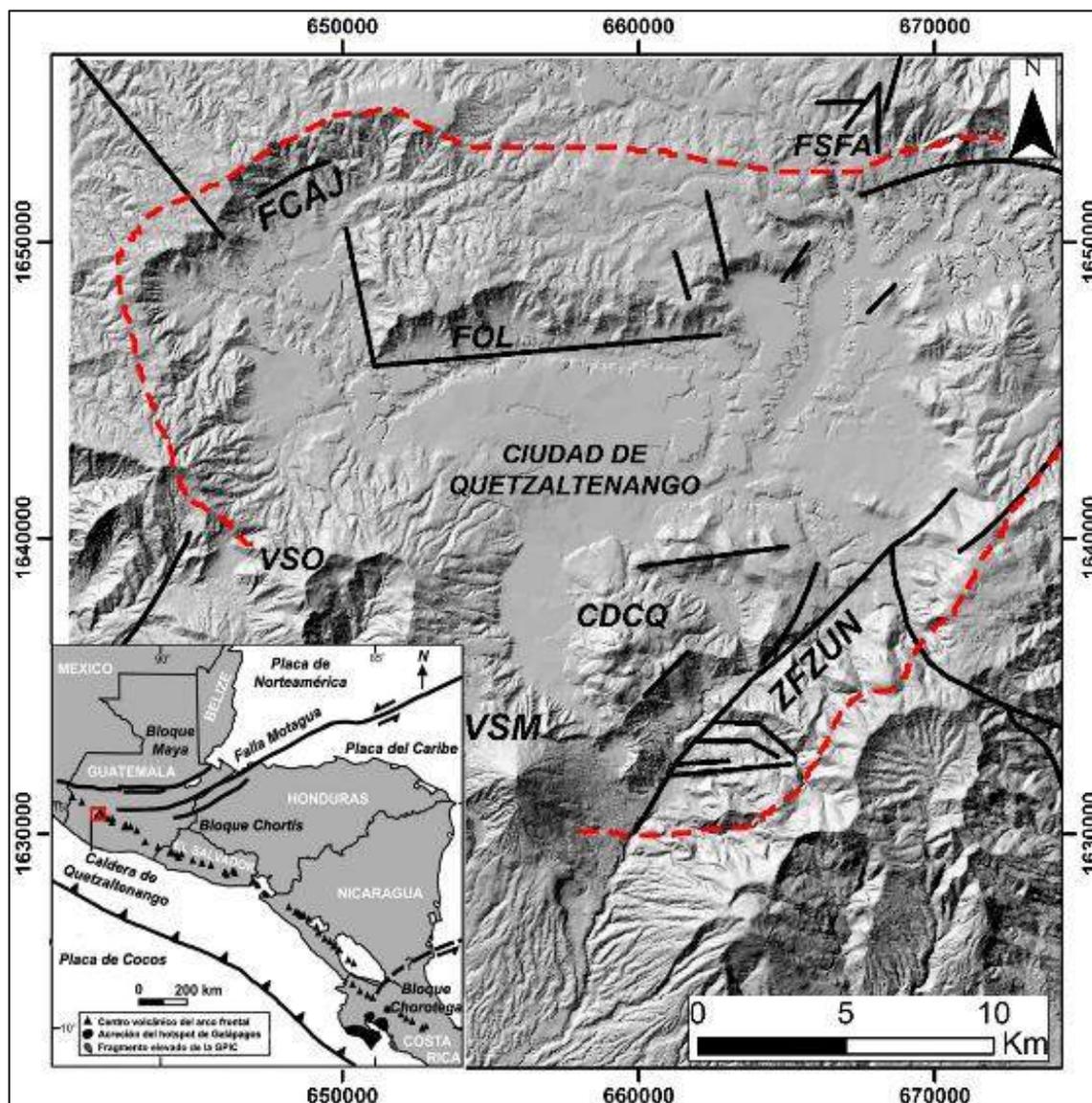
<sup>9</sup> Richard Stoiber y Michael Carr. “Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America”. *Bulletin Volcanologic*. 37:3 (septiembre de 1973): 304-325.

<sup>10</sup> Edgar Tobías Gutiérrez. *Proyecto Zunil: Estudio de factibilidad preliminar, informe geológico y vulcanológico*. Guatemala: Instituto Nacional de Electrificación, 1977.

<sup>11</sup> Duncan Foley Et. Al., “Geology and geophysics of the Zunil geothermal system, Guatemala”. *Geothermal Resources Council Transactions*. 14, Part II, (agosto 1990): 1405-1412.

<sup>12</sup> Tobías, 9.

**FIGURA 1**  
**CALDERA DE QUETZALTENANGO**



DESCRIPCIÓN: Modelo de elevación de la caldera de Quetzaltenango (contorno aproximado en línea discontinua roja) y las estructuras geológicas más relevantes (trazo de fallas en línea sólida negra). ZFZUN=Zona de Falla de Zunil, FCAJ=falla de Cajolá, FOL=falla de Olinstepeque, FSAF=falla de San Francisco el Alto, VSM=Volcán Santa María, VSO=Volcán Siete Orejas, CDCQ=Complejo Dómico Cerro Quemado. Coordenadas UTM, dátum WGS 84, zona 15 N. Inserto, ubicación de la caldera de Quetzaltenango en el contexto del arco volcánico centroamericano, modificado a partir de Geldmacher et. al. (2008).

**FUENTE:** Trabajo de gabinete, febrero de 2016.

Las rocas graníticas presentes en los alrededores de la caldera de Quetzaltenango y sus márgenes son mencionadas y/o descritas por diversos autores. Williams las menciona como fragmentos líticos presentes en las partes proximales de los depósitos de caída de la erupción de 1902 del volcán Santa María, como un conjunto de líticos plutónicos, compuesto por cuarzo diorita, diorita, cuarzo monzonita, granodiorita y granito; la mayoría son rocas de grano fino a medio holocristalinas, las cuales parecen representar plutones similares a aquellos encontrados en el área de Atitlán.<sup>13</sup>

Gutiérrez menciona que en el escarpe de la falla de Cajolá se encuentra expuesto el basamento plutónico regional elevado,<sup>14</sup> así como en la zona geotérmica de Zunil, en los cauces de los ríos Pachamiyá y Chuyul, afluentes del río Samalá, así como al oeste en la base del cerro Jolóm, en Cantel, Quetzaltenango.<sup>15</sup> Estas rocas estuvieron un largo tiempo expuestas a la erosión, por lo que su contacto con las rocas volcánicas terciarias es discordante, la zona de discordancia es de 40 m a 100 m de espesor con material granítico intemperizado y arenoso; el tipo de roca de los afloramientos de los ríos Chuyul y Pachamiyá corresponde a una granodiorita hornbléndica de biotita.<sup>16</sup>

La perforación en el campo geotérmico de Zunil intersectó litologías correspondientes a cuarzo monzonita de hornblenda y biotita cloritizada, lo que según Rose, indica que el basamento por debajo del volcán Santa María probablemente consista de un complejo intrusivo superficial.<sup>17</sup>

---

<sup>13</sup> Williams, 17.

<sup>14</sup> Gutiérrez, 9.

<sup>15</sup> *Ibíd*em, 22.

<sup>16</sup> *Ibíd*em, 23.

<sup>17</sup> Rose, 110.

Es probable que estas sean de edad Terciaria y formen parte de un arreglo de rocas ígneas relacionadas a los procesos de subducción no muy diferentes al régimen actual.<sup>18</sup> Las observaciones del núcleo de perforación en Zunil muestran que el contacto superior de la roca plutónica era aparentemente una superficie meteorizada. Así, las rocas plutónicas podrían haber estado en la superficie antes de que el vulcanismo moderno las cubriera.<sup>19</sup>

García realizó un análisis petrográfico a núcleos recuperados de la perforación de los pozos Z-19 y Z-20 en el campo geotérmico Zunil II, describen un basamento de granito y un *sill* de gabro.<sup>20</sup>

Mérida describe petrográficamente las rocas graníticas que afloran en los alrededores de la aldea Pasac II y el cauce del río Chuyul, en Cantel, clasificándolas como micro granodiorita hornbléndica y cuarzo monzo diorita, respectivamente.<sup>21</sup>

Rose, García y Singer han realizado ensayos geoquímicos a las rocas graníticas en mención.

---

<sup>18</sup> *Ibidem*.

<sup>19</sup> *Ibidem*, 111.

<sup>20</sup> Otto García. *Petrology of cores from Wells Z-19 and Z-20, Zunil geothermal field, Guatemala*. Diplomado de Tecnología Geotérmica. Universidad de Auckland. Nueva Zelanda: Instituto Geotérmico, 1990.

<sup>21</sup> Roberto Mérida. *La geología en Quetzaltenango: Análisis petrológico de las rocas del Complejo Dómico Cerro Quemado en su flanco SE y estructuras volcánicas en los alrededores de la Caldera de Almolonga, en un área de 21 km<sup>2</sup> cartografiados a escala 1:25,000*. Práctica profesional supervisada, carrera de Técnico en Geología. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2015.

Rose trabajó con muestras de fragmentos líticos provenientes de los depósitos de las erupciones del volcán Santa María y del evento de Los Chocoyos de la caldera de Atitlán, además de una muestra proveniente de la perforación de un pozo en el campo geotérmico de Zunil; estas rocas son carácter calcialcalino y su contenido de SiO<sub>2</sub> en porcentaje en peso varía de 55 % a 69 %.<sup>22</sup>

García realizó el análisis de elementos mayores y elementos traza para siete muestras de los núcleos de la perforación de los pozos Z-19 y Z-20 en el campo Zunil II; las muestras Z-6 y Z-7 fueron clasificadas como gabro y granito, respectivamente.<sup>23</sup>

Singer colectó seis muestras de diorita y granodiorita de los fragmentos líticos de los depósitos de la erupción de 1902 del volcán Santa María, las cuales fueron sometidas a ensayos geoquímicos para la determinación de elementos mayores y traza, así como a geoquímica isotópica de Sr, Nd, Pb y U-Th. Las seis muestras de diorita y granodiorita poseen un contenido de SiO<sub>2</sub> de entre 48 % a 60 % de porcentaje en peso, y el resto de sus elementos mayores, con excepción del Mg, no muestran una relación linear respecto de las lavas basáltico andesíticas del volcán Santa María.<sup>24</sup> Los resultados de la geoquímica isotópica sugieren la presencia de una corteza de composición granítica intermedia por debajo del volcán Santa María, por ello se considera a estas rocas como potenciales asimiladores en la evolución magmática del mencionado volcán.<sup>25</sup>

---

<sup>22</sup> Rose, 111.

<sup>23</sup> García, 45.

<sup>24</sup> Brad Singer Et. Al., "Lying in wait: deep and shallow evolution of dacit beneath Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society, London, Special Publications*. 385 (junio 2013): 209-234.

<sup>25</sup> Brad Singer Et. Al., "Tracking open-system differentiation during growth of Santa Maria volcano, Guatemala". *Journal of Petrology*. 52:12, (septiembre 2011): 2335-2363

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 GENERAL**

Analizar petrográfica, geoquímica y geocronológicamente las rocas graníticas al noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango.

### **1.5.2 ESPECÍFICOS**

- a) Delimitar la extensión y contactos de las rocas graníticas.
- b) Clasificar petrográfica y geoquímicamente las rocas graníticas.
- c) Interpretar por medio de la geoquímica el origen de las rocas graníticas y su implicación geotectónica.
- d) Asignar una edad a las rocas graníticas, según los resultados de los ensayos geocronológicos.
- e) Proponer la historia geológica de las rocas graníticas al noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango.

## **1.6 UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN**

Los sitios de investigación se encuentran en los municipios de Cajolá, Cantel y Zunil, del departamento de Quetzaltenango, en el occidente de Guatemala (Figura 2). Se dividen en dos sectores, no colindantes, al noroeste y sureste de la ciudad de Quetzaltenango, distantes 20 km entre sí. Se ubican dentro de las hojas topográficas Quetzaltenango, Colomba y Santa María Ixtahuacán, Nos. 1860 I, 1860 II y 1960 III, escala 1:50,000, publicados por el IGN.

El primer sector propuesto se localiza al noroeste de Cajolá, sobre la carretera que conduce hacia Sibilia. Está delimitado por un polígono que cubre un área de 4 km<sup>2</sup>.

El segundo sector propuesto se compone de dos polígonos, uno al sureste de Cantel, y otro al sureste de Zunil, respectivamente. El polígono de Cantel cubre un área de 1,63 km<sup>2</sup> alrededor del río Chuyul, el caserío Chuitziribal y la aldea Pasac II. En Zunil, el polígono cubre 1 km<sup>2</sup> a lo largo del río Pachamiyá. Las coordenadas de los vértices de los polígonos se muestran en la tabla 1.

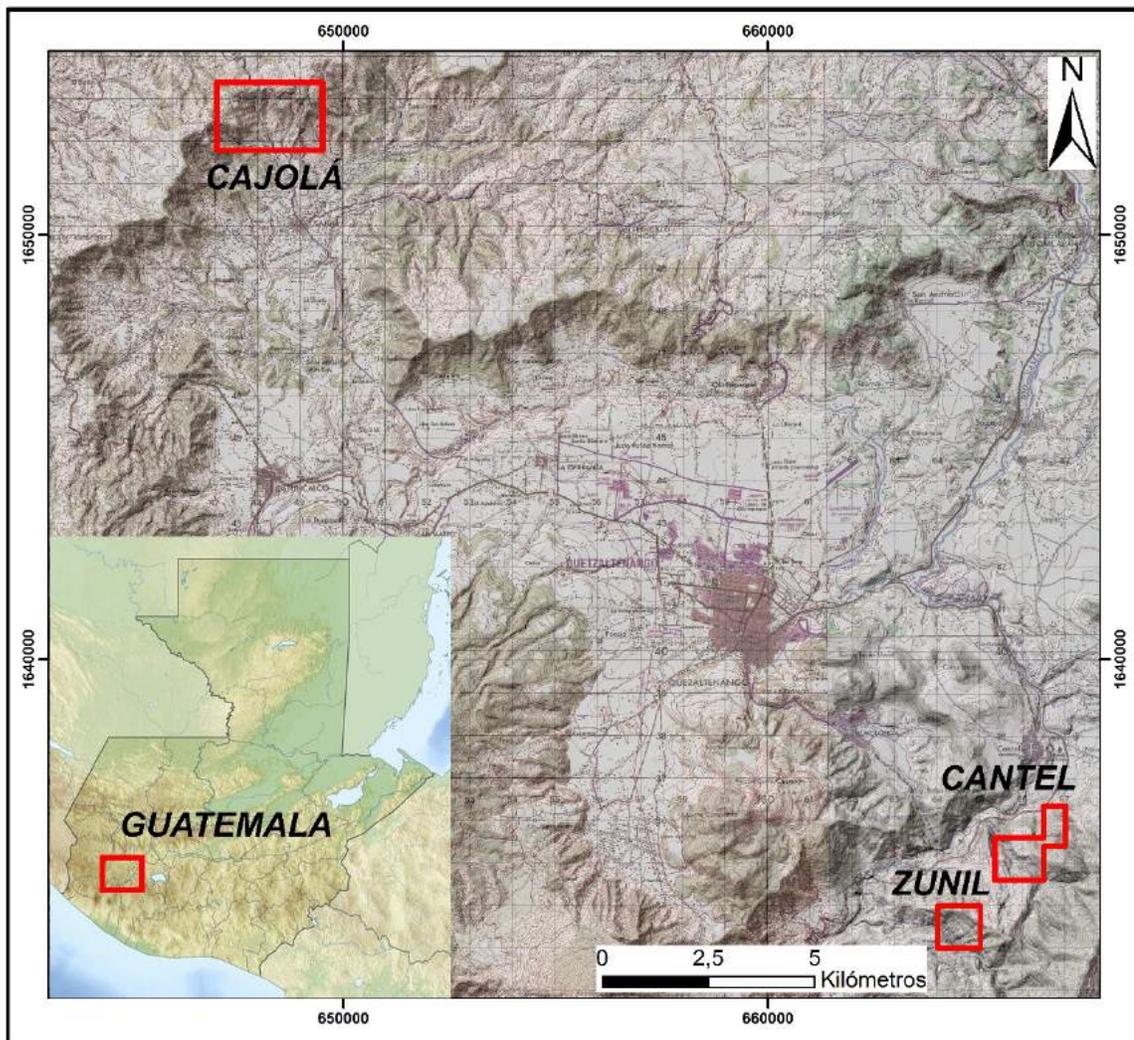
**TABLA 1**  
**COORDENADAS UTM DE LOS POLÍGONOS DE INVESTIGACIÓN**

CAJOLÁ			CANTEL			ZUNIL		
VÉRTICE	X	Y	VÉRTICE	X	Y	VÉRTICE	X	Y
A	647000	1653600	A	666500	1636550	A	664000	1634200
B	649500	1653600	B	666500	1635800	B	664000	1633200
C	649500	1652000	C	665500	1635800	C	664500	1633200
D	647000	1652200	D	665500	1634800	D	665000	1634200
			E	666500	1634800			
			F	666500	1635600			
			G	667000	1635600			
			H	667000	1636550			

**FUENTE:** Trabajo de recopilación y análisis bibliográfico, en base a SIG, coordenadas UTM, datum WGS 84, Z 15N, septiembre de 2015.

La ubicación regional del área de investigación y la localización de los polígonos mencionados, se muestra en la figura 2.

**FIGURA 2**  
**UBICACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN**

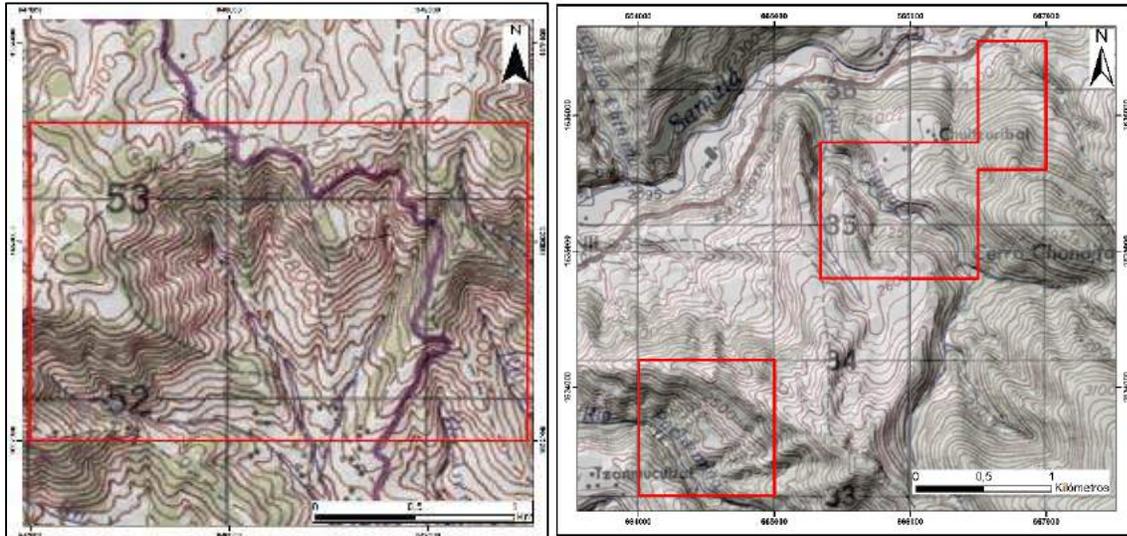


**DESCRIPCIÓN:** Mapa topográfico de ubicación del área de investigación, indicando la localización de los polígonos; inserto, localización del área de investigación en el occidente de Guatemala.

**FUENTE:** Trabajo de gabinete, marzo de 2016.

El detalle de los polígonos de investigación se muestra en la Figura 3.

### FIGURA 3 LOCALIZACIÓN DE LOS POLÍGONOS DE INVESTIGACIÓN



FUENTE: Trabajo de gabinete, marzo de 2016.

#### 1.7 ACCESOS

El área se localiza al noroeste y al sureste de la ciudad de Quetzaltenango, cabecera departamental del departamento homónimo. Ésta se encuentra a 208 km de la ciudad de Guatemala, y a 419 km de la ciudad de Cobán, Alta Verapaz.

Para llegar desde Cobán, se viaja por la carretera CA-14, hasta El Rancho, en el departamento de El Progreso, donde se cruza hacia la ciudad de Guatemala recorriendo la carretera CA-9 (Figura 4).

Para llegar desde la ciudad de Guatemala, se puede viajar por la carretera Interamericana CA-1, recorriendo 208 km hacia el oeste hasta Quetzaltenango.

El acceso desde la ciudad de Guatemala por la carretera CA-2 se hace viajando por la costa sur hacia el occidente, hasta el municipio de Santa Cruz Muluá, del departamento de Retalhuleu. Luego se continúa por la ruta CITO-180 hasta Zunil, el sector sureste del área de investigación.

Desde la ciudad de Quetzaltenango se puede llegar al sector sureste al recorrer unos 5 km hacia el sureste por la ruta nacional 9S, que conduce hacia Almolonga y Zunil, o bien, al salir de la ciudad por la ruta CITO-180 hacia Cantel.

El acceso a la zona noroeste, Cajolá, se hace a partir de la ciudad de Quetzaltenango, al recorrer 10 km sobre la Ruta Nacional 1 en dirección noroeste hacia San Marcos, hasta el km 215, en donde se toma la carretera hacia Cajolá, recorriendo 10 km más hasta donde empieza el polígono de investigación.

Dentro de las áreas de trabajo, existen caminos pavimentados, de terracería y veredas que conducen desde Cajolá, Zunil y Cantel hacia los puntos de interés en sus alrededores.

**FIGURA 4**  
**VÍAS DE ACCESO Y DISTANCIAS**



DESDE	RUTA	COLOR	DISTANCIA (km)
CIUDAD DE GUATEMALA	CA-1 – CITO-180	ROJO	218
	CA-9 – CA-2 – 9S	AMARILLO	213
COBÁN	CA-14 – 7W – 9N – CA-1 – CITO-180	MORADO	327
	CA-14 – CA-9 – CA-1 – CITO-180	AZUL+ROJO	429
	CA-14 – CA-9 – CA-9 – CA-2 – 9S	AZUL+AMARILLO	424

**FUENTE:** Trabajo de análisis y recopilación bibliográfica, agosto de 2015.

## 1.8 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La caldera de Quetzaltenango se encuentra al norte del Arco Volcánico Centroamericano, a su paso por el altiplano occidente de Guatemala; éste arco volcánico es el resultado de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe.<sup>26</sup> La caldera se encuentra en el extremo occidental del Bloque Chortís, al sur de las zonas de falla del Motagua y el Polochic, y según Rose, está asentada sobre una corteza con un espesor de entre 40 km y 50 km que puede que incluya rocas Paleozoicas del basamento.<sup>27</sup>

Rudiger Escobar cita a Halsor y Rose, diciendo que, en Guatemala, los magmas basálticos a andesíticos han sido expulsados principalmente de conos compuestos del frente del arco volcánico, mientras que las lavas dacíticas a riolíticas y tobas ocurren principalmente en calderas de tras arco y complejos de domos.<sup>28 29</sup> Estos son los materiales principales presentes en la región de Quetzaltenango.

---

<sup>26</sup> Michael Carr Et. Al., "Volcanism and geochemistry in Central America: Progress and problems". *American Geophysical Union*, 138 (2003): 153–179.

<sup>27</sup> Rose, 111, 127.

<sup>28</sup> Rudiger Escobar Et. Al. "40Ar/39Ar and paleomagnetic constraints on the evolution of Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society of America Bulletin*. 122:5/6 (mayo-junio 2010): 757-771.

<sup>29</sup> Sid Halsor y William Rose. "Common characteristic of paired volcanoes in northern Central America". *Journal of Geophysical Research*. 93:85 (mayo 1988): 4467-4476.

### 1.8.1 ESTRATIGRAFÍA

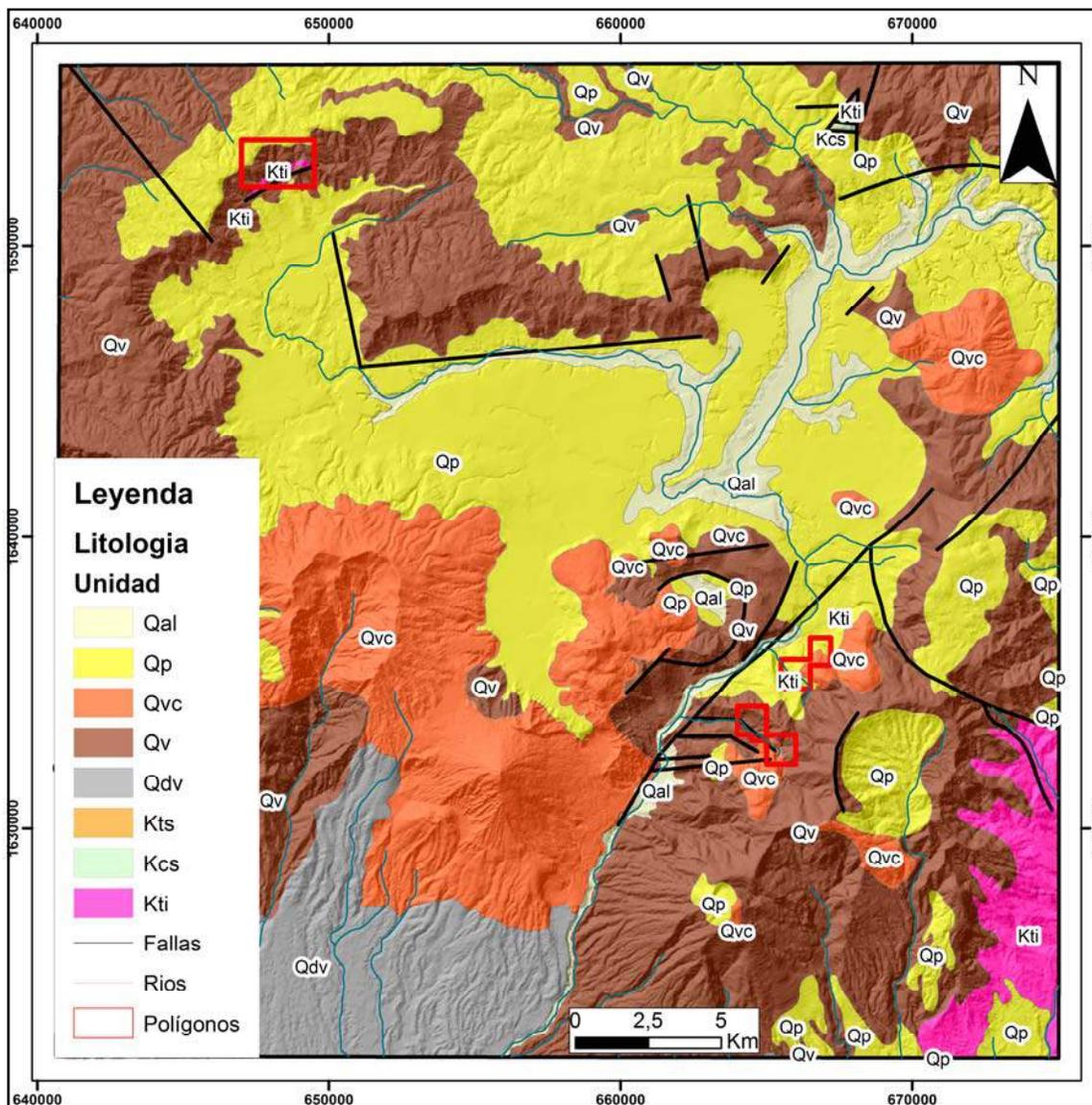
En esta región de Guatemala no se han definido formaciones litoestratigráficas formales, sino más bien, se han propuesto complejos en base a la litología, la geomorfología y las edades inferidas de los materiales producidos por la actividad volcánica.

Seguidamente, diversos autores en sus investigaciones han publicado mapas geológicos locales donde diferencian diversas unidades formales y/o informales, en especial en los complejos volcánicos y de domos como Santa María-Santiaguito y Cerro Quemado (Johns, 1975; Rose, 1987; Escobar *et. al.*, 2010) o bien en complejos volcánicos más antiguos como Zunil o Tzanjuyub (Hughes, 1978). Además, las investigaciones en la zona geotérmica de Zunil también han producido mapas y artículos (Gutiérrez, 1977; Kubota, 1982; Lima y Palma, 2000).

El área de investigación se encuentra contenida en las hojas geológicas ND15-7G y 8G, escala 1:250 000 publicadas por el IGN, en las ediciones de 1964 y 1991, respectivamente.

En la figura 5 se muestra un mapa geológico de la caldera de Quetzaltenango modificado a partir de las hojas geológicas del IGN.

**FIGURA 5**  
**MAPA GEOLÓGICO REGIONAL**



**DESCRIPCIÓN:** Mapa geológico de la caldera de Quetzaltenango y sus alrededores, con unidades litológicas, fallas y ríos. Las unidades se encuentran ordenadas de forma descendente de la más reciente a la más antigua. Qal: Aluvión; Qp: Rocas Piroclásticas Cuaternarias; Qvc: Complejos Volcánicos y Dómicos Cuaternarios; Rocas Volcánicas Cuaternarias Indiferenciadas; Qdv: Detritus Volcánico; Kts: Capas Rojas Cretácicas a Terciarias; Kcs: Carbonatos Cretácicos; Kti: Intrusivos Graníticos Cretácicos.

**FUENTE:** Modificado a partir de las hojas geológicas ND15-7G y 8G, escala 1:250 000 publicadas por el Instituto Geográfico Nacional. Trabajo de Gabinete, marzo de 2016.

Los Intrusivos Graníticos Cretácicos (Kti) corresponden al basamento descrito por Gutiérrez, el cual está formado por rocas plutónicas de posible edad Cretácica, la granodiorita de biotita es el tipo más abundante.<sup>30</sup>

Afloran cerca de Cajolá y en San Francisco El Alto, al norte de la caldera de Quetzaltenango, en los alrededores de la aldea Pasac II en Cantel, y sobre los cauces de los ríos Pachamiyá y Chuyul, entre los 2 200 msnm y 2 400 msnm.<sup>31</sup> Estas rocas graníticas también afloran al oeste del lago de Atitlán, en el río Nahualate, en el extremo suroeste del área de investigación.<sup>32</sup>

Los Carbonatos Cretácicos (Kcs) son mencionados por Gutiérrez como afloramientos cerca de Cabricán, al norte del área de estudio y en San Francisco el Alto, cuya edad se desconoce y se asume como posiblemente Cretácica, depositados sobre las rocas plutónicas.<sup>33</sup>

Las Capas Rojas Cretácicas a Terciarias (Kts), aparecen únicamente indicadas en la hoja geológica ND15-8G, junto a los Carbonatos Cretácicos e Intrusivos Graníticos Cretácicos de San Francisco El Alto. Sin embargo, su descripción, realizada por Otto Bohnenberger en 1964, se encuentra en un documento que no se publicó.

---

<sup>30</sup> Gutiérrez, 22.

<sup>31</sup> *Ibidem*, 9.

<sup>32</sup> Christopher Newhall, Et. Al. "Recent geologic history of Lake Atitlán, a caldera lake in Western Guatemala". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 33 (enero-marzo 1987): 81-107.

<sup>33</sup> Gutiérrez, 22.

El Detritus Volcánico (Qdv), cubre las faldas del Arco Volcánico hacia la planicie costera del Pacífico, y según Gutiérrez su composición varía desde pómez hasta bloques de andesita y basalto, sin consolidar o pobremente consolidados, además de lahares y material aluvional conglomerático depositado por corrientes torrenciales; también incluye los productos volcánicos de las erupciones del volcán Santa María y el Santiaguito.<sup>34</sup>

Las Rocas Volcánicas Cuaternarias Indiferenciadas (Qv) corresponden a los materiales que conforman los márgenes de la caldera, edificios y complejos volcánicos que no han tenido actividad reciente y que han empezado a ser erosionados. Incluyen los basaltos, andesitas, riolitas, tobas y depósitos de lahar de la caldera de Tzanjuyub, volcán Zunil y Santo Tomás/Pecul (Hughes, 1978), el área geotérmica de Zunil (Gutiérrez, 1977; Kubota, 1981), Cantel (Johns, 1975; Gutiérrez, 1977; Hughes, 1978), la caldera de Almolonga (Johns, 1975; Gutiérrez, 1977; Kubota, 1981) los bordes norte y oeste del valle de Quetzaltenango (Gutiérrez, 1977) y el volcán del Valle (Gutiérrez, 1977; Rose, 1987; Escobar *et. al.*, 2010).

Las edades de estas rocas corresponden al Pleistoceno, por ejemplo, las del volcán del Valle con 163 ka,<sup>35</sup> o el antiguo flujo de riolita del volcán Zunil con un rango de edad de 0,38 Ma a 0,54 Ma; dicha unidad (Qv) sobre yace discordantemente a los Intrusivos Graníticos Cretácicos (Kti).<sup>36</sup>

---

<sup>34</sup> *Ibidem*, 16.

<sup>35</sup> Escobar *Et. Al.*, 762.

<sup>36</sup> Yasuhiro Kubota *Et. Al.*, "Geothermal development in Zunil geothermal field, Republic of Guatemala". *Chinetsu*. 18 (marzo 1981): 280-295.

Los Complejos Volcánicos y Dómicos Cuaternarios (Qvc) corresponden a los edificios y materiales de los volcanes y domos que han tenido una actividad más reciente, y en algunos casos, histórica. Según Gutiérrez, en el complejo se incluye a los volcanes Siete Orejas, Chicabal, Santa María, Santiaguito, así como los domos del Complejo Cerro Quemado, la Pedrera y el Baúl.<sup>37</sup> Hughes (1978) y Gutiérrez (1977) proponen como parte de estos volcanes y domos de edad reciente al volcán Zunil, volcán Santo Tomás, y los domos Chuicham, Chonajtajuyub y Jolom (éstos en Cantel).

En la hoja geológica ND15-8G, Otto Bohnenberger (1964) propone al volcán Cuxliquel y al domo Quiac como parte de este complejo. Las edades de los materiales de estos volcanes y domos varían entre el Pleistoceno y el Holoceno, con el volcán Santa María en el rango de los 103 ka hasta el año 1902,<sup>38</sup> el volcán Zunil con 84 ka,<sup>39</sup> el Cerro Quemado con su última actividad en el año 1818,<sup>40</sup> y el volcán Santiaguito con actividad ininterrumpida desde el año 1922.<sup>41</sup>

Las Rocas Piroclásticas Cuaternarias (Qp) cubren la mayor parte de la región de la caldera de Quetzaltenango. Según Gutiérrez éstas corresponden principalmente a pómez masiva tipo lapilli, pómez sub aérea, tobas soldadas y sedimentos lacustres estratificados sub horizontales de origen volcánico.

---

<sup>37</sup> Gutiérrez, 7.

<sup>38</sup> Escobar Et. Al., 758.

<sup>39</sup> Hughes, 115.

<sup>40</sup> Francis Gall. *Cerro Quemado, volcán Quetzaltenango: Estudio de geografía histórica regional*. Guatemala: Editorial José Pineda Ibarra, 1966.

<sup>41</sup> Jeffrey Johnson Et. Al., "Explosion dynamics of pyroclastic eruptions at Santiaguito Volcano". *Geophysical Research Letters*. 31 (marzo 2004): 1-5.

La edad de los materiales de esta unidad varía desde 84 ka (Conway *et. al.*, 1992) hasta los 35 ka según Gutiérrez (1977). Puede que algunos de estos materiales sean aún más antiguos y estén relacionados con la formación de la caldera de Quetzaltenango. Además, materiales mucho más recientes se encuentran en depósitos asociados a la actividad del volcán Santa María y el Complejo Cerro Quemado.<sup>42</sup>

Los aluviones (Qal) consisten de materiales volcánicos y sedimentos re trabajados y re depositados por la acción fluvial, en los cauces de los ríos del área, entre éstos el Samalá y el Xequijel. Incluyen fragmentos de las litologías provenientes de las unidades mencionadas anteriormente.

### 1.8.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Como se mencionó anteriormente, el área se sitúa en el Bloque Chortís, al norte del Arco Volcánico, el cual es resultado de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe (Carr *et. al.*, 2003) y al sur de las zonas de falla de Motagua y Polochic.

La zona de subducción, paralela a la Fosa Mesoamericana y a la costa del Pacífico, inició su actividad hace unos 16 Ma según la edad más antigua estimada para la placa de Cocos en esta región.<sup>43</sup>

---

<sup>42</sup> Michael Conway Et. Al., "Cerro Quemado, Guatemala: the volcanic history and hazards of an exogenous volcanic dome complex". *Journal of Volcanological and Geothermal Research*. 52 (octubre 1992): 303-323.

<sup>43</sup> Richard Couch y Stephen Woodcock. "Gravity and structure of the continental margins of southwestern Mexico and northwestern Guatemala". *Journal of Geophysical Research*. 86 (marzo 1981).

Según DeMets, la placa de Cocos se mueve hacia la placa del Caribe a una velocidad de entre 70 mm/a y 85 mm/a.<sup>44</sup>

Stoiber y Carr dividen el Arco Volcánico Centroamericano en siete segmentos, estableciendo los límites de éstos en donde la cadena de volcanes activos se interrumpe o cambia de rumbo, ubicándose el área de Quetzaltenango en el segmento Guatemala Central que se extiende entre el volcán Siete Orejas y el volcán Pacaya. Al oeste está delimitado por fallas con rumbo N30E entre el volcán Chicabal y San Marcos, y hacia el este, por el graben de la ciudad de Guatemala.<sup>45</sup>

Stoiber y Carr (1973) también identifican dos tipos principales de estructuras de edad Cuaternaria en el arco volcánico, aquellas aproximadamente paralelas a la cadena volcánica y las transversales a la misma: las estructuras paralelas para este segmento no están descritas y las estructuras transversales mayores son alineaciones de centros volcánicos, que usualmente se orientan *N-S*, y fallas que frecuentemente se orientan *N30E* o *N-S*.<sup>46</sup> En este segmento, dichas estructuras se expresan en la alineación *NE* de los volcanes Santiaguito y Santa María y en la falla del valle del Samalá, orientada *N30E*.

Los segmentos de Stoiber y Carr para Guatemala y El Salvador son propuestos como zonas morfo tectónicas según el trabajo de Burkart y Self (1985), cuyos diagramas se presentan en la figura 6.

---

<sup>44</sup> Charles DeMets Et. Al., "A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc". *Geophysical Research Letters*.0:0 (noviembre 2001): 1-4.

<sup>45</sup> Stoiber y Carr, "Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America". *Bulletin Volcanologic*. 37:3 (septiembre 1973): 304-325.

<sup>46</sup> *Íbidem*, 313.

La región está dividida en bloques o zonas morfo tectónicas que redondean la curvatura del extremo sur de la placa de Norte América en las zonas de falla de Motagua y Jocotán, estas fallas no han sido mapeadas en la parte occidental de Guatemala debido a que yacen por debajo de la cobertura volcánica y no son muy activas allí; sin embargo la evidencia indica que estas estructuras continúan hacia el oeste dada la geometría en la distribución del basamento y otras rocas pre-Mioceno medio.<sup>47</sup>

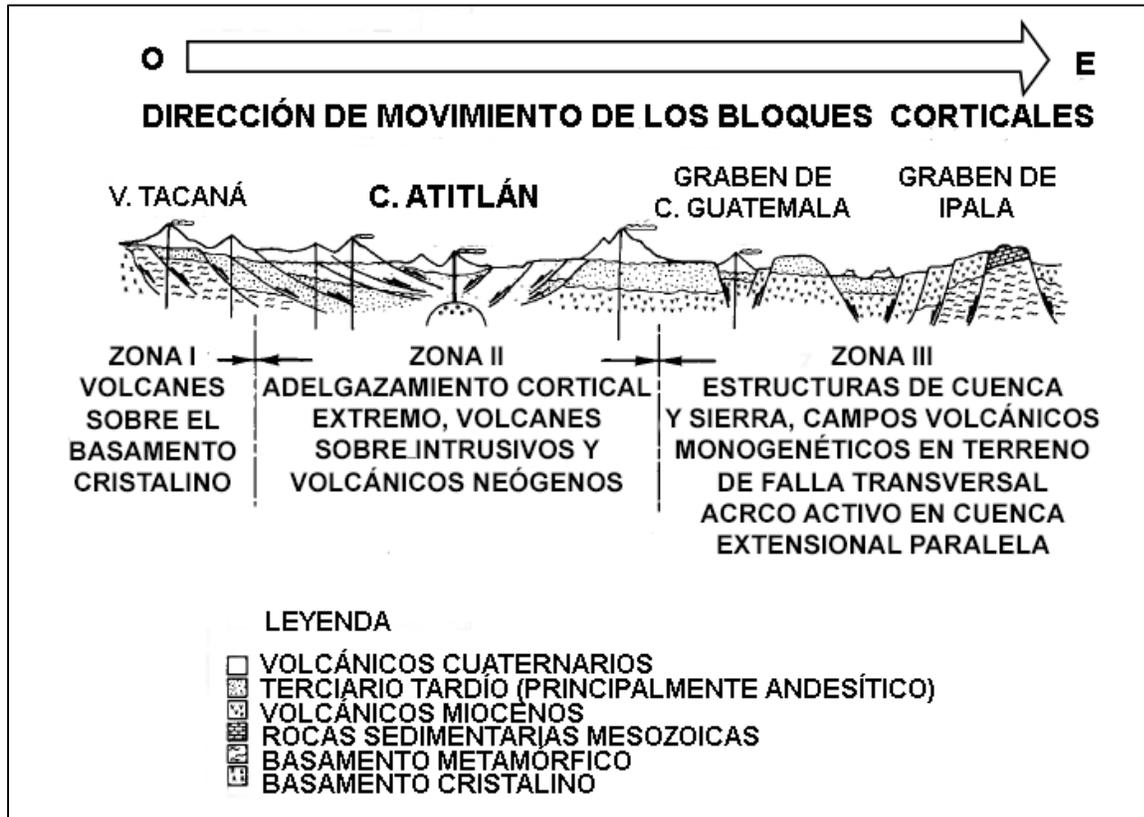
Burkart y Self proponen la rotación anti horaria del Bloque Chortís como un factor importante que da forma al terreno complejo del arco volcánico en Guatemala y El Salvador. Para explicar esto, definen cuatro zonas morfo tectónicas que se relacionan con la rotación anti horaria de los bloques alrededor de las fallas mayores (Motagua y Jocotán) y con la deriva que aleja estos bloques del arco volcánico.<sup>48</sup>

---

<sup>47</sup> Burke Burkart y Stephen Self. "Extension and rotation of crustal blocks in northern Central America and effect on the volcanic arc". *Geology*. 13, (enero 1985): 22-26.

<sup>48</sup> *Ibíd.*

## FIGURA 6 ZONAS MORFO TECTÓNICAS DE GUATEMALA



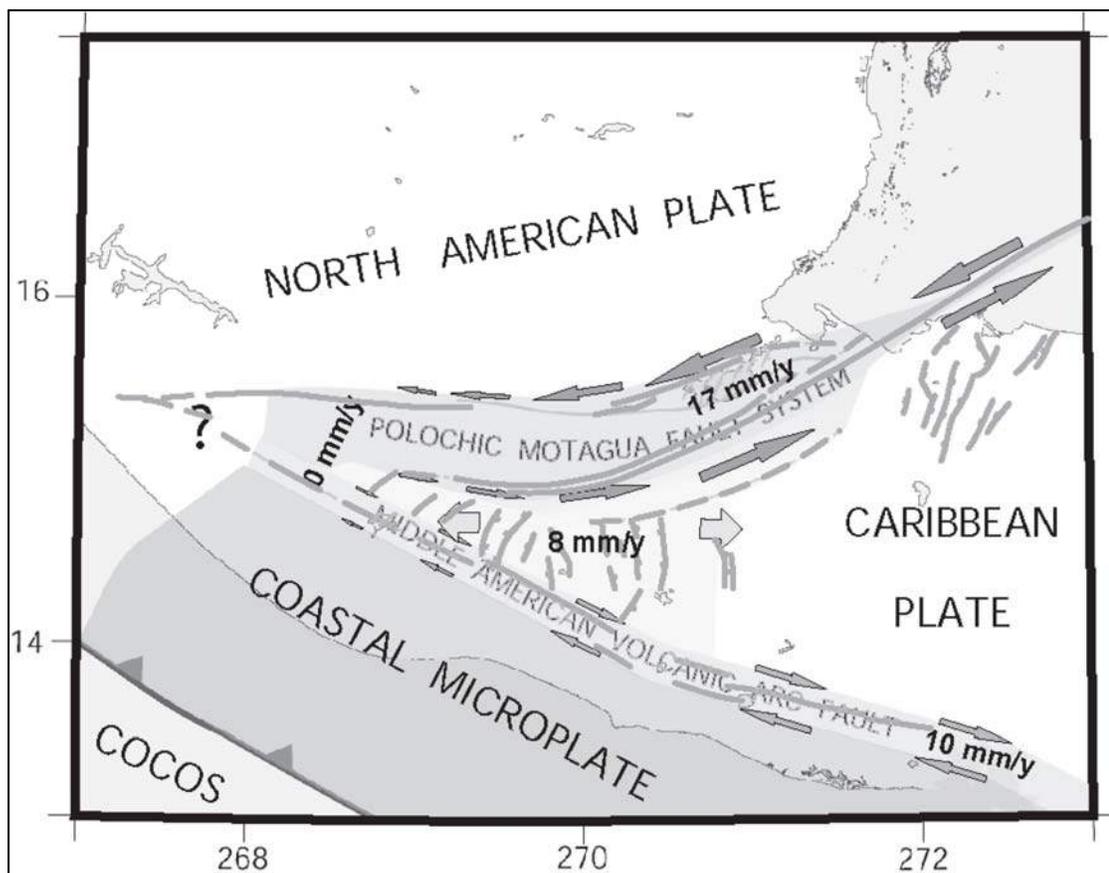
**FUENTE:** Modificado a partir de Burkart, Burke y Stephen Self. "Extension and rotation of crustal blocks in northern Central America and effect on the volcanic arc". *Geology*. 13 (enero 1985): 22-26.

Según Lyon-Caen *et. al.* (2006) y los datos de DeMets, los sitios de GPS ubicados en la planicie costera del Pacífico de Guatemala al sur del Arco Volcánico, en la porción del ante arco, indican un movimiento lateral derecho de aproximadamente 10 mm/a relativo al sitio de Tegucigalpa, ubicado en la placa del Caribe estable.<sup>49</sup>

<sup>49</sup> Helene Lyon-Caen *Et. Al.*, "Kinematics of the North American-Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system" *Geophysical Research Letters*. 33 (octubre 2006): 1-5.

Esto sugiere que la zona de ante arco al sur del arco volcánico se comporta como una micro placa (placa costera Centroamericana), tal y como se observa en Costa Rica, Nicaragua y El Salvador (Figura 7); probablemente como resultado de la partición por deslizamiento en la Fosa Mesoamericana debido a la subducción levemente oblicua de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe.<sup>50</sup>

**FIGURA 7**  
**MODELO CINEMÁTICO PROPUESTO DE LA TRIPLE**  
**CONJUNCIÓN DE PLACAS NORTEAMÉRICA-CARIBE-COCOS**



**FUENTE:** Helene Lyon-Caen *Et. Al.*, "Kinematics of the North American-Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system" *Geophysical Research Letters*. 33 (octubre 2006): 1-5.

<sup>50</sup> *Ibíd.*

Esta configuración tectónica regional tiene su mejor expresión local en el área de investigación a través de la Zona de Falla de Zunil, el cual es un sistema orientado *NE-SW* cuyas fallas principales son la falla Samalá y la falla Zunil, además de varias otras fallas sub paralelas inclinadas hacia el noroeste; su movimiento es predominantemente lateral izquierdo y de tipo normal.<sup>51</sup> Estas fallas pueden tener un desplazamiento de hasta varios cientos de metros y forman una serie de *horsts* y *grabens*.<sup>52</sup>

La Zona de Falla de Zunil puede tener una anchura de hasta 10 km y está limitada al oeste por la falla que atraviesa el flanco occidental del volcán Chicabal, hacia el este por el bloque levantado de la falla Samalá y hacia el norte y noroeste por la fractura inferida a través del domo Cerro Quemado y el Complejo Santa María-Santiaguito.<sup>53</sup>

En el área se encuentran, además, un sistema de falla *NW-SE*, representado por la falla Cajolá en el extremo noroeste del valle de Quetzaltenango, y dos sistemas *E-W*; uno corta la parte central de la Zona de Falla de Zunil, y el otro se expresa como la falla Olintepeque, con una longitud de 12 km y un desplazamiento vertical de aproximadamente 300 m, limita al norte la depresión vulcano-tectónica del valle de Quetzaltenango.<sup>54</sup>

---

<sup>51</sup> Gutiérrez, 24.

<sup>52</sup> Duncan Foley Et. Al., "Geology and geophysics of the Zunil geothermal system, Guatemala". *Geothermal Resources Council Transactions*. 14, Part II, (agosto 1990): 1405-1412.

<sup>53</sup> Gutiérrez, 25.

<sup>54</sup> *Ibíd.*

## 1.9 FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES

### 1.9.1 GRANODIORITA

Según Gill, es una roca ígnea leucocrática, de grano grueso, que consiste esencialmente de plagioclasa sódica, feldespato potásico (incluyendo pertita) y cuarzo, acompañado por uno o más minerales máficos acuosos; se distingue del granito por la *predominancia de la plagioclasa*.<sup>55</sup>

### 1.9.2 ZIRCÓN

Es un mineral perteneciente al grupo de los nesosilicatos. Es un silicato de zirconio de fórmula química  $ZrSiO_4$ . Su dureza en la escala de Mohs es de 7,5 y su densidad (medida) es de 4,6 g/cm<sup>3</sup> a 4.7 g/cm<sup>3</sup>. Pirkle y Podmeyer mencionan lo siguiente:

Es usado para datación radiométrica de las rocas que lo contienen, usando isotopos de U, así como de Th, Pb radiogénico, Hf, Y, P y otros elementos.<sup>56</sup> El zircón es especialmente abundante en los tipos de rocas ígneas más silíceas, como el granito, granodiorita, sienita y monzonita.<sup>57</sup>

### 1.9.3 MÉTODO URANIO-PLOMO (U-PB)

Milián, en su tesis de ingeniero geólogo cita a Duque, e indica lo siguiente:

---

<sup>55</sup> Robin Gill. *Igneous Rocks and Processes. A practical guide*. (Reino Unido: Wiley Blackwell, 2 010), p 242.

<sup>56</sup> *Zircon*, <http://www.mindat.org/min-4221.html> (15 de agosto de 2 015).

<sup>57</sup> F. L. Pirkle, D. A. Podmeyer. *Zircon: Origin and Uses*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Vol. 292. [http://cam.usf.edu/CAM/exhibitions/1998\\_12\\_McCollum/supplemental\\_didactics/62.Zircon.pdf](http://cam.usf.edu/CAM/exhibitions/1998_12_McCollum/supplemental_didactics/62.Zircon.pdf) (15 de agosto de 2 015).

La técnica se fundamenta en el decaimiento radioactivo del uranio ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{234}\text{U}$ ) a plomo ( $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  y  $^{208}\text{Pb}$ ) de manera natural. De los isótopos de plomo solo el  $^{204}\text{Pb}$  es común y no radiogénico, los otros tres son el resultado de una compleja serie de decaimientos desde el uranio pasando por el torio (Th).<sup>58</sup>

Estas series se caracterizan según su vida media y constante de decaimiento, como se muestra en la tabla a continuación.

**TABLA 2**  
**SERIES DE DECAIMIENTO U/Pb**

ISÓTOPO PADRE	ISÓTOPO HIJO	VIDA MEDIA (AÑOS)	CONSTANTE DE DECAIMIENTO ( $\lambda$ )
$^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}$	$4,468 \times 10^9$	$1,55158 \times 10^{-10} \text{ a}$
$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$	$0,7038 \times 10^9$	$9,8485 \times 10^{-10} \text{ a}$
$^{232}\text{Th}$	$^{206}\text{Pb}$	$14,010 \times 10^9$	$0,49475 \times 10^{-10} \text{ a}$

**FUENTE:** José Fernando Duque Trujillo. *Geocronología (U/Pb y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) y geoquímica de los intrusivos Paleógenos de la Sierra Nevada de Santa Marta y sus relaciones con la tectónica del Caribe y el arco magmático circun-Caribeño*. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra (México: Universidad Autónoma de México, 2009), p 56.

#### 1.9.4 MÉTODO U/PB EN ZIRCÓN

Según Milián en su tesis de ingeniero geólogo, el fundamento del método es que el sistema U/Pb en el zircón ha permanecido cerrado, es decir, sin asimilación o pérdida de alguno o ambos elementos.<sup>59</sup>

<sup>58</sup> José Fernando Duque Trujillo. *Geocronología (U/Pb y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) y geoquímica de los intrusivos Paleógenos de la Sierra Nevada de Santa Marta y sus relaciones con la tectónica del Caribe y el arco magmático circun-Caribeño*. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra (México: Universidad Autónoma de México, 2009), p 55.

<sup>59</sup> Ricardo Enrique Milián. *Petrografía, geoquímica y geocronología del stock ubicado en los alrededores de la aldea Matanzas, municipio de San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala*. Tesis Ingeniero Geólogo. (Guatemala: Centro Universitario del Norte - Universidad de San Carlos de Guatemala, Carrera de Geología, 2013).

En el sitio *web* del laboratorio universitario de geoquímica isotópica de los institutos de Geofísica y Geología de la Universidad Autónoma de México se encuentra más información sobre este método y las gráficas resultantes del mismo:

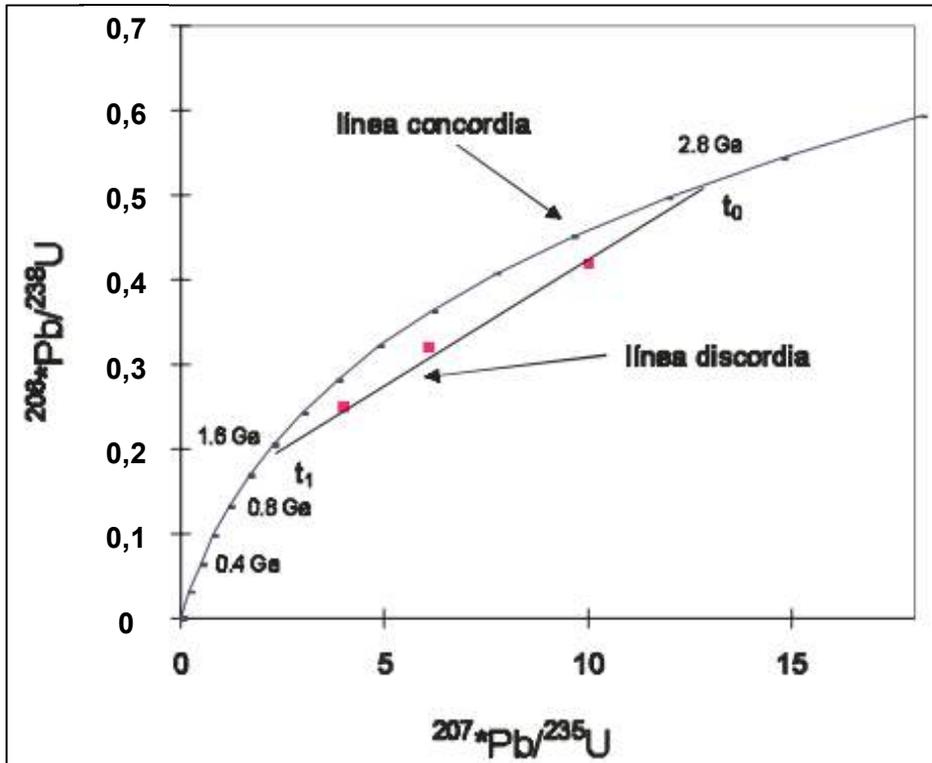
Si se grafican las relaciones  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  vs  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ , que corresponden a  $(e^{\lambda^{238}t} - 1)$  vs  $(e^{\lambda^{235}t} - 1)$ , se genera una curva, denominada curva de concordia, en la que yacen todos los puntos con edades concordantes  $207^*$  y  $206^*$ . Su curvatura corresponde a la diferencia que hay entre sus vidas medias. La curva de concordia puede ser descrita como una curva paramétrica de dos funciones,  $x(t)$ ,  $y(t)$ , donde cada función de tiempo es independiente. Si ocurrió una pérdida de Pb ó un sobrecrecimiento de cristales al tiempo  $t_1$ , los puntos con edades concordantes estarán desplazados a lo largo de una línea recta entre  $t_0$  y  $t_1$ , generando la llamada línea discordia. Las edades U-Pb de discordias obtenidas de zircones usualmente dan 2 valores. La intersección superior de la discordia con la concordia  $t_0$  corresponde a la edad de cristalización de la roca y la intersección inferior  $t^1$  a la edad del evento que perturbó el sistema (metamorfismo, difusión, etc.).<sup>60</sup>

En la siguiente figura se presenta un diagrama de curvas de concordia y discordia.

---

<sup>60</sup> *Introducción a la Geoquímica Isotópica*. <http://www.geofisica.unam.mx/laboratorios/universitarios/lugis/pdf/introduc-GI.pdf> (15 de agosto de 2 015).

**FIGURA 8**  
**DIAGRAMA DE CONCORDIA**



**FUENTE:** Introducción a la Geoquímica Isotópica. <http://www.geofisica.unam.mx/laboratorios/universitarios/lugis/pdf/introduc-GI.pdf> (15 de agosto de 2015).

### 1.9.5 ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE (ICP/MS)

Es una técnica analítica usada para la determinación de elementos. Combina una fuente de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) de alta temperatura con un espectrómetro de masas, la cual convierte los átomos de los elementos en la muestra a iones. Estos iones son separados y detectados por el espectrómetro de masas.<sup>61</sup>

<sup>61</sup> Ruth E. Wolf. *What is ICP-MS?*. [http://crystal.usgs.gov/laboratories/icpms/What\\_is\\_ICPMS.pdf](http://crystal.usgs.gov/laboratories/icpms/What_is_ICPMS.pdf) (15 de agosto de 2015).

### 1.9.6 ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZA

Toselli, en su publicación Elementos Básicos de Petrología Ígnea (2010), sobre los elementos mayores, menores y traza describe lo siguiente:

Los elementos son separados en mayores, menores y trazas. Los límites entre los grupos son arbitrarios, pero los más aceptados son: Elementos mayores >1,0% peso, elementos menores 0,1 – 1,0% peso, elementos trazas <0,1% peso. Se denominan elementos mayores porque están presentes en altas concentraciones y controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos. Los elementos menores comúnmente sustituyen a algunos elementos en los minerales principales, si llegan a estar en concentraciones suficientemente altas pueden llegar a formar minerales independientes, que se denominan minerales accesorios. Los elementos trazas, están demasiado diluidos como para formar fases separadas, ellos actúan estrictamente sustituyendo a elementos mayores y trazas en las estructuras minerales. La concentración y distribución de los elementos trazas pueden ser utilizados para estudiar la evolución de los magmas, actuando como trazadores efectivos para establecer el origen de los magmas y para discriminar procesos magmáticos.<sup>62</sup>

---

<sup>62</sup> Alejandro Toselli. *Capítulo 8. Petrología química: elementos mayores y menores.*  
[http://www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_18/08.htm](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/08.htm) (15 de agosto de 2 015).



## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA**

El método que se empleó es denominado mixto, debido a que es cuantitativo y cualitativo a la vez.

Es cuantitativo en lo relativo a la petroquímica de las muestras de roca, según las cantidades de los óxidos mayores y elementos presentes en ellas, así como en los datos de las edades obtenidas por la datación radiométrica.

Lo cualitativo comprende la caracterización petrográfica de las muestras, así como la interpretación de los datos geoquímicos y geocronológicos.

El trabajo se dividió en las siguientes etapas, explicadas a continuación.

#### **2.1 ETAPA DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

Se procedió a obtener toda la información posible, en relación con el tema de investigación: geología local con énfasis a los cuerpos graníticos, datos geoquímicos, dataciones realizadas, fundamentos de geoquímica de rocas ígneas y del método ICP/ICP-MS, fundamentos de datación radiométrica por el método U/Pb y otros datos relevantes.

## **2.2 ETAPA DE CAMPO**

Se realizó la cartografía para determinar la distribución espacial de los cuerpos graníticos en los tres polígonos propuestos, así como obtener muestras representativas para utilizar en los análisis de laboratorio.

El muestreo se trabajó según dos variables, siendo estas las diferencias litológicas que se presentaron entre los diversos afloramientos en cada polígono, y el grado de meteorización de los mismos. Por lo tanto las muestras son representativas de cada una de las litologías presentes, y lo más sanas posible. Las muestras fueron de aproximadamente 2 kg de peso, para poderse someter a los tres análisis: petrográfico, geoquímico y geocronológico.

## **2.3 ETAPA DE LABORATORIO**

Comprendió la realización de análisis petrográficos, geoquímicos y geocronológicos a las muestras extraídas del campo.

El análisis petrográfico de láminas delgadas a través del conteo de puntos permitió caracterizar mineralógicamente las rocas graníticas, obtener sus valores modales y distinguir las variedades litológicas que se presentaron. Los datos fueron graficados en diagramas de clasificación petrográfica. En función de las variedades litológicas y su distribución, se determinó el número de muestras que fueron sometidas al análisis geoquímico. El análisis petrográfico se llevó a cabo en el laboratorio de geología del CUNOR.

El análisis de litogeoquímica utilizó la técnica de espectrometría de masas por plasma inducido acoplado (ICP-MS), para determinar óxidos y elementos mayores, así como elementos traza, los cuales se utilizaron para clasificar litogeoquímicamente las rocas y determinar su origen y ambiente tectónico. El análisis se llevó a cabo en el laboratorio de *Bureau Veritas Minerals*, en Vancouver, Canadá.

La combinación de cristales visibles de zircón y una cantidad significativa de circonio en las muestras confirmaron la viabilidad de la datación para dos especímenes representativos.

La datación radiométrica a través del método por U/Pb permitió establecer la edad de emplazamiento de los cuerpos graníticos. El análisis se llevó a cabo en el laboratorio de estudios isotópicos del Centro de Geociencias de la Universidad Autónoma de México, campus Juriquilla de Querétaro, México.

## **2.4 ETAPA DE GABINETE**

En base a los datos obtenidos de la etapa de laboratorio, tanto petrográficos como geoquímicos y geocronológicos, se utilizaron diagramas de clasificación para determinar las litologías, las características geoquímicas, ambiente geotectónico de emplazamiento, y en conjunto con los datos de la datación, se propuso una reconstrucción de la historia geológica de estos cuerpos graníticos.



## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

A continuación, se presentan los resultados del trabajo de campo, el análisis petrográfico de secciones delgadas y los ensayos geoquímicos realizados a diferentes muestras de las rocas graníticas incluidas en esta investigación.

#### **3.1 RELACIONES DE CAMPO/CARTOGRAFÍA**

En este apartado se describen macroscópicamente las rocas que afloran en los polígonos del área de investigación, así como sus contactos y relaciones de campo, agrupadas en unidades litodémicas informales.

##### **3.1.1 GRANODIORITAS CANTEL (Grcn)**

Estas rocas se encuentran en escasos afloramientos, uno en los alrededores de la aldea Pasac II, y cuatro a lo largo del río Chuyul, entre los 2 330 msnm y 2 560 msnm. Forman los muros de algunos saltos de agua en las corrientes mencionadas, o bien, se muestran como una gruesa capa de material fragmentado y meteorizado, pudiendo contener algunos bloques decimétricos a métricos contenidos en la misma. Sedimentos y clastos de estas rocas se añaden a las litologías ígneas de los depósitos aluviales del río y el arroyo (Fotografía 1).

Son rocas mesocráticas a leucocráticas, grisáceas a blanquecinas, con tonos verdes, rojos o amarillos según la meteorización o alteración que presenten.

Su grado de cristalización es holocristalino, de textura fanerítica de grano medio a grueso (0,1 cm a 2,5 cm) con cristales equigranulares. Son notorios los cristales desarrollados de biotita/anfíbol, feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo. A nivel de afloramiento se observan algunos xenolitos de composición andesítica y textura afanítica (Fotografía 1).

Sobre estas rocas se encuentran discordantemente diversos depósitos piroclásticos, así como secuencias basálticas, cuyos contactos son difíciles de determinar, aunque parecen corresponder tanto a superficies de erosión, dado el *grus* que los cubre, así como a contactos fallados de tipo normal. Esto se evidencia por los abruptos cambios laterales entre los cuerpos de granodiorita y las otras litologías mencionadas, además de los evidentes escarpes expresados en los muros de los saltos de agua.

Los afloramientos de granodiorita dentro del polígono de investigación de Cantel totalizan una extensión de 14 082 m<sup>2</sup> (0,014082 km<sup>2</sup>), lo equivalente al 0,86 % de los 1,635 km<sup>2</sup> que el polígono ocupa.

## FOTOGRAFÍA 1 AFLORAMIENTOS DE GRANODIORITAS EN CANTEL



**DESCRIPCIÓN:** a) salto de agua en las cercanías de Pasac II, Cantel, con 25 m de altura aproximadamente; b) salto de agua en el río Chuyul; c) alrededores de Chuitziribal, siguiendo el curso del río Chuyul; d) detalle de la granodiorita del afloramiento anterior, en donde se observan xenolitos de composición andesítica; e) granodiorita del afloramiento de Pasac; f) granodiorita del afloramiento del curso bajo del río Chuyul.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, junio y octubre de 2015.

### 3.1.2 GRANODIORITAS ZUNIL (Grzn)

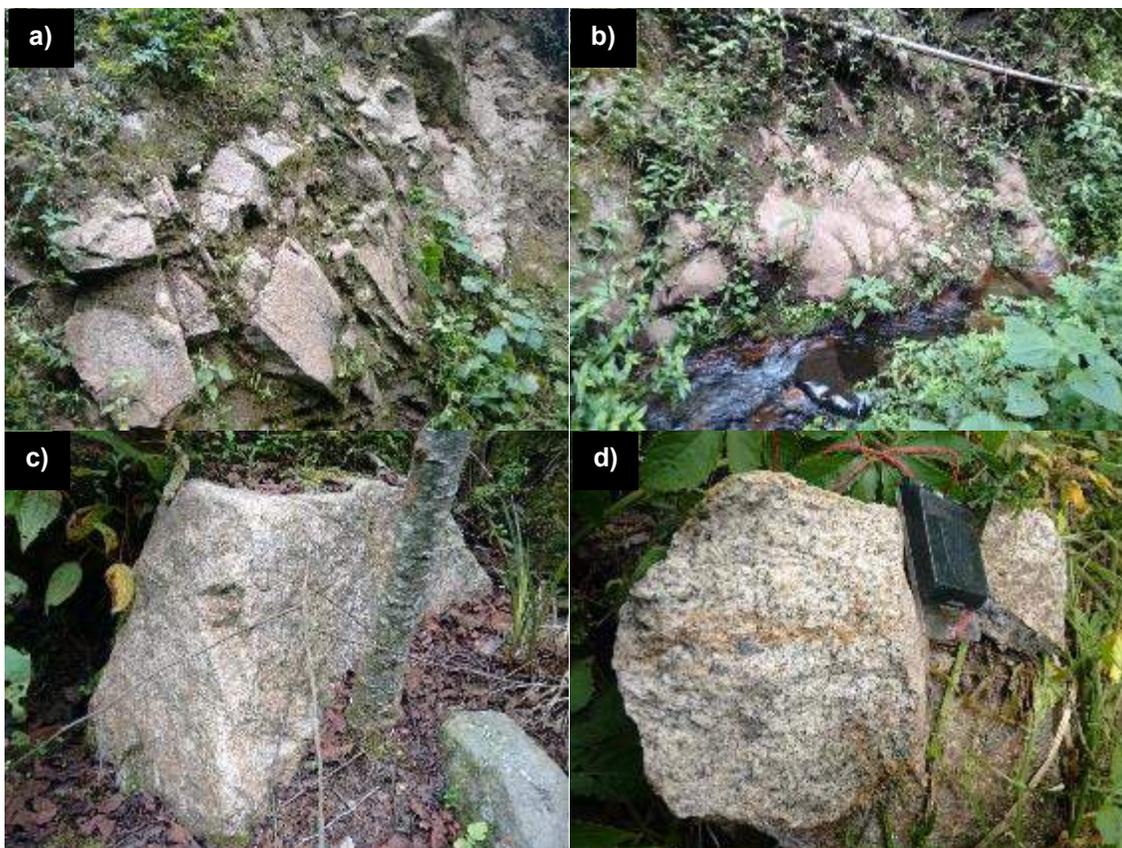
Este cuerpo rocoso se extiende a lo largo del angosto valle fluvial del río Pachamiyá, el cual corre de *SE* a *NO*, al este de la aldea Tzanmucubal. Se expone en un par de saltos de agua de difícil acceso, así como en forma de bloques y sedimentos en los depósitos aluviales de la corriente, entre los 2 250 msnm y 2 320 msnm (Fotografía 2).

Es una roca leucocrática, de coloración blanquecina a rosácea, de grado de cristalización holocristalino. Su textura es fanerítica y el tamaño de sus cristales es mediano a grueso, de 0,1 cm a 1,5 cm de largo. Los cristales tienden a ser equigranulares, con las biotitas, feldespato potásico y plagioclasa bien desarrollados, y el cuarzo micro granular.

Este cuerpo rocoso se encuentra cubierto por flujos riolíticos y andesíticos, en contactos discordantes, difíciles de observar por la abundante vegetación que cubre el valle del río Pachamiyá.

Los afloramientos de granodiorita dentro del polígono de investigación de Zunil totalizan una extensión de 2 284 m<sup>2</sup> (0,002284 km<sup>2</sup>), lo equivalente al 0,23 % de 1 km<sup>2</sup> que el polígono ocupa.

## FOTOGRAFÍA 2 AFLORAMIENTOS DE GRANODIORITA EN ZUNIL



**DESCRIPCIÓN:** a,b) exposición de granodioritas en las murallas de saltos de agua en el río Pachamiyá; c) bloque de granodiorita, éstos son abundantes en el valle fluvial; d) granodiorita del afloramiento del río Pachamiyá.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

### 3.1.3 ROCAS VOLCÁNICAS INDIFERENCIADAS (Qvi)

Esta unidad se localiza en los polígonos de Cantel y Zunil, exponiéndose en los alrededores de Pasac II, Chuitziribal, el río Chuyul y el río Pachamiyá, entre las cotas de los 2 100 msnm a los 2 500 msnm, aproximadamente.

En ésta se agrupan una serie de afloramientos de flujos andesítico-basálticos y riolíticos, cubiertos o intercalados lateralmente con depósitos de lahar y depósitos piroclásticos (Fotografía 3).

Todas estas litologías guardan una relación espacial muy compleja entre sí, con innumerables cambios laterales cuyos contactos están ocultos por las capas de suelo, zonas de cultivo y la densa vegetación.

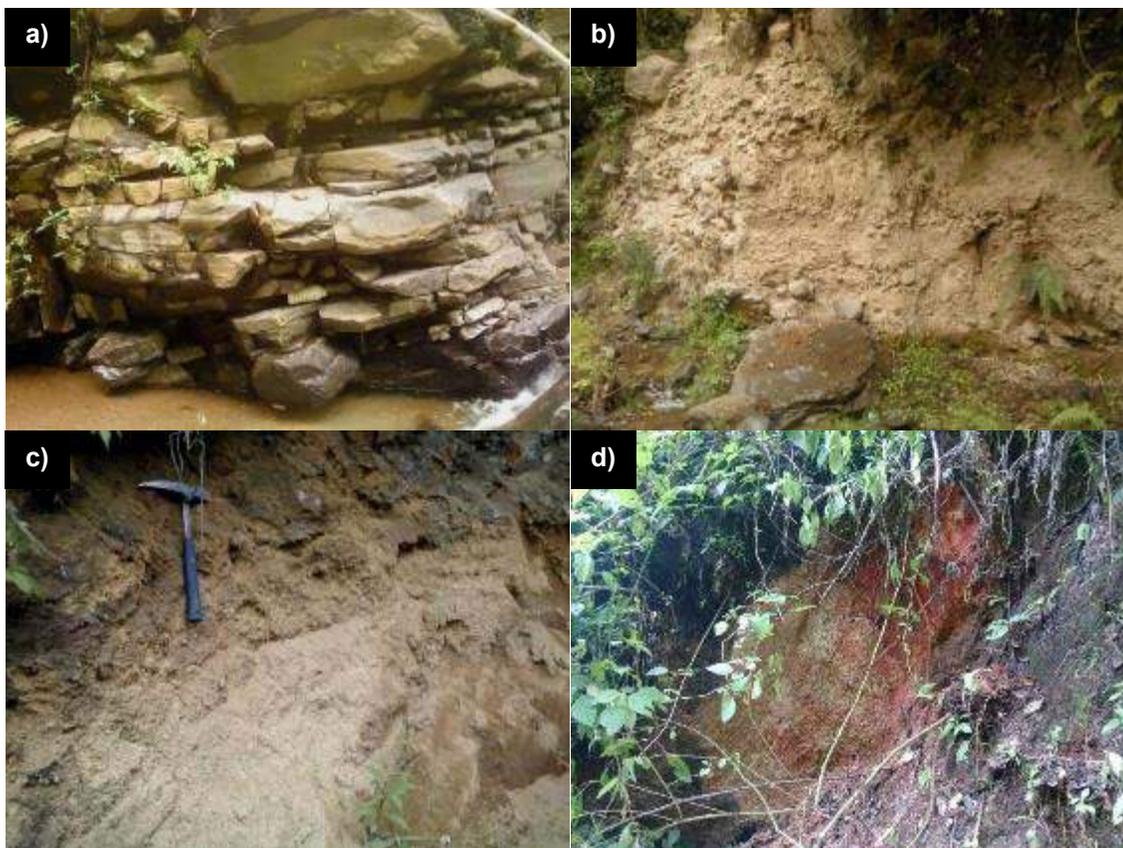
Las rocas de los flujos andesítico basálticos se exponen en los cauces de los ríos, con colores grises oscuros, grado de cristalización holocristalina y textura afanítica.

Las rocas riolíticas del río Pachamiyá se encuentran como flujos de ceniza litificados y desvitrificados, de color gris. Además pueden presentarse como un vitrófiro riolítico grisáceo a rojizo por la presencia hematita.

Los depósitos de lahar están compuestos por bloques andesítico-basálticos, que aparecen en una proporción mayor a la matriz poco consolidada de cenizas y arenas.

Los depósitos piroclásticos se componen de ceniza y lapilli tanto pomáceo como escoráceo principalmente, y por lo general están poco consolidados.

### FOTOGRAFÍA 3 ROCAS VOLCÁNICAS INDIFERENCIADAS



DESCRIPCIÓN: a) flujos andesíticos sobre el cauce del río Chuyul; b) depósito de lahar sobre el cauce del río Chuyul; c) depósito de ceniza en los alrededores de Pasac II; d) flujo riolítico meteorizado, alrededores del Río Pachamiyá.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

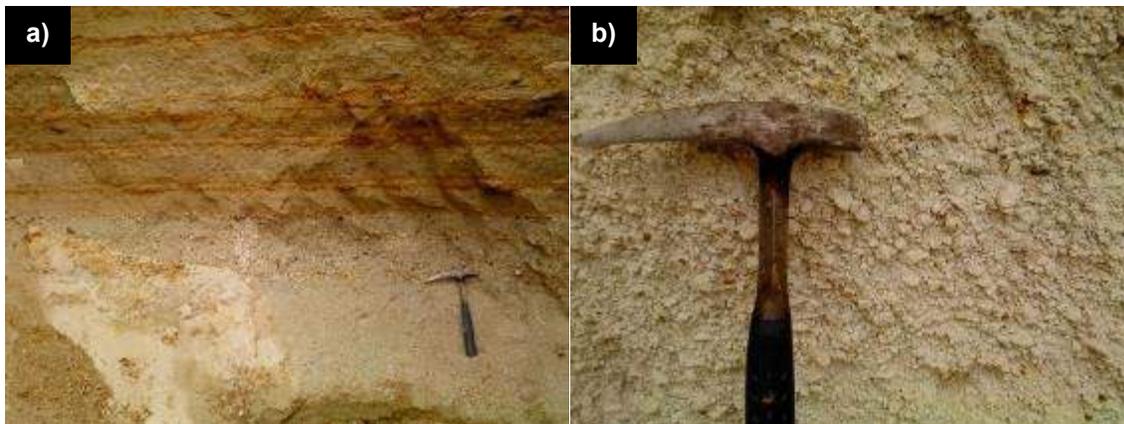
Esta unidad sobre yace discordantemente a las granodioritas de Cantel y Zunil. Sus contactos inferiores y laterales por lo general están ocultos y son abruptos.

### 3.1.4 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS CHUITZIRIBAL (Qpch)

Se localizan en los alrededores del caserío Chuitziribal, en el polígono Cantel. Se expone en los caminos en las cercanías del poblado en mención, entre los 2 400 msnm y 2 600 msnm, aproximadamente.

Aflora como cuerpos masivos, a veces estratificados, con espesores locales de hasta 50 m. Varía lateral y verticalmente entre ceniza, arenas y lapilli pomáceos. Los materiales se encuentran poco consolidados y varían en su coloración, desde blanquecina hasta anaranjada o rosácea. Yacen discordantemente sobre las Rocas Volcánicas Indiferenciadas relleno la depresión sobre la cual se asienta Chuitziribal. Estos depósitos pueden asociarse al evento eruptivo de Los Chocoyos (84 ka).

#### FOTOGRAFÍA 4 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS DE CHUITZIRIBAL



**DESCRIPCIÓN:** a) techo de los depósitos, con alternancias entre los materiales tobáceos cineríticos y de lapilli pomáceo, intercalados con horizontes laminados de material piroclástico depositado en medio lacustre antiguo; b) lapilli y pequeños bloques pomáceos mostrando una regular clasificación, característica de los depósitos piroclásticos de caída en erupciones plinianas.  
**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

### 3.1.5 DEPÓSITOS ALUVIALES (Qal)

Estos se identificaron en los cauces de los ríos Chuyul y Pachamiyá. Se componen de fragmentos rocosos sub redondeados a sub angulosos, de tamaños de arena a bloques métricos, de composiciones litológicas variadas, incluyendo escoria, pómez, riolita, andesita, basalto y granodiorita (Fotografía 5). Estos son los materiales más recientes que se encuentran en los polígonos de investigación.

#### FOTOGRAFÍA 5 DEPÓSITOS ALUVIALES



DESCRIPCIÓN: a) depósitos de bloques rocosos sub angulares y sub redondeados, arrastrados y depositados en el cauce del río Chuyul; b) depósitos de bloques rocosos sub angulares y sub redondeados, junto a arenas cuarzo feldespáticas, arrastrados y depositados en el cauce del río Pachamiyá

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

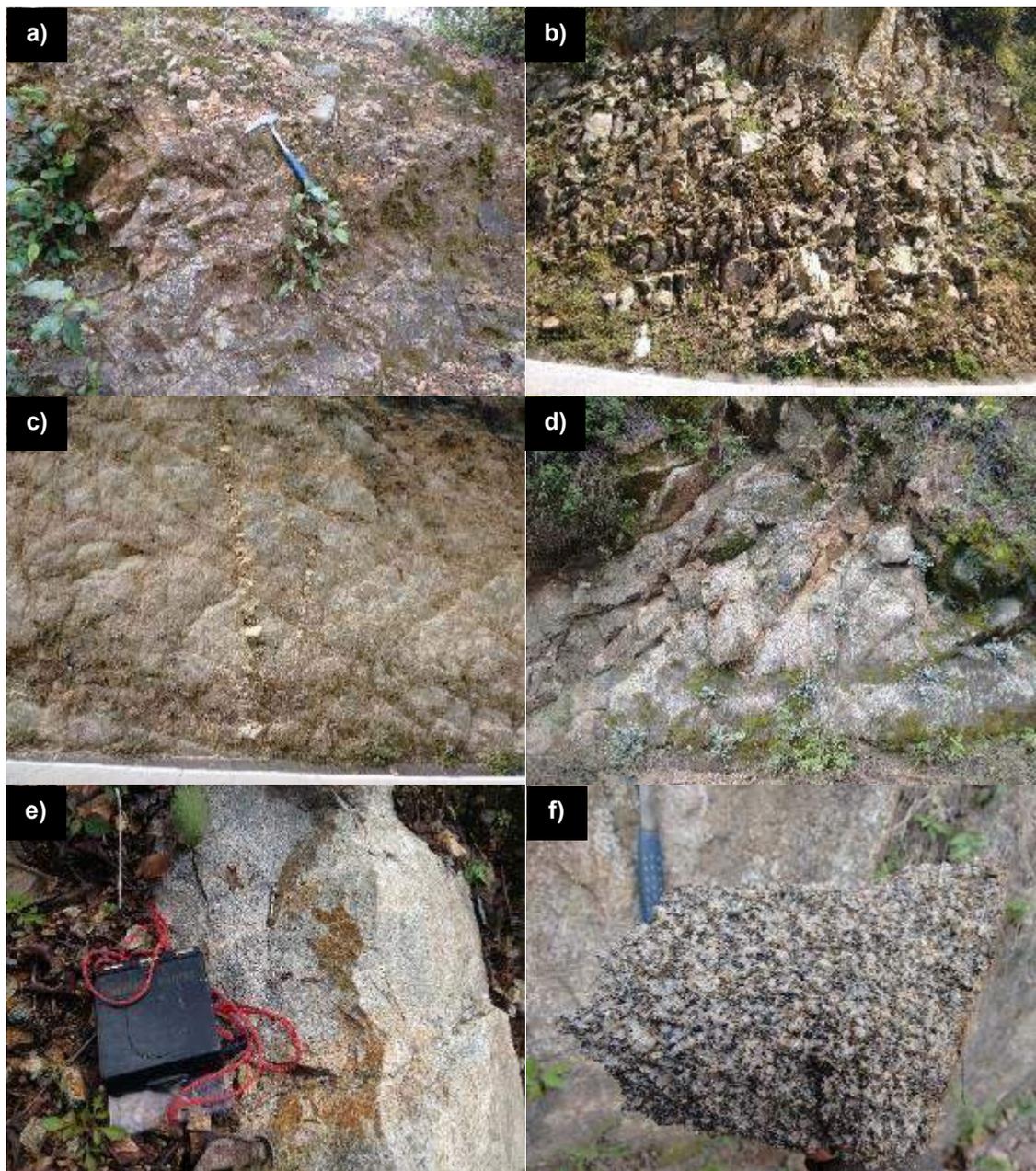
### 3.1.6 GRANODIORITAS CAJOLÁ (Grcj)

Hacia el extremo noroeste de la caldera de Quetzaltenango, y 25 km al noroeste del área de Cantel y Zunil, estas rocas se exponen en diversos afloramientos entre los 2 700 msnm y 3 060 msnm, a lo largo del corte de un tramo carretero de 3 km de longitud que comunica a las poblaciones de Cajolá y Sibilia.

Dos de los afloramientos exponen rocas bien consolidadas, con complejos patrones de fracturamiento y cierto grado de meteorización y/o alteración. Esta última es de tipo hidrotermal y afecta tanto a la granodiorita como al resto de rocas presentes en el lugar. Hacia el sur, en la base del camino, la granodiorita aparece como secciones de material poco consolidado, deleznable a fragmentos del tamaño de arena gruesa (2 mm), la cual está atravesada por un par de diques con inclinación y dirección de inclinación 80/N270 y 82/N088 (Fotografía 6).

El interior fresco deja ver una roca mesocrática, de coloración grisácea a blanquecina. El grado de cristalización es holocristalino y su textura es fanerítica, el tamaño de grano es medio a grueso (0,1 cm a 1 cm) con abundantes cristales más o menos desarrollados de feldespatos, plagioclasa, cuarzo y biotita. La roca meteorizada y fragmentada se muestra como un agregado de plagioclasa, biotita verdosa y dorada (Fotografía 6).

## FOTOGRAFÍA 6 AFLORAMIENTOS DE GRANODIORITA DE CAJOLÁ

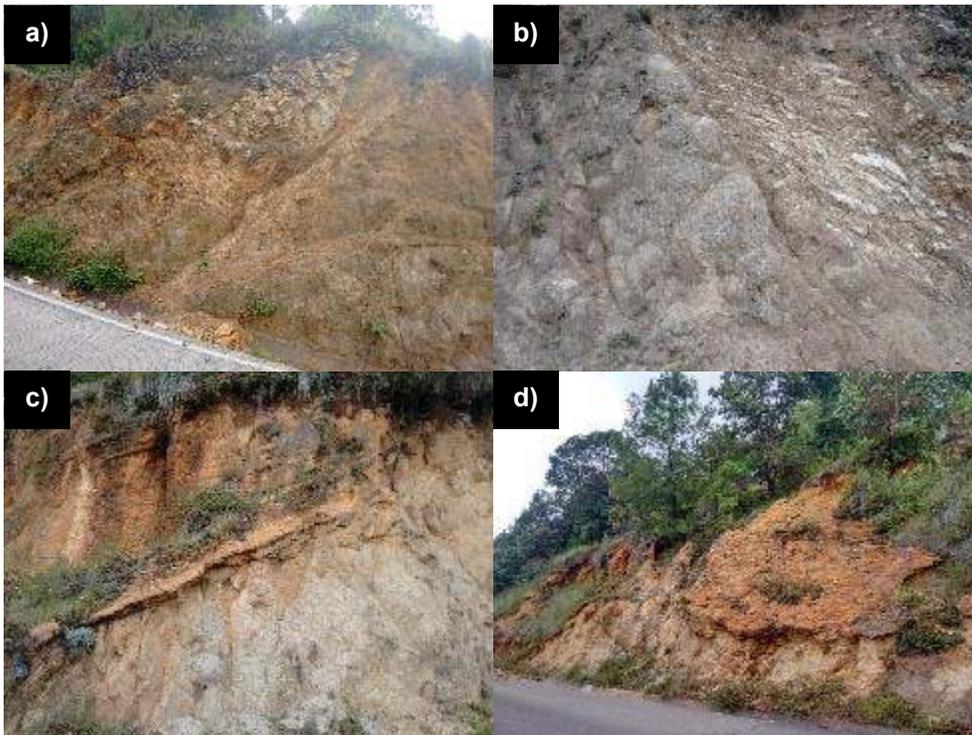


DESCRIPCIÓN: a,b) afloramientos de granodiorita consolidada; c) afloramiento de granodiorita meteorizada y poco consolidada, cortada por diques cuarzo feldespáticos; d) afloramiento de granodiorita meteorizada y poco consolidada; e) granodiorita de la sección media del polígono Cajolá, meteorizada y de grano mediano; f) granodiorita de la sección baja del polígono Cajolá, de grano grueso, con abundantes cristales de biotita y anfíbol.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, septiembre y octubre de 2015.

La secuencia de rocas a lo largo del corte de la carretera también incluye secciones de andesita con intensa alteración hidrotermal (silicificación) así como secciones de cuarcita, en contactos ocultos o fallados. Los contactos fallados visibles son entre la granodiorita poco consolidada y una de las cuarcitas y otro es con una pequeña sección de rocas volcánicas intermedias, intensamente meteorizadas. El otro contacto visible es entre la granodiorita mencionada y depósitos piroclásticos hacia la base de la secuencia, de forma discordante y erosiva (Fotografía 7).

### FOTOGRAFÍA 7 CONTACTOS FALLADOS DE LA GRANODIORITA CAJOLÁ



DESCRIPCIÓN: a) contacto fallado entre granodiorita y roca máfica, plano inclinado 36/N326; b) contacto fallado entre granodiorita y cuarcita, plano inclinado 70/N060; c,d) contactos discordantes entre granodiorita y depósitos piroclásticos.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

Los contactos entre las granodioritas y las andesitas alteradas están ocultos, al igual que los contactos entre estas andesitas y la cuarcita. Esto dificulta el determinar la extensión real de la unidad.

Los afloramientos de granodiorita dentro del polígono de investigación de Cajolá totalizan una extensión de al menos 300 631 m<sup>2</sup> (0,300631 km<sup>2</sup>), lo equivalente al 7,52 % de los 4 km<sup>2</sup> que el polígono ocupa.

### 3.1.7 CUARCITA CAJOLÁ (Czcj)

Se expone en un pequeño afloramientos a lo largo de la carretera al norte de Cajolá, como un macizo rocoso masivo y con un patrón de fractura complejo, entre los 2 785 msnm y 2 800 msnm. La cuarcita se muestra holocristalina y de grano fino, con una textura afanítica y tonalidad gris oscura. Se encuentra en contacto fallado con la secuencia de granodiorita poco consolidada.

## FOTOGRAFÍA 8 AFLORAMIENTO DE CUARCITA CAJOLÁ



DESCRIPCIÓN: a) afloramiento de cuarcita sobre la carretera al norte de Cajolá; b) muestra de cuarcita, de grano muy fino y con venillas de cuarzo.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

### 3.1.8 ANDESITA CAJOLÁ (Ancj)

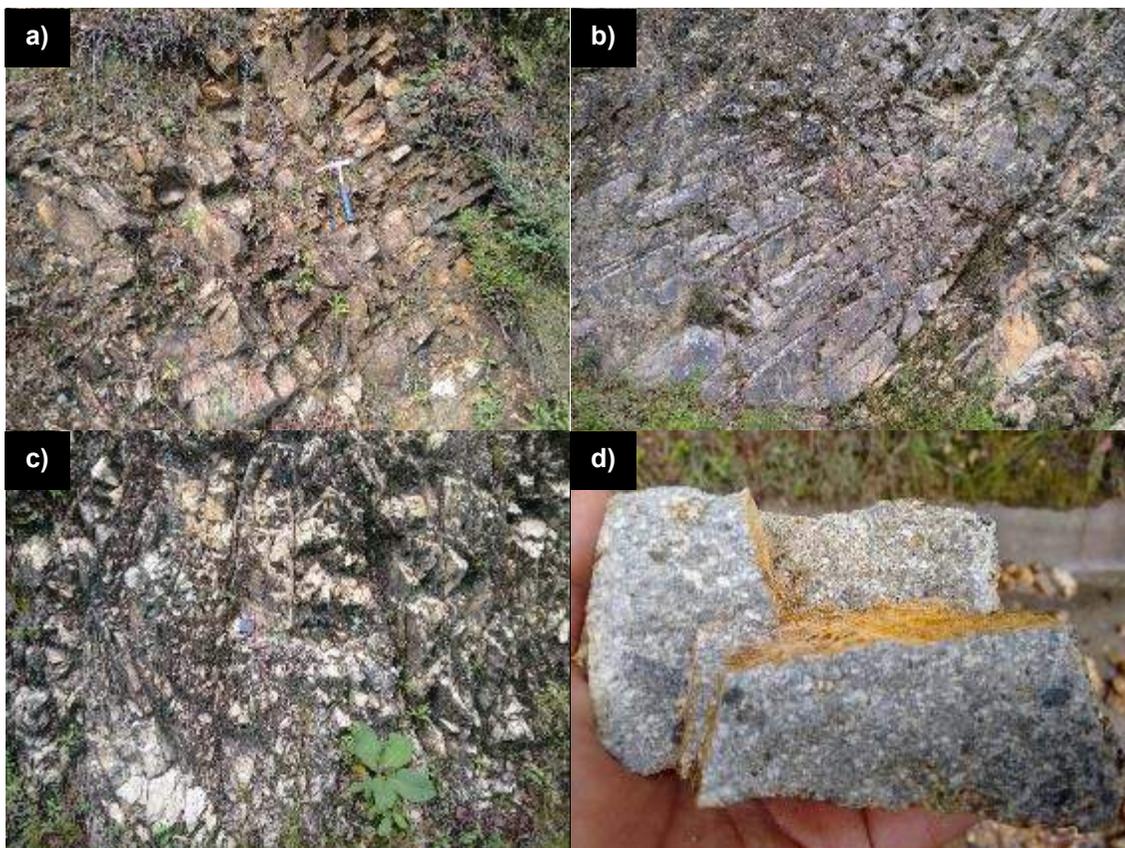
Estas rocas se exponen a lo largo de la carretera entre Cajolá y Sibilía, con secciones intercaladas lateralmente entre las rocas graníticas y las cuarcitas. Representan la unidad de roca más abundante según lo observado en los afloramientos.

Aparece como macizos rocosos con planos de dirección de flujo y/o patrones de fracturamiento que tienden a generar cuerpos tabulares o incluso secciones en donde la roca ha sido ampliamente fragmentada (Fotografía 9).

Sus coloraciones varían de grisáceas a blanquecinas, rojizas, anaranjadas, amarillentas o verdosas, según la pátina de meteorización o alteración que presenten.

La oxidación y la silicificación afectan intensamente a estas rocas, por lo cual el interior de estas rocas muestra una mesostasa grisácea a blanquecina, fenocristales de cuarzo de menos de 1 mm, algunas plagioclasas y muy rara vez algún anfíbol.

## FOTOGRAFÍA 9 AFLORAMIENTOS DE ANDESITA CAJOLÁ

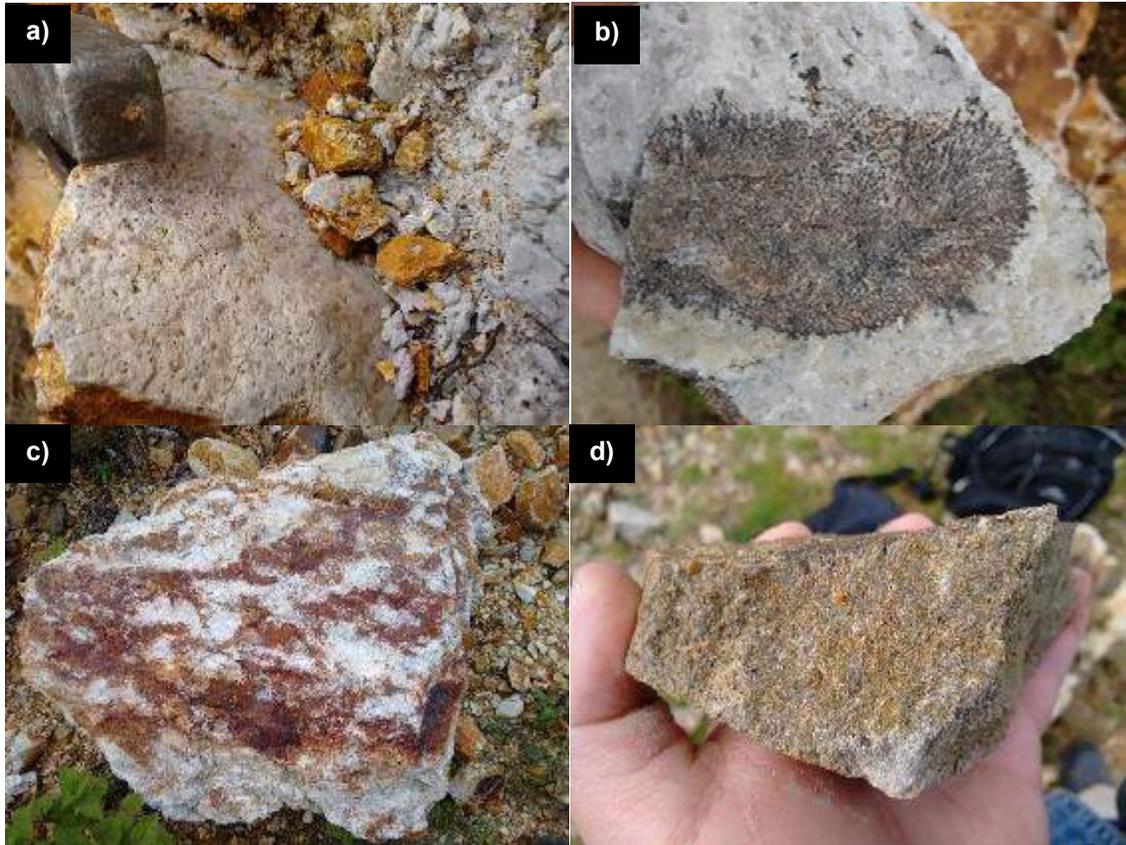


**DESCRIPCIÓN:** a,b,c) afloramientos de andesita, que muestra las pátinas de meteorización anaranjadas, grisáceas y blanquecinas que presentan, así como sus patrones de fracturamiento y direcciones de flujo antiguas; d) interior fresco de la andesita, con fenocristales de plagioclasa y anfíbol, y pátinas de oxidación en sus planos de fractura.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

Evidencias de una alteración hidrotermal de baja temperatura (150°C-200°C) incluyen la intensa silicificación, que incluso rellenó planos de fractura con sílice amorfo, así como oxidación, evidenciada en las pátinas rojizas de óxidos de hierro y las dendritas de óxidos de magnesio. Se observan muy pocas arcillas en estas rocas, así como algunos afloramientos que muestran rocas con epidotización (Fotografía 10).

## FOTOGRAFÍA 10 ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN ANDESITA CAJOLÁ



DESCRIPCIÓN: a) andesita silicificada, con un relleno de sílice amorfo en uno de sus planos de fractura; b) óxidos de manganeso en hábito dendrítico sobre andesita silicificada; c) óxidos de hierro y manganeso sobre andesita silicificada; d) andesita epidotizada.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

Los contactos entre estas rocas y las unidades de granodiorita y cuarcita están ocultos, algunos cambios laterales sugieren contactos fallados o discordantes. No se encuentran evidencias de un contacto intrusivo con la granodiorita.

### 3.1.9 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS CAJOLÁ (Qpcj)

Se localizan hacia el sureste del polígono de investigación, cubren la granodiorita y a un pequeño depósito de lahar. Los materiales del depósito son lapilli pomáceos y ceniza en una proporción casi igual entre sí. Hacia la superficie, estos materiales generan una capa de suelo.

El contacto con el depósito de lahar es concordante. El contacto con la granodiorita preserva la antigua superficie de ésta. Estas rocas piroclásticas son las más recientes del lugar.

#### FOTOGRAFÍA 11 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS CAJOLÁ

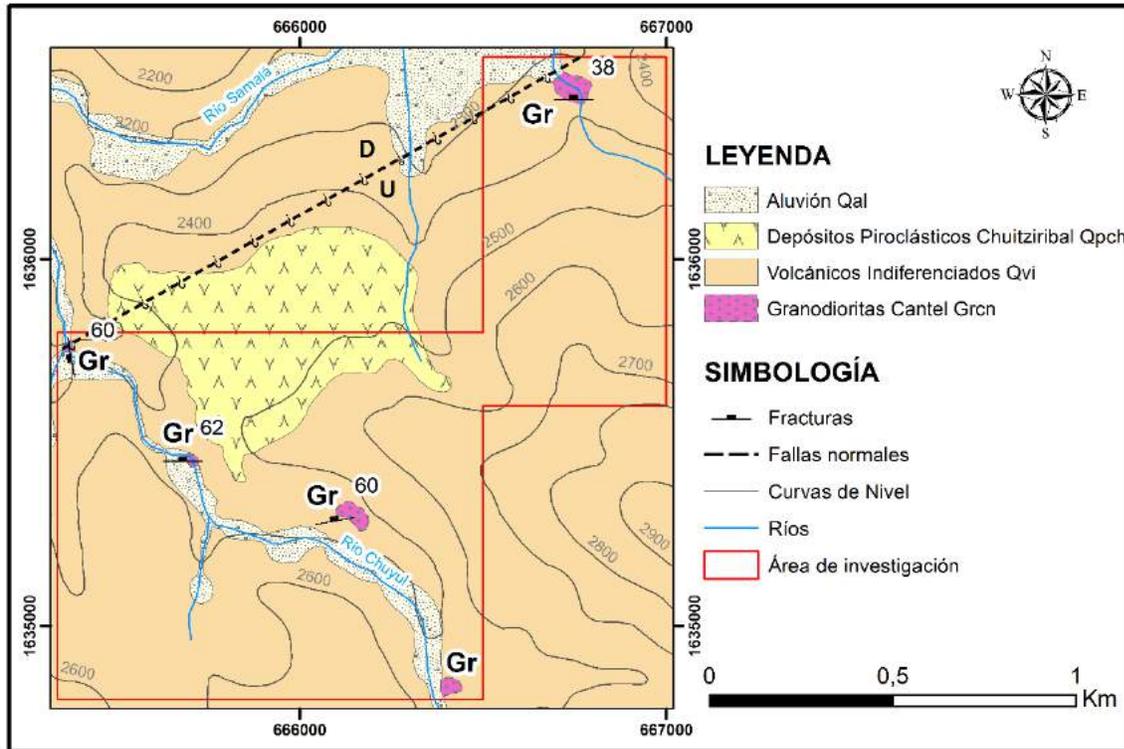


DESCRIPCIÓN: a) depósito piroclástico sobre depósito de lahar; b) depósito piroclástico sobre granodiorita meteorizada.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, octubre de 2015.

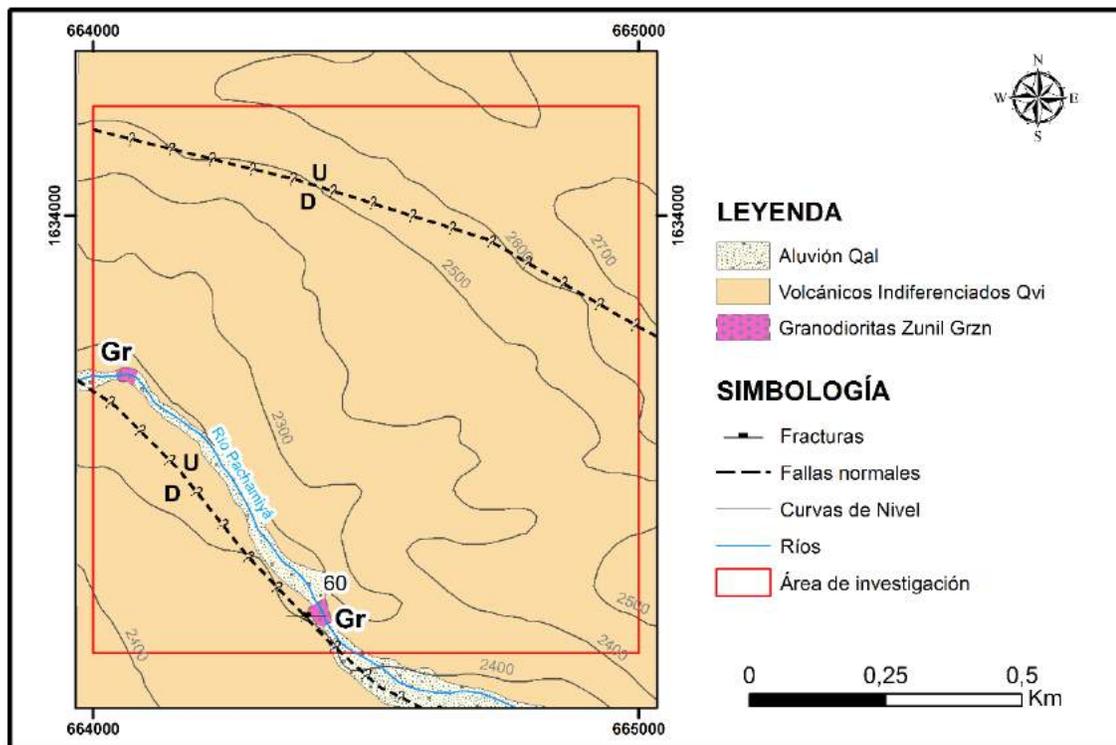
En base a la información recopilada en campo, se elaboraron tres mapas geológicos, uno para el polígono Cajolá al noroeste de la caldera de Quetzaltenango, y dos para el área sureste, uno para el polígono Cantel y otro para el polígono Zunil, los cuales se muestran en las siguientes figuras.

**FIGURA 9**  
**MAPA GEOLÓGICO DEL POLÍGONO CANTEL**



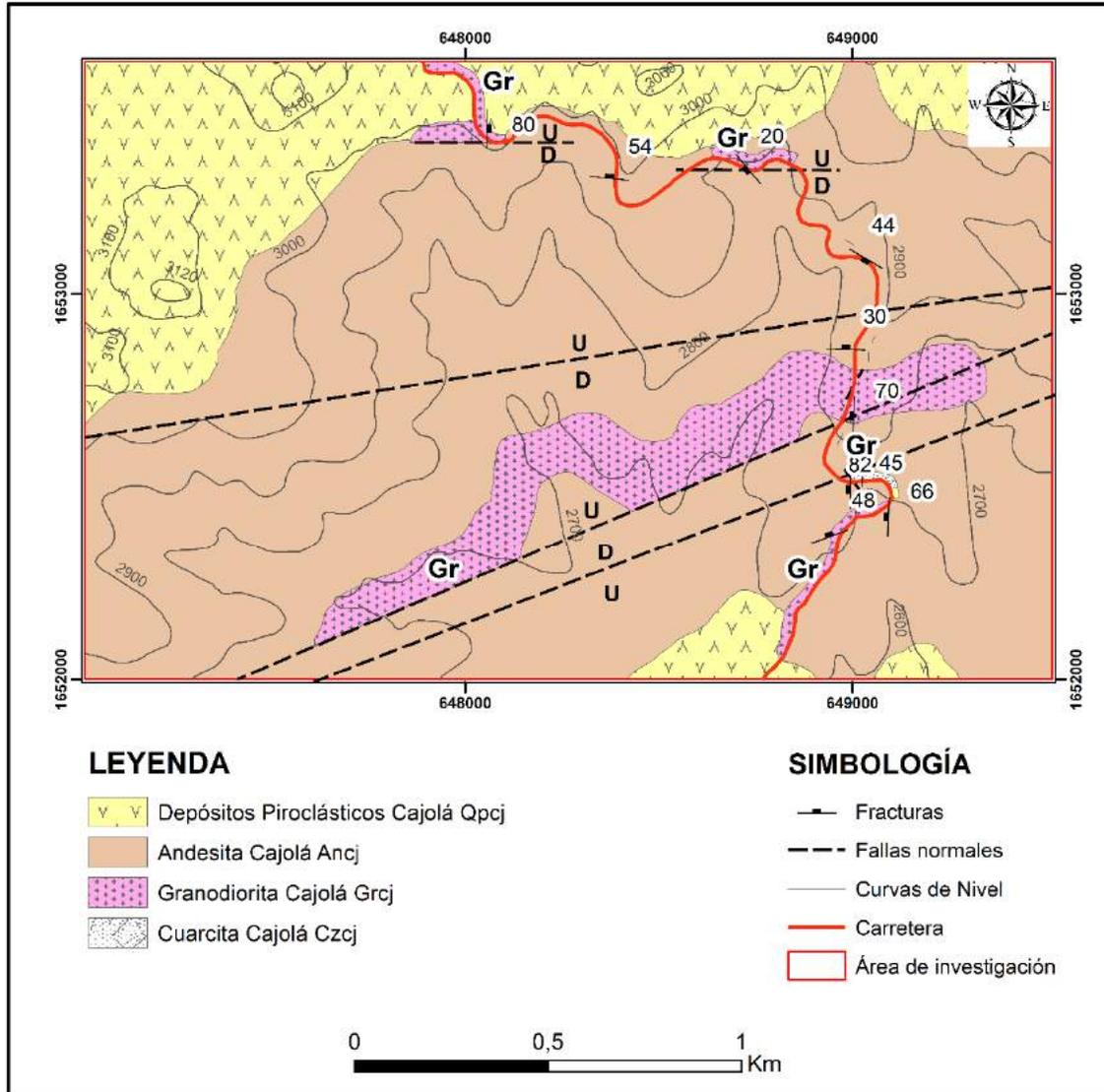
FUENTE: Trabajo de campo y de gabinete, octubre de 2015 y marzo de 2016.

**FIGURA 10**  
**MAPA GEOLÓGICO DEL POLÍGONO ZUNIL**



**FUENTE:** Trabajo de campo y de gabinete, octubre de 2015 y marzo de 2016.

**FIGURA 11**  
**MAPA GEOLÓGICO DEL POLÍGONO CAJOLÁ**



FUENTE: Trabajo de campo y de gabinete, octubre de 2015 y marzo de 2016.

Como complemento a las rocas objeto de estudio, se extrajo una muestra de los fragmentos de rocas plutónicas contenidas en las capas de tefra depositadas por la erupción del volcán Santa María en 1902.

Este volcán se encuentra a 8 km al este del área de Cantel y Zunil. El punto de muestreo se localiza a las orillas del río Cabello de Ángel, en el municipio de El Palmar, Quetzaltenango. Por este canal descienden los lahares y flujos piroclásticos del complejo de domos del volcán Santiaguito. Las coordenadas UTM del lugar, en datum WGS 84, zona 15 N son: 653683 este, 1625808 norte.

## FOTOGRAFÍA 12 FRAGMENTOS LÍTICOS PLUTÓNICOS



DESCRIPCIÓN: a) detalle de la capa de tefra y la variedad litológica de sus fragmentos; b) fragmento de roca plutónica.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, enero de 2016.

Esta muestra se tomó como representativa del basamento plutónico que subyace al volcán Santa María, ubicado en uno de los márgenes de la caldera de Quetzaltenango y dentro del bloque hundido de la misma; con el fin de comparar sus características petrográficas con las granodioritas de Cantel, Zunil y Cajolá.

### 3.2 PETROGRAFÍA

En este apartado se agrupan los diferentes cuerpos graníticos del área de investigación, según sus características petrográficas.

El cuerpo granítico al sureste del área de investigación aflora en los polígonos de Cantel y de Zunil, de los cuales se extrajeron seis muestras.

En lámina delgada analizada bajo el microscopio petrográfico, la mineralogía de las rocas de Cantel consiste de: plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, biotita/anfíbol, sericita, clorita, titanita, y zircón. Los cristales de estos minerales forman texturas subidiomórficas inequigranulares.

Las plagioclasas componen el 50 % modal del contenido mineral. Incoloras en PPL, su relieve es bajo. En XPL, muestran colores de interferencia entre el gris y blanco de primer orden. Son de tipo andesina, (Ab60An40), con maclas polisintéticas. Presentan zonaciones concéntricas y oscilantes. De hábito tabular, el desarrollo de sus cristales es subhedral a euhedral, forman numerosos fenocristales así como agregados policristalinos o glomérulos. Su tamaño va de 1 mm hasta 5 mm.

Es común observar cristales que han sido reemplazados a sericita y/o saussurita parcial o totalmente. El cuarzo representa el 25 % de la composición modal. Se presenta en PPL con un relieve bajo y prácticamente incoloro. En XPL, muestra colores de interferencia de primer orden, de gris a blanco. Se observa también cierta extinción ondulante. Aparece como cristales anhedral en forma de agregados policristalinos (glomérulos), englobando a otros minerales como feldespatos, anfíboles y minerales opacos, o bien, en los espacios intersticiales entre los demás minerales.

El feldespato potásico es de tipo ortoclasa, constituye un 15 % de la roca. En PPL se muestra incoloro y con bajo relieve. En XPL muestra colores grises de primer orden y algunas maclas simples, la forma de los cristales es anhedral a subhedral, además forma perfitas con las plagioclasas.

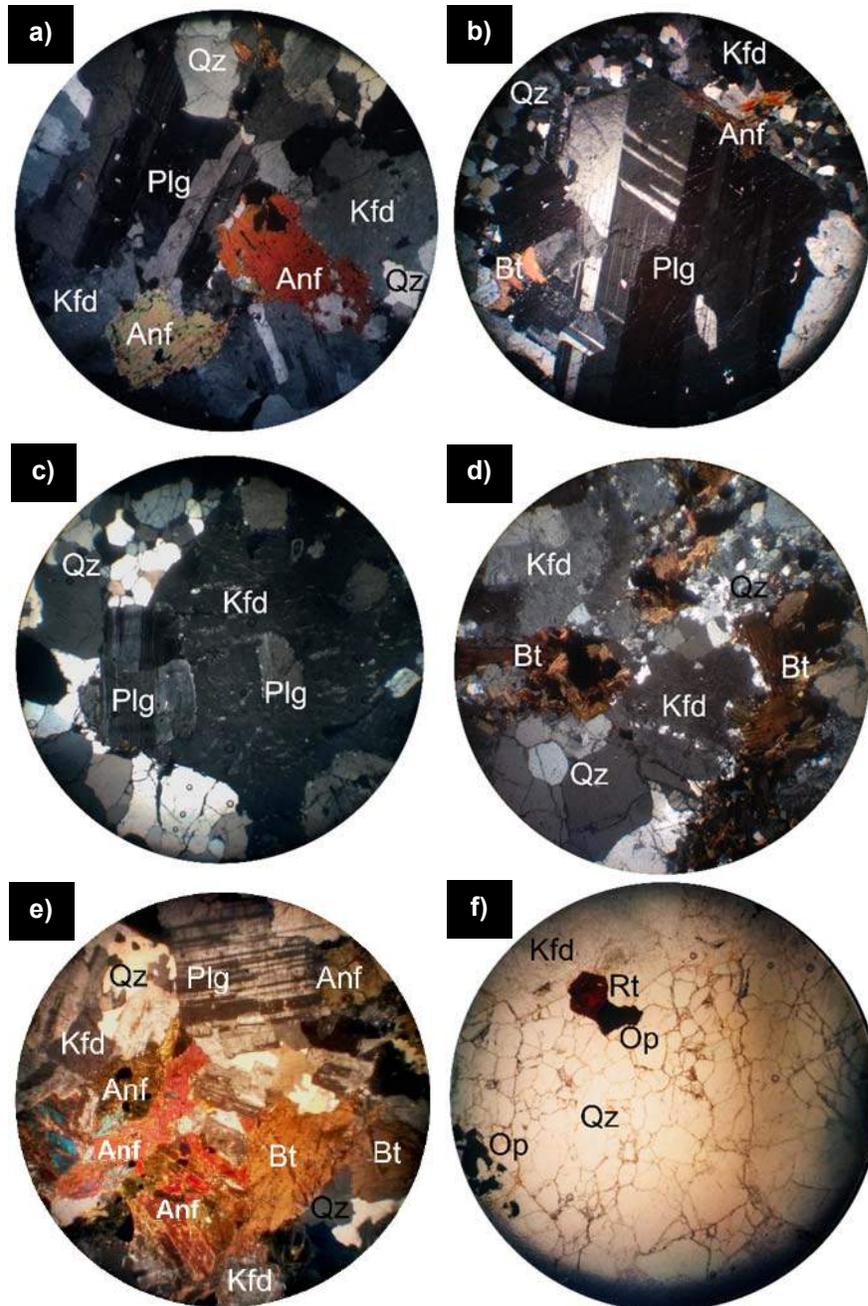
Las biotitas (5 %) y anfíboles (3 %) son los principales componentes del modal máfico. En PPL muestran un bajo a medio y medio a alto relieve, respectivamente, con colores predominantemente verdes a marrón y un pleocroísmo intenso. En XPL se aprecian algunas maclas simples en las hornblendas. Aparecen como cristales subhedrales agrupados, de entre 1 mm y 5 mm de largo, formando *clots* de biotita y/o anfíbol. También se presentan como pequeñas inclusiones en los cristales de plagioclasas o bien en glomérulos junto a microcristales de cuarzo en el espacio intersticial de otros cristales. Pueden presentarse alterados a clorita o saussiritizados en algunas muestras. La clorita (verdosa en PPL), junto a los opacos, completa el 2 % restante. Como minerales accesorios aparecen la titanita y el zircón.

En lámina delgada analizada bajo el microscopio petrográfico, la mineralogía de la muestra correspondiente al polígono de Zunil es bastante similar a las de Cantel, con algunas variaciones en los porcentajes de abundancia de los minerales. La textura también es subidiomórfica e inequigranular.

Las plagioclasas (50 %) son también de tipo andesina, Ab65An35 aproximadamente. Sus maclas son polisintéticas y también se observan zonaciones concéntricas y oscilantes. La mayoría de los cristales se muestran limpios, sin rastros de sericita, y también forman agregados policristalinos. El feldespato potásico es más abundante (25 %), de tipo ortoclasa. Sus cristales, anhedrales a subhedrales, no presentan maclas, sólo algunas inclusiones de cuarzo.

El cuarzo (20 %) se presenta con extinción ondulante, como cristales anhedrales, por lo general en agregados policristalinos, cristales que engloban a otros minerales o bien, en los espacios intersticiales. Las biotitas (3 %) son los principales componentes del modal máfico. Anfíboles y opacos completan el 2 % restante. La biotita y el anfíbol también forman *clots*.

**FOTOGRAFÍA 13**  
**FOTOMICROGRAFÍAS DE LAS ROCAS GRANÍTICAS**  
**DE CANTELY ZUNIL**



DESCRIPCIÓN: a) muestra EM-6655-16357-4, fenocristales de plagioclasa (Plg), cristales subhedrales de anfíbol, y cristales anhedrales de feldespato potásico de tipo ortosa (Kfd) y de cuarzo (Qz), textura subidiomórfica inequigranular; b) muestra EM-6661-16352-8, que muestra un agregado policristalino de fenocristales de plagioclasa (Plg); c) "piscina" de feldespato potásico anhedral que rodea a plagioclasas, muestra EM-6664-16348-5; d) cristales subhedrales de biotita (Bt) y óxidos opacos intersticiales entre los cristales de Kfd y Qz, muestra EM-6664-16333-10; e) clot de biotita (Bt) y anfíbol (Anf), muestra EM-6655-16357-4; f) cristal de rutilo (Rt) de color rojo y alto relieve, muestra EM-6664-16348-5, vista en PPL.  
**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher noviembre de 2015.

Las rocas graníticas del noroeste del área de investigación se exponen en el polígono Cajolá. Cuatro muestras fueron seleccionadas para el análisis petrográfico. En lámina delgada, se aprecian plagioclasas, feldespato potásico, cuarzo, biotita/anfíbol, clorita, sericita y opacos. La textura es fanerítica, subidiomorfa inequigranular (Fotografía 14).

Las plagioclasas (50 %) son de tipo andesina, con composición Ab55An45 aproximadamente. Los cristales, de entre 1 mm y 5 mm de largo, son subhedrales a euhedrales, con algunas maclas polisintéticas y una intensa alteración a sericita en casi todos sus cristales. Los fenocristales tienden a agruparse en glomérulos (agregados policristalinos). La sericitización hace que en PPL estos cristales se observen más grisáceos y manchados, aumentando así ligeramente su relieve.

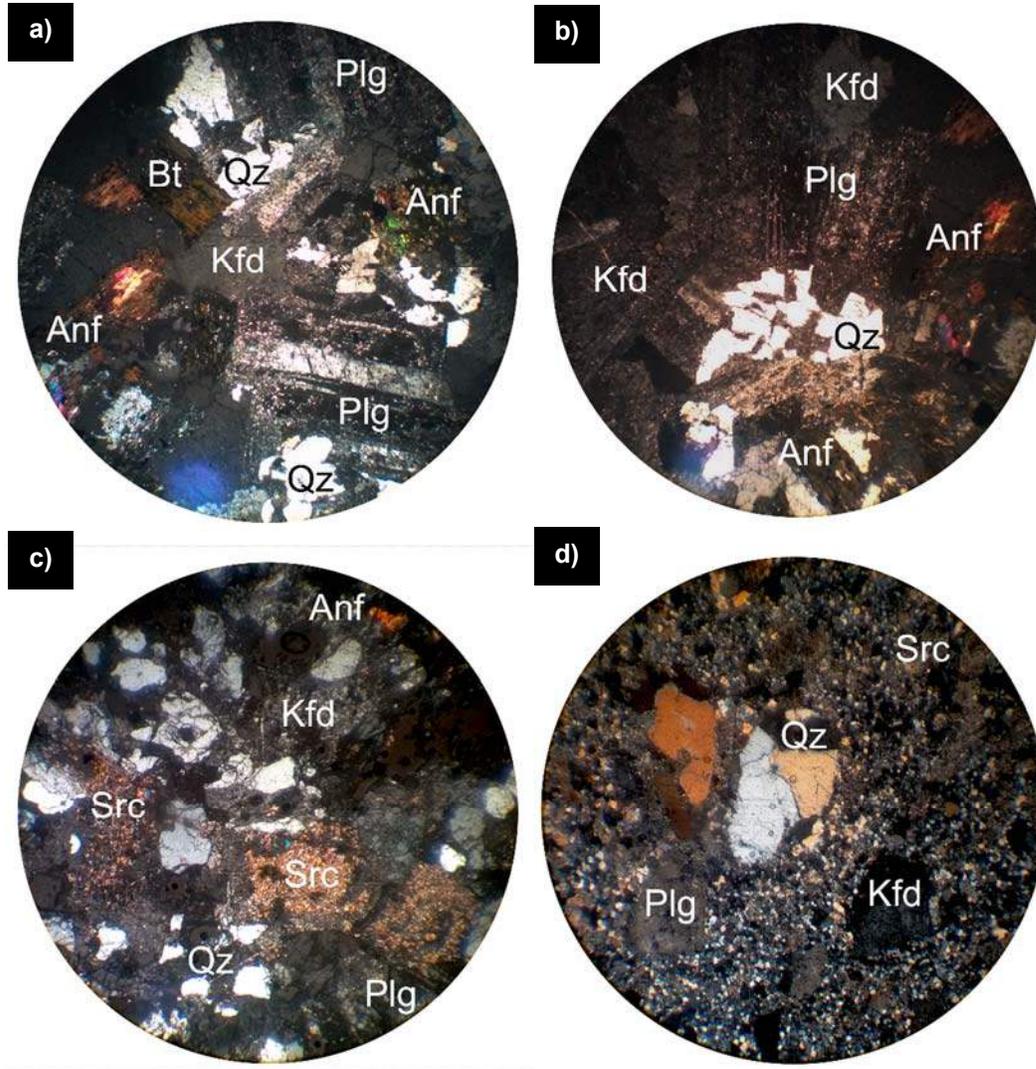
El feldespato potásico es ortoclasa (20 %), con cristales subhedrales a anhedrales, sin maclas y alterados a sericita en algunos casos. Suele incluir a cristales de plagioclasa. Su relieve se mantiene más bajo que el resto de cristales.

El cuarzo (20%) aparece en cristales anhedrales, de entre 1 mm y 2 mm de largo, poco desarrollados y aislados, no suelen formar glomérulos o grandes "piscinas". Suele aparecer junto a la ortosa, desarrollando texturas cuneiformes.

La biotita (5 %), y el anfíbol (3 %) aparecen en cristales subhedrales de entre 1 mm y 3 mm de largo, apenas si se observan clots, ya que tienden a aparecer como cristales individuales. En PPL su color va de verde claro a grisáceo, su pleocroísmo es más débil y no se presentan cloritizados en comparación con estos minerales en las rocas de Cantel y Zunil, su relieve es ligeramente menor también. Los óxidos opacos (2 %) completan el modal máfico de estas rocas.

Una de las muestras, la EM-6489-16526-13, muestra una textura afanítica, en donde predomina una mesostasa de pequeños cristales de cuarzo, con una longitud igual o menor a 1 mm. Se observan algunos cristales de plagioclasa y/o feldespatos potásicos completamente sericitizados así como agregados policristalinos de cuarzo. Esto sugiere que la roca granítica estuvo expuesta a alteración hidrotermal, cuarzo-sericítica, de manera similar a las andesitas del área, la cual destruyó la textura hipidiomórfica inequigranular original.

## FOTOGRAFÍA 14 FOTOMICROGRAFÍAS DE LA GRANODIORITA DE CAJOLÁ

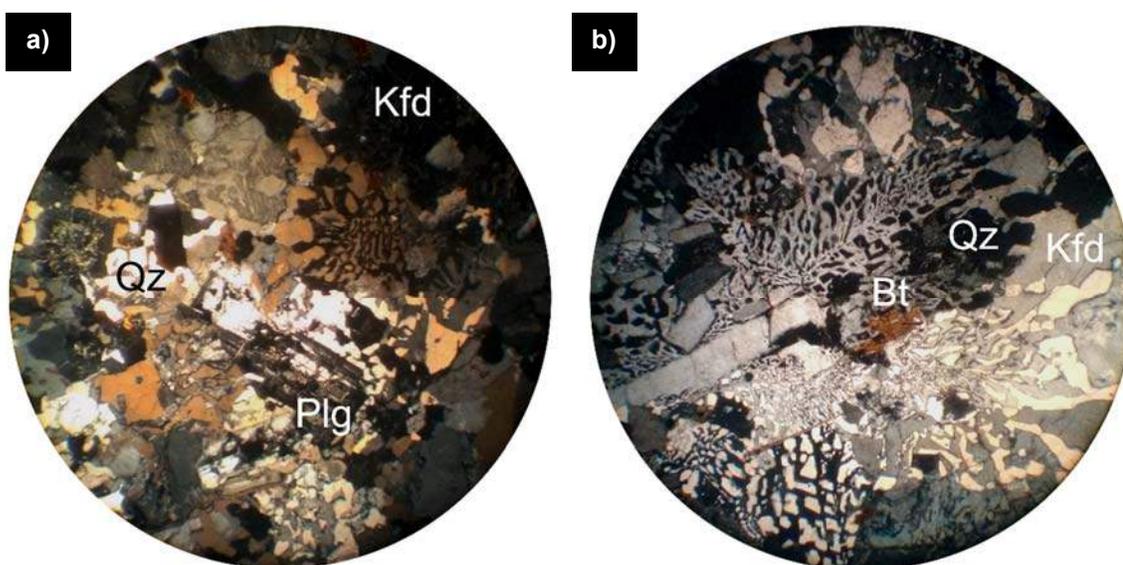


DESCRIPCIÓN: a) granodiorita de Cajolá, compuesta de fenocristales de plagioclasa y cristales subhedrales de biotita y anfíbol, rodeados por cristales anhedrales de feldespato potásico y cuarzo, muestra EM-6480-16533-1; b) muestra EM-6487-16532-2, que muestra los inter crecimientos cuneiformes entre el cuarzo y el feldespato potásico; c) otra vista de la muestra anterior, con la sericita (Src) que reemplaza a las plagioclasas, rodeado por abundantes cristales anhedrales de cuarzo y feldespato potásico; d) muestra EM-6489-16526-13, glomérulo de cuarzo, cristales anhedrales de feldespato potásico y plagioclasa totalmente reemplazada por sericita, contenidos en una mesostasa de grano fino compuesta de cuarzo, plagioclasa y óxidos opacos.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, noviembre de 2015.

La roca del dique también fue analizada en lámina delgada bajo el microscopio petrográfico. La composición es de aproximadamente 50 % cuarzo y 50 % de feldespato alcalino sin determinar, cuyos cristales presentan inter crecimientos angulares, formando una textura granofídica. La biotita y la plagioclasa aparecen como minerales accesorios (Fotografía 15).

### FOTOGRAFÍA 15 FOTOMICROGRAFÍAS DEL DIQUE GRANÓFIDO



DESCRIPCIÓN: a) vista de la muestra EM-6489-16525-3, con el cuarzo y el feldespato potásico anhedral y cristales subhedrales aislados de plagioclasa; b) otra vista de la muestra, mostrando la textura granofídica formada por el inter crecimiento de cuarzo y feldespato potásico, y un cristal aislado de biotita.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, noviembre de 2015.

También se realizó una lámina delgada de la cuarcita emplazada junto a la granodiorita. La vista al microscopio deja ver una matriz fina de cristales anhedrales de cuarzo de menos de 1 mm de largo (Fotografía 16).

## FOTOGRAFÍA 16 FOTOMICROGRAFÍA DE CUARCITA CAJOLÁ



**DESCRIPCIÓN:** Vista al microscopio de la cuarcita Cajolá, muestra EM-6490-16525-12.  
**TOMADA POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, noviembre de 2015.

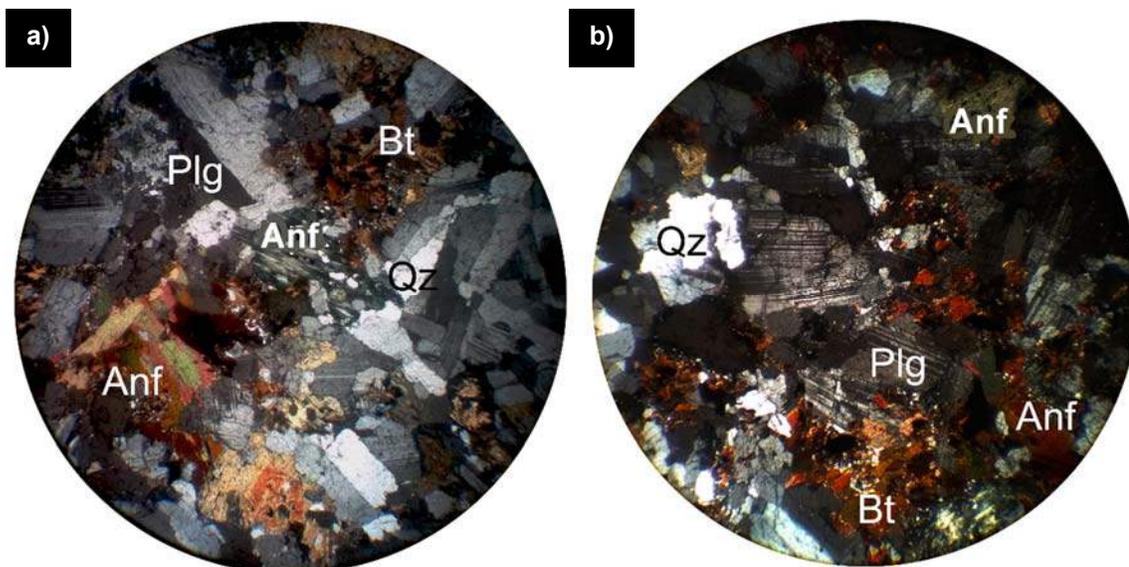
Con el fin de compararla con las rocas graníticas de Cantel, Zunil y Cajolá, se analizó petrográficamente la muestra EM-6583-16258-14, correspondiente al fragmento lítico plutónico del depósito de tefra de la erupción del volcán Santa María en el año 1902. En la lámina delgada se observan plagioclasas, biotita, anfíbol, cuarzo y opacos. Su textura es hipidiomórfica inequigranular.

La plagioclasa representa el 60 % de esta muestra, son de tipo andesina y composición Ab65An35 aproximadamente. Incolores y de bajo relieve en PPL. En XPL, muestran colores de interferencia entre el gris y blanco de primer orden. Muestra cristales subhedrales a euhedrales de entre 1 mm y 5 mm de largo, con maclado polisintético y de tipo albita en algunos casos.

No destacan fenocristales, pero sí hay cristales inter crecidos en agregados policristalinos.

La biotita (15 %) y los anfíboles (15 %) confieren un grado de color melanocrático a la roca. En PPL su color varía entre verde claro y marrón, el relieve es medio. Están levemente cloritizados. Sus cristales subhedrales a anhedrales aparecen tanto de forma individual como en forma de cristalitas que rellenan los espacios intersticiales entre las plagioclasas. El cuarzo, en pequeños cristales anhedrales y monocristalinos, aparece en espacios intersticiales y compone un 2 % de la muestra. El feldespato potásico, de tipo ortosa, representa el 1 % de la composición, la cual se completa con un 2 % de opacos.

### FOTOGRAFÍA 17 MICROFOTOGRAFÍAS DE DIORITA DEL SANTA MARÍA



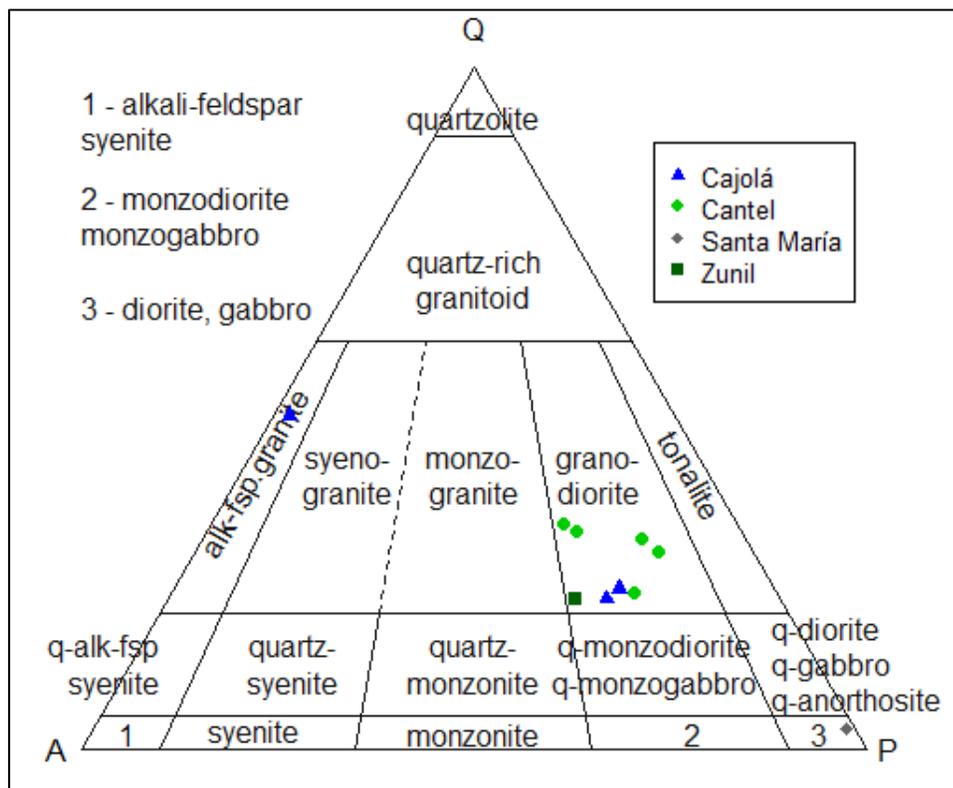
DESCRIPCIÓN: a,b) vistas microscópicas de la muestra EM-6583-16258-14, con cristales subhedrales a euhedrales de plagioclasa, abundante biotita y hornblenda como cristales individuales, que rellenan el espacio entre cristales, el cuarzo aparece anhedral e intersticial.

**TOMADAS POR:** Edgar Roberto Mérida Boogher, enero de 2016.

García (1990) reporta un sill de gabro de casi 90 m de espesor en el pozo Z-20 del campo geotérmico Zunil II. Lo describe microscópicamente como una roca holocristalina, densa y masiva, de textura poikilítica, compuesta por plagioclasas cálcicas como labradorita, hornblenda, biotita y augita.

Los valores modales de los contenidos de cuarzo (Q), feldespato alcalino (A) y plagioclasa (P), de las rocas graníticas de Cantel, Zunil, Cajolá, y el fragmento lítico plutónico de la tefra del Volcán Santa María fueron graficados en el diagrama ternario QAP de la IUGS (Unión Internacional de Ciencias Geológicas) para la clasificación de rocas ígneas faneríticas. Los resultados se muestran en la figura a continuación. Así, las rocas graníticas de Cantel, Zunil y Cajolá, pueden clasificarse modalmente como granodioritas, según su petrografía.

**FIGURA 12**  
**CLASIFICACIÓN MODAL DE LAS ROCAS GRANÍTICAS DE**  
**CANTEL, ZUNIL Y CAJOLÁ**



**FUENTE:** Trabajo de gabinete, marzo de 2016.

### 3.3 GEOQUÍMICA DE ÓXIDOS MAYORES Y ELEMENTOS TRAZA

Se analizaron las muestras EM-6661-16352-8 y EM-6667-16364-9, pertenecientes a las granodioritas de Cantel, la muestra EM-6664-16333-10 de la granodiorita de Zunil y la muestra EM-6489-16525-3, correspondiente al dique granofido de Cajolá. Se determinaron los valores de contenidos de elementos mayores, norma CIPW y elementos traza, los cuales se muestran en las tablas 3 y 4.

Los datos fueron procesados con el *software* GCD Toolkit 4, tanto para el modelado de diagramas de clasificación/discriminación, así como para recalcular los valores en base seca, necesarios en el cálculo de la norma mineral CIPW.

**TABLA 3**  
**COMPOSICIÓN DE ELEMENTOS MAYORES Y NORMA CIPW**

Muestra	EM-6661-16352-8	EM-6667-16364-9	EM-6664-16333-10	EM-6487-16532-2	EM-6489-16525-3
Método	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS
Unidades	%peso	%peso	%peso	%peso	%peso
SiO <sub>2</sub>	71,24	68,09	71,49	64,69	76,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,75	15,65	15,03	15,75	12,72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,77	3,83	2,52	5,83	1,22
MgO	0,89	1,12	0,65	2,78	0,15
CaO	2,33	2,99	2,28	3,92	0,43
Na <sub>2</sub> O	3,67	3,72	3,99	2,34	2,54
K <sub>2</sub> O	3,78	3,97	3,58	3,62	6,26
TiO <sub>2</sub>	0,38	0,42	0,29	0,78	0,16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,11	0,07	0,15	0,02
MnO	0,08	0,06	0,07	0,14	0,03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,04	0,03	0,00	0,03
Total	100	100	100	100	100
<b>NORMA CIPW</b>					
	EM-6661-16352-8	EM-6667-16364-9	EM-6664-16333-10	EM-6487-16532-2	EM-6489-16525-3
Q	29,37	23,5	28,93	25,11	36,62
C	0,6	0,06	0,61	1,21	1,03
Or	22,34	23,46	21,16	21,39	37
Ab	31,05	31,48	33,76	19,8	21,49
An	10,97	14,12	10,85	18,47	2
Hy	2,22	2,79	1,62	6,92	0,37
Il	0,17	0,13	0,15	0,29	0,06
Hm	2,77	3,83	2,52	5,83	1,22
Ru	0,29	0,35	0,21	0,62	0,13
Ap	0,21	0,26	0,17	0,36	0,05
Total	99,99	99,98	99,98	100	99,97

**FUENTE:** Trabajo de gabinete, enero de 2016.

**TABLA 4**  
**COMPOSICIÓN DE ELEMENTOS TRAZA**

Muestra	EM-6661-16352-8	EM-6667-16364-9	EM-6664-16333-10	EM-6489-16525-3
Método	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS
Unidades	ppm	Ppm	ppm	ppm
Ni	<20	<20	<20	<20
Ba	728	789	662	553
Be	<1	1	2	<1
Co	3.3	9.7	2.8	1.5
Cs	5	7	6.4	6.1
Ga	15.6	16.8	14.9	11.8
Hf	3.7	4.4	3.8	3.9
Nb	8.4	6	7.2	8.6
Rb	138.4	140	144.1	208.7
Sn	2	4	3	<1
Sr	252	301.6	241	133.5
Ta	0.7	0.7	0.8	1.1
Th	13.2	11.9	11.7	28.6
U	4	2.8	3.2	10.1
V	41	56	29	10
W	0.6	1.7	0.7	1.5
Zr	127.8	145.5	132.6	101.5
Sc	5	7	4	2
Y	16.6	16.9	14.8	12.8
La	25.6	23.2	29.2	15.4
Ce	47.7	47	53.5	30.6
Pr	5.27	5.18	5.42	3.43
Nd	19.6	20	18.9	12.7
Sm	3.41	3.74	3.35	2.49
Eu	0.64	0.8	0.56	0.52
Gd	3.08	3.54	2.77	2.10
Tb	0.48	0.54	0.43	0.35
Dy	2.79	2.94	2.56	1.97
Ho	0.56	0.6	0.54	0.46
Er	1.81	1.79	1.51	1.36
Tm	0.26	0.27	0.24	0.21
Yb	1.85	1.8	1.81	1.44
Lu	0.29	0.28	0.28	0.23

**FUENTE:** Trabajo de gabinete, enero de 2016.

Según la norma CIPW, se tienen pequeñas cantidades de corindón y apatito normativo, los cuales no se aprecian en la petrografía. Además, por estar construida en una base anhidra, la norma no considera a las biotitas y anfíboles presentes en estas rocas.

Las rocas contienen SiO<sub>2</sub> en un corto intervalo de 64,69 % a 71,49 % en peso, y que para el dique granófico alcanza el 76,43%. El contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es alto, 12,72 % a 15,75 % en peso, y los óxidos de los elementos calcoalcalinos (Ca, Na, K), tienen valores muy similares entre sí, de entre 2 % y 4% en peso. Los óxidos de Fe, Mg, Mn y Ti están dentro de los valores usuales para el tipo de roca (granodiorita). El dique granófico se distingue por su pobre contenido de Ca, Mg, Fe, Ti y P.

En los diagramas tipo Harker (Figura 12), se puede apreciar el comportamiento de los óxidos mayores respecto del contenido de SiO<sub>2</sub> para las cuatro muestras de este estudio, y catorce muestras de los trabajos de Singer *et. al.*, 2013, Rose (1987) y García (1990).<sup>63 64 65</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, FeO, MgO, MnO, TiO<sub>2</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se empobrecen con el incremento de SiO<sub>2</sub>, por la cristalización de plagioclasas, ortosa, biotita, anfíbol y otros minerales máficos y opacos. Únicamente el K<sub>2</sub>O se enriquece y Na<sub>2</sub>O se comporta aleatoriamente.

En la figura 12, las granodioritas de Cantel se presentan en verde, las granodioritas de Zunil en verde, las granodioritas de Cajolá en azul y las muestras de Singer en negro, las de Rose en rosado y las de García en amarillo.

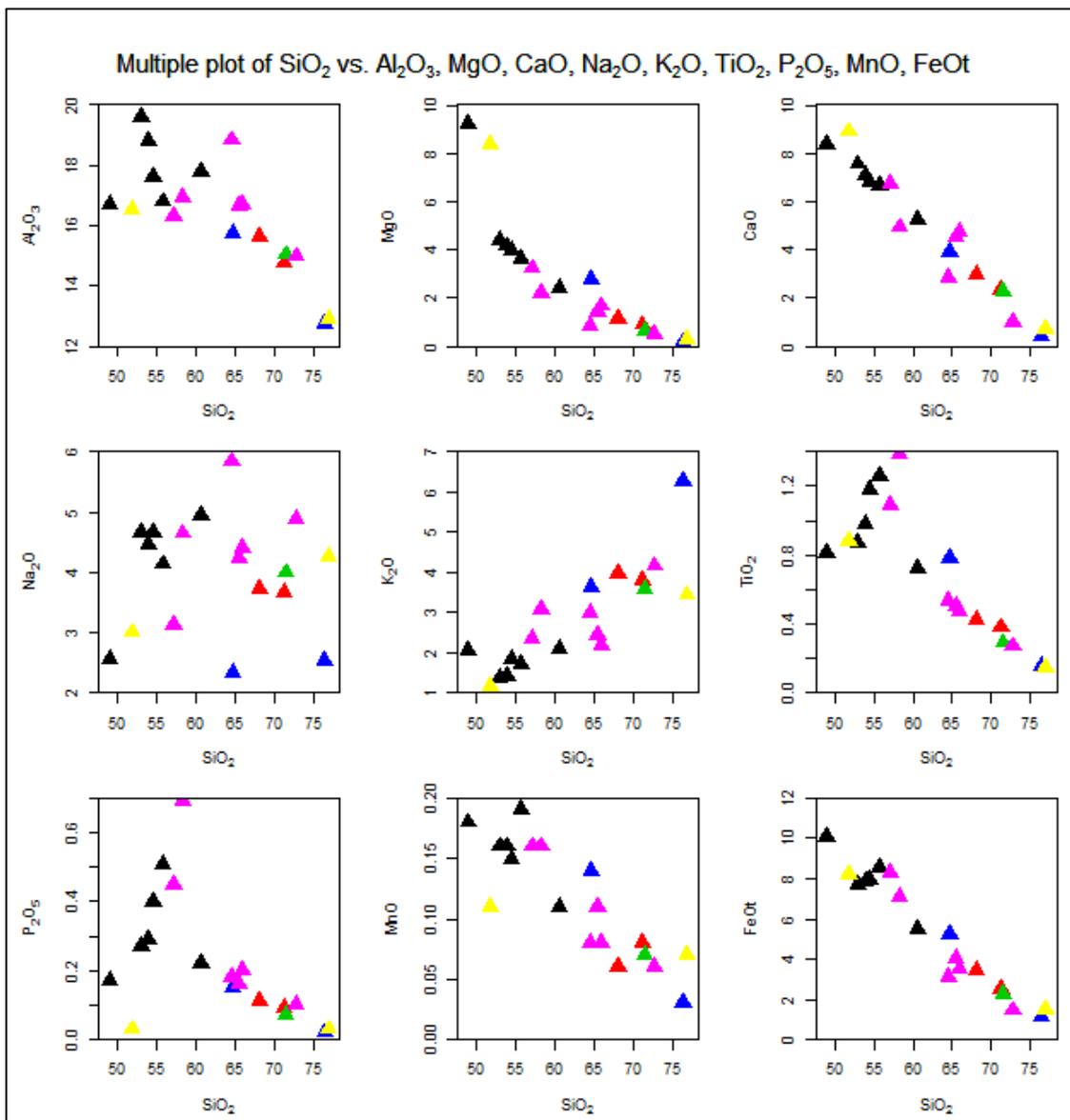
---

<sup>63</sup> Brad Singer *Et. Al.*, "Lying in wait: deep and shallow evolution of dacit beneath Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society, London, Special Publications*. 385 (junio 2013): 209-234.

<sup>64</sup> Rose, 111.

<sup>65</sup> García, 48.

**FIGURA 13**  
**DIAGRAMA TIPO HARKER DE ÓXIDOS MAYORES vs. SiO<sub>2</sub>**

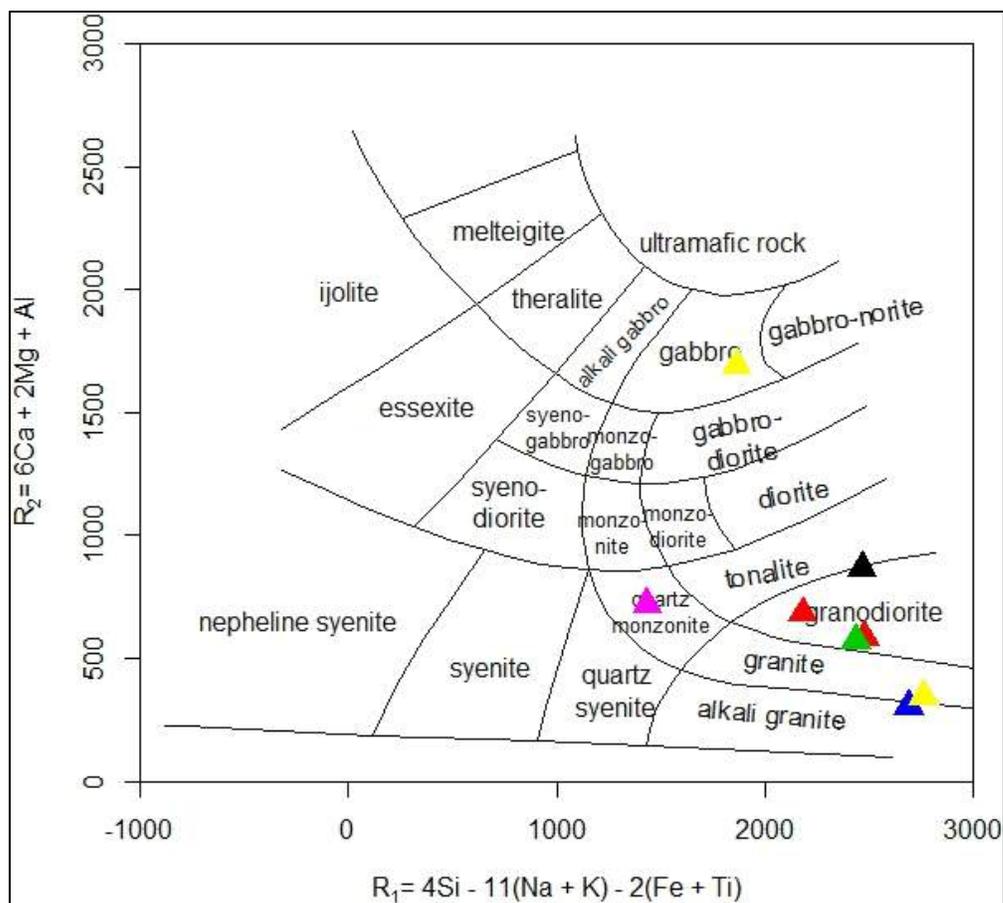


DESCRIPCIÓN: Diagrama multi elementos mostrando el comportamiento de los óxidos mayores vs SiO<sub>2</sub> en las muestras de granodiorita de Cantel (verde), Zunil (rojo), Cajolá (azul) y las muestras de Singer (negro), Rose (rosado) y García (amarillo).

FUENTE: Trabajo de gabinete, marzo de 2016.

De La Roche propone un diagrama de clasificación geoquímico y utiliza los valores de 8 óxidos mayores (Si, Na, K, Fe, Ti, Ca, Mg y Al).<sup>66</sup> Las muestras de roca de Cajolá (en negro), Cantel (en rojo) y Zunil (en verde) corresponden al campo de la granodiorita, y el granófico de Cajolá (ej azul), a un granito alcalino. La muestra de Rose (en rosa) es cuarzo monzonita y las muestras de García (en amarillo) son de granito y de gabro (Figura 14).

**FIGURA 14**  
**DIAGRAMA R1-R2 (DE LA ROCHE ET. AL. 1980)**



**FUENTE:** Trabajo de gabinete, enero de 2016.

<sup>66</sup> H. De la Roche Et. Al., "A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major element analysis – in relationship with current nomenclature". *Chemical Geology*, 29 (enero 1980): 183-210.

Otra característica geoquímica de las rocas graníticas es el índice de saturación en alúmina, el cual permite dividir entre rocas metaluminosas, peraluminosas y peralcalinas. Al utilizar el diagrama B-A de Debon y La Forte (1983),<sup>67</sup> modificado por Villaseca *et. al.* (1998),<sup>68</sup> las muestras de Cajolá (en negro), Cantel (en rojo) y Zunil (en verde) caen en los campos de metaluminoso a ligeramente y medianamente peraluminoso (Figura 15). Esto es concordante con el escaso corindón normativo y con la abundancia de plagioclasas y feldespatos potásicos, además de la presencia de biotita y anfíboles en las láminas delgadas, mientras que el dique granofido de Cajolá (en azul) y el granito de García (en amarillo) corresponden al campo peraluminoso félsico, el cual es propio de los miembros más ácidos de las series magmáticas.<sup>69</sup>

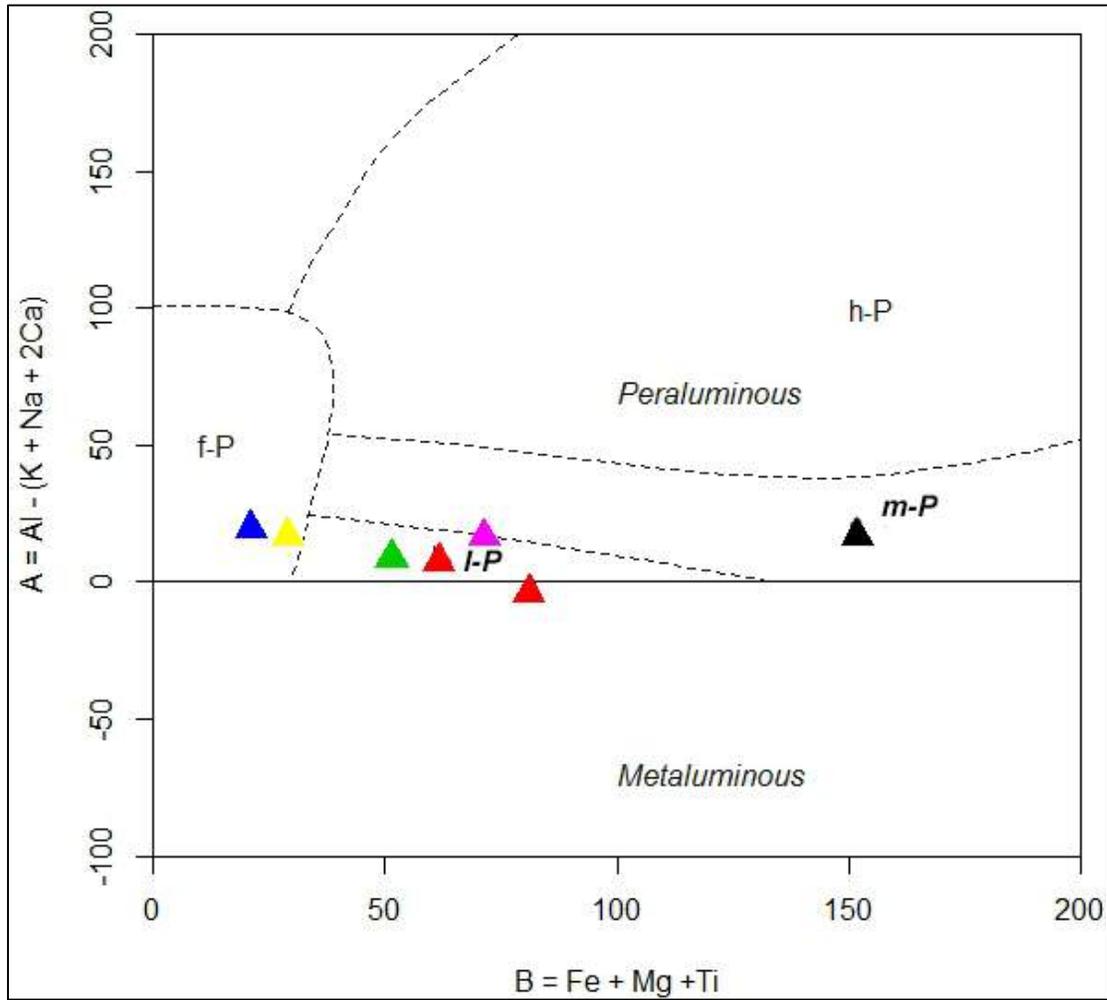
---

<sup>67</sup> F. Debon y P. Le Fort. "A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. 73 (enero 1983): 135-149.

<sup>68</sup> Carlos Villaseca *Et. Al.*, "A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. 89 (junio 1998): 113-119.

<sup>69</sup> *Ibíd.*

**FIGURA 15**  
**DIAGRAMA B-A (MODIFICADO POR VILLASECA ET. AL. 1998)**



**FUENTE:** Trabajo de gabinete, marzo de 2016.

De acuerdo con la clasificación de Frost, los granitoides pueden caracterizarse de acuerdo a tres relaciones de sus óxidos de elementos mayores, son éstos el número Fe o  $Fe^*=(FeO/(FeO+MgO))$ , Índice Alcalino Modificado  $MAL=(Na_2O+K_2O-CaO)$  y el Índice de Saturación en alúmina  $ASI=(Al/(Ca-1,67P+Na+K))$ .<sup>70</sup>

Las muestras de granodiorita de Cajolá, Cantel y Zunil son de afinidad magnésiana, con caracteres de una serie magmática calcialcalina y de metaluminosas a ligeramente peraluminosas, con un ASI menor a 1,1, propio de un granito Tipo I.<sup>71</sup>

Estas rocas coinciden en características con la clasificación de granitos cordilleranos propuesta por Frost, ejemplificada con los batolitos de la costa oeste de Estados Unidos de Norteamérica; el dique granófico es de afinidad ferroana, de serie magmática alcalinocálcica y de Tipo I cordillerano con ASI entre 0,7 y 1,1 (Figura 16).<sup>72</sup>

La muestra de cuarzomonzonita del pozo 2CQ6-1 del campo geotérmico Zunil I (Rose, 1987) y el granito y el gabro del pozo Z20 del campo geotérmico Zunil II (García, 1990) tienen valores ASI de 0,7 a 1,1, lo que también los hace granitos Tipo I cordilleranos.

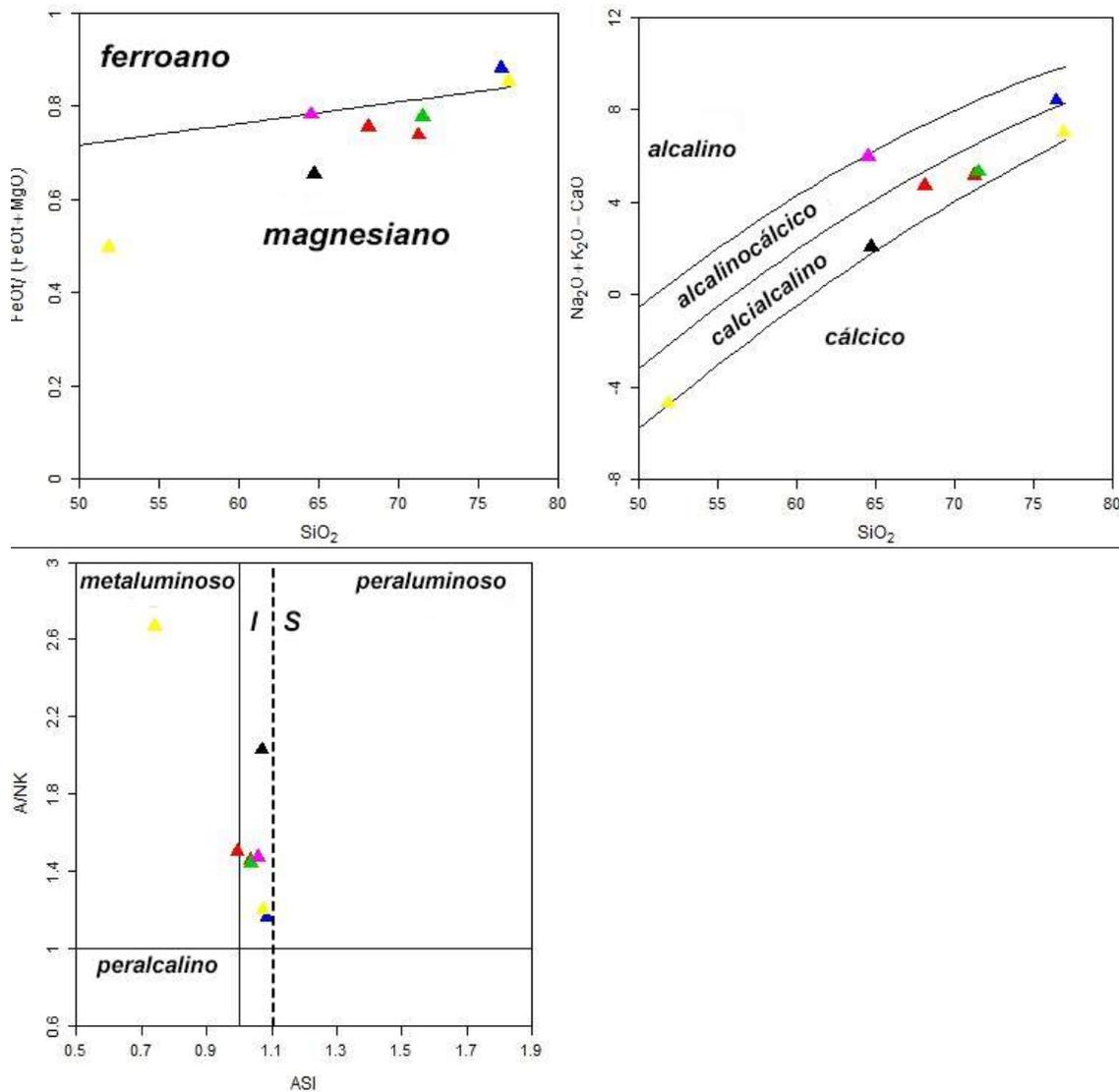
---

<sup>70</sup> Ronald Frost Et. Al., "A geochemical classification for granitic rocks". Journal of Petrology. 42 (abril 2001): 2033-2048.

<sup>71</sup> Bruce Chappell y Allan White. "Two contrasting granite types". Pacific Geology. 8 (1974): 173-174.

<sup>72</sup> Frost Et. Al., 2039.

**FIGURA 16**  
**CLASIFICACIÓN DE GRANITOIDES (FROST ET. AL. 2001)**

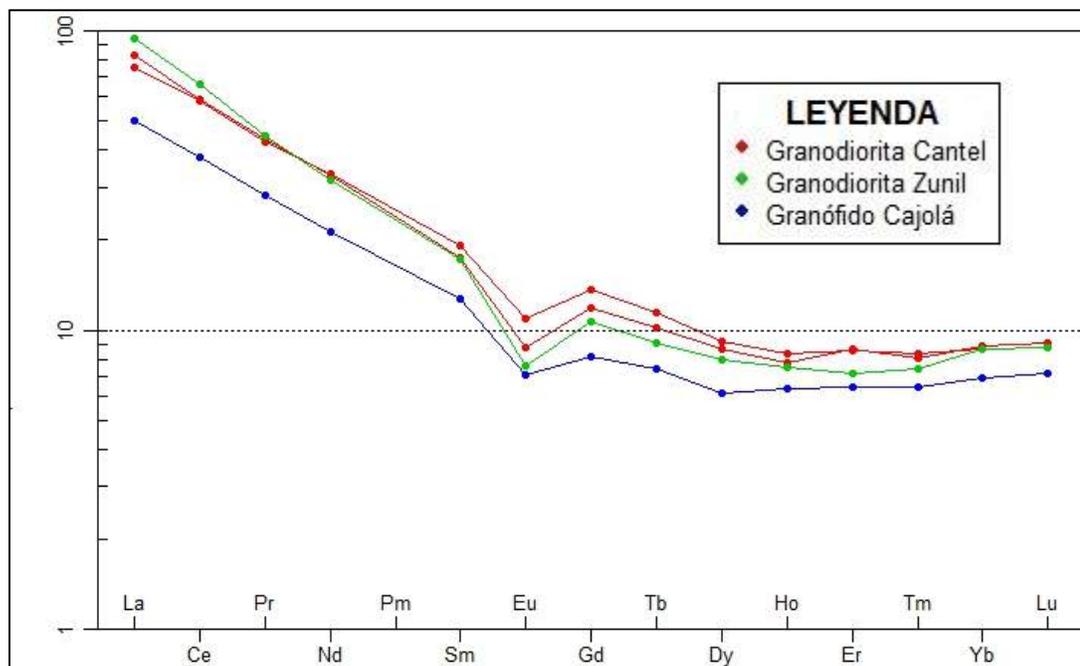


**FUENTE:** Trabajo de Gabinete, marzo de 2016.

El comportamiento de los elementos traza, en este caso las tierras raras, se identifica en los diagramas normalizados a condrito. Esto debido a que se asume que las concentraciones de elementos en el condrito son similares a las de la Tierra primigenia.

En este diagrama se puede distinguir un enriquecimiento de las tierras raras ligeras (La-Sm) respecto de las tierras raras pesadas (Eu-Lu). El Eu muestra una anomalía negativa significativa, lo que sugiere que las plagioclasas fueron removidas del fundido durante su cristalización, o bien una fusión parcial en donde la plagioclasa queda como residuo.<sup>73</sup> La pendiente negativa hacia las tierras raras pesadas es relativamente plana.

**FIGURA 17**  
**DIAGRAMA DE REE NORMALIZADO A CONDRITO**  
**(BOYNTON, 1984)**



**FUENTE:** Trabajo de gabinete, marzo de 2016.

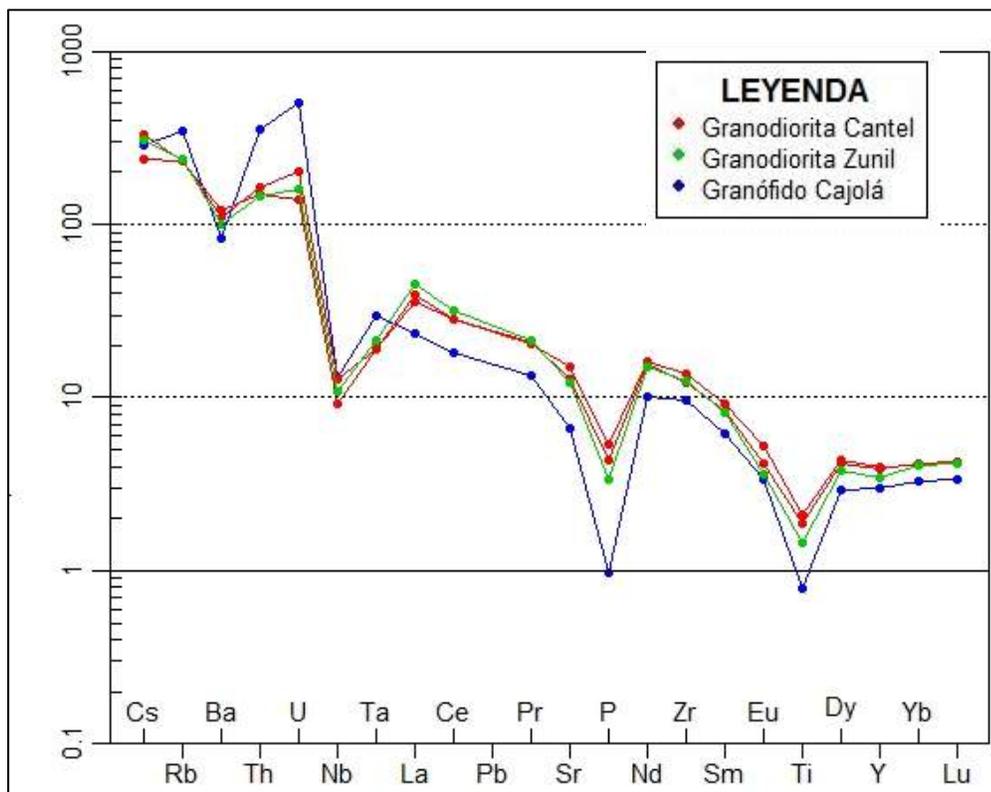
<sup>73</sup> Alejandro Toselli. *Capítulo 9. Petrología química II: elementos trazas e isótopos..*  
[http://www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_18/09.htm](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/09.htm) (15 de abril de 2015).

Las concentraciones de elementos trazas compatibles e incompatibles de las muestras están normalizadas con respecto a los valores de manto primitivo y de la corteza continental, según McDonough y Sun (1995) y de Taylor y McLennan (1995), respectivamente.

Se normalizan a estos valores ya que se asumen estas dos fuentes como reservorios donde pudo originarse el magma que formó las rocas de esta investigación. A partir de estos diagramas es posible observar el comportamiento de los elementos traza y distinguir patrones.

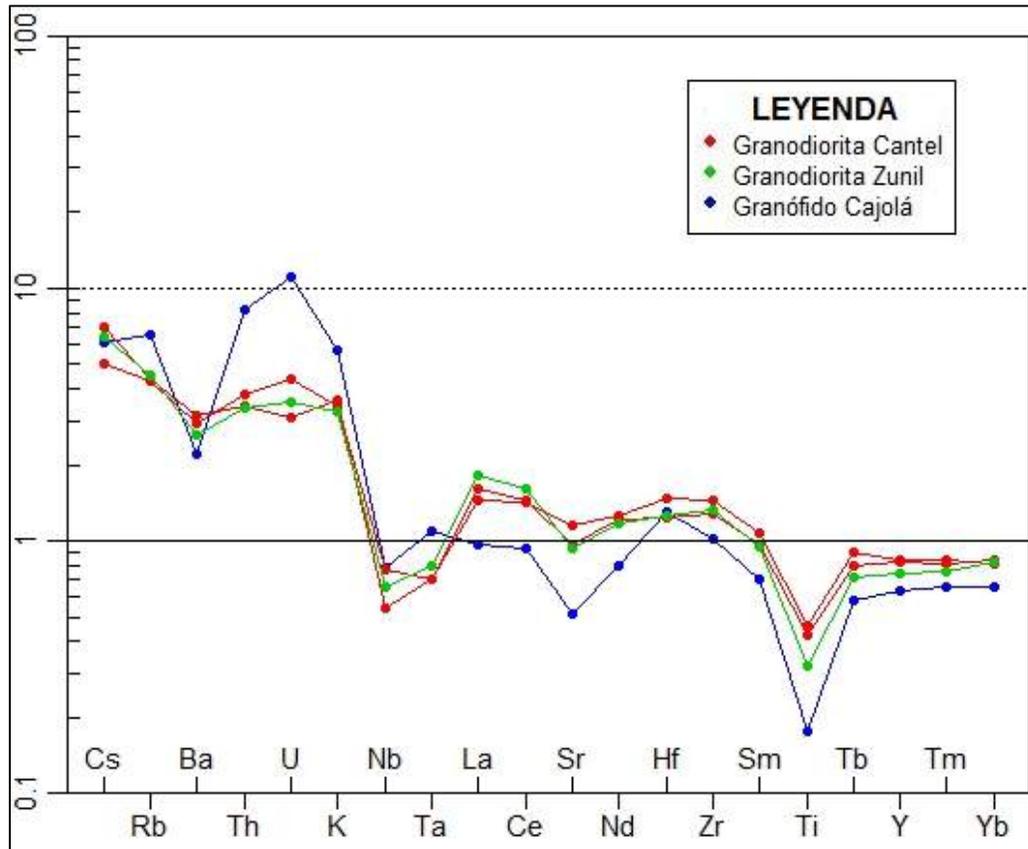
Elementos como Nb, Ta y Ni evidencian una anomalía negativa, más marcada en el diagrama normalizado al manto primitivo. Las rocas graníticas de Cantel y Zunil muestran anomalías negativas de Ba y P. La muestra del granófono de Cajolá, en azul, se distingue por mostrarse enriquecido en Rb, Th, U y Ta.

**FIGURA 18**  
**DIAGRAMA DE ELEMENTOS TRAZA NORMALIZADOS AL**  
**MANTO PRIMITIVO (MCDONOUGH Y SUN, 1995)**



**FUENTE:** Trabajo de Gabinete, marzo de 2016.

**FIGURA 19**  
**DIAGRAMA DE ELEMENTOS TRAZA NORMALIZADOS A LA**  
**CORTEZA CONTINENTAL (TAYLOR Y MCLENNAN, 1995)**



**FUENTE:** Trabajo de Gabinete, marzo de 2016.

Las concentraciones de elementos mayores y elementos traza fueron utilizados para la discriminación geotectónica de las rocas graníticas y la determinación de sus ambientes, a través del diagrama multicatiónico R1 – R2 de Batchelor y Bowden (1985) y de los diagramas de elementos traza para discriminación geotectónica de Pearce *et. al.*, (1984).

Según el primer diagrama, las muestras se ubican desde el campo de colisión pre-placa hasta el post-orogénico. El gabro de García (en amarillo) y la granodiorita de Cajolá (en negro) se hallan en el primer campo. Las granodioritas de Cantel y Zunil (en rojo y verde) se encuentran en el campo sin-colisional y la cuarzomonzonita de Rose (en rosa) es de orogenia tardía. El granófido de Cajolá (en azul) y el granito de García (en amarillo) son de ambiente post-orogénico. Estos reflejan los diversos estadios del emplazamiento del magma.<sup>74</sup>

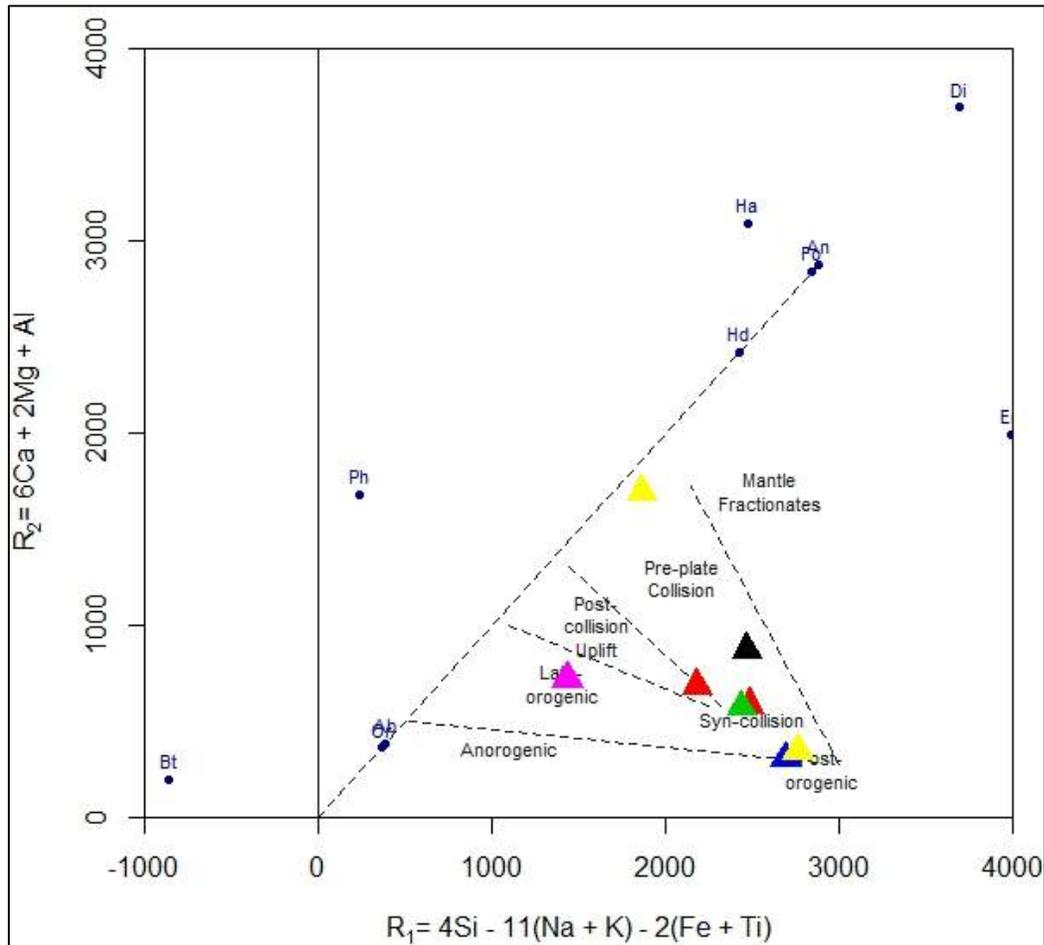
En el segundo diagrama, las muestras son principalmente granitos de arco volcánico (VAG), con cierta tendencia hacia el campo de los granitos sin-colisionales (syn-COLG), coincidentes con una zona de subducción.<sup>75</sup>

---

<sup>74</sup> R. Batchelor y P. Bowden. "Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters". *Chemical Geology*. 48 (marzo 1985): 43-55.

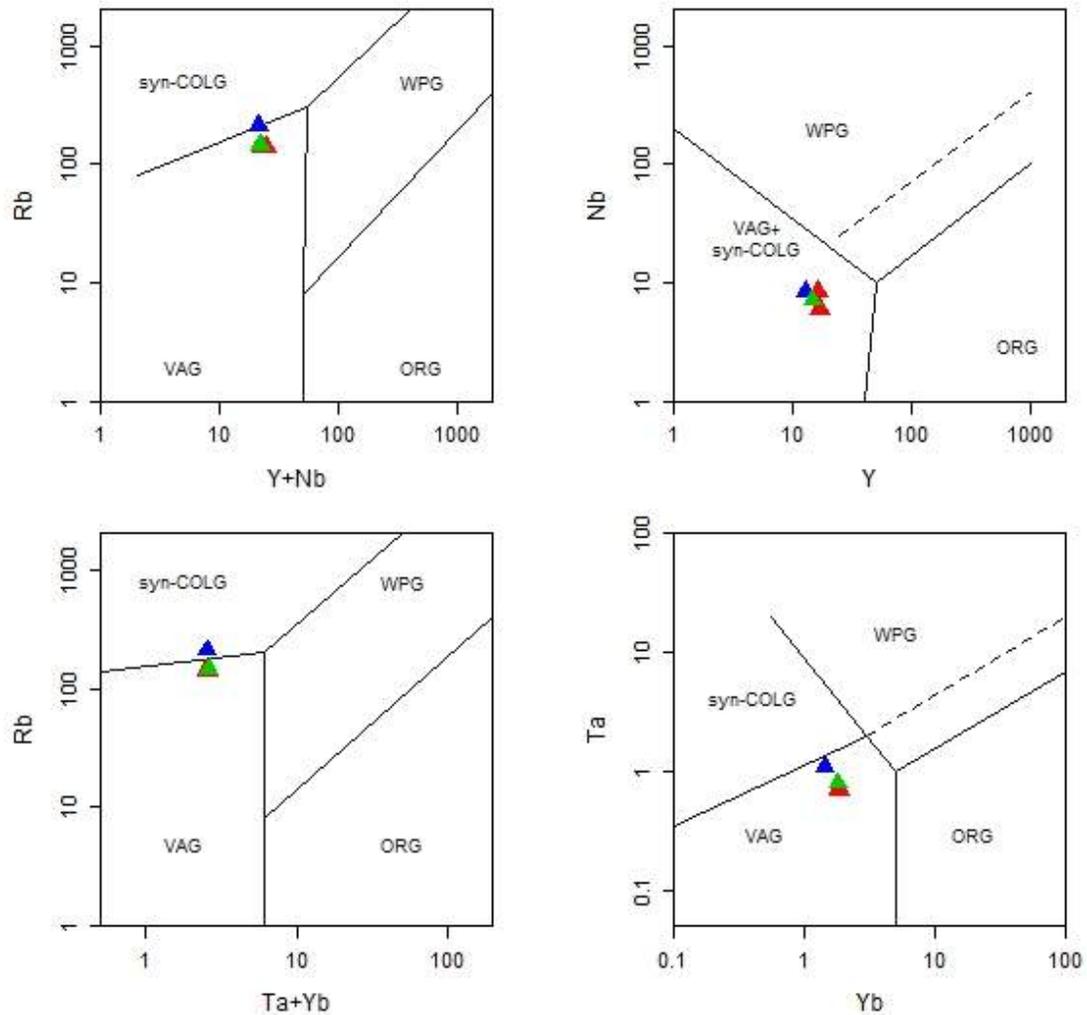
<sup>75</sup> Julian Pearce Et. Al., Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks". *Journal of Petrology*. 25 (noviembre 1984): 956-983.

**FIGURA 20**  
**DIAGRAMA R1 – R2 PARA DISCRIMINACIÓN GEOTECTÓNICA**  
**(BATCHELOR Y BOWDEN, 1985)**



**FUENTE:** Trabajo de Gabinete, marzo de 2016.

**FIGURA 21**  
**DIAGRAMAS PARA DISCRIMINACIÓN GEOTECTÓNICA**  
**(PEARCE ET. AL. 1984)**



DESCRIPCIÓN: Diagrama para determinar los ambientes tectónicos en donde se formaron las muestras de granodiorita de Cantel (verde), Zunil (rojo) y el granófono de Cajolá (azul).

FUENTE: Trabajo de Gabinete, marzo de 2016.

Jung y Pfänder proponen un modelo experimental para el cálculo de las temperaturas de los fundidos magmáticos y sus posibles protolitos. Utiliza las relaciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  y  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  de las muestras para construir un geotermómetro, el cual, a pesar de que tiene cierto grado de incertidumbre, proporciona una aproximación válida.<sup>76</sup>

La relación  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  permiten distinguir entre fundidos derivados de pelitas ( $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0,5$ ) y fundidos derivados de grauvacas o fuentes ígneas ( $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  de 0,3 a 1,5) según Jung y Pfänder. Considerando los valores de dicha relación en las muestras seleccionadas, se optó por un modelo en donde el magma es derivado de la fusión de rocas meta-ígneas (Figura 22).<sup>77</sup>

Las temperaturas se calculan a través de tres ecuaciones diferentes, denominadas Ley de poder, Ley exponencial y Regresión lineal (Jung y Pfänder, 2007). Sus respectivas expresiones son  $T(^{\circ}\text{C})=[A/(\text{Al}^2\text{O}^3/\text{TiO}^2)]^{1/B}$ ;  $T(^{\circ}\text{C})=[\ln(A) - \ln(\text{Al}^2\text{O}^3/\text{TiO}^2)]/B$  y  $T(^{\circ}\text{C})=A/[(\text{Al}^2\text{O}^3/\text{TiO}^2)+B]$ , en donde A y B son valores indicados en dicho trabajo.<sup>78</sup>

Los valores obtenidos para las muestras en la figura 22 están en el rango de los 765°C a 992°C según las tres ecuaciones, que, al obtener sus valores promedio, quedan en 773°C y 972°C para el granito y el gabro de García (en amarillo). Estas no son temperaturas de cristalización de la roca, sino una aproximación a la temperatura del fundido que las originó. Mientras las granodioritas de Cantel (en rojo) y Zunil (en verde) se encuentran en el rango de los 844°C a 887°C.

---

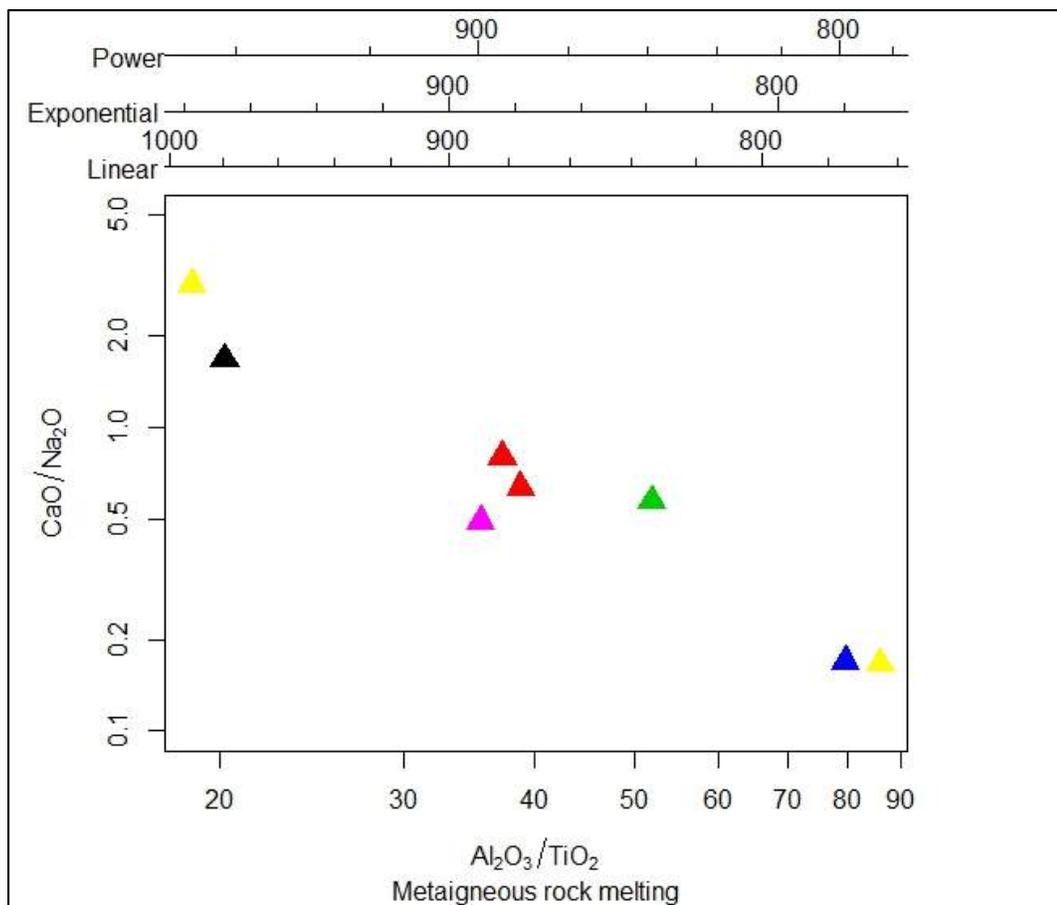
<sup>76</sup> Stefan Jung y Albert Pfänder. "Source composition and melting temperatures of orogenic granitoides: constraints from  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  and accessory mineral saturation thermometry". *European Journal of Mineralogy*. 19 (diciembre 2007): 859-870.

<sup>77</sup> *Ibidem*, 860.

<sup>78</sup> *Ibidem*, 865.

La granodiorita de Cajolá (en negro) tiene un valor de 963°C, un valor anómalo por la modificación en el contenido de aluminio debido a la intensa sericitización que presenta esa roca. El granófido de Cajolá (en azul) y la muestra de Rose (en rosa) completan las muestras en el diagrama.

**FIGURA 22**  
**MODELO DE TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LOS MAGMAS**  
**(JUNG Y PFÄNDER, 2007)**



**FUENTE:** Trabajo de gabinete, marzo de 2016.

### 3.4 GEOCROLOGÍA

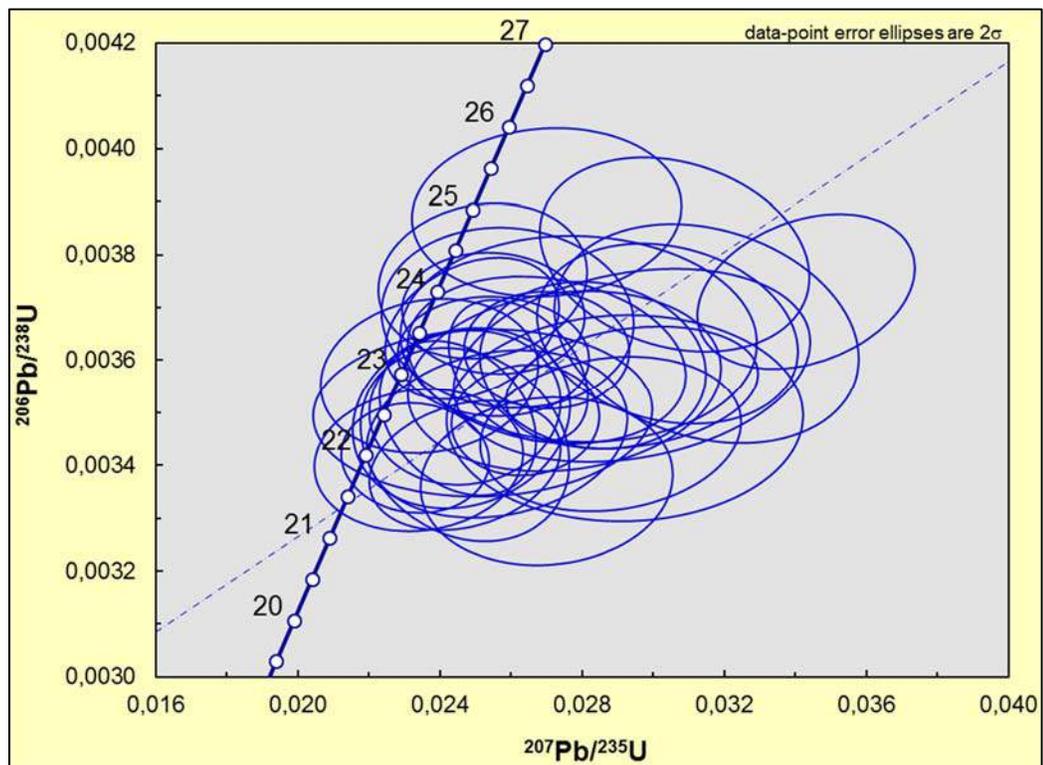
Se analizaron dos muestras de granodiorita (EM-6664-16333-10 y EM-6487-16532-2), provenientes del río Pachamiyá, en Zunil, y de la carretera al norte de Cajolá respectivamente.

En estas rocas se analizaron un total de 65 cristales de zircón, de los cuales 61 fueron utilizados para establecer una edad en base a un promedio ponderado (Figuras 23 a 26) a partir de los ratios y edades corregidas de cada cristal. Se descartaron los datos de cuatro zircones debido a valores anómalos en la relación  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  (serie del actinio).

El rango de edad establecido a partir de las 32 relaciones isotópicas de la muestra de Zunil es de  $22,87 \pm 0,26$  Ma, la cual corresponde al piso Aquitaniense de la época del Mioceno.

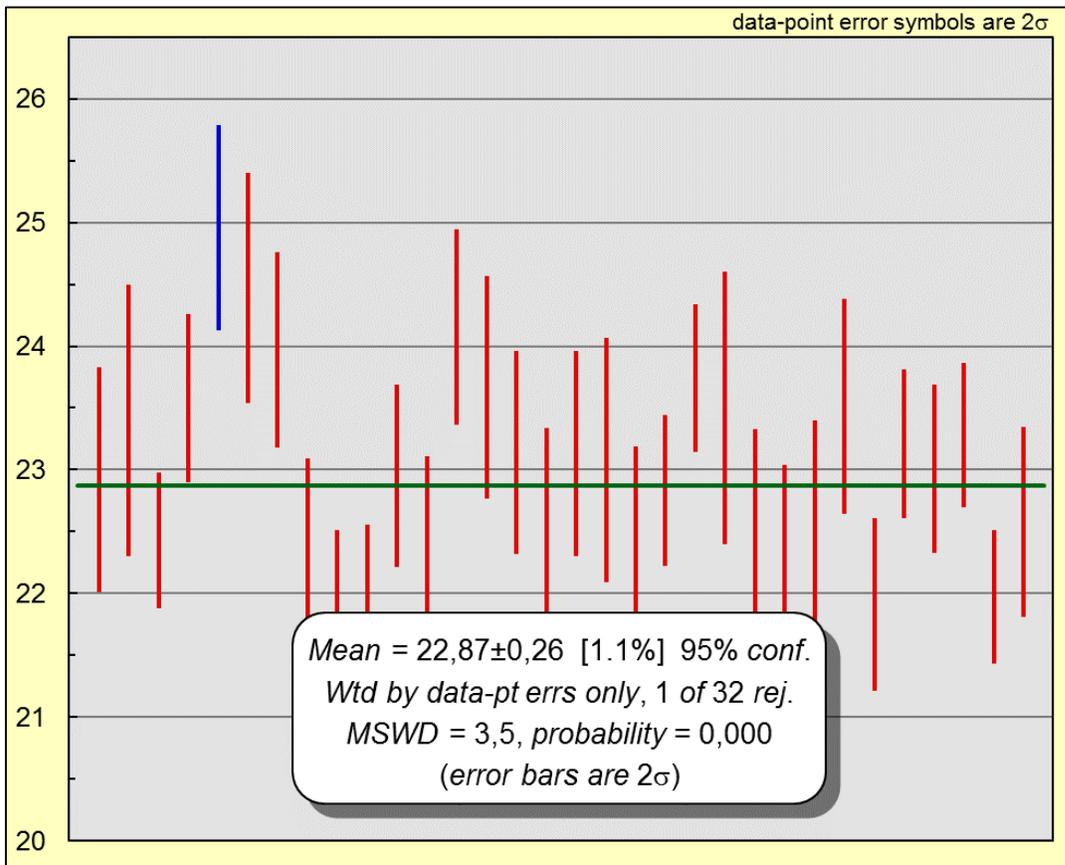
El rango de edad establecido a partir de 29 relaciones isotópicas de la muestra de Cajolá es de  $12,69 \pm 0,14$  Ma, la cual corresponde al piso Serravalliense de la época del Mioceno.

**FIGURA 23**  
**DIAGRAMA DE CONCORDIA MUESTRA EM-6664-16333-10**



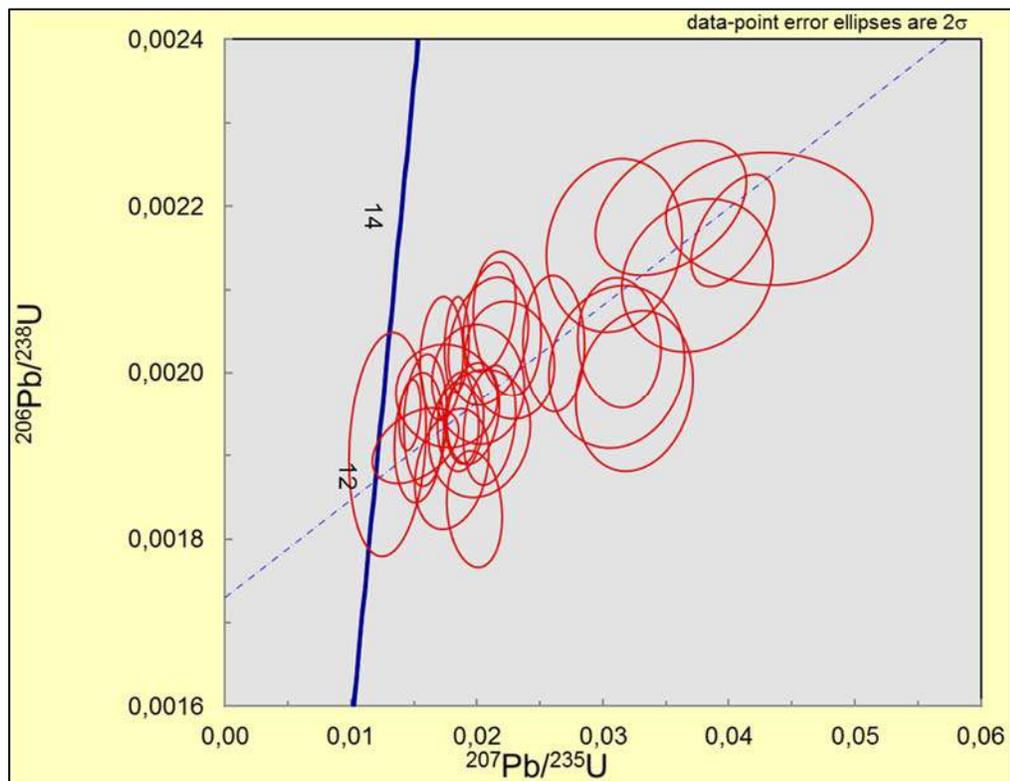
**FUENTE:** Trabajo de laboratorio, abril de 2016.

**FIGURA 24**  
**EDAD PROMEDIO PONDERADA MUESTRA EM-6664-16333-10**



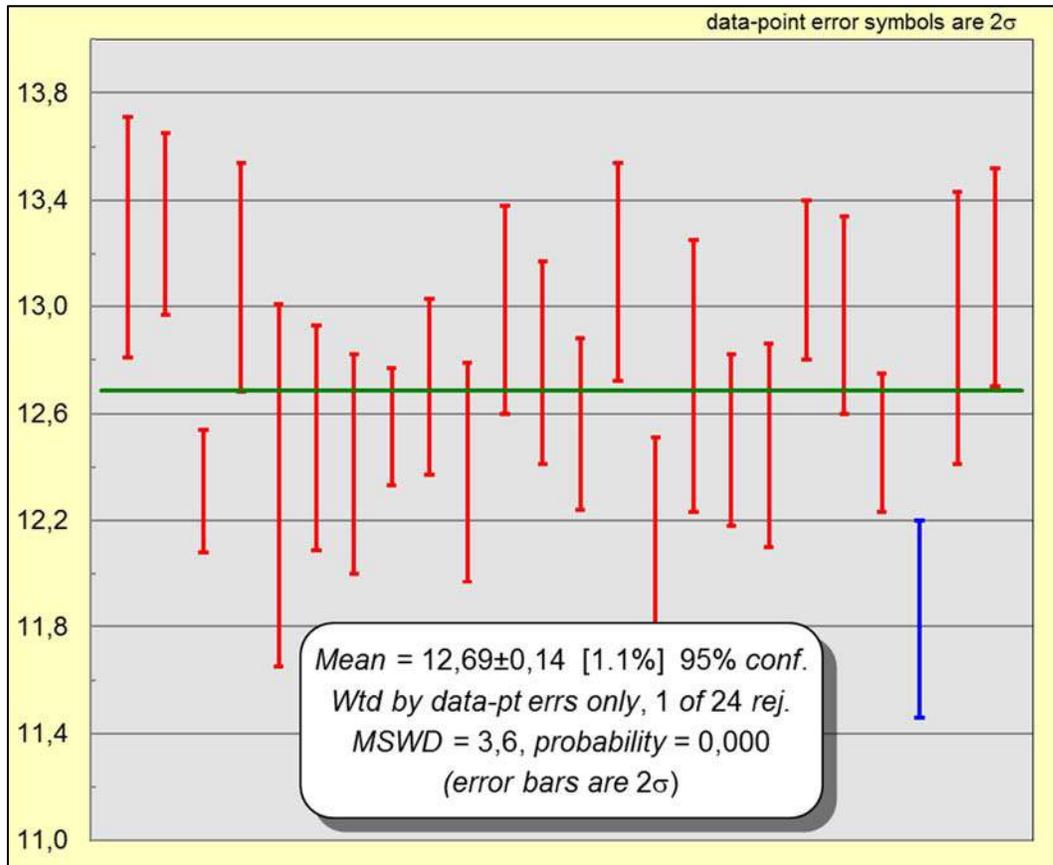
**FUENTE:** Trabajo de laboratorio, abril de 2016.

**FIGURA 25**  
**DIAGRAMA DE CONCORDIA MUESTRA EM-6487-16532-2**



**FUENTE:** Trabajo de laboratorio, agosto de 2016.

**FIGURA 26**  
**EDAD PROMEDIO PONDERADA MUESTRA EM-6487-16532-2**



**FUENTE:** Trabajo de laboratorio, agosto de 2016.

### 3.5 DISCUSIÓN

En base a su petrografía, las rocas graníticas de la caldera de Quetzaltenango son granodioritas, con contenidos minerales de plagioclasa de tipo andesina (50 %), feldespato alcalino tipo ortosa (25 %), cuarzo (20 %), biotita (3 %), hornblenda, rutilo, zircón y óxidos opacos (2 %).

Estas rocas presentan minerales de alteración tales como sericita, clorita, cuarzo, epidota y óxidos de manganeso, lo cual es consistente con una alteración fílica a argílica en un sistema hidrotermal de tipo epitermal a mesotermal.<sup>79</sup> Estos sistemas se encuentran activos actualmente sólo en la zona de Zunil.

El dique que corta a las granodioritas de Cajolá es de composición cuarzo-feldespática, se clasificó como un granito de feldespato alcalino, compuesto por cuarzo (50 %), feldespato potásico (49 %) plagioclasa y biotita (1 %), muestra una textura granofídica, formada por los inter crecimientos angulares a cuneiformes entre el cuarzo y el feldespato. Según Lowenstern (1997), esta textura se forma por una cristalización rápida y simultánea del cuarzo y el feldespato, en un sub enfriamiento pronunciado de la mezcla silicatada.<sup>80</sup> Lauri (2004) cita a Hughes (1971), indica que estas mezclas graníticas atraviesan condiciones eutécticas durante su cristalización.<sup>81</sup>

---

<sup>79</sup> G. Corbett y T. Leach. "Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization". *Special publication series, Society of Economic Geologist*. 6 (diciembre 1998): 1-236.

<sup>80</sup> Jacob Lowenstern Et. Al., "Comagmatic A-Type Granophyre and Rhyolite from the Alid Volcanic Center, Eritrea, Northeast Africa". *Journal of Petrology*. 38:12 (diciembre 1997): 1707-1721.

<sup>81</sup> Laura Lauri. "Petrogenesis of felsic igneous rocks associated with the Paleoproterozoic Koilismaa layered igneous complex, Finland". Disertación académica. Universidad de Helsinki, Finlandia: Facultad de Ciencias, 2004.

El rutilo, según Murphy (2007), indica un ambiente oxidante, causado por la adición de agua a la cuña del manto, lo que estabiliza minerales como la titanita, rutilo, ilmenita y hornblenda.<sup>82</sup> La presencia de minerales acuosos como la biotita y la hornblenda en estas granodioritas indican la presencia de agua en el magma que las originó.

En base a criterios texturales,<sup>83</sup> se propone una secuencia de cristalización para las granodioritas de esta investigación y una aproximación de su petrogénesis.

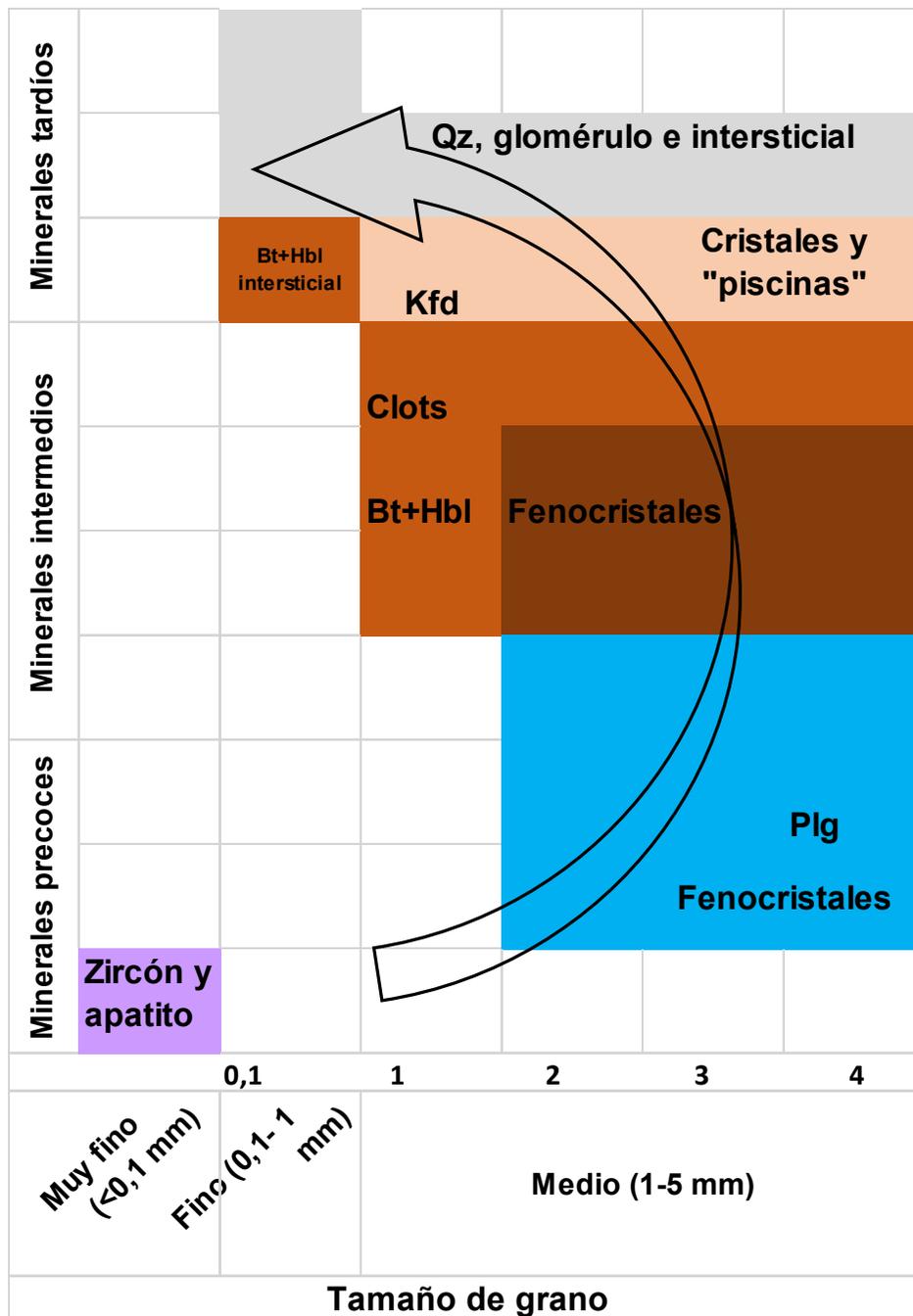
Los fenocristales y cristales zonados de plagioclasa fueron los primeros minerales en cristalizar en el *liquidus* (fundido). Este *liquidus*, rico en agua, continuó luego con la cristalización de biotita y hornblenda, formando *clots*. Más cristales de biotita y anfíbol se formaron posteriormente durante la cristalización fraccionada. Finalmente, se cristalizaron el cuarzo y el feldespato potásico anhedral, bien como extensas “piscinas” rodeando a los minerales ya mencionados, como agregados policristalinos y en el espacio intersticial de otros cristales. A continuación se muestra un diagrama secuencial de cristalización.

---

<sup>82</sup> Brendan Murphy. “Igneous Rock Associations 8. Arc Magmatism II: Geochemical and Isotopic Characteristics”. *Geoscience Canada*. 34:1 (marzo 2007): 1-29.

<sup>83</sup> Antonio Castro. *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. España: Editorial Paraninfo, 2015.

**FIGURA 27**  
**DIAGRAMA SECUENCIA-TAMAÑO DE GRANO**



FUENTE: Trabajo de gabinete, abril de 2016.

Los fenocristales de plagioclasa agrupados en glomérulos (agregados policristalinos) son comunes en rocas de composición granítica a tonalítica.<sup>84</sup> El agregado policristalino de biotita+hornblenda, denominado *clot*, tienen un origen por reacción peritética entre los cristales precoces de piroxeno y el *liquidus* del fundido. Su presencia es común en rocas básicas a intermedias (como la granodiorita) en las asociaciones calcialcalinas de los batolitos de tipo cordillerano.<sup>85</sup>

Geoquímicamente, las muestras de Cantel, Cajolá y Zunil de esta investigación corresponden a granodioritas (4 muestras) y un granito alcalino (dique granófico).

Según los índices de clasificación utilizados por Frost, las cuatro granodioritas son de carácter magnesiano, de serie magmática calcialcalina e índice de saturación peraluminoso, a excepción de una de las de Cantel, que es metaluminosa. El dique granófico de Cajolá es de carácter ferroano, de serie magmática alcalinocálcica e índice de saturación peraluminoso. El carácter magnesiano indica que, a nivel molecular, el magnesio es más abundante que el hierro, y que los magmas se empobrecieron en este último al ir aumentando el contenido de sílice. Este carácter magnesiano las identifica como granitoides de tipo cordillerano. Al contrario, el carácter ferroano indica cierto enriquecimiento en hierro.<sup>86</sup> El índice de saturación en alúmina, que varía entre ligeramente peraluminoso y metaluminoso concuerda con la presencia de minerales como anfíbol y piroxeno.<sup>87</sup>

---

<sup>84</sup> Castro, 115.

<sup>85</sup> *Ibidem*, 118.

<sup>86</sup> Frost Et. Al., 2039.

<sup>87</sup> Fernando Velasco-Tapia Et. Al., "Estudio petrográfico y geoquímico del Complejo Plutónico El Peñuelo (Cinturón de Intrusivos de Concepción del Oro), noreste de México". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 63:2 (junio 2011): 183-199.

Según la clasificación de Villaseca, una granodiorita de Cantel, las dos granodioritas del río Chuyul y Pachamiyá y la granodiorita de Cajolá son metaluminosas, ligera y moderadamente peraluminosas respectivamente. El ligero enriquecimiento en aluminio se concentra en una fase de biotita, ya que no se observa moscovita, cordierita o granate. El dique granófico de Cajolá se encuentra dentro del campo altamente peraluminoso félsico, el cual corresponde a los términos más ácidos de una serie granítica y que más que leucogranitos anatéticos *sensu stricto*, pueden ser magmas altamente fraccionados de series graníticas ligeramente peraluminosas.<sup>88</sup>

De esta cuenta, las muestras analizadas se agrupan en dos subdivisiones principales de la clasificación propuesta por Frost, son estos: los granitoides magnesianos calcialcalinos ligeramente peraluminosos y los granitoides ferroanos alcalinocálcicos peraluminosos félsicos.

En el primer grupo se encuentran las granodioritas de Cajolá, Cantel y Zunil. Los granitoides magnesianos calcialcalinos metaluminosos a ligeramente peraluminosos componen los plutones en la porción principal de los batolitos cordilleranos, con rocas como la diorita, monzodiorita y granodiorita. En el segundo grupo se encuentra el dique granófico de Cajolá. Estos granitoides ferroanos alcalinocálcicos a alcalinos y peraluminosos suelen corresponder a plutones de tipo A y a granófidios asociados a diques máficos y plutones.<sup>89</sup>

---

<sup>88</sup> Villaseca Et. Al., 116.

<sup>89</sup> Frost Et. Al., 2039.

Los granitoides cordilleranos son parte de las rocas consideradas como granitoides Tipo I según Chapell y White (1974) y se exponen en las zonas de arcos magmáticos, con el nombre de granitos de arco volcánico, con las rocas calcialcalinas ubicadas en la porción de tierra adentro del batolito, las cuales se vuelven más alcalinas al alejarse aún más del mismo; los batolitos cordilleranos también incluyen granitoides ferroanos alcalinocálcicos peraluminosos.<sup>90</sup>

La geoquímica de elementos traza de las granodioritas de Cantel, Zunil y el granófono de Cajolá, presenta una firma de arco volcánico, ya que al ser comparadas las concentraciones de REE Vs. condrito, se observa un enriquecimiento de las LREE respecto de las HREE, las cuales muestran un perfil bastante llano, además de la anomalía negativa de Eu, consistente con el fraccionamiento de la plagioclasa en las rocas calcialcalinas de arco volcánico. Además, al ser comparados los elementos compatibles e incompatibles respecto del manto primitivo y la corteza continental, se observan anomalías negativas de Ti, Zr, Hf, Nb, Ta y Th, lo cual también es típico de zonas de subducción.<sup>91</sup>

Los perfiles llanos de HREE implican que la fuente del magma se encuentra en el manto superficial de lertzholita-espinela, a menos de 50 km de profundidad.<sup>92</sup>

---

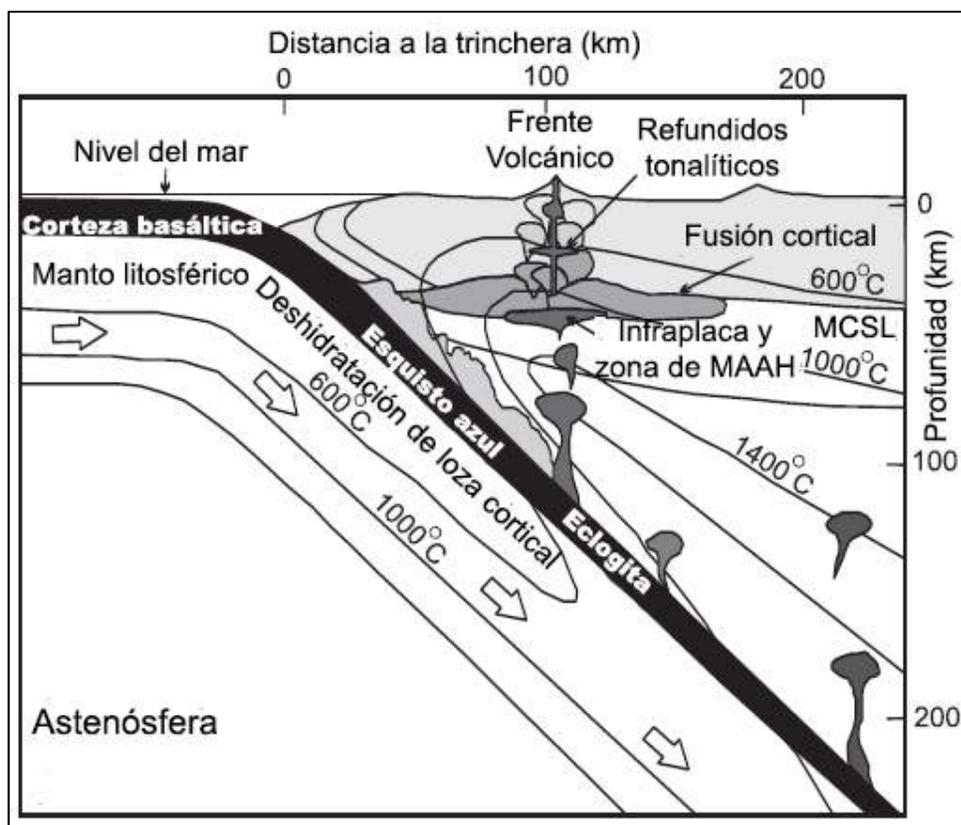
<sup>90</sup> Frost Et. Al., 2043

<sup>91</sup> Milián, 106.

<sup>92</sup> Murphy, 1.

Sin embargo, estos magmas no se derivan directamente de la fusión de la loza subducida, ya que la litósfera oceánica a una profundidad de 110 km sería metamorfozada a eclogita, la cual posee fases estables de granate y no de espinela, lo que sugiere otros procesos para su petrogénesis, como la fusión parcial de rocas corticales.<sup>93</sup>

**FIGURA 28**  
**FORMACIÓN DE UN ARCO VOLCÁNICO CONTINENTAL**



**FUENTE:** Murphy, Brendan J. *Arc Magmatism II: Geochemical and Isotopic Characteristics*, 2007.

<sup>93</sup> Murphy, 9.

Los granitoides magnesianos reflejan una afinidad con magmas relativamente hidratados y oxidados y se asocian con orígenes relacionados a las zonas de subducción.<sup>94</sup>

Las granodioritas de Cantel y Zunil presentan anomalías negativas en el Ti, P, Nb, Ta y Eu, lo cual refleja un fraccionamiento de diversas cantidades de apatito (P), óxidos de hierro y titanio (Ti) y plagioclasa (Eu), de acuerdo a Du Bray.<sup>95</sup> La cristalización fraccionada de anfíbol y/o magnetita provoca que la composición del fundido se desplace hacia composiciones más intermedias y félsicas,<sup>96</sup> lo cual parece ser la ruta petrogenética que siguieron estas rocas, derivándose de un líquido por fusión parcial del manto y evolucionados a través de la cristalización fraccionada de los minerales mencionados anteriormente.

El granófido de Cajolá (granitoide ferroano alcalinocálcico y peraluminoso félsico) se distingue por presentar anomalías positivas de elementos incompatibles como Rb, Ba, Th, U, La, y Sr, lo cual es indicativo de que el magma que formó estas rocas es de un nivel cortical y es muy diferenciado.<sup>97</sup> Y es que las rocas peraluminosas en zonas de subducción suelen formarse por la diferenciación de magmas a partir de una serie calcialcalina de composición gabroica a granodiorítica.<sup>98</sup>

---

<sup>94</sup> Murphy, 12.

<sup>95</sup> Edward Du Bray Et. Al., "Geochemistry and Geochronology of Middle Tertiary Volcanic Rocks of the Central Chiricahua Mountains, Southeast Arizona". *U.S. Geological Survey Professional Paper*. 1684 (2004): 1-57.

<sup>96</sup> Murphy, 23.

<sup>97</sup> Valerie Pompa-Mera. *Geoquímica y geocronología de los complejos intrusivos en el sur de Chiapas, México*. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2009.

<sup>98</sup> Villaseca Et. Al., 115.

También pueden formarse por la adición de un fluido derivado de la loza que se subduce a una fuente empobrecida es responsable por las relativamente elevadas abundancias de los elementos LIL anteriormente mencionados.<sup>99</sup> Así pues, estas rocas parecen haber sido producidas tanto por diferenciación de un magma de composición intermedia, o bien por la fusión parcial de la corteza.

Según la discriminación tectónica de granitos de Pearce, las granodioritas de Cantel, Zunil y Cajolá, así como el dique granofido, son granitos de arco volcánico. Según Batchelor y Bowden, corresponden a los campos de sin-colisión y post-orogénica, para las granodioritas y el dique granofido, respectivamente. Una clasificación de granitoides según su ambiente geotectónico se muestra en la figura 29.

En conjunto, las 5 muestras y sus características reflejan diferentes procesos tectonomagmáticos, desde el magmatismo de un margen de placas activo y destructivo, hasta magmatismo anatético (sin colisional/sin orogénico).

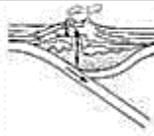
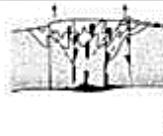
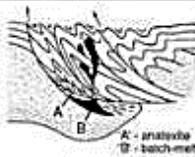
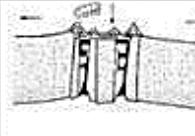
Sin embargo, no todas las características geoquímicas y petrográficas coinciden con los procesos propuestos por Batchelor y Bowden. Por ejemplo, las granodioritas sin-colisionales de Cajolá, Cantel y Zunil no muestran cordierita, ni una clara evidencia de ser granitoides anatéticos o de derivar directamente de la fusión de la corteza.

A pesar de ello, las muestras evidencian una evolución en el ambiente tectónico en las que este basamento granítico fue emplazado, desde el proceso de subducción mismo, hasta la fase de post orogénica.

---

<sup>99</sup> F. Mohamed y A. Hassanen. "Geochemical evolution of arc-related mafic plutonism in the Umm Naggat district, Eastern Desert of Egypt". *Journal of African Earth Sciences*. 22:3 (enero 1996): 269-283.

**FIGURA 29**  
**CLASIFICACIÓN GEOTECTÓNICA DE GRANITOIDES**

	OROGENICO			TRANSICIONAL	ANOROGENICO
	Arco islas oceánicas	Margen continental activo	Colisión continental	Levantamiento/ colapso post-orogénico	Rift continental. Punto caliente
					
Geoquímica	Calc-alc > tol. Tipo-M e I-M hidrídicos Met-Al.	Calc-alc. Tipo-I > Tipo-S Met-Al. a Per-Al	Calc-alc. Tipo-S Per-Al.	Calc-alc. Tipos-I y S (Tipo-A) Met-Al. a Per-Al.	Alcal. Tipo-A Per-alcal.
Tipos de rocas	Cz-diorita en arco maduro	Tonalit- granod > granito- gabro	Leucogranito y migmatitas	Granod. + diorita- gabro. Bimodal	Granito-sienita + diorita- gabro
Minerales	Hbl>bi	Hbl, bi	Bi, mu, hbl, grt, Sil-Al, crd.	Hbl>bi	Hbl, bi, aegir, fayal, riebeck, arfved.
Volcanismo	Basalto arco islas a andesit	Andesita y dacita	ausente	Basalto y riolita	Lavas alcalinas y tobas
Ejemplos	Bougainville, islas Solomon	Batolitos Cordillera de los Andes	Manaslu y Lhotse, Nepal	Plutones tardío Caledónicos Inglaterra	Complejos de Nigeria. Pluton Rangel
Origen	Fusión parcial de manto	Fusión parcial de manto con corteza	Fusión parcial de corteza reciclada	Fusión parcial de corteza inf y media+ manto	Fusión parcial de manto y/o corteza inf. anhidra
Mecanismos de fusión	Subducción, transferencia de calor y fluidos hacia arriba que disuelven minerales de la loza.		Engrosamiento tectónico + calor radiogén.	Calor cortical + mantélico (ascen. Astenósfera)	Punto caliente y/o ascenso del manto

**FUENTE:** *Capítulo 11 – Rocas plutónicas*, [http://www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_18/11.htm](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm) (visitado el 18 de mayo de 2016).

Las edades obtenidas en circones, por medio del U/Pb, correspondientes a las granodioritas de Zunil y Cajolá, son de  $22.87 \pm 0.26$  y  $12.69 \pm 0.14$  Ma, ubicadas en el Mioceno. Esta edad ha sido interpretada como la edad de cristalización de la roca, y por consiguiente, del evento magmático.

Durante esta época, se produce la ruptura de la placa de Farallón (23 Ma) pasando a formar las placas de Cocos y de Nazca; una loza de la placa de Cocos se separa por debajo del norte de Centroamérica y produce el levantamiento topográfico a gran escala en esa región, además de comenzar la subducción casi ortogonal de la placa de Cocos por debajo del bloque Chortís.<sup>100</sup>

Además, se desarrollan las zonas de falla lateral izquierda *strike-slip* a lo largo de la zona de sutura Cretácica tardía del valle del Motagua, provocando el movimiento hacia el este de la placa Caribe en relación a la placa de Norteamérica.<sup>101</sup> Previamente se dio un progresivo cese de la actividad plutónica en el sur de México (35-28 Ma).<sup>102</sup> La reconstrucción tectónica del norte de Centroamérica durante el Mioceno (22 Ma) se puede apreciar en la figura a continuación.

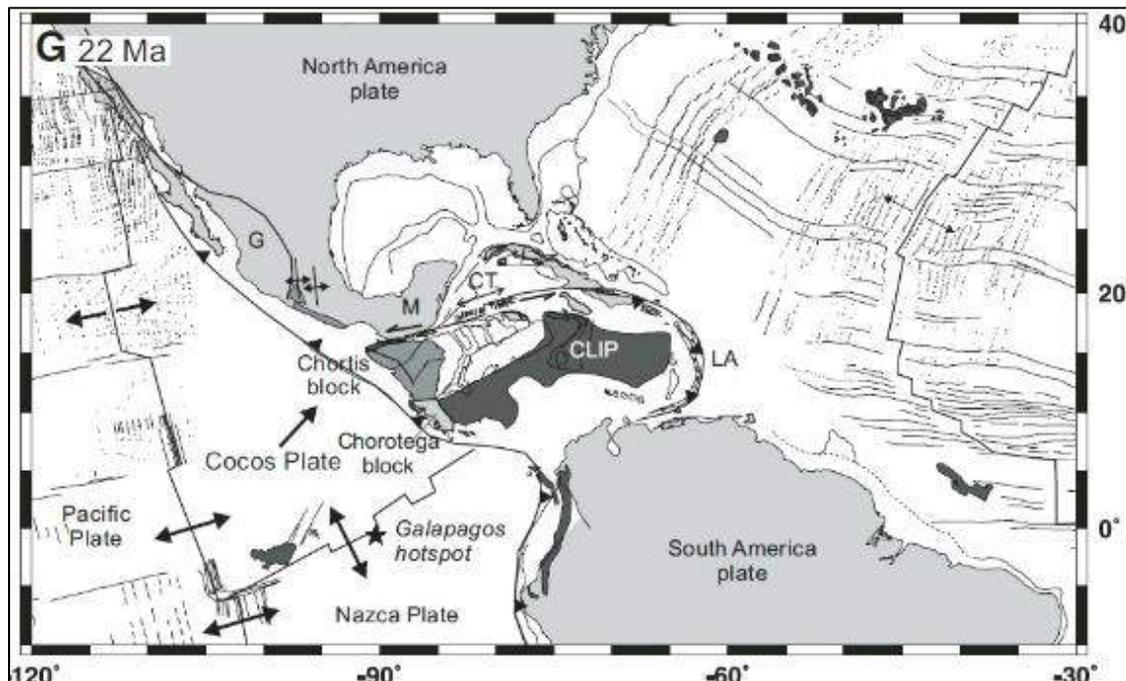
---

<sup>100</sup> Paul Mann. "Overview of the tectonic history of northern Central America". Geological Society of America Special Paper. 428 (2007): 1-19.

<sup>101</sup> *Ibíd*em, 13.

<sup>102</sup> Peter Schaaf Et. Al., "Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence". *Tectonics*. 14 (diciembre 1995): 1339-1350.

### FIGURA 30 RECONSTRUCCIÓN PALEOTECTÓNICA Y GEOGRÁFICA DEL NORTE DE CENTROAMÉRICA



DESCRIPCIÓN: CLIP: Gran provincia ígnea del Caribe, CT: Fosa Caimán, G: Terreno Guerrero, LA: Antillas Menores, M: Bloque Maya. Costa Rica y Panamá corresponden aproximadamente al área del Bloque Chorotega y Honduras, Nicaragua y Guatemala, al Bloque Chortís.

FUENTE: *Overview of the tectonic history of northern Central America*, Paul Mann, 2007.

Salazar (2008) incluye en su trabajo una recopilación de dataciones realizadas a las rocas del Macizo de Chiapas, en donde incluye datos del trabajo de Mújica-Mondragón (1987) sobre el batolito de la costa Chiapaneca, con granodioritas de biotita y hornblenda con edades entre los  $24,4 \pm 1$  Ma y  $20 \pm 1$  Ma, que afloran al sur del Complejo Volcánico Tacaná.<sup>103</sup>

<sup>103</sup> Josué Salazar. *Geología, petrología y geoquímica del Macizo de Chiapas, área de Motozintla de Mendoza*. Tesis Ingeniero Geólogo. Universidad Autónoma de México, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2008.

García-Palomo (2004) en su trabajo sobre dicho Complejo, reporta un nuevo *stock* de granodiorita consistente en feldespatos alcalinos, plagioclasas, biotita y cuarzo, con edades de  $13,3\pm 0,2$  Ma y  $12,2\pm 0,1$  Ma.<sup>104</sup>

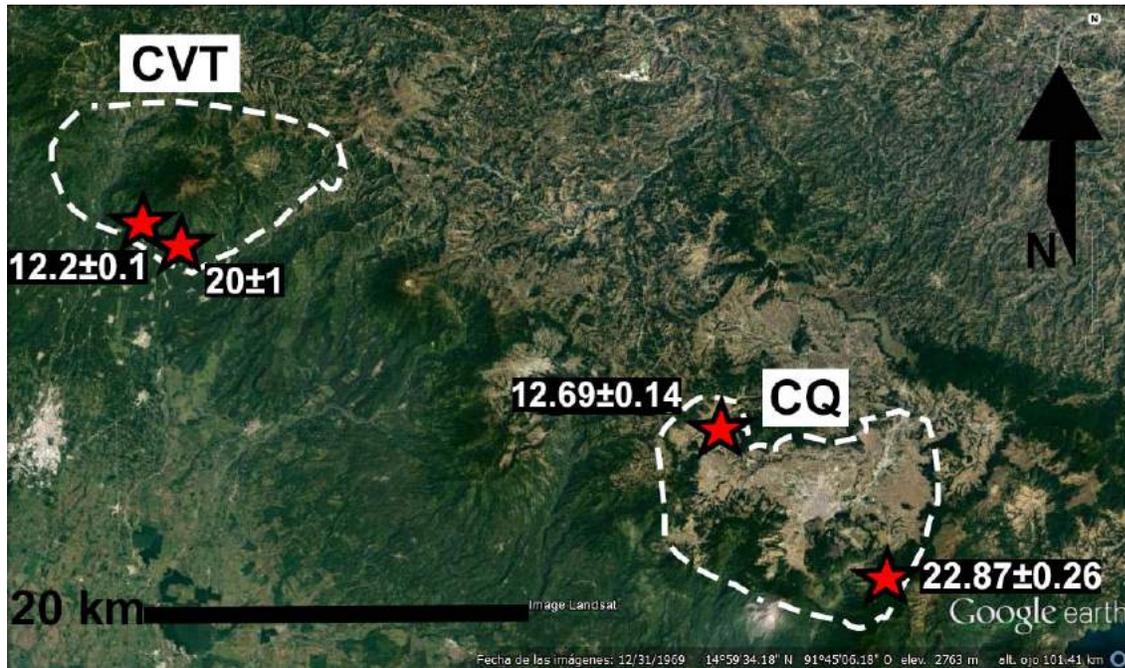
Así como las granodioritas de Cajolá, Cantel y Zunil están cubiertas por los materiales volcánicos propios de la caldera, así las granodioritas descritas por Mújica-Mondragón (1987) y García-Palomo (2004) están cubiertas por los materiales de las calderas de la fase primitiva del Complejo Volcánico Tacaná.

Por sus características petrográficas, geocronológicas y la distribución espacial de las rocas graníticas de la caldera de Quetzaltenango respecto de las del Complejo Volcánico Tacaná, distante 40 km al NW (Figura 31), estas podrían correlacionarse entre sí.

---

<sup>104</sup> Armando García-Palomo Et. Al., "Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala". Geological Society of America Special Paper "Natural Hazards in Central America". 2004.

**FIGURA 31**  
**ROCAS GRANÍTICAS DE LA CALDERA DE QUETZALTENANGO**  
**Y EL COMPLEJO VOLCÁNICO TACANÁ**



**DESCRIPCIÓN:** Ubicación del Complejo Volcánico Tacaná respecto de la caldera de Quetzaltenango (delimitadas por los guiones blancos) y de las rocas graníticas que afloran en dichos lugares (estrellas rojas) indicándose las edades de los mismos. Granodiorita de Zunil:  $22,87 \pm 0,26$  Ma; Granodiorita de Cajolá:  $12,69 \pm 0,14$  Ma; Granodiorita Finca Zajul:  $20 \pm 1$  Ma; Granodiorita Río San Rafael:  $12,2 \pm 0,1$  Ma.

**FUENTE:** Trabajo de gabinete, septiembre de 2016.

## CONCLUSIONES

- a) Las rocas graníticas de la caldera de Quetzaltenango se exponen hacia el noroeste en Cajolá y hacia el sureste en Cantel y Zunil en escasos afloramientos, con una superficie de 0,3 km<sup>2</sup> y por tanto, de dimensiones poco cartografiables, muestran además contactos fallados y erosivos con las rocas volcánicas y depósitos piroclásticos que las cubren, más no con la roca caja original, la cual está ausente.
- b) La clasificación petrográfica de estas rocas corresponde con granodioritas, compuestas por 50 % de plagioclasa tipo andesina, 25 % de feldespato alcalino tipo ortosa, 20 % de cuarzo, 3 % de biotitas, 2 % de minerales como anfíboles, clorita y opacos; dioritas, compuestas por 60 % de plagioclasa tipo andesina, 15 % de biotita, 15 % de hornblenda, 2 % de cuarzo, 1 % de feldespato potásico y 2 % de óxidos opacos; granitos alcalinos, compuestos por 49 % de feldespato potásico, 49 % de cuarzo, 1 % de plagioclasa y 1 % de biotita. Muestran texturas hipidiomórficas inequigranulares unimodales, hipidiomórficas poikilíticas y granofídicas respectivamente.
- c) Geoquímicamente, la litología de las muestras corresponde a granodiorita y granito alcalino, con un contenido de SiO<sub>2</sub> de entre el 65 % y 71 % para la primera, y un contenido de entre el 75 % y el 77 % para el segundo; normativas en cuarzo y en ocasiones con corindón, son de naturaleza principalmente magnesiana, de serie magmática calcialcalina y de índice de saturación en alúmina ligeramente peraluminoso, correspondientes a granitoides Tipo I cordilleranos.

- d) Son granitoides con firma de arco volcánico, según las anomalías negativas de Ta, Nb y Ti, de margen continental activo, asociadas a una zona de subducción, emplazadas durante procesos tectono-magmáticos de sin-colisión y magmatismo post orogénico.
- e) Los procesos petrogenéticos de los magmas que formaron estas rocas incluyen diferenciación por cristalización fraccionada para las granodioritas, y fusión de la corteza e interacción con fluidos residuales para el granito alcalino.
- f) La edad promedio ponderada de cristalización de las granodioritas de Zunil y Cajolá, a partir de U/Pb en circones, es de  $22,87 \pm 0,26$  y  $12,69 \pm 0,14$  Ma, lo cual, junto con su petrografía, permite relacionarlas con las granodioritas del Complejo Volcánico Tacaná, las cuales a su vez están relacionadas al batolito costero de Chiapas.

## RECOMENDACIONES

- a) Realizar dataciones adicionales a las rocas graníticas de Cantel y a los fragmentos líticos plutónicos expulsados por la erupción del volcán Santa María en el año
- b) Llevar a cabo análisis geoquímicos de isótopos en las rocas graníticas de la caldera de Quetzaltenango para determinar de mejor manera aspectos sobre el protolito y ambientes de emplazamiento de los magmas.
- c) Comparar la geoquímica de las rocas graníticas con las del batolito costero de Chiapas y con las rocas graníticas situadas entre la caldera de Quetzaltenango y la de Atitlán, a fin de establecer de mejor manera las correlaciones entre ellas.
- d) Extender el mapeo y muestreo hacia el noreste de la caldera de Quetzaltenango, a fin de ubicar otros posibles afloramientos de rocas graníticas y analizarlas y compararlas con las rocas de esta investigación.



## BIBLIOGRAFÍA

- Batchelor, R. and P. Bowden. "Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters". *Chemical Geology*. 48 (marzo 1985): 43-55.
- Burkart, Burke and Stephen Self. "Extension and rotation of crustal blocks in northern Central America and effect on the volcanic arc". *Geology*. 13, (enero 1985): 22-26.
- Caicedo A. and J. Palma, "Present status of exploration and development of the geothermal resources of Guatemala". *Geothermal Resources Council*. 23 (agosto 1990): 97-105.
- Carr, MJ. Et. Al. "Volcanism and geochemistry in Central America: Progress and problems". *American Geophysical Union*, 138 (2003): 153–179.
- Castro, Antonio Dorado. *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. España: Editorial Paraninfo, 2015.
- Chappell, BW and JR. White. "Two contrasting granite types". *Pacific Geology*. 8 (1974): 173-174.
- Conway, Michael Et. Al. "Cerro Quemado, Guatemala: the volcanic history and hazards of an exogenous volcanic dome complex". *Journal of Volcanological and Geothermal Research*. 52 (octubre 1992): 303-323.
- Corbett, GJ and TM. Leach. "Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization". Special publication series, *Society of Economic Geologist*. 6 (diciembre 1998): 1-236.
- Couch, R. and S. Woodcock. "Gravity and structure of the continental margins of southwestern Mexico and northwestern Guatemala". *Journal of Geophysical Research*. 86 (marzo 1981).
- DeMets, Charles. "A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc". *Geophysical Research Letters*. 0:0 (noviembre 2001): 1-4.

- Duffield, William. "Oblique synoptic images, produced from digital data, display strong evidence for a new caldera in southwestern Guatemala". *Journal of Volcanological and Geothermal Research*. 55:3/4 (marzo 1993): 217-224.
- Duque Trujillo, José Fernando. *Geocronología (U/Pb y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) y geoquímica de los intrusivos Paleógenos de la Sierra Nevada de Santa Marta y sus relaciones con la tectónica del Caribe y el arco magmático circun-Caribeño*. Tesis Maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México. México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2009.
- Escobar, Rudiger Et. Al. " $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and paleomagnetic constraints on the evolution of Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society of America Bulletin*. 122:5/6 (mayo-junio 2010): 757-771.
- Debon, F. and P. Le Fort. "A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. 73 (enero 1983): 135-149.
- Du Bray, Et. Al. "Geochemistry and Geochronology of Middle Tertiary Volcanic Rocks of the Central Chiricahua Mountains, Southeast Arizona". *U.S. Geological Survey Professional Paper*. 1684 (2004): 1-57.
- Foley, Duncan Et. Al. "Geology and geophysics of the Zunil geothermal system, Guatemala". *Geothermal Resources Council Transactions*. 14, Part II, (agosto 1990): 1405-1412.
- ". "Satellites images, digitized topography, and the recognition of the Xela Caldera, Quezaltenango Valley, Guatemala". Cincinatti, EEUU: *Geological society of America*. 24:7 (enero 1992): 217-233.
- Frost, B. Ronald Et. Al. "A geochemical classification for granitic rocks". *Journal of Petrology*. 42 (abril 2001): 2033-2048.
- Gall, Francis. *Cerro Quemado, volcán Quetzaltenango: Estudio de geografía histórica regional*. Guatemala: Editorial José Pineda Ibarra, 1966.
- García, Otto. *Petrology of cores from Wells Z-19 and Z-20, Zunil geothermal field, Guatemala*. Diplomado de Tecnología Geotérmica. Universidad de Auckland. Nueva Zelanda: Instituto Geotérmico, 1990.
- García-Palomo, A. Et. Al. "Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala". *Geological Society of America Special Paper "Natural Hazards in Central America"*. 2004.

- Geldmacher, J. Et. Al. "Age and Geochemistry of the Central American Forearc Basement (DSDP Leg 67 and 84): Insights into Mesozoic Arc Volcanism and Seamount Accretion on the Fringe of the Caribbean LIP". *Journal of Petrology*. 0:0 (octubre 2008): 1-35.
- Gill, Robin. *Igneous Rocks and Processes. A practical guide*. Reino Unido: Wiley Blackwell, 2010.
- Gutiérrez, Edgar Tobías. *Proyecto Zunil: Estudio de factibilidad preliminar, informe geológico y vulcanológico*. Guatemala: Instituto Nacional de Electrificación, 1977.
- Halsor, Sid and William Rose. "Common characteristic of paired volcanoes in northern Central America". *Journal of Geophysical Research*. 93:85 (mayo 1988): 4467-4476.
- Hughes, C. "Anatomy of a granophyre intrusion". *Lithos*. 4 (abril 1971): 403-415.
- Hughes, JM. *Geology and petrology of Caldera Tzanjuyub, western Guatemala*. Tesis de Maestro en Artes, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, United States of America: Dartmouth College, 1978.
- Introducción a la Geoquímica Isotópica*. <http://www.geofisica.unam.mx/laboratorios/universitarios/lugis/pdf/introduc-GI.pdf> (15 de agosto de 2015).
- Johns, GW. *Geology of the Cerro Quemado volcanic dome complex, Guatemala*; Tesis de Maestro en Ciencias, Michigan Technological University, Houghton, Michigan, United States of America: Michigan Technological University, 1975.
- Johnson, JB. Et. Al. "Explosion dynamics of pyroclastic eruptions at Santiaguito Volcano". *Geophysical Research Letters*. 31 (marzo 2004): 1-5.
- Jung, Stefan and Albert Pfänder. "Source composition and melting temperatures of orogenic granitoides: constraints from CaO/Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> and accessory mineral saturation thermometry". *European Journal of Mineralogy*. 19 (diciembre 2007): 859-870.
- Kubota, Yasuhiro Et.Al. "Geothermal development in Zunil geothermal field, Republic of Guatemala". *Chinetsu*. 18 (marzo 1981): 280-295.
- ". "Geothermal System and Hydrothermal Alteration in the Zunil Geothermal Field, Guatemala". *Journal of the Geothermal Research Society of Japan*. 7:1 (enero 1985): 1-17.

- Lauri, Laura. "Petrogenesis of felsic igneous rocks associated with the Paleoproterozoic Koilismaa layered igneous complex, Finland". Disertación académica. Universidad de Helsinki, Finlandia: Facultad de Ciencias, 2004.
- Lima, Enrique and Julio Palma. "The Zunil-II geothermal field, Guatemala, Central America". Kyushu – Tohoku, Japón: *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. (mayo-junio 2000): 2133-2138.
- Lowenstern, Et. Al. "Comagmatic A-Type Granophyre and Rhyolite from the Alid Volcanic Center, Eritrea, Northeast Africa". *Journal of Petrology*. 38:12 (diciembre 1997): 1707-1721.
- Lyon-Caen, Helene Et. Al. "Kinematics of the North American-Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system". *Geophysical Research Letters*. 33 (octubre 2006): 1-5.
- Mann, Paul. "Overview of the tectonic history of northern Central America". *Geological Society of America Special Paper*. 428 (2007): 1-19.
- Mérida, Edgar Roberto. *La geología en Quetzaltenango: Análisis petrológico de las rocas del Complejo Dómico Cerro Quemado en su flanco SE y estructuras volcánicas en los alrededores de la Caldera de Almolonga, en un área de 21 km<sup>2</sup> cartografiados a escala 1:25,000*. Práctica profesional supervisada, carrera de Técnico en Geología. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2015.
- Milián, Ricardo Enrique. *Petrografía, geoquímica y geocronología del stock ubicado en los alrededores de la aldea Matanzas, municipio de San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala*. Tesis Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2013.
- Mohamed, FH. and MA. Hassanen. "Geochemical evolution of arc-related mafic plutonism in the Umm Naggat district, Eastern Desert of Egypt". *Journal of African Earth Sciences*. 22:3 (enero 1996): 269-283.
- Música-Mondragón, R. *Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas*. Proyecto C-2009. México: Instituto Mexicano del Petróleo 1987. (sin publicar).
- Murphy, J. Brendan. "Igneous Rock Associations 8. Arc Magmatism II: Geochemical and Isotopic Characteristics". *Geoscience Canada*. 34:1 (marzo 2007): 1-29.

Newhall, Et. Al. "Recent geologic history of Lake Atitlán, a caldera lake in Western Guatemala". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 33 (enero-marzo 1987): 81-107.

Pearce, Julian and Michael Norry. "Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks". *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 69:1 (enero 1979): 33-47.

----- Et. Al. "Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks". *Journal of Petrology*. 25 (noviembre 1984): 956-983.

*Petrología química: Elementos mayores y menores*. [http://www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_18/08.htm](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/08.htm) (15 de agosto de 2015).

Pirkle FL. and DA. Podmeyer. "Zircon: Origin and Uses". *Society for mining, metallurgy and exploration*. 292. 1992. [http://cam.usf.edu/CAM/exhibitions/1998\\_12\\_McCollum/supplemental\\_didactics/62.Zircon.pdf](http://cam.usf.edu/CAM/exhibitions/1998_12_McCollum/supplemental_didactics/62.Zircon.pdf) (15 de agosto de 2015).

Pompa-Mera, Valerie. *Geoquímica y geocronología de los complejos intrusivos en el sur de Chiapas, México*. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2009.

*Rocas plutónicas*. [http://www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_18/11.htm](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm) (18 de mayo de 2016)

Roche, de la. Et. Al. "A classification of volcanic and plutonic rocks using R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> diagrams and major element analysis – in relationship with current nomenclature". *Chemical Geology*, 29 (enero 1980): 183-210.

Rose, William. "Santa Maria, Guatemala: Bimodal soda-rich calc-alkalic stratovolcano". *Journal of volcanology and geothermal research*. 33 (enero 1987): 109-129.

Salazar, Josue. *Geología, petrología y geoquímica del Macizo de Chiapas, área de Motozintla de Mendoza*. Tesis Ingeniero Geólogo. Universidad Autónoma de México, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2008.

Schaaf, Peter. Et. Al. "Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence". *Tectonics*. 14 (diciembre 1995): 1339-1350.

Singer, Brad Et. Al. "Tracking open-system differentiation during growth of Santa María volcano, Guatemala". *Journal of Petrology*. 52:12, (septiembre 2011): 2335-2363

----- "Lying in wait: deep and shallow evolution of dacit beneath Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society, London, Special Publications*. 385 (junio 2013): 209-234.

Stoiber, Richard and Michael Carr. "Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America". *Bulletin Volcanologic*. 37:3 (septiembre 1973): 304-325.

Velasco-Tapia, Fernando Et. Al. "Estudio petrográfico y geoquímico del Complejo Plutónico El Peñuelo (Cinturón de Intrusivos de Concepción del Oro), noreste de México". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 63:2 (junio 2011): 183-199.

Villaseca, Carlos Et. Al. "A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. 89 (junio 1998): 113-119.

Williams, Howell. "Volcanic history of the Guatemalan highlands". *University of California Publications: Geological Sciences*. 38 (marzo 1960): 1-86.

Wolf, Ruth. *What is ICP-MS?*. [http://crustal.usgs.gov/laboratories/icpms/What\\_is\\_ICPMS.pdf](http://crustal.usgs.gov/laboratories/icpms/What_is_ICPMS.pdf) (15 de agosto de 2015).

*Zircon*. <http://www.mindat.org/min-4221.html> (15 de agosto de 2015).



V.ºB.º  
*[Handwritten signature]*

---

Adán García Véliz  
Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa  
Bibliotecario

**ANEXO I**  
**RELACIONES ISOTÓPICAS Y EDADES CORREGIDAS DE LAS**  
**MUESTRAS ANALIZADAS**



## RELACIONES ISOTÓPICAS MUESTRA EM-6664-16333-10

<b>CORRECTED RATIOS<sup>2</sup></b>												
	U (ppm) <sub>1</sub>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/ U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>20</sup> <sup>6</sup> Pb	±2s abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>2</sup> <sup>35</sup> U	±2s abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>2</sup> <sup>38</sup> U	±2s abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>23</sup> <sup>2</sup> Th	±2s abs	Rho
Zircon_36_G rZunil	308	186	0,6 0	0,1043	0,00 84	0,056 4	0,00 46	0,003 8	0,00 02	0,0024	0,00 02	0,28 5
Zircon_37	316	123	0,3 9	0,0543	0,00 69	0,027 5	0,00 36	0,003 6	0,00 01	0,0013	0,00 02	0,14 5
Zircon_38	584	275	0,4 7	0,0800	0,01 10	0,037 6	0,00 47	0,003 5	0,00 04	0,0017	0,00 02	- 0,04 6
Zircon_39	305	130	0,4 3	0,0563	0,00 82	0,027 9	0,00 41	0,003 6	0,00 02	0,0016	0,00 02	- 0,04 1
Zircon_40	1591	739	0,4 6	0,0548	0,00 37	0,026 4	0,00 17	0,003 5	0,00 01	0,0013	0,00 01	0,06 4
Zircon_41	1684	680	0,4 0	0,0498	0,00 42	0,024 9	0,00 20	0,003 7	0,00 01	0,0013	0,00 01	0,30 7
Zircon_42	554	202	0,3 6	0,0513	0,00 62	0,027 0	0,00 31	0,003 9	0,00 01	0,0016	0,00 01	0,07 4
Zircon_43	716	289	0,4 0	0,0579	0,00 66	0,030 6	0,00 31	0,003 8	0,00 02	0,0014	0,00 01	- 0,23 1
Zircon_44	494	248	0,5 0	0,0685	0,00 53	0,034 3	0,00 25	0,003 7	0,00 01	0,0016	0,00 01	0,30 4
Zircon_45	466	187	0,4 0	0,0520	0,00 57	0,024 7	0,00 24	0,003 4	0,00 02	0,0013	0,00 02	- 0,19 1
Zircon_46	473	234	0,4 9	0,0571	0,00 64	0,027 0	0,00 29	0,003 4	0,00 01	0,0013	0,00 01	0,07 6
Zircon_47	907	449	0,5 0	0,0527	0,00 47	0,024 7	0,00 22	0,003 4	0,00 01	0,0012	0,00 01	0,25 2
Zircon_48	475	222	0,4 7	0,0486	0,00 54	0,023 7	0,00 25	0,003 6	0,00 01	0,0012	0,00 01	0,12 1
Zircon_49	470	242	0,5 1	0,0551	0,00 67	0,025 6	0,00 30	0,003 5	0,00 01	0,0012	0,00 01	0,17 8
Zircon_50	538	208	0,3 9	0,0491	0,00 49	0,025 2	0,00 24	0,003 8	0,00 01	0,0015	0,00 01	0,11 6
Zircon_51	619	250	0,4 0	0,0498	0,00 59	0,025 9	0,00 29	0,003 7	0,00 01	0,0013	0,00 01	- 0,06 3
Zircon_52	356	121	0,3 4	0,0546	0,00 70	0,027 0	0,00 32	0,003 6	0,00 01	0,0014	0,00 01	- 0,18 6
Zircon_53	314	148	0,4 7	0,0498	0,00 61	0,024 6	0,00 25	0,003 5	0,00 01	0,0011	0,00 01	0,14 1
Zircon_54	290	114	0,3 9	0,0714	0,00 66	0,033 9	0,00 34	0,003 5	0,00 04	0,0014	0,00 02	0,04 9
Zircon_55	650	275	0,4 2	0,0590	0,00 62	0,028 3	0,00 26	0,003 6	0,00 01	0,0014	0,00 01	- 0,10 3
Zircon_56	419	283	0,6 8	0,0610	0,00 82	0,029 4	0,00 41	0,003 6	0,00 02	0,0014	0,00 01	0,24 2
Zircon_57	840	552	0,6 6	0,0506	0,00 48	0,024 5	0,00 18	0,003 5	0,00 01	0,0012	0,00 01	- 0,29 3
Zircon_58	744	311	0,4 2	0,0600	0,00 56	0,029 4	0,00 29	0,003 5	0,00 01	0,0014	0,00 01	0,22 2
Zircon_59	2141	1326	0,6 2	0,0510	0,00 47	0,025 5	0,00 21	0,003 7	0,00 01	0,0012	0,00 01	- 0,05 9
Zircon_60	311	132	0,4 2	0,0604	0,00 87	0,031 5	0,00 35	0,003 7	0,00 02	0,0016	0,00 02	0,22 7

Zircon_61	280	13 3	0,4 8	0,052 1	0,008 1	0,025 2	0,003 9	0,003 5	0,000 1	0,001 4	0,000 2	0,041
Zircon_62	578	22 4	0,3 9	0,062 1	0,007 1	0,028 8	0,003 0	0,003 5	0,000 1	0,001 5	0,000 1	0,150
Zircon_63	336	11 4	0,3 4	0,061 7	0,009 2	0,029 2	0,004 1	0,003 5	0,000 2	0,001 6	0,000 3	0,023
Zircon_64	413	15 0	0,3 6	0,062 7	0,007 2	0,030 4	0,003 0	0,003 7	0,000 1	0,001 6	0,000 2	- 0,196
Zircon_65	592	28 2	0,4 8	0,048 8	0,005 0	0,023 4	0,002 4	0,003 4	0,000 1	0,001 2	0,000 1	0,097
Zircon_66	123 9	54 7	0,4 4	0,051 1	0,004 7	0,025 5	0,002 2	0,003 6	0,000 1	0,001 3	0,000 1	- 0,042
Zircon_67	588	22 4	0,3 8	0,052 5	0,004 4	0,026 2	0,001 6	0,003 6	0,000 1	0,001 3	0,000 1	- 0,367
Zircon_68	139 0	80 9	0,5 8	0,053 5	0,004 4	0,027 0	0,001 9	0,003 6	0,000 1	0,001 4	0,000 1	- 0,021
Zircon_69	995	35 1	0,3 5	0,050 2	0,004 1	0,023 3	0,001 7	0,003 4	0,000 1	0,001 2	0,000 1	- 0,060
Zircon_70_GrZu nil	566	27 1	0,4 8	0,049 7	0,004 8	0,024 7	0,002 2	0,003 5	0,000 1	0,001 2	0,000 1	0,070

FUENTE: Trabajo de laboratorio, abril de 2016.

## EDADES CORREGIDAS DE CIRCONES MUESTRA EM-6664-16333-10

<i>CORRECTED AGES (Ma)</i>									
	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2s$	Best age (Ma)	$\pm 2s$	Disc %
Zircon_36_GrZ unil	24,4	4	55,6	4,5	1734	97	<b>24,4</b>	4,0	56,4 2
Zircon_37	22,92	0,91	27,5	3,5	680	110	<b>22,9</b>	0,9	16,6 5
Zircon_38	22,34	0,85	37,4	4,6	1130	190	<b>22,3</b>	0,9	40,3 5
Zircon_39	23,4	1,1	28,5	4,2	1000	150	<b>23,4</b>	1,1	17,8 9
Zircon_40	22,43	0,55	26,5	1,7	428	85	<b>22,4</b>	0,6	15,3 6
Zircon_41	23,58	0,68	25,4	2,2	324	82	<b>23,6</b>	0,7	7,17
Zircon_42	24,96	0,83	27	3,1	390	73	<b>25,0</b>	0,8	7,56
Zircon_43	24,47	0,93	30,5	3,1	600	110	<b>24,5</b>	0,9	19,7 7
Zircon_44	23,97	0,79	34,2	2,5	870	110	<b>24,0</b>	0,8	29,9 1
Zircon_45	22,13	0,96	24,8	2,3	490	130	<b>22,1</b>	1,0	10,7 7
Zircon_46	21,68	0,83	27	2,9	610	110	<b>21,7</b>	0,8	19,7 0
Zircon_47	21,91	0,65	24,8	2,1	413	98	<b>21,9</b>	0,7	11,6 5
Zircon_48	22,95	0,74	24,1	2,4	550	150	<b>23,0</b>	0,7	4,77

<b>Zircon_49</b>	22,28	0,83	25,6	2,9	470	120	<b>22,3</b>	0,8	12,9 7
<b>Zircon_50</b>	24,15	0,79	25,2	2,3	355	92	<b>24,2</b>	0,8	4,17
<b>Zircon_51</b>	23,67	0,9	25,9	2,9	384	86	<b>23,7</b>	0,9	8,61
<b>Zircon_52</b>	23,14	0,82	27	3,1	760	130	<b>23,1</b>	0,8	14,3 0
<b>Zircon_53</b>	22,44	0,9	24,6	2,5	550	130	<b>22,4</b>	0,9	8,78
<b>Zircon_54</b>	22,32	0,87	33,8	3,4	1006	95	<b>22,3</b>	0,9	33,9 6
<b>Zircon_55</b>	23,13	0,83	28,3	2,5	671	86	<b>23,1</b>	0,8	18,2 7
<b>Zircon_56</b>	23,08	0,99	29,4	4	810	180	<b>23,1</b>	1,0	21,5 0
<b>Zircon_57</b>	22,44	0,75	24,6	1,8	450	100	<b>22,4</b>	0,8	8,78
<b>Zircon_58</b>	22,83	0,61	29,8	2,7	640	120	<b>22,8</b>	0,6	23,3 9
<b>Zircon_59</b>	23,74	0,6	25,5	2,1	380	100	<b>23,7</b>	0,6	6,90
<b>Zircon_60</b>	23,5	1,1	31,5	3,4	690	110	<b>23,5</b>	1,1	25,4 0
<b>Zircon_61</b>	22,5	0,83	25,2	3,8	660	180	<b>22,5</b>	0,8	10,7 1
<b>Zircon_62</b>	22,25	0,79	28,8	3	650	130	<b>22,3</b>	0,8	22,7 4
<b>Zircon_63</b>	22,4	1	29,1	4	740	130	<b>22,4</b>	1,0	23,0 2
<b>Zircon_64</b>	23,51	0,87	30,4	3	800	100	<b>23,5</b>	0,9	22,6 6
<b>Zircon_65</b>	21,91	0,7	23,4	2,4	530	150	<b>21,9</b>	0,7	6,37
<b>Zircon_66</b>	23,21	0,6	25,6	2,2	330	70	<b>23,2</b>	0,6	9,34
<b>Zircon_67</b>	23,01	0,68	26,2	1,6	423	89	<b>23,0</b>	0,7	12,1 8
<b>Zircon_68</b>	23,28	0,58	27,1	1,9	370	120	<b>23,3</b>	0,6	14,1 0
<b>Zircon_69</b>	21,97	0,54	23,3	1,7	338	73	<b>22,0</b>	0,5	5,71
<b>Zircon_70_GrZ unil</b>	22,58	0,77	24,8	2,2	430	100	<b>22,6</b>	0,8	8,95

FUENTE: Trabajo de laboratorio, abril de 2016.

## RELACIONES ISOTÓPICAS MUESTRA EM-6487-16532-2

<i>CORRECTED RATIOS<sup>2</sup></i>												
	U (ppm) 1	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/ U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2s abs	<sup>207</sup> Pb / <sup>235</sup> U	±2s abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>2</sup> <sup>38</sup> U	±2s abs	<sup>208</sup> Pb/ <sup>2</sup> <sup>32</sup> Th	±2s abs	Rho
Zircon_01_ Cajola	1106	644	0,5 8	0,078	0,0075	0,022	0,002	0,002	0,000 1	0,0009	0,00 01	- 0,15
Zircon_02	906	662	0,7 3	0,073	0,0055	0,021	0,002	0,002	0,000 1	0,0009	0,00 01	0,33
Zircon_03	15210	3243	0,2 1	0,057	0,0087	0,015	0,003	0,002	0,000 0	0,0008	0,00 02	0,41
Zircon_04	727	447	0,6 1	0,095	0,0080	0,026	0,002	0,002	0,000 1	0,0009	0,00 01	- 0,03
Zircon_05	700	800	1,1 4	0,052	0,0110	0,013	0,003	0,002	0,000 1	0,0007	0,00 01	0,14
Zircon_06	1532	1472	0,9 6	0,119	0,0140	0,035	0,005	0,002	0,000 1	0,0011	0,00 01	0,39
Zircon_07	1335	1407	1,0 5	0,145	0,0160	0,043	0,007	0,002	0,000 1	0,0012	0,00 01	- 0,02
Zircon_08	862	786	0,9 1	0,061	0,0055	0,016	0,001	0,002	0,000 1	0,0006	0,00 00	0,10
Zircon_09	1179	1225	1,0 4	0,076	0,0130	0,020	0,003	0,002	0,000 1	0,0007	0,00 01	0,12
Zircon_10	5040	1385	0,2 7	0,055	0,0026	0,015	0,001	0,002	0,000 0	0,0008	0,00 00	0,25
Zircon_11	13170	2876	0,2 2	0,065	0,0099	0,018	0,003	0,002	0,000 1	0,0005	0,00 02	- 0,05
Zircon_12	553,7	383	0,6 9	0,058	0,0062	0,015	0,002	0,002	0,000 1	0,0007	0,00 01	0,15
Zircon_13	1029	1178,9	1,1 5	0,132	0,0140	0,038	0,005	0,002	0,000 1	0,0010	0,00 01	0,16
Zircon_14	873	753	0,8 6	0,063	0,0058	0,017	0,001	0,002	0,000 1	0,0007	0,00 01	0,08
Zircon_15	1259	1245	0,9 9	0,073	0,0110	0,020	0,003	0,002	0,000 1	0,0008	0,00 01	- 0,04
Zircon_16	1168	1179	1,0 1	0,074	0,0059	0,020	0,002	0,002	0,000 1	0,0008	0,00 00	0,20
Zircon_17	1189	4084	0,9 4	0,246	0,0190	0,077	0,130	0,002	0,000 4	0,0018	0,00 26	0,31
Zircon_18	1026,5	912	0,8 9	0,079	0,0089	0,021	0,003	0,002	0,000 1	0,0008	0,00 01	0,25
Zircon_19	1438,7	1839,1	1,2 8	0,069	0,0081	0,018	0,002	0,002	0,000 1	0,0007	0,00 00	0,25
Zircon_20	799,7	517	0,6 5	0,120	0,0120	0,033	0,004	0,002	0,000 1	0,0012	0,00 01	0,15
Zircon_21	994	724	0,7 3	0,072	0,0058	0,019	0,002	0,002	0,000 0	0,0007	0,00 00	0,09
Zircon_22	512	330	0,6 4	0,111	0,0140	0,031	0,004	0,002	0,000 1	0,0012	0,00 01	0,12
Zircon_23	810	681	0,8 4	0,079	0,0063	0,021	0,002	0,002	0,000 1	0,0008	0,00 01	0,23
Zircon_24	3960	1013	0,2 6	0,066	0,0030	0,018	0,001	0,002	0,000 0	0,0010	0,00 01	0,10
Zircon_25	817	576,4	0,7 1	0,085	0,0100	0,023	0,003	0,002	0,000 1	0,0009	0,00 01	- 0,09
Zircon_26	1382	1524	1,1 0	0,072	0,0045	0,019	0,001	0,002	0,000 0	0,0007	0,00 00	- 0,04
Zircon_27	990	1025	1,0 4	0,079	0,0069	0,020	0,002	0,002	0,000 1	0,0007	0,00 01	- 0,13
Zircon_28	1334	2042	1,5 3	0,139	0,0091	0,040	0,003	0,002	0,000 1	0,0010	0,00 01	0,55
Zircon_29	333	165,9	0,5 0	0,121	0,0180	0,031	0,004	0,002	0,000 1	0,0012	0,00 01	0,10
Zircon_30_ Cajola	773	566	0,7 3	0,114	0,0110	0,031	0,003	0,002	0,000 1	0,0011	0,00 01	- 0,07

FUENTE: Trabajo de laboratorio, agosto de 2016.

## EIDADES CORREGIDAS MUESTRA EM-6487-16532-2

<i>CORRECTED AGES (Ma)</i>									
	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2s$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2s$	Best age (Ma)	$\pm 2s$	Disc %
Zircon_01_Cajola	13,26	0,45	22,5	2,2	1297	100	<b>13,3</b>	0,5	<del>41,07</del>
Zircon_02	13,31	0,34	21,1	1,7	1068	100	<b>13,3</b>	0,3	<del>36,92</del>
Zircon_03	12,31	0,23	15,23	2,7	490	160	<b>12,3</b>	0,2	19,17
Zircon_04	13,11	0,43	26,2	2	1520	100	<b>13,1</b>	0,4	<del>49,96</del>
Zircon_05	12,33	0,68	13	2,5	750	210	<b>12,3</b>	0,7	5,15
Zircon_06	14,15	0,43	35,3	4,7	1890	160	<b>14,2</b>	0,4	<del>59,92</del>
Zircon_07	14,07	0,42	42,9	6,3	2303	130	<b>14,1</b>	0,4	<del>67,20</del>
Zircon_08	12,51	0,42	16	1,4	784	100	<b>12,5</b>	0,4	21,81
Zircon_09	12,41	0,41	20,3	3,3	1167	190	<b>12,4</b>	0,4	<del>38,87</del>
Zircon_10	12,55	0,22	14,8	0,7	430	71	<b>12,6</b>	0,2	15,20
Zircon_11	12,7	0,33	17,8	3,3	770	180	<b>12,7</b>	0,3	28,65
Zircon_12	12,38	0,41	15,5	1,6	720	130	<b>12,4</b>	0,4	20,13
Zircon_13	13,64	0,48	37,4	4,7	2122	120	<b>13,6</b>	0,5	<del>63,53</del>
Zircon_14	12,99	0,39	17,3	1,4	765	78	<b>13,0</b>	0,4	24,91
Zircon_15	12,79	0,38	20,2	3	1040	180	<b>12,8</b>	0,4	<del>36,68</del>
Zircon_16	12,56	0,32	19,8	1,7	1000	120	<b>12,6</b>	0,3	<del>36,57</del>
Zircon_17	<del>45,08</del>	<del>7</del>	<del>75,2</del>	<del>38</del>	<del>3171</del>	<del>470</del>	<del>3171,0</del>	<del>470,0</del>	<del>79,95</del>
Zircon_18	13,13	0,41	21	2,6	1130	170	<b>13,1</b>	0,4	<del>37,48</del>
Zircon_19	12,13	0,38	18,1	2,4	995	130	<b>12,1</b>	0,4	<del>32,98</del>
Zircon_20	12,74	0,51	32,5	3,7	2012	89	<b>12,7</b>	0,5	<del>60,80</del>
Zircon_21	12,5	0,32	18,8	1,5	1023	93	<b>12,5</b>	0,3	<del>33,54</del>
Zircon_22	13,86	0,55	30,9	4,3	1834	140	<b>13,9</b>	0,6	<del>55,15</del>
Zircon_23	12,48	0,38	21,1	1,7	1198	89	<b>12,5</b>	0,4	<del>40,85</del>
Zircon_24	13,1	0,3	18,5	0,79	820	60	<b>13,1</b>	0,3	29,19
Zircon_25	12,97	0,37	22,7	2,8	1230	150	<b>13,0</b>	0,4	<del>42,86</del>
Zircon_26	12,49	0,26	19,2	1,1	951	77	<b>12,5</b>	0,3	<del>34,95</del>
Zircon_27	11,83	0,37	19,9	1,8	1169	120	<b>11,8</b>	0,4	40,55
Zircon_28	13,98	0,35	40,1	2,6	2218	88	<b>14,0</b>	0,4	<del>65,14</del>
Zircon_29	12,92	0,51	31	4,3	1960	140	<b>12,9</b>	0,5	<del>58,32</del>
Zircon_30_Cajola	13,11	0,41	31,2	2,7	1876	120	<b>13,1</b>	0,4	<del>57,98</del>

FUENTE: Trabajo de laboratorio, agosto de 2016.

No. 059-2017

**USAC  
CUNOR**

Universidad de San Carlos de Guatemala  
Centro Universitario del Norte



El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer los dictámenes de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

**INGENIERO GEOLOGO**

Al trabajo titulado:

**GEOQUIMICA, PETROGRAFIA Y GEOCRONOLOGIA DE LAS ROCAS GRANITICAS  
AL NOROESTE Y SUROESTE DE LA CALDERA DE QUETZALTENANGO,  
QUETZALTENANGO**

Presentado por el (la) estudiante:

**EDGAR ROBERTO MÉRIDA BOOGHER**

Autoriza el

**IMPRIMASE**

Cobán, Alta Verapaz 30 de Marzo de 2017.

  
Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales  
DIRECTOR

