



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Magmatismo y tectónica de la parte  
oriental de la zona de cizalla del Río  
Santiago, Jalisco**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Oscar Agesandro García Arriola

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Luca Ferrari



**Ciudad Universitaria, CDMX, 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





## Dedicatoria

*A mis amados padres, Oscar y Josefina  
quienes con profundo cariño y ternura  
inculcaron en mí, el amor por el  
maravilloso mundo de la ciencia  
y el conocimiento...*

*A mi adorada hermanita Kenya,  
quien a pesar de las vicisitudes de la vida  
ha sabido levantar la cara y luchar,  
demostrando que ese férreo carácter  
también sirve para sortear grandes obstáculos...*

*A mi demás familia:  
mis amigos  
mis primos  
mis tíos  
con quienes también he compartido la vida  
y han estado al pendiente de la evolución de este trabajo...*

*A ella...*

## Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a mis padres por haberme apoyado incondicionalmente en todo momento durante mi carrera y toda mi vida, su gran amor y cariño han sido siempre pilares para llegar a donde estoy.

Por ser tan generosas conmigo y porque en ellas adquirí no solo conocimientos académicos sino aprendí también a vivir la vida, quiero agradecer eternamente a mi *alma mater* la Universidad Nacional Autónoma de México y a mi Facultad de Ingeniería en cuyas aulas me convertí en geólogo.

Agradezco profundamente a mi profesor y director de tesis el Dr. Luca Ferrari por todo lo que me enseñó de Geología desde que fue mi maestro de Tectónica, por su gran apoyo como tutor y por sus muy valiosas aportaciones y correcciones a esta tesis.

Quiero agradecer a todos y cada uno de mis maestros de la carrera: Juan Medina, Alfredo Victoria, Noé Santillán, Blanca Buitrón, Fernando Rosique, Laura Mori, Francisco Medina, Ricardo Padilla, Roberto Maldonado, Carlos Schulze, Joaquín Aguayo, Emiliano Campos, María de la Paz, Bernardo Martell, Iza Canales, Alberto Arias, Baldomero Carrasco, Aldo Ramos, Gilberto Silva, Luca Ferrari, Moisés Dávila, Francisco Romero, Javier Arellano, Marco Rubio, Dante Morán, Luis Arrubarena y Javier Mancera, porque todos ellos me enseñaron la grandeza de la Geología y me dejaron un invaluable aprendizaje acerca de ella.

A mis amigos y amigas de la Facultad, con quienes compartí experiencias y aventuras inolvidables, llenando mi vida de entusiasmo haciendo que el recorrido de la carrera fuera mucho más placentero, divertido y grandioso.

Mi especial agradecimiento al Dr. Isidro Loza y al Geol. Juan Carlos Castillo por acompañarme durante las jornadas de campo y por haber realizado valiosos comentarios que alimentaron a este trabajo.

Le agradezco a mis sinodales: el Dr. Enrique González, el Dr. Dante Morán, la Dra. Laura Mori, el Dr. Aldo Ramos y el Dr. Luca Ferrari por sus muy valiosas y atinadas observaciones a esta tesis que sin duda ayudaron a mejorarla y complementarla. También mi agradecimiento hacia ellos por evaluarme durante la presentación de mi examen profesional.

Al proyecto CONACYT CB-237745 “Temporalidad y duración de los eventos de extensión, magmatismo y mineralización en la parte sur de la Sierra Madre Occidental: Un estudio integrado de geocronología U-Pb, Ar-Ar y trazas de fisión” por incluirme como becario para la elaboración de mi trabajo y por todos los apoyos ofrecidos durante las temporadas de campo.

Un agradecimiento especial al Dr. Enrique González, a la Mtra. Isabel Domínguez y a Gloria González por todas las facilidades brindadas durante el proceso de trámites para la titulación.

Del Centro de Geociencias, Juriquilla de la UNAM, quiero agradecer al Dr. Carlos Ortega por la elaboración de los análisis geocronológicos de mis muestras, al técnico-laboratorista Manuel Albarrán del taller de molienda por enseñarme el proceso de preparación, y a Oscar y Juan por apoyarme con la elaboración de láminas delgadas.

A Fernando Nuñez por facilitarme el uso de los microscopios para que pudiera realizar mis análisis petrográficos en el Instituto de Geología de la UNAM

A mis tíos Mario y Cristina por su siempre acogedora hospitalidad en su casa cuando me quedaba en Querétaro durante mi Estancia Profesional y durante mi trabajo de preparación de muestras en el Centro de Geociencias de Juriquilla de la UNAM

A Hermes y Edith por haberme ayudado a resolver algunas dudas durante el análisis petrográfico de este trabajo.

A todos ellos, Muchas Gracias!



# Índice

---

<b>RESUMEN</b>	10
<b>CAPÍTULO I Introducción</b>	11
• Objetivos y justificación de la tesis	11
• Ubicación de la zona de estudio	12
• Marco geológico y tectónico	13
- Bloque Jalisco (BJ)	13
- Sierra Madre Occidental (SMO)	14
- Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM)	16
- Evolución tectónica de la región de estudio	18
• Trabajos Previos	20
<b>CAPÍTULO II Metodología</b>	21
• Trabajo en campo	21
• Trabajo en laboratorio y gabinete	22
- Fechamiento de zircones por el método U/Pb mediante LA-ICP-MS	22
- Análisis Petrográfico	23
- Análisis Estructural	24
<b>CAPÍTULO III Geocronología</b>	25
• Introducción	25
• Resultados	28

<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>Estratigrafía y Petrografía</b>	36
•	Sierra Madre Occidental	36
-	Andesita Cinco Minas	36
-	Intrusivo Presa de la Yesca	39
-	Ignimbrita San Pedro Analco	41
-	Ignimbrita Juana Castilla	44
-	Intrusivo Río Santiago	46
-	Areniscas Las Juntas	49
-	Ignimbrita Santo Domingo	52
-	Dacita Las Ánimas	52
-	Ignimbrita Juanepantla	53
•	Faja Volcánica Trans-Mexicana	55
-	Domo e Ignimbrita Hostotipaquillo	55
-	Depósitos aluviales retrabajados	56
-	Basaltos Mesa Las Flores	56
-	Depósitos recientes	57
•	Secciones Estructurales	60
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>Tectónica y análisis estructural</b>	62
•	Fundamento Teórico	62
•	Análisis cinemático de las fallas	64
•	Diques máficos	71
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>Conclusiones</b>	73
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		75
<b>ANEXOS</b>		81

## Resumen

---

La conformación de la Sierra Madre Occidental (SMO) es el resultado de una serie de eventos magmáticos y tectónicos ocurridos durante más de 60 Ma, desde el Cretácico tardío hasta el Mioceno, periodo durante el cual tuvieron lugar importantes procesos geológicos que culminaron con el fin de la subducción de la placa Farallón y sus placas descendientes, y el proceso de apertura del Golfo de California. En particular, los pulsos riolítico-ignimbríticos que ocurrieron en el Oligoceno y Mioceno temprano son los responsables de la generación de la SMO como gran provincia silícica, que en este trabajo fue estudiada en su límite meridional con el Bloque Jalisco y la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM).

Para el presente trabajo se elaboró una cartografía geológica y se reconstruyó una columna estratigráfica de un área ubicada al noroeste de Tequila, Jal. Se estudiaron dos transectos que cruzan el Río Grande de Santiago y las principales estructuras tectónicas de la frontera sur de la SMO. Se realizó un estudio petrográfico de 20 muestras y se fecharon 8 de ellas por el método U-Pb en zircón. Finalmente, se hizo un análisis estructural de las fallas y los diques máficos observados en los transectos. Todo ello con el objetivo de realizar una reconstrucción de la historia geológica de la parte sur de la Sierra Madre Occidental y discutir el origen de los diversos elementos magmáticos y tectónicos involucrados en ella.

Los resultados expuestos en esta tesis, han llevado a proponer la estratigrafía de la zona como una secuencia de lavas andesíticas, cubiertas por una sucesión de ignimbritas que están intrusionadas por un cuerpo silícico muy extenso. Este paquete de rocas, con edades del Oligoceno tardío, es cubierto por una secuencia de areniscas con edades máximas de depósito de 23.5 Ma que lo separa de otro paquete de ignimbritas y domos dacíticos del Mioceno temprano.

El análisis estructural que se realizó sugiere que toda esta secuencia está basculada por fallas extensionales y cubierta en discordancia por lavas basálticas y flujos piroclásticos del Plioceno de la FVTM. Dicho análisis indica también que las unidades de la SMO fueron afectadas principalmente por fallas normales con una componente lateral menor. De las poblaciones de fallas y la orientación de los diques máficos medidos en campo se puede obtener el paleotensor de esfuerzo en 6 sitios, mismo que indica un régimen extensional inicialmente con dirección NE-SW que progresivamente pasó a NW-SE.

# Capítulo I      Introducción

---

## Objetivos y justificación de la tesis

El objetivo general de la presente tesis es reconstruir la historia geológica del límite sur de la Sierra Madre Occidental, así como discutir el posible origen de los principales elementos magmáticos y tectónicos que se conformaron a lo largo de esta importante zona. Para este fin, se estudió un área ubicada en la frontera entre los estados de Jalisco y Nayarit donde pueden observarse las relaciones entre la Sierra Madre Occidental (SMO), la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) y el Bloque Jalisco (BJ).

Para alcanzar este objetivo general, se establecieron las siguientes metas:

- ✓ Elaboración de un mapa geológico y estructural basado en cartografía previa, en nuevas observaciones en campo y en la interpretación de imágenes disponibles de Google Earth
- ✓ Elaboración de secciones estructurales y de una columna geológica basadas en las relaciones estratigráficas entre las unidades geológicas que se establecieron
- ✓ Determinación de las edades de las rocas volcánicas, plutónicas y sedimentarias de mayor relevancia por medio del método U-Pb
- ✓ Elaboración de un análisis estructural de los esfuerzos a los que fueron sometidas las unidades geológicas encontradas, a partir de las fallas que las afectan.

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto CONACYT CB-237745 “Temporalidad y duración de los eventos de extensión, magmatismo y mineralización en la parte sur de la Sierra Madre Occidental: Un estudio integrado de geocronología U-Pb, Ar-Ar y trazas de fisión” encabezado por el Dr. Luca Ferrari.

## Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio se localiza en la frontera entre el estado de Jalisco y el estado de Nayarit (**Fig. 1**) a 82.5 km al NW de la ciudad de Guadalajara y a 10.5 km al NE del poblado de Hostotipaquillo. La principal vía de acceso a esta zona es a través de la carretera Guadalajara-

Tepic desde donde se recorren 92 km partiendo de la ciudad de Guadalajara atravesando los poblados de Tequila y Magdalena hasta llegar a la desviación rumbo a Hostotipaquillo, la cual se toma girando a la derecha.

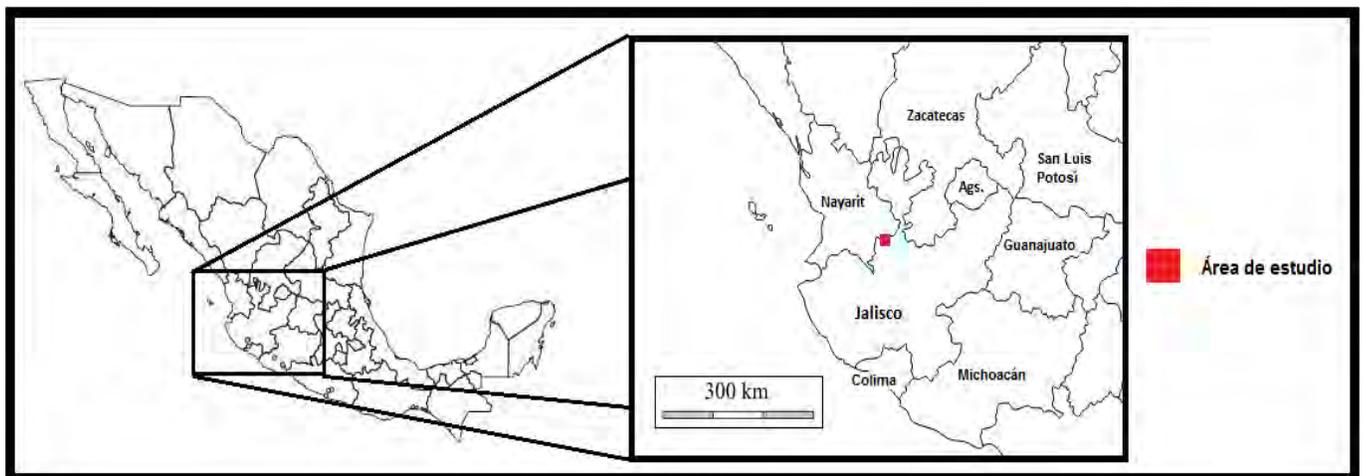


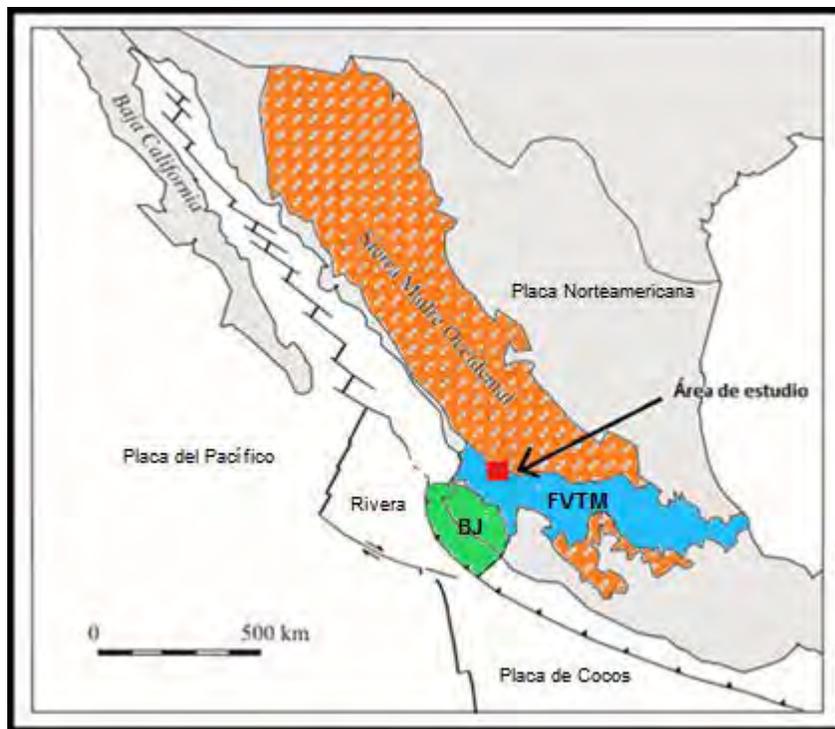
Figura 1. Localización del área de estudio

Se trabajaron 2 transectos dentro de esta zona. Para llegar al primero de ellos, se sigue en la misma dirección rumbo a Hostotipaquillo y poco antes de entrar al poblado se toma un camino de terracería con dirección E y luego NE en donde se recorrerán unos 13 km hasta llegar al pueblo de San Pedro Analco, sitio de inicio del primer recorrido estudiado rumbo al SW.

Al segundo de transecto, se llega a partir del mismo punto antes de entrar a Hostotipaquillo pero avanzando ahora en dirección NW tomando la carretera rumbo a la presa de La Yesca. El transecto comienza aproximadamente a partir del km. 12.5 recorriendo toda la carretera en esa dirección hasta la presa y continúa en el lado norte del río en donde comienza el estado de Nayarit recorriendo un camino de terracería durante unos 11 km más.

## Marco geológico y tectónico

La zona estudiada se localiza en el occidente del país en la parte noroeste del estado de Jalisco, en el límite con Nayarit, e incluye el Distrito Minero de San Pedro Anasco. Dicha región coincide con la frontera entre las provincias geológicas de la Sierra Madre Occidental (SMO) y el Bloque Jalisco (BJ), que se encuentra cubierta por rocas de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) (**Fig. 2**). A continuación se realiza una descripción cronológica del origen de cada una de las provincias mencionadas, así como un breve análisis de su evolución tectónica a mayor escala a lo largo del tiempo.



**Figura 2.** Ubicación de las tres provincias mayores: Sierra Madre Occidental (SMO), Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) y el Bloque Jalisco (JB), así como de la zona de estudio. Modificada de **Ferrari et al, 2000**

### Bloque Jalisco (BJ)

Se trata de un bloque cortical que forma parte del llamado Terreno Guerrero. Dicho terreno tiene su origen en el Mesozoico y representa importantes periodos de magmatismo de aquellos tiempos. Según el estudio geocronológico de **Valencia et al., (2013)**, las rocas intrusivas que forman la parte principal del BJ presentan dos grupos de edades; uno entre 80 a 91 Ma para el

batolito de Puerto Vallarta y el otro de entre 59.4 a 64 Ma para los plutones que afloran más al este en los valles de Antenguillo y Ameca.

En su mayoría, el BJ se encuentra conformado por rocas plutónicas de composición entre granito y dioritas cubiertos parcialmente por ignimbritas silíceas con edades del Cretácico-Paleoceno (**Ferrari et al., 2000**). Estas rocas intrusionan a un basamento constituido por rocas metamórficas y depósitos marinos sedimentarios que abundan sobre todo al oeste del bloque cerca de Sierra Vallejo y Sierra de Zapotan, mientras que más hacia la parte SE del bloque afloran calizas y areniscas de edades mesozoicas (**Ferrari et al., 2000**). En general, este

paquete litológico se encuentra afectado por un bajo grado de metamorfismo, así como por fracturamiento y plegamiento que se asocia a la orogenia Larámide. (**Ferrari et al., 2000**). En el caso de las rocas plutónicas del bloque, las que poseen edades de 90 a 54 Ma, evidentemente no presentan dicha deformación.

Trabajos de termocronología llevados a cabo en la costa de Puerto Vallarta y Manzanillo, sugieren que el complejo intrusivo del BJ fue levantado y exhumado desde unos 10 km de profundidad antes de 52 Ma (**Calmus et al, 2002**).

### **Sierra Madre Occidental (SMO)**

La Sierra Madre Occidental es la provincia ignimbrítica continua más grande del mundo y la tercera en tamaño de las llamadas *Silicic Large Igneous Provinces* (SLIP) (**Bryan et al., 2002**). Está constituida por diferentes episodios magmáticos Cretácico-Cenozoicos que acompañan dos importantes eventos tectónicos: (1) la subducción de la placa Farallón por debajo de la Norteamericana y (2) la apertura del Golfo de California (**Ferrari et al., 2007**).

La SMO se ubica en la parte occidental del país y posee un área de extensión actual de alrededor de 300,000 km<sup>2</sup>, una elevación promedio de más de 2000 m y un ancho de entre 200 y 400 km por 1200 km de largo aproximadamente (**Ferrari et al., 2005**), extendiéndose en partes de los actuales estados de Chihuahua, Sonora, Sinaloa, Durango, Nayarit, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato, Querétaro y San Luis Potosí.

El área de este estudio se encuentra en la región sur de la SMO en su frontera con el Bloque Jalisco donde predominan secuencias ignimbríticas subyacidas por coladas de andesita.

La estratigrafía de esta enorme provincia geológica está definida por diferentes eventos magmáticos que se han ido generando a partir del Cretácico Tardío. El conjunto más antiguo está conformado por rocas plutónicas y volcánicas de este periodo que se encuentran emplazadas en un basamento conformado por rocas del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico. Posteriormente, dentro de la secuencia estratigráfica se han encontrado rocas andesíticas y dacítico-riolíticas pertenecientes al Eoceno. Ambos grupos de rocas (plutónicas del Cretácico superior-Paleoceno y andesíticas del Eoceno) forman parte del llamado Complejo Volcánico Inferior (CVI) (**McDowell y Keitzer, 1977**), el cual, se encuentra cubierto por la secuencia de rocas más representativas de toda la SMO: las ignimbritas silíceas del Oligoceno y Mioceno temprano, que han sido denominadas como el Supergrupo Volcánico Superior (SVS) (**McDowell y Clabaugh, 1979**). Se tiene registrado que estas rocas fueron generadas durante dos importantes pulsos de magmatismo ignimbrítico-riolítico; el primero de ellos ocurrió de 34 a 28 Ma., mientras que el segundo de 24 a 18 Ma.; y corresponden a un régimen de extensión asociado al periodo final de la subducción y a la apertura del Golfo de California (**Ferrari et al 2013**). Dentro de este grupo, se encuentran intercaladas secuencias de coladas basáltico-andesíticas que pertenecen a la suite denominada “Basalto-Andesitas del Sur de la Cordillera” (SCORBA) (**Cameron et al., 1989**). Finalmente, derrames de basaltos e ignimbritas alcalinos se emplazaron durante el Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario, durante la separación de la península de Baja California del continente (**Ferrari et al., 2007**). Dichas coladas pueden ser encontradas, sobre todo, en la periferia de la SMO. (**Fig. 3**)



Figura 3. Imagen que muestra la distribución geográfica de los diferentes episodios volcánicos de la SMO y la FVTM. Modificada de Ferrari et al, 2012

### Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM)

Se trata de un arco magmático que cubre un área de 160,000 km<sup>2</sup> extendiéndose de este a oeste cubriendo la parte central del territorio mexicano, teniendo como límite geológico este a la cuenca jurásica oceánica del Golfo de México, y por el oeste, al rift del Golfo de California, que se encuentra conformando nuevo piso oceánico desde hace unos 3.6 Ma (Lonsdale, 1995)

La FVTM es la provincia geológica más joven de las tres en cuestión, pues a pesar de que los mecanismos tectónicos responsables de su formación iniciaron a finales del Cretácico, su configuración actual se define hasta hace 19 Ma en su parte centro-oriental y hasta hace unos 11 Ma en la parte occidental, debido a erupciones volcánicas producto de la subducción existente por debajo de la placa Norteamericana.

En la figura 4, se muestra la distribución del vulcanismo de la FVTM. En ella se puede apreciar una migración del arco magmático en dirección E en la zona norte de la Faja durante el Mioceno, y posteriormente un movimiento en dirección contraria hacia el W; es decir, hacia la trinchera de subducción, durante el Mioceno tardío y el Plioceno temprano. En contraste, en la parte sur de la FVTM, el arco se trasladó de manera progresiva hacia el Este sin presentar después ningún cambio de dirección. Esto provocó que los cinturones magmáticos tuvieran una

orientación NNW durante el Eoceno, y posteriormente durante el Oligoceno comenzaron a rotar en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta alcanzar su orientación actual E-W durante el Mioceno medio (**Ferrari et al., 2012**).

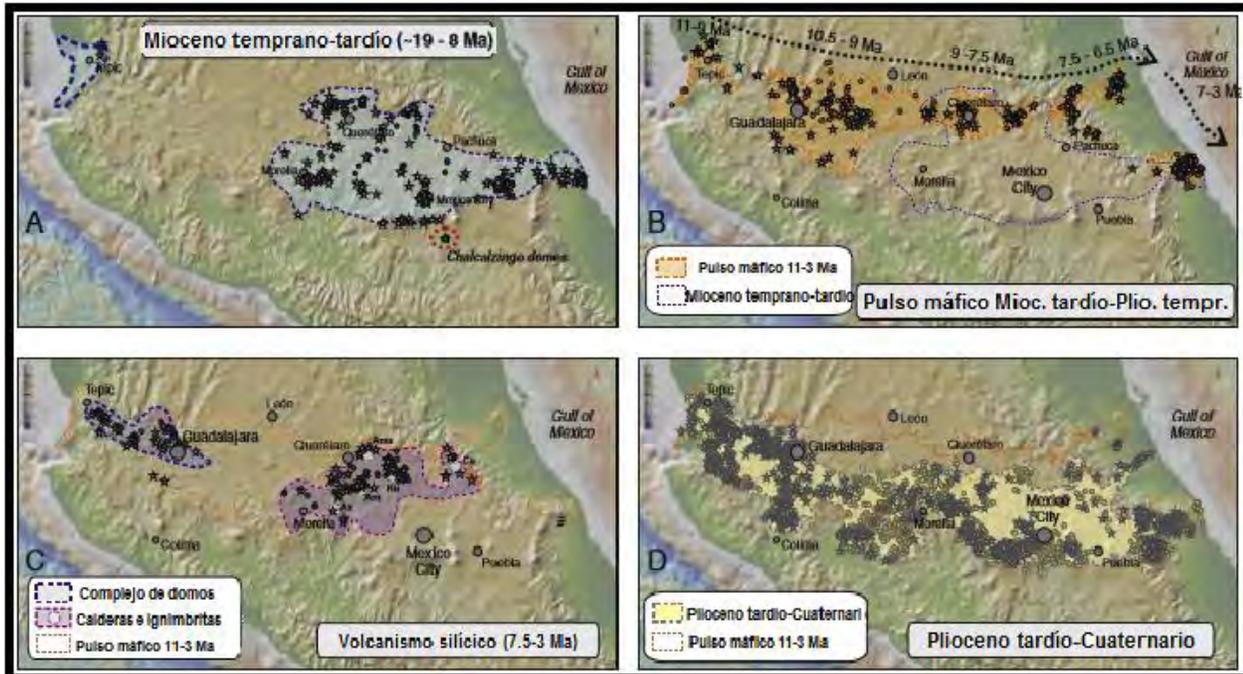


Figura 4. Secuencia de imágenes que representan la migración del arco magmático desde el Mioceno Temprano hasta su posición en el Cuaternario. Modificada de **Ferrari et al, 2012**

Con el cese de la subducción afuera de Baja California alrededor de los 12.5 Ma, la parte más profunda del slab subducido se desprende y la ruptura se propaga hacia el Este por debajo de la FVTM en los siguientes 7 Ma (**Ferrari, 2004**). Por otro lado, a los 10 Ma, la placa de Rivera se separa de la de Cocos y empieza a subducir con una inclinación ligeramente superior (**DeMets y Traylen, 2000**). En la actualidad, la placa de Rivera (**Yang et al., 2009**) presenta un ángulo de subducción de 40° por debajo de la región antearco, y uno de 70° por debajo de la FVTM; mientras que el ángulo de subducción de la placa de Cocos (**Pérez-Campos et al., 2008**) es aún menor (**Ferrari et al, 2012**). Esto provoca que las dos placas se encuentren separadas por un desgarre ortogonal a la trinchera cuyo vértice está ubicado al sur del Volcán de Fuego de Colima, por donde fluye material del manto en forma toroidal como “abrazando” al

*slab* de la placa de Rivera hasta su límite occidental a un costado del Golfo de California (**Soto et al., 2009**) (**Fig. 5**).

En general, la FVTM, presenta ciertas particularidades que la vuelven única en su tipo: a) en ella se encuentran productos ígneos con firmas geoquímicas de magmas intraplaca (basaltos OIB) coexistiendo con otros típicos de un ambiente de subducción; b) sus principales estratovolcanes se encuentran alineados en forma oblicua a la orientación general de toda la Faja; c) las placas que subducen en frente del arco son relativamente jóvenes, hecho que tradicionalmente genera escaso vulcanismo. (**Ferrari et al., 2012**)

Dentro de la zona de estudio de este trabajo, la FVTM cubre el límite geológico entre la SMO y el BJ.

### **Evolución tectónica de la región de estudio**

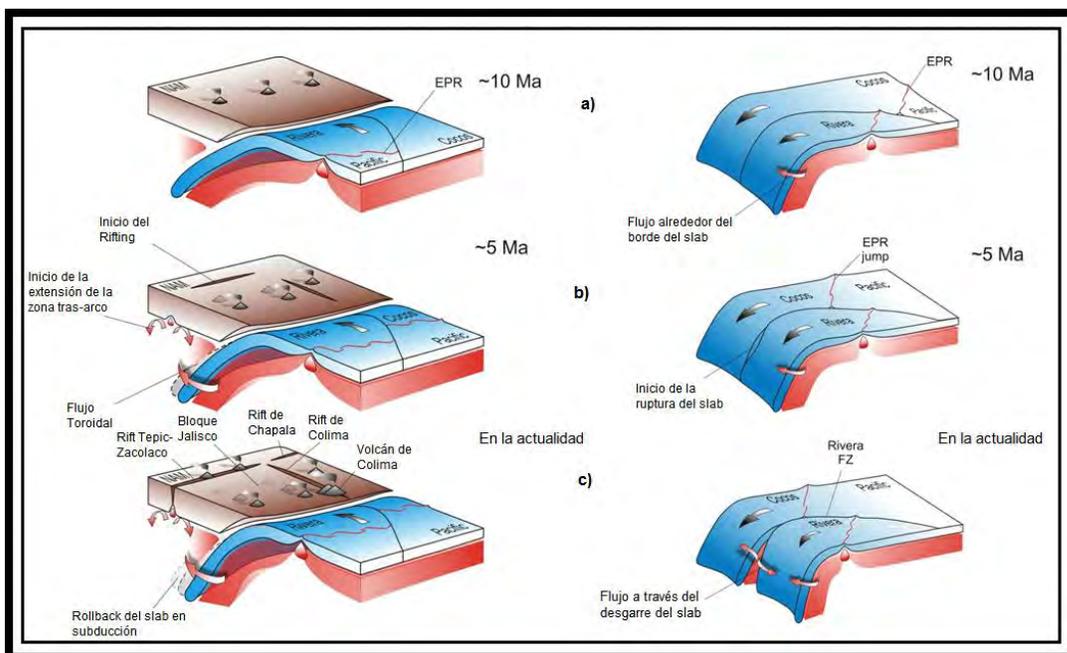
El magmatismo continental que contribuyó a la formación del Bloque Jalisco, la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Trans-Mexicana, está ligado a la subducción de la placa Farallón y sus placas descendientes, por debajo de la Norteamericana. Sin embargo, el magmatismo que particularmente formó buena parte del Bloque Jalisco y del Complejo Volcánico Inferior (CVI) de la SMO es parte del llamado “arco Larámide”, que se construye entre el Cretácico Tardío y el Eoceno Temprano, al tiempo que la zona E de México es deformada durante la orogenia homónima. En cambio los pulsos ignimbríticos y la actividad ígnea silícica que constituyen el Supergrupo Volcánico Superior (SVS) de la SMO (35-18 Ma) corresponden con un régimen tectónico de extensión asociado a la disminución de la convergencia de la placa Farallón y sus descendientes Guadalupe y Magdalena, que eventualmente llega al fin de la subducción y a la apertura del Golfo de California. La extensión ortogonal a la trinchera que afecta a la SMO durante todo este periodo, es atribuida a un incremento de inclinación del *slab* subducido (*rollback*) y, posiblemente, al desprendimiento de fragmentos de la placa en subducción.

Entre los 18 y los 12.5 Ma. se ha inferido un movimiento lateral izquierdo entre la SMO y el Bloque Jalisco debido a la disminución de la tasa de subducción de la microplaca Magdalena, lo que genera una extensión E-W en la SMO mientras que la placa de Cocos continuó subduciendo por debajo del Bloque Jalisco (**Ferrari et al., 1995**).

Al terminar la subducción de la microplaca Magdalena a los 12.5 Ma, y al separarse la placa de Rivera de la de Cocos se produce un cambio de movimientos en la frontera entre la SMO y el Bloque Jalisco (**Fig. 5a**). Este cambio, que se da a partir de 10 Ma, se caracteriza por una deformación de tipo transtensional derecho (**Ferrari, 1995; Ferrari et al., 2002**). Las fallas en “*echelon*” con orientación promedio WNW-ESE que se encuentran entre Guadalajara y Tepic, son las evidencias de este movimiento de transtensión que más adelante darían origen al rift Tepic-Zacoalco (**Ferrari y Rosas Elguera, 2000**).

Sucesivamente hace aproximadamente 5-6 Ma, estas fallas empiezan a tener movimientos normales debido al *rollback* de la placa de Rivera y con ello continúa la formación de los rifts de Tepic-Zacoalco y Colima que limitan al Bloque Jalisco. (**Rosas Elguera et al., 1996**) (**Fig. 5b**) Posteriormente, hacia los 4 y 2 Ma dicha deformación extensional rota hasta alcanzar una dirección SW-NE, lo cual reactiva las fallas NW-SE antes generadas pero ahora como fallas de extensión.

En la actualidad y desde hace 2 Ma el movimiento extensional ha alcanzado una orientación WSW-ENE, lo que entonces supone que las fallas NNW-SSE son las más recientes debido a esta rotación del fenómeno de extensión (**Fig. 5c**).



**Figura 5.** Situación por episodios del *slab* en subducción que acompaña el desarrollo de la FVTM. a) Hace 10 Ma se inicia la ruptura del *slab* en subducción y con ella un evento de extensión transtensional derecho. b) Flujo toroidal de material del manto alrededor de los bordes de la placa. c) Continúa el *rollback* de la placa de Rivera y el desarrollo de diversos rifts Tomada de **Manea et al. (2013)**

## Trabajos Previos

El origen de la Sierra Madre Occidental, ha sido investigado por diferentes autores a partir de finales de la década de los años 70 y principios de los 80 con los trabajos elaborados por **McDowell y Clabaugh, (1979, 1981)** y **Damon (1979)**, quienes fueron los primeros en documentar una estratigrafía regional de esta provincia de manera general. Sin embargo, al tratarse de una provincia geológica de dimensiones globales, se comenzaron a elaborar trabajos cuyas zonas de estudio se ubican en sectores más específicos de la región, sobre todo hacia la parte centro-norte. Más adelante, estos trabajos comenzaron también a involucrar estudios de la FVTM, ubicada hacia la parte sur de la provincia silícica, debido a la interacción geológico-tectónica que guarda con ella. Ejemplos de estos trabajos son los elaborados por **Nieto et al., (1985)** y **Moore et al., (1994)** cuyos estudios incluyen fechamientos y descripciones de los basaltos que conforman a la FVTM; **Soto et al., (2009)** explican el flujo del manto por debajo de la FVTM y posteriormente por **Ferrari et al, (2012)** quienes hablan acerca de su generación.

A finales de los años 90 y durante los 2000, los estudios sobre esta provincia comenzaron a centrarse en dar una explicación a los procesos que conformarían al Terreno Guerrero (específicamente al Bloque Jalisco), debido a que el análisis de su tectónica contribuiría al conocimiento sobre la génesis de la SMO, ya que ambas provincias comparten frontera geológica justo por debajo de la FVTM. **Ferrari et al., (1995)** describen los movimientos tectónicos ocurridos entre la SMO y el Bloque Jalisco, así como la generación del Golfo de California. **Lonsdale, (1995)** quien por medio de métodos geofísicos incluye también estudios acerca del mismo Golfo. **Ferrari et al., (2000)** y **Calmus et al., (2002)** hablan acerca de la composición del Bloque Jalisco y de los procesos de su formación al asociarlo a la Orogenia Larámide, **Ferrari y Rosas-Elguera, (2000)** explican la formación del rift Tepic-Zacoalco (frontera natural entre BJ y SMO) mientras que **Valencia et al., (2013)** a partir de estudios geocronológicos, realizan fechamientos al Bloque Jalisco.

Uno de los estudios más recientes cuya zona de estudio se encuentra dentro del área estudiada en el presente trabajo, es el elaborado por **Paez, (2010)** quien para sus tesis de maestría realiza un análisis estructural del área de la Presa de la Yesca.

Los estudios aquí mencionados, han aportado valiosa información acerca del contexto geodinámico de la región, para la elaboración de la presente tesis.

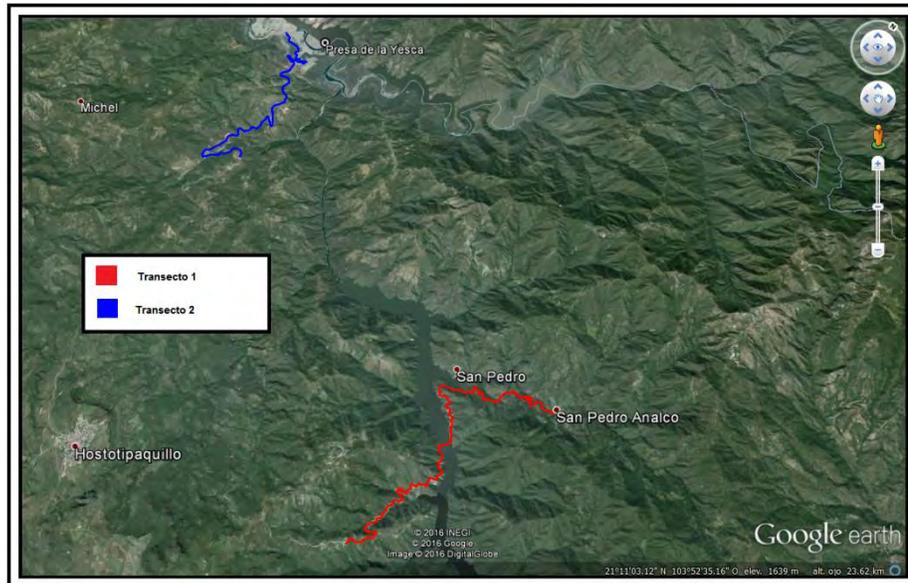
## Capítulo II Metodología

---

### Trabajo en campo

Se realizaron recorridos a lo largo de dos transectos para su estudio. El primero (T1) posee una longitud aproximada de 10 km y corre desde el poblado de San Pedro Analco y va en dirección SW hasta el Río Grande de Santiago, el cual se fue bordeando hasta atravesarlo por el puente que se encuentra en la zona, continuando después en dirección sur hasta limitar con la Falla Cinco Minas. El segundo transecto (T2) parte desde el Río Grande de Santiago a 2.5 km aprox. al oeste de la Presa de la Yesca, recorriendo en dirección SE hasta tocar la Falla Las Juntas con una longitud aproximada de 8.5 km (**Fig. 6**). Durante ambos recorridos se fueron tomando muestras de roca para posterior análisis petrográfico y algunas de ellas para análisis geocronológico. Se colectaron también, datos estructurales de planos de discontinuidad como fallas, fracturas y estratificaciones además de orientación de estrías con sus indicadores cinemáticos en los planos de fallas. Para estos recorridos se utilizaron las cartas F13-D44 y F13-D43 del SGM y de INEGI como referencia. En cada punto de interés, se registraron coordenadas UTM para posterior interpretación geológica de lo observado.

Más adelante se elaboró una selección de 8 muestras de roca tomadas para realizar fechamiento por medio del método geocronológico U-Pb, mientras que a otras se les realizó lámina delgada para su análisis petrográfico.



**Figura 6.** Se muestra la ubicación de cada uno de los transectos trabajados durante las temporadas de campo. Imagen satelital tomada de Google Earth

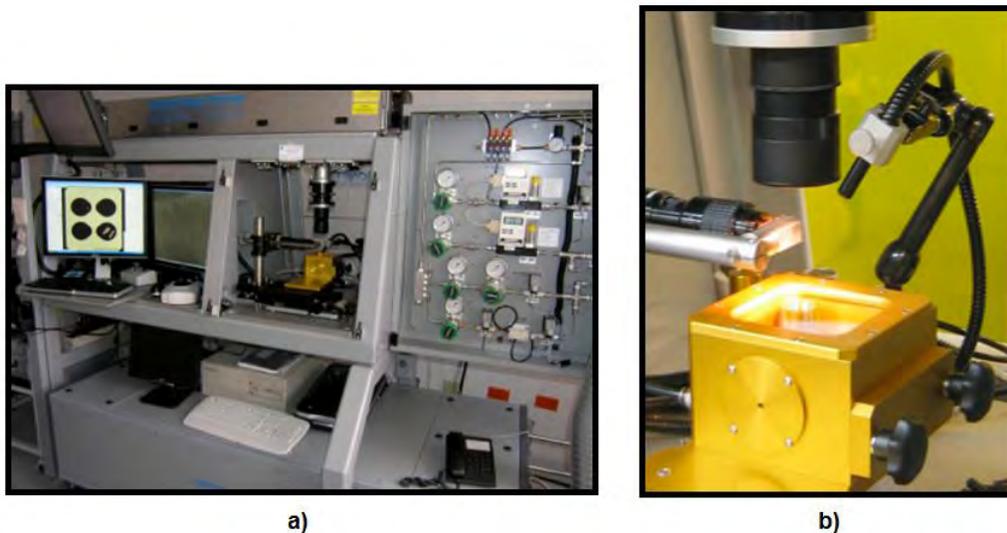
## Trabajo en laboratorio y gabinete

### Fechaamiento de zircones por el método U-Pb mediante LA-ICP-MS

Se utilizó la técnica *Laser Ablation Inductively Couple Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS) para el análisis por U-Pb de los zircones separados de cada una de las muestras designadas para fechaamiento. Dicho proceso se realizó en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias, Juriquilla UNAM (LEI, CGEO).

El método inicia con el separado de zircones. Se trituraron las muestras y se tamizaron para dividir las en distintas fracciones de tamaños, las más finas se pasaron por el proceso de batea donde solo quedaron los residuos de mayor densidad. Se utilizaron unas finas pinzas para separar los zircones de cada muestra con la ayuda de un microscopio. Posteriormente se montan los zircones de cada muestra, en una resina epóxica endurecedora que se pulirá más adelante con abrasivos especiales una vez que haya terminado de secar, con el objetivo de crear una superficie homogénea dejando expuestos los zircones a un mismo nivel. Posteriormente comienza el proceso de fechaamiento por medio del sistema de ablación Laser Resonetics Resolution M-50 (**Fig. 7a**), el cual hace incidir un haz de láser de Ar de 193 nm de

longitud de onda sobre la superficie del zircón generando un cráter sobre una de sus caras de apenas unas cuantas micras de profundidad (**Fig. 7b**), del cual se desprende un gas volatilizado que es transportado por una corriente de Ar y N<sub>2</sub> a un ICP-MS, que disocia e ioniza a 7000° C al material arrancado de la muestra para analizar las diferencias de masas de los iones producidos (**Melgarejo et al., 2010**).



**Figura 7.** a) Laser Resonetics Resolution M-50 del Laboratorio de Estudios Isotópicos del CGEO. b) Detalle del mismo dispositivo donde se emite el haz de Ar sobre los zircones.

Se realiza entonces la medición de zircones estándar y vidrios NIST como referencia, por cada 10 zircones analizados con la intención de realizar las correcciones por fraccionamiento de los isotopos y deriva instrumental (**Solari et al., 2009**).

Más adelante, se reducen y corrigen los datos obtenidos mediante un software diseñado para tales efectos calculando así las edades de cada zircón con el promedio de las relaciones isotópicas  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  y  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  para la elaboración de las gráficas de concordia que más adelante se explicarán.

### Análisis petrográfico

En el taller de laminación del CGEO, se elaboraron láminas delgadas de las muestras más representativas recabadas en campo y se analizaron con los equipos petrográficos Olympus BX60 de luz transmitida del Instituto de Geología de la UNAM. Ahí mismo, se tomaron fotos microscópicas de cada muestra.

## Análisis estructural

Se utilizó el software FaultKin de Allmendinger (**Marret, 1990; Allmendinger, 2012**) de licencia libre en la red, para procesar los datos de planos de falla y pitch recabados durante las jornadas de campo. Dicho software funciona introduciendo los datos de rumbo, echado, tipo de falla y valor del pitch de cada dato tomado por estación estructural o unidad geológica. Con esta información, el programa elabora diagramas de P&T (presión-tensión) de forma similar a los mecanismos focales utilizados en sismología, para ubicar la orientación de los esfuerzos que generaron a las fallas (**Fig. 8**).

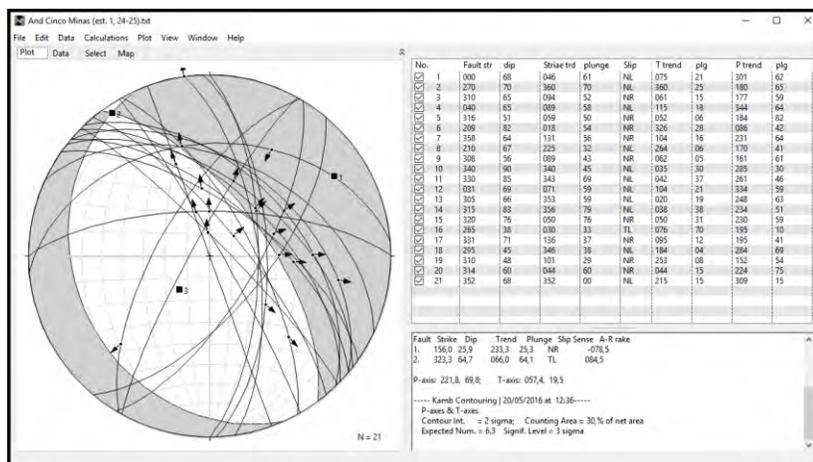


Figura 8. Captura de pantalla del software FaultKin durante el procesamiento de los datos de este trabajo

## Capítulo III Geocronología

---

### Introducción

Dentro de las múltiples reacciones que existen de decaimiento radioactivo entre distintos elementos químicos, sin duda, una de las más utilizadas para el fechamiento geológico de minerales y rocas, es la del U/Pb ( $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$  hasta el  $^{206}\text{Pb}$  y  $^{207}\text{Pb}$ ). Esto se debe a que el U tiene una vida media sumamente larga, y a que presenta tres cadenas de desintegración bien conocidas, de las cuales, dos de ellas en específico, son mayormente utilizadas para estos efectos; en donde intervienen muchos otros isotopos radioactivos hijos como el Th, Pa, Ra, Rn, Po, entre otros hasta llegar al Pb (**Fig. 9**). Estas cadenas o series de desintegración permiten una datación independiente de las edades y al correlacionarlas se logra la conclusión de la edad absoluta de la formación del mineral en cuestión.

El Uranio se encuentra en la naturaleza en forma de tres isotopos radioactivos:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ , mientras que el Torio solo existe como  $^{232}\text{Th}$ . Así, los isotopos  $^{235}\text{U}$  (con una vida media de 704 millones de años aprox.),  $^{238}\text{U}$  (con una vida media de 4.47 mil millones de años aprox.) y  $^{232}\text{Th}$  (con una vida media de 14.01 mil millones de años aprox.) decaen a  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  y  $^{208}\text{Pb}$  respectivamente.

El término “vida media” de un isótopo, se refiere al tiempo que se requiere para que se complete el decaimiento de la mitad de los átomos existentes en algún mineral. Para este tipo de análisis, los minerales más utilizados son los zircones por su alto contenido en U y Th radioactivo, lo cual, significa que ya han recorrido el camino de la serie de desintegración y es posible determinar su edad de formación analizando la proporción de U convertida en Pb radiogénico, misma que es nula al momento de formación.

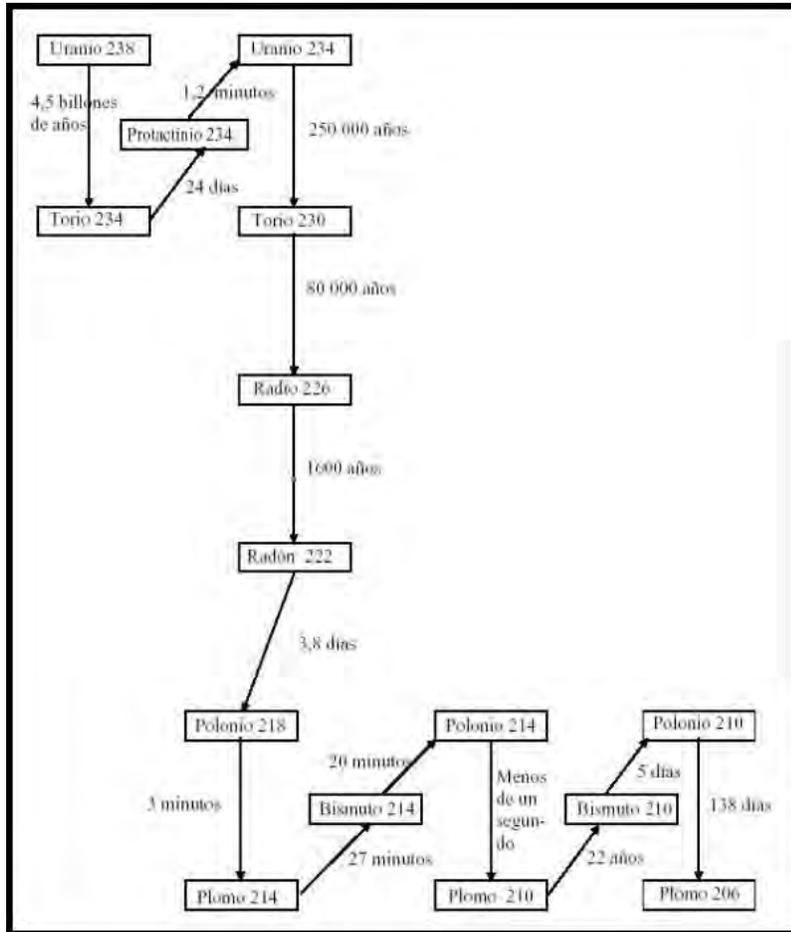


Figura 9. Serie de desintegración del  $^{238}\text{U}$  con los tiempos de vida media en cada paso. Tomada de Cánovas-Picón, 2007

Es justamente esta diferencia tan amplia, en cuanto al contenido de ambos elementos químicos, la que posibilita que esta relación (Pb/U) determine la edad de algún mineral, considerándola por ello, como de alto grado de efectividad (Doe, 1970). Esto se logra utilizando la siguiente fórmula:

$$D = N (e^{\lambda t} - 1)$$

donde:

N= Isótopos padres radioactivos

D= Isótopos hijos radioactivos

$\lambda$ = Constante de desintegración del isótopo radioactivo

t= Edad del mineral

La constante de desintegración ( $\lambda$ ) está en función del tiempo de vida media del isótopo mediante la relación:

$$\lambda = 0.693 / \text{tiempo de vida media}$$

Para calcular la edad del mineral (t), se requiere conocer la relación D/N (un ejemplo de ella sería la relación  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ) y elaborar un procedimiento matemático sencillo:

$$D = N (e^{\lambda t} - 1)$$

$$e^{\lambda t} = (D/N) + 1$$

$$\lambda t = \ln [(D/N) + 1]$$

$$t = \ln [(D/N) + 1] / \lambda$$

Este procedimiento se realiza en las relaciones  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  y  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  del mineral y se elabora una gráfica con ambas (cada relación representa un eje dentro de la gráfica) para analizar las edades arrojadas en comparación. Si el mineral ha sido siempre un sistema cerrado durante su desintegración de U a Pb, los resultados serán concordantes y a la curva graficada por las dos relaciones se le denomina: **curva de la concordia**. Como el número de átomos de U debe ser menor al número de átomos de Pb dentro del mineral, las proporciones de estas relaciones reflejarán siempre en la gráfica un aumento.

Ahora bien, si el mineral llegara a sufrir algún cambio interno que lo llevara a perder Pb dentro su composición debido a algún posible fenómeno térmico (como el metamorfismo), los resultados en la gráfica se verán como una línea recta por debajo de la curva que interseca a esta. A esta recta se le denomina: **discordia (Fig. 10)**.

El punto superior donde ambas líneas de la gráfica se cortan, representa el tiempo de cristalización del mineral o la roca, mientras que el punto inferior de intersección de las líneas, representa la edad del evento que obligó al mineral a perder Pb (**Wetherill, 1965**).

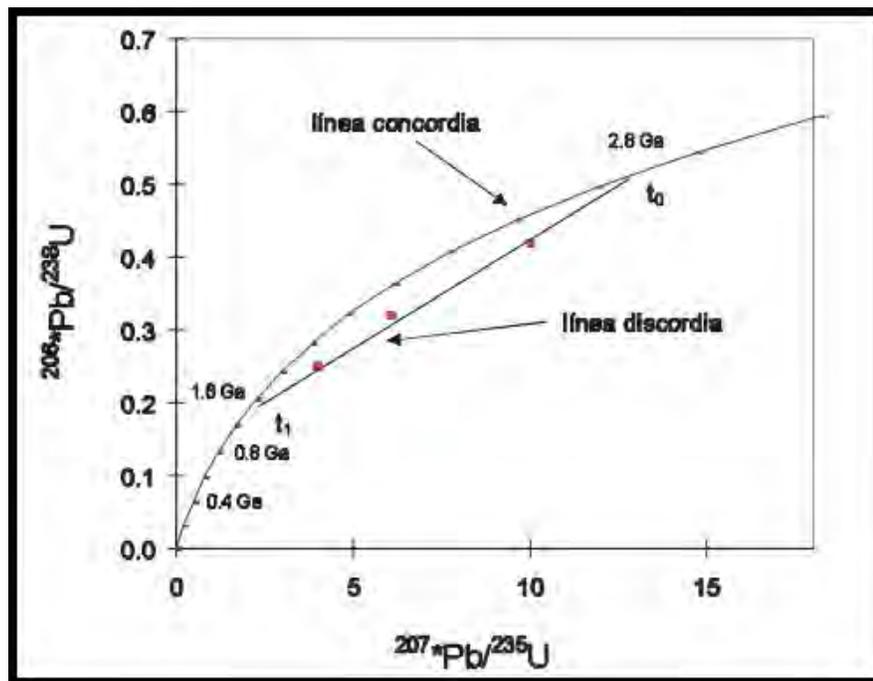


Figura 10. Ejemplo de un diagrama de concordia generada por los sistemas  $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$ . La línea de discordia interseca a la curva concordia en  $t_0$  que representa la edad de cristalización de la roca, y en  $t_1$  que indica la edad de algún evento de metamorfismo.

Tomada de <http://www.geofisica.unam.mx/laboratorios/universitarios/lugis/pdf/introduc-GI.pdf>

## Resultados

Se analizaron los zircones de un total de 8 muestras por el método de U/Pb con un sistema de ablación láser acoplado a un espectrómetro de masas con ionización por plasma (LA-ICP-MS, por sus siglas en inglés), en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias, Juriquilla UNAM. Siete de estas muestras son de origen ígneo, mientras que una de ellas corresponde a una arenisca (**Tabla 1**). Los resultados obtenidos fueron procesados por el software Isoplot (Ludwig, 2003) generando el gráfico de tipo Wetherill (concordia). En tres casos, donde la mayoría de los resultados eran moderadamente discordantes, se usó la edad que arroja la rutina TuffZirc (TuffZirc Age).

Muestra	Tipo de roca	Coordenadas de ubicación (UTM)	Edad obtenida (Ma)	Diagrama Utilizado
SPA-2	Ignimbrita	606400 m E 2340486 m N	22.89 ± 0.78	Wetherill
SPA-22	Intrusión silícica	606999 m E 2335318 m N	27.44 ± 0.40	Wetherill
SPA-28	Intrusión silícica	606713 m E 2332677 m N	26.27 ± 0.36 (Weth.) 26.77 ± 0.19 (Tuff.)	Wetherill TuffZirc
SPA-7	Ignimbrita	594563 m E 2348657 m N	25.55 ± 0.96	Wetherill
SPA-31	Intrusión silícica	606703 m E 2332341 m N	26.05 ± 0.29	Wetherill
SPA-5	Intrusión silícica	592843 m E 2345049 m N	27.54 ± 0.26 (Tuff.)	Wetherill TuffZirc
SPA-18C	Ignimbrita	606297 m E 2336133 m N	20.90 ± 8.7	Wetherill
SPA-33A	Arenisca	595598 m E 2338857 m N	23.5 (edad máxima)	TuffZirc

**Tabla 1.** Edades arrojadas por el fechamiento de zircones por U/Pb para las muestras obtenidas en campo. Se muestra también su tipo de roca, así como sus coordenadas de ubicación.

El diagrama de Wetherill, se interpreta verificando los puntos de intersección entre la curva de la concordia y la línea de la discordia. Sobre todo el punto inferior debido a que este marca el último evento de cristalización del mineral, y por ende, el momento de su formación. Algunos datos fueron eliminados durante el cálculo debido a que presentaron altos niveles de discordancia ocasionado por una mala señal analítica causada por fluctuaciones de la instrumentación o por haber realizado una mezcla de los dominios en los zircones durante el análisis. Los diagramas que se realizaron para este trabajo, se sitúan en el punto inferior de intersección de ambas líneas:

La muestra SPA-2 se localizó al NW del pueblo de San Pedro Analco y corresponde a una ignimbrita.

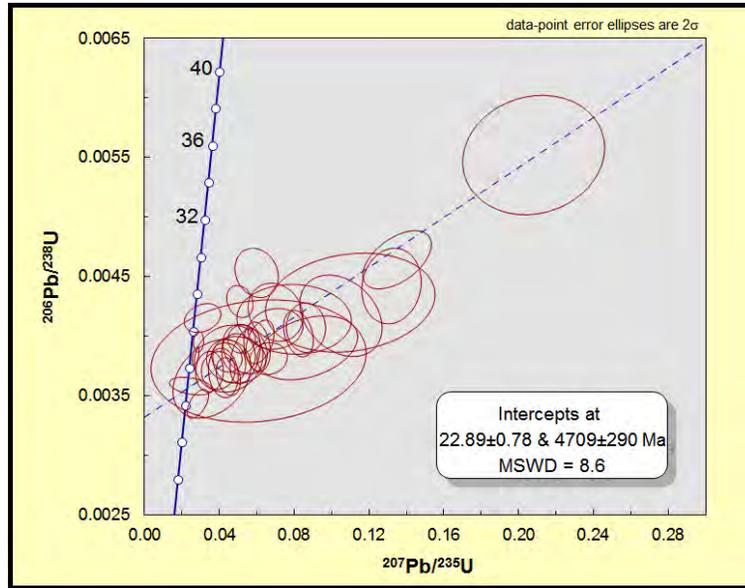


Figura 11. Gráfico de Wetherill con resultados para la muestra SPA-2. La mayoría de los datos presentan edades concordantes.

El diagrama de concordia de Wetherill de esta muestra presenta en su gran mayoría datos con edades ligeramente discordantes, y solo algunos se presentan alejados de la intersección de la recta, cuya intersección inferior es a los  $22.89 \pm 0.78$  Ma. (Fig. 11).

La muestra SPA-22, perteneciente a una roca silícica, fue colectada al SW del Cerro Las Ánimas, muy cercana al Río Grande de Santiago y del puente que lo atraviesa.

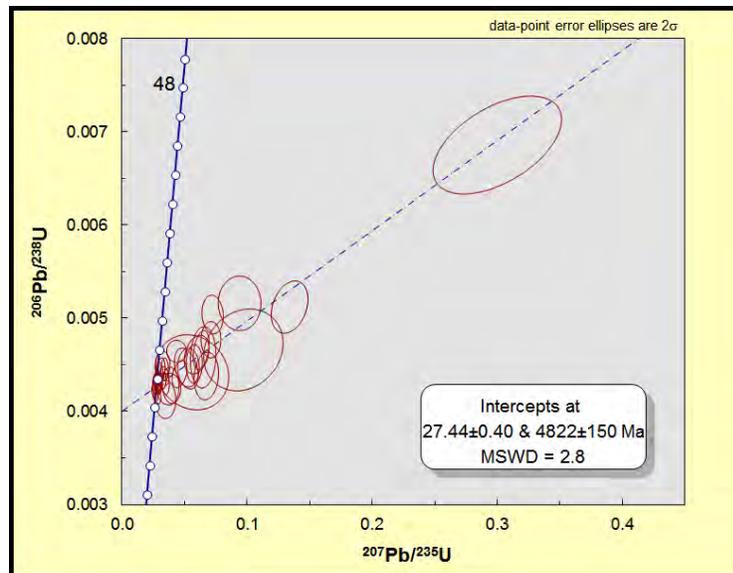
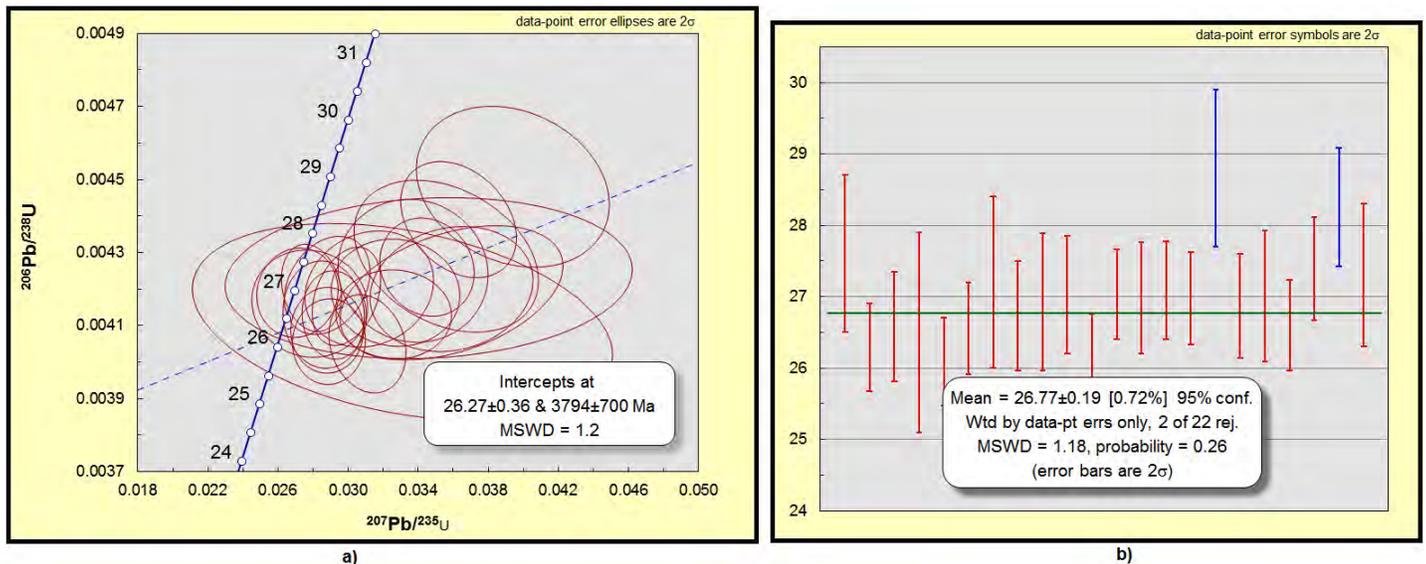


Figura 12. Gráfico de Wetherill con resultados para la muestra SPA-22. Presenta una alta concentración de datos concordantes en la intersección. Solo se observa un dato demasiado aislado.

En su diagrama de Wetherill, es notoria la concentración de datos en la intersección de la concordia. Se registran menos datos aislados a dicha concentración que la muestra anterior y la edad de intercepta es de  $27.44 \pm 0.40$  Ma (**Fig. 12**).

Las muestras SPA-28 y SPA-31, pertenecen a una misma unidad silícica ubicada al S del Cerro La Ánimas en el Distrito Minero Cinco Minas, que se muestreó en dos afloramientos donde presentaba diferencias litológicas.



**Figura 13 . a)** Gráfico de Wetherill con resultados para la muestra SPA-28. A pesar de no estar tan concentrados, los datos muestran una marcada tendencia a la intersección. **b)** Gráfico TuffZirc de la misma muestra que configura una edad media ponderada de 26.77 Ma.

Para la muestra SPA-28, se elaboraron los gráficos de Wetherill y TuffZirc. El primero de ellos presenta cierta dispersión de los datos que, sin embargo, se encuentran lo suficientemente agrupados como para determinar una edad de  $26.27 \pm 0.36$  Ma (**Fig 13a**). Se realizó también el gráfico TuffZirc para intentar tener un resultado más preciso, obteniéndose una edad media ponderada de  $26.77 \pm 0.19$  Ma. (**Fig. 13b**)

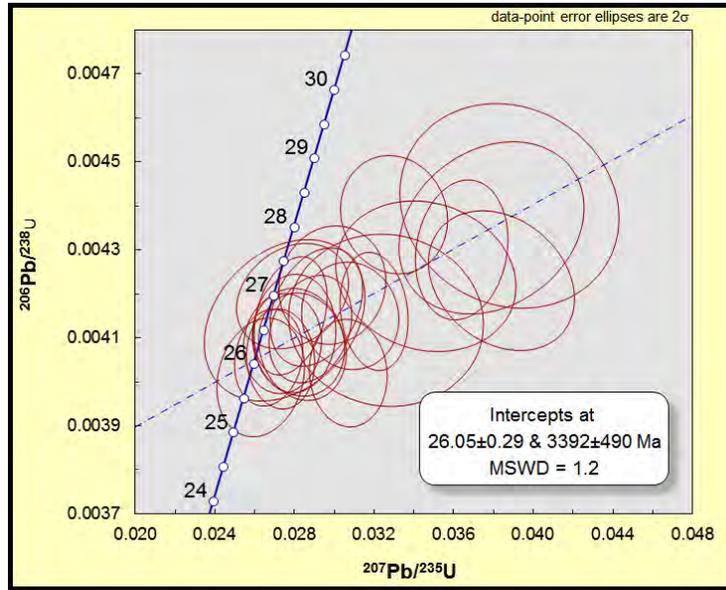


Figura 14. Gráfico de Wetherill con resultados para la muestra SPA-31. Tendencia de los datos a una intersección en  $26.05 \pm 0.29$  Ma.

La muestra SPA-31 arrojó resultados de intercepta de  $26.05 \pm 0.29$  Ma que, dentro del error, es comparable a la edad de intercepta de la SPA-28. (Fig. 14)

La muestra SPA-18C es una ignimbrita que fue colectada al Oeste del Cerro Las Ánimas, muy cerca de la ribera del Río Grande de Santiago.

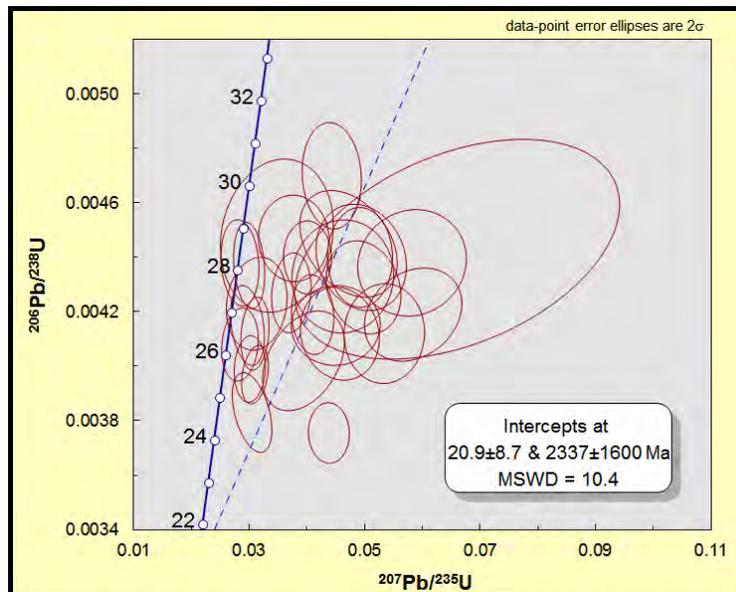


Figura 15. Gráfico de Wetherill con resultados para la muestra SPA-18C. Buena parte de los datos son discordantes y con una gran dispersión, por lo que la intersección de la concordia cae muy lejos de los datos.

En su gráfico, se puede observar que la gran mayoría de los datos de las edades de los zircones son moderadamente discordantes pero distribuidos en un rango relativamente amplio de entre 25.5 y 28.2 Ma. Esta situación puede ser debido a que la muestra contenía “antecristales” producto de eventos ígneos recientes que no alcanzaron a fundirse y recrystalizar. Por lo anterior, se considera que la edad de formación de esta ignimbrita debe acercarse a la de los zircones más jóvenes de entre 25.5 y 26 Ma. **(Fig. 15)**

La muestra SPA-7 es una ignimbrita que fue muestreada a 5.5 km al NW de la Presa de la Yesca.

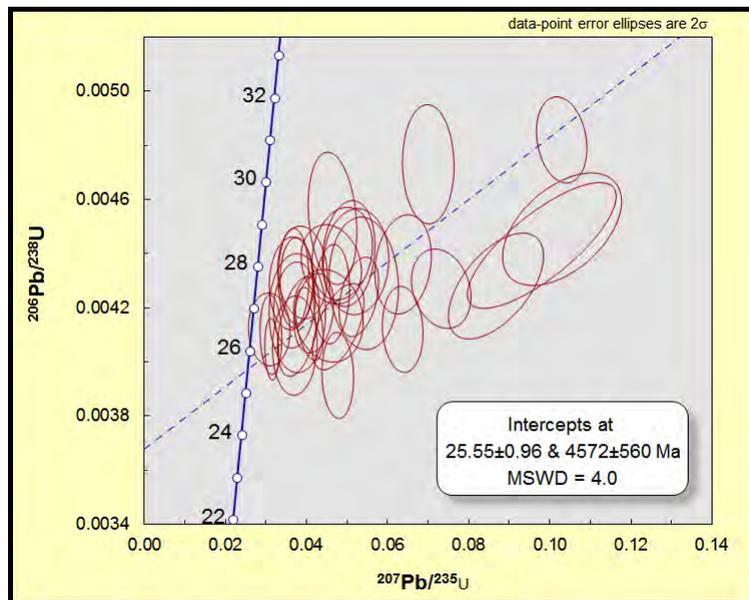


Figura 16. Gráfico de Wetherill con resultados para la muestra SPA-7.

En la gráfica de esta muestra, se observa la concentración de datos dentro de un rango de entre 26 y 30 Ma con una intercepta de la concordia a los  $25.55 \pm 0.96$  Ma. Esta edad es muy cercana a la obtenida para la ignimbrita SPA-18C; por lo que se considerará, dentro del registro estratigráfico, como una misma unidad. **(Fig. 16)**

La muestra SPA-5 se muestreó también a NW de la Presa de la Yesca pero en las partes más bajas del valle, a unos 4 km de distancia. Es parte de un cuerpo silíceo que aflora ampliamente en el cauce del Río Grande de Santiago.

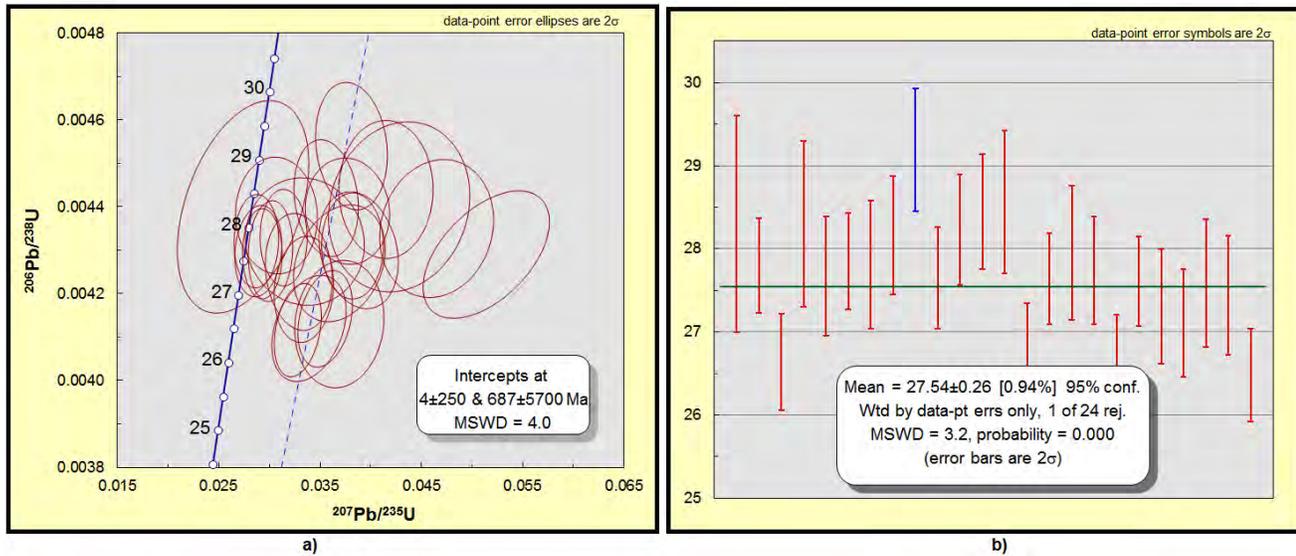
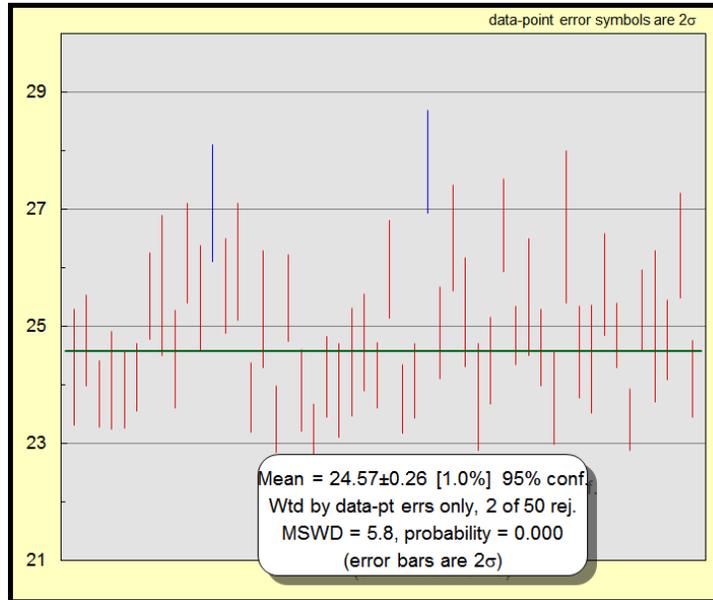


Figura 17. a) Gráfico de Wetherill con resultados discordantes para la muestra SPA-5. b) Gráfico TuffZirc de la misma muestra que configura una edad media ponderada de  $27.54 \pm 0.26$  Ma.

Esta muestra presenta una muy marcada dispersión de los datos que además son mayoritariamente discordantes, por lo que la intersección con la concordia no tiene significado geológico. Para esta muestra, las edades de los zircones sencillos se ubican en un rango de entre 26.5 y 29 Ma (**Fig.17a**). También en este caso se elaboró la gráfica TuffZirc para aumentar el grado de precisión, obteniéndose una edad media ponderada de  $27.54 \pm 0.26$  Ma (**Fig. 17b**).

Finalmente se realizó el fechamiento, por el mismo método de la muestra SPA-33A, procedente de una secuencia de areniscas rojas, localizadas aproximadamente a 5 km al S de la Presa de la Yesca. Esta es la única roca de origen sedimentario que se fechó.



**Figura 18.** Gráfico TuffZirc con resultados para la muestra SPA-33A con un intervalo de edades de entre 23 y 29 Ma.

Debido al carácter sedimentario de la muestra, los resultados en su conjunto no indican el momento de formación de la roca, si no la edad de los detritos que la componen (de diversos orígenes, ya sean ígneos, metamórficos o también sedimentarios). Sin embargo, todos los zircones cayeron dentro de un rango comprendido entre 23-29 Ma, lo que indica que estos se derivan de rocas cercanas, ya que corresponden a las edades obtenidas para las demás unidades. Además sugiere que fue depositada en una cuenca restringida. La gráfica de TuffZirc, arroja una edad media ponderada de  $24.57 \pm 0.26$  Ma. Sin embargo, consideramos que la edad máxima de depósito de esta arenisca corresponde a la de los zircones más jóvenes de la población fechada pero con baja discordancia, que tienen edades de 23.5 Ma (**Fig. 18**).

## Capítulo IV Estratigrafía y Petrografía

---

A continuación se describirán, en orden cronológico, cada una de las unidades litológicas encontradas en campo, las cuales se cartografiaron y se ordenaron en una columna geológica construida en base en las relaciones estratigráficas observadas y a las edades obtenidas. Tanto el mapa geológico y la columna, pueden observarse al final del presente capítulo (**Fig. 46 y 47**).

A cada una de estas unidades, se le asignó un nombre informal de acuerdo a los poblados más cercanos a ellos para su mejor identificación.

La mayoría de las unidades que se describen a continuación pertenecen a la SMO. En el mapa geológico se incluyen también unidades volcánicas más jóvenes pertenecientes a la FVTM, sin embargo no fueron descritas a gran detalle en este capítulo debido a que el objetivo de este trabajo es reconstruir la historia geológica únicamente de la parte sur de la SMO, así como su deformación.

### Sierra Madre Occidental

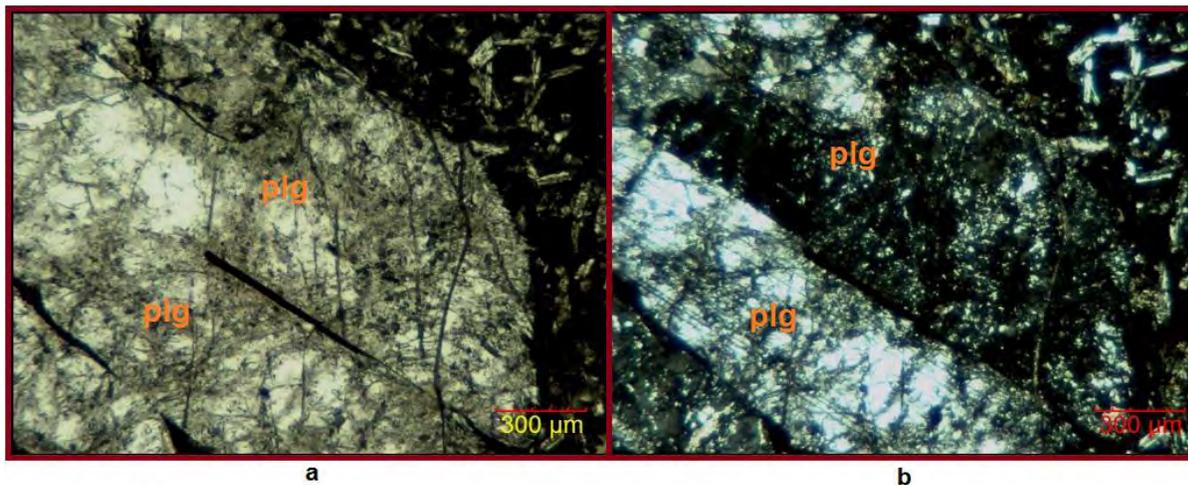
#### Andesita Cinco Minas

Se trata de la unidad geológica más antigua dentro del área estudiada. En sus afloramientos se observa con una coloración de verdosa a gris claro e incrementa su grado de fracturamiento y de alteración hidrotermal hacia las zonas más cercanas al Río Grande de Santiago, en donde su color comienza a tornarse más amarillento. Aflora al suroeste del poblado de San Pedro Analco hasta el Río Grande de Santiago. Presenta texturas de afanítica a porfídica, con alto contenido de plagioclasas sobre todo hacia la parte sur del mapa en la cercanía de un cuerpo silíceo que se describirá más adelante (**Fig. 22**). En las zonas de mayor alteración hidrotermal y donde se encuentra intrusionada por numerosos diques (**Fig. 19 a,b**), llega a presentar piritita, clorita y epidota como minerales de alteración.

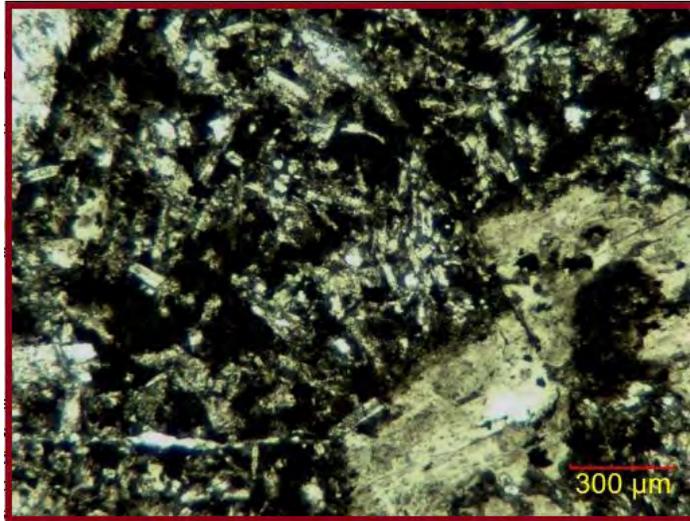


**Figura 19.** a) Imagen que muestra las tonalidades amarillentas que presenta la andesita producto de la alteración hidrotermal que forma pirita, clorita y epidota en la matriz de la roca. b) Dique máfico intrusionando a la andesita también con cambios de color por el mismo tipo de alteración.

En lámina delgada, la muestra SPA-32A de esta andesita, presenta una matriz de grano fino con numerosos microlitos de plagioclasa, así como pequeños cristales de cuarzo y opacos en menor número, todos ellos generando una matriz de textura traquítica (Fig. 21). Como fenocristales, se pudieron identificar también plagioclasas con maclado polisintético poco claro, extinción oblicua y colores de birrefringencia entre grises y azul claro (Fig. 20). Dentro de la matriz también fue posible observar algunos minerales secundarios de clorita sin hábito ni cruceo determinado de coloración verdosa clara sin pleocroísmo, y otros de aspecto fibroso y con colores de birrefringencia entre amarillos, naranja, y verdes oscuros.



**Figura 20.** a) Vista al microscopio de la andesita SPA-32A, en donde se observa en detalle uno de los abundantes cristales de plagioclasa. b) Misma vista de la plagioclasa con nicols cruzados



**Figura 21.** Detalle de la matriz traquítica de la andesita por la presencia de numerosos microlitos de plagioclasa.

Hacia el oeste, este paquete de andesitas se encuentra cubierto por una unidad de ignimbritas, mientras que más al sur, casi en contacto con el río, se ve intrusionado por una serie de diques de composición dacítica a granítica que son más frecuentes mientras más cercano se encuentra el contacto con el Intrusivo Río Santiago descrito más adelante.



**Figura 22.** Fenocristales de plagioclasa de grano grueso de entre 1 y 2 cm visibles en la Andesita Cinco Minas

Esta unidad aún no ha sido fechada, sin embargo se trata de la secuencia litológica de mayor edad de las que se estudiaron debido a su posición estratigráfica, ya que en todo contacto con otra unidad siempre se observó a la andesita por debajo de las demás. **(Fig. 23)**

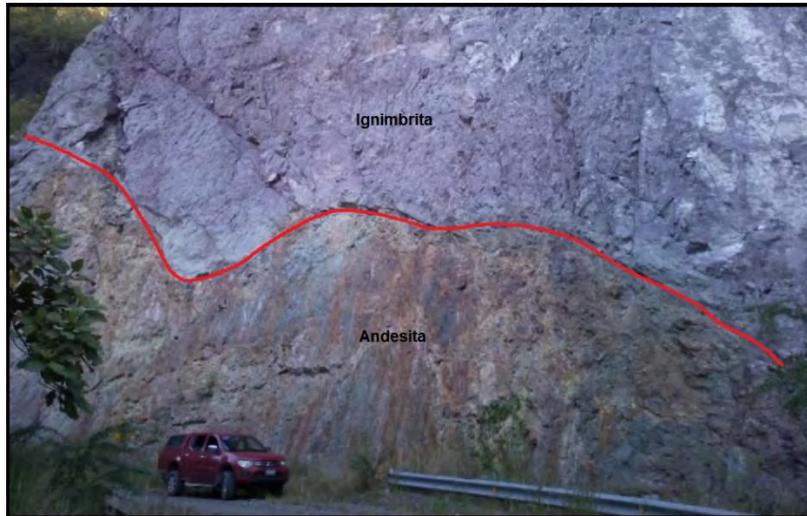


Figura 23. Imagen que muestra la posición estratigráfica de la andesita con respecto a otras unidades. (en este caso, respecto a una ignimbrita) La andesita es la roca más antigua.

### Intrusivo Presa de la Yesca

Se trata de un cuerpo subvolcánico de composición silícica que abarca una extensa área de la parte NW de la zona estudiada, y que se observa de manera amplia a lo largo del Río Grande de Santiago. Aflora más extensamente en la ladera norte de la Presa de la Yesca, y se encuentra cubierto por una unidad ignimbrítica (**Fig. 24**). En muestra de mano, se observa que se trata de una roca leucocrática que presenta una textura porfídica, con abundante contenido de cuarzo y feldespatos.

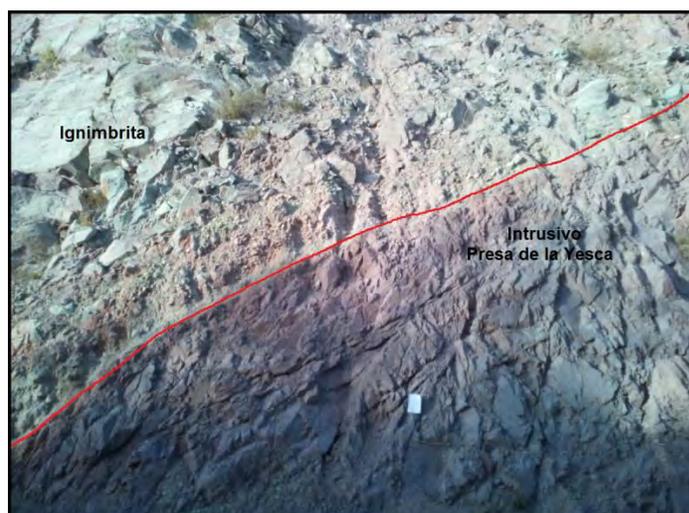
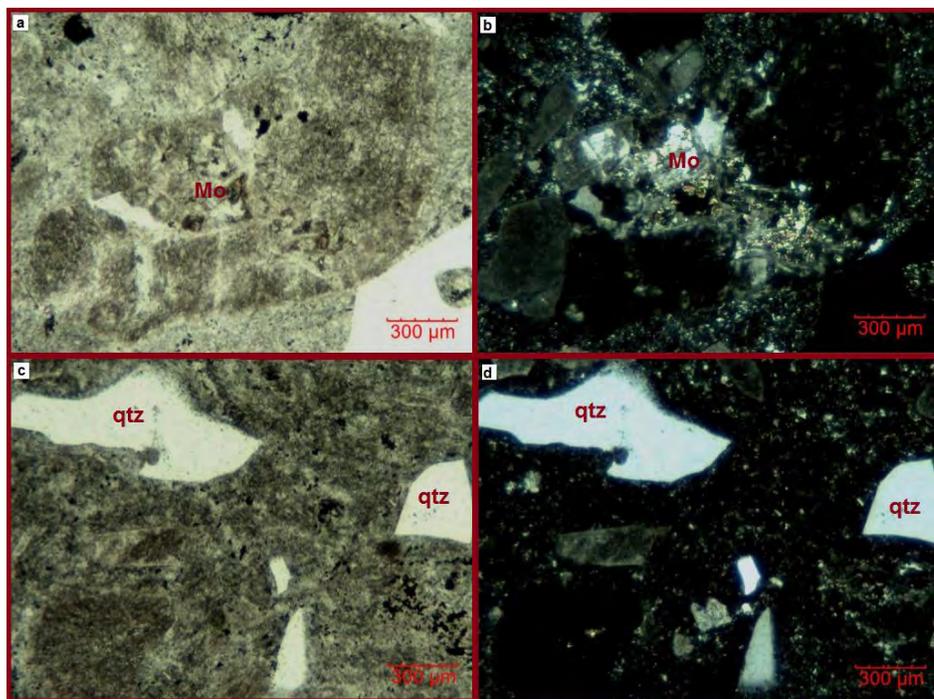


Figura 24. Contacto por plano de falla entre el Intrusivo Presa de la Yesca y una ignimbrita en color verde más reciente.

En el análisis de lámina delgada de la muestra **SPA-5** se observaron abundantes y gruesos fenocristales de cuarzo con formas subhedrales (**Fig. 25 c,d**), así como plagioclasas con maclado polisintético de tamaños variados y hábitos prismáticos. Se observaron también cristales de feldespato potásico con maclado de tipo Carlsbad. Todos estos cristales se encuentran inmersos en una matriz microcristalina también de cuarzo y feldespato. Se llegó a observar la presencia de pequeños cristales totalmente anhedrales, de alto relieve y altamente birrefringentes con colores de segundo orden entre amarillos, rosas y naranjas que se infiere como muscovita (**Fig. 25 a,b**). Estos cristales se encuentran dispersos en la matriz.

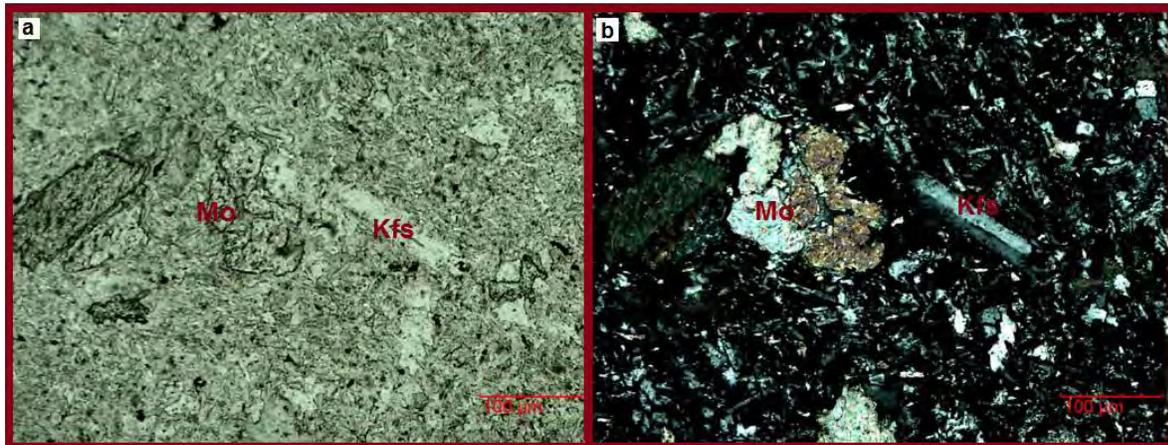
Se analizó también la lámina de la muestra **SPA-22** de esta misma unidad que posee una matriz de grano fino con abundantes minerales de muscovita y en menor proporción de biotita. La muscovita fue identificada, también en esta lámina, debido a sus colores de interferencia entre amarillos y azules de alta birrefringencia, así como por su alto relieve. De forma aislada se encuentran inmersos en la matriz algunos pequeños cristales de feldespato con maclado de Carlsbad (**Fig. 26 a,b**).

Las características texturales y petrográficas de este cuerpo sugieren que se trata de una intrusión somera.



**Figura 25.** Vista al microscopio de la muestra SPA-5. a) Detalle de un cristal de muscovita de alto relieve, b) con colores de interferencia azulados propios de una alta birrefringencia en nícoles cruzados. c) Cristales subhedrales de cuarzo, d) con nícoles cruzados.

Esta unidad presenta mayor cantidad de fracturas y fallas en proximidad del Río Grande de Santiago, mismo del que se infiere pudo haber labrado su lecho en correspondencia de una zona de falla. Aflora a una altura mucho mayor en la ladera norte que en la ladera sur, lo que apoya la hipótesis de que una zona de falla normal en correspondencia con el río provoque el hundimiento de la zona al sur del mismo



**Figura 26.** Muestra al microscopio de SPA-5. a) Imagen con nicos alineados de un cristal de muscovita de alto relieve y uno de feldespato. b) Misma vista pero con nicos cruzados donde se aprecia el maclado de Carlsbad del feldespato y los altos colores de interferencia de la muscovita

De la misma muestra **SPA-5** se separaron zircones que fueron fechados mediante el método U-Pb, arrojando una edad aproximada de  $27.54 \pm 0.26$  Ma

### Ignimbrita San Pedro Analco

Esta unidad se encuentra cubriendo a la Andesita Cinco Minas. En el transecto 1 entre el poblado de San Pedro Analco y el Río Grande de Santiago, se puede observar el contacto entre ambas unidades en diferentes sitios (**Fig. 27**).

Esta roca se caracteriza por presentar colores más claros que la secuencia de andesitas; varía entre tonalidades de grisáceos a verdes tornándose a coloraciones más rosáceas hacia el sur. Se trata de un depósito de flujo piroclástico pobre en cristales con abundantes cantidades de vidrio y ceniza pumicítica.

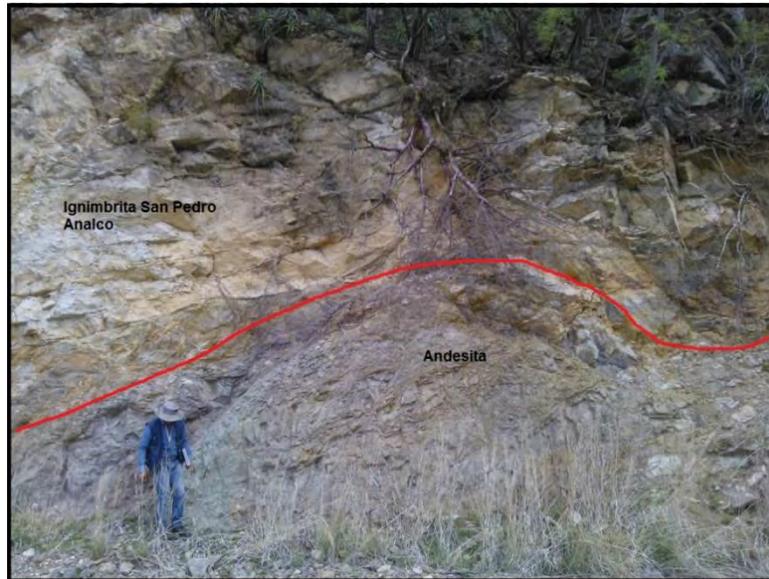


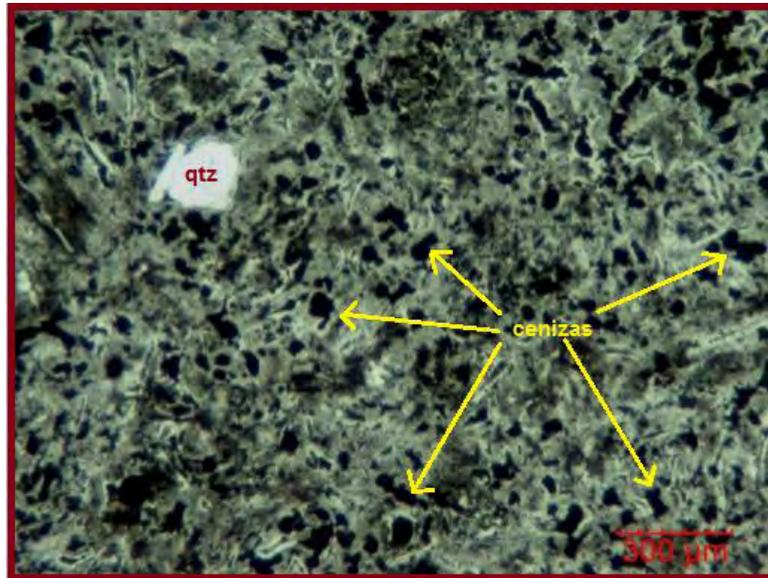
Figura 27. Afloramiento donde la ignimbrita San Pedro Analco cubre a la Andesita Cinco Minas.

También presenta *fiammes* producto de la compactación por gravedad de la pómez, que definen una textura eutaxítica. Contiene, además, escasos cristales de cuarzo y abundantes fragmentos líticos de lavas andesítica y dacítica. Por otro lado, al sur del Río Grande de Santiago, esta secuencia se encuentra a mayores elevaciones que en el lado norte, lo que sugiere también la presencia de alguna falla a nivel del río.



Figura 28. La alteración hidrotermal ligada al fracturamiento también afecta a la Ignimbrita San Pedro Analco

En microscopio, la muestra **SPA-14** de esta unidad, presenta abundante material piroclástico como vidrio y ceniza pumicítica, que pueden identificarse debido a su nula reacción óptica al cruzar nicoles y al girar la platina (**Fig. 29**). Además de presentar formas totalmente amorfas, tamaños homogéneos, coloraciones oscuras entre grises y negras, y sin ninguna estructura en particular. En esta matriz pumicítica se encontraron pequeños cristales de cuarzo en cantidades menores al 5% de abundancia total.



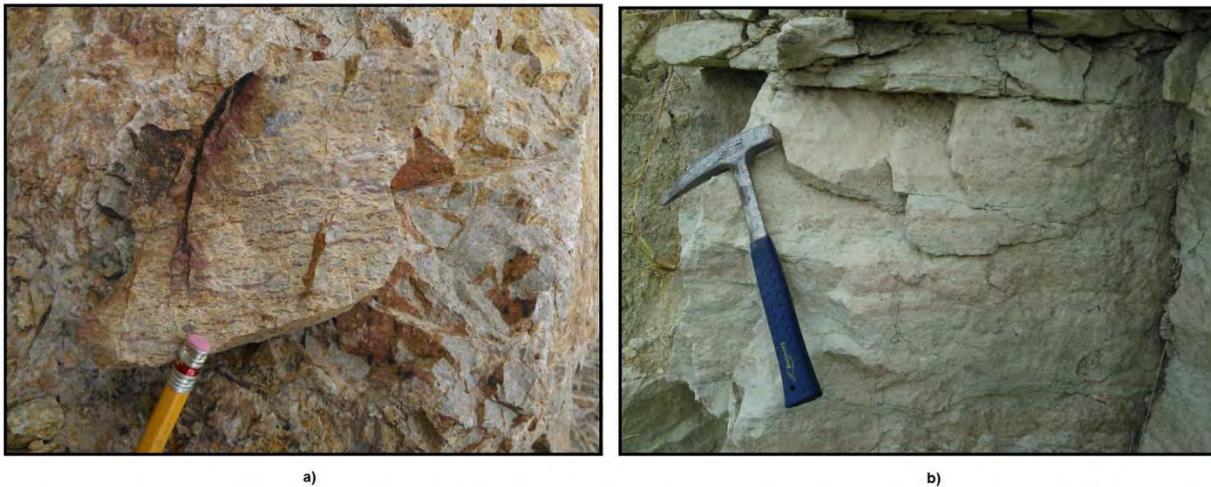
**Figura 29.** Imagen vista con al microscopio de la muestra SPA-14. Se observa un elevado número de vidrios de ceniza con formas totalmente amorfas. En la parte izquierda se puede apreciar un cristal de cuarzo.

También se llegan a apreciar escasos fragmentos de pómez más gruesos que presentan coloraciones pardas generando texturas eutaxíticas.

Para determinar su edad se realizó un fechamiento por U-Pb a zircones separados de la muestra **SPA-18C**. Las edades de estos zircones tienen un rango entre 25.5 y 28.2 Ma, siendo en su mayoría discordantes. En las ignimbritas de la parte sur de la SMO es común la presencia de zircones heredados de los eventos ígneos inmediatamente anteriores (antecristales) (**Bryan et al., 2008**), por ello consideramos que la edad de erupción de esta ignimbrita se acerca más a la edad de los zircones más jóvenes de 25.5 a 26 Ma.

### Ignimbrita Juana Castilla

Esta ignimbrita se encuentra bordeando al Intrusivo Presa de la Yesca tanto por su parte norte como por la parte sur. Posee en general una coloración verde claro (**Fig. 30b**) conformada por una matriz de grano fino y muy mala consolidación. Presenta alto contenido de fenocristales de cuarzo y fragmentos de pómez en forma de *fiamme* (>20%) generando una textura eutaxítica (**Fig. 30a**), también se pudieron observar algunos fenocristales de feldespato, abundantes vesículas y líticos de otras ignimbritas y andesitas sobre todo hacia la parte sur de la unidad. Se encuentra por lo general estratificada en ciertas partes muy específicas cercanas al río y con un particular tono amarillento.



**Figura 30.** a) Muestra de mano de la Ignimbrita Juana Castilla con *fiammes* de pómez y coloración amarillenta. b) Estratificación de la ignimbrita donde se puede apreciar sus típicos colores verdes

Se analizaron al microscopio las muestras **SPA-7** y **SPA-34** de esta ignimbrita, en donde se verificó también a estas escalas, una gran cantidad de pómez en forma de *fiamme* (**Fig. 31**), y fenocristales de plagioclasas (identificadas por su maclado polisintético) y de cuarzo. Se reconocieron algunas zonas dentro de la lámina con texturas traquíticas con microlitos de plagioclasas y cristales de cuarzo, lo que puede suponer la presencia de líticos de tipo andesítico. Ambas muestras presentan también vidrios y algunos cristales de mica blanca de grano fino cercanos a las plagioclasas (**Fig. 32 a,b**).

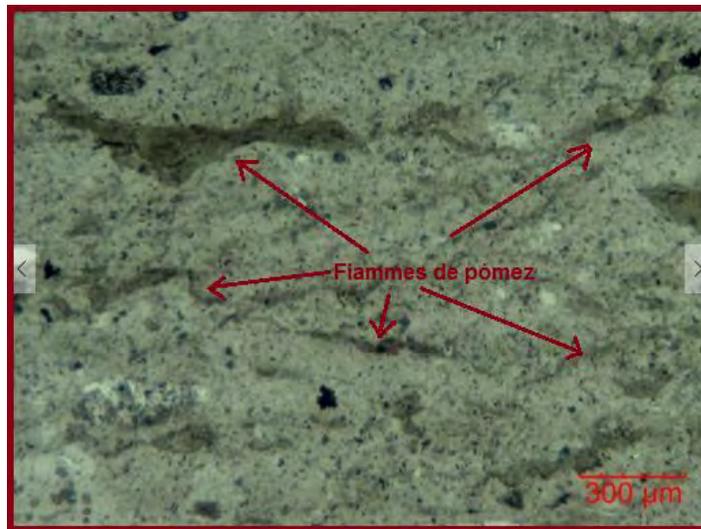


Figura 31. Detalle de las pómez aplastadas en forma de *fiamme* a nivel microscópico de la muestra SPA-7

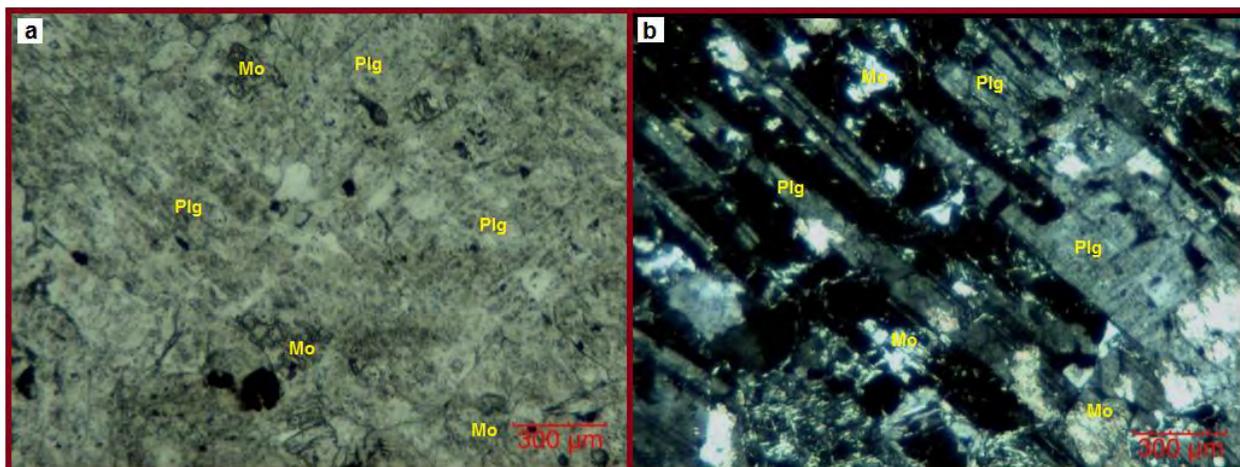


Figura 32. a) Pequeños cristales de mica blanca de grano fino que alteran a un fenocristal de plagioclasa de la lámina SPA-34. b) Misma lámina con nícoles cruzados donde se aprecia el maclado polisintético de las plagioclasas

De la muestra SPA-7 de esta ignimbrita se separaron zircones que se fecharon por el método U-Pb, dando como resultado un rango de edades de entre 26 y 28 Ma. Al igual que en el caso de la Ignimbrita San Pedro Analco, se considera que la edad de erupción se acerca a las edades más jóvenes. Esto se debe a que este tipo de ignimbritas voluminosas tan comunes en la SMO, están asociadas a cámaras ricas en cristales y de gran tamaño, que en muchas ocasiones logran cristalizar zircones (antecristales) antes de la erupción que las libera, evacuando así un volumen considerable de la cámara pero sin llegar al 50% para posteriormente dar lugar a la formación de un plutón o batolito. Dicha erupción posee una edad

igual o menor a la del zircón más joven, de ahí el rango de edad obtenido por el fechamiento por U-Pb.

Por su posición estratigráfica, litología y edad, esta ignimbrita se considera equivalente a la Ignimbrita San Pedro Analco.

### Intrusivo Río Santiago

Este cuerpo intrusiona a la Andesita Cinco Minas (**Fig. 33**), y aflora principalmente en la ladera sur del Río Grande de Santiago en la parte SE de la zona de estudio. Presenta variaciones en cuanto al contenido y tipo de minerales siendo el cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa los más abundantes. Sin embargo, las diferencias más significativas que se registraron fueron en el contenido de mica oscura (biotita), anfíboles y mica blanca, siendo esta última más abundante en la parte norte del área de afloramiento, mientras que más al sur aumenta la cantidad de biotita y anfíbol, y disminuye la plagioclasa.



**Figura 33.** Imagen que corrobora la idea de que el Intrusivo Río Santiago intrusiona a la Andesita Cinco Minas, pues se encontraron enclaves de andesita dentro del intrusivo. Los enclaves son fragmentos de la roca encajonante que se originan al momento de la intrusión del plutón y que son asimilados por el mismo.

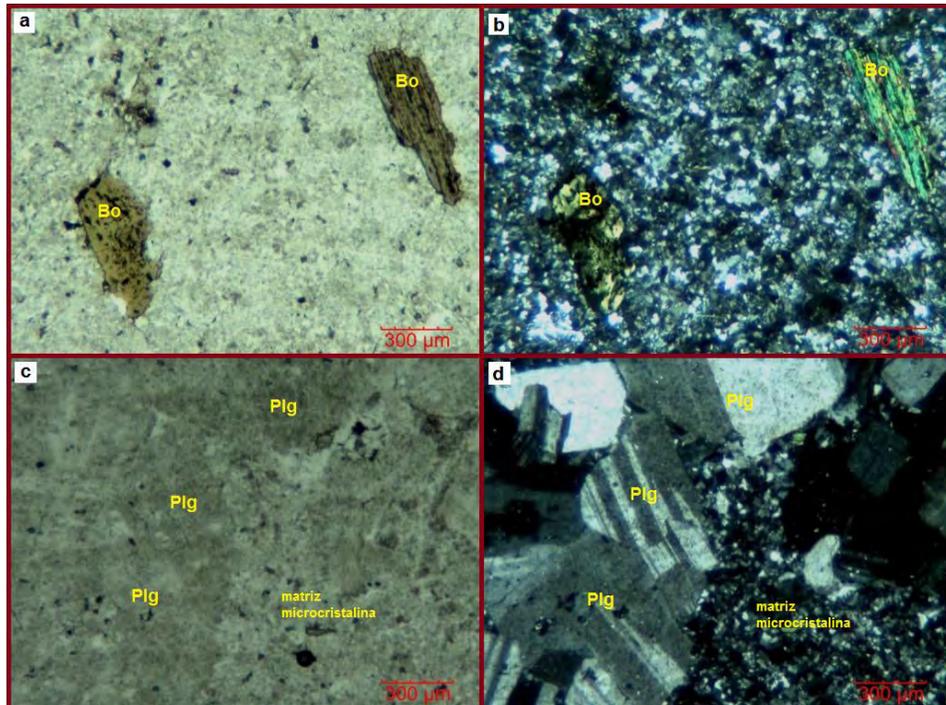
A lo largo de todo el transecto, el Intrusivo Río Santiago presenta fracturas y fallas en diversas direcciones, así como múltiples diques de composición máfica (**Fig. 34**). Se aprecia una coloración amarillenta impartida por la alteración de tipo hidrotermal que también se observó en la Andesita Cinco Minas y que se asocia a procesos de enfriamiento del intrusivo

Debido a las variaciones mineralógicas, se estudiaron en lámina delgada, dos muestras de esta misma unidad tomadas a 400 m de distancia entre sí. La primera de ellas (**SPA-31**), se caracteriza por presentar fenocristales de cuarzo y plagioclasas intercrecidos entre sí, inmersos en una matriz microcristalina compuesta en su mayoría por los mismos minerales (**Fig. 35 c,d**).

Se distinguen también cristales de biotita de menor tamaño con coloraciones pardas (5% en abundancia) (**Fig. 35 a,b**), así como pequeños cristales de muscovita con colores de interferencia entre rosa y verde, y de alto relieve. En general, la textura de la muestra es porfídica, lo que indica un emplazamiento somero y enfriamiento rápido.

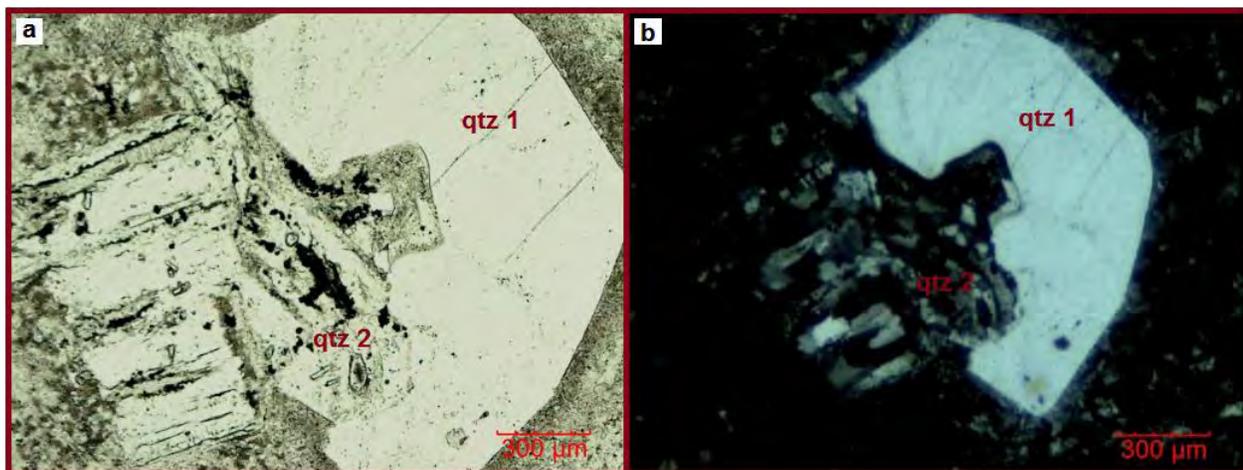


**Figura 34.** El Intrusivo Río Santiago está intrusionado por diques máficos de distinto espesor y dirección variable.



**Figura 35.** Lámina delgada de SPA-31. a) Se observan dos cristales de biotita de color pardo. b) Misma biotita con nicoles cruzados donde se aprecian colores de interferencia entre verdes y amarillos. c) Plagioclasas inmersas en una matriz microcristalina. d) Las mismas plagioclasas vistas con nicoles cruzados con maclado polisintético.

La segunda muestra, la **SPA-28**, presenta una matriz de tipo criptocristalino. Su contenido de plagioclasas y mica oscura es menor en comparación al de la muestra anterior. Se observan fenocristales de cuarzo con formas de euhedrales a subhedrales con extinción recta, así como algunos otros con extinción ondulante, lo cual pudiera indicar algún evento de deformación, como por ejemplo, un incipiente inicio de metamorfismo (**Fig. 36 a,b**).



**Figura 36.** Cristales de cuarzo de la lámina SPA-28; qtz 1: cuarzo con extinción recta, qtz 2: cuarzo con extinción ondulante. a) Nicoles paralelos. b) Nicoles cruzados

Es importante destacar, que en ciertas zonas, este intrusivo presenta fracturamiento en columnas tabulares horizontales, que indicarían un enfriamiento en sentido vertical (**Fig. 37**).



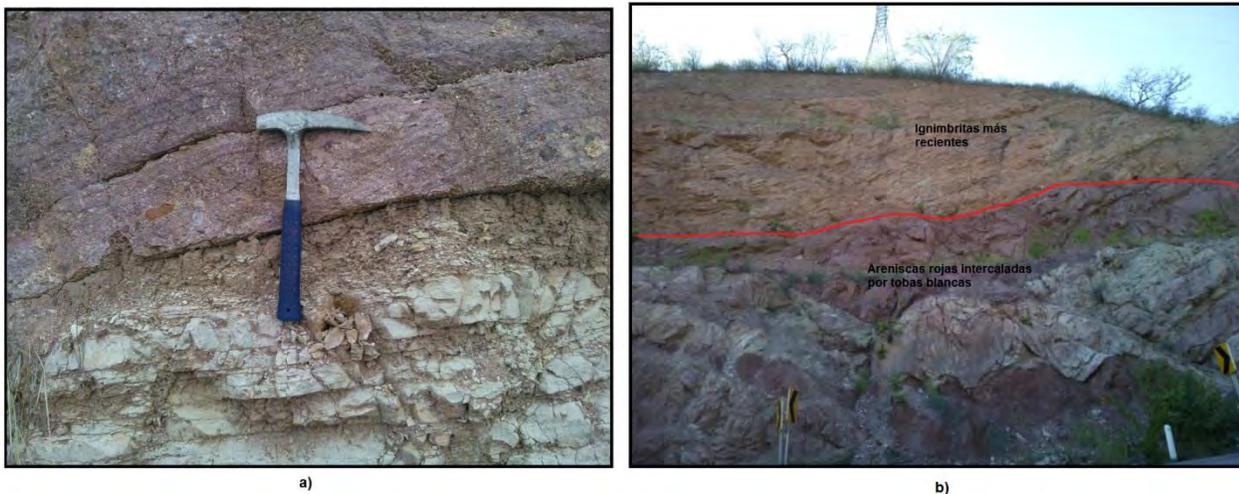
**Figura 37.** Columnas tabulares del intrusivo dispuestas en la actualidad en posición casi horizontal

Las dos muestras estudiadas en microscopio petrográfico, fueron posteriormente procesadas para su fechamiento por el método U-Pb. La muestra **SPA-28** arrojó una edad de intercepta de  $26.27 \pm 0.36$  Ma, mientras que para la muestra **SPA-31** se obtuvo una edad de intercepta de  $26.05 \pm 0.29$  Ma. Tomando en cuenta el error, estas edades son indistinguibles y también compatibles con una edad de  $26.6 \pm 0.6$  Ma obtenida por el método K-Ar en cristales de hornblenda para una muestra recolectada 2.5 km más al este dentro del mismo cuerpo silíceo. (**Nieto et al., 1985**).

### **Areniscas Las Juntas**

Este paquete representa la única unidad geológica de origen sedimentario del área estudiada. Está conformada por areniscas continentales rojas que se encuentran aflorando en un área limitada. Se localizan hacia la parte este del área de estudio y aflora sobre la carretera que une

a Hostotipaquillo con la Presa de la Yesca. Esta secuencia está sobreyacida por un paquete de ignimbritas distintas a las descritas previamente (**Fig. 38b**), y tiene intercalada una secuencia de tobas blancas de grano muy fino con un espesor promedio de 50 cm (**Fig. 38a**).



**Figura 38.** a) Detalle de la intercalación de las tobas blancas en la Arenisca Las Juntas. b) Contacto entre las areniscas y las ignimbritas más recientes que las sobreyacen.

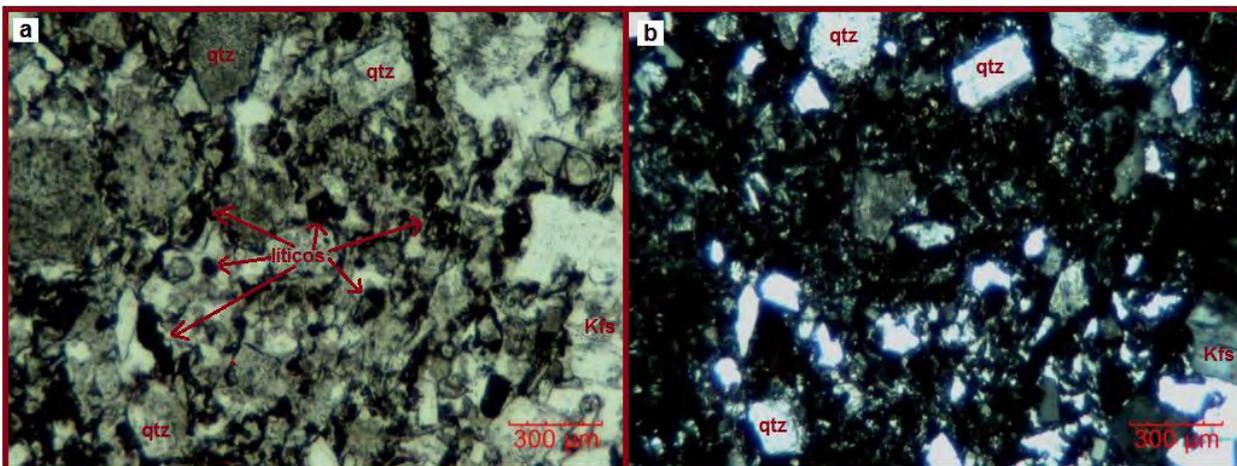
La presencia de estas areniscas rojas marca un *hiatus* del volcanismo local durante el cual, hubo erosión y redeposición de rocas preexistentes. Las tobas blancas intercaladas son muy finas, por lo que se infiere que su fuente estuvo alejada del área de estudio.

En general, esta unidad presenta una intensa coloración rojiza debido a la presencia de minerales ferromagnesianos que con el paso del tiempo se han oxidado a magnetita y otros óxidos de hierro. Posee clastos de ignimbritas y andesitas de tamaños muy variados desde 1 mm hasta casi 1 cm, es decir, se encuentra muy mal clasificada. Las areniscas están bien estratificadas (**Fig. 39b**) y están afectadas por pliegues suaves con ejes casi en dirección N-S (185° aprox.) (**Fig. 39a**).



**Figura 39.** a) Se observa un pliegue de las areniscas siendo cortado por una falla de tipo normal. b) Estratificación de las areniscas con una actitud promedio de  $160^\circ / 50^\circ$  al W

En lámina delgada vista al microscopio, la muestra **SPA-33A** de esta unidad, se encuentra moderadamente clasificada; y posee una matriz de clastos subangulares de coloraciones rojizas de fragmentos líticos oxidados y de minerales opacos granosoportados. Presenta, además, alto contenido de cristales de cuarzo en un 20% de abundancia. En menor cantidad se observan cristales de feldespato y muscovita pero con una abundancia menor al 1% (**Fig. 40 a,b**).



**Figura 40.** a) Líticos oxidados, cuarzos y feldespato potásico en nícoles paralelos de la muestra SPA-33A. b) Nícoles cruzados de SPA-33A.

De esta unidad se separaron zircones detríticos de la misma muestra **SPA-33A** para fechamiento. Las edades obtenidas se agrupan en un intervalo muy restringido entre 23 y 29 Ma con un solo grano de edad Jurásica Temprana. El rango de edades abarca la actividad ígnea de la SMO en los alrededores indicando un transporte limitado. La edad máxima de deposición de esta secuencia corresponde a la edad más joven de ca. 23.5 Ma.

### **Ignimbrita Santo Domingo**

Se trata de un depósito masivo de flujo de ceniza pobre en fenocristales de color gris claro, localizado justo al norte de la Andesita Cinco Minas y de la Ignimbrita San Pedro Analco. Presenta escasa pómez no colapsada, se encuentra poco soldado y medianamente endurecido. Pertenece a la parte superior de la secuencia ignimbrítica, muy probablemente del Mioceno temprano. De la muestra **SPA-2** de esta unidad, se separaron zircones que fueron fechados mediante el método U-Pb, arrojando una edad aproximada de  $22.89 \pm 0.78$  Ma

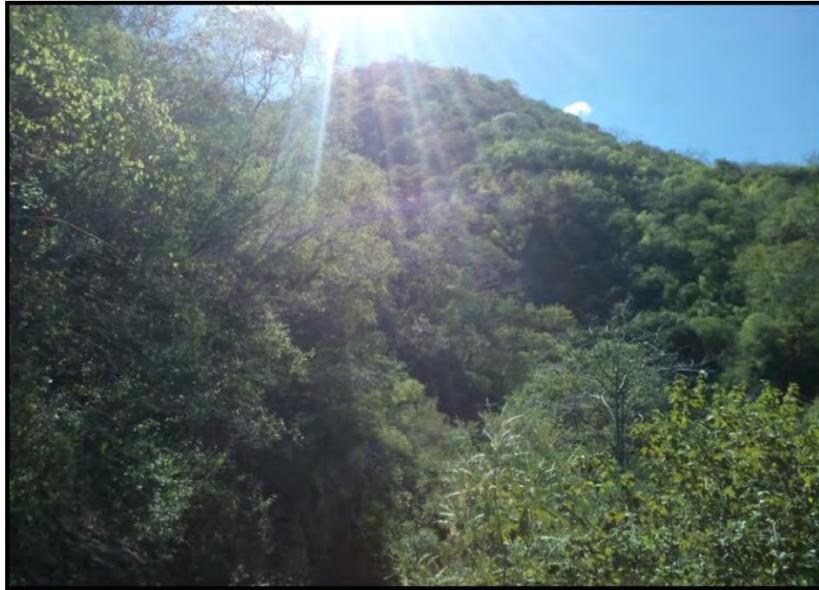
### **Dacita Las Ánimas**

Esta unidad corresponde a un domo de lava dacítica que conforma al Cerro Las Ánimas que cubre a la Andesita Cinco Minas y a la Ignimbrita San Pedro Analco. Se ubica exactamente al sur del poblado de San Pedro Analco y posee una extensión aproximada de  $6.3 \text{ km}^2$ .

Se interpreta como domo volcánico debido a la morfología abombada que presenta, producto del emplazamiento de una lava viscosa (**Fig. 41**).

En muestra de mano la roca exhibe una importante cantidad de feldespato, biotita, y en menor proporción cuarzo y anfíboles de tipo hornblenda.

En lámina delgada la muestra **SPA-3** de esta unidad presenta abundantes fenocristales de plagioclasa y feldespatos alcalinos (sanidino) con caras muy bien definidas, algunos aislados en la matriz y bastantes juntos entre ellos o intercrecidos. También en importante cantidad se identificaron pequeños fragmentos de biotita con algunos cristales ya muy alterados, dispersos en una matriz microlítica. La biotita también se encontró dentro de las fracturas de las plagioclasas y los feldespatos. Se observaron también algunos cristales de hornblenda completamente sustituidos por óxidos.



**Figura 41.** Morfología “abombada” típica de un domo de la Dacita Las Ánimas

Esta muestra no contiene zircones por lo que fue imposible fecharla por el método U-Pb, sin embargo fue fechada por **Nieto et al., (1985)** quienes reportan una edad de  $22.54 \pm 0.47$  Ma por el método K-Ar en separados de plagioclasa.

### **Ignimbrita Juanepantla**

Se trata de un paquete de rocas piroclásticas que se encuentra descansando sobre las Areniscas Las Juntas y sobreyacida por basaltos del Plioceno temprano y depósitos de arrastre recientes. Una característica importante de ella es que posee ciertas variaciones mineralógicas, las cuales llevaron a **Paez (2010)** a dividirla en diferentes tipos de ignimbritas.

En general presenta muy buena consolidación con coloraciones entre rojizas y púrpuras con abundantes líticos de tamaños no mayores a 10 cm (**Fig. 42**), así como pómez redondeadas y en forma de *fiamme* muy alargadas. Hacia su parte más septentrional se puede apreciar abundante bandeamiento de vidrio en color blanco, de entre 0.5 a 10 cm de espesor.

Esta unidad se puede considerar como un depósito de tipo ignimbrítico de alta temperatura y con alto grado de deformación; que da origen a estructuras *boudinadas* dentro del bandeamiento blanco y *fiammes* de gran longitud replegadas (**Fig. 42 y 43**), las cuales, fueron generadas en respuesta a un flujo laminar que se desarrolla después de la deposición a la alta

temperatura del depósito. Estas características la identifican como una reoignimbrita o una ignimbrita reomórfica (Litvak et al., 2005).



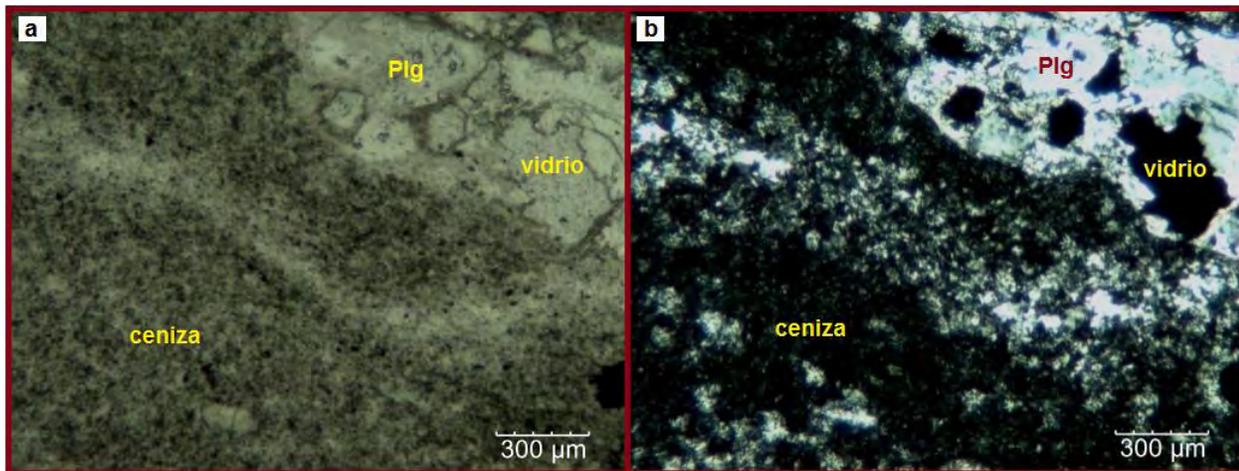
Figura 42. Coloraciones rojizas-púrpuras y bandeamiento blanco de las ignimbritas reomórficas

Un poco más hacia el sur, cerca del contacto con las Areniscas Las Juntas, esta ignimbrita muestra una gran cantidad de finos cristales de feldespatos, líticos, algunas pómez y cristales secundarios de calcita bien definidos. Además es notoria la presencia de horizontes de pómez verde que se intercala en ocasiones entre la misma ignimbrita, las areniscas rojas y las tobas blancas.



Figura 43. Estructuras *boudinadas* del vidrio de la Ignimbrita Juanepantla producto del flujo de material a alta temperatura.

La lámina delgada de la muestra **SPA-36** de esta unidad, muestra un muy alto contenido de ceniza y vidrio (80%) de tamaños entre (300 y 400  $\mu\text{m}$ ), y algunos cristales de plagiocalsas. No se observan estructuras bien definidas (**Fig. 44a,b**).



**Figura 44.** Lámina delgada de la muestra SPA-36 **a)** Se observa abundante ceniza como matriz y un cristal de plagioclasa **b)** Nícoles cruzados de SPA-36.

**Bryan et al., (2008)** reportan una edad de  $17.7 \pm 0.5$  Ma por el método K/Ar en separados de biotita para una muestra de esta ignimbrita

## Faja Volcánica Trans-Mexicana

### Domo e Ignimbrita Hostotipaquillo

En el camino que sale del poblado de Hostotipaquillo hacia el norte, se observa por unos 7 km un depósito de flujo de ceniza con pómez claras y oscuras parcialmente aplastadas producto de la mezcla entre un magma silíceo y uno máfico. El depósito tiene una forma alargada con una ligera pendiente hacia el Río Grande de Santiago. Su fuente es un domo exógeno de composición riolítica ubicado en las inmediaciones de Hostotipaquillo. Se infiere que el flujo piroclástico surgió en principio de la actividad volcánica efusiva que posteriormente dio origen al

domo, pero la mezcla de magmas de diferente composición indica que el arribo de basalto pudo haber disparado la erupción. El domo no está fechado pero se encuentra encima de coladas de basalto fechadas al Plioceno temprano (**Nieto et al., 1985; Moore et al., 1994**).

### **Depósitos aluviales retrabajados**

Se infiere que estos depósitos sedimentarios datan de la época Pliocénica debido a la posición estratigráfica en la que fueron observados subyaciendo a basaltos de 1 Ma (que a continuación se describirán) (**Fig. 45**). Fueron generados por el retrabajo sedimentario de antiguos aluviones existentes. Se componen principalmente por rocas retrabajadas de las litologías circunvecinas de mayor edad, tales como ignimbritas y andesitas desprendidas de la roca madre debido a procesos de erosión. Se encuentran en forma de conglomerados con arenas y arcillas que los cementan. Estos depósitos se llegaron a observar en ambos transectos realizados durante el periodo de trabajo en campo, pero fueron más evidentes en el segundo de ellos donde cubrían a la Ignimbrita Juanepantla. Al mismo tiempo, estos aluviones sirven de base para las mesas de basaltos que a continuación se describirán.

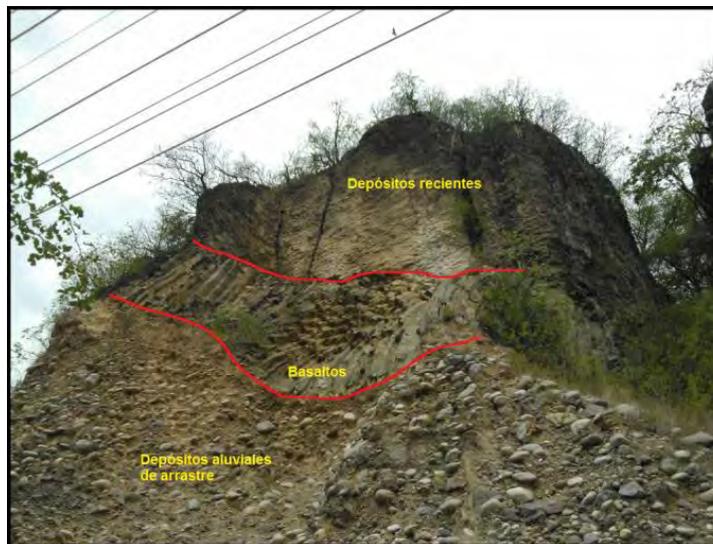
### **Basaltos Mesa las Flores**

Estos basaltos se emplazaron en forma de derrames de tipo fisural (**Paez, 2010**) y presentan prismas hexagonales producto del enfriamiento, con espesores de entre 40 y 70 m (**Fig. 45**). A distancia se puede observar que tienen la forma de una mesa que está depositada sobre secuencias sedimentarias aluviales y de arrastre. Son fácilmente reconocibles por su morfología de pequeñas planicies y presentan coloraciones melanocráticas con textura afanítica pero con algunos minerales visibles como plagioclasas y olivinos.

Estos basaltos fueron fechados por **Nieto et al. (1985)** y **Moore et al. (1994)**, quienes reportan edades similares, de cerca de 1 Ma, tanto por el método K/Ar como por el de Ar/Ar, respectivamente. Estos derrames se encuentran actualmente a una altura de más de 50 m sobre el cauce del Río Grande de Santiago, lo que indica una erosión significativa en solo 1 millón de años.

### Depósitos recientes

Se componen de arenas y gravas que pueden encontrarse tanto en la parte más alta de las elevaciones mezclados con materia orgánica y suelos, como en las partes más bajas en los taludes cercanos al río donde además se encuentran en constante contacto con agua donde se llegan a distinguir cantos rodados angulosos y secuencias de limos y arcillas (**Fig. 45**).



**Figura 45.** Imagen que muestra el orden cronológico del depósito de las últimas tres unidades descritas.

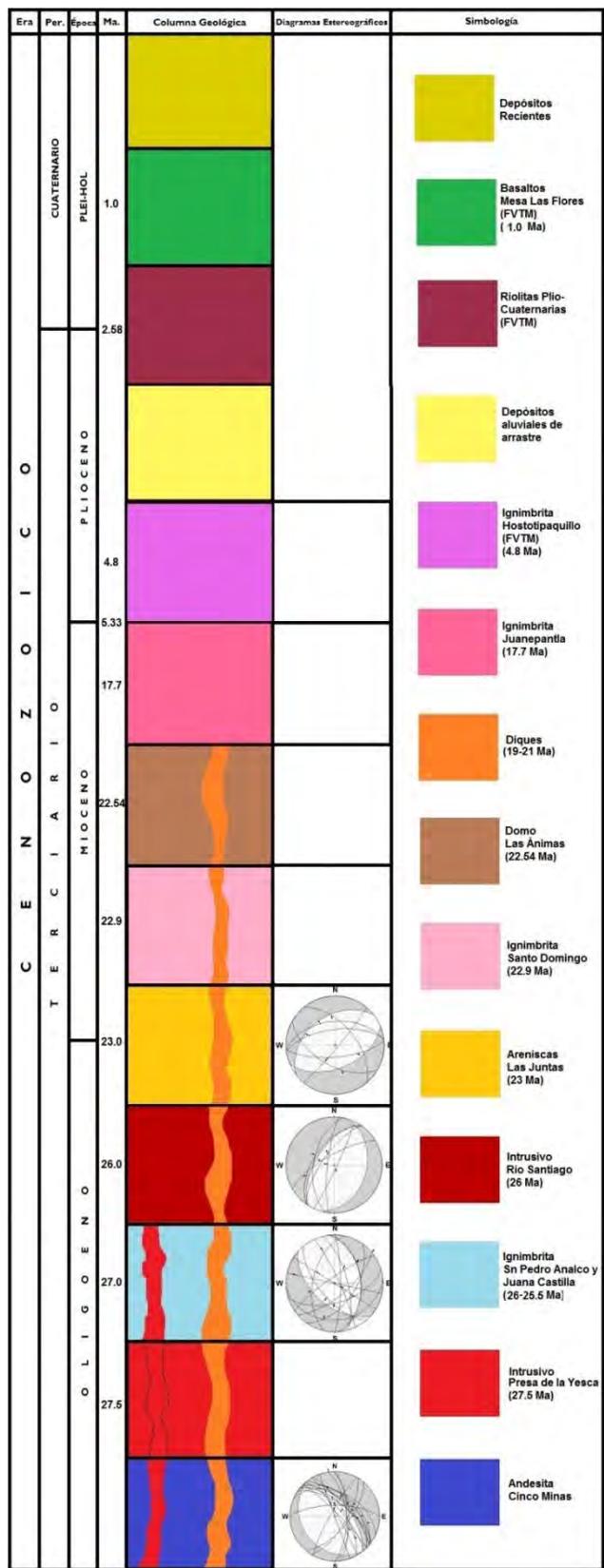
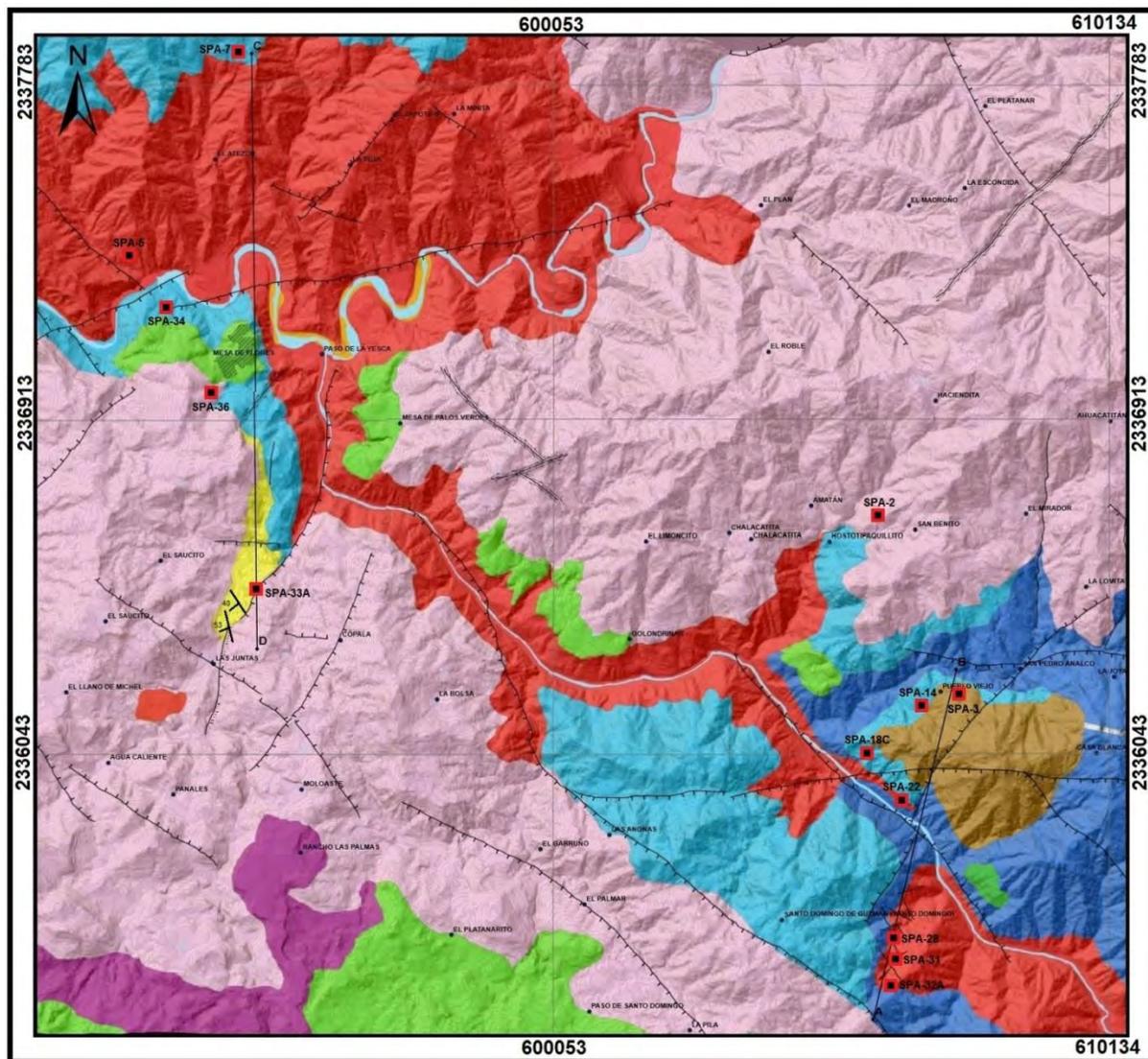


Figura 46. Columna Geológica elaborada de la región



**Simbología**



**Sierra Madre Occidental**

- Domo Las Ánimas
- Ignimbrita Juanepantla y Sto. Domingo
- Areniscas Las Juntas
- Ignimbrita Sn. Pedro Analco y Juana Castilla
- Intrusivos Río Santiago y Presa de la Yesca
- Andesita Cinco Minas

**Faja Volcánica Trans-Mexicana**

- Depósitos Recientes
- Basaltos Mesa de la Flores
- Ignimbrita Hostotipaquillo

**Rasgos Estructurales**

- Líneas de sección
- Fallas laterales
- Fallas Normales
- Fracturas
- Rumbo y echado de estratificación

**Referencias**

- Muestras colectadas
- Río Grande de Santiago
- Localidad
- Pueblos y rancherías

Figura 47. Mapa Geológico de la zona de estudio

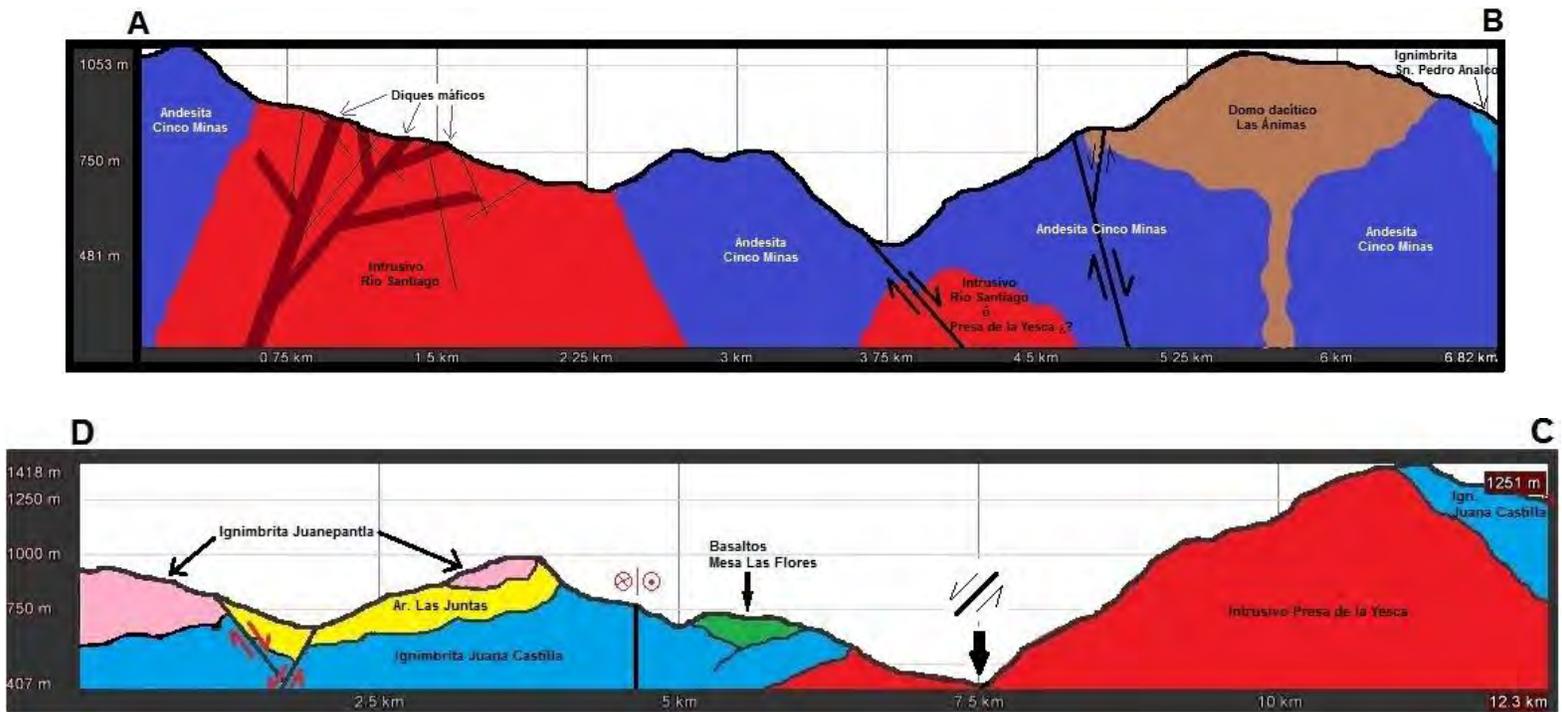


Figura 48. Secciones estructurales de los transectos trabajados durante las jornadas de campo

## Secciones estructurales

Se elaboraron dos secciones estructurales (**Fig. 48**) de cada uno de los transectos que se siguieron en campo. La sección A-B corresponde al transecto 1; inicia en la Falla Cinco Minas, al SW del Intrusivo Río Santiago y termina a 1 km al W del poblado de San Pedro Anasco. De izquierda a derecha se puede observar que el Intrusivo Río Santiago (rojo) corta a la Andesita Cinco Minas (azul) y que a su vez este, es intrusionado por una serie de diques máficos que más adelante se describirán, siendo afectado por varias fracturas con diversas direcciones. En la parte central de la sección, se observa una falla de tipo normal que marca el levantamiento del bloque sur con respecto al norte y que en campo fue inferida debido a la diferencia de alturas al cruzar de norte a sur en ese punto a la altura del río. Posteriormente, se observan nuevamente un par de fallas normales que afectan a la Andesita Cinco Minas y a una pequeña parte del domo de la Dacita Las Ánimas (café) que se emplaza a través de dicha andesita.

La sección D-C, corresponde al transecto 2, parte desde el sur de las Areniscas Las Juntas muy cercano al poblado del mismo nombre y corre en dirección sur a norte hasta la frontera entre la Ignimbrita Juana Castilla y el Intrusivo Presa de la Yesca. De izquierda a derecha, se observa el depósito de la Ignimbrita Juanepantla (rosa) sobre las Areniscas Las Juntas (amarillo) que a su vez se encuentran depositadas sobre la Ignimbrita Juana Castilla (azul celeste). Las tres unidades geológicas se encuentran afectadas por un par de fallas normales, sin embargo la Ignimbrita Juana Castilla presenta también una falla lateral derecha un poco más al norte. Al centro de la sección yacen basaltos de la FVTM sobre la misma ignimbrita, e inmediatamente después se observa la aparición del Intrusivo Presa de la Yesca (rojo) extendiéndose por unos 6 km aprox. siguiendo el rumbo de esta sección. Se observa una falla normal que afecta a este intrusivo y que fue inferida debido a que a partir de este punto fue notoria una elevación de las alturas durante el recorrido de este transecto hacia el norte. La sección estructural finaliza al norte de este intrusivo donde se alcanza a distinguir nuevamente el emplazamiento de la Ignimbrita Juana Castilla sobre él.

## Capítulo V Tectónica y análisis estructural

Como parte del estudio geológico de esta tesis, se presenta un análisis estructural de las fallas medidas durante el trabajo de campo, en donde se caracterizará su geometría, se propondrá una interpretación sobre las orientaciones del campo de esfuerzo generador y se comparará lo observado a escala local con los eventos de deformación reportados a nivel regional.

### Fundamento teórico

Dentro del campo de la Geología Estructural, uno de los fenómenos más analizados por estudiosos de esta disciplina es el del comportamiento de las fallas geológicas, debido que las estructuras que se observan en campo guardan relación directa con procesos tectónicos como la subducción, orogénesis, rompimiento de la corteza terrestre, entre otros.

Las fallas geológicas son dislocaciones frágiles o dislocaciones cristalo-plásticas discretas de la roca, a lo largo de las cuales ha existido un desplazamiento paralelo al plano de la falla. En el caso de que no exista tal desplazamiento, la estructura recibirá únicamente el nombre de fractura o diaclasa.

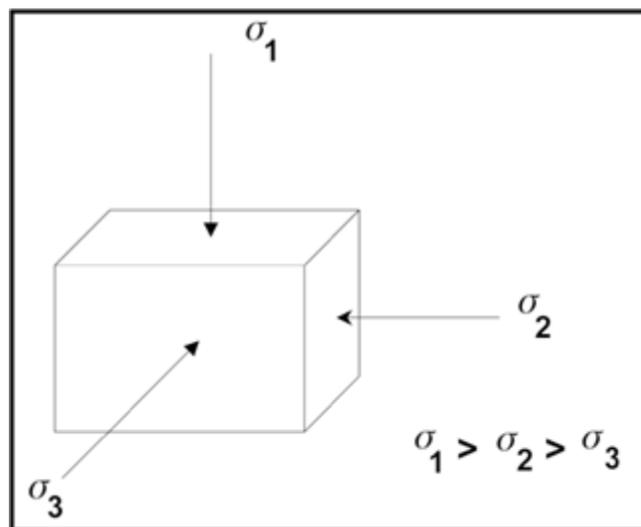


Figura 49. Ejes principales de esfuerzo

El fundamento físico por el cual se forman las fallas, lo propone **Anderson, (1951)**, quien supone que dos de los tres ejes principales del tensor de esfuerzos que provocan la ruptura de la roca y por ende las fallas (**Fig. 49 y 50**), son siempre paralelos al plano que generan la superficie de la Tierra y la atmósfera, y a lo largo del cual el esfuerzo de cizalla es cero y no existe presión confinante; por lo tanto se puede considerar que la superficie de la Tierra es un plano que contiene dos de las tres direcciones principales de esfuerzos mientras que la tercera es perpendicular a éste, debido a que son direcciones de cero esfuerzo de corte.

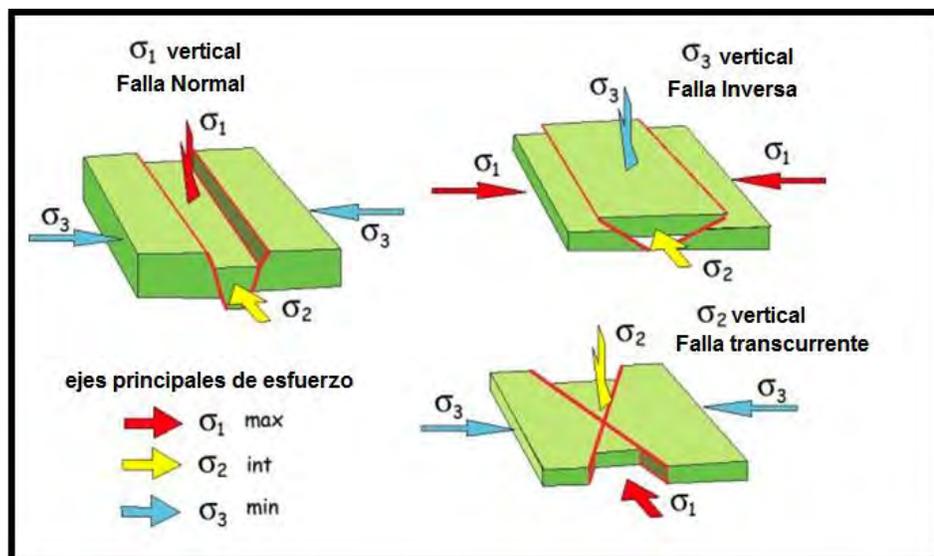


Figura 50. Tipos de fallas generadas según orientación de esfuerzos.

Además, se supone que las rocas son homogéneas y que, por tanto, tienen un comportamiento tipo Coulomb al momento de deformarse, es decir que al rebasar su límite elástico cuando están siendo sometidas a esfuerzos se produce la ruptura sin que la roca vuelva a adquirir su forma original debido a un comportamiento de tipo frágil (**Fig. 51**). Dependiendo de la orientación de los ejes del tensor de esfuerzos se tendrá la formación de diferentes tipos de fallas. Con base en las suposiciones de **Anderson (1951)**, las fallas de tipo normal tienen inclinaciones de alrededor de  $60^\circ$  y un pitch de  $90^\circ$ , y se producen cuando  $\sigma_1$  es vertical; las de

tipo inverso presentan inclinaciones de 30° y pitch de 90° generándose cuando  $\sigma_3$  es vertical; y las fallas transcurrentes tendrán inclinaciones de 90° y pitch de 0° cuando  $\sigma_2$  es vertical.

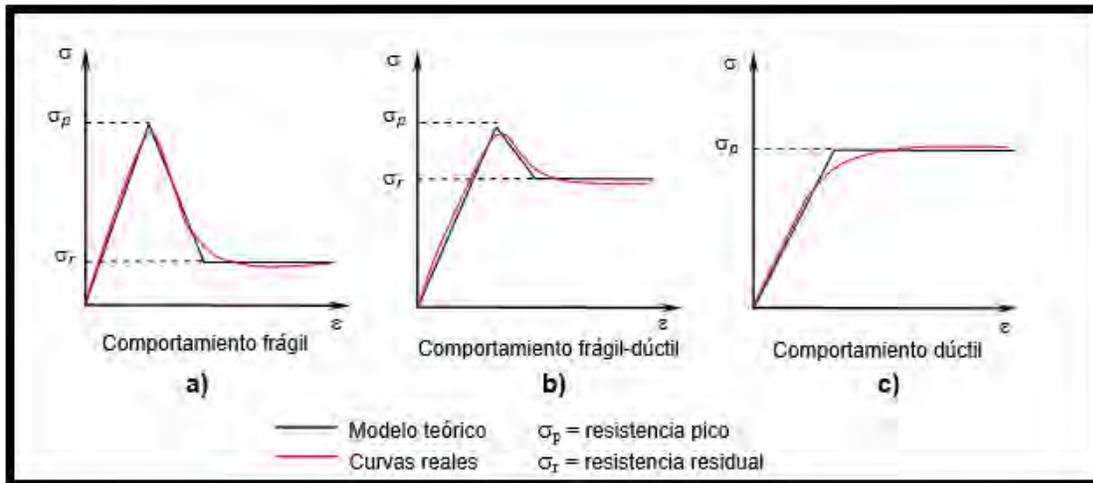


Figura 51. Comportamiento de las rocas según el tipo de esfuerzo-deformación. (Tomada de González de Vallejo, 2002)

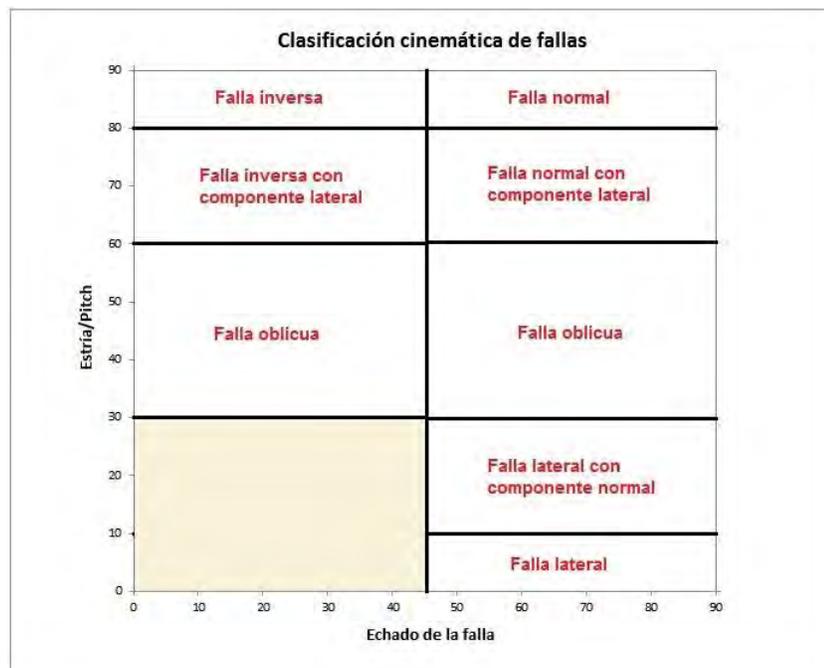
## Análisis cinemático de fallas

Para poder elaborar un análisis del sentido de los esfuerzos generadores de las fallas que afectan a las unidades litológicas estudiadas, es necesario conocer la naturaleza de cada una de ellas, la cual se define con su rumbo, echado, ángulo de estriamiento (pitch) y sentido de desplazamiento, sin embargo, esta última característica no se pudo determinar en campo.

Para resolver este inconveniente, se elaboraron gráficas con los datos medidos de cada estructura cuyos ejes representan los ángulos del echado de las fallas medidas contra los de sus estrías generadas por la fricción entre los bloques durante el desplazamiento (gráficas *dip vs pitch*). Al graficar los datos medidos en campo, los resultados se comparan con un diagrama que se elaboró para este trabajo con el mismo formato de estas gráficas (generado con ayuda del diagrama de la figura 53) que posee los campos de los posibles tipos de falla que pueden

existir, de acuerdo a un régimen de deformación de tipo andersoniano (**Anderson, 1951**), para así, poder determinar que tipos de fallas son cada uno de los datos medidos (**Fig. 52**).

Utilizando el software FaultKin de Richard Allmendinger (**Marret, 1990; Allmendinger, 2012**), se elaboraron también estimaciones de la orientación del tensor de esfuerzo que se graficaron en diagramas de mecanismos focales como los utilizados en sismología, ya que estos muestran la orientación de los vectores de tensión-compresión a la que fue sometida la roca para generar las fallas observadas. En el mapa de la **figura 58** se muestra la localización en campo de cada mecanismo focal.



**Figura 52.** Diagrama elaborado para definir el tipo de cada una de las fallas estudiadas.

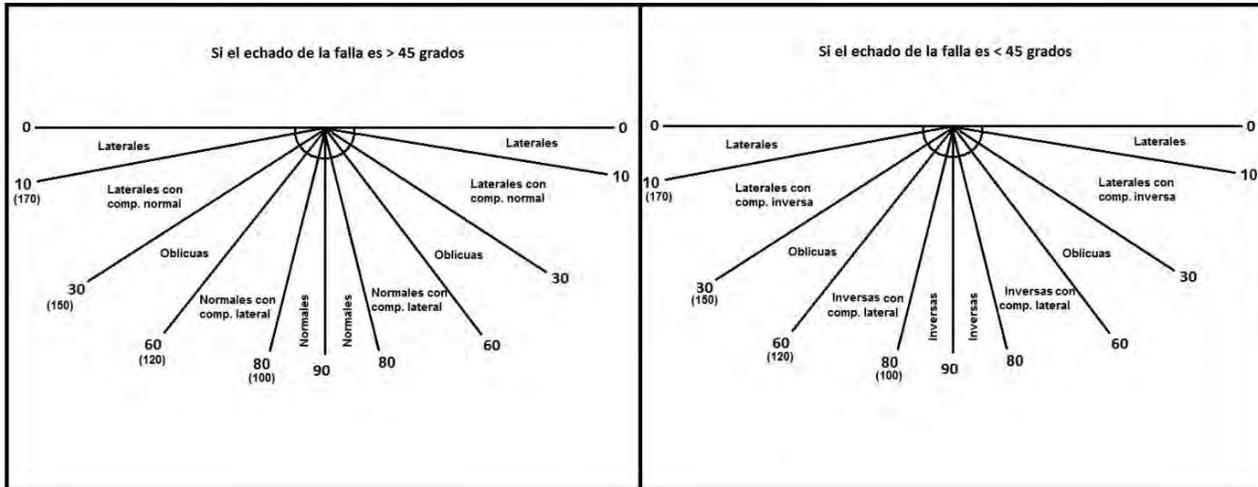


Figura 53. Criterios para la nomenclatura de las fallas basado en el ángulo de echado y en el del pitch de las estrías

El primer análisis elaborado se refiere a la unidad de lavas andesíticas Cinco Minas que constituye la base de la sucesión aflorante. En la gráfica *dip vs pitch* (Fig. 54), se puede apreciar que la gran mayoría de las fallas presentan altos valores de pitch y de echado, lo que las coloca en los campos de fallas oblicuas, normales con componente lateral y normales puras. Solo dos datos corresponden a fallas completamente laterales.

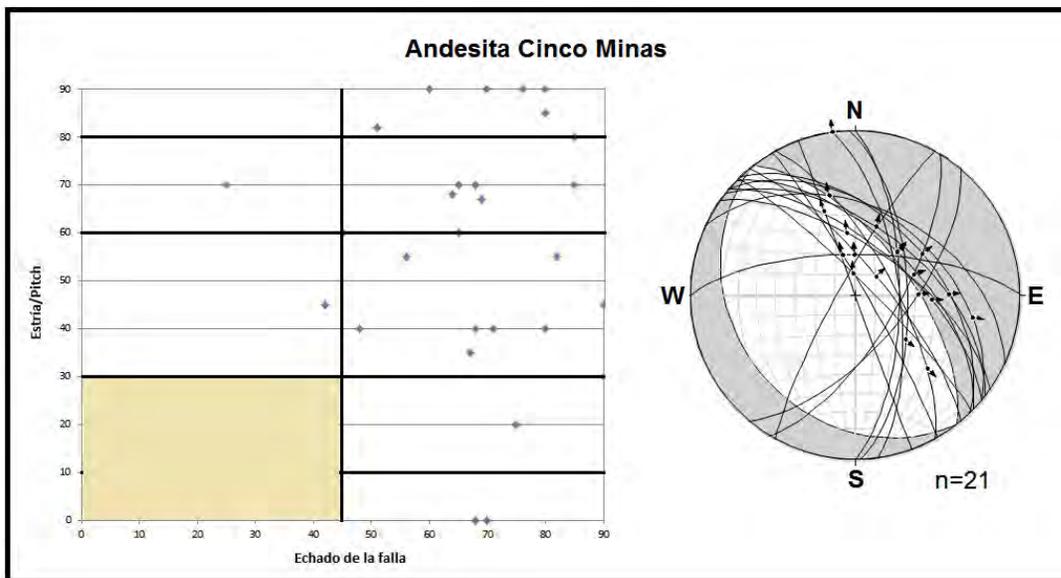


Figura 54. Gráfica dip vs pitch y diagrama de mecanismo focal de la Andesita Cinco Minas

Las ciclográficas en el estereograma revelan que en su mayoría, las fallas medidas en esta unidad poseen una marcada orientación NW-SE, algunas pocas N-S, tres de ellas NE-SW y solo una E-W. La solución generada por el software, tomando en cuenta todas las fallas de esta unidad, indica un régimen de fallamiento de tipo normal producto de una extensión con orientación NE-SW.

El segundo análisis corresponde a la Ignimbrita San Pedro Analco. En la gráfica se observan cuatro fallas de tipo normal, dos normales con componente inversa, una falla inversa con componente lateral, tres oblicuas, una lateral con componente normal y una última lateral pura. Dichas fallas generan un estereograma sin una marcada tendencia de rumbo pero sí de echado ( $>60^\circ$ ), solo cuatro fallas con echados menores a  $40^\circ$ . El software FaultKin generó una solución que indica un régimen de fallamiento normal de una extensión con orientación ENE-WSW (**Fig. 55**).

En la siguiente figura se presenta el análisis elaborado al Intrusivo Río Santiago (**Fig. 56**). En él, se observa que solo 6 fallas registradas mostraron ángulo de estriamiento en esta unidad. Cuatro de ellas son fallas netamente normales, solo una con una importante componente lateral y una más de tipo oblicuo. El rumbo de todas ellas es en dirección NE-SW y sus echados por encima de  $70^\circ$  (solo uno de  $50^\circ$ ) lo que dio como resultado también un régimen de fallamiento normal pero con extensión NW-SE.

Finalmente, se muestra el análisis de las Areniscas Las Juntas. Dicha unidad litológica se encuentra 12 km más alejada que las primeras tres mencionadas y corresponden al segundo transecto durante el trabajo de campo.

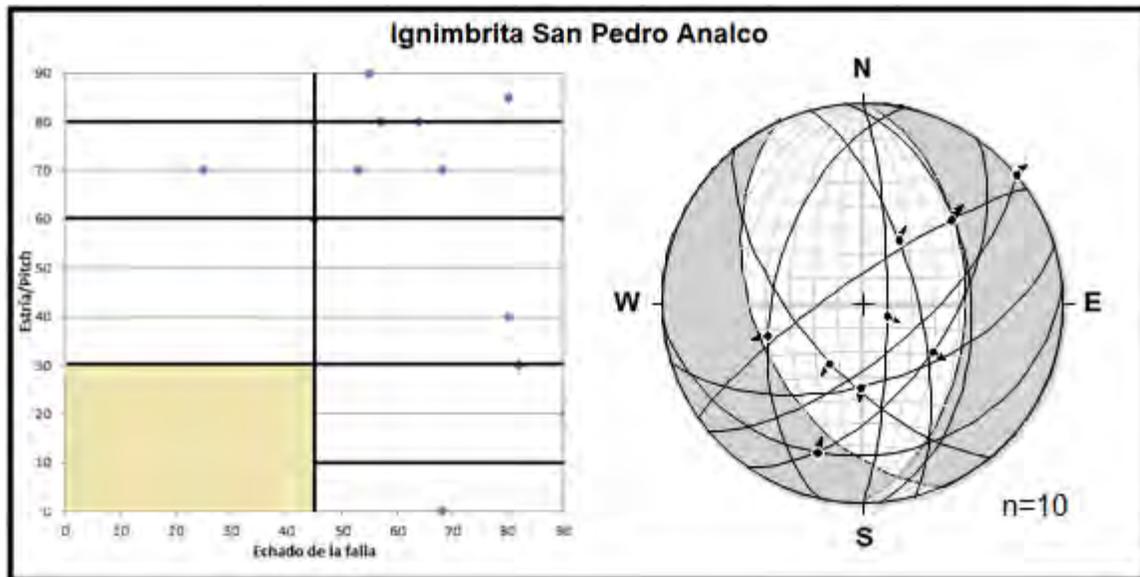


Figura 55. Gráfica dip vs pitch y diagrama de mecanismo focal de la Ignimbrita San Pedro Analco.

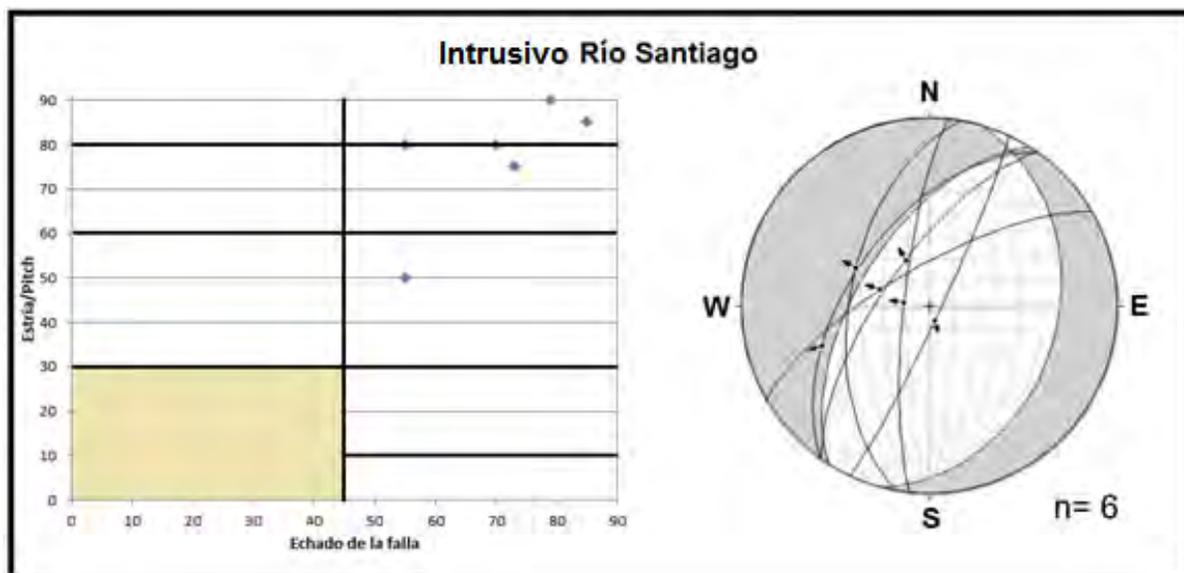


Figura 56. Gráfica dip vs pitch y diagrama de mecanismo focal del Intrusivo Río Santiago.

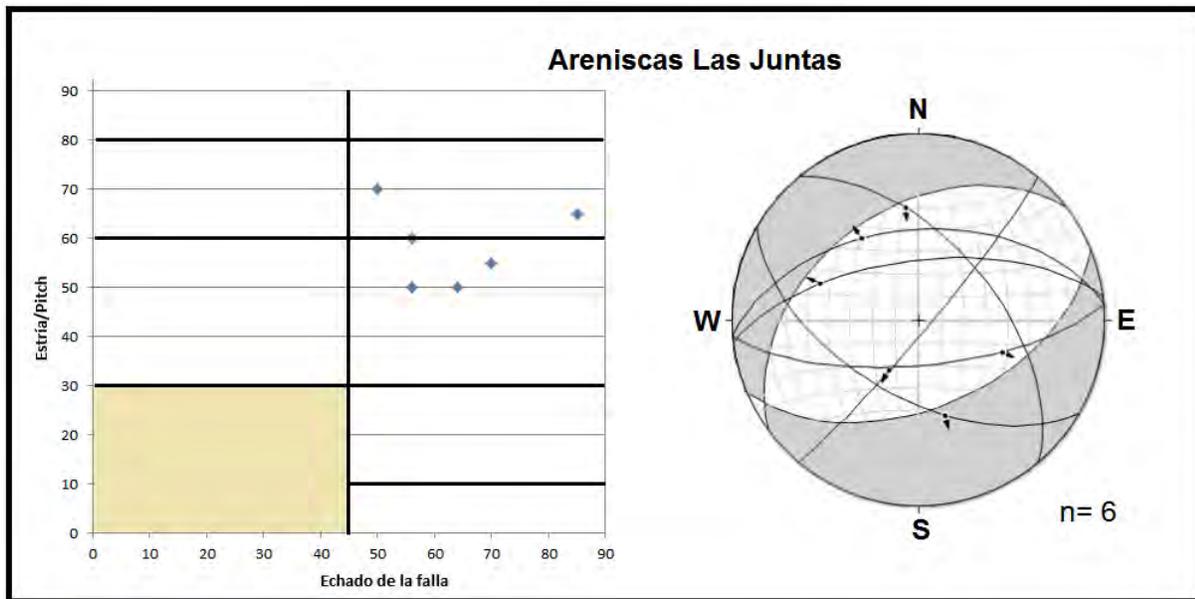


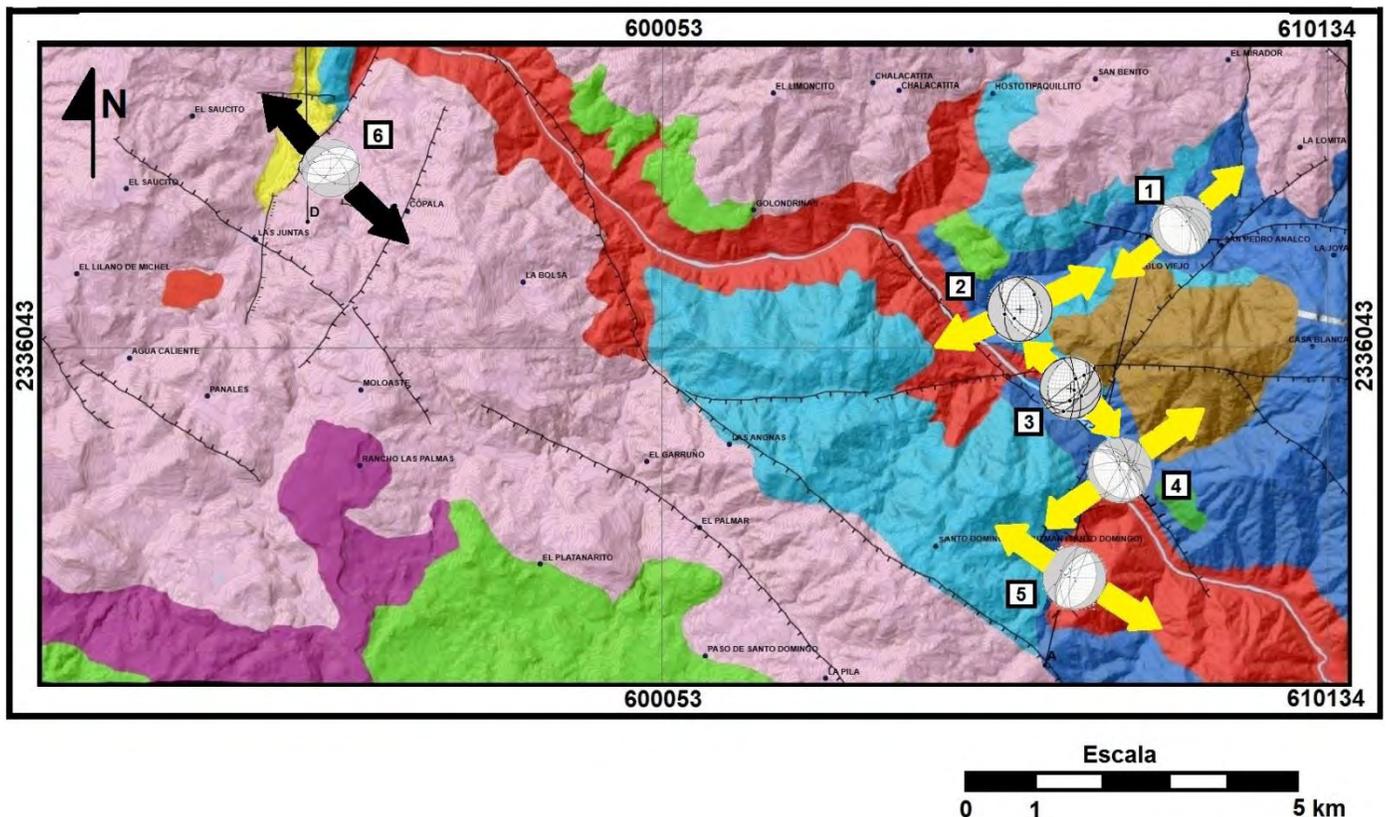
Figura 57. Gráfica dip vs pitch y diagrama de mecanismo focal de las Areniscas Las Juntas

Tres de las seis fallas mostradas son normales con componente lateral, mientras que las otras tres son oblicuas. La solución generada por el programa indica una vez más un régimen de fallamiento normal con extensión NW-SE (**Fig. 57**).

A continuación se presenta un detalle del mapa mostrado en el capítulo anterior con la ubicación de los tensores de esfuerzos obtenidos. Es importante aclarar que este mapa presenta la ubicación de 6 diagramas, es decir, dos más de los ya analizados, debido a que las fallas pertenecientes tanto a la Ignimbrita San Pedro Analco como a la Andesita Cinco Minas fueron medidas y registradas en dos sitios diferentes respectivamente. En el mapa, se colocan los tensores de esfuerzos generados en cada uno de estos puntos, mientras que los descritos previamente para estas unidades, son el resultado de la superposición de estos.

Las soluciones que se describieron previamente se obtuvieron utilizando todas las fallas medidas en una misma unidad geológica independientemente del sitio de medida.

En el mapa de la **figura 58** se puede observar que los tensores de esfuerzos de los puntos 1, 2 y 4, presentan un régimen extensional con una marcada orientación NE-SW, mientras que los tensores de los puntos 3, 5 y 6 se orientan en sentido NW-SE también en extensión. Esto se debe a que el fallamiento ocurrido en sentido NE-SW fue rotando poco a poco en sentido anti-horario en un lapso no mayor a 1 Ma. hasta alcanzar una orientación NW-SE, situación que se sustenta verificando las unidades geológicas a las que afectan cada uno de los tensores de esfuerzos, en este caso, los tensores de los puntos 1, 2 y 4 pertenecen a la Andesita Cinco Minas y a la Ignimbrita San Pedro Analco, las cuales, son las unidades de mayor antigüedad según las relaciones estratigráficas planteadas en capítulos anteriores producto de las observaciones realizadas en campo y los análisis geocronológicos elaborados para este trabajo. Así mismo, los tensores del régimen extensional en dirección NW-SE se ubican en unidades geológicas de edad posterior como lo son el Intrusivo Río Santiago y las Areniscas Las Juntas (puntos 5 y 6 del mapa respectivamente).



**Figura 58.** Detalle del mapa del área de estudio con la ubicación de los mecanismos focales. Los diagramas 1 y 4 superpuestos corresponden al diagrama de la Andesita Cinco Minas mostrado en la sección de análisis de este capítulo, mientras que los diagramas 2 y 3 generan al diagrama analizado de la Ignimbrita San Pedro Analco. Los diagramas 5 y 6 del Intrusivo Río Santiago y de las Areniscas Las Juntas, respectivamente, son los mismos presentados en el análisis cinemático.

Cabe mencionar que el tensor de esfuerzos del punto 3 en dirección NW-SE se encuentra afectando al mismo tiempo a la andesita y a la ignimbrita pero también a un pequeño sector donde existe roca silícica; es probable que en este punto se encuentre aflorando alguna pulsación del evento magmático que generó al Intrusivo Río Santiago el cual se localiza solo 1 km al sur de este lugar. Esta situación reafirma la propuesta sobre la rotación del fallamiento en sentido anti-horario, ya que la edad de las fallas de este sitio a pesar de afectar a las unidades más antiguas, queda definida al afectar al intrusivo de edad más joven.

### Diques máficos

Se analizó también la orientación de los diques máficos que intrusionan a las unidades geológicas del área de estudio (Andesita Cinco Minas, Ignimbrita San Pedro Analco e Intrusivo Río Santiago) debido a que estos tienden a intrusionarse de manera perpendicular al plano  $\sigma_1$ - $\sigma_2$ , es decir, paralelo al  $\sigma_3$ . Los datos fueron ploteados en el estereograma y en el diagrama de rosas para su visualización.

En la **figura 59**, se observa el mapa con la orientación de los diques encontrados a los costados del Río Grande de Santiago en el camino rumbo al poblado de San Pedro Analco, así como el estereograma con los polos de los planos de intrusión de cada uno de ellos y su roseta estructural. Se observa que los rumbos predominantes de la orientación de los diques son de  $310^\circ$  y  $335^\circ$  (N  $25^\circ$ - $50^\circ$  W). También se observan dos poblaciones menores con dirección N-S y E-W. Estas direcciones indican regímenes extensionales similares a las que se deducen de las fallas.

Ninguno de estos diques ha sido fechado en el área de estudio. Sin embargo, a nivel regional, existen dos pulsos de magmatismo máfico: el primero corresponde al Mioceno inferior con edades en un rango entre 21 y 19 Ma., y el segundo se ubica entre finales del Mioceno medio a Mioceno tardío (12-11 Ma) (**Damon et al., 1979; Nieto et al., 1981; Ferrari et al., 2002; Silva Fragoso, 2015**). Existe además un tercer pulso asociado a la actividad de la FVTM con edades del Plioceno Tardío a Cuaternario (**Nieto et al., 1985; Moore et al., 1994**), sin embargo, los

diques observados en campo no se observan alimentando a estas coladas posteriores de la FVTM.

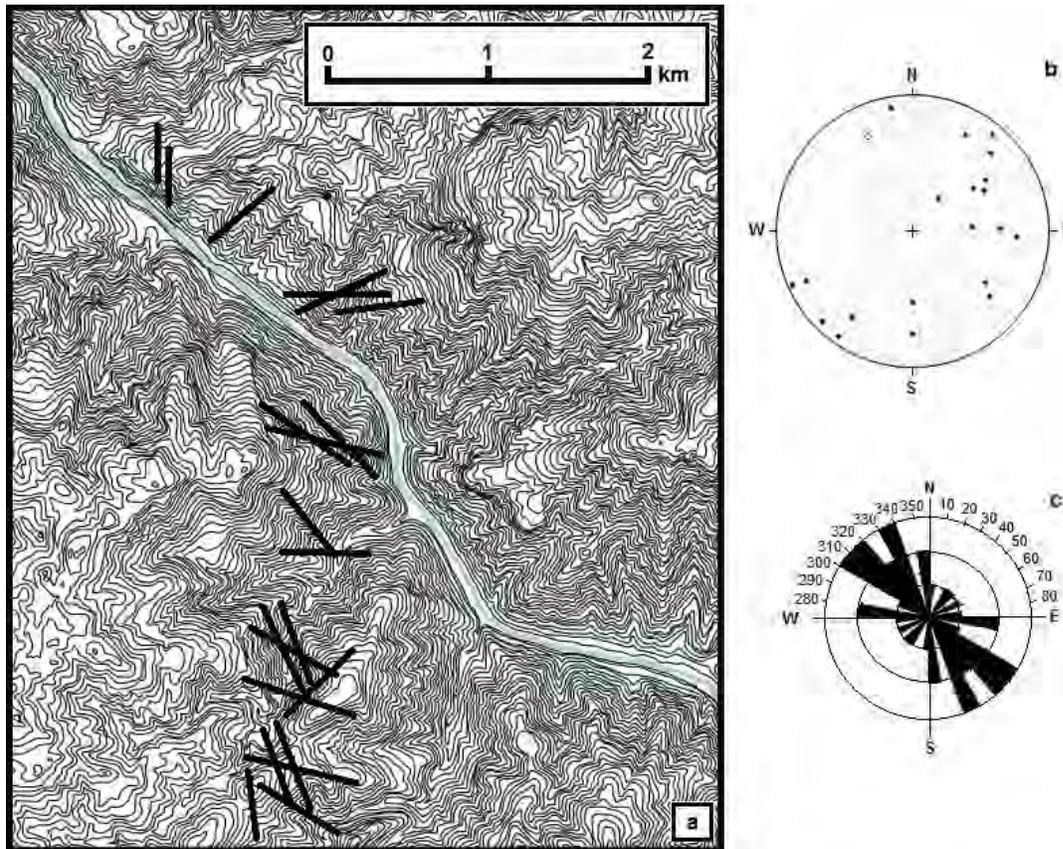


Figura 59. a) Mapa del área de afloramiento de los diques máficos. b) Diagrama estereográfico de polos de cada uno de los planos de intrusión de los diques. c) Roseta estructural que marca la orientación de los diques.

## Capítulo VI Conclusiones

---

Es innegable la influencia que la tectónica regional, a través de millones de años, ha ejercido sobre la conformación de la Sierra Madre Occidental desde cualquier enfoque bajo el cual quiera ser observada. Prueba de ello en este trabajo, son los resultados presentados de los diferentes estudios elaborados, cuya finalidad ha sido la contribución al conocimiento de tan importante provincia geológica a partir de una visión general, es decir, abarcando en un mismo trabajo varios aspectos geológicos: geocronología, petrografía y geología estructural, y elaborando un análisis puntual de cada uno de ellos dentro de la zona de estudio. Las conclusiones a las que se llegaron a partir de dichos resultados son explicadas a continuación:

- Estratigráficamente fueron identificados cuatro paquetes ignimbríticos dentro de la región de estudio: San Pedro Analco, Juana Castilla, Santo Domingo y Juanepantla (por sus nombres asignados en esta tesis) pertenecientes al llamado Supergrupo Volcánico Superior (SVS) de la SMO (**Mc Dowell y Clabaugh, 1979; Ferrari et al., 2005**). Sin embargo, desde un punto de vista cronológico, estos paquetes pueden dividirse en dos; el primero de ellos lo conforman las ignimbritas San Pedro Analco y Juana Castilla de 26 Ma ambas, y el segundo (aunque un poco más separadas en el tiempo) las ignimbritas Santo Domingo y Juanepantla, de 22.9 y 17.7 Ma. respectivamente. Este último grupo encuentra correlación con el segundo pulso ignimbrítico-riolítico que domina en la parte sur de la SMO (capítulo 1). En cuanto a las ignimbritas de 26 Ma., esta edad corresponde a un periodo de poca actividad volcánica entre los dos pulsos ignimbríticos reportados por **Ferrari et al, 2005**. Sin embargo, se han reportado edades similares en la zona de Acaponeta-Huajicori en Nayarit (**Ferrari et al., 2013**) y en el área inmediatamente al este en Cinco Minas (**Nieto et al., 1985**) lo que sugiere la posibilidad de erupciones volcánicas de menor magnitud durante la transición entre estos dos pulsos.
- La presencia de la Areniscas Las Juntas (23.5 Ma) es evidencia de un periodo de inactividad volcánica en la región, dentro del cual, existió el tiempo suficiente para la erosión y depósito

de rocas preexistentes generando esta unidad sedimentaria. Las rocas erosionadas corresponden a unidades geológicas aledañas a la SMO y su depósito finaliza con el emplazamiento de la Ignimbrita Juanepantla.

- El régimen extensional registrado del Oligoceno tardío al Mioceno temprano (responsable de la generación de toda la SMO) está representado, en esta zona de estudio, por todas las fallas normales encontradas en campo, que responden principalmente a una extensión con dirección NE-SW que posteriormente pasa a una dirección NNW-SSE en las unidades más jóvenes.
- Los diques máficos, emplazados al SE de la zona de estudio, no se observaron alimentando a las coladas basálticas pliocénicas de la FVTM, por lo que se infiere que, a pesar de no haber sido fechados, corresponden a los dos pulsos de magmatismo máfico más antiguos reconocidos a nivel regional. El primero de ellos pertenece a la etapa final de la SMO con edades de entre 21-19 Ma., mientras que el segundo se origina entre los 12 y 11 Ma., fechas que corresponden a los inicios de la FVTM.

## Bibliografía

---

- **Allmendinger**, R.W., Cardozo, N.C., Fisher, D., **2012**. Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors. Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 pp.
- **Anderson**, E.M., **1951**. The dynamics of Faulting (2a ed.). Olivier & Boyd, Edinburgh. 208 pp.
- **Bryan**, S.E., Riley, T. R., Jerram, D. a., Leat, P. T., Stephens, C. J., **2002**. Silicic volcanism: an undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins, en Menzies, M.A., Klemperer, S. L., Ebinger, C. J., Baker J., Magmatic Rifted Margins: Geological Society of America Special Paper, 362, 97-118.
- **Bryan**, S.E., Ferrari, L., Reiners, P.W., Allen, C.M., Petrone, C.M., Ramos-Rosique, A., and Campbell, I.H., **2008**. New Insights into crustal contributions to large-volume rhyolite generation in the mid-Tertiary Sierra Madre Occidental Province, Mexico, revealed by U-Pb geochronology: Journal of Petrology, v. 49, p. 47-77, doi:10.1093/petrology/egm070.
- **Calmus**, T., Aguillón-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Cotten, J., Bourgois, J., Michaud, F., **2002**. Geochemical diversity of Late Miocene volcanism in Southern Baja California, Mexico: Implication of mantle and crustal sources during the opening of an asthenospheric window. Journal of Geology, 110: 627-648.
- **Cameron**, M., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S. and Gunn. S., **1989**. Southern Cordillera Basaltic Andesite Suite, southern Chihuahua, Mexico: a link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America. Journal of Geophysical Research, v. 94, p. 7817-7840
- **Cánovas-Picón**, F., **2007**. Física nuclear y partículas (2006-2007), Datación Radiactiva.

- **DeMets, C., & Traylen, S., 2000.** Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North America plates and the mantle: Implications for the geodynamic evolution of the Jalisco region: *Tectonophysics*, v. 318, p. 119-159.
- **Damon, P.E. y Nieto-Obregón, J., 1979.** Un plegamiento neogénico en Nayarit y Jalisco, y evolución geomórfica del Río Grande de Santiago. *Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria, XII Convención Nacional*, p. 156-191.
- **Doe, B.R., 1970.** *Lead Isotopes*. Springer-Verlag. Nueva York
- **Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Norini G., López-Martínez, M, 2014.** Miocene faulting in the southwestern Sierra Madre Occidental, Nayarit, Mexico: kinematics and segmentation during the initial rifting of the southern Gulf of California. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(3) p. 283-302
- **Ferrari, L., 1995.** Miocene shearing along the northern boundary of the Jalisco block and the opening of the southern Gulf of California. *Geology*, 23(8), p. 751.
- **Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., 2000.** Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: the Tepic-Zacoalco rift revisited: *Geological Society America Special Paper 334*, 41-64.
- **Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas, S., Romero, F., 2000a.** Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. En: Delgado Granados, H., Aguirre-Díaz., Stock, J. (eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico: Geological Society of America Special Paper, 334*, 65-84.

- **Ferrari, L., López-Martínez, M. & Rosas-Elguera, J., 2002.** Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics*, 21(4), pp. 1-25.
- **Ferrari, L., 2004.** Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology*, 32 (1), 77-80.
- **Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005.** Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 3, 343-378
- **Ferrari, L. & Bryan, S., 2007.** Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America. *Geological Society of America*, 242(01), pp. 1-39.
- **Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M. 2012.** The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: *Tectonophysics*, 522-523, 122-149. Doi:10.1016/j.tecto.2011.09.018
- **Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P.F., 2013.** Late Oligocene to Middle Miocene rifting and syn-extensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, México: the beginning of the Gulf of California rift: *Geosphere*, 9 (5), 1-40.
- **González de Vallejo, L., 2002.** *Ingeniería Geológica*, Editorial Prentice Hall, 715 p.
- **Litvak, V.D. & Poma, S. 2005a.** Estratigrafía y facies volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Valle del Cura: magmatismo paleógeno en la Cordillera Frontal de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 60(2): 402-416.

- **Lonsdale, P., 1995.** Segmentation and disruption of the East Pacific Rise in the mouth of the Gulf of California: Marine Geophysical Researches, v. 17, p. 323-359
- **Ludwig, K. R., 2003.** User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel (No. 4). Kenneth R. Ludwig.
- **Manea, V.C., Manea, M., Ferrari, L., 2013.** A geodynamical perspective on the subduction of Cocos and Rivera plates beneath Mexico and Central America. Tectonophysics, Invited review paper, doi:10.1016/j.tecto.2012.12.039.
- **Marret, R.A., Allmendinger, R.W., 1990.** Kinematic analysis of fault-slip data. Journal of Structural Geology, v. 12, p. 973-986.
- **McDowell, F.W. & Clabaugh, S.E., 1979.** Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico: Geological Society of America, Special Paper 180, 113-124
- **McDowell, F.W. & Clabaugh, S.E., 1981.** The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of western Mexico. Univ. Nal. Auton. México, Instituto de Geología. Revista, 5, 195-206.
- **McDowell, F.W., Keitzer, R.P., 1977.** Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico. Geological Society of American Bulletin, 88, 1479-1487.
- **Melgarejo, J.C., Proenza, J.A., Galí, S., Llovet, X., 2010.** Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62(1), p. 1-23

- **Moore, G. et al., 1994.** Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt. Geological Society of America Bulletin, 106(3), 383-394.
- **Nieto-Obregón, J., Delgado L., A. & Damon E., P., 1981.** Relaciones petrológicas y geocronológicas del magmatismo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico de Nayarit, Jalisco y Zacatecas. Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria, XIV Convención Nacional, p. 327-361
- **Nieto-Obregón, J., Delgado L., A. & Damon E., P., 1985.** Geochronologic, petrologic and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and The Mexican Volcanic Belt. Geofísica Internacional, 24, pp- 623-663
- **Paez, V., 2010.** Análisis estructural en la región de Paso de la Yesca, límite entre los estados de Jalisco y Nayarit, (tesis de maestría). Centro de Geociencias, Juriquilla, UNAM, México.
- **Pérez-Campos, X., Y. Kim, A. Husker, P. M. Davis, R. W. Clayton, A. Iglesias, J. F. Pacheco, S. K. Singh, V. C. Manea and M. Gurnis, 2008.** Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico. Geophys Res. Lett., 35, L18303, doi:10.1029/2008GL035127
- **Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño, V.H., Urrutia-Fucugauchi, J., 1996.** The continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Plio-Quaternary kinematics of western Mexico. Geology, 24:921-923
- **Silva-Fragoso, A., 2015.** Tectónica y volcanismo bimodal en la zona de transición entre la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Trans-Mexicana al norte de Guadalajara, Jalisco. (tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

- **Solari**, L.A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J.P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., **2009**. U-Pb Zircon Geochronology with an Integrated LA-ICP-MS Microanalytical Workstation: Achievements in Precision and Accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34, 5-18.
- **Soto**, G.L., Ni, J.F., Grand, S.P., Sandvol, E., Valenzuela, R.W., Guzmán, M., Gómez-González, J.M., Domínguez-Reyes, T., **2009**. Mantle flow in the Rivera-Cocos subduction zone. *Geophysical Journal International*, 179(2) p. 1004-1012, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04352.x.
- **Valencia**, V.A., Richter K., Rosas-Elguera, J., López-Martínez, M., Grove, M., **2013**. The age and composition of the pre-Cenozoic basement of the Jalisco Block: implications for and relation to the Guerrero composite terrane, Springer-Verlag, doi 10.1007/s00410-013-0908-z, pp. 801-824.
- **Wetherill**, G., **1956**. Discordant uranium-lead ages: *Transactions-American Geophysical Union*, 37, 320-326.
- **Yang**, T., Grand, S.P., Wilson, D., Guzmán-Speziale, M., Gómez-González, J.M., Domínguez-Reyes, T., Ni, J., **2009**. Seismic structure beneath the Rivera subduction zone from finite-frequency seismic tomography. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01302, doi:10.1029/2008JB005830.

Anexos

Análisis U/Pb

A continuación se presentan los datos, por muestra analizada, de cada uno de los zircones fechados mediante el método de U/Pb en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias, Juriquilla UNAM.

Muestra	CORRECTED RATIOS <sup>a</sup>										CORRECTED AGES (Ma)						Disc %				
	U (ppm) <sup>b</sup>	Th (ppm) <sup>b</sup>	<sup>238</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>235</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>207</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	Best age	±1σ	±2σ	Disc %						
SPA-33A																					
Zircon-001	216.3	84.2	0.39	0.1300	0.0239	0.0730	0.0330	0.0045	0.0002	0.0038	0.0003	0.17	23.8	1.4	73.0	12.0	2069.0	330.0	23.8	330.0	61.00
Zircon-002	435	194	0.45	0.6758	0.0073	0.0372	0.0034	0.0032	0.0002	0.0037	0.0002	0.20	23.5	1.0	37.0	4.3	1010.0	210.0	23.5	1.0	36.41
Zircon-003	268	133.6	0.50	0.0330	0.0260	0.0277	0.0064	0.0038	0.0002	0.0015	0.0002	0.17	24.3	1.0	27.4	6.5	640.0	970.0	24.3	1.0	11.31
Zircon-004	450	172.9	0.38	0.0434	0.0099	0.0273	0.0035	0.0039	0.0001	0.0032	0.0002	0.21	24.8	0.8	27.3	3.3	200.0	190.0	24.8	0.8	9.30
Zircon-005	3400	811	0.19	0.0518	0.0091	0.0267	0.0018	0.0037	0.0001	0.0033	0.0001	0.21	23.9	0.6	26.7	1.8	300.0	150.0	23.9	0.6	10.61
Zircon-006	166.6	46.4	0.28	0.0820	0.0110	0.0142	0.0062	0.0039	0.0002	0.0026	0.0001	0.18	24.1	1.3	45.4	6.0	1000.0	220.0	24.1	1.3	12.00
Zircon-007	1630	430	0.26	0.0732	0.0070	0.0144	0.0050	0.0041	0.0004	0.0025	0.0002	0.41	26.1	0.8	41.2	4.8	1000.0	170.0	26.1	0.8	24.25
Zircon-008	264	105.6	0.40	0.0498	0.0066	0.0247	0.0012	0.0037	0.0001	0.0032	0.0001	0.15	24.1	0.8	24.7	1.2	140.0	250.0	24.1	0.8	2.51
Zircon-009	1509	754	0.50	0.0598	0.0040	0.0254	0.0021	0.0037	0.0001	0.0033	0.0001	0.17	23.9	0.7	25.5	2.0	320.0	160.0	23.9	0.7	6.20
Zircon-010	1237	674	0.55	0.0506	0.0050	0.0265	0.0016	0.0038	0.0001	0.0035	0.0001	0.07	24.1	0.6	24.4	1.4	320.0	140.0	24.1	0.6	8.60
Zircon-011	200	150.8	0.69	0.0819	0.0097	0.0141	0.0061	0.0038	0.0001	0.0039	0.0002	0.25	24.4	0.9	49.0	5.2	1000.0	300.0	24.4	0.9	16.80
Zircon-012	235	126.6	0.46	0.1490	0.0240	0.0149	0.0049	0.0049	0.0002	0.0049	0.0006	0.06	29.6	0.4	89.0	14.0	2300.0	210.0	29.6	0.4	60.16
Zircon-013	583	232	0.43	0.0574	0.0048	0.0316	0.0025	0.0049	0.0001	0.0036	0.0001	0.17	25.3	0.7	31.3	2.5	300.0	170.0	25.3	0.7	18.90
Zircon-014	138.9	57.9	0.42	0.0720	0.0200	0.0370	0.0110	0.0040	0.0002	0.0020	0.0003	0.10	25.7	1.2	36.0	11.0	930.0	440.0	25.7	1.2	28.01
Zircon-015	318	403	0.90	0.0495	0.0071	0.0259	0.0033	0.0038	0.0001	0.0035	0.0001	0.04	24.4	0.8	25.9	3.3	200.0	250.0	24.4	0.8	5.64
Zircon-016	320	183.8	0.52	0.1039	0.0077	0.0292	0.0042	0.0041	0.0001	0.0036	0.0002	0.24	26.3	0.9	29.2	4.3	350.0	200.0	26.3	0.9	10.01
Zircon-017	115	442	0.41	0.1440	0.0180	0.0200	0.0040	0.0040	0.0001	0.0040	0.0001	0.44	41.3	0.4	240.0	61.0	3000.0	100.0	41.3	0.4	64.85
Zircon-018	232.1	160.6	0.69	0.0613	0.0096	0.0330	0.0051	0.0040	0.0001	0.0034	0.0001	0.01	25.3	0.9	32.9	3.0	320.0	310.0	25.3	0.9	22.58
Zircon-019	350	230	0.67	0.2960	0.0200	0.2310	0.0130	0.0053	0.0003	0.0053	0.0003	0.45	26.2	1.7	211.0	14.0	2460.0	100.0	26.2	1.7	62.41
Zircon-020	196.2	90.9	0.46	0.0673	0.0086	0.0247	0.0038	0.0046	0.0002	0.0038	0.0002	0.13	20.5	1.2	42.3	5.6	810.0	290.0	20.5	1.2	30.28
Zircon-021	1481	551	0.37	0.0578	0.0051	0.0236	0.0036	0.0035	0.0001	0.0033	0.0001	0.22	23.3	0.3	25.6	1.6	980.0	140.0	23.3	0.3	40.81
Zircon-022	443	126	0.41	0.1400	0.0140	0.1160	0.0040	0.0041	0.0001	0.0041	0.0001	0.08	28.9	1.1	112.3	14.0	2340.0	120.0	28.9	1.1	24.80
Zircon-023	168.1	77.5	0.46	0.0530	0.0120	0.0345	0.0075	0.0044	0.0002	0.0037	0.0002	0.33	24.2	1.2	34.2	7.4	390.0	590.0	24.2	1.2	17.54
Zircon-024	255	127.9	0.50	0.0649	0.0095	0.0355	0.0052	0.0042	0.0002	0.0037	0.0002	0.10	27.1	1.0	35.4	5.1	650.0	260.0	27.1	1.0	28.47
Zircon-025	363	137	0.43	0.0632	0.0073	0.0348	0.0038	0.0040	0.0001	0.0037	0.0002	0.15	25.7	0.8	34.6	3.8	640.0	250.0	25.7	0.8	25.75
Zircon-026	453	202	0.45	0.0792	0.0073	0.0381	0.0042	0.0036	0.0001	0.0034	0.0001	0.50	26.2	1.0	49.2	6.0	610.0	180.0	26.2	1.0	10.90
Zircon-027	209	118	0.46	0.0610	0.0140	0.0372	0.0071	0.0041	0.0002	0.0037	0.0001	0.41	26.1	1.0	57.1	6.9	640.0	340.0	26.1	1.0	21.81
Zircon-028	1726	1053	0.61	0.0486	0.0034	0.0244	0.0017	0.0037	0.0001	0.0032	0.0001	0.01	23.8	0.6	24.4	1.7	140.0	150.0	23.8	0.6	2.54
Zircon-029	120	50.3	0.42	0.0990	0.0140	0.0672	0.0034	0.0042	0.0002	0.0031	0.0004	0.41	27.0	1.3	56.1	7.8	1530.0	230.0	27.0	1.3	51.87
Zircon-030	150.2	61	0.52	0.0730	0.0110	0.0472	0.0068	0.0046	0.0002	0.0031	0.0002	0.02	20.8	1.3	46.7	6.6	900.0	330.0	20.8	1.3	36.10
Zircon-031	429	151.5	0.35	0.0517	0.0075	0.0276	0.0033	0.0039	0.0002	0.0035	0.0002	0.07	25.3	1.0	27.6	1.5	200.0	240.0	25.3	1.0	8.93
Zircon-032	201.8	84.8	0.37	0.0604	0.0150	0.0372	0.0071	0.0041	0.0002	0.0037	0.0001	0.41	24.6	1.4	47.4	6.6	1440.0	230.0	24.6	1.4	12.20
Zircon-033	470	267	0.57	0.0536	0.0073	0.0455	0.0042	0.0044	0.0001	0.0039	0.0001	0.04	23.3	0.8	45.4	4.8	980.0	250.0	23.3	0.8	21.14
Zircon-034	873	893	1.02	0.0586	0.0042	0.0280	0.0021	0.0036	0.0001	0.0032	0.0001	0.06	23.4	0.6	28.0	2.1	440.0	160.0	23.4	0.6	16.99
Zircon-035	266	160	0.61	0.0970	0.0180	0.0390	0.0030	0.0039	0.0009	0.0022	0.0010	0.06	20.2	1.8	51.0	17.0	1690.0	300.0	20.2	1.8	30.49
Zircon-036	1184	364	0.48	0.0910	0.0210	0.1120	0.0040	0.0046	0.0002	0.0043	0.0003	0.48	29.8	0.4	143.0	14.0	2720.0	130.0	29.8	0.4	33.46
Zircon-037	1596	412	0.46	0.0484	0.0061	0.0344	0.0038	0.0042	0.0001	0.0033	0.0001	0.06	26.2	0.8	26.8	5.8	1200.0	200.0	26.2	0.8	60.85
Zircon-038	499	226.4	0.45	0.0502	0.0054	0.0273	0.0030	0.0040	0.0001	0.0035	0.0001	0.08	25.5	0.7	27.3	3.0	190.0	200.0	25.5	0.7	6.07
Zircon-039	148	47	0.87	0.0828	0.0076	0.0281	0.0034	0.0043	0.0001	0.0033	0.0001	0.03	23.8	0.7	28.7	4.3	580.0	220.0	23.8	0.7	22.20
Zircon-040	334	154.1	0.29	0.0548	0.0037	0.0292	0.0031	0.0035	0.0001	0.0031	0.0001	0.10	23.9	0.7	29.2	1.0	420.0	190.0	23.9	0.7	18.12
Zircon-041	590	147.3	0.25	0.0661	0.0053	0.0327	0.0027	0.0036	0.0001	0.0021	0.0002	0.07	23.0	0.7	32.6	2.7	730.0	180.0	23.0	0.7	29.54
Zircon-042	252	140	0.25	0.0802	0.0230	0.0380	0.0160	0.0048	0.0002	0.0039	0.0001	0.28	23.4	1.1	42.0	16.0	1230.0	310.0	23.4	1.1	41.00
Zircon-043	306	234.1	0.27	0.0912	0.0120	0.0410	0.0100	0.0033	0.0002	0.0035	0.0002	0.04	26.5	1.0	40.4	9.8	1110.0	260.0	26.5	1.0	41.10
Zircon-044	924	73.4	0.23	0.1750	0.0170	0.1040	0.0110	0.0044	0.0003	0.0029	0.0003	0.59	24.4	1.7	100.0	10.0	2600.0	140.0	24.4	1.7	71.40
Zircon-045	564	224.9	0.40	0.0576	0.0050	0.0302	0.0029	0.0038	0.0001	0.0036	0.0001	0.55	24.1	1.7	30.2	2.8	470.0	180.0	24.1	1.7	20.07
Zircon-046	2389	144.4	0.41	0.0661	0.0070	0.0326	0.0043	0.0041	0.0001	0.0020	0.0002	0.24	26.1	0.8	32.4	4.3	860.0	140.0	26.1	0.8	30.83
Zircon-047	171	302.8	0.60	0.0990	0.0180	0.0660	0.0110	0.0042	0.0002	0.0034	0.0001	0.21	27.2	1.6	89.0	16.0	1260.0	220.0	27.2	1.6	34.68
Zircon-048	341	130.8	0.40	0.0620	0.0082	0.0345	0.0045	0.0037	0.0001	0.0035	0.0002	0.09	23.6	0.9	34.0						



# Magmatismo y tectónica de la parte oriental de la zona de cizalla del Río Santiago, Jalisco

Muestra	CORRECTED RATIOS <sup>2</sup>											CORRECTED AGES (Ma)							Disc %		
	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ		Best age (Ma)	±2σ
SPA-28																					
Zircon-036_SPA-28	324	221	0.59	0.0689	0.0067	0.0420	0.0042	0.0045	0.0002	0.0019	0.0001	0.31	28.9	0.9	41.7	4.1	1070.0	120.0	28.9	0.9	30.60
Zircon-037	465	124	0.27	0.0623	0.0070	0.0356	0.0043	0.0043	0.0002	0.0018	0.0002	-0.32	27.6	1.1	36.4	4.2	830.0	110.0	27.6	1.1	24.18
Zircon-038	262	78.6	0.30	0.0910	0.0120	0.0518	0.0057	0.0041	0.0002	0.0021	0.0003	0.00	26.4	1.1	51.2	5.5	1470.0	120.0	26.4	1.1	48.44
Zircon-039	1615	364	0.23	0.0509	0.0027	0.0288	0.0017	0.0041	0.0001	0.0013	0.0001	0.01	26.3	0.6	28.9	1.6	300.0	57.0	26.3	0.6	9.03
Zircon-040	1290	275	0.21	0.0519	0.0037	0.0286	0.0019	0.0041	0.0001	0.0016	0.0001	-0.05	26.6	0.8	28.6	1.9	379.0	85.0	26.6	0.8	7.06
Zircon-044	736	236	0.32	0.0765	0.0058	0.0468	0.0035	0.0043	0.0002	0.0023	0.0001	-0.09	27.9	1.0	46.4	3.4	1114.0	95.0	27.9	1.0	39.82
Zircon-042	275	133	0.48	0.1332	0.0089	0.0889	0.0058	0.0047	0.0002	0.0034	0.0002	0.46	30.2	0.9	86.3	5.4	2168.0	73.0	2168.0	73.0	65.06
Zircon-043	416	127	0.31	0.0590	0.0120	0.0331	0.0098	0.0041	0.0002	0.0018	0.0005	-0.34	26.5	1.4	33.1	9.6	610.0	220.0	26.5	1.4	19.94
Zircon-044	1287	309	0.24	0.0517	0.0028	0.0289	0.0017	0.0041	0.0001	0.0015	0.0001	0.03	26.1	0.6	28.9	1.7	431.0	64.0	26.1	0.6	9.72
Zircon-045	1131	352	0.31	0.0513	0.0028	0.0292	0.0015	0.0041	0.0001	0.0016	0.0001	-0.04	26.6	0.6	29.2	1.4	323.0	58.0	26.6	0.6	9.04
Zircon-046	560	141	0.25	0.0600	0.0120	0.0346	0.0095	0.0042	0.0002	0.0019	0.0005	0.10	27.2	1.2	34.5	9.0	660.0	240.0	27.2	1.2	21.16
Zircon-047	541	125	0.23	0.0460	0.0041	0.0278	0.0027	0.0042	0.0001	0.0018	0.0001	-0.06	26.7	0.8	27.8	2.6	435.0	78.0	26.7	0.8	3.85
Zircon-048	168	67.3	0.40	0.0635	0.0087	0.0359	0.0052	0.0042	0.0002	0.0022	0.0002	0.40	26.9	1.0	35.7	5.0	1070.0	150.0	26.9	1.0	24.57
Zircon-049	138.8	74	0.44	0.0667	0.0078	0.0395	0.0045	0.0043	0.0002	0.0025	0.0002	-0.38	27.8	1.0	39.3	4.4	1090.0	110.0	27.8	1.0	29.21
Zircon-050	526	248	0.47	0.0669	0.0045	0.0404	0.0029	0.0043	0.0001	0.0020	0.0001	0.31	27.8	0.8	40.2	2.8	849.0	68.0	27.8	0.8	30.92
Zircon-054	729	189	0.26	0.0721	0.0043	0.0425	0.0035	0.0043	0.0002	0.0022	0.0002	0.26	27.8	0.9	42.2	3.4	1000.0	110.0	27.8	0.9	34.15
Zircon-052	1008	224	0.22	0.0546	0.0052	0.0312	0.0030	0.0042	0.0001	0.0017	0.0002	0.15	27.0	0.8	31.6	3.0	390.0	120.0	27.0	0.8	14.46
Zircon-053	806	229	0.28	0.0556	0.0036	0.0311	0.0018	0.0041	0.0001	0.0017	0.0001	-0.18	26.1	0.7	31.1	1.8	471.0	74.0	26.1	0.7	16.17
Zircon-054	1089	303	0.28	0.0480	0.0024	0.0279	0.0014	0.0042	0.0001	0.0015	0.0001	-0.20	27.0	0.6	27.9	1.4	241.0	56.0	27.0	0.6	3.12
Zircon-055	279	145.5	0.52	0.0573	0.0049	0.0327	0.0030	0.0042	0.0001	0.0016	0.0001	-0.05	27.0	0.8	32.7	3.0	530.0	100.0	27.0	0.8	17.49
Zircon-056	684	179.4	0.26	0.0503	0.0033	0.0288	0.0020	0.0042	0.0001	0.0016	0.0001	0.28	27.1	0.7	28.8	2.0	273.0	81.0	27.1	0.7	5.94
Zircon-057	143.4	67.3	0.47	0.0779	0.0081	0.0486	0.0052	0.0045	0.0002	0.0025	0.0002	0.44	29.1	1.0	48.0	5.0	1380.0	130.0	29.1	1.0	39.38
Zircon-058	667	208	0.31	0.0480	0.0031	0.0271	0.0019	0.0042	0.0001	0.0015	0.0001	0.06	27.0	0.7	27.2	1.8	240.0	91.0	27.0	0.7	0.81
Zircon-059	145.4	98.5	0.68	0.0655	0.0077	0.0394	0.0045	0.0045	0.0002	0.0018	0.0001	-0.22	28.8	1.1	39.1	4.4	920.0	130.0	28.8	1.1	26.34
Zircon-060	685	179	0.26	0.0522	0.0025	0.0299	0.0016	0.0042	0.0001	0.0016	0.0001	0.33	26.9	0.7	29.9	1.6	336.0	43.0	26.9	0.7	10.13
Zircon-064	236	88.8	0.38	0.0694	0.0061	0.0435	0.0035	0.0045	0.0001	0.0023	0.0002	0.04	28.7	0.9	43.2	3.4	983.0	91.0	28.7	0.9	33.50
Zircon-062	139.2	58.9	0.42	0.0925	0.0088	0.0562	0.0059	0.0046	0.0002	0.0027	0.0002	0.39	29.9	1.1	55.3	5.6	1430.0	110.0	29.9	1.1	45.92
Zircon-063	306	98.4	0.32	0.0605	0.0071	0.0359	0.0038	0.0042	0.0001	0.0018	0.0002	0.14	27.0	0.9	35.8	3.7	680.0	150.0	27.0	0.9	24.55
Zircon-064	631	149	0.24	0.0567	0.0046	0.0326	0.0027	0.0041	0.0001	0.0020	0.0001	-0.02	26.6	0.6	32.5	2.6	570.0	120.0	26.6	0.6	18.15
Zircon-065	499	152	0.30	0.0820	0.0240	0.0510	0.0230	0.0046	0.0004	0.0029	0.0006	-0.39	29.5	2.5	51.0	20.0	1210.0	260.0	29.5	2.5	42.16
Zircon-066	74.2	67.3	0.91	0.0938	0.0099	0.0563	0.0052	0.0047	0.0002	0.0020	0.0001	-0.23	30.3	1.3	55.4	5.0	1430.0	140.0	30.3	1.3	45.34
Zircon-067	400	147.5	0.37	0.0589	0.0039	0.0345	0.0022	0.0043	0.0001	0.0016	0.0001	-0.12	27.4	0.7	34.5	2.1	533.0	78.0	27.4	0.7	20.61
Zircon-068	291	95.9	0.33	0.1036	0.0073	0.0623	0.0048	0.0045	0.0002	0.0033	0.0002	0.26	28.8	1.0	61.2	4.6	1620.0	100.0	28.8	1.0	52.94
Zircon-069	469	137	0.29	0.0609	0.0047	0.0363	0.0027	0.0044	0.0001	0.0018	0.0001	-0.31	28.3	0.8	37.1	2.6	669.0	74.0	28.3	0.8	23.85
Zircon-070	272	90.1	0.33	0.0560	0.0056	0.0337	0.0035	0.0043	0.0002	0.0017	0.0002	-0.05	27.3	1.0	33.6	3.4	620.0	120.0	27.3	1.0	18.75

Tabla 5. Zirrones de la muestra SPA-28

# Magmatismo y tectónica de la parte oriental de la zona de cizalla del Río Santiago, Jalisco

Muestra	CORRECTED RATIOS <sup>2</sup>											CORRECTED AGES (Ma)						Disc %			
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		±2σ	Best age (Ma)	±2σ
SPA-31																					
Zircon-071	172.2	64.4	0.37	0.0575	0.0054	0.0671	0.0065	0.0088	0.0002	0.0035	0.0002	0.45	56.6	1.5	67.9	6.0	622.0	91.0	56.6	1.5	16.64
Zircon-072	1360	422	0.31	0.0556	0.0027	0.0307	0.0016	0.0040	0.0001	0.0016	0.0001	-0.06	25.9	0.7	30.7	1.5	418.0	63.0	25.9	0.7	15.73
Zircon-073	173.1	67.2	0.39	0.0474	0.0048	0.0275	0.0033	0.0041	0.0002	0.0016	0.0001	0.29	26.7	1.0	27.5	3.2	380.0	110.0	26.7	1.0	3.09
Zircon-074	196.1	109.9	0.56	0.0646	0.0059	0.0379	0.0038	0.0044	0.0002	0.0017	0.0001	0.23	28.0	1.0	37.8	3.7	810.0	110.0	28.0	1.0	25.93
Zircon-075	187.9	111.4	0.59	0.0567	0.0068	0.0326	0.0040	0.0041	0.0002	0.0015	0.0002	-0.05	26.6	1.0	32.5	3.9	600.0	120.0	26.6	1.0	18.15
Zircon-076	82	63.7	0.78	0.1030	0.0140	0.0625	0.0088	0.0045	0.0002	0.0020	0.0002	-0.03	28.8	1.2	61.3	8.3	1810.0	1200	28.8	1.2	53.02
Zircon-077	247	71.9	0.29	0.0661	0.0052	0.0384	0.0030	0.0042	0.0001	0.0019	0.0002	-0.26	27.2	0.9	38.2	3.0	842.0	99.0	27.2	0.9	28.74
Zircon-078	869	207.5	0.24	0.0481	0.0027	0.0274	0.0016	0.0041	0.0001	0.0015	0.0001	0.06	26.3	0.6	27.4	1.6	219.0	50.0	26.3	0.6	4.05
Zircon-079	154	170	1.10	0.0685	0.0068	0.0425	0.0042	0.0046	0.0002	0.0017	0.0001	0.39	29.3	1.1	42.2	4.1	980.0	1600	29.3	1.1	30.52
Zircon-080	619	195	0.32	0.0553	0.0024	0.0320	0.0014	0.0042	0.0001	0.0017	0.0001	-0.15	26.7	0.7	32.0	1.4	383.0	69.0	26.7	0.7	16.47
Zircon-081	496	125.2	0.25	0.0479	0.0038	0.0279	0.0023	0.0042	0.0001	0.0019	0.0001	0.24	27.0	0.6	27.9	2.3	381.0	79.0	27.0	0.6	3.26
Zircon-082	551	142.4	0.26	0.0502	0.0035	0.0282	0.0019	0.0041	0.0001	0.0017	0.0001	-0.11	26.3	0.7	28.2	1.9	320.0	76.0	26.3	0.7	6.60
Zircon-083	359	121	0.34	0.0890	0.0100	0.0517	0.0070	0.0042	0.0002	0.0025	0.0004	0.25	27.3	1.1	51.2	7.4	1470.0	1400	27.3	1.1	46.68
Zircon-084	826	222	0.27	0.0485	0.0024	0.0278	0.0015	0.0042	0.0001	0.0015	0.0001	0.31	26.7	0.7	27.8	1.5	242.0	58.0	26.7	0.7	4.03
Zircon-085	572	174	0.30	0.0521	0.0032	0.0308	0.0020	0.0042	0.0001	0.0016	0.0001	-0.06	26.7	0.7	30.8	2.0	410.0	73.0	26.7	0.7	13.25
Zircon-086	314	106	0.34	0.0585	0.0059	0.0346	0.0037	0.0042	0.0001	0.0017	0.0002	-0.14	27.3	0.9	34.6	3.6	520.0	110.0	27.3	0.9	21.21
Zircon-087	337	72.4	0.24	0.1170	0.0130	0.0752	0.0090	0.0047	0.0002	0.0056	0.0007	-0.28	30.1	1.1	73.5	8.1	1950.0	880	30.1	1.1	59.05
Zircon-088	447	159	0.29	0.0513	0.0038	0.0299	0.0022	0.0042	0.0001	0.0016	0.0001	0.07	27.1	0.7	29.9	2.2	295.0	78.0	27.1	0.7	9.23
Zircon-089	397	256	0.64	0.0548	0.0038	0.0330	0.0022	0.0044	0.0001	0.0015	0.0001	-0.09	28.2	0.7	32.9	2.2	519.0	97.0	28.2	0.7	14.35
Zircon-090	613	176	0.29	0.0511	0.0026	0.0288	0.0017	0.0041	0.0001	0.0016	0.0001	0.25	26.5	0.6	28.8	1.7	430.0	57.0	26.5	0.6	7.92
Zircon-091	630	185	0.29	0.0497	0.0029	0.0280	0.0017	0.0041	0.0001	0.0016	0.0001	0.03	26.4	0.7	28.1	1.7	273.0	71.0	26.4	0.7	5.94
Zircon-092	174.3	109.7	0.63	0.0833	0.0076	0.0501	0.0048	0.0044	0.0002	0.0021	0.0001	0.12	28.2	0.9	51.0	4.6	1372.0	890	28.2	0.9	44.63
Zircon-093	494	207	0.42	0.0688	0.0070	0.0383	0.0047	0.0044	0.0001	0.0020	0.0002	0.12	26.9	0.9	38.1	4.5	960.0	1400	26.9	0.9	29.42
Zircon-094	69	41.6	0.60	0.1460	0.0160	0.1050	0.0110	0.0051	0.0003	0.0035	0.0004	-0.13	33.0	1.7	101.0	9.8	2421.0	920	33.0	1.7	67.33
Zircon-095	82	69.3	0.85	0.0970	0.0140	0.0578	0.0085	0.0046	0.0002	0.0019	0.0002	-0.09	29.5	1.2	56.8	8.2	1640.0	1500	29.5	1.2	48.06
Zircon-096	447	138.6	0.29	0.0764	0.0047	0.0457	0.0028	0.0043	0.0001	0.0030	0.0001	-0.13	27.2	0.7	45.3	2.7	1155.0	670	27.2	0.7	38.82
Zircon-097	405	174.4	0.43	0.0735	0.0044	0.0420	0.0028	0.0043	0.0001	0.0018	0.0001	-0.10	27.4	0.8	41.7	2.7	934.0	940	27.4	0.8	34.22
Zircon-098	592	166.3	0.28	0.0486	0.0028	0.0291	0.0019	0.0042	0.0001	0.0018	0.0001	0.31	26.8	0.7	29.1	1.8	291.0	70.0	26.8	0.7	7.87
Zircon-099	663	183	0.28	0.0507	0.0033	0.0284	0.0018	0.0041	0.0001	0.0017	0.0001	-0.12	26.2	0.7	28.5	1.8	395.0	61.0	26.2	0.7	7.96
Zircon-100	1236	441	0.36	0.0472	0.0023	0.0267	0.0014	0.0041	0.0001	0.0013	0.0000	0.15	26.1	0.6	26.8	1.4	217.0	50.0	26.1	0.6	2.69
Zircon-101	564	237	0.42	0.0602	0.0031	0.0364	0.0019	0.0043	0.0001	0.0016	0.0001	0.14	27.7	0.8	36.3	1.8	623.0	72.0	27.7	0.8	23.77
Zircon-102	1196	565	0.47	0.0483	0.0024	0.0273	0.0014	0.0041	0.0001	0.0014	0.0001	-0.07	26.1	0.6	27.4	1.4	295.0	58.0	26.1	0.6	4.85
Zircon-103	151	81.3	0.54	0.0690	0.0070	0.0410	0.0030	0.0046	0.0004	0.0022	0.0009	-0.23	29.3	1.4	41.0	25.0	870.0	3200	29.3	1.4	28.54
Zircon-104	128.2	162.9	1.27	0.0646	0.0085	0.0388	0.0045	0.0044	0.0002	0.0016	0.0001	-0.12	28.3	1.2	38.5	4.4	1050.0	190.0	28.3	1.2	26.49
Zircon-105	722	225	0.31	0.0474	0.0033	0.0263	0.0018	0.0040	0.0001	0.0015	0.0001	0.17	25.8	0.7	26.3	1.8	284.0	75.0	25.8	0.7	1.86

Tabla 6. Zirrones de la muestra SPA-31

Muestra	CORRECTED RATIOS <sup>2</sup>											CORRECTED AGES (Ma)						Disc %			
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		±2σ	Best age (Ma)	±2σ
SPA-07																					
Zircon-106	253	179	0.71	0.0655	0.0079	0.0377	0.0057	0.0042	0.0002	0.0016	0.0002	-0.01	26.9	1.2	37.5	5.5	770.0	130.0	26.9	1.2	28.27
Zircon-107	137.9	77.1	0.56	0.0810	0.0110	0.0520	0.0080	0.0047	0.0004	0.0030	0.0017	0.15	29.9	2.8	51.0	41.0	11900	3400	29.9	2.8	41.32
Zircon-108	638	844	1.32	0.0710	0.0120	0.0330	0.0120	0.0045	0.0002	0.0023	0.0003	0.49	28.9	1.1	100.0	10.0	2520.0	92.0	2520.0	92	74.10
Zircon-109	411	295	0.72	0.0935	0.0064	0.0529	0.0040	0.0042	0.0001	0.0019	0.0001	0.35	27.3	0.8	52.3	3.8	1562.0	96.0	27.3	0.8	47.56
Zircon-110	555	533	0.96	0.0723	0.0062	0.0418	0.0040	0.0042	0.0001	0.0017	0.0001	0.21	26.9	0.8	41.5	3.8	1030.0	100.0	26.9	0.8	35.44
Zircon-111	223	149	0.67	0.1104	0.0082	0.0700	0.0052	0.0047	0.0002	0.0026	0.0001	-0.03	30.4	1.2	68.6	4.9	1842.0	94.0	30.4	1.2	55.60
Zircon-112	294	254	0.86	0.1597	0.0073	0.1029	0.0051	0.0048	0.0001	0.0031	0.0002	-0.20	31.0	0.8	99.4	4.7	2438.0	720	2438.0	72	68.78
Zircon-113	358	306	0.85	0.1430	0.0130	0.0867	0.0096	0.0043	0.0002	0.0026	0.0002	0.57	27.5	1.0	84.0	9.1	2170.0	130.0	27.5	1.0	67.26
Zircon-114	170	87.9	0.52	0.1051	0.0097	0.0638	0.0057	0.0044	0.0002	0.0027	0.0001	0.17	28.0	1.0	62.7	5.4	1810.0	100.0	28.0	1.0	55.34
Zircon-115	359	333	0.93	0.1267	0.0084	0.0732	0.0060	0.0043	0.0001	0.0021	0.0001	-0.21	27.5	0.8	71.6	5.6	2099.0	92.0	2099.0	92	61.62
Zircon-116	150.5	63.2	0.42	0.0833	0.0095	0.0504	0.0053	0.0044	0.0002	0.0024	0.0002	0.15	28.3	1.1	49.8	5.0	1280.0	130.0	28.3	1.1	43.17
Zircon-117	314	184	0.59	0.0656	0.0070	0.0371	0.0045	0.0041	0.0002	0.0016	0.0002	0.05	26.1	0.9	37.0	4.4	810.0	130.0	26.1		

Muestra	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	CORRECTED RATIOS <sup>2</sup>						CORRECTED AGES (Ma)						Disc %					
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ
SPA-18c																					
Zircon-101	204.2	62.2	0.30	0.0960	0.0120	0.0382	0.0077	0.0044	0.0002	0.0027	0.0003	0.08	28.2	1.0	57.3	7.4	1460.0	210.0	28.2	1	50.79
Zircon-102	93.3	26.2	0.28	0.1620	0.0200	0.1110	0.0120	0.0050	0.0003	0.0045	0.0006	-0.16	32.1	1.9	106.0	11.0	2410.0	220.0	2410.0	220	60.72
Zircon-103	220.2	90	0.41	0.0960	0.0120	0.0584	0.0069	0.0042	0.0001	0.0026	0.0002	0.23	27.0	0.9	57.4	6.4	1530.0	190.0	27.0	1	53.00
Zircon-104	783	249	0.32	0.0555	0.0037	0.0301	0.0022	0.0040	0.0001	0.0015	0.0001	0.07	25.7	0.7	30.1	2.1	460.0	140.0	25.7	1	14.68
Zircon-105	110.4	61.6	0.56	0.1360	0.0230	0.0900	0.0190	0.0049	0.0004	0.0036	0.0009	0.17	31.3	2.4	87.0	17.0	2190.0	230.0	2190.0	230	64.02
Zircon-106	521	198	0.38	0.0646	0.0048	0.0373	0.0028	0.0043	0.0001	0.0021	0.0001	0.13	27.5	0.7	37.2	2.7	700.0	160.0	27.5	1	26.08
Zircon-107	180.9	57.2	0.32	0.0710	0.0130	0.0472	0.0069	0.0045	0.0002	0.0025	0.0003	-0.36	28.6	1.0	46.6	6.4	1090.0	280.0	28.6	1	38.43
Zircon-108	231	198	0.86	0.0928	0.0095	0.0534	0.0057	0.0041	0.0002	0.0018	0.0002	0.02	26.5	1.0	52.7	5.5	1400.0	190.0	26.5	1	49.72
Zircon-109	183.3	86.9	0.47	0.1260	0.0140	0.0676	0.0085	0.0040	0.0002	0.0029	0.0003	0.18	25.6	1.2	66.2	7.9	2080.0	180.0	2080.0	180	61.33
Zircon-110	223.6	157.8	0.71	0.2240	0.0260	0.1710	0.0240	0.0051	0.0002	0.0049	0.0005	0.64	34.9	1.4	159.0	20.0	2900.0	200.0	2900.0	200	78.05
Zircon-111	779	343.5	0.44	0.0499	0.0042	0.0284	0.0026	0.0041	0.0001	0.0014	0.0001	0.13	26.3	0.7	28.4	2.5	180.0	160.0	26.3	1	7.54
Zircon-112	105	60.7	0.58	0.1020	0.0310	0.0660	0.0230	0.0044	0.0003	0.0029	0.0007	0.41	28.5	2.1	64.0	20.0	1580.0	350.0	28.5	2	55.42
Zircon-113	246.9	92.4	0.37	0.0830	0.0100	0.0494	0.0064	0.0044	0.0002	0.0025	0.0003	-0.17	28.3	1.0	48.8	6.2	1280.0	200.0	28.3	1	42.01
Zircon-114	148.9	59.4	0.40	0.1240	0.0150	0.0830	0.0100	0.0049	0.0002	0.0040	0.0004	0.33	31.7	0.9	80.4	9.4	2040.0	220.0	2040.0	220	60.61
Zircon-115	282.8	110.1	0.39	0.0845	0.0079	0.0492	0.0046	0.0044	0.0002	0.0024	0.0002	-0.01	28.3	1.0	49.3	4.4	1230.0	180.0	28.3	1	42.54
Zircon-116	200.8	110.7	0.55	0.0731	0.0091	0.0394	0.0038	0.0040	0.0002	0.0019	0.0002	0.37	25.9	1.0	39.1	5.6	830.0	240.0	25.9	1	33.89
Zircon-117	266	258	0.97	0.0587	0.0083	0.0377	0.0050	0.0045	0.0001	0.0016	0.0001	-0.02	28.8	0.8	37.5	4.9	590.0	250.0	28.8	1	23.33
Zircon-118	251.7	129	0.51	0.0698	0.0070	0.0443	0.0042	0.0047	0.0002	0.0019	0.0001	-0.08	30.2	1.0	44.0	4.1	820.0	220.0	30.2	1	31.36
Zircon-119	322.3	201.8	0.63	0.0813	0.0091	0.0457	0.0056	0.0041	0.0001	0.0019	0.0002	-0.11	26.5	0.9	45.3	5.4	1210.0	200.0	26.5	1	41.52
Zircon-120	460	194.5	0.42	0.0682	0.0056	0.0410	0.0030	0.0042	0.0001	0.0020	0.0002	-0.09	26.9	0.8	40.8	2.9	920.0	150.0	26.9	1	34.00
Zircon-121	302	78.8	0.26	0.0525	0.0077	0.0313	0.0043	0.0042	0.0001	0.0017	0.0002	0.12	27.2	0.9	31.2	4.2	270.0	250.0	27.2	1	12.79
Zircon-122	675	326	0.48	0.0529	0.0045	0.0297	0.0024	0.0042	0.0001	0.0014	0.0001	-0.28	26.7	0.8	29.7	2.4	300.0	170.0	26.7	1	10.07
Zircon-123	471	208.6	0.44	0.0809	0.0099	0.0450	0.0063	0.0042	0.0001	0.0020	0.0003	0.02	26.7	0.8	44.6	6.0	1140.0	200.0	26.7	1	40.09
Zircon-124	259.7	166.9	0.64	0.0863	0.0093	0.0498	0.0053	0.0043	0.0001	0.0020	0.0002	-0.18	27.6	0.9	49.2	5.1	1260.0	180.0	27.6	1	43.96
Zircon-125	651	239.5	0.37	0.0493	0.0037	0.0300	0.0022	0.0044	0.0001	0.0017	0.0001	-0.19	28.1	0.8	30.0	2.2	190.0	150.0	28.1	1	6.40
Zircon-126	114.8	65.1	0.57	0.0580	0.0140	0.0348	0.0080	0.0045	0.0002	0.0015	0.0002	0.13	28.8	1.5	34.5	7.8	470.0	380.0	28.8	2	16.52
Zircon-127	545	349	0.64	0.0580	0.0054	0.0305	0.0028	0.0038	0.0001	0.0014	0.0001	-0.44	24.6	0.8	30.5	2.6	500.0	190.0	24.6	1	19.28
Zircon-128	1118	673	0.60	0.0862	0.0058	0.0438	0.0029	0.0038	0.0001	0.0016	0.0001	-0.03	24.2	0.6	43.5	2.8	1300.0	120.0	24.2	1	44.46
Zircon-129	499	144.1	0.29	0.0676	0.0056	0.0401	0.0034	0.0044	0.0001	0.0023	0.0002	-0.02	28.3	0.7	39.9	3.3	820.0	160.0	28.3	1	29.02
Zircon-130	167.3	89	0.53	0.2800	0.0180	0.2520	0.0180	0.0068	0.0003	0.0094	0.0006	0.36	43.5	1.6	228.0	15.0	3346.0	99.0	3346.0	99	80.92
Zircon-131	986	503	0.51	0.0542	0.0037	0.0310	0.0020	0.0041	0.0001	0.0014	0.0001	0.18	26.5	0.7	30.9	1.9	380.0	150.0	26.5	1	14.21
Zircon-132	178	116	0.65	0.0740	0.0110	0.0462	0.0072	0.0043	0.0002	0.0020	0.0002	0.03	27.9	1.1	45.6	7.0	1010.0	330.0	27.9	1	38.82
Zircon-133	142	94	0.66	0.1200	0.0140	0.0770	0.0089	0.0047	0.0002	0.0026	0.0003	0.11	30.4	1.3	76.4	8.0	1950.0	230.0	30.4	1	60.21
Zircon-134	476	218.4	0.46	0.0472	0.0047	0.0284	0.0027	0.0044	0.0001	0.0015	0.0001	-0.14	28.2	0.8	28.4	2.7	130.0	190.0	28.2	1	0.85
Zircon-135	1024	310	0.30	0.0561	0.0031	0.0310	0.0019	0.0040	0.0001	0.0016	0.0001	0.30	25.5	0.6	31.0	1.9	440.0	120.0	25.5	1	17.65

Tabla 8. Zircones de la muestra SPA-18C

# Magmatismo y tectónica de la parte oriental de la zona de cizalla del Río Santiago, Jalisco

Muestra	CORRECTED RATIOS <sup>2</sup>			CORRECTED AGES (Ma)										Disc %							
	U (ppm) <sup>1</sup>	Th (ppm) <sup>1</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ abs	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±2σ abs	<sup>206</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	±2σ abs	Rho	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		±2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±2σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±2σ	Best age (Ma)	±2σ
SPA-05																					
Zircon-136	651	325.4	0.50	0.0870	0.0100	0.0560	0.0065	0.0048	0.0001	0.0025	0.0002	0.11	30.6	0.8	55.3	6.1	1350.0	170.0	30.6	±	44.62
Zircon-137	128	85.5	0.67	0.0460	0.0084	0.0274	0.0053	0.0044	0.0002	0.0015	0.0001	0.40	28.3	1.3	27.3	5.2	40.0	300.0	28.3	1	-3.66
Zircon-138	536	241	0.45	0.1720	0.0560	0.1200	0.1200	0.0049	0.0012	0.0047	0.0036	-0.06	31.6	7.4	112.0	84.0	2520.0	280.0	2520.0	280	21.79
Zircon-139	1282	594	0.46	0.0488	0.0031	0.0287	0.0018	0.0043	0.0001	0.0014	0.0001	0.03	27.8	0.6	28.7	1.7	140.0	130.0	27.8	1	3.14
Zircon-140	173	78	0.45	0.1072	0.0098	0.0653	0.0060	0.0047	0.0002	0.0028	0.0002	-0.07	30.2	1.2	64.2	5.7	1660.0	180.0	30.2	±	52.96
Zircon-141	1300	628	0.48	0.0613	0.0035	0.0355	0.0022	0.0041	0.0001	0.0017	0.0001	0.29	26.6	0.6	35.4	2.1	650.0	110.0	26.6	1	24.75
Zircon-142	636	313.8	0.49	0.0971	0.0065	0.0619	0.0042	0.0046	0.0001	0.0028	0.0002	0.05	39.8	0.7	60.9	4.0	1550.0	100.0	39.8	±	51.47
Zircon-143	237	171	0.72	0.0684	0.0094	0.0428	0.0057	0.0044	0.0002	0.0016	0.0002	0.13	28.3	1.0	42.4	5.7	770.0	210.0	28.3	1	33.25
Zircon-144	788	386	0.49	0.0650	0.0054	0.0388	0.0032	0.0043	0.0001	0.0017	0.0001	-0.21	27.7	0.7	38.7	3.1	710.0	160.0	27.7	1	28.50
Zircon-145	1400	680	0.49	0.0516	0.0033	0.0314	0.0019	0.0043	0.0001	0.0015	0.0001	-0.01	27.9	0.6	31.4	1.9	260.0	130.0	27.9	1	11.31
Zircon-146	268	129.7	0.48	0.0958	0.0083	0.0628	0.0053	0.0048	0.0002	0.0026	0.0002	0.29	31.1	1.1	62.7	5.1	1530.0	160.0	31.1	±	50.40
Zircon-147	654	284.2	0.43	0.0550	0.0079	0.0335	0.0048	0.0043	0.0001	0.0016	0.0002	-0.05	27.8	0.8	33.4	4.7	440.0	240.0	27.8	1	16.74
Zircon-148	574	240.1	0.42	0.1970	0.0620	0.1500	0.2000	0.0054	0.0018	0.0062	0.0079	0.79	34.0	11.0	140.0	110.0	2760.0	270.0	2760.0	270	25.71
Zircon-149	625	285.9	0.46	0.0511	0.0053	0.0307	0.0033	0.0044	0.0001	0.0016	0.0001	-0.03	28.2	0.7	30.7	3.3	260.0	190.0	28.2	1	8.27
Zircon-150	694	324	0.47	0.0614	0.0046	0.0381	0.0029	0.0045	0.0001	0.0018	0.0001	-0.15	29.2	0.7	37.9	2.8	660.0	150.0	29.2	1	22.98
Zircon-151	1152	550	0.48	0.0511	0.0031	0.0301	0.0018	0.0043	0.0001	0.0015	0.0001	0.09	27.7	0.6	30.1	1.7	230.0	120.0	27.7	1	8.14
Zircon-152	2034	1091	0.54	0.1400	0.0150	0.0930	0.0140	0.0048	0.0002	0.0035	0.0005	0.36	30.7	1.0	90.0	13.0	2230.0	130.0	2230.0	130	65.89
Zircon-153	1380	695	0.50	0.0626	0.0057	0.0377	0.0034	0.0044	0.0001	0.0017	0.0001	-0.06	28.2	0.7	37.6	3.3	640.0	140.0	28.2	1	24.92
Zircon-154	275	138.9	0.51	0.0739	0.0072	0.0487	0.0053	0.0046	0.0002	0.0018	0.0002	0.32	39.5	1.0	48.2	5.1	1060.0	190.0	39.5	±	38.80
Zircon-155	455	211	0.46	0.1900	0.0800	0.1000	1.0000	0.0051	0.0088	0.0048	0.0094	0.54	33.0	54.0	130.0	280.0	2700.0	310.0	2700.0	310	74.62
Zircon-156	528	281.8	0.53	0.0586	0.0045	0.0356	0.0026	0.0044	0.0001	0.0016	0.0001	-0.17	28.5	0.7	35.5	2.6	540.0	160.0	28.5	1	19.86
Zircon-157	386	188.5	0.49	0.0677	0.0061	0.0415	0.0038	0.0044	0.0001	0.0018	0.0001	0.00	28.6	0.9	41.3	3.7	840.0	170.0	28.6	1	30.85
Zircon-158	633	306	0.48	0.0646	0.0057	0.0369	0.0036	0.0041	0.0001	0.0017	0.0001	0.09	26.6	0.8	36.7	3.5	770.0	140.0	26.6	1	27.66
Zircon-159	1129	417	0.37	0.0495	0.0033	0.0289	0.0019	0.0043	0.0001	0.0015	0.0001	0.13	27.6	0.6	28.9	1.9	170.0	140.0	27.6	1	4.36
Zircon-160	524	257.6	0.49	0.0777	0.0075	0.0465	0.0046	0.0044	0.0001	0.0020	0.0002	0.13	28.0	0.8	46.1	4.4	1190.0	160.0	28.0	1	39.37
Zircon-161	793	370	0.47	0.0641	0.0042	0.0382	0.0025	0.0043	0.0001	0.0018	0.0001	0.00	27.7	0.7	38.0	2.4	720.0	140.0	27.7	1	27.00
Zircon-162	637	270	0.42	0.0592	0.0053	0.0339	0.0030	0.0041	0.0001	0.0017	0.0001	0.33	26.5	0.7	33.8	3.0	570.0	180.0	26.5	1	21.48
Zircon-163	2132	1116	0.52	0.0492	0.0026	0.0293	0.0016	0.0043	0.0001	0.0014	0.0001	0.00	27.6	0.5	29.4	1.6	150.0	110.0	27.6	1	6.09
Zircon-164	663	317.1	0.48	0.0555	0.0048	0.0329	0.0027	0.0043	0.0001	0.0016	0.0001	-0.14	27.3	0.7	32.8	2.6	420.0	170.0	27.3	1	16.74
Zircon-165	985	510	0.52	0.0576	0.0037	0.0334	0.0024	0.0042	0.0001	0.0015	0.0001	0.11	27.1	0.7	33.4	2.3	550.0	140.0	27.1	1	18.83
Zircon-166	1700	701	0.41	0.1128	0.0052	0.0746	0.0039	0.0048	0.0001	0.0034	0.0002	0.27	30.6	0.6	73.0	3.7	1827.0	93.0	30.6	±	58.12
Zircon-167	642	249	0.39	0.0876	0.0082	0.0514	0.0051	0.0043	0.0001	0.0025	0.0003	0.52	27.6	0.8	51.9	4.9	1380.0	160.0	27.6	1	46.84
Zircon-168	394	211	0.54	0.0604	0.0059	0.0369	0.0037	0.0043	0.0001	0.0016	0.0001	0.24	27.4	0.7	36.7	3.7	610.0	200.0	27.4	1	25.23
Zircon-169	1638	741	0.45	0.0577	0.0034	0.0328	0.0019	0.0041	0.0001	0.0015	0.0001	0.30	26.5	0.6	32.7	1.9	490.0	130.0	26.5	1	19.02
Zircon-170	222	282	0.39	0.1017	0.0073	0.0636	0.0045	0.0045	0.0001	0.0029	0.0002	0.21	28.8	0.7	62.5	4.3	1610.0	110.0	28.8	±	53.94

Tabla 9. Zirrones de la muestra SPA-5

## Datos estructurales

A continuación se presentan los datos obtenidos en campo de cada uno de los planos de fallas medidos por estación.

Estación	1	
Rumbo	Echado	Pitch
320	76	90
265	38	119
25	58	
331	71	140
119	57	
295	45	60
310	48	140
314	60	90
352	68	0

Tabla 10. Fallas medidas de la estación 1

Estación	12	
Rumbo	Echado	Pitch
170	65	
320	70	
144	54	
140	64	80
192	53	70
310	83	
178	54	
183	65	
355	45	60
122	71	
335	82	30
252	80	

Tabla 11. Fallas medidas de la estación 12

Estación	20	
Rumbo	Echado	Pitch
30	21	
334	82	
73	57	100
50	68	0
35	55	90
0	80	95
235	33	
225	70	
235	80	140
122	90	120
345	68	70
102	90	160
85	25	110
78	85	
110	68	

Tabla 12. Fallas medidas de la estación 20

Estación	24	
Rumbo	Echado	Pitch
0	68	70
180	65	
270	70	90
310	65	120
340	60	
100	55	
40	65	70
316	51	98
209	82	125
358	64	112
210	67	35
308	56	125

Tabla 13. Fallas medidas de la estación 24

Estación	1.2	
Rumbo	Echado	Pitch
120	56	60
320	56	50
265	50	70
40	85	115
85	70	55
263	64	50

Tabla 14. Fallas medidas de la estación 1.2

Estación	25	
Rumbo	Echado	Pitch
155	88	
153	70	
340	90	45
330	85	70
31	69	67
130	80	
305	66	70
315	83	82

Tabla 15. Fallas medidas de la estación 25

Estación	34	
Rumbo	Echado	Pitch
215	70	100
215	55	50
322	80	
235	84	
265	66	
240	73	75
25	85	95
119	69	

Tabla 16. Fallas medidas de la estación 34

Estación	35	
Rumbo	Echado	Pitch
336	86	
305	83	
335	75	
135	70	
176	36	
330	76	
5	65	
120	70	
161	90	
190	55	100
186	79	90

Tabla 17. Fallas medidas de la estación 35