

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE GEOLOGIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN



TESIS

**PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL
PLUTÓN LA UNIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA UNIÓN Y
GUALÁN, ZACAPA, GUATEMALA**

FRANCIS EMANUEL SALGUERO DÍAZ

COBÁN, ALTA VERAPAZ, OCTUBRE DE 2016

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE GEOLOGIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**INFORME FINAL DE TESIS, TITULADO
PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL
PLUTÓN LA UNIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA UNIÓN Y
GUALÁN, ZACAPA. GUATEMALA**

**PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE**

**POR:
FRANCIS EMANUEL SALGUERO DÍAZ
201140384**

**COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

COBÁN, ALTA VERAPAZ, OCTUBRE DE 2016

**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS
RECTOR MAGNÍFICO**

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

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

COORDINADOR ACADÉMICO

Lic. Zoot. Erwin Fernando Monterroso Trujillo

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geol. Sergio David Morán Ical

COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR Ing. Geol. Osmín Jared Vásquez Hernandez
SECRETARIO Ing. Geol. Silvia Cortés Bendfeldt
VOCAL Ing. Geol. Ricardo Enrique Milián De la Cruz

REVISORES DE REDACCIÓN Y ESTILO

Lic. Marvin Aníbal Cuz Kuckling

REVISOR DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

Ing. Geol. Luis Gustavo Chiquín Marroquín

ASESORES

Ing. Geol. Osmín Jared Vásquez Hernandez
Luigi Solari, Ph.D.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CENTRO DE GEOCIENCIAS

Apartado Postal 1-742, Querétaro, Qro. 76001
Tels: Qro: (442)2381116, ext. 177 Cd. Mexico: (55) 56234116 ext. 177
Fax: (442) 2381101; <http://www.geociencias.unam.mx>



**Comisión de Trabajos de Graduación
CUNOR, Cobán, Guatemala**

PRESENTE

Por medio de la presente hago constar que he realizado el trabajo de tesis del Estudiante Francis Emanuel Salguero Díaz, con número de carné 201140384, y cuyo título es "*Petrografía, Geoquímica y geocronología del plutón la Unión en los municipios de la Unión y Gualán, Zacapa, Guatemala*". El trabajo de tesis es satisfactorio y plenamente aprobado. Por lo tanto, en mi juicio el estudiante puede proceder con solicitar fecha de examen.

Sin otro por el momento, reciban un saludo cordial

Campus Juriquilla, a 27 de julio de 2016

Dr. Luigi Solari
UNAM, Centro de Geociencias
Campus Juriquilla
Juriquilla, Querétaro
76230 Querétaro, QRO

Tel. (+52) 442 2381104 ext 119
Fax. (+52) 5623 4129
e-mail: solari@servidor.unam.mx

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

Ref. 15-CG-227/2016
28 de julio de 2016

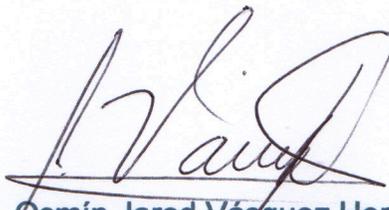
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

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. FRANCIS EMANUEL SALGUERO DÍAZ**, carné n.º **201140384**, titulado: **“PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL PLUTÓN LA UNIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA UNIÓN Y GUALÁN, ZACAPA, GUATEMALA”**, 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. Osmín 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

Ref. 15-CG-257/2016
08 de septiembre de 2016

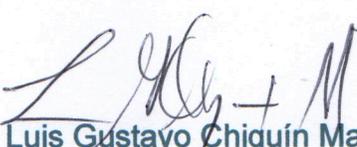
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

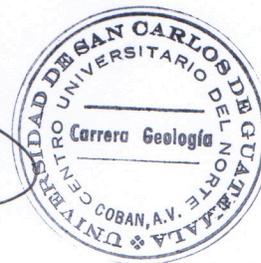
Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. FRANCIS EMANUEL SALGUERO DÍAZ**, carné n.º **201140384**, titulado: **“PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL PLUTÓN LA UNIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA UNIÓN Y GUALÁN, ZACAPA, GUATEMALA”**, 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. Luis Gustavo Chiquín Marroquín
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.: geologiausac@gmail.com

Ref. 15-CG-293/2016
17 de octubre de 2016

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: **“PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL PLUTÓN LA UNIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA UNIÓN Y GUALÁN, ZACAPA, GUATEMALA”**, realizado por el (la) T.U. **GEÓL. FRANCIS EMANUEL SALGUERO DÍAZ**, carné n.º **201140384**, 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”

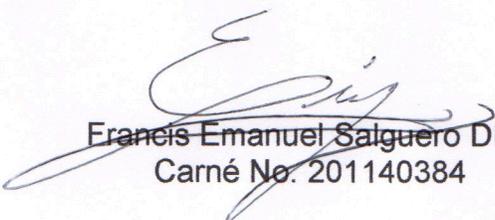
Lic. Marvin Anibal Cuz Kuckling
Comisión Redacción y Estilo
Carrera Geología, CUNOR



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 a ustedes el Informe Final de Trabajo de Graduación titulado, "PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL PLUTÓN LA UNIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA UNIÓN Y GUALÁN, ZACAPA. GUATEMALA", como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo,



Francis Emanuel Salguero Díaz
Carné No. 201140384

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 forma”

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2.4., sub inciso 2.4.1. del Acta No. 17-2012 de Sesión Extraordinaria del Consejo Directivo de fecha 18 de julio de 2012.

DEDICATORIA

Mis padres, abuelos, hermanas y sobrinas ya que ellos fueron la fuente de mi inspiración durante todo mi proceso de formación académica.

A mi novia Julissa y su familia, por su sincera y gran amistad que me han demostrado en todo este tiempo y por ayudarme a enfrentar todos los retos durante este proceso.

A los docentes y amigos que me apoyaron en el desarrollo de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Lorena y Francis, quienes a lo largo de mi vida han brindado su apoyo incondicional en mi formación académica, juntos hemos logrado una nueva meta.

A mis hermanas, Glendy y Margarita, por apoyarme y motivarme siempre, gracias por su gran ejemplo.

A mi familia y amigos que fueron, son y seguirán siendo muy importantes en mi vida.

A la tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente al Centro Universitario del Norte, por permitirme seguir creciendo como persona y formándome como profesional

La carrera de Geología y a los docentes que la conforman, por sus enseñanzas, sin las cuales no hubiera sido posible realizar la presente investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Centro de Geociencias y al Dr. Luigi Solari por su gran apoyo y soporte para el desarrollo de esta investigación.

A la municipalidad de La Unión, por permitirme realizar mis prácticas en su territorio.

Muchas gracias,
Francis Emanuel

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE MAPAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	iv
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Antecedentes	5
1.4 Objetivos	7
1.3.1 General	7
1.3.2 Específicos	7
1.5 Ubicación y extensión de la investigación	7
1.6 Accesos	8
1.7 Marco geológico regional	9
1.7.1 Estratigrafía	9
a Estratigrafía del paleozoico	9
b Estratigrafía del mesozoico	10
c Estratigrafía del cenozoico	11
1.7.2 Geología Estructural	13
1.8 Marco teórico	15
CAPÍTULO 2	
METODOLOGÍA	
2.1 Marco metodológico	19
2.1.1 Etapa de recopilación bibliográfica	19
2.1.2 Etapa de campo	19
2.1.3 Etapa de laboratorio	20
2.1.4 Etapa de gabinete	24
2.2 Metodología	24
2.2.1 Petrografía	24
a Clasificación mineralógica	24
b Clasificación textural	26
2.2.2 Geocronología	26
a Método U-Pb	26
b Circón	28
c Método U/Pb	28
2.2.3 Geoquímica	30

a	Elemento mayores	30
1	Mineralogía normativa	30
2	Índice de saturación de sílice (ISS)	31
3	Índice de saturación de alúmina (ISA)	31
4	Criterios en base a la alcalinidad (CBA)	32
5	Clasificación R1-R2 (De La Roche 1980)	34
6	Discriminación tectónica	35
b	Elementos traza y REE	36
1	Clasificación Zr/TiO ₂ – SiO ₂ (Winchester & Floyd 1977)	36
2	Diagramas multielementales y REE	37
3	Ambiente geodinámico	39
CAPÍTULO 3		
DISCUSIÓN DE RESULTADOS		
3.1	Petrografía	45
3.2	Geocronología	53
3.3	Geoquímica	62
3.3.1	Elementos mayores	62
3.3.2	Elementos traza y REE	71
3.4	Discusión	80
3.4.1	Características de las unidades	80
a	Intrusivo JMB (Monzogranito La Unión)	80
b	Intrusivo POR (Monzogranito Campanario y POR-D (Cuarzomonzodiorita Tres Pinos)	81
c	Intrusivo POC (Sienogranito Pacayalito)	83
3.4.2	Génesis	84
a	Intrusivo JMB (Monzogranito La Unión)	84
b	Intrusivo POR (Monzogranito Campanario y POR-D (Cuarzomonzodiorita Tres Pinos)	85
c	Intrusivo POC (Sienogranito Pacayalito)	86
3.4.3	Magmatismo calcoalcalino rico en potasio (High-K)	87
CONCLUSIONES		89
RECOMENDACIONES		93
BIBLIOGRAFÍA		95
ANEXOS		
Anexo I	Mapa geológico	101
Anexo II	Perfiles geológicos	103
Anexo III	Descripción de las muestras recolectadas	105
Anexo IV	Elementos mayores y traza	115
Anexo V	Registro isotópico	118

ÍNDICE DE TABLAS

1	Vértices del área de investigación	8
2	Decaimiento radiactivo U-Pb como geocronómetro dentro del sistema	27
3	Características isotópica de U y Pb	27
4	Ecuaciones simplificadas del decaimiento radiométrico U-Pb	28
5	Criterio del índice de saturación de sílice (ISS)	31
6	Ambiente geodinámico	42
7	Muestras evaluadas	43
8	Mineralogía de muestras recolectadas	45
9	Textura de muestra recolectadas	46
10	Edades de muestras analizadas	53
11	Rango policromático de los grupos ígneos	62
12	Mineralogía normativa	63
13	Índice de saturación de sílice (ISS)	64
14	Resumen de resultados de elementos mayores	70
15	Ambiente geodinámico (Winter 2001)	78
16	Resumen de resultados de elementos traza y REE	79

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Accesos regionales	8
2	Columna litoestratigráfica regional	12
3	Elipse de deformación de movimiento sinistral	13
4	Mapa tectónico regional	15
5	Clasificación de Streckeissen (1976)	25
6	Clasificación textural de rocas ígneas	26
7	Diagrama de concordia de Wetherhil (1956)	29
8	Diagrama de Shand (1943)	32
9	Diagrama McDonald & Katsura (1984)	33
10	Diagrama AFM (1971)	33
11	Diagrama SiO ₂ – K ₂ O (1976)	34
12	Diagrama R1-R2 (1980)	35
13	Diagrama de discriminación por marco tectónico B-A (modificado por Villaseca et. Al. 1998)	36
14	Clasificación Zr/TiO ₂ – SiO ₂ (Winchester & Floyd 1977)	37
15	Diagrama tectónico Hf – Rb/30 – 3Ta (Harris et. Al. 1986)	40
16	Discriminación tectónica (Pearce et. Al 1984)	41
17	Mapa de ubicación de lugares de interés	44
18	Diagrama de clasificación modal	46
19	(a) Relación isotópica de la muestra TFS-PLU-06 (b) relación isotópica y edad de la TFS-PLU -06	55
20	(a) Relación isotópica de la muestra TFS-PLU-11 (b) relación isotópica y edad de la TFS-PLU-11	56
21	(a) Relación isotópica de la muestra TFS-PLU-04 (b) relación	57

	isotópica y edad de la TFS-PLU-04	
22	(a) Relación isotópica de la muestra TFS-PLU-05 (b) relación isotópica y edad de la TFS-PLU-05	58
23	(a) Relación isotópica de la muestra TFS-PLU-10 (b) relación isotópica y edad de la TFS-PLU-10	59
24	Circones analizados	61
25	Diagramas ISA (Shand 1943)	65
26	Alcalinidad basado en McDonald & Katsura (1964)	66
27	Clasificación subalcalina	66
28	Clasificación calcoalcalina	67
29	Clasificación por método R1-R2 (De La Roche 1980)	68
30	Clasificación B-A (Modificado de Villaseca et. Al. 2001)	69
31	Zr/TiO ₂ – SiO ₂ (Winchester & Floyd 1977)	71
32	Elementos traza normalizaos a manto primitivo (mcDonough & Sun 19995)	72
33	REE normalizadas a condritas (McDonough & Sun 19995)	75
34	Diagrama Hf – Rb/30 – 3Ta (Harris et. Al. 1986)	76
35	Marco Tectónico (pearce et. Al. 1984)	77

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

1	Zona de cizalla sobre río La Jigua	48
2	Contacto fallado LOC – PLU	50
3	Granito deformado en facies esquistosa	51
4	Granito deformado en facies gnéisica	52

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolla con el fin de analizar los aspectos petrográficos, geoquímicos y geocronológicos de las rocas ígneas de la zona de estudio que se encuentra comprendida entre los municipios de La Unión y Gualán, Zacapa, con la finalidad de enriquecer la información geológica a una escala que muestre más detalles regionales sobre dicho territorio.

Los cuerpos ígneos se definieron como unidades formales con base a datos de campo, análisis petrográfico, análisis geoquímico y datación radiométrica por el método U/Pb, donde se definieron cuatro intrusivos, Monzogranito La Unión (JMB), Monzogranito Campanario (POR), Cuarmonzodiorita Tres Pinos (POR-D) y Sienogranito Pacayalito (POC), todos estos cuerpos se encuentran intruyendo al basamento de la zona, el cual, es dominado por las rocas metasedimentarias de bajo grado pertenecientes a la Filita San Diego (FSD). Las rocas ígneas se encuentran deformadas al norte por la Falla Motagua, formando un grupo de rocas metaígneas comúnmente asociadas al Complejo Las Ovejas, las cuales se generaron por la deformación regional del Monzogranito La Unión (Plutón La Unión).

El origen de estos cuerpos ígneos está ligada a la composición de la roca generadora, las condiciones que implicaron su emplazamiento así como la evolución magmática a través de la corteza.

INTRODUCCIÓN

La investigación consistió en el cartografiado geológico a escala 1:50 000 en La Unión y Gualán Zacapa, con el objetivo de determinar las características petrográficas, geoquímicas, geocronológicas y estructurales regionales que poseen las rocas ígneas agrupada como Plutón La Unión, con el fin de proponer el origen y la evolución de dichos intrusivos, basados en modelos ya establecidos.

Los modelos propuestos por diversos autores se fundamentan en la concentración de algunos minerales, elementos mayores y traza, los cuales son fundamentalmente necesarios para clasificar las rocas, así como determinar la evolución que estos han tenido y las implicaciones necesarias para su emplazamiento en la corteza perteneciente a lo que se conoce hoy en día como Terreno Sula.

Fue necesario realizar estudios petrográficos, geocronológicos y geoquímicos de elementos mayores y elementos traza a un grupo de rocas previamente seleccionadas con el fin de medir su composición modal y química, así como las relaciones litoestratigráficas que estas poseen.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Guatemala se caracteriza por la interacción de 3 placas tectónicas que forman 2 márgenes tectónicos importantes, la zona de subducción de la Placa Cocos debajo de la Placa Caribe y el movimiento sinistral de la Placa Caribe con respecto a la Norteamérica. Dicho movimiento de rumbo se originó a partir de la colisión del Bloque Maya y el Bloque Chortí, los cuales previamente se encontraban interactuando en una antigua zona de subducción donde aparentemente bajo el Bloque Maya se subducía el Bloque Chortí hasta el Cretácico (Giunta 2002).

El argumento antes mencionado posee algunas deficiencias, ya que, durante la actividad de esa antigua zona de subducción, se generó una diversidad de cuerpos ígneos intrusivos localizados (en lo que se considera como placa Caribe) que se emplazaron sobre rocas metamórficas que en ese momento formaban la caja del Plutón La Unión, Plutón Chiquimula y otros pequeños cuerpos aislados que existen entre ellos.

Dichos cuerpos metamórficos representan gran importancia para la tectónica regional ya que están contenidos dentro de las Fallas Motagua y Jocotán-Chamelecón y a su vez sirviendo de roca reservorio para el emplazamiento de diversos cuerpos ígneos en la franja denominada por Ortega, et al. (2006) como el terreno Sula.

Ratschbacher (2009), Pindell (2011) y Torres De León, et al. (2012) consideraron factores geológicos importantes en cuanto a la formación del terreno Sula que está compuesto por el Complejo Las Ovejas, Filita San Diego, Complejo el Tambor, y Filita Agua Salobrega, en Guatemala. Dichos autores definieron unidades en base a fechamientos de circones por medio del método U-Pb para establecer la secuencia de eventos de deformación que han sufrido dichos cuerpos metamórficos, ya que estos poseen una gran complejidad en cuanto a sus relaciones estratigráficas y la edad que estos presentan.

Tomando en cuenta todo lo anterior se genera la pregunta de investigación:

¿Cuáles son las características petrográficas, geoquímicas y la edad del Plutón La Unión en Guatemala?

1.2 Justificación

El Bloque Chortí, está conformado por terrenos tectonoestratigráficos, los cuales presentan una diversidad geológica muy compleja y poco correlacionable. El área de investigación se desarrolla sobre el Terreno Sula, el cual es una sección que alberga una serie de cuerpos metamórficos e ígneos con complicadas relaciones de campo poco estudiadas, por tanto, se sugiere implementar un análisis geoquímico de elementos mayores y traza en las rocas ígneas que conforman el Plutón La Unión para determinar el origen del intrusivo y a su vez establecer la evolución magmática y tectónica que ha sufrido dicha zona.

Además, es necesario considerar estudios geocronológicos para establecer las relaciones estratigráficas que poseen las rocas intrusivas internamente, así como con las unidades metamórficas adyacentes, ya que dicha unidad se emplazó durante el Jurásico aparentemente sobre la Filita San Diego y puede revelar datos muy importantes para realizar estudios de paleogeografía en el futuro.

Es de gran importancia establecer estas relaciones contenidas dentro del Terreno Sula, en las cuales, se encuentra implicado El Complejo Las Ovejas que forma una de las unidades metamórficas más relevantes de dicho terreno, así como del Bloque Chortí, el cual ha sido catalogado a través del tiempo como el basamento del mismo.

1.3 Antecedentes

El cuerpo ígneo que se desarrolla en el municipio de La Unión, Gualán y Río Hondo en Zacapa posee pocos datos geológicos, donde lo que más sobresale es el mapa Chiquimula a escala 1:250 000 producido por el Instituto Geográfico Militar –IGM- publicado en 1969.

Se debe tomar en cuenta que no existe ninguna información pública en cuanto a datos geoquímicos y geocronológicos y que dicho cuerpo ha sido correlacionado por varios autores como Clemmons (1976), Donnelly (1990) Beccaluva (1994), Giunta (2002), con el Batolito Chiquimula.

Realmente no es posible llegar a establecer dichas relaciones estratigráficas porque no se cuenta con estudios a detalle en ambas zonas sobre geoquímica ó geocronología.

Lawrence (1981) describió la Filita San Diego como rocas metamórficas de bajo grado con facies de esquistos verdes: compuesta por filita, esquisto y pizarra con interestratificaciones delgadas de cuarcita. El examen petrográfico de las rocas, reveló principalmente cuarzo y moscovita, con algo de clorita y pirita.

Ratschbacher, et al. (2009) establece que en los límites tectónicos entre las placas Norteamericana y Caribe existe una diversidad de cuerpos ígneos que se encuentran emplazados en el Complejo Las Ovejas, Filita San Diego y Esquistos Cacaguapa, los cuales han sido poco documentados; pero aseguran que los granitoides que se localizan en la zona norte del bloque Chortí han sido poco deformados y por falta de estudios geocronológicos por U-Pb no hay claras asignaciones de fechamientos para los cuerpos ígneos, aunque algunas dataciones en la región arrojan intervalos de 36, 40 y 59 Ma, y menos comunes 81, 120, 161 y 260 Ma.

Pindell, et al. (2011) sostienen que el Complejo Las Ovejas se encuentra exhumado desde el Cretácico superior y ahora está cubierto por el mélangé serpentinitico sur de la falla Motagua y ha sido cabalgado hacia el sur por la Filita San Diego, con la cual ha sido reunida mediante (1) fallas durante las últimas etapas de la elevación de la Las Ovejas o (2) el empuje hacia el sur de una flor transpresiva del Motagua en rocas metamórficas de las Ovejas luego de su exhumación.

Torres, et al. (2012) establecen que las Filita San Diego y el Complejo las Ovejas son unidades litotectónicas distintas que se yuxtaponen tectónicamente, tal vez durante o después del metamorfismo del Eoceno-Oligoceno del Complejo Las Ovejas en la zona cercana a Gualán, además estipulan que los ortogneis pueden estar vinculados ó ser parte del Plutón La Unión y que Filita San Diego pudiera llegar hasta

cierto punto a ser el protolito del Complejo Las Ovejas, aunque todavía no está bien documentado dicho argumento.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Determinar el origen y evolución del Plutón La Unión, con base en las características petrográficas y geoquímicas de elementos mayores y traza de la sección que aflora en el oriente de Guatemala.

1.4.2 Específicos

- Evaluar petrográficamente el espectro de rocas pertenecientes al Plutón La Unión.
- Definir la edad de los cuerpos ígneos por medio dataciones radiométricas por el método U/Pb en circones.
- Analizar los datos geoquímicos de elementos mayores y traza obtenidos mediante resultados de laboratorio.
- Establecer las relaciones estratigráficas existentes entre el Pluton La Unión, el Complejo Las Ovejas y la Filita San Diego.

1.5 Ubicación y extensión de la investigación

Inicialmente se propone un área de 130km² con la debida observación de que dicha extensión se encuentra sujeta a cambios ya sea de ampliación o reducción según sea la necesidad para aprovechar mejor los afloramientos que pueda ofrecer el intrusivo. La extensión propuesta abarca las coordenadas:

TABLA 1
Vértices de área de estudio

Vértice A E244000/N1665000	Vértice B E257000/N1665000
Vértice C E244000/N1655000	Vértice D E257000/N1655000

1.6 Accesos

El acceso principal para llegar al área de estudio es la CA-9 (Ver fotografía 1), donde la distancia marcada entre la ciudad de Cobán y el municipio de La Unión es aproximadamente 245 km y la distancia desde ciudad Guatemala a la misma es de 195km.

FIGURA 1
ACCESOS REGIONALES



Fuente: modificado de Google Eath® para fines ilustratvos

1.7 Marco geológico regional

Guatemala se encuentra dividida en dos bloques: bloque Maya y bloque Chortí, unidos por la zona de sutura del Motagua que cuenta con características de ambos bloques. Dichos bloques se encuentran formando el límite tectónico entre la Placa Norteamericana y la Placa Caribe, que constituyen el contexto tectónico regional que ha afectado a lo largo del tiempo geológico. Para una mejor percepción de la estratigrafía regional se caracterizó de forma cronológica a través del tiempo, en orden de la más antigua a la más reciente.

1.7.1 Estratigrafía

a) Estratigrafía del Paleozoico:

Filita San Diego

Inicialmente fue descrita por Lawrence, David (1975) como: rocas metamórficas de facies de esquistos verdes, compuestas por filita, esquisto y pizarra con interestratificaciones delgadas de cuarcita.

Ortega, Fernando, et. al. (2006) en su trabajo The Maya-Chortis boundary: a tectonostratigraphic approach indica:

“La secuencia en la región de San Diego - La Unión localizada entre las fallas Motagua y Jocotán consiste en rocas de muy bajo grado libres de carbonato, con unidades laminares de siliciclásticos que varían de metapelitas oscuras a esquistos feldespáticos y conglomerados de grano

fino con clastos de chert, cuarcitas y venas de cuarzo y remanentes de pirita.”¹

Ratchbacher, et al. (2009) cita a Solari, et al. (2008) el cuál estableció una edad cronológica para estas rocas metamórficas, por el método U/Pb de 520 Ma, durante el piso 3 perteneciente al Cámbrico.

b) **Estratigrafía del Mesozoico:**

Plutón la Unión

Ortega, Fernando, et. al. (2006) en su trabajo *The Maya-Chortis boundary: a tectonostratigraphic approach* indica:

“A lo largo del valle del Motagua y al sur de la Falla del Motagua, varios cuerpos intrusivos como El Complejo Las Ovejas y la filita San Diego, poseen una edad aparente en base a Rb/Sr y ³⁹Ar/Ar⁴⁰ con edades de 104 a 35 Ma.”²

Torres de León, et. al. (2012) en su investigación “*The Chortís Block-Southwestern México Connections: U-Pb Zircon Geochronology*” sugieren una edad para el Plutón La Unión de jurásica media. En dicha publicación le denominan al “Plutón La Unión” como “Granito La Unión” siendo este más antiguo que el Plutón Chiquimula que posee una edad Cretácica Superior.

¹ Fernando Ortega Gutiérrez. *The Maya-Chortís Boundary: A Tectonostratigraphic Approach*, (México: 2006), P24

² *Ibidem*, 31.

c) **Estratigrafía del Cenozoico:**

Aluvión

Unidad constituida por una serie de depósitos que se localizan sobre las redes fluviales. Leal, Dulce (2012) en su trabajo de EPS “Evaluación de susceptibilidad por deslizamientos en un área de 8 km² en el casco urbano de La Unión” argumenta:

“Dicha unidad se encuentra principalmente alrededor del río La Jigua, dirigiéndose de Norte a Sur, aunque también rodea varias de las quebradas. Posee bloques subredondeados a redondeados que van desde los pocos centímetros hasta los 3 metros aproximadamente y están constituidos por granito, peridotita, esquistos, filitas. Existe abundante arrastre de material fino, tal como lo es la arena.”³

Coluvión

Unidad constituida por una serie de deslizamientos ubicados en diversos puntos del área. Leal, Dulce (2012) agrega y sostiene que:

“Se localizó en por lo menos 4 puntos de la unidad de práctica, tanto inmersa en la unidad de filita como en la unidad de intrusivo, en zonas de pendiente relativamente plana y consideradas inestables en cuanto a deslizamientos se refiere.”⁴

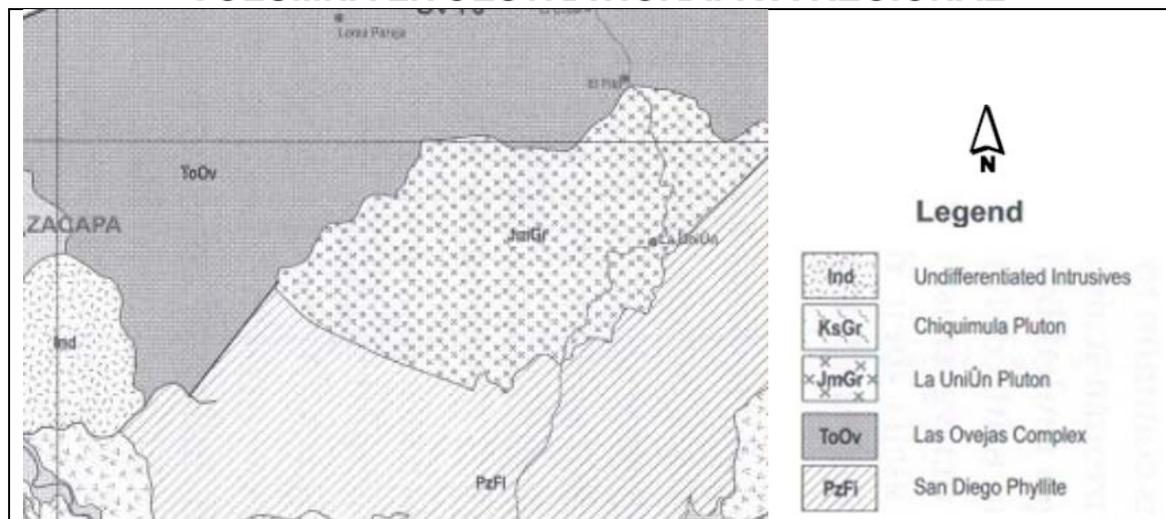
³ Ibídem, 26.

⁴ Dulce Leal Sosa. Evaluación de susceptibilidad por deslizamientos en un área de 8 km² en el casco urbano del municipio de La Unión, (Marzo 2012). 27.

La litoestratigrafía se desarrolla en torno a la disposición de las unidades en relación de unas con otras a través de relaciones estratigráficas ya establecidas en las que se ordenan los eventos cronológicamente para establecer la secuencia de eventos de formación de cierta zona.

Torres De León, et. al. (2012) en su publicación “*The Chortís Block-Southwestern México Connections: U-Pb Zircon Geochronology*” propusieron la columna litoestratigráfica (por tipo de roca) regional, donde resaltan las relaciones entre la Filita San Diego y el Complejo Las Ovejas como roca caja del Plutón La Unión. (Figura 2)

FIGURA 2
COLUMNA LITOESTRATIGRÁFICA REGIONAL



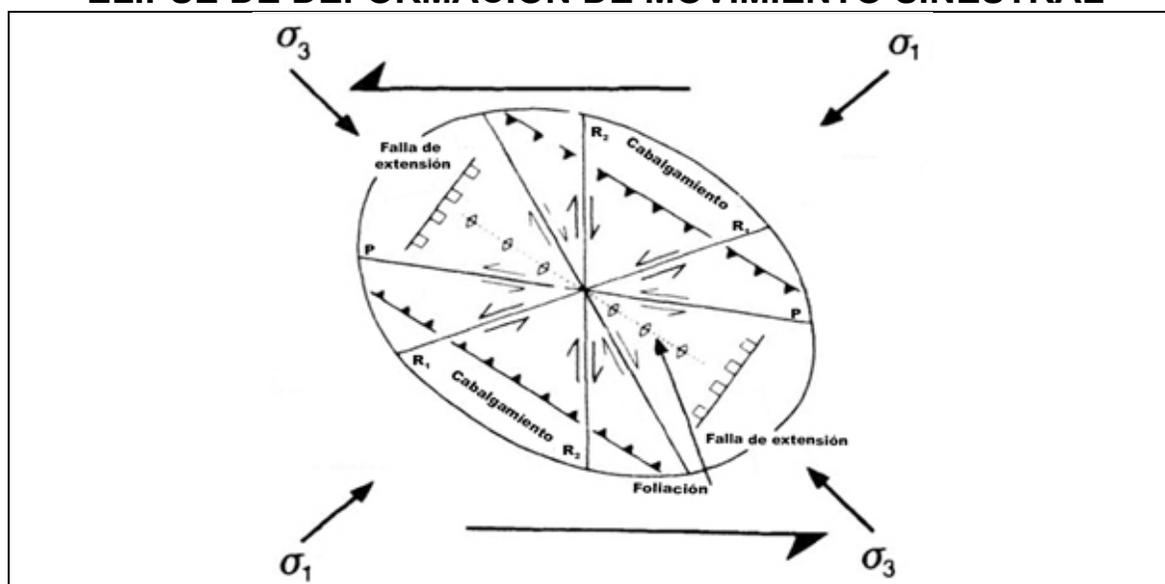
Fuente: Torres De León, et. al. *The Chortís Block-Southwestern México Connections: U-Pb Zircon Geochronology*, 2012, p293.

1.7.2 Geología estructural

El Bloque Chortí forma parte de la Placa del Caribe y se localiza al sur de la falla Motagua. Posee un basamento metamórfico con rocas de alto grado (Complejo Las Ovejas) y otras de bajo grado (Filita San Diego) con edades indefinidas que se modifican por autor y método; además es albergue del Plutón Chiquimula y Plutón La Unión, etc.

El área se encuentra en una región de rocas metamórficas e ígneas, estas se encuentran asociadas con la zona de falla Motagua y Jocotán, donde la Filita San Diego forma una “cuña” que inicia en el centro del país y se extiende hacia el oriente y se encuentra cabalgando sobre el Complejo Las Ovejas. Los sistemas de fallas Motagua y Jocotán se desplazan con un movimiento sinistral (Figura 3) O-E.

FIGURA 3
ELIPSE DE DEFORMACIÓN DE MOVIMIENTO SINISTRAL



Fuente: *The mapping of geological structures*, Ken McClay (2007), *Department of Geology, Royal Holloway University of London*, Elipse de Deformación, Sinistral.

La falla Motagua es de tipo transformante sinistral, se localiza en la zona central del país y forma lo que se le denomina Valle del Motagua ya que sigue el curso del río Motagua.⁵

La falla Jocotán se encuentra al sur de la zona de la Falla del Motagua y al igual que esta, es de movimiento sinistral y más hacia el Oeste, se encuentra cubierta de materiales volcánicos del Terciario y Cuaternario por lo que no hay evidencias concretas de su continuidad.⁶

En el trabajo de T. W. Donnelly, et. al. titulado *Northern Central America, The Maya and Chortis Blocks* se describe:

“El bloque Chortí está definido clara y marcadamente al noroeste por la zona de falla Motagua y al sudoeste por la Fosa Mesoamericana, margen de la Placa de Cocos (Figura 5). El límite sur del basamento del bloque Chortís ha sido cubierto por rocas volcánicas del Cenozoico.”⁷

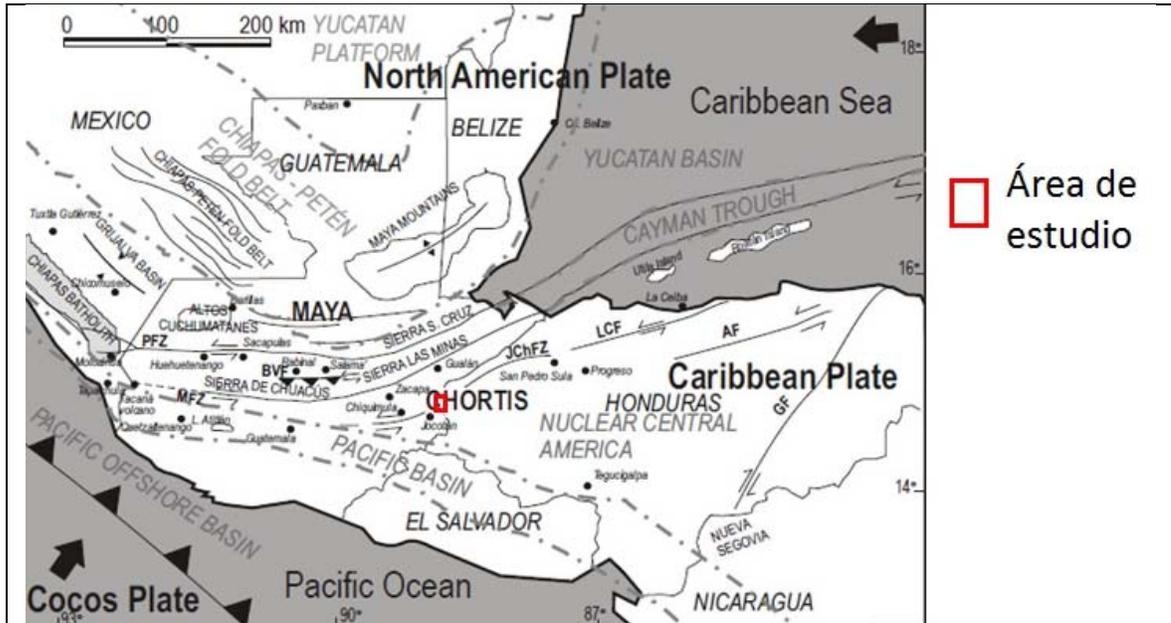
Salguero (2013) en su investigación “Modelo Petrológico del Plutón La Unión” determinó que en un área de 24 kilómetros cuadrados cercano a la cabecera municipal se localiza una elipse de deformación local con vectores de esfuerzo principal hacia N035° y una extensión a N305°.

⁵ T. W. Donnelly, G. S. Horne, y Otros. *Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks*. Traducido por Mauricio Chiquín Yoj. 21.

⁶ *Ibidem*,. 21

⁷ *Ibidem*,. 21

FIGURA 4
MAPA TECTÓNICO REGIONAL



Fuente: *The Maya-Chortís Boundary: A Tectonostratigraphic Approach*, Ortega Gutiérrez, et al. (2006), p68

1.8 Marco teórico

Las rocas ígneas se originan a partir de la cristalización del magma proveniente de la corteza ó del manto, y se pueden clasificar por los siguientes parámetros:

- Su origen
- Su textura
- Su composición mineralógica
- Su composición química
- Su ambiente

Para esto es necesario establecer algunas definiciones y conceptos para comprender mejor los parámetros asociados a las rocas ígneas, los cuales se detallan a continuación:

Circón	Silicato de circonio ($ZrSiO_4$), el cual perteneciente al grupo de los nesosilicato y cuenta con algunas características importantes como su dureza entre 6,5-7,5 en la escala de Mohs, densidad de $4,7 \text{ g/cm}^3$ y es un mineral que es pobremente magnético.
Cuerpo ígneo	Es un cuerpo rocoso que se ha generado a partir de magma que se ha cristalizado en el interior o el exterior de la corteza terrestre.
Datación	Técnica empleada para la estimación de la edad de materiales geológicos, tales como rocas, minerales o materia orgánica a partir de isótopo radioactivos. Se fundamenta en las series de desintegración de isótopos con tasas constantes de decaimiento.
Geocronología	Conjunto de métodos que permiten datar formaciones geológicas, formas topográficas, vestigios de plantas y animales además de tejido antiguos.
Geoquímica	Ciencia que estudia la composición, distribución y abundancia de elementos químicos incluyendo los isótopos en minerales, rocas suelos, agua y atmósfera, así como las causas de la distribución de los mismos.
Gradación mineral	Es un cambio que existe en la composición mineral de un cuerpo rocoso a lo largo de su estructura regional por procesos fisicoquímicos.
Gradación textural	Es un cambio que existe en la relación entre minerales de un cuerpo rocoso.
Granito tipo I	Son generados por fusión parcial de rocas ígneas y se encuentran generalmente asociados a cobre y molibdeno.
Granito tipo S	Son generados por fusión parcial de sedimentos peraluminosos, se encuentran asociados a estaño y tungsteno. Se forman en la parte superior de la corteza
Índice de alcalinidad	Este criterio se basa en la relación álcalis con respecto a la sílice, siendo los posibles resultados: rocas alcalinas y subalcalinas.

Índice de saturación de alúmina (ISA)	Método utilizado para clasificar geoquímicamente rocas de composición félsica, se basa en la relación existente entre el contenido molar del Al_2O_3 y la suma en moles de los compuestos CaO , K_2O y Na_2O para obtener una de las tres posible opciones: peraluminio, metaluminoso ó peralcalino
Índice de saturación de sílice	Método utilizado para clasificar geoquímicamente rocas de composición félsica, se basa en el porcentaje de contenido de sílice para obtener las tres posible opciones: sobresaturado, saturado ó subsaturado.
Isótopo	Formas de un elemento que difieren entre sí en la masa de sus átomos y en las propiedades dependientes de esa masa. Teniendo el mismo número atómico y el mismo número de valencia de electrones, los isotopos ocupan la mis posición en la tabla periódica y tienen propiedades idénticas
Método U-Pb	Es una de las formas más seguras para realizar fechamientos de formación de los cuerpos rocosos y correlaciones estratigráficas debido a que el Uranio es uno de los elementos con más rango de vida y con una serie de decaimientos bien estudiada y clasificada.
Petrografía	Parte de la petrología que se encarga de evaluar las condiciones microscópicas de una roca.
Roca calcoalcalina	Roca ígnea que es generada a partir de la fusión parcial de otra roca preexistente en un margen tectónico convergente.
Roca metaluminosa	Son rocas ígneas que poseen una proporción molar de óxido de aluminio mayor a la de óxido de sodio de potasio, pero menor a la suma de óxidos anteriores más el óxido de calcio
Roca peraluminosa	Son rocas ígneas que poseen una proporción molar de óxido de aluminio superior a la suma de óxido de sodio, óxido de potasio y óxido de calcio.

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

2.1 Marco metodológico

Para el óptimo desarrollo se dividió la misma en 4 etapas, las cuales se relacionan con los 3 ejes que rigen la misma, siendo estas:

2.1.1 Etapa De Recopilación bibliográfica

Se realizó durante los meses de enero a marzo del año 2015, con la finalidad de recolectar toda la información sobre la región para definir los límites y objetivos del presente trabajo.

2.1.2 Trabajo De campo

Se llevó a cabo entre junio y julio de 2015, tiempo durante el cual se cartografió el área de las rocas intrusivas, las cuales tienen una extensión de aproximadamente 110km² para determinar los rasgos regionales del intrusivo, así como sus relaciones de campo con los cuerpos metamórficos. A su vez se realizó una recolección de 10 muestras sanas con un peso aproximado de 2 a 3 kilogramos para los respectivos análisis petrográficos en el Centro Universitario del Norte (CUNOR), y análisis geoquímicos y geocronológicos en el Centro de Geociencias de la Universidad Autónoma de México (UNAM) para su análisis.

2.1.3 Trabajo De laboratorio

Esta etapa de laboratorio se desarrolló inicialmente con una selección de las muestras que previamente se recolectaron en campo con ayuda del asesor interno Ing, Geol. Osmín J Vásquez y con Ing. Geol. Ricardo Milián para cada uno de los análisis que se efectuaron durante la investigación. Dichas muestras seleccionadas se sometieron a sus respectivos análisis de la siguiente manera:

Petrografía: Para realizar los respectivos estudios petrográficos fue necesario hacer láminas delgadas de las muestras seleccionadas, su preparación implicó usar las cortadoras del Laboratorio del Centro Universitario del Norte (CUNOR) y posteriormente ser pulidas y adheridas a los portaobjetos respectivos mediante el bálsamo de Canadá que se utiliza en relación a 7:3 (7 mililitros de fracción pegante y 3 mililitros de fracción secante).

Geoquímica de elementos mayores y traza: Se enviaron las muestras hacia la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en Querétaro, donde el procedimiento¹ detallado para la preparación y obtención de los resultados por dicha institución consiste en

Un triturado en el Laboratorio de Molienda y Pulverizado a través de una prensa hidráulica con base de acero, con el fin de obtener fragmentos menores a 4 milímetros que fueron posteriormente enjuagados con agua desionizada para luego observarlos mediante la lupa binocular para descartar fragmentos

⁸ Ricardo Milián, Petrografía, geoquímica y geocronología del Stock ubicado a los alrededores de la aldea Matanzas, municipio de San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala (Centro Universitario del Norte, 2013), p23

alterados. Seguidamente se pulverizaron hasta obtener 30 y 40 gramos de la muestra con un tamaño menor a 75 micras (Tamiz No. 200).

Análisis de elementos mayores

Se analizaron los elementos químicos que están presentes en concentraciones mayores al 0,1% o 1 000 ppm en roca total. Siendo el procedimiento estándar para la preparación de la muestra se toma de Lozano Santa Cruz, et al. (1995):

“Para el análisis de elemento mayores, 0,9 g de polvo de la muestra se mezclan con 4,5 g de metaborato de litio (LiBO_2) y 4,5 gramos de tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$). A esta mezcla se le añaden 2 gotas de bromuro de litio (LiBr), para evitar que parte de la solución permanezca pegada al crisol. Las muestras se diluyen al 90% Mol, con el fin de evitar que el efecto de la matriz puede alterar el análisis de los elementos traza en el espectrómetro. La solución se calienta a 1000 °C durante 10 minutos para crear una tableta vítrea que es la que se analiza mediante un equipo de Fluorescencia de rayos X (FRX).”⁹

Análisis de elementos traza

Un elemento traza es aquel cuya concentración es menor al 0,1 % o a 1000 ppm del total de la roca. Los procedimientos mínimos para la preparación e las muestras se citaron de José Duque (2009):

“El procedimiento de preparación consiste en pesar una cantidad entre 0,04950 gramos y 0,05050 gramos de muestra pulverizada. La digestión comienza con la adición de 500 microlitro (μL) de ácido nítrico (HNO_3) a 8 normal (N) y 1 mililitro (mL) de ácido fluorhídrico (HF) concentrado. Se deja calentar por 10 horas sobre una parrilla de calentamiento a una temperatura de 100°C.

⁹ Andrea Rossotti, Reconstrucción de la historia eruptiva de la "Pómez Citlalépetl" (Volcán Pico de Orizaba). Tesis Doctoral en Ciencias de la Tierra. (México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, 2009), p 64.

Luego se deja evaporar sobre la parrilla hasta la sequedad. Posteriormente se añade 500µL de HNO₃ a 8N y 1mL de HF concentrado, el siguiente paso es transvasar la muestra para ser introducida en bombas de presión Parr con el fin de digerir los minerales refractarios (Circón).

Ya con las muestras completamente en solución se realiza la dilución con una solución de estándar interno (ISS) que contiene 10 ppb de Germanio (Ge), 5 ppb de Indio (In), 5 ppb de Tulio (Tm) y 5 ppb de Bismuto (Bi). La dilución se realiza en una proporción de 1:2000 con el fin de lograr las concentraciones óptimas a los límites de detección del equipo.

El análisis de las muestras se realizó por medio de espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS), usando un equipo *Thermo Series X*. Para la calibración del equipo se emplearon las muestras de referencia certificadas JB-2, JG-2, JR-1, MAR, AGV-2, BCR-2, BHVO-2.¹⁰

Geocronología: Se enviaron las muestras hacia la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para el estudio geocronológico, donde se sometieron al análisis de Ablación Láser-Espectrometría de Masas con Fuente de Plasma de acomplamiento Inductivo (LA-ICP-MS, por sus siglas en inglés).

Las muestras se trituraron y pulverizaron con una prensa hidráulica en el laboratorio de Molienda y Pulverizado del Centro de Geociencias (CGEO). Después de la fragmentación se tamizaron hasta obtener fracciones menores a 50 micras.

Seguidamente se utilizó la mesa vibratoria Wilifley, proceso que se fundamenta en la diferencia de densidades de los minerales y como el circón posee una densidad de 4,7 gr/cm³ es de los últimos en obtenerse junto con el apatito, cuarzo, granate, magnetita, etc. Luego se secaron los concentrados obtenidos a una temperatura que no exceda los 180°C.

¹⁰ José Fernando Duque Trujillo, p94, 95.

Inicialmente se separaron los minerales magnéticos del concentrado con un imán y posteriormente se separaron los minerales paramagnéticos, así como los que poseen inclusiones metálicas mediante el separador magnético tipo Frantz. Este se basa en la creación de un campo magnético a partir de un campo eléctrico, lo cual permite calibrar la intensidad del mismo que genera una separación efectiva el sobrante es una mezcla de circones, pirita, apatito, etc.

A través de un estereoscopio o lupa binocular se seleccionaron los circones, los cuales no deben poseer fracturas e inclusiones. En rocas ígneas deben de montarse alrededor de 50 y 80 cristales de circón y en metamórficas alrededor de 120 a 150 tomando en consideración que existen poblaciones heredadas.

Una vez obtenidos los circones se montaron en una resina epóxica que tras un tiempo cristaliza y es pulida, se observa a través de un microscopio con una platina de catodoluminiscencia y debe fotografiarse con luz transmitida y reflejadas, lo que permitió observar la estructura del circón para seleccionar los mejores sitios y realizar los disparos con el láser de ablación.

Una vez seleccionados los lugares que serán disparados en la probeta la muestra se debe trasladar al Laboratorio de Estudio Isotópicos (LEI) y "son ablacionados con un láser excímero de 193nm (ArF) de la marca Resonetics acoplado al ICP.MS Thermo X-Serie queadrupolo".¹¹

Se realizó el proceso de ablación en una celda con una atmosfera de Helio (He) en la que incide el láser y provoca la

¹¹ Luigi Solari, et al., *U/Pb zircon geochronology by an integrated LA-ICPMS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy: Geostandards and Geoanalytical Research* (México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, 2009), p5.

nebulización del lugar de disparo, "el cráter obtenido tiene dimensiones aproximadas de 23 micras de diámetro y 15 micras de profundidad.¹²

El material nebulizado se dirigió al ICP-MS para medir las relaciones isotópicas en cada uno de los cráteres realizado, éstas son comparadas con muestras estándar para mantener un control sobre las relaciones isotópicas obtenidas.

2.1.4 Etapa de gabinete

Se desarrolló entre los meses de diciembre de 2015 a julio de 2016, tiempo durante el cual se analizaron los resultados obtenidos en la etapa de laboratorio en cuanto a petrografía, geocronología y geoquímica de elementos mayores y traza se refiere.

2.2 Metodología

2.2.1 Petrografía

a) Clasificación mineralógica

Es una de las formas más comunes para clasificar las rocas ya que se basa en análisis de las características ópticas mineralógicas, texturales y estructurales que presentan las rocas ígneas en cuanto a su composición modal.

Normalmente la composición mineralógica es agrupada en 4 grandes grupos: minerales de composición félsica (cuarzo, feldespatos alcalinos, plagioclasas, feldespatoides, escapolitas, cordierita y moscovita), minerales de composición máfica

¹² Paola Andrea Botero Santa, p68.

(Olivino, piroxeno (no todas), anfíbol, biotita, flogopita), minerales opacos (magnetita, hematita, ilmenita, sulfuros de Cu- Fe) y minerales accesorios (apatito, circón, turmalina, berilo, esfena, rutilo, granate, espinela, topacio, fluorita). Cabe mencionar que los minerales accesorios por lo regular no exceden el 5% en volumen total.

Para su clasificación mineralógica es necesario tomar en cuenta su composición en la misma y con base a estos criterios clasificarla, siendo uno de los más utilizados, el Diagrama de clasificación QAP ó diagrama de Streckeissen, el cual es un diagrama ternario de clasificación de rocas ígneas con base a la normalización del contenido de cuarzo (Q), alcalinos (A) y plagioclasas (P) (Figura 5). Esta clasificación se aplica para rocas con porcentajes de minerales oscuros menor a 90% y sin presencia de feldespatoideos.

FIGURA 5
CLASIFICACIÓN DE STRECKEISEN (1976)



Fuente: Antonio Castro Dorado, Petrografía básica: Texturas, clasificación y nomenclatura de rocas. Editorial Parainfo, (Madrid 1989), p: 66-67.

b) Clasificación textural

Además, para la clasificación se hace una evaluación de la relación entre minerales para la determinación de la textura y así realizar interpretaciones de campo y de laboratorio sobre el tiempo de cristalización con base a la granulometría y el arreglo de los mismos. (Figura 6)

FIGURA 6
CLASIFICACIÓN TEXTURAL DE ROCAS ÍGNEAS



Fuente: https://www.codelcoeduca.cl/img/proceso/exploracion/tipo_de_roca_textura.jpg

2.2.2 Geocronología

Es una de las ramas de la Geología que ayuda a establecer la edad de formación del cuerpo rocoso en análisis.

a) Método U-Pb

Es una de las formas más seguras para establecer una edad absoluta de los cuerpos rocosos debido a que el Uranio es uno de los elementos con más rango de vida y con una serie de decaimientos bien estudiada y clasificada.

Esta técnica se fundamenta en el decaimiento radioactivo de los isótopos de U y Th (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th) considerados como isótopo padre, a isótopos radiogénicos del Pb (^{206}Pb , ^{207}Pb y ^{208}Pb) que en este caso son considerados los isótopos hijo. Estos decaimientos se originan de unas complejas reacciones que involucran U y Th, generando así, varios geocronómetros dentro de un mismo sistema, los cuales pueden describirse de la siguiente forma:

TABLA 2
DECAIMIENTO RADIOACTIVO U-Pb COMO GEOCRONÓMETRO DENTRO DEL SISTEMA

$$\begin{aligned} {}^{206}\text{PbP}/{}^{204}\text{Pb} &= {}^{206}\text{Pbi}/{}^{204}\text{Pb} + {}^{238}\text{U} (e^{\lambda 238 t} - 1) / {}^{204}\text{Pb}, \\ {}^{207}\text{PbP}/{}^{204}\text{Pb} &= {}^{207}\text{Pbi}/{}^{204}\text{Pb} + {}^{235}\text{U} (e^{\lambda 235 t} - 1) / {}^{204}\text{Pb} \\ {}^{208}\text{PbP}/{}^{204}\text{Pb} &= {}^{208}\text{Pbi}/{}^{204}\text{Pb} + {}^{232}\text{Th} (e^{\lambda 232 t} - 1) / {}^{204}\text{Pb} \end{aligned}$$

Fuente: Paola Botero, Origen y evolución de la falla de El Bajío en su sector noroeste. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra. (México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias., 2011), p44

Donde P representa la abundancia actual del isótopo en la muestra, i la abundancia isotópica inicial, ^{204}Pb hace referencia al plomo no radiogénico y λ la constante de decaimiento para cada uno de los isótopos de uranio y torio. Cada uno de los decaimientos ha sido caracterizado en cuanto a su vida media y constante de decaimiento como se muestra en Tabla 3.

TABLA 3
CARACTERÍSTICAS ISOTÓPICAS DE U Y Pb

Isótopo padre	Isótopo hijo	Vida media (años)	Constante de decaimiento (A)
^{238}U	^{206}Pb	$4,468 \times 10^9$	$1,55158 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$
^{235}U	^{207}Pb	$0,07038 \times 10^9$	$9,8485 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$
^{232}Th	^{208}Pb	$14,010 \times 10^9$	$0,49475 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$

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

b) Circón

Es un silicato de circonio ($ZrSiO_4$), el cual pertenece al grupo de los nesosilicatos y cuenta con algunas características importantes como su dureza, y oscila entre 6,5 y 7,5 en la escala de Mohs, su densidad es aproximadamente de $4,7 \text{ g/cm}^3$ y es un mineral pobremente magnético.

Además, posee las características adecuadas para tomarse en cuenta al momento de un datación absoluta por U/Pb debido que es un mineral que durante su cristalización almacena y retiene en su estructura molecular importantes concentraciones de uranio y muy poco o nada de plomo, lo cual simplifica las ecuaciones de la Tabla 2 a las representadas en la Tabla 4, además este mineral es convencionalmente encontrado dentro de las rocas ígneas félsicas e intermedias, las cuales son de principal interés para esta investigación.

TABLA 4
ECUACIONES SIMPLIFICADAS DEL DECAIMIENTO
RADIOMETRICO U-Pb

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = (e^{\lambda_{238} t} - 1)$ $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = (e^{\lambda_{235} t} - 1)$

Fuente: Paola Botero, Origen y evolución de la falla de El Bajío en su sector noroeste. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra. (México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias., 2011), p45

c) Método U/Pb

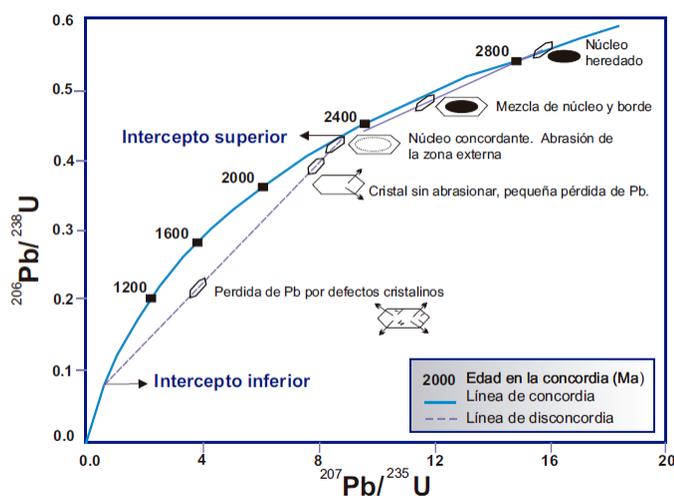
Una de las características al emplear dicho método en los circones es que es un sistema cerrado y existe una relación bien estrecha y marcada del contenido de uranio y plomo en una roca ya que estos evolucionan e involucran proporcionalmente dentro de los circones.

Paola Botero (2011) cita a Wetheril (1956) en relación a un sistema cerrado “la edad de concordia como aquella edad relacionada directa y exclusivamente con el decaimiento radioactivo. Aquellas muestras que pueden exhibir excesos y/o defectos de U y Pb generan una línea recta que determina la edad de discordia e intersecta a la línea de concordia en dos puntos.”

La intersección superior se interpreta como un evento de cristalización o una edad de herencia y la intersección inferior se interpreta como la edad de pérdida de Pb, generada por un evento metamórfico, termal o hidrotermal que, para estar bien definido, debe estar soportado por medio de otras evidencias geológicas y geocronológicas.

La relación que guarda la línea de concordia con la discordia permite inferir algunos procesos de cristalización, abrasión y mezcla de los cristales de circón como se observa en la Figura 7.

FIGURA 7
DIAGRAMA DE CONCORDIA DE WETHERHILL (1956)



Fuente: Paola Botero, Origen y evolución de la falla de El Bajío en su sector noroeste. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra. (México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias., 2011), p45

2.2.3 Geoquímica

Obedece a un sistema de análisis basado en la cantidad porcentual de óxidos que posee una roca, siendo la proporcionalidad de estos muy importante porque su composición refleja la evolución que ha tenido a través de su cristalización y el ambiente de formación.

Los constituyentes químicos generalmente se dividen en tres categorías: elementos mayoritarios (> 1% en peso) a los que pertenece SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O y K_2O , minoritarios (0,1%- 1% en peso) a los que pertenece TiO_2 , ZrO_2 , MnO_2 , Cr_2O_3 y P_2O_5 y trazas (<0,1% en peso) entre los cuales se encuentra Ba, Zr, Rb, Sr, Ga, Y, Nb, Th, U, Ni, Hf, Ta, Mo, Sc, Co, Cr, tierras raras (REE), entre otros.

La metodología empleada durante la investigación está propiamente ligada a cada uno de los ejes de la misma, utilizándose los siguientes criterios:

a. Elementos mayores

1. Mineralogía normativa

Es un método químico (siglas en honor a Cross, Iddings, Pearson y Washington) utilizado para clasificar las rocas ígneas basado en la mineralogía normativa, esta es la más utilizada debido a que es posible realizar el cálculo de la mineralogía de una roca utilizando los análisis químicos.

La mineralogía normativa de una roca puede ser diferente de la mineralogía observada mediante el análisis petrográfico, porque los cálculos asumen que el magma es anhidro, siendo la biotita u hornblenda incapaces de formarse con base a esta clasificación.

2. Índice de saturación de sílice (ISS)

Se encuentra vinculado con la concentración de sílice (SiO₂) presente en la roca también conocido como “índice de saturación de sílice” (ISS). Este criterio permite clasificar las rocas como sobresaturadas, saturadas y subsaturadas en sílice. (Tabla 5)

TABLA 5
CRITERIO DEL ÍNDICE DE SATURACIÓN DE SÍLICE (ISS)

Clasificación	Contenido de SiO ₂
Sobresaturada	>70%
Saturada	64%-70%
Substurada	<64%

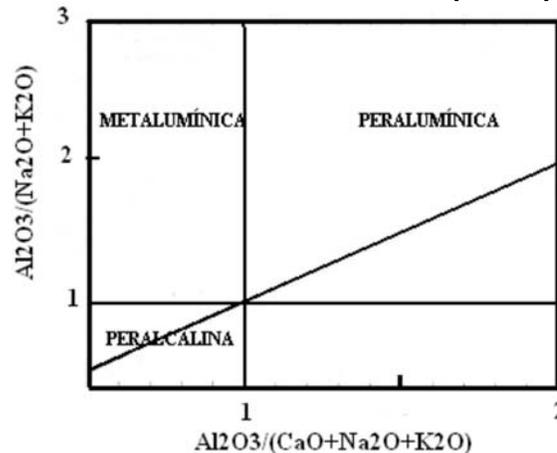
Fuente Granite Genesis: In-Situ Melting and Crustal Evolution, Guo-Neng Chen (2009), p 15

3. Índice de saturación de alúmina (ISA)

El grado de saturación en alúmina es el segundo componente más abundante en las rocas ígneas, el cual consiste en determinar el ISA de cada muestra tomando los criterios de la concentración de alúmina (Al₂O₃) en relación a la concentración de los óxidos de sodio (Na₂O), potasio (K₂O) y calcio (CaO), en proporciones moleculares (Al₂O₃ / Na₂O + K₂O + CaO). Esta relación puede presentar 3 tipos de variantes según la abundancia de los óxidos y así

clasificarse como Peraluminoso, Metlauminoso y Peralcalino, siendo posible su representación gráfica (Figura 8) gracias al Diagrama de Shand (1943).

FIGURA 8
DIAGRAMA DE SHAND (1943)



Fuente: Tectonic discrimination of granitoids. Maniar, P. D., Piccoli, P. M., (1989). p 635

4. Criterios en base a la alcalinidad (CBA)

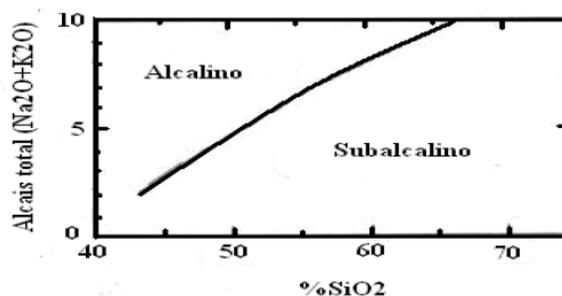
La alcalinidad de la roca es el tercer criterio general para la clasificación de granitoides, la cual, se obtuvo mediante los diagramas McDonald y Katsura (1984) que relaciona SiO_2 con respecto a K_2O+Na_2O , Irvine y Baragar (1971) que relaciona FeO_t , K_2O+Na_2O y MgO en un diagrama ternario y Peccerillo y Taylor (1976) que relaciona K_2O con respecto a SiO_2 .

Diagrama $SiO_2 - K_2O+Na_2O$ (McDonald y Katsura 1984)

La clasificación de McDonald y Katsura (1964) es utilizada en series de rocas donde cada una de ellas pertenece a un ambiente geológico específico o provincia petrogenética definida. Siendo las rocas alcalinas

asociadas a un ambiente intraplaca, y las subalcalinas (calcoalcalinas y toleíticas) pertenecientes a un margen de placa convergente y a zonas de extensión respectivamente.

FIGURA 9
DIAGRAMA MCDONALD y KATSURA (1984)

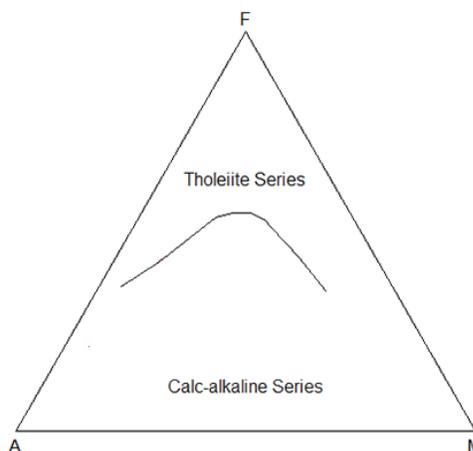


Fuente: Chemical composition of Hawaiian lavas. McDonald, G. A. y T. Katsura, (1964). p. 82-133.

Diagrama ternario AFM (Irvine y Baragar 1971)

Irvine y Baragar (1971) es una clasificación utilizada para dividir la serie subalcalina en “tholeítica” y “calcoalcalina” y se basa en la concentración de FeO_t, K₂O+Na₂O y MgO que presentan las rocas ígneas.

FIGURA 10
DIAGRAMA AFM (1971)

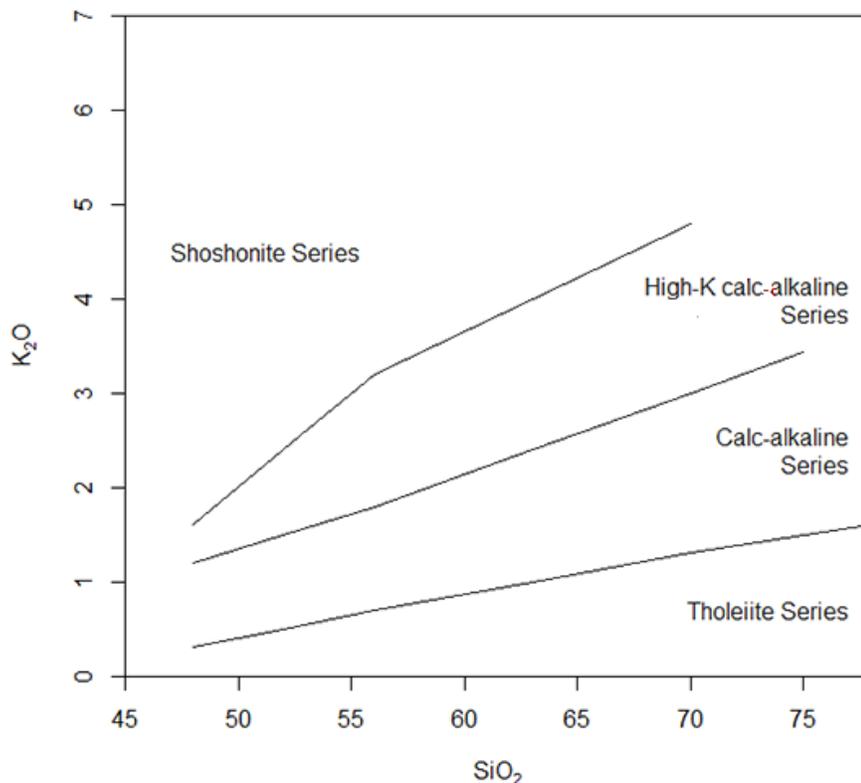


Fuente: Cuaderno de practica de geoquímica, Molina, J. F., et. al. p34.

Diagrama SiO₂ - K₂O (Peccerillo y Taylor 1976)

Peccerillo y Taylor (1976) establecieron una clasificación para subdividir la serie calcoalcalina, tomando como referencia el contenido de SiO₂ con respecto al enriquecimiento en K₂O.

FIGURA 11
DIAGRAMA SiO₂ - K₂O (1976)

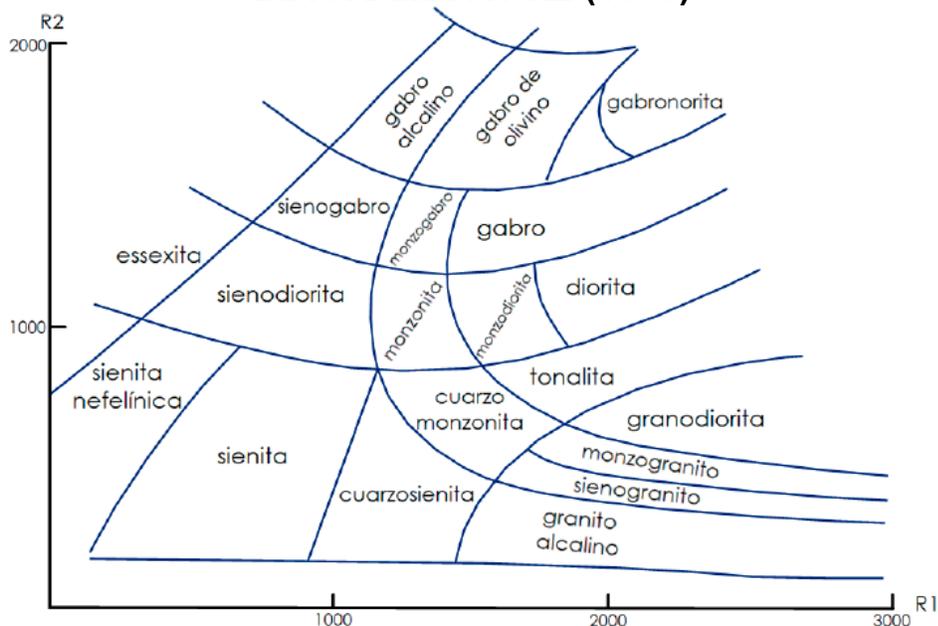


Fuente: Cuaderno de practica de geoquímica, Molina, J. F., et. Al. P34.

5. Clasificación R1-R2 (De la Roche 1980)

De La Roche (1980) establece una clasificación química de las rocas graníticas con base a su contenido en cationes de Si, Na, K, Fe y Ti (R1) Ca, Mg y Al (R2), siendo considerada una de la más completas debido a que toma como variables 8 elementos químicos.

FIGURA 12
DIAGRAMA R1-R2 (1980)



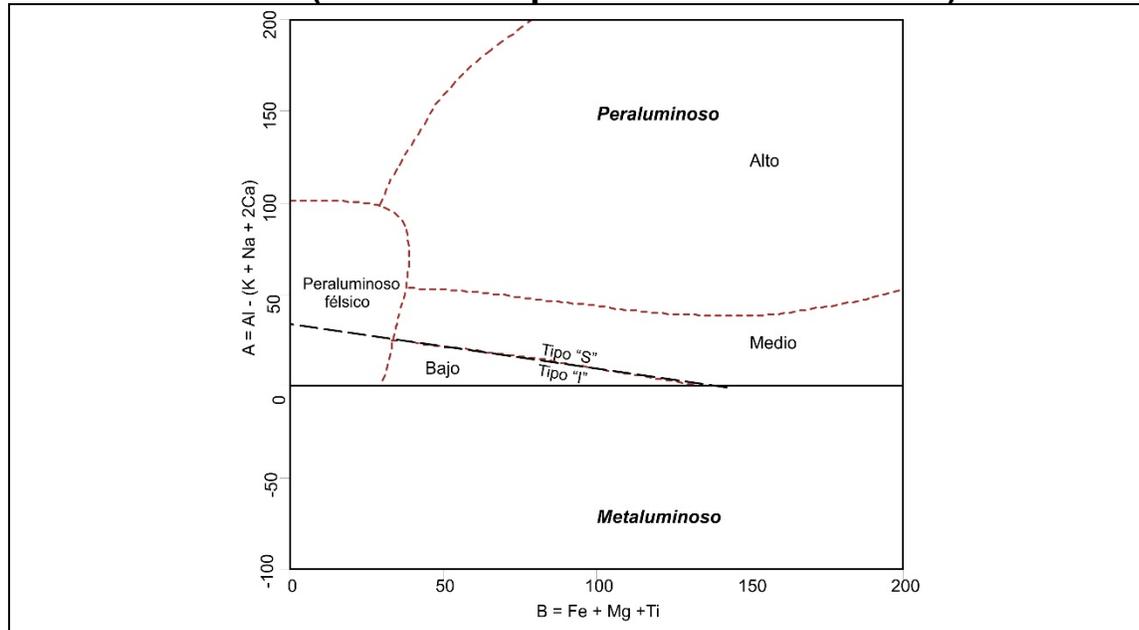
Fuente: Using Geochemical Data, Rollinson (1982). p85

6. Discriminación tectónica

La discriminación por marco tectónico tomando de referencia el diagrama B-A se puede evaluar la saturación de alúmina, así como la roca generadora del magma, donde claramente domina la fuente metaígneas (*I-type*) para casi todas las muestras a excepción de la TFS-PLU-10 que se originó de una roca metasedimentaria (*S-type*). (Figura 13)

Discrimina granitoides basándose en el parámetro A (Al, Na, K y Ca) y en el parámetro B (Fe, Mg y Ti). La principal ventaja de este diagrama es que discrimina automáticamente el contenido de alúmina en conjunto con el protolito del mismo.

FIGURA 13
DIAGRAMA DE DISCRIMINACIÓN POR MARCO TECTÓNICO
B-A (modificado por Villaseca et al. 1998)



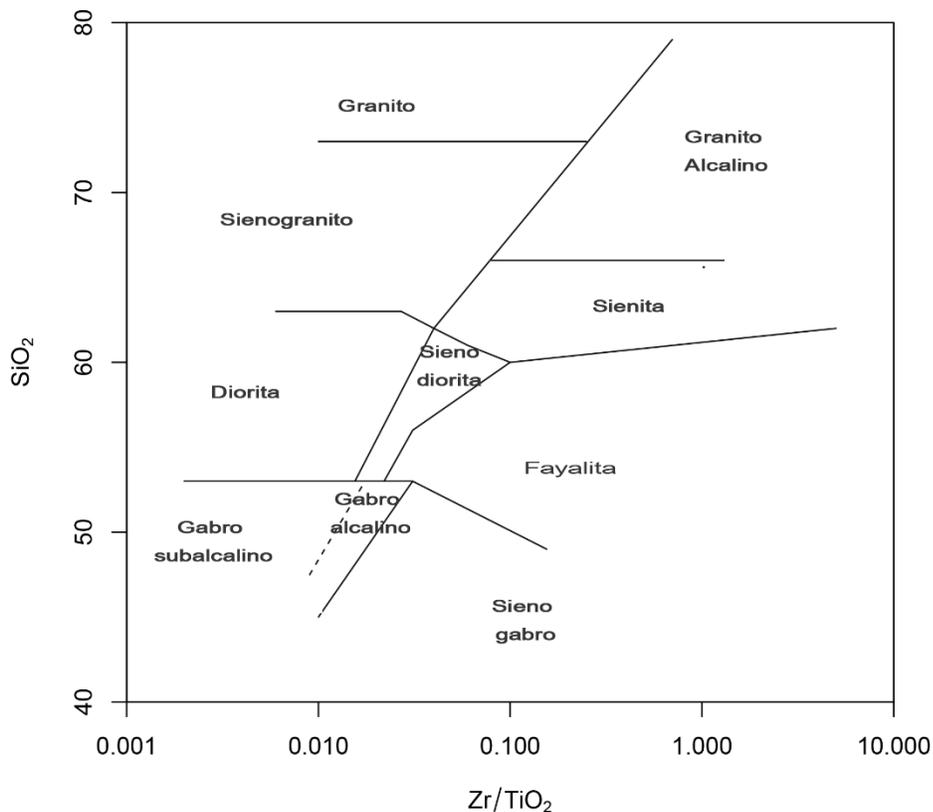
Fuente: Ricardo Milián, Petrografía, Geoquímica y Geocronología del Stock ubicado a los alrededores de la aldea Matanzas, Municipio de San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala. Tesis Ingeniero Geólogo. (México: Centro Universitario del Norte., 2013), p101

b. Elementos traza y REE

1. Clasificación Zr/TiO₂ - SiO₂ (Winchester y Floyd 1977)

Este diagrama es utilizado para discriminar rocas graníticas, tomando como referencia el contenido de Zr/TiO₂ con respecto a SiO₂ que contienen las rocas ígneas. (Figura 14)

FIGURA 14
CLASIFICACIÓN Zr/TiO₂ - SiO₂ (WINCHESTER y FLOYD 1977)



Fuente: Using Geochemical Data, Rollinson (1982).

2. Diagramas multielementales y REE

Los diagramas REE y multielementales o Spider son un complemento importante para estudiar la historia de cristalización de los granitoides, debido a que evidencian variaciones de las concentraciones de elementos de importancia.

La inflexión mejor comprendida y más marcada en los perfiles de las REE ocurre con el europio (Eu), debido a que es el único elemento de las tierras raras que forma concentraciones significantes de cationes divalente Eu²⁺ es preferiblemente incorporado en los feldespatos,

sustituyendo al calcio. Anomalías negativas de Eu reflejan fraccionamiento de feldespato (plagioclasa) del líquido magmático y la persistencia de feldespato (plagioclasa) como una fase sólida residual durante la fusión parcial.

Para cada tipo de roca, excepto para el granito peralcalino, existe una mayor concentración de los elementos de las tierras raras ligeras (LREE) debido a que son más incompatibles que los elementos de las tierras raras pesadas (HREE) en la cristalización fraccional. El granito peralcalino presenta mayor concentración de HREE posiblemente por la influencia de fluoruros o CO₂ que acomplejan a estos elementos durante la cristalización fraccional

Los diagramas multielementales normalizados o diagramas de elementos incompatibles (diagramas tipo Spider) normalizan la concentración de los elementos trazas con respecto a la concentración del manto primitivo y condritas (McDonough y Sun 1995).

Estos gráficos multielementales contienen mezclas más heterogéneas de elementos trazas que los diagramas de los REE. Por consiguiente, ellos muestran un número mayor de picos que reflejan diferentes comportamientos, de distintos grupos de elementos trazas.

Así mismo, contrastan el comportamiento de los elementos más móviles (Cs, Rb, K, Ba, Sr) con los menos móviles (Y, Hf, Zr, Ti, Nb, Ta). La concentración de los elementos más móviles (LIL) puede ser una función del comportamiento de la fase fluida en el magma, mientras

que la concentración de los elementos menos móviles (HFS) puede estar controlada por la química de la fuente y los procesos cristal/fundido que tengan lugar durante la evolución de la roca.

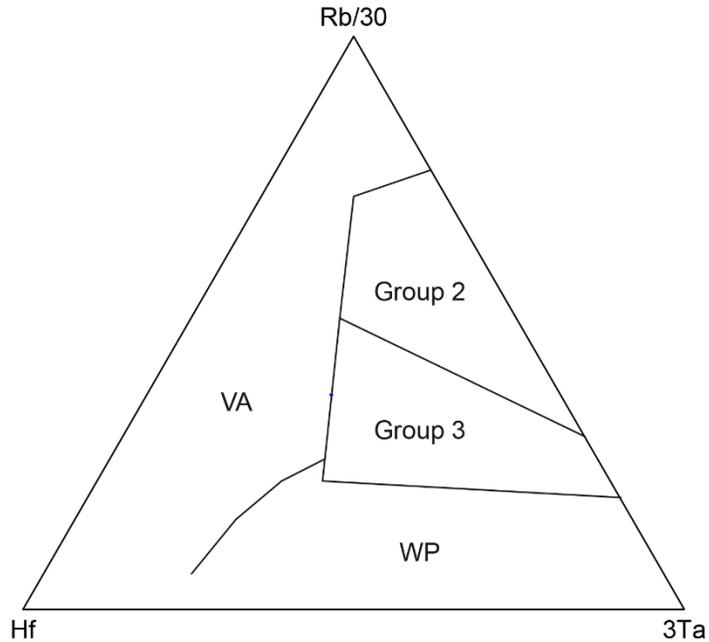
3. Ambiente geodinámico

Debido a que existe una estrecha relación entre la composición química de las rocas granitoides y el ambiente geodinámico en el cual puedan formarse, han sido realizados varios intentos para tratar de discriminar el ambiente tectónico de formación de las rocas graníticas, usando análisis químicos.

Diagrama ternario Hf – Rb/30 -3Ta (1986)

Harris et. Al. (1986) estableció el diagrama ternario Hf – Rb/30 - 3Ta, el cual se utiliza para discriminar ambiente geodinámicos en rocas ígneas, siendo los posibles VA: Arco volcánico, Group 2: Sin-colisional, Group 3: Tardío y Post-colisional ó WP: Intraplaca. (Figura 15)

FIGURA 15
DIAGRAMA TECTÓNICO HF – RB/30 – 3TA
(HARRIS ET. AL 1986)

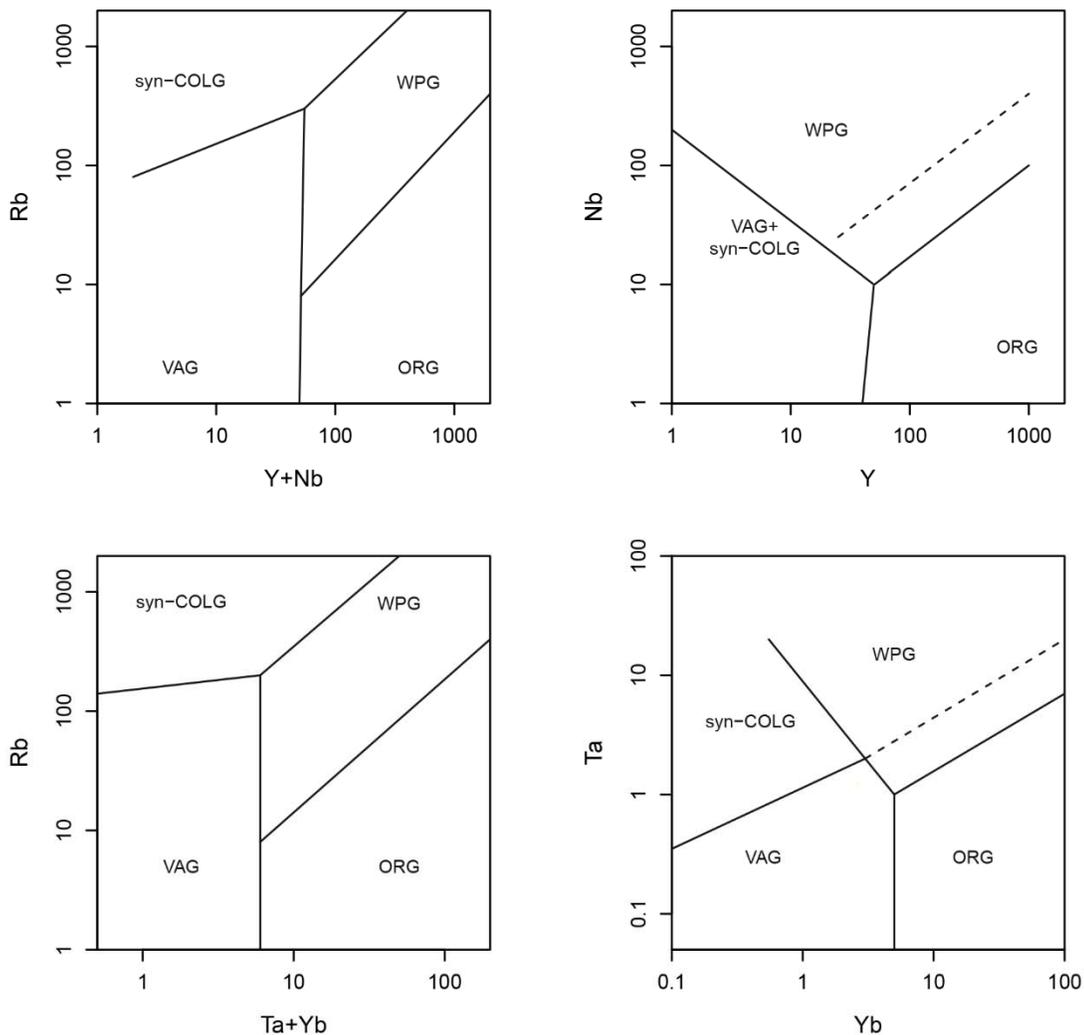


Fuente: Using Geochemical Data, Rollinson (1982).

Pearce et. Al (1984)

Pearce et. Al. (1984) estableció los diagramas de discriminación tectónica los cuales toman de referencia el contenido de Y, Nb, Rb, Ta y Yb. Estos gráficos pueden dar los resultados de Syn-COLG: Granitos sintectónicos, WPG: Granitos intraplacas, ORG: Granitos de cordilleras oceánicas ó VAG: Granitos de arcos volcánicos.

FIGURA 16
DISCRIMINACIÓN TECTÓNICA (PEARCE ET. AL. 1984)



Fuente: Using Geochemical Data, Rollinson (1982).

Winter (2001)

Esta metodología es utilizada para establecer el marco tectónico donde las rocas ígneas se generaron basado en diversas características, porque varían dependiendo sus condiciones de formación. Estos marcos tectónicos pueden ser agrupados como: orogénicos (arco de islas oceánicas, margen continental activo y zonas de colisión continental) y anorogénicos. (Post- orogénico).

TABLA 6
AMBIENTE GEODINÁMICO

Características	AIO	MCA	CC	PO	AC y PC	CMO e IO
Geoquímica	Calcoalcalino>toleítico Tipo M Metaluminico	Calcoalcalino Tipo I>Tipo S Metaluminoso a suavemente peraluminico	Calcoalcalino Tipo S Peraluminico	Calcoalcalino Tipo I-S (Tipo A) Metaluminico a peraluminico	Alcalino Tipo A Peralcalino	Toleitico Tipo M Metaluminico
Tipo de roca	Cuarzo diorita en arcos madurlos	Tonalitas granodioritas > granitos o gabros	Migmatitas y leucogranitos	Bimodal granodiorita+diorita- gabro	Granito, sienita+diorita- gabro	Plagiogranito
Origen	Fusion parcial de material máfico prveniente delmanto	Fusión parcial de material máfico derivado del manto+ corteza continental	Fusión parcial de material proveniente de la corteza continental	Fusión parcial de la corteza inferior + contribución del manto	Fusión parcial del manto y/o corteza inferior (anhidra)	Fusión parcial del manto y cristalización fraccional
Mecanismos de fusión	Transferencia de fluidos y especies disueltas de losa de subducción a la cuña mantelar. Fusion de la cuña y transferencia de calor a la corteza superior	El proceso es similar al arco de isla oceánico	Engrosamiento de la corteza continental+ calor radiogénico	Calor de la corteza continental+ calor del manto	Transferencia de calor adiabática y fundidos magmáticos del manto.	Similar a la apertura continental

AIO: Arco de Isla Oceánico; **MCA:** Margen Continental Activo; **CC:** Colisión Continental; **PO:** Post- Orogénico; **AC:** Apertura Continental;

PC: Punto Caliente; **CMO:** Cordillera Medio Oceánica; **IO:** Islas Oceánicas.

CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta investigación se basa en resultados petrográficos obtenidos en el laboratorio de geología del Centro Universitario del Norte, así como los resultados geoquímicos y geocronológicos obtenidos en el laboratorio de geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, gracias al apoyo del Dr. Luigi Solari, el Centro de Geociencias de la UNAM y el Laboratorio Ultralimpio e ICP-MS los cuales pueden consultarse en el Anexo III.

Cada una de las muestras se analizó por separado y fue sometida a una serie de procesos petrográficos, geoquímicos y geocronológicas. La Tabla 7, desglosa información básica sobre cada una de las muestras analizadas y su distribución espacial puede observarse en el Mapa de muestras analizadas (Figura 17) donde también resaltan lugares comúnmente mencionados en esta investigación.

**TABLA 7
MUESTRAS EVALUADAS**

Código	Este	Norte	P	GQ	GC
TFS-PLU-01	630296	1658311	✓	✓	
TFS-PLU-02	630074	1655961	✓	✓	
TFS-PLU-03	627645	1657136	✓	✓	
TFS-PLU-04	630010	1656279	✓	✓	✓
TFS-PLU-05	629915	1656962	✓	✓	✓
TFS-PLU-06	618310	1656120	✓	✓	✓
TFS-PLU-08	621009	1652628	✓	✓	
TFS-PLU-09	626354	1651120	✓	✓	
TFS-PLU-10	624369	1650564	✓	✓	✓
TFS-PLU-11	622,253	1652390	✓	✓	✓

Dónde: **P:** Petrografía **GQ:** Geoquímica **GC:** Geocronología

Fuente: Investigación de campo 2 016

3.1. Petrografía

Las 10 muestras que se analizaron petrográficamente en el presente trabajo, se muestran en la Tabla 8 donde se logra observar la composición modal de cada una de ellas, y la Tabla 9 que muestra los resultados ya procesados obtenidos mediante el diagrama de Streckeissen (Figura 18). La tabla 8 muestra la abundancia de los tectosilicatos, así como de los minerales secundarios y accesorios que se encuentran en cada una de las muestras recolectadas.

TABLA 8
MINERALOGÍA DE MUESTRAS RECOLECTADAS

Código	Mineralogía (%)										Roca
	Tectosilicatos			Minerales accesorios							
	Qz	Plg	Fk	Ep	Mv	Bt	Hbl	Pi	Gr	He	
TFS-PLU-01	6	51	5	27	2	4		2	2	1	Cuarzodiorita
TFS-PLU-02	19	41	16	15	2	2	3	2			Granodiorita
TFS-PLU-03	25	35	22	14		2	1	1			Monzogranito
TFS-PLU-04	34	32	23	7	1	1	0.5	0.5	1		Monzogranito
TFS-PLU-05	4	65	13	12		4		2			Cuarzomonzodiorita
TFS-PLU-06	24	33	21	16	4					2	Monzogranito
TFS-PLU-08	36	28	24	10	2						Monzogranito
TFS-PLU-09	21	44	18	8	3	1		2	2.5	0.5	Granodiorita
TFS-PLU-10	32	34	23	7	2	2					Monzogranito
TFS-PLU-11	35	33	24	6	1	1					Monzogranito

Fuente: Investigación de campo 2 016

A su vez en la tabla 9 se evidencian las texturas identificadas en muestra de mano y mediante el microscopio petrográfico en cada una de las muestras recolectadas. Estas texturas aportan datos muy importantes sobre las condiciones de cristalización de las rocas ígneas que se encuentran dentro del área de interés.

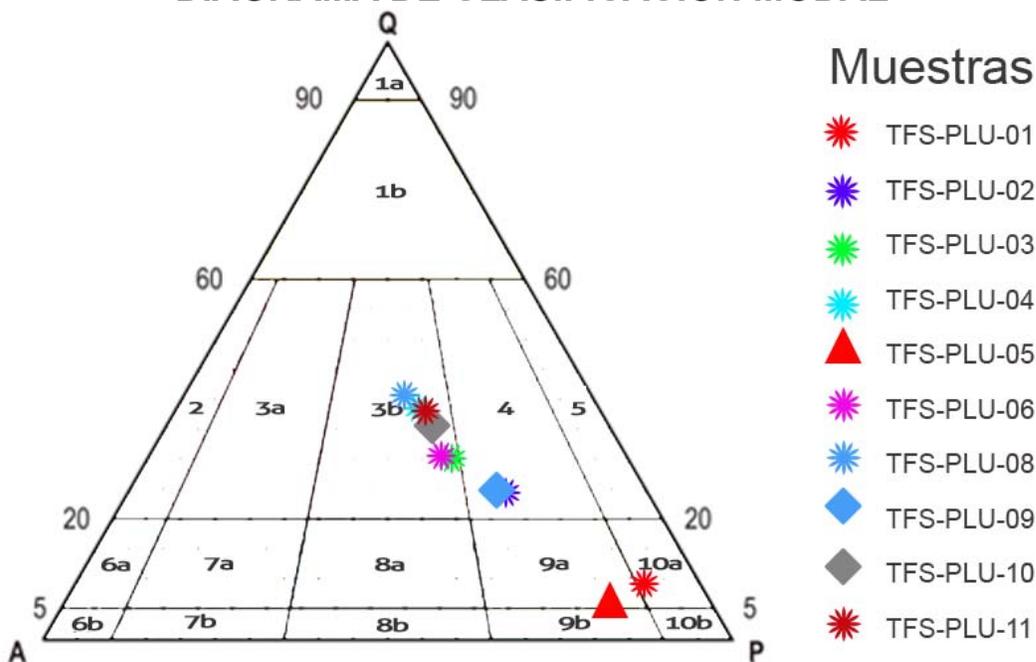
TABLA 9
TEXTURA DE MUESTRAS RECOLECTADAS

Código	Texturas
TFS-PLU-01	Antipertítica, Inequigranular, Porfiritica y Fanerítica
TFS-PLU-02	Inequigranular, Porfiritica, Fanerítica, Borde saturados y Extinción ondulante
TFS-PLU-03	Inequigranular, Porfiritica, Fanerítica, Borde saturados y Extinción ondulante
TFS-PLU-04	Inequigranular, Fanerítica, Antipertítica, Borde saturados y Extinción ondulante
TFS-PLU-05	Inequigranular, Porfiritica y Fanerítica
TFS-PLU-06	Inequigranular, Fanerítica, Porfiritica, Borde saturados y Extinción ondulante
TFS-PLU-08	Inequigranular, Fanerítica y Porfiritica
TFS-PLU-09	Inequigranular, Fanerítica, Zonada y Antipertítica
TFS-PLU-10	Equigranular, Fanerítica, Zonada, Borde saturados y Extinción ondulante
TFS-PLU-11	Equigranular, Fanerítica, Zonada, Borde saturados y Extinción ondulante

Fuente: Investigación de campo 2 016

Las fichas técnicas de cada una de las muestras analizadas se observar con mayor detalle en el Anexo II.

FIGURA 18
DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN MODAL



Dónde: **1^a:** Cuarzolita, **1b:** Granitoide rico en cuarzo, **2:** Granito de feldespato alcalino, **3^a:** Sienogranito, **3b:** Monzogranito, **4:** Granodiorita, **5:** Tonalita, **6^a:** Cuarzosienita de feldespato alcalino **6b:** Sienita de feldespato alcalino, **7^a:** Cuarzosienita, **7b:** Sienita, **8^a:** Cuarzomonzonita, **8b:** Monzonita, **9^a:** Cuarzomonzodiorita/Cuarzomonzogabro **9b:** Monzodiorita/Monzogabro, **10^a:** Cuarzodiorita/Cuarzogabro y **10b:** Diorita/Gabro.

Fuente: Investigación de campo 2 016

Petrográficamente la mayoría de las rocas poseen una composición leucocrática (a excepción de las muestras TFS-PLU-01/ 05 que poseen una composición melanocrática) y se presentan con una textura inequigranular-fanerítica (con excepción de las muestras TFS-PLU-10/ 11 que poseen textura equigranular), donde es claro el dominio de los minerales tectosilicatos (Cuarzo (Q), plagioclasas (Plg) y feldespato alcalino (FK)) con respecto a los minerales accesorios. En los tectosilicatos la cantidad de Q y Plg es mayor en relación al contenido de FK (excepto la muestra TFS-PLU-05).

Estas variaciones sugieren que el intrusivo tuvo una diferencia entre la nucleación (proceso de asociación química generadora de minerales) y su velocidad de crecimiento en las distintas fases minerales.

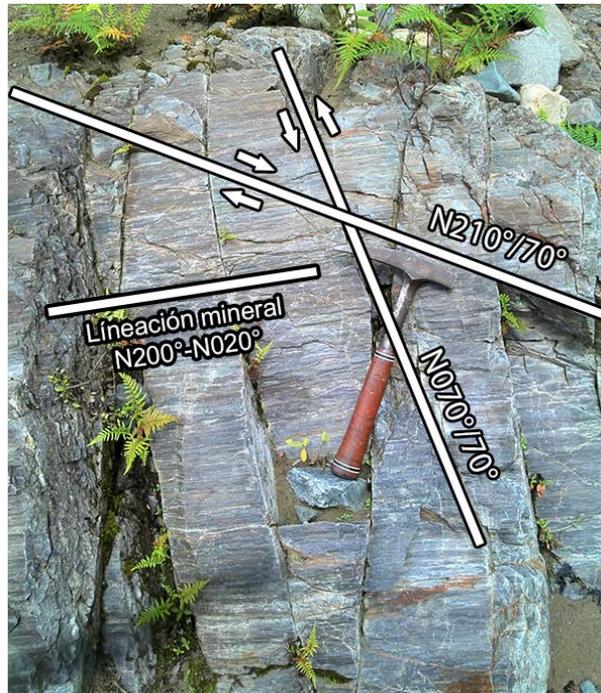
El cuarzo percibido en las muestras recolectadas (TFS-PLU-02/ 03/ 04/ 10/ 11) se observa con una textura de extinción ondulante y bordes saturados, y las plagioclasas observadas en las muestras (TFS-PLU-01/ 04/ 09) incurren con una textura antipertítica, este comportamiento es causado por el desarrollo de las zonas de cizalla regionales (rocas metaígneas del Complejo las ovejas) y locales que afectan la zona de estudio (Zona de cizalla del Río La Jigua)

La cizalla local es una zona de falla de movimiento dextral muy importante con una orientación SW-NE que se encuentra deformando al intrusivo de forma transversal en un grado de milonítico intermedio y se desarrolla sobre una buena porción del Río La Jigua; pero afecta algunas quebradas cercanas a la zona con facies protomilonítica como en “La Quebradona”.

Salguero (2015) muestra esta fotografía (Fotografía 1) donde “se aprecia un afloramiento sobre el Río La Jigua, visto de noroeste a sureste que presenta una foliación $N230^{\circ}/24^{\circ}$ ”

Hay que tomar en cuenta que la zona de cizalla es lo más representativo en cuanto a la deformación local; pero no hay que descartar que el área seguramente se encuentra influenciada por dos fallas regionales muy importantes (Falla Motagua y Falla Jocotán-Chamelecón) y seguramente esta zona es una falla secundaria (Riedel) que se ha generado a partir de la liberación de esfuerzos tensionales en la zona y ha recristalizado las rocas ígneas cercanas a la zona de la cizalla.

FOTOGRAFÍA 1 ZONA DE CIZALLA SOBRE RÍO LA JIGUA



UTM WGS84: 16P E253322, N1657183

Fuente: Petrología en Zacapa: Modelo petrológico del Plutón La Unión, p. 47

Algunos minerales accesorios no cotécticos como moscovita y epidota en cada una de las muestras recolectadas están representando una sustitución mineral, donde la epidota reemplaza algunas veces a hornblendas y con más frecuencia a plagioclasas de forma parcial mediante textura “antipertítica”, y en otros casos de forma total sustituyendo al mineral por completo, y la moscovita por su parte,

sustituye a algunas plagioclasas y biotitas. Algunas veces también se logra observar una textura “porfirítica” no primaria, es decir, que esta se ha generado por la resistencia de algunos minerales a la deformación regional y local.

Las muestras localizadas entre el Río La Jigua y el Río Pacayalito (TFS-PLU-09/ 10) presentan una zonación oscilatoria en sus plagioclasas, este “zonado” está asociado a cambios abruptos o continuos en la composición química de la solución sólida (variaciones en la orientación del cristal, lo cual permite identificar el zonado).

Gran parte de estos fenómenos de sustitución se considera que están asociados a la deformación regional, porque la zona se localiza entre dos fallas sinestrales regionales muy importantes: Falla Motagua y Falla Jocotán-Chamelecón. La primera tiene mayor importancia que la segunda por diversas razones, en especial, porque se encuentra deformando gran parte del cuerpo ígneo que se desarrolla en la región, con un contacto un tanto problemático.

Este contacto geológico es difícil de establecer mediante fotografías aéreas, debido al cambio abrupto no observado en campo como lo han sugerido algunos autores a través del tiempo, porque los gneises que han sido caracterizados como rocas metamórficas del basamento del bloque chortís son ortogneises que han sido generados a partir del cizallamiento del intrusivo por la falla del motagua, el cual disminuye su grado metamórfico conforme más se extiende hacia el sur en donde se localiza el intrusivo.

El fenómeno de la deformación de las rocas ígneas no es constante a través del todo el cuerpo ígneo deformado y se requiere un cartografiado con un buen detalle para determinar el comportamiento de la deformación y estimar las zonas de mayor comprensión ejercida por la cizalla.

Aunque es alta la dificultad para encontrar el contacto entre estas dos unidades (Plutón La Unión –PLU- y Complejo Las Ovejas –LOC-) se logró observar en campo lo que sugiere ser el contacto entre estas dos unidades litodémicas (Fotografía 2), donde se observa un plegamiento en rocas graníticas cortado por una falla de bajo ángulo (Falla inversa) que puede ser producto del límite plástico, resultado de la deformación regional ocasionada seguramente por la cizalla regional de la zona de falla del Motagua.

FOTOGRAFÍA 2 CONTACTO FALLADO CLO – PLU



WGS84/GTM E 627738 N 1660458

Fuente: Investigación de campo 2 016

Un claro ejemplo de este fenómeno se localiza sobre la vía de acceso ZA-07, sobre la cual se pueden observar ortogneises de alto grado metamórfico en la zona que aflora entre la cabecera municipal de “Gualán” y el cruce a las aldeas “La Laguna” y “Guaranjá”, posteriormente el grado disminuye a esquisto (Fotografía 3) hasta llegar a la aldea “El Chile” y continúa con una fase filítica o de menos grado hasta la aldea “El Filo”.

FOTOGRAFÍA 3 GRANITO EN DEFORMADO EN FACIES ESQUISTOSA



WGS84/GTM E 629014 N 1661989

Fuente: Investigación de campo 2 016

La fotografía 4 muestra una zona cercana a la aldea Lampocoy, Zacapa, donde es posible observar un alto grado de deformación en las rocas graníticas, en que se logra observar la textura ígnea, en la cual sobresalen granos de cuarzo deformados, mostrando un comportamiento “Sc” del tipo sinistral para la deformación de estas rocas.

FOTOGRAFÍA 4 GRANITO DEFORMADO EN FACIES GNEISICA



WGS84/GTM E 619620 N 1661955

Fuente: Investigación de campo 2 016

3.2. Geocronología

De las 10 muestras recolectadas, se analizaron cinco por medio del método U/Pb con la finalidad de obtener la edad de cristalización del intrusivo (Ver detalle en anexo IV) a través del tiempo geológico. Estos análisis generaron cinco figuras, las cuales están compuestas por:

(a) Un gráfico de concordia donde se muestra la relación isotópica entre Pb207/U235 con respecto a Pb206/U238, acompañado de un promedio ponderado, para establecer la edad de los circones analizados, los cuales poseen un índice de confiabilidad del 95%

(b) Un gráfico donde se relaciona la concentración de U238 de forma logarítmica con respecto a la edad reportada por cada una de los 30 circones analizados para cada una de las muestras con el fin de observar el comportamiento de la concentración de uranio en cada uno de los circones y observar los circones sobresalientes anómalos, los cuales fueron descartados en esta investigación, pero en este caso ninguno de los circones evaluados son metamórficos aparentemente.

Las muestras (Figura 19/ 20/ 21/ 22/ 23) sufrieron algunas modificaciones, descartando los circones que no encajan en la línea de concordia, lo cual se debe a un incremento ó decremento de plomo no radiogénico dando como resultados la Tabla 10.

TABLA 10
EDADES DE MUESTRAS ANALIZADAS

Muestra	Edad (Ma)	Circones evaluados	Circones descartados
TFS-PLU-06	169,7+/-1,3 Ma.	30	2
TFS-PLU-11	167,6+/-1,7 Ma.	30	3
TFS-PLU-04	33,94 +/-0,48 Ma.	30	2
TFS-PLU-05	33,42+/-0,52 Ma.	30	12
TFS-PLU-10	23,53+/-0,3 Ma.	30	10

Fuente: Datos obtenidos mediante geocronología por el método U/Pb realizado por el Dr. Luigi Solari en el Centro de Geociencias de la UNAM en colaboración con esta investigación.

Las muestras TFS-PLU-04, TFS-PLU-05 y TFS-PLU-10 poseen circones que fueron descartados (Ver Tabla 10) y que presentan una anomalía de plomo no radiogénico que puede estar relacionado al desarrollo de la Zona de Cizalla del Río La Jigua, TFS-PLU-06 posee también una anomalía que seguramente está asociado a la deformación por la cizalla en el contacto entre el Complejo Las Ovejas y el Plutón La Unión y la muestra TFS-PLU-11 se encuentra asociado a la pequeña zona de cizalla del Río Carí.

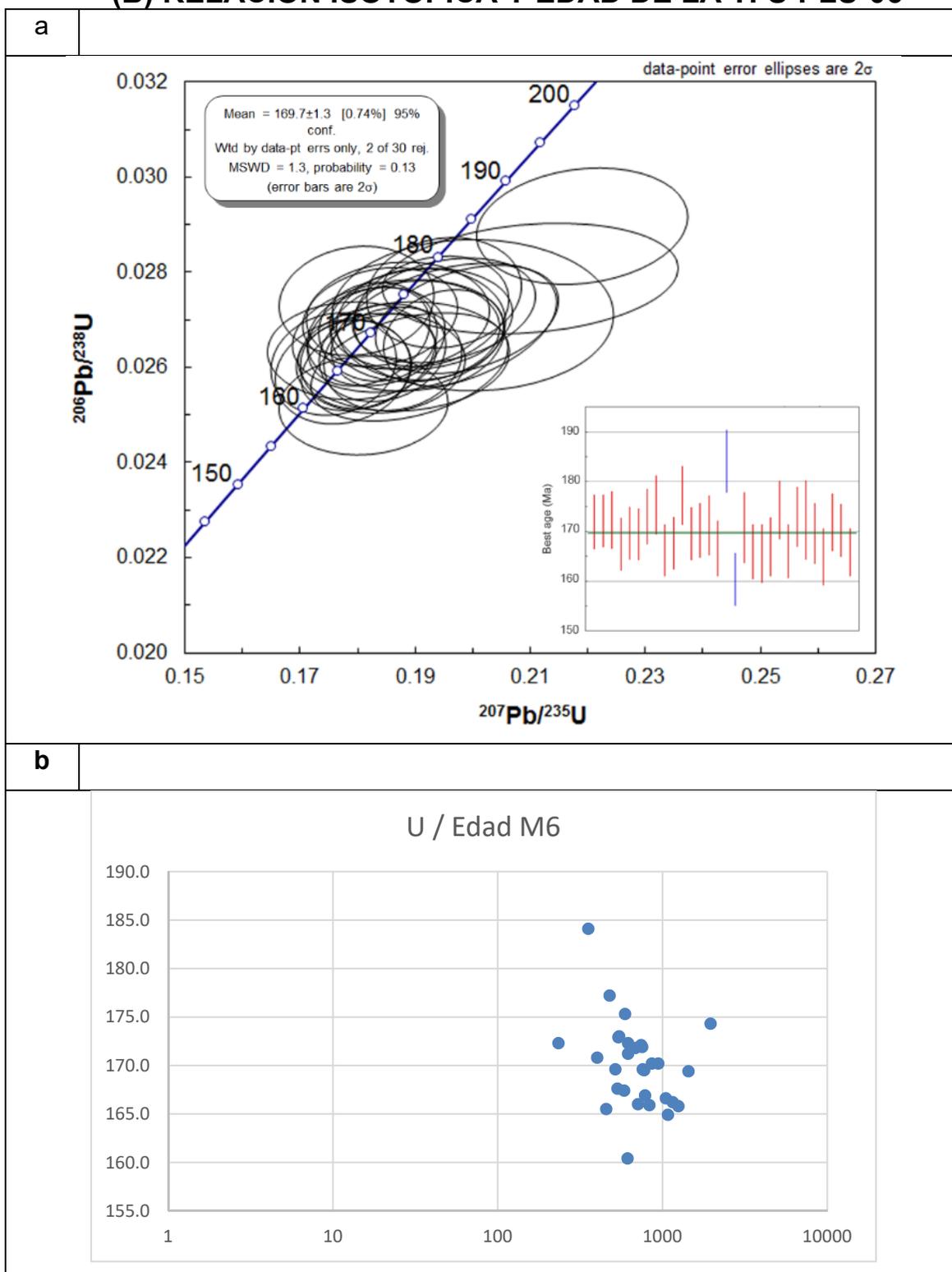
Las muestras TFS-PLU-06 y TFS-PLU-11 son correlacionables y pertenecen al evento más antiguo de cristalización magmática registrado en la zona. Estas dos muestras pertenecen a lo que es conocido como Plutón La Unión y en promedio poseen una edad de 168,45 Ma.

La muestra TFS-PLU-04 corresponde a un monzogranito que forma parte de un cuerpo ígneo que se desarrolla hacia el este de la Falla del Río La Jigua. Este segundo evento magmático se extiende hasta alcanzar casi la frontera con el país de Honduras.

La muestra TFS-PLU-05 corresponde a un dique de monzodiorita que se encuentra intruyendo al cuerpo ígneo al este de la falla Río La Jigua, este dique se tomó como representativo de varios diques de similar composición y comportamiento que se encuentran dispuestos al azar en este cuerpo y en el Plutón La Unión. Los diques se generaron por un movimiento tensional regional que permitió originar una apertura en la corteza para el emplazamiento de dichos cuerpos elongados.

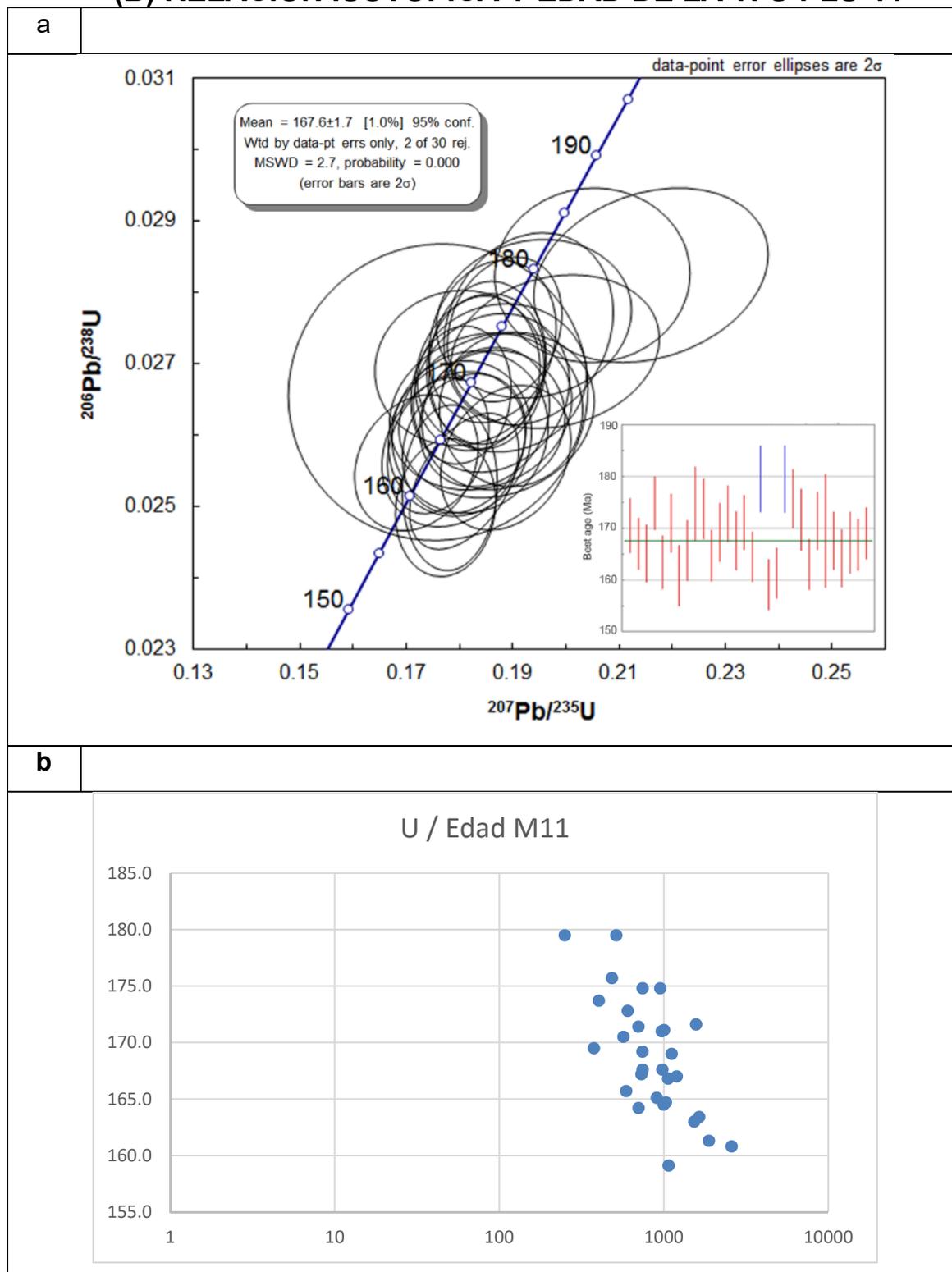
La muestra TFS-PLU-10 es controversial puesto que presenta una edad bastante joven con respecto a las otras cuatro, y se encuentra casi al final de la traza de la Falla La Jigua que se desarrolla sobre el Río La Jigua en su contacto lateral este y con la Falla Pacayalito que se desarrolla sobre el Río Pacayalito como su contacto lateral oeste.

FIGURA 19
(A) RELACIÓN ISOTÓPICA DE LA MUESTRA TFS-PLU-06
(B) RELACIÓN ISOTÓPICA Y EDAD DE LA TFS-PLU-06



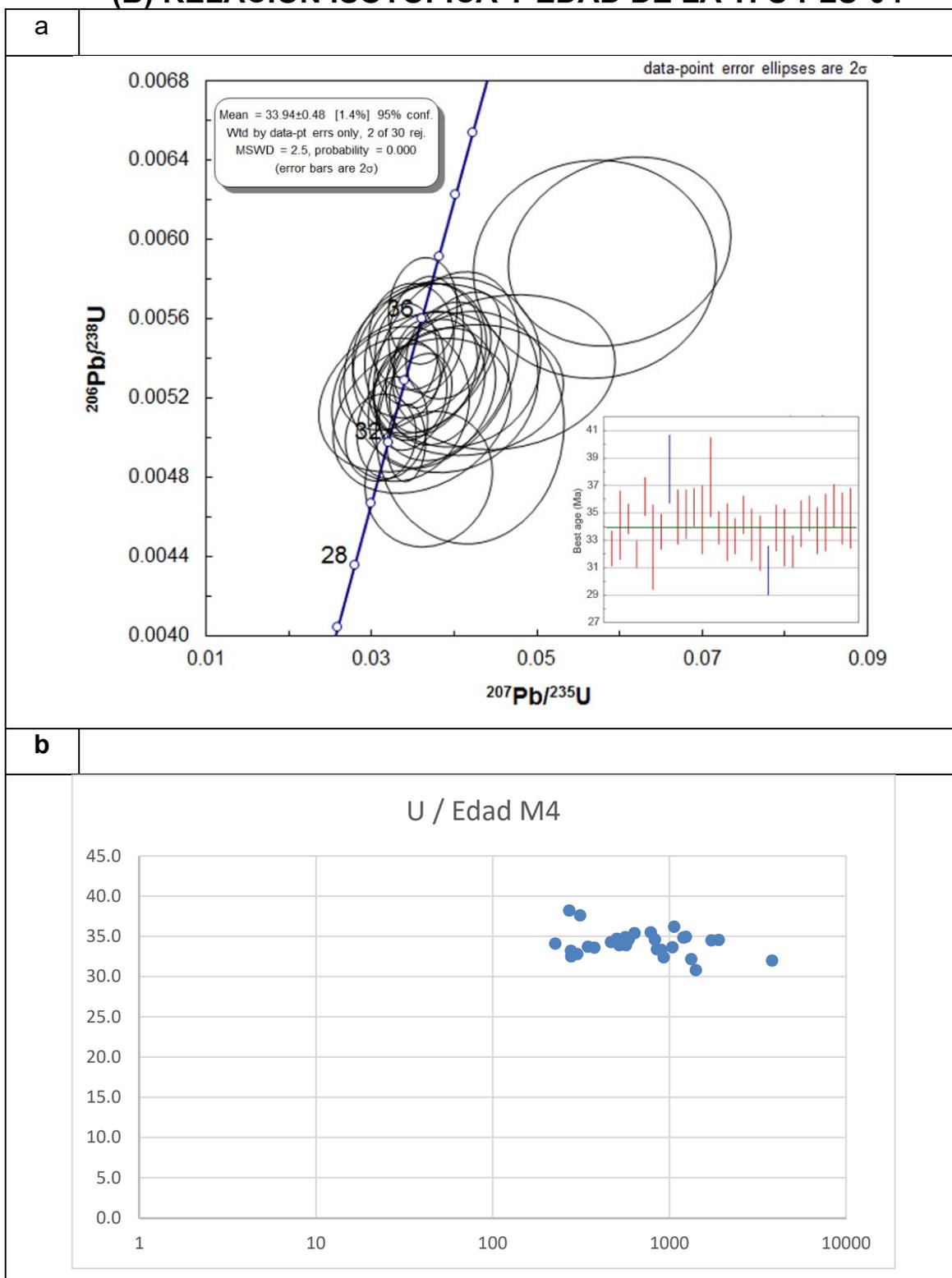
Fuente: Investigación de campo 2 016

FIGURA 20
(A) RELACIÓN ISOTÓPICA DE LA MUESTRA TFS-PLU-11
(B) RELACIÓN ISOTÓPICA Y EDAD DE LA TFS-PLU-11



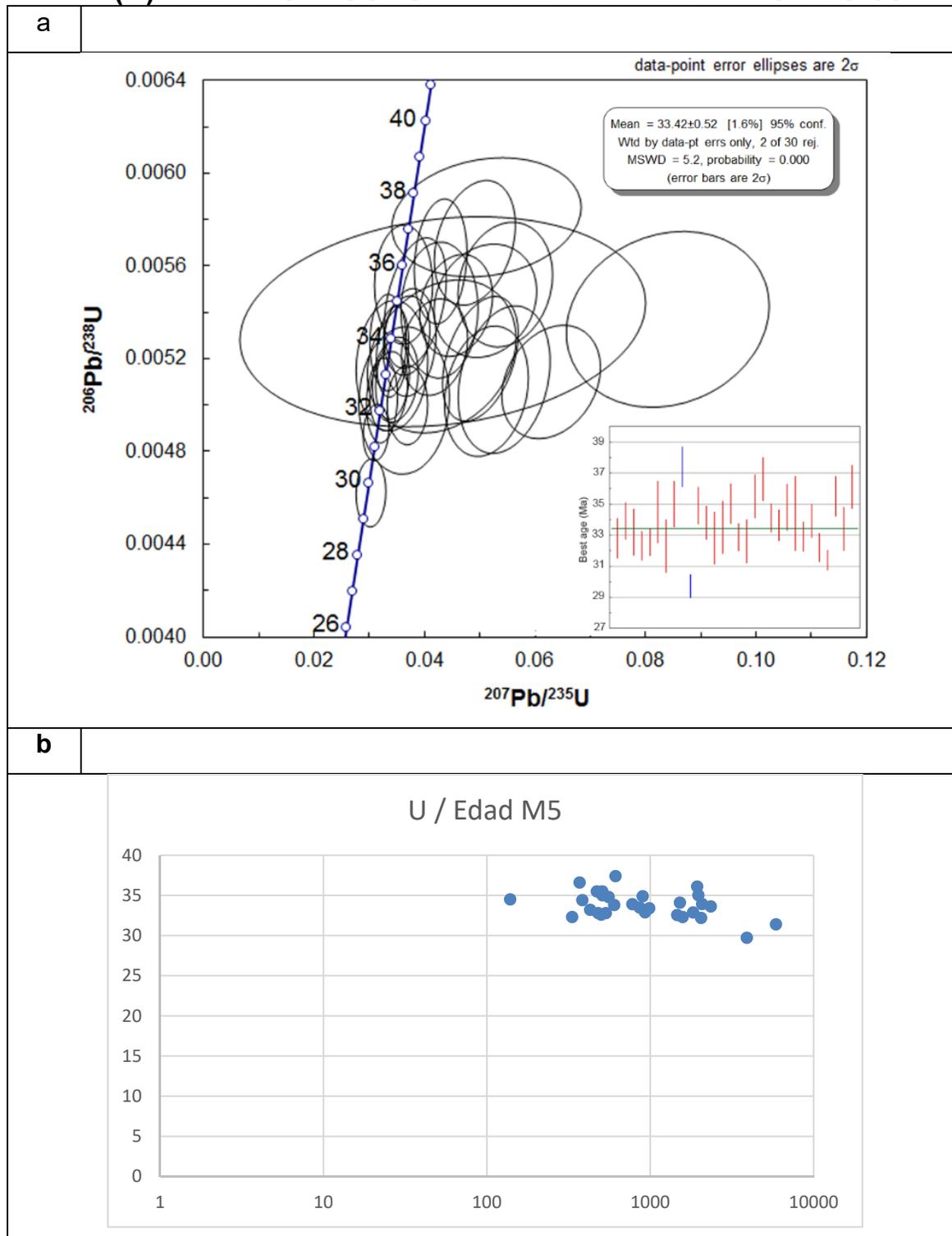
Fuente: Investigación de campo 2 016

FIGURA 21
(A) RELACIÓN ISOTÓPICA DE LA MUESTRA TFS-PLU-04
(B) RELACIÓN ISOTÓPICA Y EDAD DE LA TFS-PLU-04



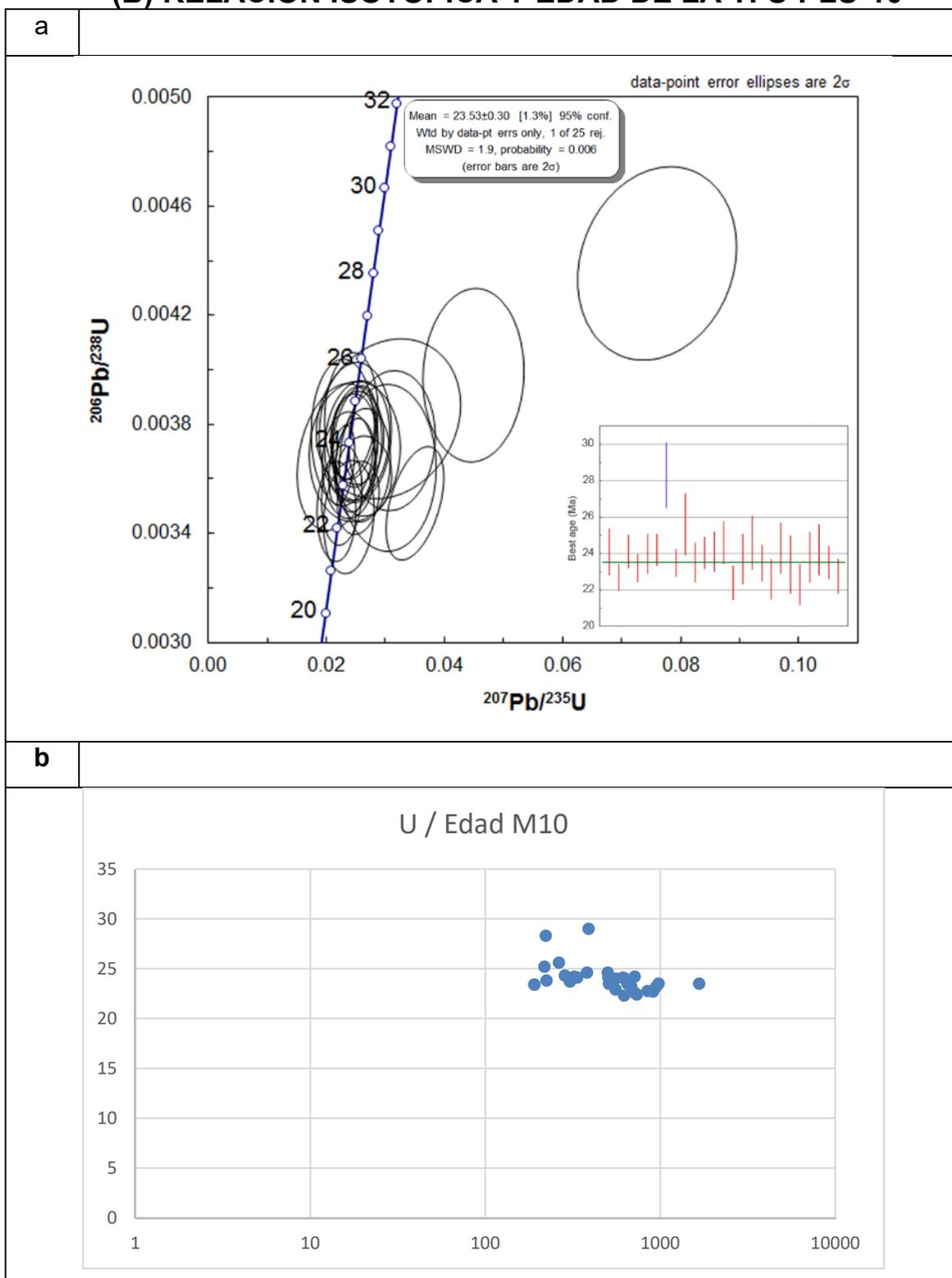
Fuente: Investigación de campo 2 016

FIGURA 22
(A) RELACIÓN ISOTÓPICA DE LA MUESTRA TFS-PLU-05
(B) RELACIÓN ISOTÓPICA Y EDAD DE LA TFS-PLU-05



Fuente: Investigación de campo 2 016

FIGURA 23
(A) RELACIÓN ISOTÓPICA DE LA MUESTRA TFS-PLU-10
(B) RELACIÓN ISOTÓPICA Y EDAD DE LA TFS-PLU-10



Fuente: Investigación de campo 2 016

Los circones evaluados por el laboratorio poseen algunas características que son evidenciados en la Figura 24, donde se muestran 8 de los 30 circones analizados para cada una de las muestras.

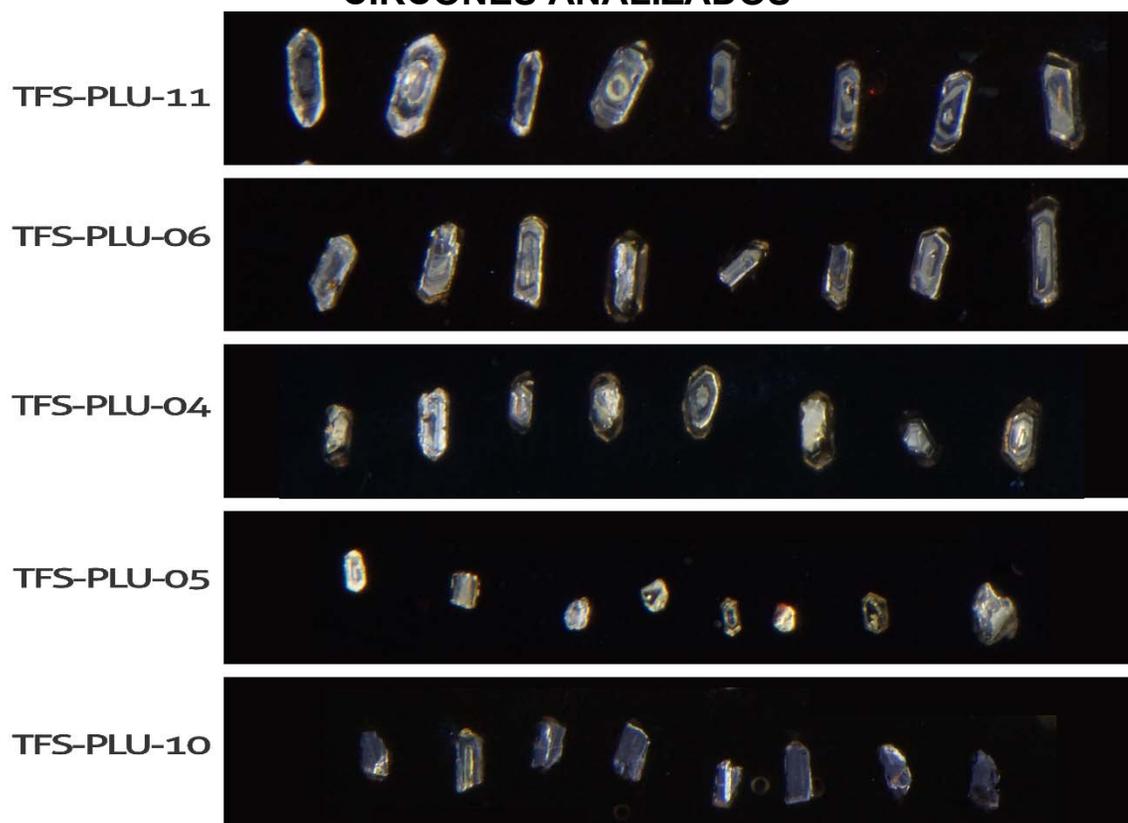
Los cristales de circón para las muestras jurásicas (TFS-PLU-11 / 06) se presentan de forma euhedral, con una coloración gris bastante uniforme y con aureolas de crecimiento, lo cual respalda la fiabilidad de los resultados debido a que no se observa alteración en los cristales y estos son de origen primario, no heredados.

La muestra TFS-PLU-04 observa de forma subhedral, con una coloración entre gris y ámbar y con aureolas de crecimiento similares a las muestras jurásicas, con una muy alta confiabilidad.

La forma de los cristales encontrados en la muestra TFS-PLU-05 es bastante complicada, ya que existe gran variación entre estos, algunos son euhedrales, otros subhedrales y otros anhedrales (los cuales pueden llegar a reflejar un enfriamiento rápido, que no permitió la formación completa de estos minerales). Además, poseen un color gris y ámbar, donde algunas veces es posible encontrar aureolas de crecimiento, especialmente cuando son cristales euhedrales. Estos se encuentran moderadamente fracturados, lo que contribuyó a que se descartaran hasta doce de estos circones debido a que poseían concentraciones anómalas de plomo.

Los circones de la muestra más joven (TFS-PLU-10) poseen una serie de cristales subhedrales, coloración similar a las de las muestras jurásicas, estos minerales no poseen aureolas de crecimiento y algunas están levemente fracturados, lo cual sugiere que están alterados y su contenido de plomo no radiogénico es más posible y se encuentra reflejado en la Tabla 10, donde se evidencia que se descartaron diez de sus circones analizados, debido a concentraciones anómalas de Pb.

FIGURA 24
CIRCONES ANALIZADOS



Fuente: Imágenes tomadas por Dr. Luigi Solari en el Centro de Geociencias de la UNAM en colaboración con esta investigación.

3.3. Geoquímica

Se analizaron las 10 muestras recolectadas mediante geoquímica de elementos mayores, traza y REE. Para una mejor interpretación, se dividieron en 4 grupos intrusivos basados en los datos geocronológicos obtenidos, así como en la ubicación espacial que estos poseen de acuerdo a la siguiente tabla:

TABLA 11
RANGO POLICROMÁTICO DE LOS GRUPOS ÍGNEOS

Muestra	Roca petrográfica	Edad	Grupo	Símbolo individual
TFS-PLU-03	Monzogranito	168,45+/-2,55 Ma. Jurásico/Medio Bajociense	JMB	
TFS-PLU-06*	Monzogranito			
TFS-PLU-08	Monzogranito			
TFS-PLU-11*	Monzogranito			
TFS-PLU-01	Cuarzodiorita	33,94+/-0,48 Ma. Paleogeno/Oligoceno Rupeliense	POR	
TFS-PLU-02	Granodiorita			
TFS-PLU-04*	Monzogranito			
TFS-PLU-05*	Cuarzomonzodiorita	33,44+/-0,48 Ma. Paleogeno/Oligoceno Rupeliense	POR-D	
TFS-PLU-09	Granodiorita	23,53+/-0,3 Ma. Paleogeno/Oligoceno Chattiense	POC	
TFS-PLU-10*	Monzogranito			

Fuente: Investigación de campo 2 016.

Los datos obtenidos fueron evaluados por los métodos geoquímicos establecidos por diversos autores y se separaron según su naturaleza en elementos mayores y elementos traza, que dieron los siguientes resultados:

3.3.1. Elementos mayores

El análisis parte tomando como referencia el método con el nombre de "Mineralogía normativa CIPW" la cual fue desarrollada a principios del siglo pasado por Cross, Iddings, Pearson y Washington. En la Tabla 12 se desarrollan los resultados obtenidos, donde es necesario mencionar que esta mineralogía

puede diferir de la mineralogía observada mediante el análisis petrográfico, porque los cálculos asumen que el magma es anhídrido, siendo la biotita u hornblenda incapaces de formarse con base a esta clasificación.

TABLA 12
MINERALOGÍA NORVATIVA

Muestra	Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
TFS-PLU-03	31.5	0	28.0	29.3	5.0	0.01	3.5	2.0	0.5	0.2
TFS-PLU-06	23.0	0	29.8	34.7	5.1	1.0	3.2	2.1	0.8	0.3
TFS-PLU-08	31.4	1	24.1	33.7	4.1	0	2.7	1.5	0.6	1.3
TFS-PLU-11	20.2	0	27.8	40.2	1.9	6.0	0.3	2.6	1	0.2
TFS-PLU-01	15.4	0	15.7	30.8	20.3	3.0	7.4	5.1	1.8	0.5
TFS-PLU-02	20.8	0	22.8	43.2	3.2	5.3	0.7	2.6	1	0.4
TFS-PLU-04	28,1	0	29.1	33.4	2.8	2.9	2.0	1.5	0.2	0.1
TFS-PLU-05	22.0	0	11.5	41.0	9.9	3.4	3.5	5.1	2	2
TFS-PLU-09	29.1	0.4	25.2	32.0	5.6	0	4.6	1.8	0.6	0.8
TFS-PLU-10	25.7	1.4	28.2	37.1	1.8	0	3.3	2.2	0.1	0.1

Q:Cuarzo, **C:**Corindón, **Or:**Ortoclasa, **Ab:**Albita, **An:**Anortita, **Di:**Diopsido, **Hy:**Hiperstena, **Mt:**Magnetita, **Il:**Ilmenita y **Ap:**Apatito

Fuente: Investigación de campo 2 016.

De las rocas que contienen corindón normativo, resaltan especialmente en las muestras TFS-PLU-09/ 10, las cuales pertenecen al intrusivo que aflora entre el este y sureste del Río Pacayalito y al oeste del Río La Jigua. Además, la roca TFS-PLU-08 presenta una pequeña porción de este mineral, que, aunque aparentemente no es significativa, puede ser indicio de otra composición en el magma.

En cuanto a la saturación de sílice, este se encuentra vinculado con la concentración de sílice (SiO₂) presente en la roca también conocido como “índice de saturación de sílice” (ISS). Este criterio permite dividirlos como sobresaturadas (>70%), saturadas (64%-70%) y subsaturadas (<64%) en sílice. (Tabla 13)

TABLA 13
ÍNDICE DE SATURACIÓN DE SÍLICE (ISS)

Muestra	ISS	Muestra	ISS
TFS-PLU-03	Sobresaturado	TFS-PLU-02	Saturado
TFS-PLU-06	Sobresaturado	TFS-PLU-04	Sobresaturado
TFS-PLU-08	Sobresaturado	TFS-PLU-05	Saturado
TFS-PLU-11	Sobresaturado	TFS-PLU-09	Sobresaturado
TFS-PLU-01	Sub saturado	TFS-PLU-10	Sobresaturado

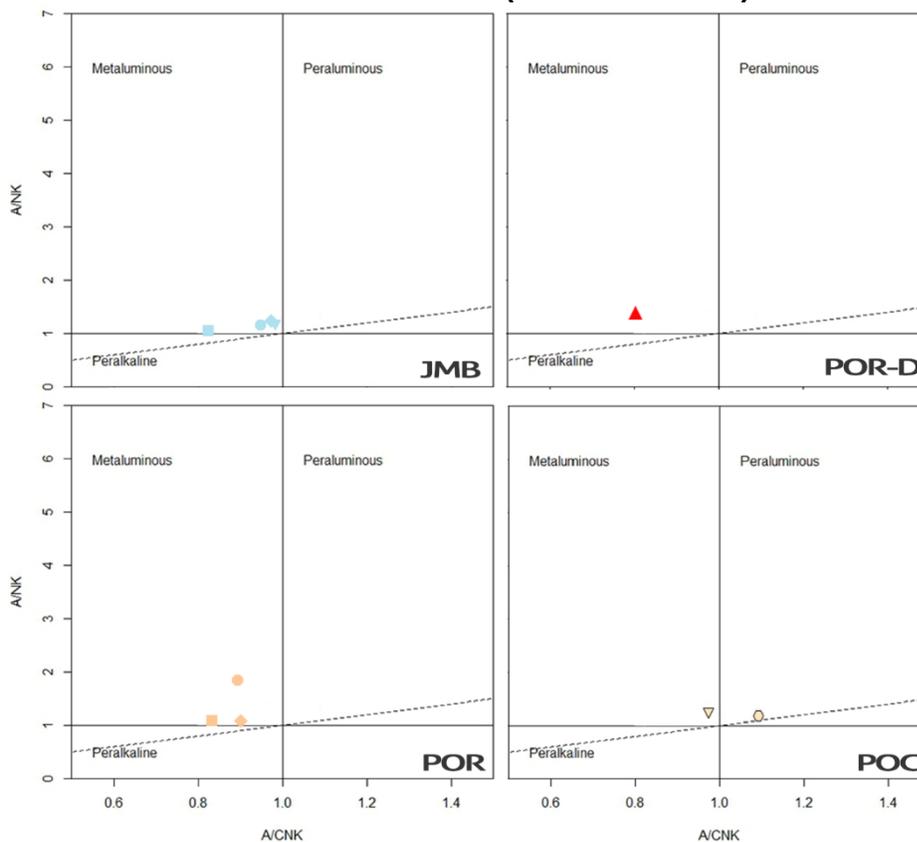
Fuente: Investigación de campo 2 016

El grado de saturación en alúmina (ISA) es el segundo criterio general en las rocas ígneas, que establece una relación en la concentración de alúmina (Al_2O_3) en relación a la concentración de los óxidos de sodio (Na_2O), potasio (K_2O) y calcio (CaO), en proporciones moleculares ($Al_2O_3 / Na_2O + K_2O + CaO$).

Shand (1943) estableció gráficamente el desarrollo del criterio ISA, mediante una relación molar entre $Al / (Ca+Na+K)$ en función a $Al / (Na+K)$ denominada ACKN/AKN. Ésta puede presentar 3 tipos de variantes: Peraluminoso Metaluminoso ó Peralcalino.

La gráfica 25 muestra cuatro diagramas de Shand (1943), donde se evidencian la dominancia de metaluminosidad en las rocas estudiadas (JMB, POR y POR-D). La gráfica (POC) en la se observan las rocas TFS-PLU-09/ 10 presenta una clara tendencia a migrar de una composición metaluminosa a peraluminosa, lo cual es reforzado por el contenido normativo de Corindón en ambas muestras.

FIGURA 25
DIAGRAMAS ISA (SHAND 1943)

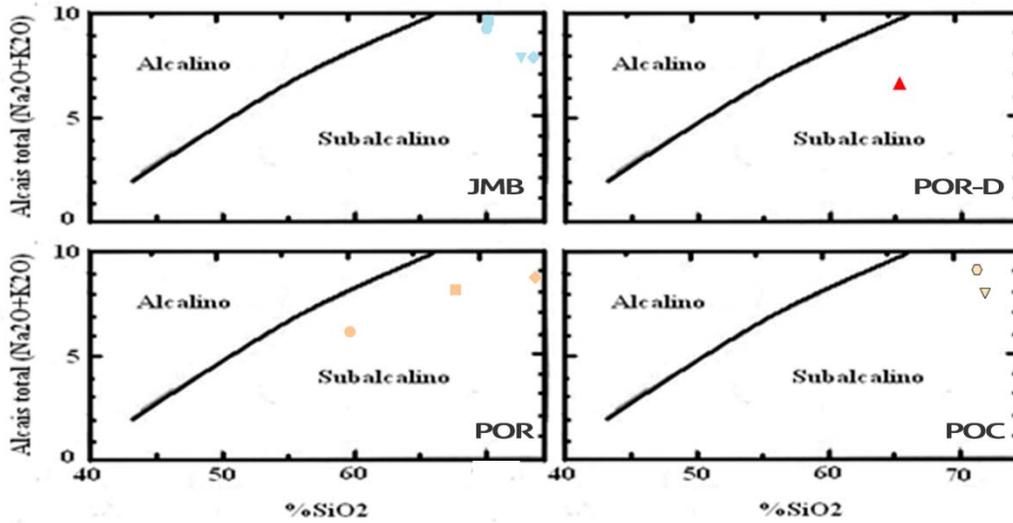


Fuente: Investigación de campo 2 016.

La alcalinidad de la roca se obtuvo mediante los diagramas McDonald & Katsura (1984), Irvine & Baragar (1971) y Peccerillo & Taylor (1976).

La clasificación McDonald & Katsura (1964) dio como resultado una dominancia de las rocas en un ambiente subalcalino (calcoalcalinas y tholeíticas), lo cual implica que están asociadas a un margen de placa convergente y a zonas de extensión respectivamente. (Figura 26)

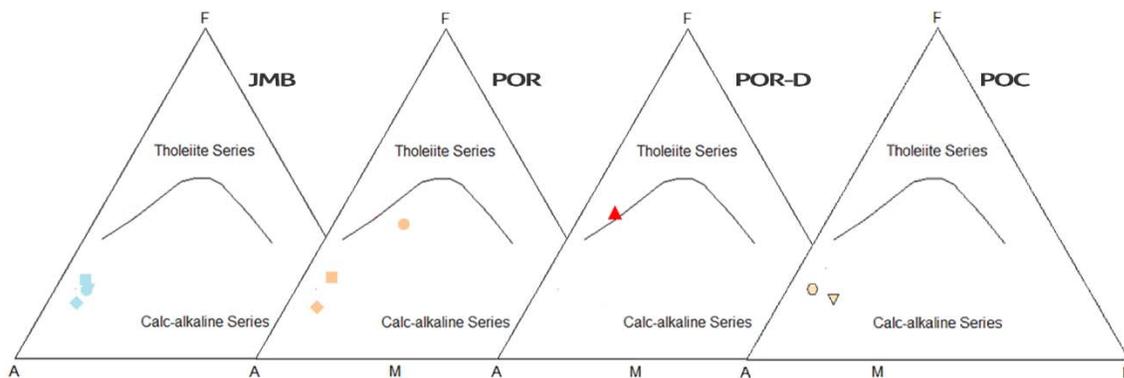
FIGURA 26
ALCALINIDAD BASADO EN McDONALD & KATSURA (1964)



Fuente: Investigación de campo 2 016.

La clasificación Irvine & Baragar (1971) por medio de la Figura 27 manifiesta la dominancia de rocas calcoalcalinas (JMB, POR y POC), con una muestra (POR-D) que se encuentra dentro del campo Tholeítico la cual puede estar vinculada a márgenes convergentes al igual que el sistema calcoalcalino.

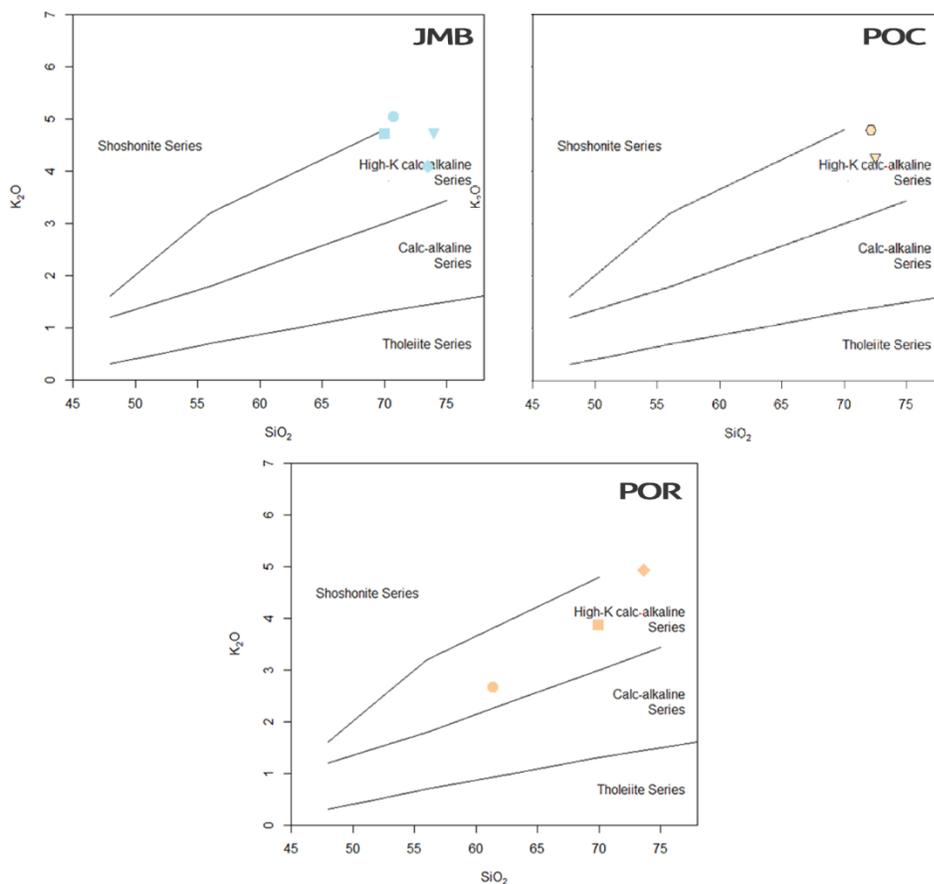
FIGURA 27
CLASIFICACIÓN SUBALCALINA



Fuente: Investigación de campo 2 016.

El diagrama de Peccerillo & Taylor (1976) muestra una total dominancia de las rocas analizadas (JMB, POR y POC) dentro del campo Calcoalcalino rico en potasio. (Figura 28)

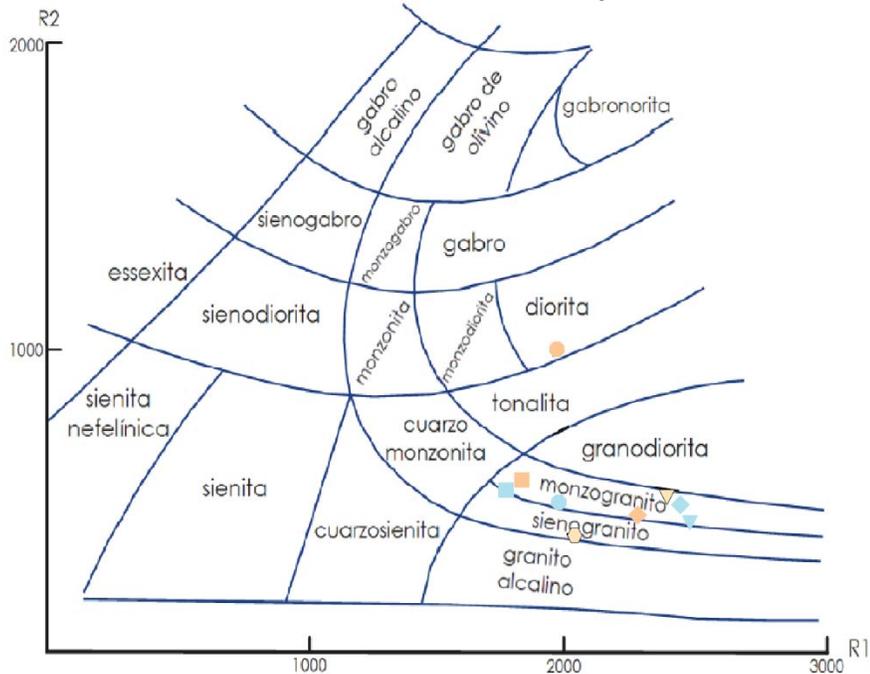
FIGURA 28
CLASIFICACIÓN CALCOALCALINA



Fuente: Investigación de campo 2 016.

El diagrama R1-R2 muestra una dominancia de rocas monzograníticas, a excepción de TFS-PLU-10 (POC) que se encuentra dentro del campo de sienogranito y TFS-PLU-01 que se encuentra dentro del campo de Diorita.

FIGURA 29
CLASIFICACIÓN POR MÉTODO R1-R2 (DE LA ROCHE 1980)

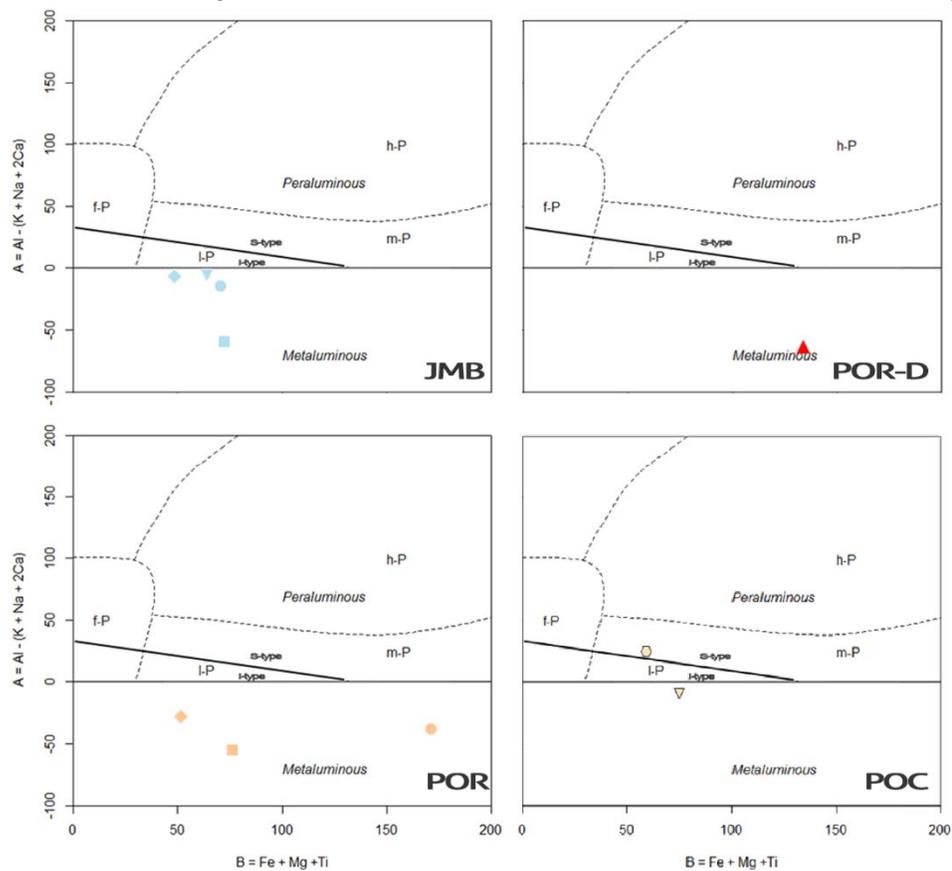


Fuente: Investigación de campo 2 016.

La discriminación por marco tectónico tomando de referencia los elementos mayores, se realizó mediante el método B-A (modificado de Villaseca 1998)

La discriminación por marco tectónico tomando de referencia el diagrama B-A puede evaluar la saturación de alúmina, así como la roca generadora del magma, donde claramente domina la fuente metaígneas (*I-type*) para casi todas las muestras a excepción de la TFS-PLU-10 que se originó de una roca metasedimentaria (*S-type*). (Figura 30)

FIGURA 30
CLASIFICACIÓN B-A (MODIFICADO DE VILLASECA et. Al. 2001)



Fuente: Investigación de campo 2 016

Como forma de resumen se muestra la Tabla 14, donde se observa los resultados obtenidos mediante los métodos principales de división ISS, ISA y CBA.

TABLA 14
RESUMEN DE RESULTADOS DE ELEMENTOS MAYORES

Muestra	ISS	ISA	CBA			De La Roche	Discriminación tectónica
			Mc&K	I&B	P&T		Villaseca
TFS-PLU-03	Sobresaturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Monzogranito	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-06	Sobresaturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Monzogranito	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-08	Sobresaturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Monzogranito	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-11	Sobresaturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Monzogranito	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-01	Subsaturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Diorita	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-02	Saturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Monzogranito	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-04	Sobresaturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Monzogranito	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-05	Saturado	Metaluminosa	Subalcalino	Tholeítico			Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-09	Sobresaturado	Metaluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Monzogranito	Tipo I Metaluminoso
TFS-PLU-10	Sobresaturado	Peraluminosa	Subalcalino	Calcoalcalino	Rico en K	Sienogranito	Tipo S Peraluminoso

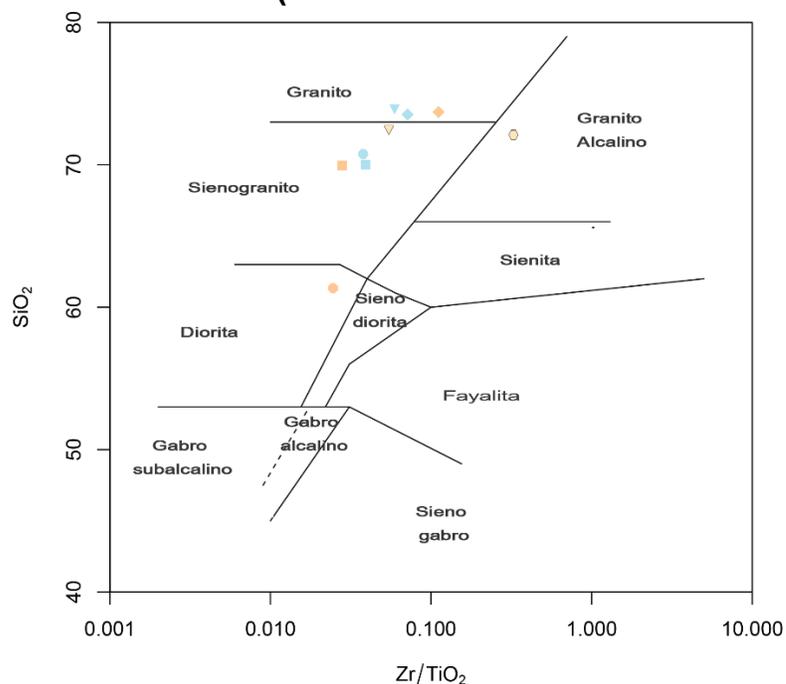
ISS: Índice de saturación de sílice, **ISA:** Índice de saturación de alúmina, **CBA:** Criterio en base a la alcalinidad, **Mc&K:** McDonald & Katsura (1964), **I&B:** Irvine & Baragar (1971), **P&T:** Peccerillo & Taylor (1976), **B&B:** Batcherlos & Bowden (1985)

Fuente: Investigación de campo 2 016

3.3.2. Elementos Traza y REE

Los elementos traza se analizaron y asociaron en grupos previamente establecidos en la Tabla 11 (JMB/POR/POR-D/POC). El análisis se inicia con una clasificación de roca por el método Winchester & Floyd (1977), donde es posible observar una dominancia en los campos Granito y Sienogranito en la mayoría de las muestras a excepción de TFS-PLU-01 que está en el campo de Diorita y TFS-PLU-10 que grafica en el campo de Granito alcalino. (Figura 31)

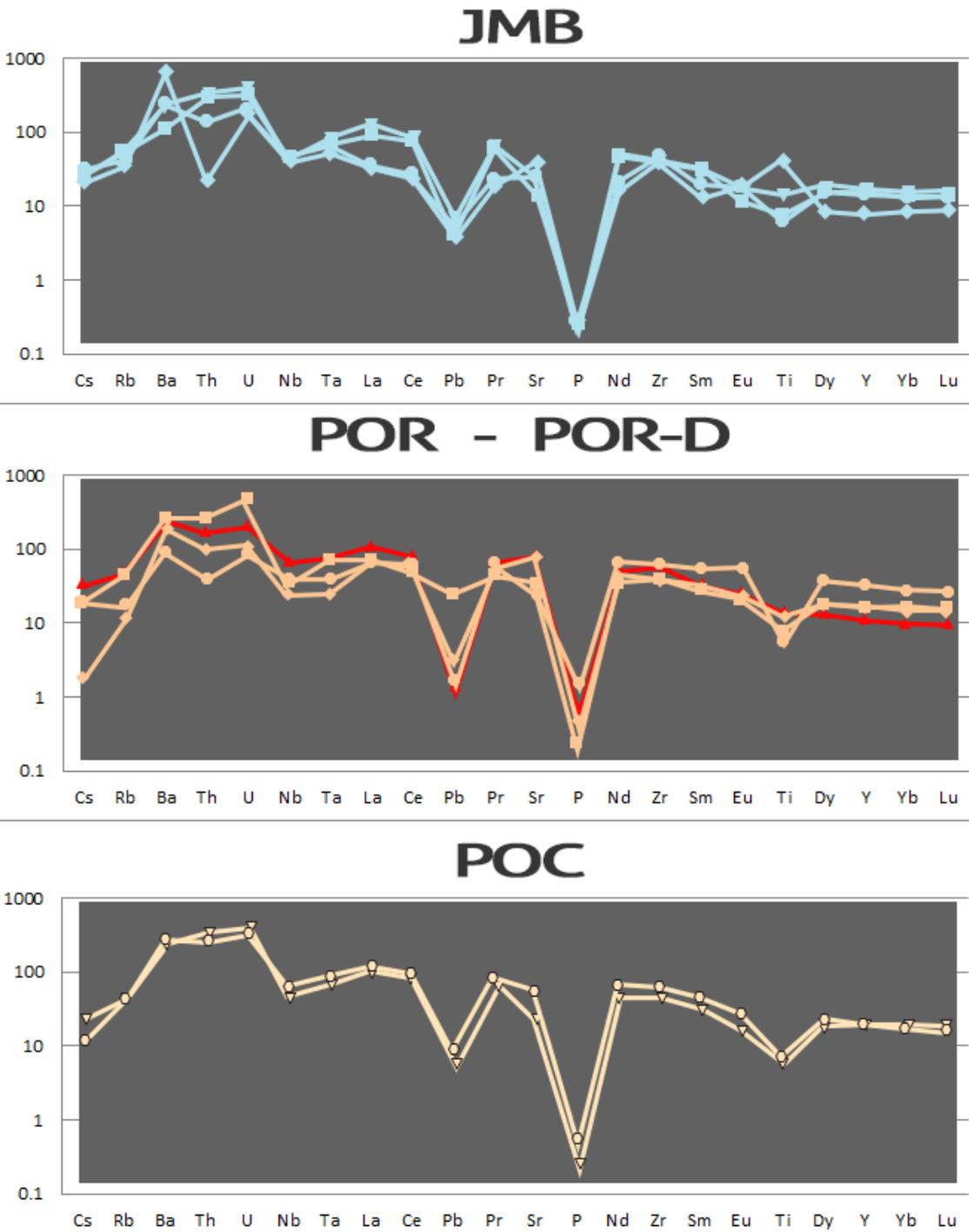
FIGURA 31
ZR/TIO2 – SIO2 (WINCHESTER & FLOYD 1977)



Fuente: Investigación de campo 2 016

McDonough & Sun (1995) sugieren que para estudiar los elementos traza y REE debe de realizarse una normalización de estos a Manto Primitivo y Condrita respectivamente, con el fin de observar las incompatibilidades positivas y negativas en el sistema *spider*. (Figura 32)

FIGURA 32
ELEMENTOS TRAZA NORMALIZADOS A MANTO PRIMITIVO
(McDONOUGH & SUN 1995)



Fuente: Investigación de campo 2 016

El diagrama (Figura 32) evidencia un comportamiento similar para los intrusivos, y reflejan una típica firma de arco volcánico y una clara vinculación de la misma cámara magmática ya que los intrusivos que contienen las mismas proporciones de HFSE pueden estar directamente relacionados o pueden haber sido derivados del mismo magma (Pearce y Cann, 1973). Esto se evidencia por el enriquecimiento del magma en elementos LFSE (*Low Field Strength Elements*) y plomo, a diferencia de los HFSE (*High Field Strength Elements*) como consecuencia de la solubilidad y movilidad de los primeros (Duque 2009).

Los elementos de alta fuerza de campo (HFSE) son elementos con una alta relación carga/radio. Estos incluyen Ti, Ni, Cr, Zr, Hf, Nb, Ta, y Y. Las proporciones de estos diferentes elementos se consideran para reflejar las relaciones genéticas entre varias rocas (Raymond 1995).

Las muestras poseen anomalías negativas de Nb y Ti que son indicadores de un fraccionamiento del magma emplazado en corteza continental por medio de fenómenos de subducción (Rollinson 1993, Wilson 1987). Además, se observa empobrecimiento de Ba y Sr vinculado a su gran movilidad y compatibilidad con líquidos de composición intermedia a félsica (Milián 2013), dando como resultado una sustitución al momento de la cristalización, al K en feldespatos potásicos y biotita, y al Ca en plagioclasas respectivamente (Wilson 1987).

Anomalías positivas en U y Pb indican la incompatibilidad y diferenciación que han sufrido el magma generador de las rocas de esta investigación.

Los Elementos de tierras raras (*Rare Elements Earth* ó REE) también se analizaron mediante un diagrama *Spider* normalizado a

Condritas. (McDonough & Sun 1995) con el fin de analizar la distribución de LREE (*Light Rare Elements Earth*) y los HREE (*High Rare Elements Earth*) los cuales están divididos por el elemento Eu (Figura 33).

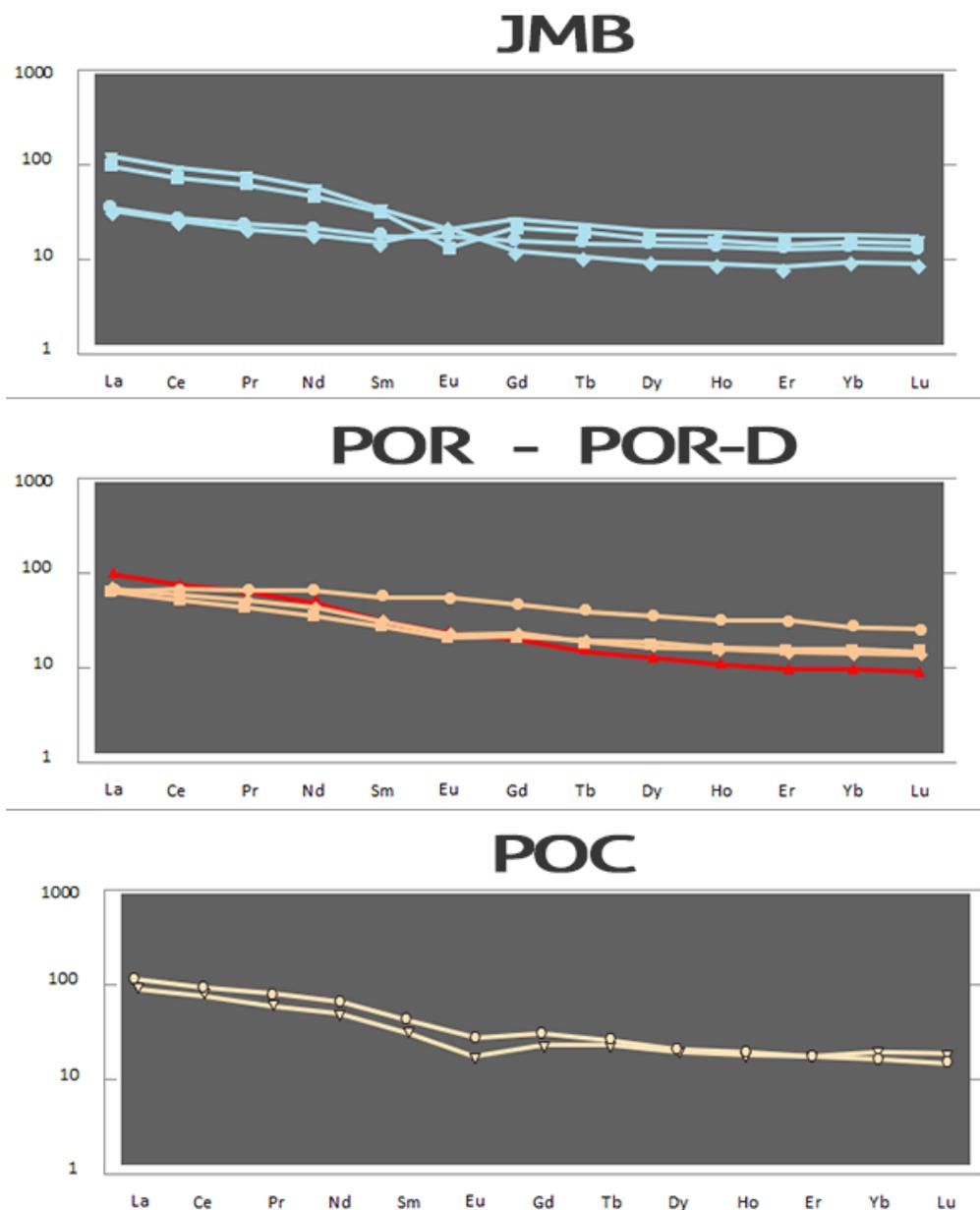
Un enriquecimiento de las LREE regularmente se logra cuando el magma fuente era portador de granates, los cuales retienen las HREE más pesadas dentro de su red cristalina.

Es claro observar un comportamiento muy similar entre los grupos de rocas ígneas de esta investigación, donde es observable un comportamiento diferente en el elemento Eu, que puede generar una sustitución por Ca en plagioclasas, que es evidenciado por anomalías negativas en el diagrama *Spider*, pero cuando presenta enriquecimiento patentiza una ganancia en plagioclasas ya fraccionadas derivadas de la migración de magma. (Raymond 1995).

Este fenómeno es claramente observable en el grupo JMB, donde TFS-PLU-06 no presenta ni enriquecimiento ni empobrecimiento, TFS-PLU-03 presenta un déficit de Eu y las muestras TFS-PLU-06/ 08 y las otras dos presentan una clara ganancia debido al fraccionamiento de la muestra TFS-PLU-03.

En las muestras perteneciente al grupo POR (TFS-PLU-01/ 02/ 04) y POR-D (TFS-PLU-05) no se observa mayor fraccionamiento de plagioclasas, pero sobresale el fraccionamiento de apatito de la muestra TFS-PLU-01 evidenciado por la anomalía negativa de La.

FIGURA 33
REE NORMALIZADAS A CONDRITAS
(McDONOUGH & SUN 1995)

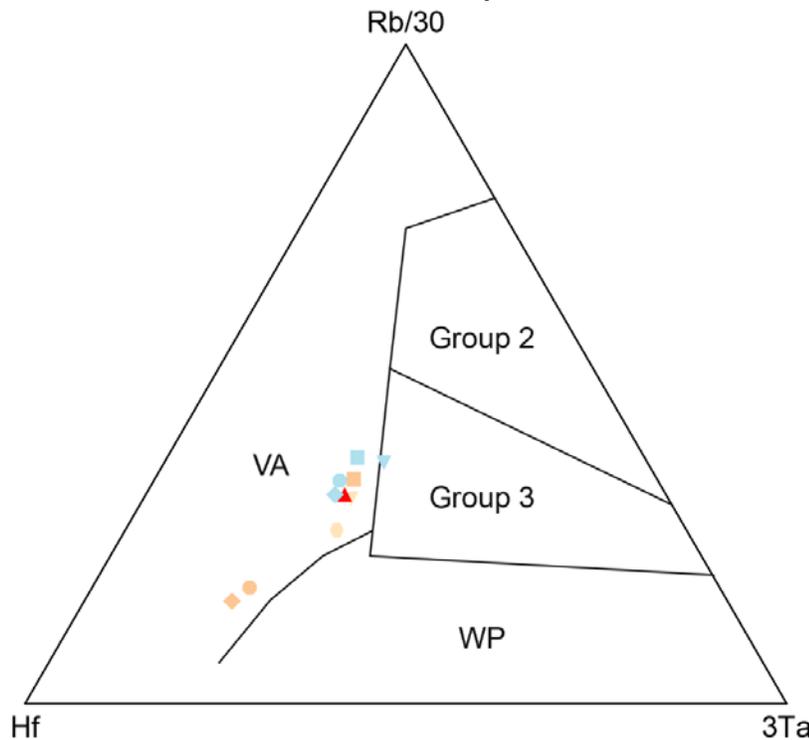


Fuente: Investigación de campo 2 016

El ambiente geodinámico se obtuvo por tres métodos: Diagrama ternario Hf - Rb/30 - 3Ta (Harris et. Al. 1986), Discriminación tectónica (Pearce et. Al. 1984) y Características petroquímicas (Winter 2001).

Mediante el diagrama ternario de Harris et al. (1986) se puede establecer que predominantemente las muestras corresponden a un ambiente geodinámico “VA” que corresponde al ambiente de Arco volcánico a excepción de la muestra TFS-PLU-03 (JMB) que se encuentra levemente dentro del campo Tardío y post-colisional.

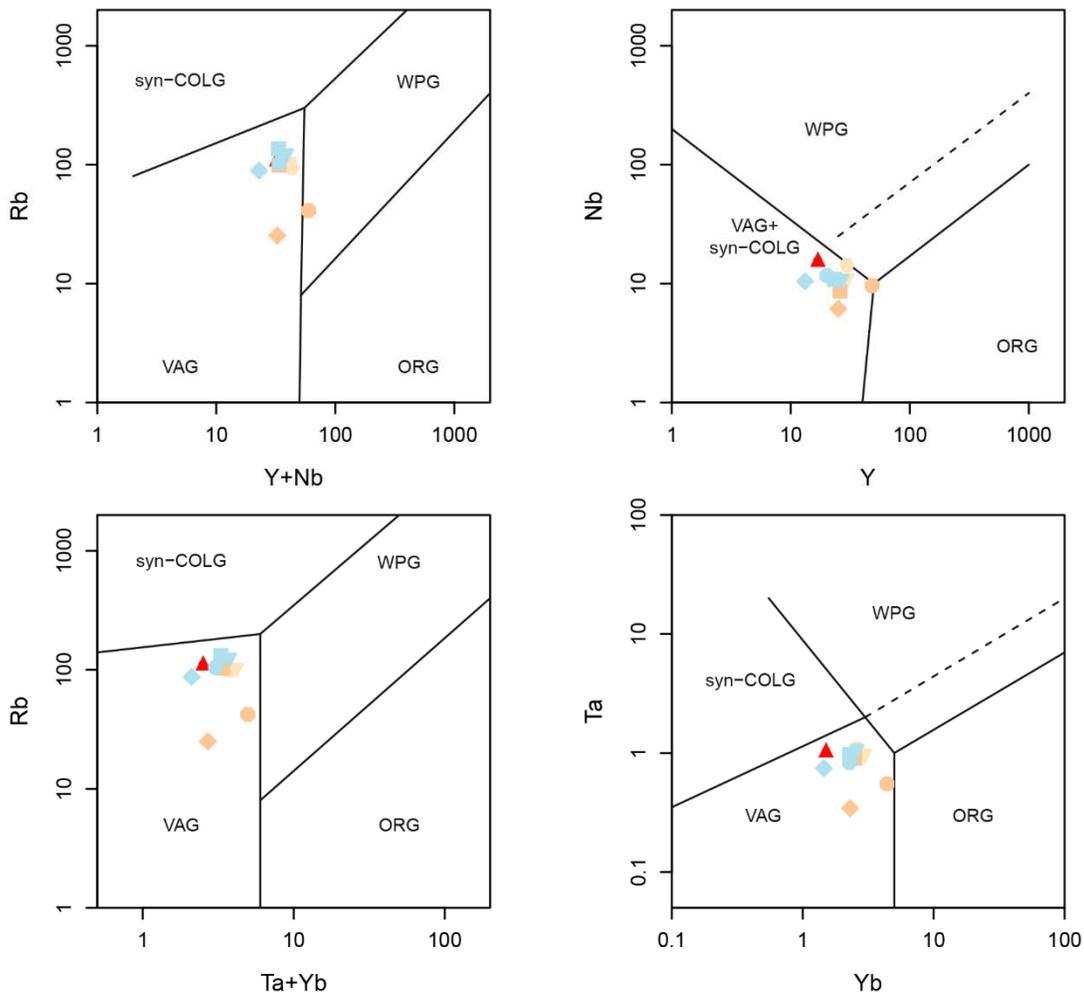
FIGURA 34
DIAGRAMA HF - RB/30 - 3TA (HARRIS ET. AL 1986)



VA: Arco volcánico, **Group 2:** Sin-colisional, **Group 3:** Tardío y Post-colisional, **WP:** Intraplaca
Fuente: Investigación de campo 2 016

Pearce et. Al. (1984) estableció los diagramas de discriminación tectónica los cuales toman de referencia el contenido de Y, Nb, Rb, Ta y Yb. Estos gráficos evidencian una fuerte tendencia a un ambiente “VAG” y “VAG+Syn-COLG” que son granitos generados en arcos volcánicos y sintectónicos; y demuestra que evidentemente todos los grupos ígneos poseen una mayor tendencia a un ambiente de arco. (Figura 35)

FIGURA 35
MARCO TECTÓNICO (PEARCE ET. AL 1984)



Syn-COLG: Granitos sintectónicos, **WPG:** Granitos intraplacas, **ORG:** Granitos de cordilleras oceánicas, **VAG:** Granitos de arcos volcánicos.

Fuente: Investigación de campo 2 016

Winter (2001) sugiere que puede establecerse el ambiente geodinámico de formación basándose en 2 características como el tipo de roca, la geoquímica, de las cuales se puede establecer su origen y el mecanismo de fusión que generó el conjunto de rocas del intrusivo.

El intrusivo JMB está conformado por Granodiorita-Sienogranito-Monzogranito, la secuencia POR está conformado por Monzodiorita-Tonalita-Monzogranito, las rocas POR-D por Monzodiorita y la asociación POC por Cuarzomonzodiorita-Granodiorita.

La geoquímica de las secuencias de rocas reveló que estas son tipo-I calcoalcalino con un enriquecimiento en potasio, metaluminoso con un leve enriquecimiento hacia peraluminoso, lo cual sostiene que fueron generadas por una mezcla de material máfico derivado del manto y corteza continental.

Estos resultados revelan un mecanismo de fusión, transferencia de fluidos y especies disueltas de roca en la zona de subducción en la cuña mantelar, dando como resultado un ambiente MCA ó Margen Continental Activo. (Tabla 15)

TABLA 15
AMBIENTE GEODINÁMICO (WINTER 2001)

Características	JMB	POR	POR-D	POC
Geoquímica	Calcoalcalino Rico en K Tipo I Matulumínico	Calcoalcalino Rico en K Tipo I Matulumínico	Toleítico Tipo I Matulumínico	Calcoalcalino Rico en K Tipo I-S Matulumínico- Peralumínico
Tipo de roca	Monzogranito	Cuarzodiorita, Granodiorita, Monzogranito	Cuarzomonzodiorita	Granodiorita, Monzogranito
Asociación mineral Pearce et. Al. (1984)	Hbl, Bt	Hbl, Bt	Hbl, Bt	Bt
Origen	Fusión parcial de material máfico derivado del manto + corteza continental			
Mecanismos de fusión	Transferencia de fluidos y especies disueltas de losa de subducción a la cuña mantelar. Fusión de la cuña y transferencia de calor a la corteza superior			

Fuente: Investigación de campo 2 016.

TABLA 16
RESUMEN DE RESULTADOS DE ELEMENTOS TRAZA Y REE

Muestra	W&F	M&S	Discriminación tectónica		
			Harris	Pearce	Winter
TFS-PLU-03	Granito	Arco Volcánico	Tardío y Postcolisional	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-06	Sienogranito	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-08	Granito	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-11	Sienogranito	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-01	Diorita	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-02	Sienogranito	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-04	Granito	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-05		Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-09	Sienogranito	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo
TFS-PLU-10	Granito alcalino	Arco Volcánico	Arco volcánico	Arco volcánico	Margen continental activo

Fuente: Investigación de campo 2 016

3.4. Discusión

Los intrusivos de la zona de estudio se pueden caracterizar gracias a cuatro factores importantes: geocronología, geoquímica, petrografía y observaciones de campo. La geocronología de los cuerpos ígneos analizados revela que en la zona existen cuatro cuerpos ígneos importantes, JMB (Jurásico Medio Bajociense), POR (Paleógeno Oligoceno Rupeliense), POR-D (Paleógeno Oligoceno Rupeliense - Dique) y POC (Paleógeno Oligoceno Chattiense).

3.4.1. Características de las unidades

a) Intrusivo JMB (Monzogranito La Unión)

El intrusivo JMB bibliográficamente es conocido como Plutón La Unión, este cuerpo ígneo había sido poco estudiado y según antecedentes a gran escala, era un único cuerpo ígneo y no existía ni variación ni diferentes eventos magmáticos en la zona.

El intrusivo había sido fechado anteriormente con una edad de 170 Ma por Torres de León, et. Al (2012) por medio de una edad relativa asignada gracias a la datación por el método U-Pb de rocas metaígneas (Ortogneis) datados en el municipio de Gualán, Zacapa al norte del área de investigación.

Basado en las cuatro muestras (TFS-PLU-03/ 06/ 08/ 11) recolectadas y analizadas por métodos petrográficos y geoquímicos de elementos mayores, traza y REE se puede argumentar que el Plutón La Unión es un granitoide del tipo Monzogranito calcoalcalino rico en potasio que se formó en un ambiente de arco volcánico derivado de la fusión parcial de

rocas ígneas (Tipo I), el cual posee una edad de $168,45 \pm 2,55$ Ma. Y se emplazó en la corteza en el piso Bajociense (Jurásico/Medio).

Los contactos netos encontrados en la aldea Tasharté y Lampocoy del intrusivo con respecto a la roca caja (Filita San Diego), la ausencia de xenolitos, y el tamaño de grano de la roca sugiere que el intrusivo se emplazó en una zona intermedia (Mesozonal), además por su forma espacial, se puede establecer que es un cuerpo ígneo tipo “globo” el cual en sus condiciones iniciales de formación fue generado por un magma viscoso (Llambías 2001) es reflejado por su composición modal y química, donde este ejerció un mayor esfuerzo de empuje al que le ofrecía la tectónica regional al momento de su emplazamiento en la corteza.

b) Intrusivo POR (Monzogranito Campanario) y POR-D (Cuarzomonzodiorita Tres Pinos)

El grupo POR nunca había sido mencionado y es nombrado en esta investigación como Granito Campanario, este está compuesto por las muestras TFS-PLU-01/ 02/ 04 las cuales han revelado que el intrusivo es un granitoide del tipo Monzogranito, que está compuesto por tres etapas de cristalización (Diorita, Granodiorita y Monzogranito) el cual se formó en un ambiente de arco volcánico.

Además, es un granitoide calcoalcalino rico en potasio generado por la fusión parcial de rocas ígneas (Tipo I) que se emplazó en la corteza hace $33,94 \pm 0,48$ Ma. durante el Rupeliense (Paleogeno/Oligoceno).

En Campanario, La Quebradona (La Unión) y Betel (Gualán) es posible encontrar contactos netos del intrusivo con respecto a la roca caja (Filita San Diego) y en Cumbre Alta el contacto fallado que este posee con respecto al Plutón La Unión.

A su vez, la ausencia de xenolitos, y el tamaño de grano de la roca sugiere que el intrusivo se emplazó en una zona intermedia (Mesozonal), además por su forma espacial, se puede establecer que es un cuerpo ígneo con las mismas características que el Monzogranito La Unión, es del tipo “globo” y fue generado por un magma viscoso al momento de su emplazamiento de en la corteza.

POR-D fue documentado por primera vez en 2013 como un dique de composición máfica orientado en la zona de extensión de los esfuerzos principales de la falla Motagua. Este intrusivo fue estudiado a través de la muestra TFS-PLU-05, que evidenció en sus resultados que el cuerpo ígneo es una Cuarzomonzodiorita, y que se formó en un ambiente de arco volcánico. Además, es un intrusivo calcoalcalino rico en potasio generado por la fusión parcial de rocas ígneas (Tipo I) que se emplazó en la corteza hace $33,44 \pm 0,48$ Ma. durante el Rupeliense (Paleogeno/Oligoceno).

Sobre un afluente de La Quebradona, el cual desciende desde Tres Pinos es posible encontrar contactos netos del intrusivo con respecto a la roca caja (Monzogranito Campanario), que acompañado de la ausencia de xenolitos, y el tamaño de grano de la roca sugiere que el intrusivo se emplazó en una zona superficial (epizonal), además por su forma espacial, se puede establecer que es un cuerpo ígneo y los

modelos establecidos por Llambías (2001) sugieren que es tipo “laminar” el cual en sus condiciones iniciales de formación fue generado por un magma “poco viscoso”, que ejerció un menor esfuerzo de empuje al que le ofrecía la tectónica regional al momento de su emplazamiento en la corteza.

Se estima que POR y POR-D provienen del mismo evento magmático, ya que el primero (POR) fue formado hace 33.94Ma y el otro fue emplazado 0.5Ma más tarde. Salguero (2015) estableció que la forma de este segundo cuerpo, se encuentra geométricamente establecida en la dirección de tensión de la Falla Motagua, por lo cual se sugiere que pudo haber intruído al primero mediante una falla o un remanente extensional de la deformación regional en ese momento.

c) Intrusivo POC (Sienogranito Pacayalito)

POC no había sido documentado con anterioridad y es nombrado en esta investigación como Granito Pacayalito, se encuentra desarrollándose entre los Río Pacayalito y La Jigua.

Este intrusivo fue investigado a través de las muestras TFS-PLU-09/ 10 las cuales sostienen que el intrusivo tuvo dos etapas de cristalización, Monzogranito y Sienogranito respectivamente, así como su emplazamiento en un ambiente de arco volcánico.

Además, es un intrusivo calcoalcalino rico en potasio generado por la fusión parcial de rocas ígneas (Tipo I) y rocas sedimentarias (Tipo S) que se emplazó en la corteza hace 23,53±0,3 Ma. durante el Chattense (Paleogeno/Oligoceno).

Sobre el Río La Jigua (al este) es posible encontrar contactos netos del intrusivo con respecto a la roca caja (Filita San Diego), y sobre el Río Pacayalito (al noroeste) se encuentra de manera fallada con el intrusivo JMB el cual también se encuentra afectado por la zona de cizalla en algunas partes.

La ausencia de xenolitos, y el tamaño de grano de la roca sugiere que el intrusivo se emplazó en una zona intermedia (mesozonal), además por su forma espacial, se puede establecer que es un cuerpo ígneo tipo “globo” el cual se comportó de forma similar al cuerpo JMB y POR en sus condiciones iniciales de formación.

3.4.2. Génesis

a) Intrusivo JMB (Monzogranito la Unión)

Los procesos genéticos del intrusivo sostienen que se emplazó en la zona intermedia (mesozonal), se formó a partir de la fusión parcial de rocas ígneas (Tipo I), por su forma su magma fue muy viscoso y rico en SiO_2 . Durante su formación en un margen continental activo y una zona de arco volcánico este sufrió un empobrecimiento (TFS-PLU-03/ 06) y un posteriormente un enriquecimiento (TFS-PLU-08/ 11) de Eu evidenciado en las anomalías positivas y negativas respectivamente.

Las anomalías negativas se generan por un fraccionamiento en las plagioclasas, donde Eu sustituye a Ca, donde además el magma primario sufre una “perdida” de plagioclasas por migración. Por el contrario, las anomalías positivas de Eu evidencian un enriquecimiento en el magma de

plagioclasas ya fraccionadas. Hay casos especiales donde no hay ni empobrecimiento, ni enriquecimiento en Eu en el magma y esto se debe a que aún no ha existido un fraccionamiento en él, es decir que era químicamente estable (Raymond 1995).

Mediante los resultados de este análisis se puede argumentar que el intrusivo sufrió una migración, donde inicialmente intruyó en la zona noroeste de la localidad (TFS-PLU-06) y migró hacia el este (TFS-PLU-03), donde sufrió un fraccionamiento en sus plagioclasas, para posteriormente migrar hacia el sur (TFS-PLU-08/ 11), lo que implicó un empobrecimiento de plagioclasas fraccionadas en el este y un enriquecimiento de plagioclasas fraccionadas para sus últimos estadios de cristalización al sur.

b) Intrusivo POR (Monzogranito Campanario) y POR-D (Cuarzomonzodiorita Tres Pinos)

Los procesos genéticos del intrusivo sostienen que es un intrusivo (POR) que se emplazó en la zona intermedia (mesozonal) y el dique intruyó a este posteriormente en una zona superficial (epizonal), siendo ambos intrusivos formados a partir de la fundición parcial de rocas ígneas (Tipo I),

El intrusivo POR, evidencia un alto contenido de SiO₂ a diferencia del POR-D, lo cual se evidencia por dos eventos de cristalización relacionados; pero diferentes, ya que se argumenta que el magma inicial sufrió un proceso de diferenciación, dejando atrás la fase máfica y ascendiendo así la fase félsica; pero por un sistema extensional, la fase máfica logró ascender y consolidarse a niveles litoestáticos menos profundos.

Durante su formación en el margen continental activo y una zona de arco volcánico, el grupo POR sufrió un emplazamiento sin fraccionar plagioclasas; pero con un fraccionamiento de apatito, evidenciado en un leve empobrecimiento de La en la muestra TFS-PLU-01, posteriormente se generó la cristalización de TFS-PLU-02/ 04 las cuales evidencian un leve empobrecimiento en Eu, generando así el fraccionamiento de plagioclasas (Raymond 1995).

La muestra perteneciente al grupo POR-D (TFS-PLU-05) evidencia no tener un fraccionamiento en sus plagioclasas al momento de su consolidación, lo que sugiere que la migración de este mismo a niveles más alto de la corteza no fue por fraccionamiento de estos minerales, sino por una apertura extensional en la corteza y un cambio de densidad de los con los cuerpos adyacentes (Llambías 2001).

c) Intrusivo POC (Sienogranito Pacayalito)

Los procesos genéticos del intrusivo sostienen que es un intrusivo que se emplazó en la zona intermedia (mesozonal), donde se formó a partir de la fundición parcial de rocas ígneas (Tipo I) donde aparentemente sufrió un proceso de asimilación durante el ascenso por parte de la roca caja aumentando el contenido de alúmina del mismo y dando como resultado una pseudo fundición parcial en la muestra (TFS-PLU-10).

Durante su formación en un margen continental activo y una zona de arco volcánico este sufrió un empobrecimiento en Eu evidenciado con anomalías negativas, la cuales sugieren el fraccionamiento en las plagioclasas, donde Eu sustituye a Ca (Raymond 1995).

3.4.3. Magmatismo calcoalcalino rico en potasio (High-K)

La química de los magmas depende principalmente de la naturaleza de los protolitos en lugar de los procesos que intervienen en su generación. Roberts & Clemens (1993) establecen que el enriquecimiento en potasio de granitoides “tipo I” puede estar vinculado posiblemente a un ambiente donde la fusión de la roca madre se produce como consecuencia de la descompresión después del engrosamiento de la corteza.

Según ellos el enriquecimiento en potasio en el magma se deriva del proceso de fusión parcial del material parental (máfico a intermedio), la cual es una transición al enriquecimiento en K de las rocas metaígneas en la corteza.

Estos materiales de base se podrían derivar del manto enriquecido de la litosfera subcontinental. Dependiendo del tiempo transcurrido y los procesos que operan entre la separación de una de protolito, el manto y su fusión parcial posterior, el magma granitoide parecerían tener una conexión con el manto más o menos directa en su firma isotópica.

Regularmente, son el resultado de extremos térmicos en sus regiones de origen de la corteza inferior, los cuales, según datos sobre fusión parcial experimental de rocas de la corteza comunes sugieren que el enriquecimiento en K, puede derivarse únicamente de la fusión parcial hidratada de rocas

máficas y metamórficas de corteza intermedia, debido a que las rocas metabasálticas por si solas no poseen la cantidad de K₂O necesario y debe de sufrir una mezcla con otros fluidos derivados del manto.

Huppert y Sparks (1988) modelan los efectos térmicos de la intrusión de magma basáltico en la corteza continental, con esto proponen una temperatura de al menos 900-950°C, siempre que se cumpla la convección en el magma máfico. Estas temperaturas son mucho más altas que puede ser logrado en simples engrosamiento de la corteza (Inglaterra y Thompson, 1984).

Sobre la base de muchas líneas de evidencia, en condiciones H₂O para los magmas hidratados subsaturados con agua se deriva únicamente a partir de la descomposición de las micas y los anfíboles.

Para los materiales bajos en H₂O de composición máfica a intermedia, con H₂O contenidos entre 0,7 y 1,6% en peso, la fusión parcial resulta entre 30% y 60% (T= 900-950 °C, P= 5-10 kbar = 0,5-1,0 GPa). Estos volúmenes relativamente altos de fusión significan que no hay líquidos derivados de las rocas y deberían verse afectadas con el fin para generar volúmenes potencialmente móviles de masa fundida.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales

Los intrusivos de la zona de estudio se pueden caracterizar gracias a cuatro factores importantes: geocronología, geoquímica, petrografía y observaciones de campo. La geocronología de los cuerpos ígneos analizados revela que en la zona existen cuatro cuerpos ígneos importantes, JMB, POR, POR-D y POC.

El intrusivo JMB (Plutón La Unión/Monzogranito La Unión) se formó a partir de la fundición parcial de rocas ígneas (Tipo I), por su forma su magma fue muy viscoso y rico en SiO₂. Durante su formación en un margen continental activo y una zona de arco volcánico este sufrió un enriquecimiento y un empobrecimiento en Eu evidenciado un fraccionamiento, así como una migración del mismo, dando como resultado un granitoide tipo I, calcoalcalino rico en potasio.

El cuerpo ígneo POR y POR-D, son considerados genéticamente contemporáneos, siendo ambos intrusivos formados a partir de la fundición parcial de rocas ígneas (Tipo I), El intrusivo POR, evidencia un alto contenido de SiO₂ a diferencia del POR-D, lo cual se evidencia por dos eventos de cristalización relacionados; pero diferentes, ya que se argumenta que el magma inicial sufrió un proceso de diferenciación, dejando atrás la fase máfica y ascendiendo así la fase félsica; pero por un sistema extensional, la fase máfica logró ascender y consolidarse a niveles litoestáticos menos profundos, dando como resultado un granitoide tipo I, calcoalcalino rico en potasio (POR) y magma tipo I, tholeítico (POR-D).

El grupo POC (Sienogranito) se formó a partir de la fundición parcial de rocas ígneas (Tipo I) donde aparentemente sufrió un proceso de asimilación durante el ascenso por parte de la roca caja aumentando el contenido de alúmina del mismo y dando como resultado una pseudo fundición parcial en la muestra (TFS-PLU-10), dando como resultado un granitoide tipo I, calcoalcalino rico en potasio.

Las características de campo y petrográficas de las rocas, sugiere que basado en sus contactos netos encontrados, la ausencia de xenolitos, y el tamaño de grano de las rocas sugieren que este se emplazaron en una zona intermedia "Mesozonal" y por su geometría se puede clasificar como un cuerpo ígneo tipo "globo" el cual fue generado por un magma viscoso (a excepción de POR-D que se emplazó en una zona somera "epizonal" y es el tipo "laminar").

Roberts & Clemens (1993) establecen que el enriquecimiento en potasio de granitoides "tipo I" puede estar vinculado a un ambiente postcolisional, donde la fusión de la roca madre se produce como consecuencia de la descompresión después del engrosamiento de la corteza, debido a que para alcanzar este resultado se debe estar en un "extremo térmico" durante la fusión parcial, donde resulta entre 30% y 60% de la pérdida de H₂O (T=900-950°C, P=5-10kbar = 0,5-1,0GPa) debido a que se deriva únicamente de la fusión parcial hidratada de rocas máficas y metamórficas de corteza intermedia, ya que las rocas metabasálticas por si solas no poseen la cantidad de K₂O necesario y debe de sufrir una mezcla con otros fluidos derivados del manto.

Conclusiones específicas

Las cuerpos ígneos de la zona de estudio (JMB/POR/POR-D/POC) se han clasificado petrográfica y químicamente como Monzogranito La Unión, Monzogranito Campanario con una asociación Diorita-Granodiorita-Monzogranito, Cuarzomonzodiorita Tres Pinos y Sienogranito Pacayalito con una secuencia Monzogranito-Sienogranito respectivamente, debido a las proporciones de tectosilicatos, elementos mayores y traza que estos poseen.

Los resultados geoquímicos obtenidos sugieren que todos los cuerpos ígneos analizados poseen bastantes características similares; fueron generados por la fundición parcial de rocas ígneas, es decir son Tipo I (a excepción de la muestra TFS-PLU-10 del grupo POC, la cual evidencia una asimilación en el magma, dando como resultado Tipo S), son calcoalcalinos ricos en potasio (a excepción de POR-D que es Toleítico), poseen las características de intrusivos generados en un margen continental activo de arco de volcánico y que sus firmas de elementos traza y REE revelan una muy posible vinculación a la misma cámara magmática, con un fraccionamiento de plagioclasas que en algunos casos implicaron la migración del magma.

Basado en los resultados de la datación radiométrica por método U-Pb en circones, se establece que inicialmente emplazó en la Filita San Diego, ya que posee una edad de $168,45 \pm 2,55$ Ma. (Bajociense), seguidamente se intruyó POR, con una edad de $33,94 \pm 0,48$ Ma. (Rupeliense). Se estima que POR y POR-D provienen del mismo magma, ya que el segundo fue emplazado en $33,44 \pm 0,48$ Ma. (Rupeliense), por la forma de este segundo cuerpo y la dirección de elongación, se sugiere que pudo haber intruído al primero mediante un remanente extensional de la deformación regional en ese momento, y por último se encuentra la intrusión al sur del grupo POC con $23,53 \pm 0,3$ Ma. (Chattiense).

La Litoestratigrafía ígnea de la zona inicia con la formación de la Filita San Diego (FSD) aparentemente en el Precámbrico (Torres De León, et. Al. 2012), seguidamente fue intruído por el Monzogranito La Unión (JMB) durante el Bajociense, cubriendo una gran área desde la parte norte de la Sierra del Merendón hasta lo que hoy se limita por la Falla Motagua, según datos geocronológicos obtenidos por Torres De León. Posteriormente se generó el Sistema Riedel Dextral que actualmente se conoce como Zona de Cizalla del Río La Jigua (ZCRJ), el cual fue el punto de generación para el desarrollo del Monzogranito Campanario (POR) durante el Rupeliense, el cual había sufrido una diferenciación magmática, generando dos fases ígneas, POR y POR-D.

0.5 Ma. más tarde, durante el Repeliense, la fase máfica del sistema POR consolidarse a niveles litoestáticos menos profundos. Finalmente, al sur de la actividad ígnea, se generó una zona de debilidad entre el Monzogranito La Unión (JMB) y el Monzogranito Campanario (POR), dando la pauta a la inyección del magma perteneciente a al Sienogranito Pacayalito (POC), el cual aparentemente sufrió un proceso de asimilación durante su ascenso, lo cual implicó un enriquecimiento en alúmina.

El Complejo Las Ovejas (LOC) en esta zona, es aparentemente producto de la cizalla regional del Sistema de Falla del Motagua, el cual tuvo que ser generado posterior a la obducción del Cretácico y ha afectado desde entonces a más de la mitad del intrusivo (tomando en cuenta su límite norte con la falla). La relación de esta unidad metamórfica con respecto al Monzogranito la Unión (JMB) es de forma gradual-inferida, ya que no se observan cambios bruscos en las zonas cercanas al intrusivo, este aumenta su esquistosidad gradualmente hacia el norte, hasta alcanzar altos grados de deformación, con respecto a la Filita San Diego, esta se presenta de forma fallada, aunque es muy posible que hayan zonas que estén siendo cizalladas por la falla Motagua.

RECOMENDACIONES

Realizar un análisis geocronológico y geoquímico de todos los intrusivos que se encuentran dentro de los límites del “Terreno Sula”, con la finalidad de observar las variaciones y la evolución del plutonismo de dicha zona, porque muchos de estos pueden estar altamente vinculados a la misma cámara magmática y pueden llegar a establecer datos importantes generados durante el cierre de la zona de subducción que generó la Falla Motagua.

BIBLIOGRAFÍA

- Best, Mynor G. *Igneous and metamorphic petrology*. Brigham Young University. United State of America: Editorial Offices, 2003
- Barbarin, Bernard. "A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments". *Lithos Journal*. (march, 1999): 46, 605-626.
- Bautista Miranda, Jeffrey José, *Estudio geoquímico del Granitoide de Timotes, Estado Mérida*. Tesis Licenciatura en Ciencias de la Tierra. Universidad Central de Venezuela. Venezuela: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2010
- Botero Santa, Paola Andrea. *Origen y evolución de la falla de El Bajío en su sector noroeste*. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Centro de Geociencias, 2011.
- Castro Dorado, Antonio. *Petrografía básica*. Madrid, España: Editorial Paraninfo, 1989.
- Chen, Guo-Neng and Rodney Grapes. *Granite Genesis: In-Situ Melting and Crustal Evolution*. Sun Yat-sen University, Guangzhou, China: Editorial Springer, 2007
- Clemons, Russell and Leon E. Long. "Petrologic and Rb-Sr Isotopic Study of the Chiquimula Plutón, Southeastern Guatemala". United State of America: *The Geological Society of America*. (october, 1971): 128.
- Texturas ígneas*. https://www.codelcoeduca.cl/img/proceso/exploracion/tipo_de_roca_textura.jpg (21 de agosto de 2016)
- Donnelly Thomas, Et. Al. *Northern Central America; The Maya and Chortís Blocks*. United State of America: The Geological Society of America, 1990.

Duque Trujillo, José Fernando. *Geocronología (U/Pb y 40Ar/39Ar) 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. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico: Facultad Ciencias de la Tierra, 2009.

Frost, B. Ronald; Et. Al. "A Geochemical Classification for Granitic Rocks". *Journal of petrology*. (april 2001): 42, 2033-2048.

Gill, Robin. *Igneous rocks and processes a practical guide*. University of London. England: Editorial Wiley-Blackwell, 2010

Leal Sosa, Dulce Maria. *Evaluación de susceptibilidad por deslizamientos en un área de 8km² en el casco urbano del municipio de La Unión, Zacapa*. Ejercicio Profesional Supervisado. Carrera Ingeniería en Ciencias Geológicas. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz: Carrera de Geología, 2011.

Llambías, Eduardo Jorge, *Geología de los cuerpos ígneos*. Buenos Aires, Argentina: Editoriales Magna, 2001.

Ortega Gutiérrez, Fernando; Et. Al. "The Maya-Chortís Boundary: A Tectonostratigraphic Approach". United State of America: *International Geology Review*. (august, 2010): 49, 996-1024.

Pindell, James; Et. Al. "The Greater Antillean Arc: Early Cretaceous origin and proposed relationship to Central American subduction mélanges: implications for models of Caribbean evolution". United State of America: *International Geology Review*. (july, 2010): 1-13.

Raith Michael, Et. Al. *Guía para la microscopía de minerales en lámina delgada*. Universidad de la República. Uruguay: Facultad de Ciencias, 2012

Ratschbacher, Lothar; Et. Al. "The North American-Caribbean Plate boundary in Mexico-Guatemala-Honduras". England: *Geological Society, of London*. (december, 2009): 328, 219-293.

Raymond, Loren A. *Petrology: The study of Igneous, sedimentary and metamorphic rocks*. Appalachian State University. United State of America: McGraw-Hill, 1995.

Roberts, Malcolm P. and John Clemens. "Origin of High Pottasium, calk-alkaline, I-type granitoids". University of Manchester. England: Departament of Geology. (september, 1993): 21, 825-828.

- Rollinson, Hugh R. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. England: Editorial Longman Scientific & Technical, 1993.
- Rogers, Robert D. and Paul Mann. "Tectonic terranes of the Chortis block based on integration of regional aeromagnetic and geologic data". United State of America: *The geological society of America*. (april, 2007): 428, 65-88.
- Salguero Díaz, Francis Emanuel. *Modelo petrológico del Plutón La Unión en un área de 24 kilómetros cuadrados a escala 1:25 000*. Carrera Técnico en Geología. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología. 2015.
- Solari, Luigi; Et. Al. "U/Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICPMS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy", United State of America: *Geostandards and Geoanalytical Research Journal*. (december, 2010): 34, 5-18.
- Torres De León; Et. Al. "The Chortís Block-Southwestern México Connections: U-Pb Zircon Geochronology". United State of America: *American Journal of Science*. (march, 2012): 312, 288-313.
- Winter, John. *Igneous and Metamorphic Petrology*. United State of America: Pearson Education, 2001.



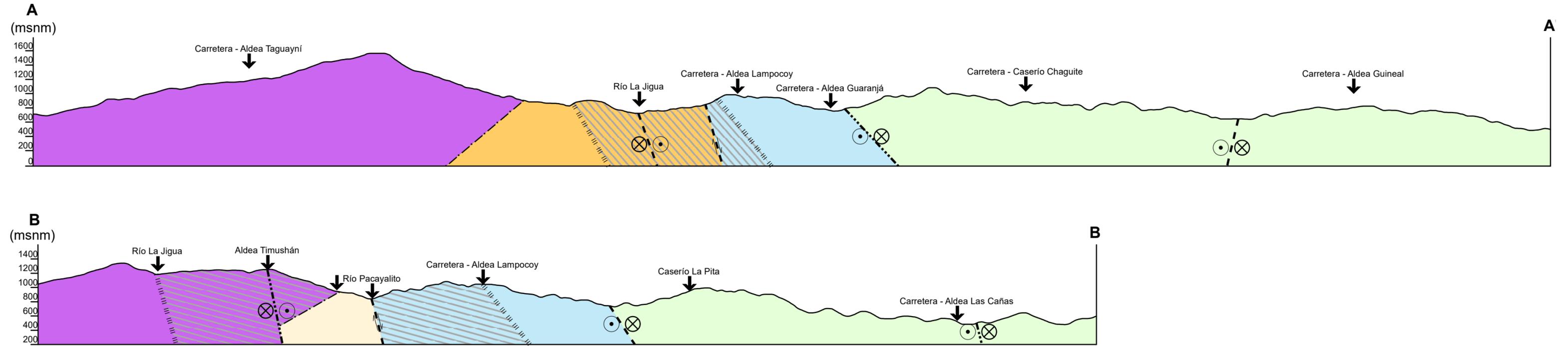
V.ºB.º
[Handwritten signature]

Adán García Véliz
 Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa
 BIBLIOTECARIO



ANEXOS

Perfiles Geológicos

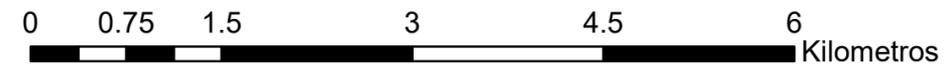


LEYENDA

- Complejo Las Ovejas (LOC)
- Sienogranito El Sauce (POC)
- Zona de cizalla (ZCRJ)
- Cuarzomonzodiorita Tres Pinos Dique (POR-D)
- Monzogranito Campanario (POR)
- Caliza (CCV)
- Monzogranito La Unión (JMB)
- Filita San Diego (FSD)

SIMBOLOGÍA

- Topografía
- Contacto fallado inferido
- Contacto gradual
- Contacto discordante inferido
- Contacto inconforme inferido
- Contacto fallado
- ⊗ Falla dextral
- ⊕ Falla normal
- ⊙ Falla sinistral
- ⊗ Lugar



Escala horizontal y vertical 1: 50 000



Universidad San Carlos de Guatemala -USAC-
Centro Universitario del Norte -CUNOR-

Petrografía, Geoquímica y Geocronología del Plutón La Unión
en La Unión y Gualán, Zacapa, Guatemala

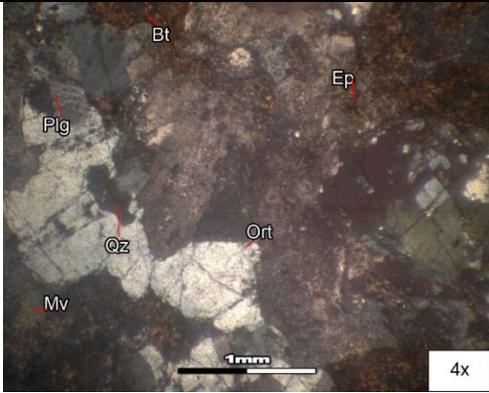
Anexo II - Perfiles geológicos

Autor: Francis Emanuel Salguero Díaz
Carné: 20114084

Asesor interno: Ing. Osmín J. Vasquez
Asesor externo: Dr. Luigi Solari

Anexo II
Pag. 103

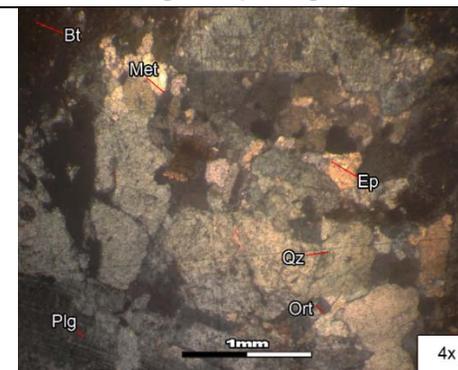
ANEXO III DESCRIPCION GENERAL DE MUESTRAS RECOLECTADAS

No. de muestra: 1/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-03		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015	PROYECTO Tesis de Ingeniería	ESTE 627636	NORTE 1658881						
HOJA TOPO/GEO Geológica	NOMBRE Chiquimula	SERIE ND 16-5 G	ESCALA 1:250 000						
UBICACIÓN En vía de acceso Cumbre Alta-La Vegona		LOCALIDAD Cumbre Alta, La Unión, Zacapa							
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales		TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva	NOMBRE Monzogranito						
DESCRIPCION MACROSCÓPICA		DESCRIPCION DE AFLORAMIENTO							
Roca clara con presencia de algunos minerales melanocráticos, con una granulometría 1mm-2mm con un grado de cristalización "holocristalina"		Roca sana con un fracturamiento y cizalla bastante fuerte y un grado de meteorización I.							
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía			Texturas						
Cuarzo (Qz)		25%	Inequigranular						
Feldes. potásico (Fk)	Ortoclasa (Ort)	22%	Porfiritica						
Plagioclasa (Plg)	Andesina	12%	Fanerítica						
	Labradorita	23%	Borde saturados						
Hornblenda (Hbl)		1%	Extinción ondulante						
Biotita (Bt)		2%							
Miner. opacos (Met)		1%							
Epidota (Ep)		14%							
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad		168,45 Ma. ± 2,55 Ma. Jurásico/Medio/Bajociense					
JMB		Relativa	Absoluta						
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
31.5	0	28.0	29.3	5.0	0.01	3.5	2.0	0.5	0.2
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo			
Sobre saturado		Metaluminosa		Calcoalcalina alta en K		I			
						Ambiente geodinámico			
						Margen Continental Activo / Arco Volcánico			
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									

No. de muestra: 2/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-06		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 618306		NORTE 1656122			
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000			
UBICACIÓN En vía de acceso Guadalupe – El Naranjo				LOCALIDAD Guadalupe, Zacapa					
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Monzogranito			
DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA				DESCRIPCIÓN DE AFLORAMIENTO					
Roca clara con presencia de algunos minerales melanocráticos, con una granulometría >2mm con un grado de cristalización “Holocristalina”				Roca sana con un fracturamiento bastante fuerte y un grado de meteorización I.					
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía					Texturas				
Cuarzo (Qz)				24%		Inequigranular			
Feldesp. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		21%		Porfiritica			
Plagioclasa (Plg)		Bitownita		26%		Faneritica			
		Labradrita		7%		Borde saturados			
Moscovita (Mv)				4%		Extinción ondulante			
Epidota (Ep)				16%					
Miner. Opacos (Met)				2%					
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad			168,45 Ma. ± 2,55 Ma. Jurásico/Medio/Bajociense				
JMB		Relativa		Absoluta					
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
23.0	0	29.8	34.7	5.1	1.0	3.2	2.1	0.8	0.3
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo		Ambiente geodinámico	
Sobre saturado		Metaluminosa		Calcoalcalina alta en K		I		Margen Continental Activo / Arco Volcánico	
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									



Fotografía petrográfica



No. de muestra: 3/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-08		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 621013		NORTE 1652631			
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000			
UBICACIÓN En vía de acceso Carí – Agua Fría				LOCALIDAD Carí, La Unión, Zacapa					
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Monzogranito			
DESCRIPCION MACROSCÓPICA				DESCRIPCION DE AFLORAMIENTO					
Roca clara con presencia de algunos minerales melanocráticos, con una granulometría 1mm-2mm con un grado de cristalización "Holocristalina"				Roca sana, fuertemente fracturada, alteraciones de óxidos de hierro y un grado de meteorización I.					
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía					Texturas				
Cuarzo (Qz)				36%		Inequigranular			
Feldesp. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		24%		Porfírica			
Plagioclasa (Plg)		Andesina		11%		Fanerítica			
		Oligoclasa		17%					
Moscovita (Mv)				2%					
Epidota (Ep)				10%					
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad			168,45 Ma. ± 2,55 Ma. Jurásico/Medio/Bajociense				
JMB		Relativa	Absoluta						
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
31.4	1	24.1	33.7	4.1	0	2.7	1.5	0.6	1.3
Saturación de Silíce		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo		Ambiente geodinámico	
Sobre saturado		Metaluminosa		Calcoalcalina alta en K		I		Margen Continental Activo / Arco Volcánico	
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									



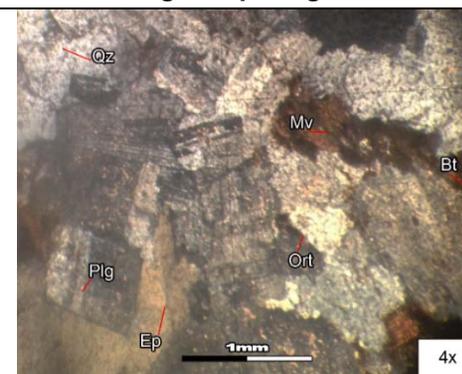
Fotografía petrográfica



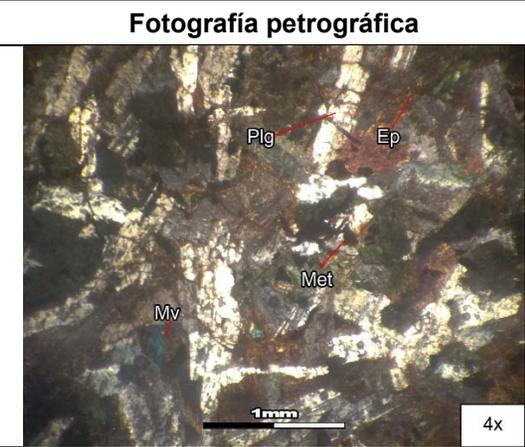
No. de muestra: 4/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-11		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 622217		NORTE 1652400			
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000			
UBICACIÓN Sobre el Río Carí, cerca del caserío 4 caminos.				LOCALIDAD Carí, La Unión, Zacapa					
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Monzogranito			
DESCRIPCION MACROSCÓPICA				DESCRIPCION DE AFLORAMIENTO					
Roca clara con presencia de algunos minerales melanocráticos, con una granulometría >2mm con un grado de cristalización "Holocristalina"				Roca sana, levemente fracturada y un grado de meteorización I.					
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía					Texturas				
Cuarzo (Qz)				35%		Equigranular			
Feldesp. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		24%		Fanerítica			
Plagioclasa (Plg)		Oligoclasa		17%		Zonada			
		Albita		16%		Borde saturados			
Biotita (Bt)				1%		Extinción ondulante			
Moscovita (Mv)				1%					
Epidota (Ep)				6%					
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad			168,45 Ma. ± 2,55 Ma. Jurásico/Medio/Bajociense				
JMB		Relativa		Absoluta					
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
20.2	0	27.8	40.2	1.9	6.0	0.3	2.6	1	0.2
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo		Ambiente geodinámico	
Sobre saturado		Metaluminosa		Calcoalcalina alta en K		I		Margen Continental Activo / Arco Volcánico	
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									



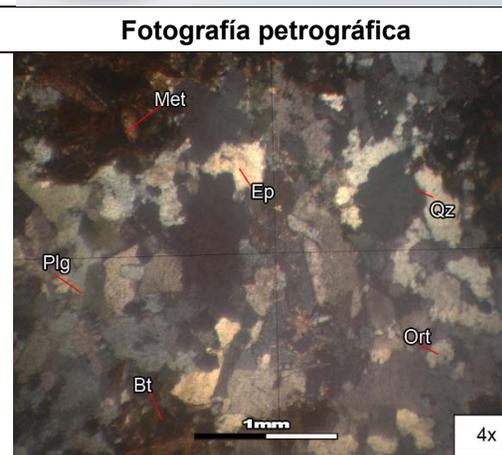
Fotografía petrográfica



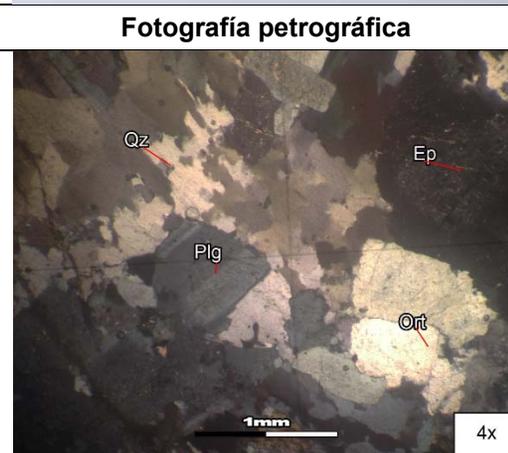
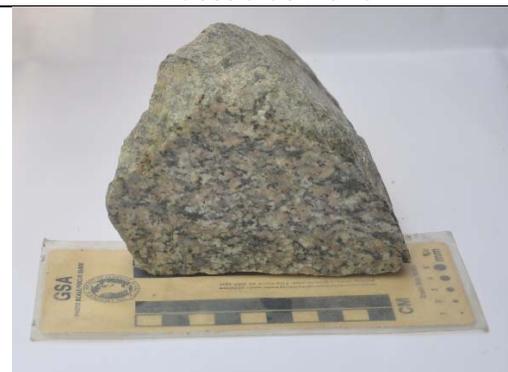
No. de muestra: 5/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-01		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 630304		NORTE 1658881			
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000			
UBICACIÓN Sobre CA-5. al norte, rumbo a Gualán				LOCALIDAD Tres Pinos, La Unión, Zacapa					
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Cuarzodiorita			
DESCRIPCION MACROSCÓPICA				DESCRIPCION DE AFLORAMIENTO					
Roca oscura afanítica, con minerales melanocráticos con una granulometría <1mm sin grado de cristalización observable y con fracturas teñidas de óxidos				Roca sana levemente alterada con un fracturamiento bastante fuerte y un grado de meteorización II.					
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía				Texturas					
Cuarzo (Qz)		6%		Inequigranular					
Feldesp. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		5%		Antipertítica			
Plagioclasa (Plg)		Bitownita		39%		Porfiritica			
		Anortita		12%		Fanerítica			
Biotita (Bt)		5%							
Moscovita (Mv)		2%							
Miner. Opacos (Met)		5%							
Epidota (Ep)		27%							
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad		33,94 Ma ± 0,48					
POR		Relativa		Absoluta		Paleogeno/Oligoceno/Rupeliense			
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
15.4	0	15.7	30.8	20.3	3.0	7.4	5.1	1.8	0.5
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo		Ambiente geodinámico	
Sub saturado		Metaluminosa		Calcoalcalina alta en K		I		Margen Continental Activo / Arco Volcánico	
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									

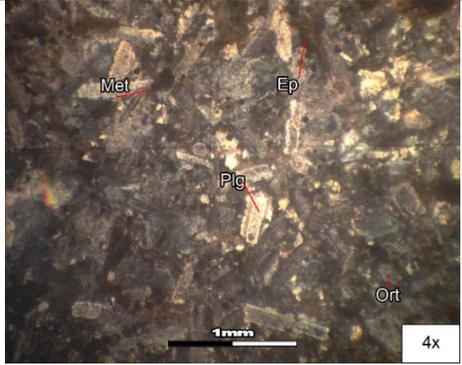


No. de muestra: 6/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-02		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 630053		NORTE 1656537			
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000			
UBICACIÓN Sobre "La Quebradona", 500 m al norte del basurero				LOCALIDAD La Unión, La Unión, Zacapa					
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Granodiorita			
DESCRIPCION MACROSCÓPICA				DESCRIPCION DE AFLORAMIENTO					
Roca de nivel intermedio con algunos minerales melanocráticos, con una granulometría de 1mm-2mm sin grado de cristalización observable				Roca sana con un fuerte fracturamiento y un grado de meteorización I.					
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía					Texturas				
Cuarzo (Qz)				19%		Inequigranular			
Feldes. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		16%		Porfiritica			
Plagioclasa (Plg)		Bitownita		27%		Faneritica			
		Anortita		14%		Borde saturados			
Biotita (Bt)				2%		Extinción ondulante			
Moscovita (Mv)				2%					
Hornblenda (Hbl)				3%					
Miner. Opacos (Met)				2%					
Epidota (Ep)				15%					
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad			33,94 Ma ± 0,48				
POR		Relativa		Absoluta		Paleogeno/Oligoceno/Rupeliense			
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
20.8	0	22.8	43.2	3.2	5.3	0.7	2.6	1	0.4
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo			
Saturado		Metaluminosa		Calcoalcalina alta en K		I			
Ambiente geodinámico									
Margen Continental Activo / Arco Volcánico									
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									

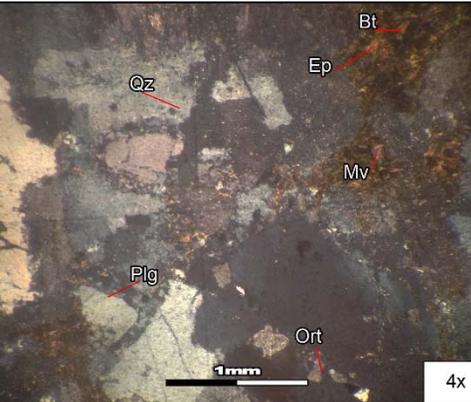


No. de muestra: 7/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-04		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 629996		NORTE 1657560			
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000			
UBICACIÓN Sobre "La Quebradona", 700 m al norte del basurero				LOCALIDAD La Unión, La Unión, Zacapa					
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Monzogranito			
DESCRIPCION MACROSCÓPICA				DESCRIPCION DE AFLORAMIENTO					
Roca de nivel leucocrático con una granulometría >2mm con grado de cristalización "holocristalino"				Roca sana con un fuerte fracturamiento y un grado de meteorización I.					
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía					Texturas				
Cuarzo (Qz)				34%		Inequigranular			
Feldesp. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		23%		Fanerítica			
Plagioclasa (Plg)		Oligoclasa		22%		Antipertítica			
		Albita		10%		Borde saturados			
Biotita (Bt)				1%		Extinción ondulante			
Hornblenda				0.5%					
Moscovita (Mv)				1%					
Miner. Opacos (Met)				1.5%					
Epidota (Ep)				7%					
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo POR		Edad Relativa		Absoluta		33,94 Ma ± 0,48			
						Paleogeno/Oligoceno/Rupeliense			
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
28,1	0	29.1	33.4	2.8	2.9	2.0	1.5	0.2	0.1
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo		Ambiente geodinámico	
Sobre saturado		Metaluminosa		Calcoalcalina alta en K		I		Margen Continental Activo / Arco Volcánico	
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									



No. de muestra: 8/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-05		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015	PROYECTO Tesis de Ingeniería	ESTE 629875	NORTE 1657548						
HOJA TOPO/GEO Geológica	NOMBRE Chiquimula	SERIE ND 16-5 G	ESCALA 1:250 000						
UBICACIÓN Sobre "La Quebradona", 1000m al norte del basurero		LOCALIDAD La Unión, La Unión, Zacapa							
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales		TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva	NOMBRE Cuarzomonzodiorita						
DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA Roca de nivel melanocrático con una granulometría de 1mm-2mm sin grado de cristalización observable		DESCRIPCIÓN DE AFLORAMIENTO Roca sana con un fuerte fracturamiento y un grado de meteorización I.							
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía				Texturas					
Cuarzo (Qz)		4%		Inequigranular					
Feldesp. potásico (Fk)	Ortoclasa (Ort)	13%		Porfiritica					
Plagioclasa (Plg)	Anortita	42%		Fanerítica					
	Bitonita	23%		Borde saturados					
Biotita (Bt)		4%		Extinción ondulante					
Miner. Opacos (Met)		2%							
Epidota (Ep)		12%							
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad		33,44 Ma ± 0,48					
POR-D		Relativa	Absoluta	Paleogeno/Oligoceno/Repeliense					
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
22.0	0	11.5	41.0	9.9	3.4	3.5	5.1	2	2
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo		Ambiente geodinámico	
Saturado		Metaluminosa		Toleítico		I		Margen Continental Activo / Arco Volcánico	
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									

No. de muestra: 9/10			COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-09			Muestra de mano				
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 626356		NORTE 1651123				
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000				
UBICACIÓN Sobre el Río La Jigua				LOCALIDAD La Jigua, La Unión, Zacapa						
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Monzogranito				
DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA				DESCRIPCIÓN DE AFLORAMIENTO				Fotografía petrográfica		
Roca de nivel leucocrático con una granulometría >2mm con grado de cristalización "holococristalino"				Roca sana sin fracturar y un grado de meteorización I.						
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS										
Mineralogía					Texturas					
Cuarzo (Qz)				21%		Inequigranular				
Feldesp. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		18%		Antiperitítica				
Plagioclasa (Plg)		Anortita		7%		Fanerítica				
		Bitownita		37%		Zonada				
Moscovita (Mv)				3%						
Biotita (Bt)				1%						
Miner. Opacos (Met)				5%						
Epidota (Ep)				8%						
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS										
Grupo		Edad			23,53 Ma ± 0,3 Paleogeno/Oligoceno/Chattense					
POC		Relativa		Absoluta						
Mineralogía normativa										
Q	C	Or	Ab	An		Di	Hy	Mt	Il	Ap
29.1	0.4	25.2	32.0	5.6		0	4.6	1.8	0.6	0.8
Saturación de Silíce		Saturación de Alúmina			Alcalinidad		Tipo	Ambiente geodinámico		
Sobre saturado		Metaluminosa			Calcoalcalina alta en K		I	Margen Continental Activo / Arco Volcánico		
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.										



No. de muestra: 10/10		COD. DE MUESTRA: TFS-PLU-10		Muestra de mano					
FECHA Junio 2 015		PROYECTO Tesis de Ingeniería		ESTE 624306		NORTE 1650598			
HOJA TOPO/GEO Geológica		NOMBRE Chiquimula		SERIE ND 16-5 G		ESCALA 1:250 000			
UBICACIÓN Sobre el Río Pacayalito				LOCALIDAD Pacayalito, La Unión, Zacapa					
CLASIFICACIÓN UTILIZADA Características ópticas de los minerales				TIPO DE ROCA Ígnea intrusiva		NOMBRE Sienogranito			
DESCRIPCION MACROSCÓPICA Roca de nivel leucocrático con una granulometría 1mm-2mm con grado de cristalización "holocristalino"				DESCRIPCION DE AFLORAMIENTO Roca sana sin fracturar y un grado de meteorización I.					
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS									
Mineralogía					Texturas				
Cuarzo (Qz)				32%		Equigranular			
Feldesp. potásico (Fk)		Ortoclasa (Ort)		23%		Fanerítica			
Plagioclasa (Plg)		Andesina		17%		Zonada			
		Oligoclasa		17%		Corde saturados			
Moscovita (Mv)				2%		Extensión ondulante			
Biotita (Bt)				2%					
Epidota (Ep)				7%					
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS									
Grupo		Edad			23,53 Ma ± 0,3				
POC		Relativa		Absoluta	Paleogeno/Oligoceno/Chattense				
Mineralogía normativa									
Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Ap
25.7	1.4	28.2	37.1	1.8	0	3.3	2.2	0.1	0.1
Saturación de Silice		Saturación de Alúmina		Alcalinidad		Tipo		Ambiente geodinámico	
Sobre saturado		Peraluminosa		Calcoalcalina alta en K		S		Margen Continental Activo / Arco Volcánico	
Créditos: Realizado por Francis Salguero con apoyo de: Centro de Geociencias de UNAM, Luigi Solari, Osmin Vásquez y Ricardo Milián.									



**ANEXO IV
ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA**

	JMB				POR			POR-D	POC	
	TFS-PLU-03	TFS-PLU-06	TFS-PLU-08	TFS-PLU-11	TFS-PLU-01	TFS-PLU-02	TFS-PLU-04	TFS-PLU-05	TFS-PLU-09	TFS-PLU-10
SiO2	73.9	70.67	73.47	70	61.32	69.93	73.7	65.55	72.5	72.13
TiO2	0.25	0.44	0.22	0.44	0.95	0.52	0.13	1.03	0.32	0.07
Al2O3	12.66	14.07	13.41	13.6	16.31	13.75	12.85	13.69	13.27	14.39
Fe2O3	1.39	1.48	0.98	1.78	3.53	1.78	1.03	3.51	1.22	1.5
FeO	1.25	1.33	0.89	1.6	3.18	1.6	0.93	3.16	1.1	1.35
MnO	0.09	0.19	0.05	0.11	0.2	0.08	0.13	0.33	0.06	0.04
MgO	1.04	1.12	0.84	0.89	2.83	1	0.96	1.33	1.61	0.83
CaO	1.13	1.43	1.54	2.01	5.14	2.2	1.34	3.84	1.55	0.45
Na2O	3.46	4.1	3.98	4.75	3.64	5.11	3.95	4.85	3.78	4.39
K2O	4.74	5.05	4.08	4.7	2.66	3.86	4.93	1.94	4.27	4.78
P2O5	0.09	0.13	0.54	0.11	0.23	0.17	0.05	0.77	0.32	0.07
Li	29.58459	45.65676	32.94266	22.17624	13.00281	21.13327	3.228939	42.52918	22.37772	19.49002
Be	2.789324	2.448889	2.114225	2.430198	1.627746	2.408327	1.15368	2.050143	2.468981	1.897819
B	5.66779	10.13431	5.194678	9.372455	4.641129	6.356364	6.830025	8.12679	12.72125	5.371163
Sc	7.450258	7.724099	7.781729	8.76006	32.5913	5.62862	22.89054	9.988572	6.891452	13.77057
V	42.05168	38.68149	34.08894	38.79397	289.7149	32.0511	227.7943	110.1374	36.30657	127.1421
Cr	24.9547	22.29482	23.64475	22.64691	17.55064	18.82855	108.3773	29.56713	24.95989	26.84003
Co	7.909223	8.586283	6.378824	6.118364	23.84549	5.86972	21.1673	11.95384	7.812984	15.64069
Ni	11.00978	9.405205	9.692703	9.583182	7.392293	8.457584	20.69899	9.147091	11.51392	10.69343
Cu	3.106124	4.771719	2.213218	4.471404	35.3603	2.448515	36.81213	72.9342	4.579531	24.34776
Zn	46.28911	50.58644	20.72751	15.82006	94.53379	112.3032	81.39522	23.7612	44.55406	81.54456

Ga	16.5733	17.44283	18.10148	17.59773	21.99234	16.41287	18.89213	19.96639	17.25583	17.66963
Rb	125.6841	105.0834	88.83271	131.6169	41.00996	101.8653	25.41631	107.1574	104.9055	93.33861
Sr	188.8432	182.0045	303.0812	108.9129	174.289	235.2857	579.7059	549.5093	162.5345	382.7474
Y	27.11235	22.19522	13.10778	24.01824	49.30828	25.30214	25.10048	16.79536	29.56335	28.70946
Zr	148.7737	168.6784	159.0077	171.4313	233.7431	144.973	145.2142	209.7785	174.1168	227.1858
Nb	10.73709	10.91774	10.22023	10.58434	9.509834	8.606699	6.188624	15.16406	10.92392	14.42557
Mo	0.385816	0.309441	0.459772	0.900407	0.463451	0.311888	1.276072	0.598641	0.400771	0.66418
Sn	11.36933	3.193591	2.888369	3.719694	1.870797	4.439207	1.058941	1.575338	3.244409	2.366928
Sb	0.184558	0.097038	0.103749	0.185131	0.408476	0.1866	0.340024	0.314569	0.335716	0.178497
Cs	5.28385	5.8683	4.18641	5.26119	3.684281	3.355512	0.344723	6.492825	4.7034	2.206444
Ba	577.0242	544.7376	1816.4	291.2965	228.6996	599.5052	497.3657	585.8081	587.0674	626.2828
La	27.62706	8.057634	8.003274	23.26897	15.48472	15.10077	17.58735	24.10442	23.51466	26.51296
Ce	55.25524	16.35536	15.1505	47.73738	40.89093	31.62932	37.46324	48.40743	48.71177	54.52917
Pr	6.477367	2.113644	1.891408	5.847106	6.37208	3.948553	4.990406	6.112041	5.889626	7.197988
Nd	23.38715	9.352252	8.159129	21.98101	30.60768	15.78522	20.8826	23.59732	21.75698	28.46627
Sm	4.84957	2.717413	2.180398	4.765028	8.422015	3.930947	4.774963	4.791004	4.825239	6.22515
Eu	1.007012	0.976239	1.146672	0.737156	3.123101	1.129185	1.342671	1.423567	0.931875	1.485732
Tb	0.744594	0.538117	0.376367	0.702206	1.453959	0.66876	0.697793	0.583579	0.775899	0.882957
Gd	4.630445	3.122457	2.335983	4.445629	9.244015	4.03336	4.63405	4.119452	4.675755	5.804329
Dy	4.558535	3.578435	2.322944	4.195446	9.137895	4.211748	4.222573	3.143375	4.868746	5.173881
Ho	0.919572	0.748259	0.46419	0.83011	1.808484	0.853109	0.858487	0.601215	0.994723	1.00863
Er	2.618295	2.1313	1.253458	2.330524	4.910047	2.401762	2.380228	1.627448	2.878759	2.775341
Yb	2.589102	2.198819	1.434523	2.319968	4.437011	2.460776	2.282933	1.506176	2.967536	2.618074
Lu	0.386365	0.329554	0.224826	0.347961	0.648732	0.372469	0.340832	0.224932	0.445419	0.387343
Hf	3.9449	4.380526	4.078955	4.435205	4.816349	3.994349	3.561809	4.785505	4.641842	5.451409

Ta	1.098449	0.853715	0.774646	0.980222	0.540317	0.871946	0.351699	0.995365	1.008834	1.098824
W	1.683889	0.489248	0.349593	0.59106	0.445242	0.695919	0.312346	1.007567	0.512464	0.814732
Pb	15.22923	15.08414	10.1946	10.38971	3.631562	59.60319	7.564287	3.196136	14.61407	21.35068
Th	10.07708	3.983454	0.668244	9.165946	1.113308	7.460401	2.816732	4.732689	9.589351	7.39125
U	2.839437	1.446467	1.363266	2.404794	0.623525	3.196327	0.833427	1.618738	3.041219	2.402052
Ti	6483.20417	2789.83915	19085.043	3399.31068	2306.0105	2994.45639	5242.05673	6111.99892	2812.32461	2936.50442
P	295.763	307.6861	308.4433	279.4045	1545.41896	241.3067	524.4184	675.0659	287.5764	585.4624
Tl	0.343079	0.806182	0.354141	0.61735	0.575549	0.784741	0.304543	0.828797	0.556378	0.630041

ANEXO V
REGISTRO ISOTÓPICO

	Relaciones isotópicas corregidas							Edad (Ma)							Edad (Ma)	Disc %
	$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 2s$ abs	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 2s$ abs	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2s$ abs	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 2s$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 2s$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 2s$			
TFS-PLU-06																
Zircon_01	0.22	0.0512	0.0035	0.191	0.013	0.02702	0.00087	171.9	5.5	177.1	11	220	150	171.9	2.94	
Zircon_02	0.30	0.0495	0.003	0.1839	0.011	0.02706	0.00085	172.1	5.3	171	9.1	150	130	172.1	-0.64	
Zircon_03	0.25	0.0502	0.0035	0.187	0.013	0.02709	0.00092	172.3	5.8	173.8	11	200	150	172.3	0.86	
Zircon_04	0.25	0.0507	0.0027	0.1843	0.009	0.02631	0.00084	167.4	5.3	171.5	7.7	206	110	167.4	2.39	
Zircon_05	0.35	0.0501	0.0032	0.1832	0.0098	0.02665	0.00085	169.6	5.3	172	9	200	130	169.6	1.40	
Zircon_06	0.34	0.0522	0.0024	0.195	0.0086	0.02662	0.00083	169.4	5.2	180.8	7.3	284	100	169.4	6.31	
Zircon_07	0.24	0.0507	0.0032	0.195	0.013	0.0272	0.0009	173	5.6	180.8	11	230	150	173.0	4.31	
Zircon_08	0.37	0.0516	0.0032	0.195	0.011	0.02757	0.00095	175.3	5.9	180.6	9.3	250	140	175.3	2.93	
Zircon_09	0.29	0.0506	0.0025	0.1818	0.0095	0.02611	0.00083	166.2	5.2	169.5	8.2	207	110	166.2	1.95	
Zircon_10	0.25	0.0489	0.0033	0.179	0.012	0.02635	0.00084	167.6	5.3	170.3	11	150	150	167.6	1.59	
Zircon_11	0.27	0.0544	0.0059	0.21	0.021	0.02787	0.00095	177.2	5.9	196	19	370	240	177.2	9.59	
Zircon_12	0.32	0.0481	0.0024	0.1819	0.0087	0.02665	0.00085	169.5	5.3	169.6	7.5	102	110	169.5	0.06	
Zircon_13	0.27	0.0506	0.0034	0.19	0.012	0.02676	0.00087	170.2	5.5	176.6	11	220	150	170.2	3.62	

Zircon_14	0.28	0.0496	0.0035	0.191	0.012	0.02691	0.00096	171.2	6	179	9.5	210	150	171.2	4.36
Zircon_15	0.31	0.0504	0.0029	0.1861	0.0098	0.02618	0.00089	166.6	5.6	173.2	8.4	230	140	166.6	3.81
Zircon_16	0.23	0.055	0.0036	0.219	0.015	0.02897	0.001	184.1	6.3	203	12	400	150	184.1	9.31
Zircon_17	0.35	0.0511	0.0036	0.181	0.012	0.0252	0.00085	160.4	5.3	168.7	10	220	160	160.4	4.92
Zircon_18	0.21	0.051	0.0048	0.195	0.016	0.02685	0.0011	170.8	7.1	181	14	260	220	170.8	5.64
Zircon_19	0.37	0.0484	0.0026	0.1758	0.0089	0.02607	0.00088	165.9	5.5	164.3	7.7	135	130	165.9	-0.97
Zircon_20	0.26	0.0513	0.004	0.189	0.014	0.02601	0.00093	165.5	5.9	175	12	230	170	165.5	5.43
Zircon_21	0.42	0.0525	0.004	0.188	0.015	0.02623	0.00094	166.9	5.9	175	13	280	170	166.9	4.63
Zircon_22	0.09	0.0475	0.0032	0.1798	0.011	0.0274	0.00094	174.3	5.9	167.8	9.6	100	150	174.3	-3.87
Zircon_23	0.26	0.0502	0.0036	0.184	0.012	0.02609	0.00086	166	5.4	171	10	200	160	166.0	2.92
Zircon_24	0.21	0.0504	0.0035	0.1928	0.011	0.02718	0.00095	172.9	6	178.8	9.4	200	150	172.9	3.30
Zircon_25	0.33	0.0539	0.0056	0.2	0.02	0.0271	0.0013	172.3	8	185	17	300	220	172.3	6.86
Zircon_26	0.35	0.0512	0.0043	0.187	0.015	0.02666	0.00097	169.6	6.1	174	13	230	180	169.6	2.53
Zircon_27	0.42	0.049	0.0027	0.1774	0.0096	0.02591	0.0009	164.9	5.7	165.7	8.2	160	130	164.9	0.48
Zircon_28	0.27	0.054	0.004	0.199	0.013	0.02701	0.00093	171.8	5.8	184.2	11	340	160	171.8	6.73
Zircon_29	0.26	0.0497	0.0025	0.1835	0.0084	0.02675	0.00085	170.2	5.3	171.8	7.4	172	110	170.2	0.93
Zircon_30	0.26	0.0502	0.0025	0.1797	0.0079	0.02606	0.00076	165.8	4.8	168.8	7.3	195	110	165.8	1.78
TFS-PLU-11															

Zircon_31	0.28	0.0505	0.0036	0.188	0.013	0.0268	0.00085	170.5	5.3	174.9	11	220	150	170.5	2.52
Zircon_32	0.42	0.0508	0.0028	0.1847	0.01	0.02625	0.0008	167	5	171.9	8.8	216	120	167.0	2.85
Zircon_33	0.41	0.0506	0.0034	0.1801	0.011	0.02595	0.00089	165.1	5.6	167.9	9.3	200	140	165.1	1.67
Zircon_34	0.36	0.0495	0.0024	0.1885	0.0088	0.02748	0.00083	174.8	5.2	175.2	7.5	174	110	174.8	0.23
Zircon_35	0.73	0.0533	0.0029	0.1887	0.01	0.02568	0.00083	163.4	5.2	175.3	8.6	320	120	163.4	6.79
Zircon_36	0.31	0.0498	0.0032	0.1839	0.01	0.02688	0.0009	171	5.7	171.2	8.9	190	140	171.0	0.12
Zircon_37	0.15	0.05	0.0025	0.1782	0.0073	0.02526	0.00095	160.8	5.9	166.4	6.2	188	110	160.8	3.37
Zircon_38	0.34	0.0509	0.0037	0.182	0.012	0.02604	0.00093	165.7	5.9	169.4	11	280	180	165.7	2.18
Zircon_39	0.33	0.0502	0.0038	0.193	0.013	0.02749	0.0011	174.8	7.1	179	11	230	180	174.8	2.35
Zircon_40	0.26	0.0491	0.0028	0.1862	0.0098	0.02731	0.00093	173.7	5.9	174.5	7.9	157	120	173.7	0.46
Zircon_41	0.55	0.0506	0.0028	0.1809	0.0095	0.02588	0.0008	164.7	5	168.6	8.2	205	120	164.7	2.31
Zircon_42	0.30	0.0504	0.0033	0.186	0.012	0.02659	0.00091	169.2	5.7	172.9	10	220	150	169.2	2.14
Zircon_43	0.32	0.0519	0.0045	0.198	0.016	0.02717	0.00088	172.8	5.5	183	13	270	170	172.8	5.57
Zircon_44	0.49	0.0505	0.0044	0.184	0.014	0.02633	0.0009	167.6	5.7	171	12	190	180	167.6	1.99
Zircon_45	0.35	0.0493	0.0027	0.1845	0.0087	0.02691	0.00085	171.1	5.3	171.8	7.5	150	120	171.1	0.41
Zircon_46	0.28	0.0489	0.0023	0.176	0.0078	0.02585	0.00078	164.5	4.9	164.5	6.7	157	100	164.5	0.00
Zircon_47	0.27	0.0539	0.0048	0.216	0.018	0.02824	0.001	179.5	6.4	201	16	390	210	179.5	10.70

Zircon_48	0.35	0.0514	0.0024	0.1774	0.0077	0.02498	0.00079	159.1	4.9	165.7	6.6	264	100	159.1	3.98
Zircon_49	0.33	0.0514	0.0023	0.1809	0.0084	0.02535	0.00078	161.3	4.9	168.7	7.2	244	100	161.3	4.39
Zircon_50	0.13	0.0534	0.0041	0.205	0.015	0.02824	0.001	179.5	6.5	189	13	300	170	179.5	5.03
Zircon_51	0.24	0.0502	0.0041	0.194	0.015	0.02763	0.00091	175.7	5.7	182	12	230	170	175.7	3.46
Zircon_52	0.42	0.0507	0.003	0.1853	0.009	0.02698	0.00096	171.6	6	172.6	7.7	210	130	171.6	0.58
Zircon_53	0.37	0.0495	0.0029	0.1719	0.0095	0.02561	0.00078	163	4.9	160.9	8.2	160	130	163.0	-1.31
Zircon_54	0.28	0.0488	0.0034	0.18	0.013	0.02694	0.00089	171.4	5.6	167.4	11	140	150	171.4	-2.39
Zircon_55	0.23	0.0457	0.0053	0.176	0.023	0.0266	0.0017	169.5	11	164	20	70	270	169.5	-3.35
Zircon_56	0.32	0.0509	0.0029	0.1897	0.011	0.02635	0.00088	167.6	5.6	177.6	8.6	260	140	167.6	5.63
Zircon_57	0.37	0.0492	0.0031	0.1789	0.011	0.0258	0.00089	164.2	5.6	166.8	9.7	170	130	164.2	1.56
Zircon_58	0.37	0.0516	0.0045	0.187	0.015	0.02628	0.00095	167.2	6	174	13	250	200	167.2	3.91
Zircon_59	0.30	0.0509	0.0034	0.1864	0.011	0.02621	0.0008	166.8	5	173.4	9.5	250	140	166.8	3.81
Zircon_60	0.35	0.0496	0.0024	0.1803	0.0077	0.02656	0.00079	169	5	168.3	6.7	176	100	169.0	-0.42
TFS-PLU-04															
Zircon_61	0.65	0.0476	0.0055	0.0325	0.0035	0.00505	0.00021	32.4	1.3	32.4	3.5	20	220	32.4	0.00
Zircon_62	0.45	0.058	0.017	0.0384	0.0096	0.0053	0.00039	34.1	2.5	37.9	9.5	460	490	34.1	10.03
Zircon_63	0.30	0.0484	0.0035	0.0357	0.0025	0.00537	0.00018	34.55	1.1	35.6	2.4	120	140	34.6	2.95
Zircon_64	0.34	0.0498	0.0029	0.0342	0.0019	0.004973	0.00016	31.98	1	34.1	1.9	210	120	32.0	6.22

Zircon_65	0.46	0.0474	0.0046	0.0362	0.0034	0.00564	0.00022	36.2	1.4	36	3.3	70	190	36.2	-0.56
Zircon_66	0.47	0.058	0.014	0.0419	0.0093	0.00505	0.00048	32.5	3.1	41.4	9	480	500	32.5	21.50
Zircon_67	0.39	0.0467	0.0049	0.0347	0.0036	0.00523	0.0002	33.64	1.3	34.6	3.5	70	200	33.6	2.77
Zircon_68	0.92	0.074	0.016	0.06	0.011	0.00594	0.00039	38.2	2.5	61	11	910	410	38.2	37.38
Zircon_69	0.73	0.049	0.0095	0.0358	0.0066	0.0054	0.00031	34.7	2	35.6	6.4	160	350	34.7	2.53
Zircon_70	0.44	0.0481	0.0085	0.0355	0.0064	0.00544	0.00028	34.9	1.8	35.3	6.2	80	350	34.9	1.13
Zircon_71	0.35	0.0457	0.0056	0.0348	0.0042	0.00551	0.00022	35.4	1.4	34.6	4.1	-50	230	35.4	-2.31
Zircon_72	0.34	0.0518	0.0091	0.039	0.0072	0.00536	0.00039	34.5	2.5	38.8	7	230	380	34.5	11.08
Zircon_73	0.34	0.071	0.016	0.057	0.012	0.00585	0.00045	37.6	2.9	56	12	890	450	37.6	32.86
Zircon_74	0.57	0.0452	0.0069	0.0322	0.005	0.00527	0.00019	33.91	1.2	32.1	4.9	-80	290	33.9	-5.64
Zircon_75	0.70	0.052	0.014	0.0351	0.0094	0.00523	0.00033	33.6	2.1	34.8	9.2	110	530	33.6	3.45
Zircon_76	0.42	0.0502	0.0058	0.0353	0.0036	0.00518	0.0002	33.31	1.3	35.2	3.5	180	240	33.3	5.37
Zircon_77	0.78	0.0465	0.0044	0.0342	0.0031	0.00542	0.00021	34.85	1.4	34.1	3.1	10	190	34.9	-2.20
Zircon_78	1.88	0.0501	0.0081	0.0373	0.0063	0.0052	0.00029	33.4	1.9	37.1	6.2	180	340	33.4	9.97
Zircon_79	0.98	0.054	0.013	0.0361	0.0088	0.00511	0.00032	32.8	2	35.7	8.6	210	460	32.8	8.12
Zircon_80	0.56	0.0547	0.0099	0.0369	0.0063	0.00479	0.00028	30.8	1.8	36.7	6.2	450	440	30.8	16.08
Zircon_81	0.50	0.0532	0.0073	0.0377	0.0049	0.00528	0.00026	33.9	1.7	38.4	5	270	270	33.9	11.72

Zircon_82	0.62	0.048	0.01	0.0335	0.0068	0.00517	0.00032	33.2	2.1	33.2	6.6	100	370	33.2	0.00
Zircon_83	0.40	0.0446	0.0052	0.0311	0.0035	0.005	0.00018	32.17	1.2	31	3.4	-100	210	32.2	-3.77
Zircon_84	1.29	0.0477	0.0077	0.0362	0.0054	0.00532	0.00026	34.2	1.7	36	5.3	70	310	34.2	5.00
Zircon_85	0.33	0.0523	0.0056	0.0393	0.0042	0.00544	0.0002	34.95	1.3	39.1	4.2	250	230	35.0	10.61
Zircon_86	0.34	0.058	0.013	0.0417	0.0094	0.00524	0.00027	33.7	1.7	41.3	9.1	410	470	33.7	18.40
Zircon_87	0.56	0.065	0.016	0.046	0.011	0.00533	0.00032	34.3	2.1	45	10	440	510	34.3	23.78
Zircon_88	1.43	0.0492	0.0055	0.0366	0.0037	0.00552	0.00024	35.5	1.6	36.5	3.7	160	240	35.5	2.74
Zircon_89	0.77	0.0522	0.0067	0.0389	0.0055	0.00538	0.00029	34.6	1.9	38.7	5.4	250	280	34.6	10.59
Zircon_90	0.42	0.055	0.012	0.0398	0.0087	0.00538	0.00035	34.6	2.2	39.4	8.5	310	470	34.6	12.18
TFS-PLU-05															
Zircon_91	0.49	0.09	0.014	0.0629	0.0073	0.0054	0.0002	32.8	1.3	61.8	6.9	1360	490	32.8	46.93
Zircon_92	0.93	0.0532	0.0056	0.0373	0.0039	0.00527	0.00019	33.9	1.2	37.8	3.8	300	200	33.9	10.32
Zircon_93	0.77	0.0467	0.0071	0.0341	0.0053	0.00517	0.00023	33.2	1.5	33.9	5.1	50	280	33.2	2.06
Zircon_94	2.68	0.0476	0.0039	0.0323	0.0023	0.00502	0.00015	32.31	0.96	32.2	2.3	50	170	32.3	-0.34
Zircon_95	0.96	0.0493	0.0043	0.0335	0.0028	0.00506	0.00014	32.55	0.89	33.5	2.8	150	180	32.6	2.84
Zircon_96	0.55	0.118	0.022	0.084	0.015	0.00537	0.00034	34.5	2	84	13	1750	350	34.5	57.41
Zircon_97	0.90	0.056	0.011	0.0363	0.0067	0.00502	0.00026	32.3	1.7	36	6.5	310	340	32.3	10.28
Zircon_98	0.72	0.0569	0.0061	0.0383	0.0046	0.00544	0.00023	35	1.5	39	4.7	410	240	35.0	10.26
Zircon_99	1.63	0.067	0.016	0.0512	0.014	0.00581	0.00021	37.4	1.3	50.5	13	800	350	37.4	25.94
Zircon_100	1.15	0.049	0.0032	0.0303	0.0022	0.004621	0.00012	29.72	0.76	30.3	2.2	160	140	29.7	1.91
Zircon_101	0.57	0.0622	0.0069	0.0457	0.0054	0.00543	0.00018	34.9	1.2	45.2	5.3	600	250	34.9	22.79
Zircon_102	0.41	0.056	0.0072	0.0418	0.0049	0.00525	0.00017	33.8	1.1	41.5	4.8	360	260	33.8	18.55

Zircon_103	0.97	0.0787	0.0084	0.0544	0.0068	0.00514	0.00026	32.8	1.7	55	6.5	1140	210	32.8	40.36
Zircon_104	0.37	0.0609	0.014	0.0431	0.011	0.00521	0.00027	33.5	1.7	42.7	10	560	320	33.5	21.55
Zircon_105	0.58	0.069	0.008	0.051	0.0076	0.00545	0.0002	35.03	1.3	50.5	7.2	890	180	35.0	30.63
Zircon_106	0.83	0.0493	0.0035	0.0342	0.0025	0.00511	0.00014	32.87	0.9	34.1	2.5	200	160	32.9	3.61
Zircon_107	0.83	0.0756	0.0097	0.0512	0.0062	0.00506	0.00023	32.6	1.4	50.6	6	1050	250	32.6	35.57
Zircon_108	0.59	0.079	0.0099	0.0546	0.007	0.00552	0.00022	35.5	1.4	55	6.7	1090	250	35.5	35.45
Zircon_109	0.39	0.064	0.0076	0.0491	0.006	0.0057	0.00022	36.6	1.4	48.5	5.8	770	240	36.6	24.54
Zircon_110	0.80	0.0535	0.0045	0.0368	0.0034	0.0053	0.00014	34.1	0.93	36.7	3.3	390	190	34.1	7.08
Zircon_111	1.75	0.046	0.0033	0.0342	0.0024	0.00523	0.00016	33.63	1	34.1	2.4	0	150	33.6	1.38
Zircon_112	0.71	0.0556	0.0068	0.0427	0.0057	0.00541	0.00024	34.8	1.5	42.3	5.5	310	240	34.8	17.73
Zircon_113	1.21	0.055	0.028	0.0433	0.03	0.00536	0.00037	34.4	2.4	42.9	27	360	390	34.4	19.81
Zircon_114	0.46	0.0492	0.005	0.0347	0.0034	0.00511	0.00015	32.9	0.96	34.6	3.3	90	190	32.9	4.91
Zircon_115	0.34	0.0435	0.0036	0.0334	0.0027	0.00527	0.00017	33.91	1.1	33.4	2.7	-90	170	33.9	-1.53
Zircon_116	0.75	0.0504	0.0041	0.0369	0.003	0.005	0.00014	32.2	0.92	36.8	2.9	220	170	32.2	12.50
Zircon_117	0.45	0.0441	0.0025	0.0312	0.0019	0.004882	0.0001	31.39	0.67	31.14	1.8	-85	120	31.4	-0.80
Zircon_118	0.67	0.0469	0.0058	0.0362	0.0043	0.00552	0.00021	35.5	1.3	36.1	4.2	20	240	35.5	1.66
Zircon_119	1.76	0.07	0.0094	0.0501	0.0056	0.0052	0.00022	33.4	1.4	49.6	5.4	780	270	33.4	32.66
Zircon_120	0.81	0.055	0.0042	0.0429	0.0039	0.00562	0.00022	36.1	1.4	42.7	3.8	380	160	36.1	15.46
TFS-PLU-10															
Zircon_121	0.98	0.06	0.011	0.0311	0.006	0.00374	0.00021	24.1	1.3	31	5.9	540	390	24.1	22.26
Zircon_122	1.17	0.0538	0.0067	0.0254	0.0029	0.00353	0.00011	22.7	0.73	25.4	2.8	320	250	22.7	10.63
Zircon_123	1.12	0.0508	0.0074	0.0252	0.0037	0.00375	0.00014	24.11	0.9	25.2	3.6	140	290	24.1	4.33
Zircon_124	0.81	0.143	0.08	0.112	5.5	0.0045	0.048	29	250	106	400	1990	190	29.0	72.64
Zircon_125	1.74	0.055	0.007	0.0264	0.0038	0.00361	0.00012	23.2	0.78	26.4	3.7	320	250	23.2	12.12
Zircon_126	1.48	0.0629	0.037	0.0303	0.037	0.00361	0.00043	23.2	2.7	30.2	34	610	460	23.2	23.18
Zircon_127	1.21	0.0485	0.0069	0.0251	0.0035	0.00373	0.00017	24	1.1	25.1	3.5	70	280	24.0	4.38
Zircon_128	1.38	0.0488	0.0052	0.0247	0.003	0.00377	0.00014	24.2	0.89	24.7	3	140	210	24.2	2.02

Zircon_129	1.21	0.046	0.046	0.0229	0.058	0.00356	0.00075	22.9	4.8	22.9	45	10	590	22.9	0.00
Zircon_130	0.85	0.129	0.022	0.076	0.014	0.00439	0.00029	28.3	4.8	75.3	10	2060	300	28.3	62.42
Zircon_131	0.82	0.048	0.0046	0.0226	0.0018	0.00365	0.00012	23.49	0.75	22.7	1.8	60	190	23.5	-3.48
Zircon_132	0.85	0.085	0.013	0.0449	0.007	0.00398	0.00026	25.6	4.7	44.4	6.7	1220	320	25.6	42.34
Zircon_133	0.88	0.055	0.0094	0.0262	0.0038	0.00365	0.00017	23.5	1.1	26.2	3.8	390	280	23.5	10.31
Zircon_134	1.21	0.0504	0.0063	0.0248	0.0031	0.00374	0.00014	24.04	0.88	24.8	3	230	230	24.0	3.06
Zircon_135	1.13	0.0506	0.0095	0.0252	0.0045	0.00374	0.00018	24.1	1.1	25.1	4.5	120	350	24.1	3.98
Zircon_136	1.10	0.0484	0.0075	0.0242	0.0037	0.00383	0.00019	24.6	1.2	24.2	3.7	40	300	24.6	-1.65
Zircon_137	1.37	0.0474	0.0066	0.0217	0.0027	0.00348	0.00015	22.4	0.95	21.7	2.7	40	250	22.4	-3.23
Zircon_138	0.99	0.049	0.012	0.0219	0.0056	0.00368	0.00022	23.7	1.4	21.8	5.5	-120	430	23.7	-8.72
Zircon_139	1.10	0.057	0.017	0.0305	0.01	0.00382	0.00024	24.6	1.5	30.5	10	580	380	24.6	19.34
Zircon_140	1.05	0.0488	0.0078	0.0238	0.0037	0.00365	0.00016	23.48	1	23.8	3.6	100	290	23.5	1.34
Zircon_141	1.00	0.067	0.0075	0.035	0.004	0.00351	0.00017	22.6	1.1	34.8	3.9	660	250	22.6	35.06
Zircon_142	0.98	0.0432	0.0084	0.0228	0.0044	0.00377	0.00022	24.3	1.4	22.7	4.4	-240	320	24.3	-7.05
Zircon_143	0.71	0.067	0.012	0.0304	0.0067	0.00364	0.00025	23.4	1.6	30.3	6.5	530	350	23.4	22.77
Zircon_144	1.05	0.0455	0.0069	0.0238	0.0035	0.00346	0.00017	22.3	1.1	25	3.5	20	250	22.3	10.80
Zircon_145	0.81	0.046	0.011	0.0248	0.0063	0.0037	0.00021	23.8	1.4	24.7	6.2	60	410	23.8	3.64
Zircon_146	0.91	0.0475	0.009	0.0249	0.005	0.00377	0.00021	24.2	1.4	24.9	4.9	-30	310	24.2	2.81
Zircon_147	0.80	0.051	0.026	0.0264	0.02	0.00391	0.00026	25.2	1.7	28.1	18	50	530	25.2	10.32
Zircon_148	1.06	0.0475	0.0057	0.0248	0.0028	0.00365	0.00014	23.5	0.91	24.8	2.8	20	240	23.5	5.24
Zircon_149	0.79	0.063	0.035	0.0317	0.036	0.00364	0.00042	23.4	2.7	31.5	28	500	470	23.4	25.71
Zircon_150	1.53	0.0453	0.006	0.0226	0.0028	0.00354	0.00015	22.75	0.96	22.7	2.8	-10	240	22.8	-0.22

No. 222-2016

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:

GEOLOGÍA

Al trabajo titulado:

TESIS

PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL PLUTÓN LA UNIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA UNIÓN Y GUALÁN, ZACAPA, GUATEMALA

Presentado por el (la) estudiante:

FRANCIS EMANUEL SALGUERO DÍAZ

Autoriza el

IMPRIMASE

Cobán, Alta Verapaz 17 de octubre de 2016

Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales

DIRECTOR

