

Universidad Nacional Autónoma de México



Centro de Geociencias, Campus Juriquilla
Posgrado en Ciencias de la Tierra



**La Ignimbrita Alacrán, Bolaños, Jalisco. Características Físicas y
Distribución.**

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias de la Tierra
(Vulcanología)

Presenta:

Isaac Gutiérrez Palomares

Director de Tesis:
Dr. Gerardo de Jesús Aguirre Díaz

2008

A mi familia:

Padres

*Jorge Gutiérrez Escudero
Ma. de la Paz Palomares Calderón*

Hermanos

*Jorge Gutiérrez Palomares
Jessica Gutiérrez Palomares*

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que de manera directa o indirectamente han contribuido al desarrollo de mis estudios de maestría:

A mi asesor el Dr. Gerardo de Jesús Aguirre Díaz, por haberme dado la posibilidad de trabajar con él y con su equipo de trabajo, así como por el apoyo y la confianza que me brindó siempre.

A CONACYT, por haberme otorgado la beca con número de registro 195620 durante los primeros 2 años de mi estancia en el posgrado. También quiero agradecer al programa del proyecto CONACYT 46005P por haberme otorgado una beca como asistente del proyecto “Las Ignimbritas de gran volumen del Terciario medio en México, provincia de la Sierra Madre Occidental y rocas similares dentro y al sur del Cinturón Volcánico Mexicano. Origen, naturaleza y relación con yacimientos minerales hidrotermales”, a cargo del Dr. Gerardo de Jesús Aguirre Díaz, la cual permitió la conclusión de esta tesis de maestría.

A todas las personas que contribuyeron con sus comentarios y sugerencias para el mejoramiento de ésta tesis, muchas gracias a los revisores: Dr. José Jorge Aranda, Dr. Eduardo González Partida, Dr. Alfredo Aguillón Robles y Dr. Ricardo Saucedo Girón. Así mismo extendiendo mi agradecimiento al Dr. Gerardo Carrasco Núñez por sus valiosos comentarios durante los exámenes interanuales, al Dr. Roberto Molina Garza por haberme enseñado la técnica de obtención y procesamiento de muestras, así como el manejo y la interpretación de los datos obtenidos para los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS), y por haber hecho las correcciones correspondientes al capítulo de AMS.

Al técnico del laboratorio de laminación del CGEO Juan Tomás Vásquez Ramírez, por la preparación de las láminas delgadas, al técnico del laboratorio de molienda y pulverizado del CGEO Manuel Albarán Murillo por la ayuda otorgada en el trabajo de molienda y pulverizado.

Al Ing. Javier de la Vega, responsable de la mina de Bolaños perteneciente al Grupo Minera México, por todo el apoyo logístico y de hospedaje otorgado durante mis visitas al área de estudio. Así mismo agradezco a José Luís (chepe), Reinaldo y Jorge (balín) por las facilidades otorgadas durante mi estancia en Bolaños.

Al Ing. José Luís Medina, de la compañía minera El Pílon, por su disposición y ayuda durante mis visitas a San Martín de Bolaños.

A mis compañeros y amigos José Luís (pepe), por su valiosa ayuda y compañía durante las temporadas de campo allá en Bolaños, así como por enseñarme la técnica para la obtención de muestras orientadas para los análisis de AMS, a Javier (Javi) también por su ayuda en campo y por haberme ayudado en la obtención del VERD. También agradezco al Ing. Jorge Nieto Obregón por sus valiosos comentarios y ayuda otorgados, pero sobre todo por brindarme su amistad.

A todo el personal administrativo y de la biblioteca del CGEO, por su disponibilidad y ayuda otorgada en mi estancia en el campus. También agradezco a todos los profesores

que me dieron clases en el postgrado, los cuales contribuyeron enormemente a mi desarrollo académico.

A todos los compañeros y amigos del CGEO, los cuales fueron parte fundamental en mi estancia en la ciudad de Querétaro, gracias por compartir tantos momentos de ocio y trabajo.

Quiero agradecer de forma muy especial a Laura por todos los momentos y enseñanzas que hemos compartido desde que estamos juntos. *Grazie di nuovo amore mio!*

Finalmente, debo agradecer a mis padres y hermanos por todo el apoyo incondicional y la confianza que me han brindado durante toda la vida, también por soportar todas mis locuras, **¡gracias por creer en mí!**

Índice

Resumen	i
Abstract	iii
Capítulo I.- Introducción	1
I.1 Localización de la zona de estudio	1
I.2 Objetivos	2
I.3 Metodología	2
I.3.1 Etapa pre-exploratoria	2
I.3.2 Etapa exploratoria	3
I.3.3 Etapa post-exploratoria	4
Capítulo II.- Marco geológico	6
II.1 Características generales de la Sierra Madre Occidental	6
II.1.1 Química de las rocas	7
II.1.2 Complejo volcánico inferior	7
II.1.3 Inconformidades entre las secuencias ígneas	8
II.1.4 Supergrupo volcánico superior	9
II.2 Estudios previos en el área del graben de Bolaños	13
II.2.1 Estratigrafía del área de estudio	13
Secuencia inferior de ignimbritas	14
Flujos de lava Guásima	15
Grupo Huichol	15
Depósitos volcanoclasticos del Terciario tardío al Cuaternario	17
Flujos de lava basáltica Mesa Prieta y Ranchito (T-Qb)	18
Depósitos de Flujos de lahares (T-Q1a)	18
Aluviones Cuaternarios (Qal)	18
II.2.2 Características estructurales	20
II.2.3 Evolución del graben de Bolaños	21
Capítulo III.- Ignimbrita Alacrán y litologías asociadas	24
III.1 Secuencia basal pre-ignimbrita	24
III.2 Ignimbrita Alacrán	30
III.2.1 Brecha co-ignimbrítica de rezago	32
III.2.2 Depósito principal	36
III.3 Domos riolíticos post-ignimbrita	41

III.4 Edad de la ignimbrita Alacrán	42
III.5 Área de cobertura y volumen mínimo estimado de la ignimbrita Alacrán	43
III.5.1 Cálculo del volumen equivalente de roca densa (VERD)	51
III.6 Correlación estratigráfica	52
Capítulo IV.- Anisotropía de Susceptibilidad Magnética	56
IV. 1 Descripción del método	56
IV.2 Obtención de muestras	57
IV.3 Procesamiento de las muestras	60
IV.4 Resultados	63
Capítulo V.- Interpretación	74
V.1 Interpretación de los datos de campo	74
V.2 Discusión de resultados de AMS e interpretación	77
Capítulo VI.- Conclusiones	82
Referencias bibliográficas	84
Anexo 1.- Mapa de afloramientos de la ignimbrita Alacrán	88
Anexo 2.- Ubicación geográfica de las muestras	89
Anexo 3.- Ubicación geográfica de secciones estratigráficas	93
Anexo 4.- Gráfica de espectro de edad para la ignimbrita Alacrán.	94

Resumen

La ignimbrita Alacrán, con una edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de ~25 Ma, está ubicada en la porción septentrional del estado de Jalisco y pertenece al sector sur de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental. Aflora en los alrededores del graben de Bolaños extendiéndose lateralmente hacia ambos lados de éste.

La ignimbrita Alacrán tiene espesores de 200 y 350 m en las facies proximales del lado occidental y oriental del graben de Bolaños, respectivamente, y se adelgaza progresivamente hacia el Oeste y el Este alcanzando espesores de ~150 m en las facies más distales que se pudieron medir, a 15-17 km de distancia de las márgenes del graben. Para los afloramientos conocidos de esta ignimbrita se calculó un volumen probable equivalente de roca densa mínimo de 571 km^3 , pero es posible que llegara a tener al menos el doble de este volumen. Esta es la primera vez que se determina la distribución y volumen de una ignimbrita de la Sierra Madre Occidental mediante la medición y correlación de secciones estratigráficas.

Con base en este estudio la ignimbrita Alacrán se define como una secuencia piroclástica estratificada con dos miembros principales, 1) una brecha-co-ignimbrítica de rezago, y 2) el depósito principal. La brecha co-ignimbrítica se caracteriza por su gran contenido de líticos riolíticos y andesíticos de hasta 1.5 m de diámetro, mientras que el depósito principal está conformado por una sucesión de ignimbritas y depósitos de oleadas piroclásticas. La sección tipo de la ignimbrita Alacrán, que se define en la sección El Águila en la margen Este del graben de Bolaños, y las secciones auxiliares medidas en otros sitios cercanos al graben, proporcionan la información necesaria sobre las características físicas, espesor y distribución de la ignimbrita. En facies proximales, las ignimbritas presentan abundancia de clastos angulosos de pómez blanca-amarilla de hasta 40 cm de diámetro, así como líticos riolíticos y andesíticos de hasta 40 cm de diámetro, y una matriz de abundante ceniza de pómez y escasos cristales de cuarzo y sanidino. Los depósitos de oleadas presentan líticos y clastos de pómez de tamaño de ceniza fina a gruesa, en una secuencia de capas delgadas que forman una estructura de estratificación cruzada.

Con base en un trabajo sistemático de estratigrafía volcánica, observaciones geológicas detalladas, y resultados de anisotropía de susceptibilidad magnética, se confirma

que la secuencia piroclástica de la ignimbrita Alacrán fue emitida desde fisuras asociadas a las fallas del graben de Bolaños, como ya se había reportado anteriormente por otros autores.

Abstract

The Alacrán ignimbrite, with an $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of ~25 Ma, is located in the northern portion of the Mexican state of Jalisco within the southern sector of the Sierra Madre Occidental volcanic province. It crops out in the surrounding area of the Bolaños graben, and it is distributed laterally along, and perpendicularly from, the two margins of the graben.

The Alacrán ignimbrite displays a thickness of respectively 200 and 350 m in the proximal facies of the western and eastern flanks of the Bolaños graben. It becomes progressively thinner towards the West and the East reaching a thickness of ~150 m in the most distal facies that were possible to be measured, at a distance of 15-17 km from the margins of the graben. A probable minimum dense rock equivalent volume of 571 km³ was calculated for this ignimbrite, even though the possible volume may be at least the double of the calculated value. This is the first time that the distribution and volume of an ignimbrite of the Sierra Madre Occidental are calculated by measuring and correlating stratigraphic sections, and by determining the dense rock equivalence by direct density measurements.

From this study, the Alacrán ignimbrite is defined as a bedded pyroclastic sequence with two main members, 1) a co-ignimbrite lithic lag breccia, and 2) the main deposit. The type section of the Alacrán ignimbrite is defined at El Águila site, on the eastern margin of the Bolaños graben, which together with several other auxiliary stratigraphic sections, provide the physical characteristics and distribution of this ignimbrite. The co-ignimbritic breccia is characterized by abundant rhyolitic and andesitic lithics with diameters up to 1.5 m, whereas the main deposit is made of a succession of ignimbrites and pyroclastic surge deposits. In the proximal facies, these ignimbrites show abundance of angular clasts of white-yellow pumice that reach 40 cm in diameter, as well as rhyolitic and andesitic lithics with diameters up to 40 cm, and a groundmass made of abundant pumice ash and scarce quartz and sanidine. Surge deposits contain fine to coarse ash-sized lithics and pumice clasts, in a sequence of thin layers with cross-bedding.

On the basis of a systematic work of volcanic stratigraphy, detailed geologic observations, and anisotropy of magnetic susceptibility results (AMS), it is confirmed that

the pyroclastic sequence of the Alacrán ignimbrite was erupted through fissures that were associated to the faults of the Bolaños graben, as other authors previously reported.

Capítulo I.- Introducción

1.1 Localización de la zona de estudio

El área de estudio se localiza entre la parte norte del estado de Jalisco y la parte sur del estado de Zacatecas. Esta zona se encuentra dentro de la porción sur de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, delimitada entre las coordenadas $22^{\circ} 00'$ y $21^{\circ} 30'$ latitud Norte, $104^{\circ} 00'$ y $103^{\circ} 20'$ longitud Oeste (Fig. 1).

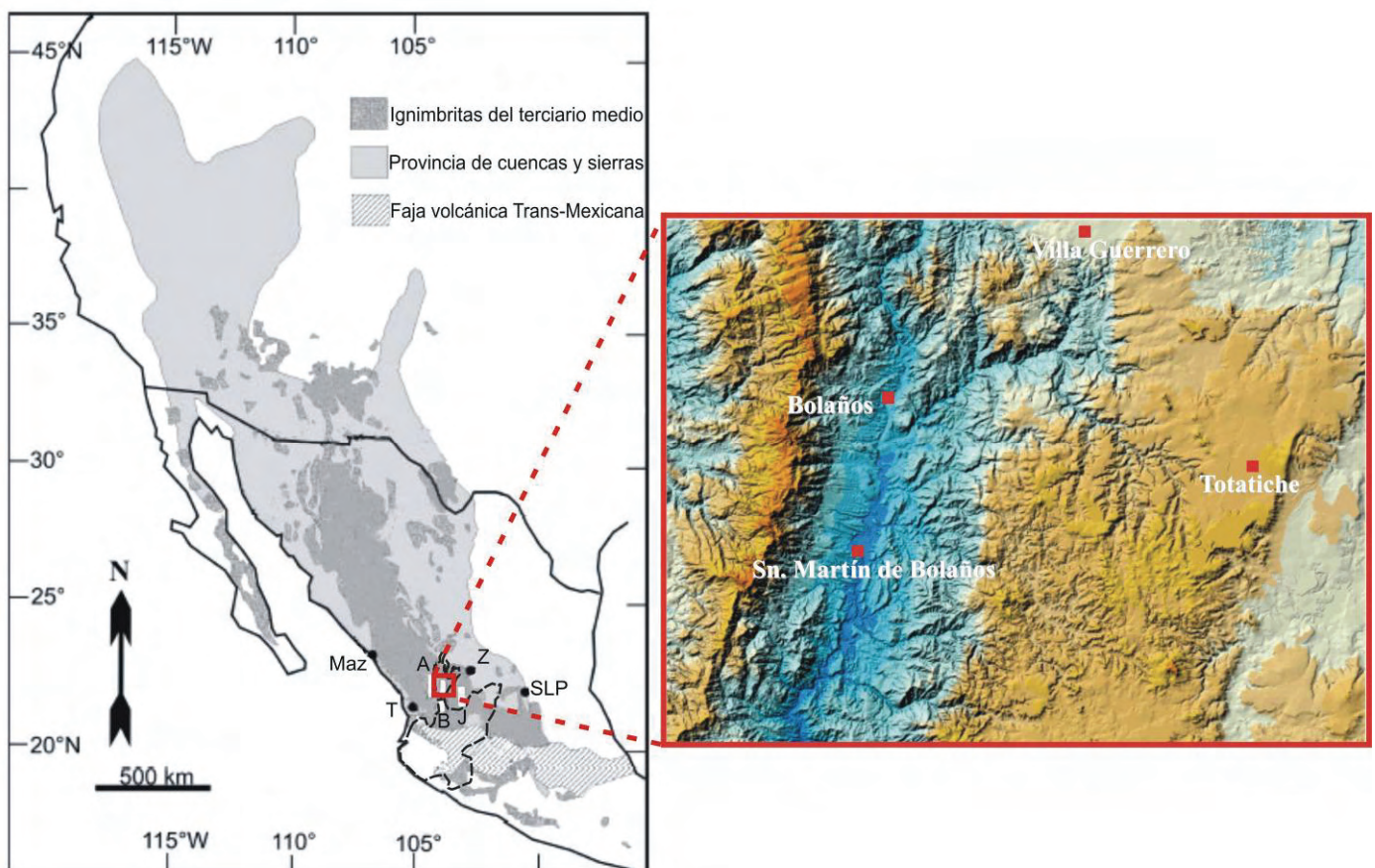


Figura 1.- Mapa de localización de la zona de estudio. El recuadro de la derecha es una imagen digital de relieve donde los tonos que van hacia el azul indican las zonas topográficamente más bajas y los tonos que van hacia el naranja indican las zonas más altas. También se indican con recuadros color rojo los poblados más importantes de la zona. En el mapa de la izquierda se representan con barras blancas las depresiones tectónicas de A-graben de Atengo, B-graben de Bolaños y J-graben de Juchipila; y con círculos negros se representan ciudades: Maz-Mazatlán, T-Tepic, Z-Zacatecas, SLP-San Luis Potosí. La línea discontinua color negro representa el estado de Jalisco (modificado de Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003).

1.2 Objetivos

- Determinar las características físicas de la ignimbrita Alacrán, tales como su distribución, extensión, volumen, componentes, grado de soldamiento, cambios de facies tanto verticales como laterales, y su relación estratigráfica con las litologías adyacentes.
- Llevar a cabo la cartografía geológica de la ignimbrita Alacrán.
- Integrar la información geológica-geocronológica-paleomagnética para inferir en la medida de lo posible la fuente de la ignimbrita Alacrán.

1.3 Metodología

La realización de este trabajo puede dividirse en tres etapas principales, las cuales son:

- Etapa pre-exploratoria
- Etapa exploratoria
- Etapa post-exploratoria

1.3.1 Etapa pre-exploratoria

Esta etapa consistió en realizar una recopilación bibliográfica de la literatura científica referente tanto a la zona de estudio como a las áreas adyacentes, buscando principalmente los artículos y libros relacionados con los temas que se desarrollaron en el presente trabajo. También se recopilaron fotografías aéreas a escala 1: 75,000 las cuales cubrieron gran parte del área de interés, y 1: 20,000 que cubrieron el graben de Bolaños; éstas últimas fueron proporcionadas por el personal de la mina de Bolaños. Las fotografías aéreas sirvieron para hacer un estudio fotogeológico del área, el cual consistió en la localización de estructuras volcánicas mayores, en identificar la presencia de fallas, en delimitar contactos geológicos, etc. Con esta información se realizó un mapa fotogeológico

preliminar con el fin de localizar sitios de interés para las temporadas de campo. Este mapa se realizó sobre las cartas de INEGI a escala 1:50,000 de Chimaltitán (F13D14), Villa Guerrero (F13D15), San Martín de Bolaños (F13D24), e Ignacio Allende (F13D25) (INEGI, 2002a, 2002b, 2003a, 2002c). También se realizó exploración geológica en las cartas Tlaltenango de Sánchez Román (F13D16) y Tepechitlán (F13D26) (INEGI, 2002d, 2002e) con la finalidad de encontrar afloramientos correlacionables con la ignimbrita Alacrán.

1.3.2 Etapa exploratoria

En la etapa exploratoria se realizaron 7 campañas de verificación, contabilizándose un total de 110 días de trabajo de campo. Las actividades que se desarrollaron en el campo fueron las siguientes:

- Exploración del área de estudio con la finalidad de encontrar afloramientos pertenecientes a la ignimbrita Alacrán, marcar los contactos con las litologías adyacentes, así como definir su relación estratigráfica con las unidades subyacentes y sobreyacentes.
- Recolección sistemática de muestras de roca de los diferentes niveles estratigráficos que conforman la ignimbrita Alacrán, identificando cambios de facies tanto verticales como laterales. También se tomaron muestras de roca de las unidades adyacentes a la ignimbrita para fines comparativos y de correlación. De esta manera se obtuvieron 152 muestras de roca de aproximadamente 30 cm de diámetro con la ayuda de un marro, una pica de geólogo y un cincel.
- Se tomaron muestras de núcleos de roca para análisis paleomagnéticos con la ayuda de un equipo de perforación.
- Verificación, definición y mapeo de estructuras volcánicas mayores, fallas y alineamientos así como su extensión y distribución dentro del área de estudio.
- Descripción de secciones litoestratigráficas de la ignimbrita Alacrán, con el fin de poder determinar sus características y, en la medida de lo posible, su extensión mediante correlación estratigráfica.

1.3.3 Etapa post-exploratoria

En esta etapa se integró toda la información recolectada en las etapas anteriores, se procesaron las muestras obtenidas en campo mediante diferentes técnicas, y se obtuvieron los resultados correspondientes. Los procesos realizados a las muestras se describen a continuación.

Análisis petrográfico

Se seleccionaron 42 muestras de roca para análisis petrográfico de láminas delgadas. La mayoría de las muestras analizadas pertenecen a la ignimbrita Alacrán y a los domos de lava relacionados, aunque también se seleccionaron muestras de roca correspondientes a depósitos subyacentes y sobreyacentes a la ignimbrita Alacrán con fines comparativos, y para tener un mejor conocimiento de las características petrográficas de las diferentes unidades que afloran en el área de estudio.

Utilizando una sierra, se cortaron almohadillas de roca con dimensiones de 10 cm largo, 5 cm de ancho, y 5 cm de espesor de las muestras seleccionadas; posteriormente se llevaron al laboratorio de laminación donde el trabajo estuvo a cargo de Juan Tomás Vázquez Ramírez, del personal de laminación del Centro de Geociencias, UNAM. Una vez listas, las láminas delgadas se analizaron con la ayuda de un microscopio petrográfico.

Los análisis petrográficos se realizaron con la finalidad de identificar las características texturales, la paragénesis, el tipo de matriz y otras características de las muestras de roca, y reconocer los cambios que pudieran presentarse en las diferentes facies de la ignimbrita Alacrán.

Análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética

Se colectaron muestras para análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética en 17 sitios distribuidos en el área de estudio. Este tipo de análisis es útil para determinar las direcciones de flujo en los sitios muestreados, estimar la procedencia del flujo con la ayuda

de las observaciones de campo, e inferir en la medida de lo posible la fuente que dio origen a los depósitos estudiados. La metodología utilizada se describe en el Capítulo IV- Anisotropía de Susceptibilidad Magnética.

Capítulo II.- Marco geológico

II.1 Características generales de la Sierra Madre Occidental

La margen sur-occidental del continente norteamericano contiene ignimbritas ampliamente distribuidas, emplazadas durante varios episodios de actividad volcánica. Los dos periodos más jóvenes de actividad en la Sierra Madre Occidental de México están documentados por mapeo geológico, acompañados por análisis de elementos mayores y determinaciones de edades isotópicas en los estados de Sinaloa, Durango, Chihuahua, y Sonora (McDowell y Clabaugh, 1979).

El primero de estos dos episodios ígneos está representado por ignimbritas, lavas y batolitos compuestos. Las edades determinadas por Henry (1975) para las rocas batolíticas en Sinaloa dan un rango desde el Cretácico Tardío hasta el Terciario Temprano (102 a 45 Ma). Las rocas intrusivas son similares en composición a acumulaciones gruesas de rocas volcánicas, aunque estas rocas están demasiado alteradas para obtener fechamientos por el método K-Ar. Las rocas batolíticas y las rocas extrusivas asociadas han sido nombradas como el “complejo volcánico inferior” (McDowell y Keizer, 1977).

Una extensa secuencia de ignimbritas intercaladas con flujos de lavas y sedimentos epiclásticos tobáceos sobreyacen el complejo volcánico inferior y forman la capa superior de la Sierra Madre Occidental. Esta gran acumulación de rocas volcánicas del Terciario Medio ha sido designada como el “supergrupo volcánico superior” (McDowell y Keizer, *op. cit.*). Éste es comparable con depósitos piroclásticos de flujo de cenizas y rocas asociadas de edad similar que cubren áreas amplias del occidente de los Estados Unidos (McDowell y Clabaugh, 1979).

En el occidente de México estos dos grupos ígneos ocupan áreas similares, y se pueden identificar a través de la mayor parte de la Sierra Madre Occidental. Ambos están aproximadamente paralelos a la margen occidental del continente.

Adicionalmente, se pueden encontrar rocas volcánicas de edad pre-cretácica expuestas en muchos lugares en el oeste de México, aunque su extensión es pequeña comparada a la de las rocas volcánicas más jóvenes. Rocas volcánicas máficas están interstratificadas con rocas sedimentarias pérmicas en Las Delicias, Coahuila (King *et al.*,

1944). Rocas verdes del Triásico Superior han sido descritos al sur de Fresnillo (de Cserna, 1976) y en los alrededores de Zacatecas (Burkart, 1836). Las ignimbritas triásicas están asociadas con capas rojas al sur de Torreón y al este de Durango (Pantoja-Alor, 1963; McLeroy y Clemons, 1965; Clemons y McLeroy, 1965). Rangin y Córdoba (1976) reportaron rocas volcánicas del Jurásico Superior al norte de Sonora. En esa zona el emplazamiento de rocas batolíticas mesozoicas acompañó el desarrollo de un cinturón orogénico desde el Jurásico (Anderson y Silver, 1975).

II.1.1 Química de las rocas

McDowell y Clabaugh (1979) reportan análisis químicos de 42 muestras de roca provenientes de la Sierra Madre Occidental y 23 muestras de roca pertenecientes a la parte Este de Chihuahua; para el complejo volcánico inferior analizaron una andesita y 14 rocas batolíticas. Todas estas muestras resultaron ser subalcalinas. Se detectó un comportamiento bimodal en las rocas del supergrupo volcánico superior, donde ninguna de las 42 muestras analizadas contenía entre 55 % y 65 % de SiO₂. Por lo tanto, rocas de composición intermedia parecen estar ausentes en el supergrupo volcánico superior del cinturón central de la Sierra Madre Occidental. La escasez de un rango composicional continuo caracteriza la química del supergrupo volcánico superior. Las rocas batolíticas del complejo volcánico inferior de composición intermedia son más típicas de una suite calco-alcalina de margen de arco continental (McDowell y Clabaugh, 1979).

II.1.2 Complejo volcánico inferior

Rocas intrusivas y extrusivas de edad Cretácico-Terciario Temprano han sido estudiadas al sur de Sinaloa por Fredrikson (1974) y Henry (1975). Su extensión se muestra en una serie de mapas de Sinaloa de 1: 100,000, los cuales fueron publicados por el Instituto de Geología de la UNAM. Estudios más detallados han sido realizados en las rocas volcánicas cercanas a depósitos minerales importantes.

Rocas andesíticas oscuras parecen dominar la porción extrusiva del complejo volcánico inferior. Sin embargo, en algunos lugares se ha observado que existen iguales

cantidades de rocas intermedias y silíceas. La proporción de rocas producidas por flujos o por sedimentos volcanoclásticos varía ampliamente (McDowell y Clabaugh, 1979). En contraste con las rocas volcánicas del Terciario Medio que cubren la Sierra Madre Occidental, estas rocas más viejas tienden a estar más deformadas debido a fallamiento, basculamiento, y plegamiento leve, y típicamente están alteradas. De hecho, son las rocas huéspedes de la mayoría de los depósitos minerales de México (McDowell y Clabaugh, *op. cit.*).

Las edades obtenidas para las rocas volcánicas asignadas al complejo volcánico inferior son indirectas. Estas rocas están generalmente demasiado alteradas para determinaciones mediante métodos como K-Ar, y en muchos lugares la alteración es tan grande que no se pueden realizar estudios petrográficos confiables.

Con base en su asociación espacial, se ha propuesto un origen común para las rocas del complejo volcánico inferior y los batolitos a lo largo del flanco oeste de la Sierra; sin embargo, este hecho no es una prueba contundente del mismo origen, pues donde las rocas volcánicas están en contacto con rocas intrusivas, las intrusiones son casi siempre más jóvenes; sin embargo, en una localidad al norte de Sinaloa, fue reportada una andesita que se emplazó sobre una roca granítica más vieja, esta andesita también fue intrusionada por un granito más joven (Hisazumi, 1929).

Edades obtenidas con los métodos de U-Pb y K-Ar en rocas batolíticas en el sur de Sinaloa documentan un periodo continuo de magmatismo desde 102 a 45 Ma (Henry, 1975). La mayoría de estas rocas intrusivas muestran evidencia de deformación sintectónica, mientras que los plutones más jóvenes no presentan esta característica.

En la parte oriental de la Sierra Madre Occidental, el complejo volcánico inferior está expuesto sólo esporádicamente.

II.1.3 Inconformidades entre las secuencias ígneas

Existen grandes inconformidades entre las dos secuencias ígneas. Cerca de la ciudad de Durango existía un relieve considerable cuando las primeras ignimbritas del supergrupo volcánico superior fueron emplazadas (Swanson *et al.*, 1978); hacia el oeste las rocas del supergrupo volcánico superior se emplazaron sobre rocas batolíticas profundamente

erosionadas. En Tayoltita una unidad irregular de capas rojas (capas rojas de Las Palmas; Nemeth, 1976) se encuentran entre la secuencia volcánica inferior y superior. Al este de Mazatlán la parte basal del supergrupo volcánico superior consiste de andesitas interestratificadas, sedimentos, y tobas. Sobre la planicie costera al norte de Mazatlán, flujos de andesitas están comúnmente interestratificados con ignimbritas riolíticas (Fredrikson, 1974; Henry, 1975). En muchas localidades al noreste de la Sierra Madre Occidental, las rocas del supergrupo volcánico superior descansan discordantemente sobre calizas mesozoicas plegadas (McDowell y Clabaugh, 1979). Donde las discordancias no son visibles, se puede apreciar un abrupto incremento en el grado de alteración hacia la parte inferior del supergrupo volcánico superior (McDowell y Clabaugh, 1979).

II.1.4 Supergrupo volcánico superior

La Sierra Madre Occidental es una gran región con elevaciones y depresiones topográficas que forman la margen occidental del altiplano central mexicano. En la región de Durango está profundamente disectada por ríos que fluyen hacia el este y que descienden rápidamente al nivel del mar. La parte superior está compuesta por rocas volcánicas del Terciario Medio, donde se pueden apreciar ignimbritas riolíticas espectacularmente expuestas. Ésta es probablemente la secuencia de ignimbritas continua más grande del mundo (McDowell y Clabaugh, 1979; Swanson y McDowell, 1984), distribuida en un cinturón con orientación sureste con aproximadamente 200-500 km ancho y al menos 1200 km de largo, extendiéndose desde la frontera de México con Estados Unidos, hasta su intersección con la provincia de la Faja Volcánica Trans-Mexicana.

Las rocas dominantes en esta secuencia son ignimbritas riodacíticas a riolíticas con un grado de soldamiento de moderado a alto. Cantidades menores de rocas máficas están usualmente presentes hacia la cima de las secuencias (McDowell y Clabaugh, 1979).

Se han fechado ignimbritas de 51 Ma en la región de Durango (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991) hasta 16 Ma (Nieto-Obregón *et al.*, 1981); sin embargo, la mayor parte de la actividad ignimbrítica tuvo lugar en un periodo de 38-28 Ma (McDowell *et al.*, 1990; Aguirre-Díaz y McDowell, 1991); este periodo ha sido referido en la literatura como “*ignimbrite flare-up*” (McDowell *et al.*, 1990; Aguirre-Díaz y McDowell, 1991). Sin

embargo, se ha encontrado que hubo una gran actividad ignimbrítica alrededor de los 23 Ma en las porciones centro-sur y suroeste de la Sierra Madre Occidental (Scheubel *et al.*, 1988, Lyons, 1988), por lo que varios autores (Nieto Samaniego *et al.*, 1999; Aranda-Gómez *et al.*, 2000; Ferrari *et al.*, 2002; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003) consideran que este episodio continuó hacia el suroeste hasta alrededor de 23-20 Ma. De esta manera, se puede considerar que el episodio de “*ignimbrite flare-up*” tuvo lugar en un periodo comprendido entre 38 y 23 Ma (Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003, Aguirre-Díaz *et al.*, 2008).

El supergrupo volcánico superior fue emplazado durante un periodo de convergencia entre la placa Farallón y la placa Norteamericana (McDowell y Clabaugh, 1979; Aguirre-Díaz y McDowell, 1991). Este periodo de vulcanismo paroxístico ha sido relacionado con pulsos de extensión en la porción meridional de la provincia de Cuencas y Sierras (CyS) (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991,1993; Aranda-Gómez *et al.*, 2000). Por otro lado, Nieto-Samaniego *et al.* (1999) consideran que el vulcanismo silícico del “*flare-up*” fue disparado por el efecto combinado de un emplazamiento extensivo de magmas básicos en la base de la corteza (*mafic underplating*) y el comienzo de extensión en la parte superior de la placa, inducida por el retroceso de la trinchera.

Haciendo un estudio comparativo con el campo volcánico de San Juan, McDowell y Clabaugh (1979) estimaron que para producir los mas de 300,000 km³ de rocas piroclásticas que forman la Sierra Madre Occidental (300,000 km² de área cubierta por este paquete de ignimbritas multiplicado por un espesor promedio de 1 km) deberían existir de 200 a 400 calderas con un diámetro promedio de 30 km; sin embargo, sólo se han reportado alrededor de 15 calderas (o complejos caldéricos) en la Sierra Madre Occidental, de las cuales solo unas cuantas han sido moderadamente estudiadas (Swanson y McDowell, 1984; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003). Varios autores han propuesto que algunas de estas ignimbritas fueron emplazadas mediante fisuras corticales relacionadas a la formación de grabenes (Scheubel *et al.*, 1988; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003) llamados también “depresiones vulcano-tectónicas” (Lipman, 1997). Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández (2003) y Aguirre-Díaz *et al.* (2005), Aguirre-Díaz *et al.*(2007, 2008) proponen la existencia de cámaras magmáticas alargadas de dimensiones batolíticas que formaron calderas alargadas dentro de los grabenes, llamando a estas estructuras “graben-caldera”.

El modelo que proponen Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández (2003) para la formación de las fisuras alimentadoras de las ignimbritas de gran volumen de la Sierra Madre Occidental y su relación con el régimen extensional regional de la provincia de Cuencas y Sierras en México se esquematiza en la Figura 2. Tomando en cuenta el gran volumen de ignimbritas en la Sierra Madre Occidental y considerando los grabenes largos o zonas de falla que afectan a estas ignimbritas, estos autores infieren un gran complejo de cámaras magmáticas. De esta forma Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández (2003) propusieron en su modelo una cámara magmática alargada o una serie de cámaras magmáticas de dimensiones batolíticas. Batolitos del Cretácico Tardío-Cenozoico Temprano relacionados al complejo vulcano-plutónico inferior están ahora expuestos en la margen oeste de la Sierra Madre Occidental, por ejemplo, las rocas plutónicas de Sinaloa (Henry y Fredrikson, 1987) o en la parte más erosionada al noroeste de la Sierra Madre Occidental en Sonora (McDowell *et al.*, 2001). Estas grandes cámaras magmáticas alcanzaron un nivel cortical somero debido principalmente al régimen extensional de la provincia de Cuencas y Sierras en la cual fueron emplazados; el haber alcanzado un alto nivel cortical causó que los magmas se volvieran ricos en volátiles por exsolución de burbujas de gas debido a la descompresión. El sistema fue abierto debido a que el techo de la cámara alcanzó las fallas normales provocadas por la extensión de la provincia de Cuencas y Sierras, o porque las fallas formadas durante la máxima extensión afectó el techo de la cámara magmática, causando una descompresión rápida, y provocando erupciones explosivas de flujos piroclásticos voluminosos e ignimbritas fisurales. La carga de líticos del flujo piroclástico fue depositada cerca de los conductos relacionados a las fallas, formando las brechas líticas de rezago observadas adyacentes al graben o a las fallas normales principales. Después de la erupción paroxísmica que formó las ignimbritas, el magma restante en la cámara magmática fue empobrecido en volátiles y fue extravasado como domos de lava riolítica y/o diques que rellenaron los conductos. Estos domos de lava y diques están alineados con el mismo patrón de los conductos relacionados a las fallas. Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández (2003) no pretenden que todas las ignimbritas de la Sierra Madre Occidental se hayan formado de esta manera, pero piensan que el volumen dominante de las ignimbritas de la Sierra Madre Occidental fue expulsado a través de

conductos fisurales relacionados a los episodios de fallamiento de la provincia de Cuencas y Sierras.

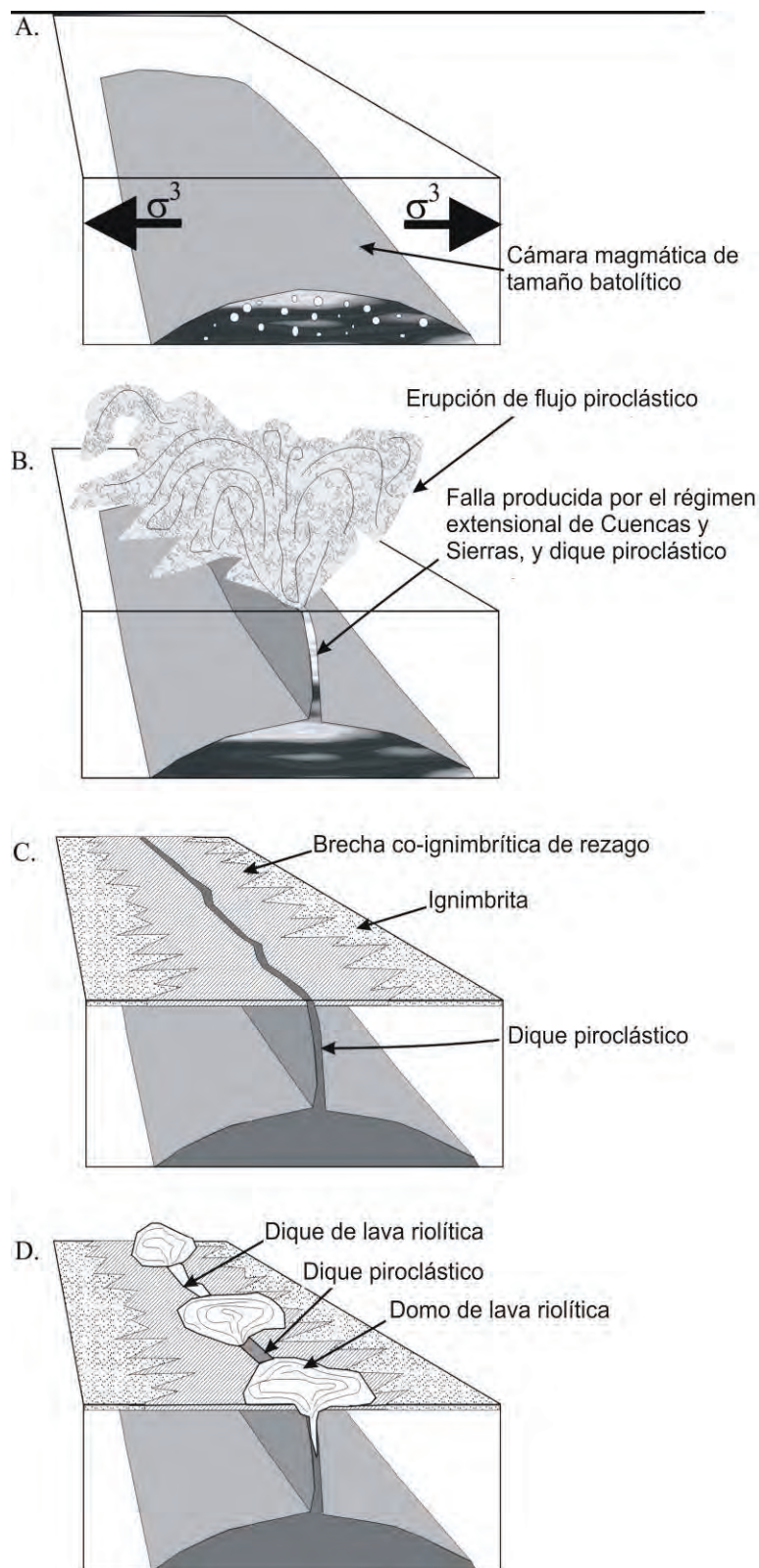


Figura 2.- Modelo esquemático donde se explica el mecanismo de erupción de flujos piroclásticos formadores de ignimbritas a través de fallas principales producidas por la provincia de Cuencas y Sierras. A: Una cámara magmática de tamaño batolítico alcanzó un nivel cortical somero, los magmas se volvieron ricos en volátiles por exsolución debido a la descompresión. B: El techo de la cámara magmática alcanzó fallas normales producidas por la provincia de Cuencas y Sierras, las cuales abrieron el sistema magmático, dando como resultado una rápida descompresión y provocando erupciones explosivas de flujos piroclásticos voluminosos. C: La carga lítica de flujos piroclásticos fue depositada cerca del conducto relacionado a la falla para formar la brecha co-ignimbrítica de rezago. D: Después de la erupción paroxísmica que formó a la ignimbrita y a la brecha co-ignimbrítica, los magmas que permanecían en la cámara se empobrecieron en volátiles y fueron extravasados como domos de lava riolítica y/o diques que rellenaron los conductos. Estos domos de lava están alineados con el mismo patrón de los conductos relacionados a las fallas (modificado de Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003).

II.2 Estudios previos en el área del graben de Bolaños

Esta área ha sido estudiada con fines principalmente mineros debido a que aquí se encuentran los distritos mineros de Bolaños y de San Martín de Bolaños. El distrito minero de Bolaños se localiza en la parte norte del estado de Jalisco, a 160 km al norte de Guadalajara; fisiográficamente pertenece a la porción sur de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental. El distrito minero de San Martín de Bolaños se localiza aproximadamente a 30 km al sur del poblado de Bolaños, a 190 km de carretera hacia el norte de Guadalajara, dentro del graben de Bolaños.

La mayoría de las minas más antiguas en este distrito están localizadas a casi 900 m de elevación sobre el río de Bolaños. En esta zona las planicies volcánicas ascienden hasta 2400 m de elevación al oeste y a 1600 m de elevación al este del río Bolaños.

Algunos de los trabajos previos que se han hecho en esta área son los reportes no publicados de McConnell en 1920 (Scheubel *et al.*, 1988 y referencias) donde se discuten las propiedades de la veta Zuloaga y la geología general de la región. En 1973 la Comisión de Estados del Territorio Nacional (CETENAL) publicó un mapa litológico general de la región de San Martín de Bolaños basado en la fotointerpretación.

Los primeros estudios enfocados en la geología y los depósitos minerales en el distrito minero de Bolaños los hizo Lyons (1988); y en el distrito minero de San Martín de Bolaños Scheubel *et al.* (1988) estudiaron la geología, el ambiente tectónico y el control estructural de la zona.

II.2.1 Estratigrafía del área de estudio

La estratigrafía del área de estudio fue definida por Lyons (1988) y Scheubel *et al.* (1988). Esta consiste de rocas del Mioceno Temprano (23 -19 Ma), las cuales fueron divididas en tres grupos litológicos mayores y 11 formaciones informales (Fig. 3). Los 600 metros inferiores de la sección expuesta en Bolaños (secuencia inferior de ignimbritas) están compuestos de ignimbritas de grado alto (soldadas), las cuales hospedan casi toda la mineralización de plata en el distrito (Lyons, 1988; Scheubel *et al.*, 1988). Estas ignimbritas están sobreyacidas por flujos de lava basalto-andesítica (Andesita Guásima). La

parte superior de la sección consiste de una secuencia de 500 m de espesor compuesta por ignimbritas de grado bajo e ignimbritas de grado alto interestratificadas con flujos de lava basáltica usualmente menores (grupo Huichol); diques y domos riolíticos emplazados en las márgenes del graben representan los conductos alimentadores de algunas de estas unidades (Lyons, 1988). Por último se encuentran aluviones, derrames basálticos, gravas de río y material coluvial cubriendo gran parte del valle de Bolaños (Lyons, 1988; Scheubel *et al.*, 1988) (Fig. 3).

Secuencia inferior de ignimbritas

Esta secuencia fue dividida por Lyons (1988) en tres formaciones: en la parte inferior se encuentra la ignimbrita Bolaños; sobreyaciendo a ésta se encuentra la ignimbrita Borrotes, con la ignimbrita Realito en la cima (Fig. 3). Estas tres unidades son litológicamente muy similares y pueden representar parte de una serie continua de erupciones. La ignimbrita Bolaños aflora en la base de los escarpes del graben de Bolaños, presenta un espesor de alrededor de 300 m en los alrededores del poblado de Bolaños sin apreciarse su base, regionalmente se engruesa hacia el suroeste de Bolaños. Es una ignimbrita de grado alto (soldada) con textura eutaxítica, es de color marrón, quebradiza, con cantidades variables de fenocristales de feldespatos alcalinos color blanco. Contiene fenocristales anhedrales de cuarzo escasos, embebidos en matriz hipocristalina; la escasez de cristales de cuarzo distingue esta ignimbrita de las sobreyacientes. Esta ignimbrita está dividida en tres miembros: un miembro inferior eutaxítico, un miembro intermedio lítico, y un miembro superior porfirítico.

La ignimbrita Borrotes es una secuencia de 100 a 150 m de espesor de ignimbritas de grado bajo (no soldadas), riolíticas con intercalaciones de ignimbritas de grado alto (soldadas); se engruesa hacia el norte y al sur del distrito. Las facies no soldadas de esta ignimbrita están compuestas por matriz de ceniza de coloración café claro y verdosa debido a alteración hidrotermal, con cristales de feldespatos muy alterados y biotita escasa; contiene también líticos de menos de 0.5 cm de diámetro y clastos de pómez verdosa muy alterados de más de 1 cm de diámetro.

La ignimbrita Realito es el miembro superior, cerca del poblado de Bolaños exhibe un espesor de alrededor de 2 m, y a 20 km al noreste de Bolaños alcanza un espesor de más de 100 m (Lyons, 1988), hacia el este dentro de la barranca de los ríos Los Cardos y Arroyo Grande, se observa con espesores de 100 a 120 metros. Esta ignimbrita presenta una textura esferulítica, la cual permite diferenciarla de la ignimbrita Borrotes hacia el noreste y este del distrito de Bolaños.

Esta secuencia de ignimbritas se correlaciona en el área de San Martín de Bolaños con la secuencia denominada por Scheubel *et al.* (1988) como *Tafu* (por sus siglas en inglés, *Tertiary undifferentiated ash and lava flows*) (Fig. 3). Esta secuencia está representada por una serie de flujos de lava y flujos de ceniza intercalados y alternados, que parecen haber sido depositados concordantemente por diversas fuentes más que por una sola fuente en intervalos cortos de tiempo (Scheubel *et al.* 1988); la composición de estas rocas es predominantemente riolítica, con menores cantidades de andesita y raras ocurrencias de basalto. En la base de ésta secuencia se encuentra la andesita Rosario, la cual presenta una coloración púrpura-grisácea, con textura porfídica y alta densidad; esta andesita sólo aflora en la base de la secuencia al suroeste del poblado de San Martín de Bolaños, y no se observa en ningún otro lugar (Scheubel *et al.*, 1988). Para la andesita Rosario se reporta una edad de 23.7 Ma, obtenida mediante el método K-Ar en roca total (Scheubel *et al.*, 1988).

Flujos de lava Guásima

La formación Guásima aflora en los escarpes oriental y occidental del graben de Bolaños, tiene espesores de 150 a 200 m de flujos de lava basáltica-andesítica acomodados en capas con espesores de 2 a 20 m, separados por capas de brechas de 1 a 10 m de espesor (Lyons, 1988).

Grupo Huichol

De acuerdo a Lyons (1988), este grupo incluye la formación Alacrán, la Ignimbrita Carboneras, con una edad K-Ar de 23.23 Ma, la secuencia ignimbrítica Chimal o grupo

Cerro el Piñón (Tcep), el basalto Huila, con una edad K-Ar de 21.03 Ma obtenida en un dique (Lyons, 1988), la toba San Martín, con una edad K-Ar de 20.14 Ma (Lyons, 1988), y la arenisca Mexquitic (Fig. 3). El Grupo Huichol forma regionalmente la capa volcánica superior, y tiene aproximadamente 500 m de espesor. Localmente, en el área de Bolaños, se observa un complejo de domos riolíticos que sobresalen por encima de las paredes del graben. Estos domos riolíticos pertenecen a la formación Alacrán y parecen estar relacionados a la mineralización (Lyons, 1988). Esporádicamente se encuentran flujos basálticos a través de esta secuencia.

La formación Alacrán se extiende hacia ambos lados del graben de Bolaños, presenta espesores de 200 a 500 m en el área de Bolaños, incluyendo los domos riolíticos. Fue definida por Lyons (1988) como una secuencia compuesta por depósitos de flujos piroclásticos color pardo claro y domos riolíticos color rojizo y café claro. De acuerdo con Lyons (1988) uno de los conductos alimentadores de esta formación es el complejo intrusivo El Águila, el cual incluye a los domos riolíticos Tepec, Cumbre, y el dique Iguana.

Esta formación aflora también en la región de San Martín de Bolaños, se extiende hacia ambos lados del graben y forma escarpes masivos de 80 a 200 m de alto. Está compuesta por domos riolíticos y depósitos de flujos piroclásticos. En esta zona, los domos riolíticos fueron definidos por Scheubel *et al.* (1988) como *Tmri*, mientras que los depósitos piroclásticos pertenecientes a la Formación Alacrán han sido definidos como *Ta* en el mismo trabajo. Los domos se localizan en el escarpe oeste, aproximadamente a 1.5 km al norte de la mina Zuloaga, y se emplazaron discordantemente respecto a los flujos piroclásticos de la zona. La formación Alacrán representa la primera de una serie de ignimbritas post-mineralización que se emplazaron tanto en Bolaños como en San Martín de Bolaños. Se caracteriza por tener juntas de enfriamiento abundantes; presenta coloraciones de gris anaranjado a gris púrpura, está altamente devitrificada, en algunas zonas se aprecia silicificación y soldamiento parcial, denotado por clastos de pómez parcialmente colapsados (Scheubel *et al.*, 1988). A lo largo del escarpe oeste, a ~ 4 km al oeste de San Martín de Bolaños y 1 km al este de la mina Zuloaga, ha sido desplazada por una falla normal por aproximadamente 1200 m (Scheubel *et al.*, 1988).

Sobre la formación Alacrán se localiza la formación Carboneras (Fig. 3), una ignimbrita de grado alto con zonas reomórficas, densa, de color morado grisáceo, que contiene cristales abundantes de sanidino y fragmentos de pómez colapsados formando *fiammes*. Esta formación se observa en la cima de la sierra de los Huicholes, dentro del graben de Bolaños y en los alrededores del poblado de Chimaltitán.

En la región de San Martín de Bolaños se localiza el grupo Cerro el Piñón (*Tcep*), definido por Scheubel *et al.* (1988). Se encuentra estratigráficamente encima de la formación Carboneras (Fig. 3), aunque en los alrededores de Villa Guerrero el grupo Cerro el Piñón (*Tcep*) está directamente encima de la ignimbrita Alacrán. Este grupo está compuesto por flujos piroclásticos riolíticos de coloraciones verdosos, rojos y color crema, con distintos grados de devitrificación y soldamiento: presenta esquirlas de vidrio y cristales de sanidino. Éste se extiende lateralmente alrededor de 50 km, y está mejor expuesto al norte de San Martín de Bolaños, con un espesor de 100 metros. Para el grupo Cerro el Piñón Scheubel *et al.* (1988) obtuvieron una edad de 21.3 Ma mediante el método K-Ar en biotita. Este grupo se correlaciona con la ignimbrita Chimal identificada en el área de Bolaños (Scheubel *et al.*, 1988).

El basalto Huila se presenta en la zona, tanto de Bolaños como en San Martín de Bolaños, como diques y *sills* que cortan las secuencias piroclásticas y se emplazan dentro de la ignimbrita Alacrán, la toba Chimal y la toba San Martín, y en forma de derrames sobre la toba San Martín (basalto Huila superior, Lyons, 1988). El grupo Huichol ha sido seguido 100 km al sur de Bolaños a lo largo del río Santiago, donde está cubierto por rocas más jóvenes pertenecientes a la Faja Volcánica Trans-Mexicana, al Norte de Guadalajara (Lyons, 1988).

Depósitos volcanoclásticos del Terciario Tardío al Cuaternario (T-Qvc-cg)

Estos depósitos se localizan generalmente dentro del valle de Bolaños, están emplazados discordantemente sobre el grupo Cerro el Piñón (Fig.3) con espesores de aproximadamente 40 m. Están compuestos por sedimentos volcanoclásticos estratificados depositados en parte en un ambiente lacustre (Scheubel *et al.*, 1988). Estos depósitos

probablemente se correlacionan con la arenisca Mexquitic del área de Bolaños (Scheubel, 1983).

Flujos de lava basáltica Mesa Prieta y Ranchito (T-Qb)

Estos flujos de lava basáltica se encuentran formando mesetas dentro del graben de Bolaños, el flujo de lava Mesa Prieta se localiza a 5 km al norte del poblado de San Martín de Bolaños, y el flujo de lava Ranchito se localiza a 6 km al sur de San Martín. Estos flujos de lava basálticos sobreyacen directamente a los sedimentos volcanoclásticos (Fig. 3). Son muy densos y presentan una apariencia casi vitrofida. Tiene una morfología basal en bloques y se hacen masivos hacia la parte superior. Contienen aproximadamente un 82 % de plagioclasas, presentes como micro-fenocristales y en la matriz, que también contiene vidrio. Se estima una edad de emplazamiento del Plio-Pleistoceno para estos flujos basálticos (Scheubel *et al.*, 1988).

Depósitos de flujos de lahares (T-Qla)

Estos depósitos de flujos de lahares se localizan de 4 a 6 km al oeste de San Martín, en la base de los escarpes. Sobreyacen discordantemente a los depósitos volcanoclásticos. Estos depósitos muestran un color café-rojizo característico, no tienen estratificación interna y están compuestos de fragmentos heterogéneos (desde 1 mm a bloques de 2 m de diámetro) contenidos en una matriz arcillosa. La posición stratigráfica y la localización geográfica de esta unidad con respecto al escarpe oeste sugieren una edad del Plio-Pleistoceno, y un origen relacionado a la fase final de fallamiento (Scheubel *et al.*, 1988).

Aluviones Cuaternarios (Cual)

El Cuaternario ha sido un periodo erosional con muy poca depositación. Los aluviones están restringidos a los sedimentos de ríos y arroyos grandes. Depósitos heterogéneos de gravas y bloques forman los depósitos mayores, mientras que las porciones

de menor energía en el río y los bancos de arroyos están compuestos de arenas y arcillas (Scheubel *et al.*, 1988).

En la Figura 3 se muestra la correlación estratigráfica entre las unidades definidas por Lyons (1988) en el área de Bolaños y las unidades definidas por Scheubel *et al.* (1988) en el área de San Martín de Bolaños.

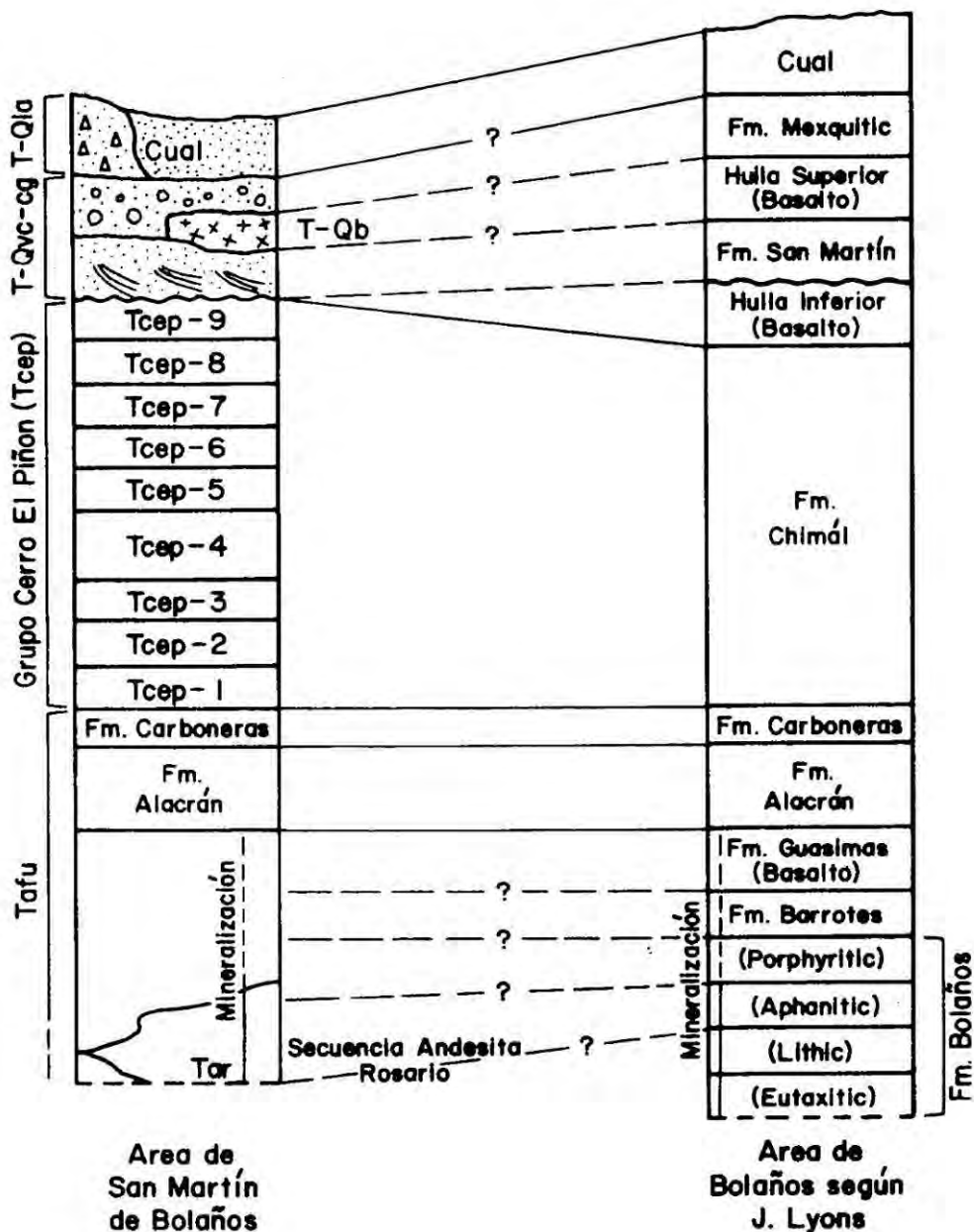


Figura 3.- Esquema donde se muestra una correlación estratigráfica entre las áreas de San Martín de Bolaños y Bolaños (tomado de Scheubel, 1983).

II.2.2 Características estructurales

La región está dominada por mesetas constituidas por ignimbritas félsicas con inclinaciones suaves, y cantidades menores de derrames de lava basálticos, andesíticos y riolíticos. Estas mesetas están cortadas por grandes grabenes regionales de alrededor de 100 km de largo y de 15-20 km de ancho, los cuales en general tienen una orientación N-S a N 10° E.

El graben de Bolaños es uno de los más prominentes. En el área de Bolaños muestra desplazamientos estratigráficos entre el piso del valle y la meseta de entre 1500 y 2000 m (Lyons, 1988); en el área de San Martín de Bolaños, Scheubel *et al.* (1988) reportaron un desplazamiento de 1200 m de la Formación Alacrán en la pared occidental del graben, y elevaciones topográficas que varían de 760 m sobre el piso del valle, a 2660 m sobre el hombro occidental del graben.

Mediante relaciones de intersecciones de fallas se ha identificado un patrón estructural complejo en el área de Bolaños, donde se han reconocido tres grupos mayores de fallas normales; el patrón más antiguo reconocido tiene una orientación N 60° E, y está cortado por otro grupo de fallas con orientación N 30° E, el cual es cortado a su vez por el grupo más joven de fallas, que tiene una orientación Norte-Sur (Scheubel *et al.*, 1988). Las estructuras principales mineralizadas se encuentran en fallas con orientaciones N 30° E, pero también existe mineralización en fallas con orientaciones N 50° E y N 60° E, las cuales son cortadas por las primeras. El movimiento más grande a lo largo de las fallas Norte-Sur del Graben de Bolaños, corta y expone la mineralización. La sección volcánica completa de la región fue cortada por las fallas del graben de Bolaños. El graben es ligeramente asimétrico, mostrando un relieve más pronunciado en el lado occidental.

La edad de la extensión que produjo el fallamiento normal en el graben de Bolaños y en las áreas adyacentes ha sido estimada de entre 23 a 19 Ma (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Aranda-Gómez *et al.*, 2000; Ferrari *et al.*, 2002, Ferrari *et al.*, 2005).

II.2.3 Evolución del graben de Bolaños

De acuerdo con Scheubel (1983) la evolución del graben de Bolaños consistió de 5 etapas, las cuales se describen a continuación:

Etapa I: es el comienzo del “*flare-up*” de ignimbritas de edad Oligoceno-Mioceno, el cual depositó productos volcánicos relacionados a la subducción mediante múltiples conductos, causando una compleja intercalación de derrames de lava y flujos de ceniza riolíticos y en menor medida andesíticos (Fig. 4).

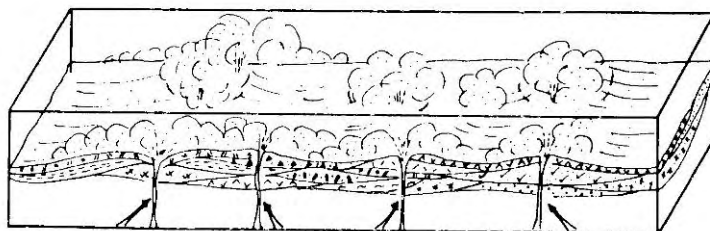


Figura 4.- Etapa I. Emplazamiento ignimbrítico mediante emanaciones de productos piroclásticos provenientes de diferentes áreas fuente, provocando intercalación de facies (tomada de Scheubel, 1983).

Etapa II: está caracterizada por arqueamiento y levantamiento de este grupo. El arqueamiento inicial probablemente produjo los conductos que controlaron la mineralización y el emplazamiento de domos riolíticos. Evidencia de mineralización en esta etapa se observa también en el área de Bolaños. Esta evidencia, combinada con patrones similares de mineralización y estructurales, sugiere que las vetas Zuloaga y Bolaños quizás pertenecen a la misma estructura mineralizante que se desarrolló antes de ser cortada por las fallas formadoras del graben. Hubo emplazamiento de flujos piroclásticos post-mineralización hace 21.3 Ma, por lo que la actividad en la etapa II pudo haber sido más antigua (Fig. 5)

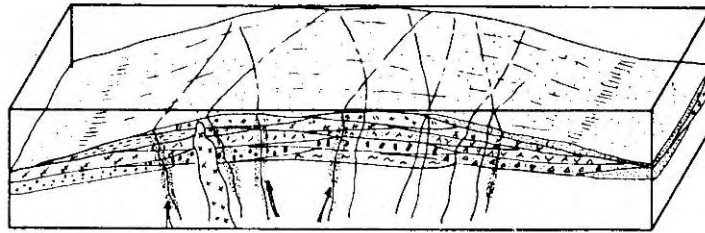


Figura 5.- Etapa II. Extensión cortical dómica que posiblemente causa las fracturas pre-minerales, seguida por el emplazamiento de intrusivos riolíticos y la mineralización asociada (tomada de Scheubel, 1983).

Etapa III: está caracterizada por desarrollo continuo de flujos piroclásticos post-mineralización, lo cuales incluyen a los depósitos de las Formaciones Alacrán, Carboneras y el grupo Cerro Piñón (Toba Chimal). Se determinó una edad K-Ar de la parte superior del grupo Cerro el Piñón de 21.3 Ma. (Fig. 6)

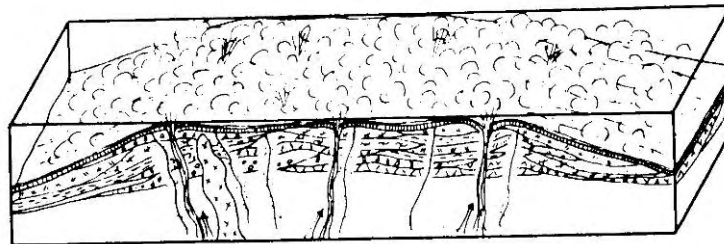


Figura 6.- Etapa III. Continuación del emplazamiento de ignimbritas post-minerales. La Formación Alacrán y el Grupo Cerro El Piñón se depositaron en este periodo (tomado de Scheubel, 1983).

Etapa IV: está caracterizada por subsidencia parcial de la estructura anticlinal arqueada, seguida por actividad efusiva. El colapso ocurrió con desplazamientos normales en una serie de fallas orientadas N 30° E, probablemente durante el Mioceno Medio. Mediante relaciones estructurales y estratigráficas se determinó que el evento que causó la extensión es de edad Mioceno Temprano y el fallamiento normal probablemente continuó hasta el Plio-Pleistoceno. La subsidencia puede ser parcialmente atribuida a la evacuación de cámaras magmáticas, en adición a la extensión o relajación de la corteza durante la reorganización de las placas (Mammerickx y Klitgord, 1982) (Fig. 7).

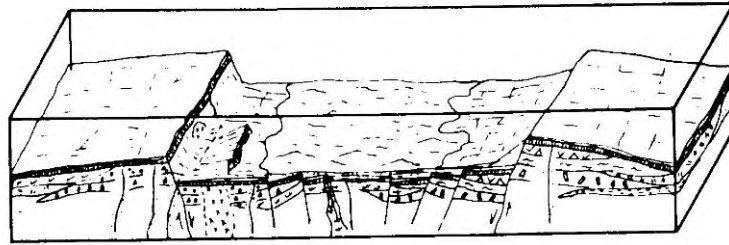


Figura 7.- Etapa IV. Subsidencia parcial del graben, depresión volcano-tectónica seguida por depósitos de sedimentos volcanoclásticos en un ambiente lacustre (tomada de Scheubel *et al.*, 1988).

Etapa V: representa la continuación de la subsidencia, lo que ocasionó agrietamientos y desarrolló de drenaje, marcando así el final de la formación del graben de Bolaños. Sin embargo, movimiento post-deposicional se ha hecho evidente en la porción oriental del graben, donde acumulaciones gruesas de sedimentos pobremente consolidados y acomodados en estratos delgados presentan echados con ángulos relativamente altos. Los flancos del graben están formados principalmente por ignimbritas pre-mineralización, aunque en algunas partes hay remanentes de la secuencia de ignimbritas post-mineralización del grupo Cerro el Piñón. Actualmente el estado decreciente de actividad volcánica es registrado por manantiales termales localizados a lo largo del Río Bolaños y en el límite del escarpe occidental (Scheubel, 1983) (Fig. 8).

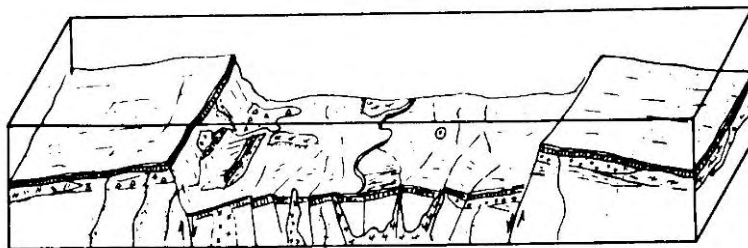


Figura 8.- Etapa V. Subsidencia continua que removió la estructura (alto topográfico en la parte sur del área), seguido del desarrollo de drenaje, el depósito del conglomerado y del lahar. Todo esto fue acompañado por magmatismo bimodal (tomada de Scheubel *et al.*, 1988).

Capítulo III.- Ignimbrita Alacrán y litologías asociadas

Como se ha explicado en el capítulo anterior, la formación Alacrán fue definida por Lyons (1988) como un conjunto de depósitos de flujos piroclásticos y domos riolíticos. La formación Alacrán fue dividida para efecto de esta tesis en: 1) secuencia basal pre-ignimbrita, 2) ignimbrita Alacrán, y 3) domos riolíticos post-ignimbrita.

III.1 Secuencia basal pre-ignimbrita

La secuencia basal pre-ignimbrita es una sucesión estratificada de depósitos de flujos piroclásticos que incluyen depósitos de oleadas y depósitos de flujos de ceniza. Esta secuencia aflora solamente en las márgenes del graben de Bolaños.

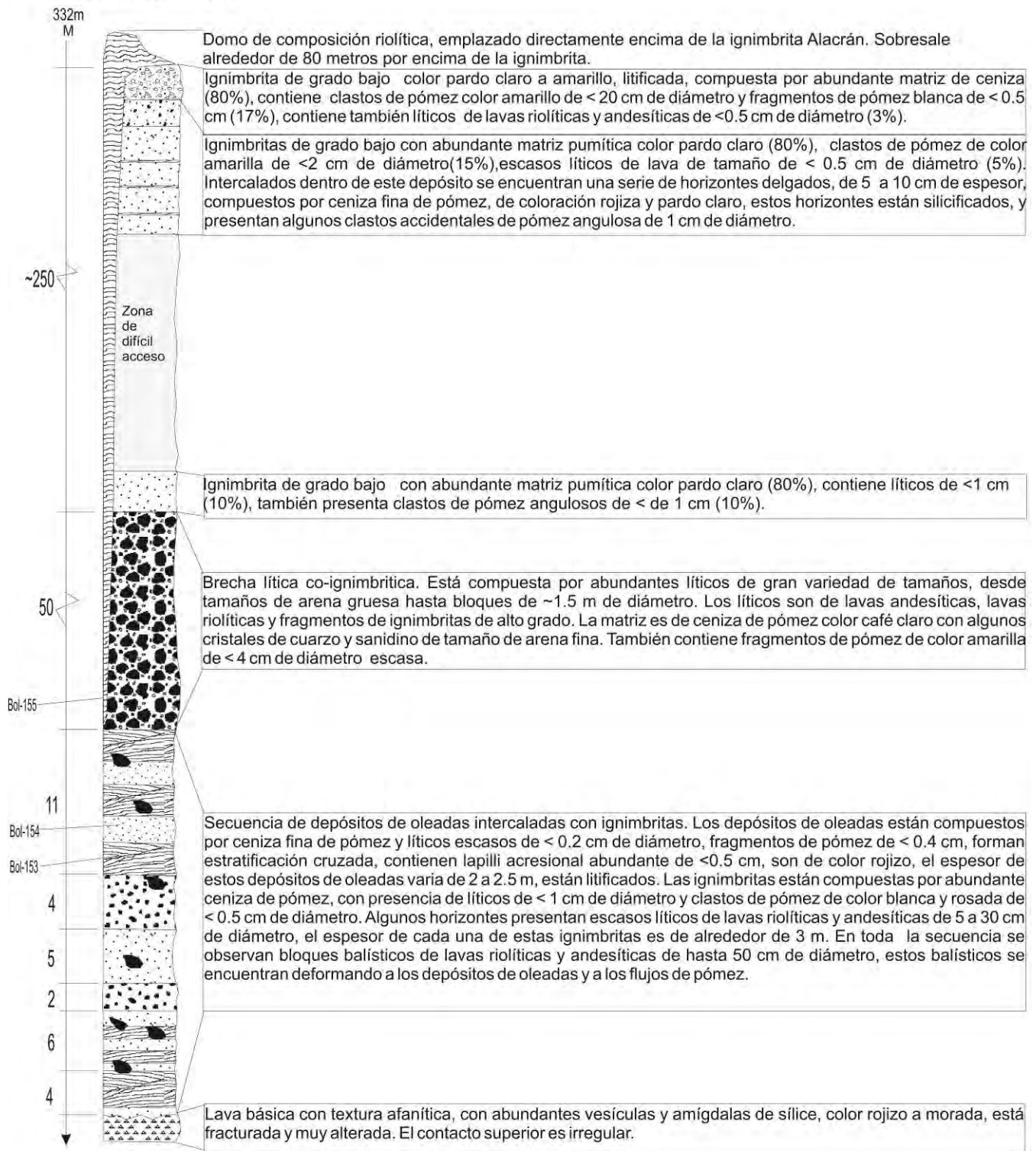
En la pared oriental del graben de Bolaños se midió a detalle en dos secciones estratigráficas, la sección El Águila (S1) y la sección Goteras (S2). En la sección el Águila (Fig. 9) es donde se encuentra mejor expuesta debido a que se aprecia su base en contacto con la andesita Guásima, presentando un espesor de 32 m. En la sección Goteras (Fig. 10) presenta un espesor de 7 metros pero no esta expuesta su base.

En la margen occidental del graben de Bolaños esta secuencia aflora en la base de la sección Astillero (Fig. 11), donde tiene un espesor de ~10 m.

Los depósitos de oleadas son paquetes de 1.5 a 2 metros de espesor y están formados por capas delgadas (1mm) con coloraciones rojizas y grises que frecuentemente forman estratificación cruzada. Están compuestos por ceniza de pómez muy fina, líticos y clastos de pómez que van desde tamaño de arena fina hasta 1 cm de diámetro; la mayoría de estos depósitos de oleadas contienen *lapilli* acrecional abundante de < 0.5 cm de diámetro. Estos depósitos se encuentran litificados por procesos secundarios como por ejemplo silicificación (Fig. 12).

En lámina delgada se observan fenocristales de cuarzo subhedrales y fenocristales de sanidino subhedrales; algunos fenocristales de sanidino presentan alteración a arcilla. Se observaron también algunos fragmentos de líticos de andesita oxidados, embebidos en una matriz de ceniza muy fina de vidrio.

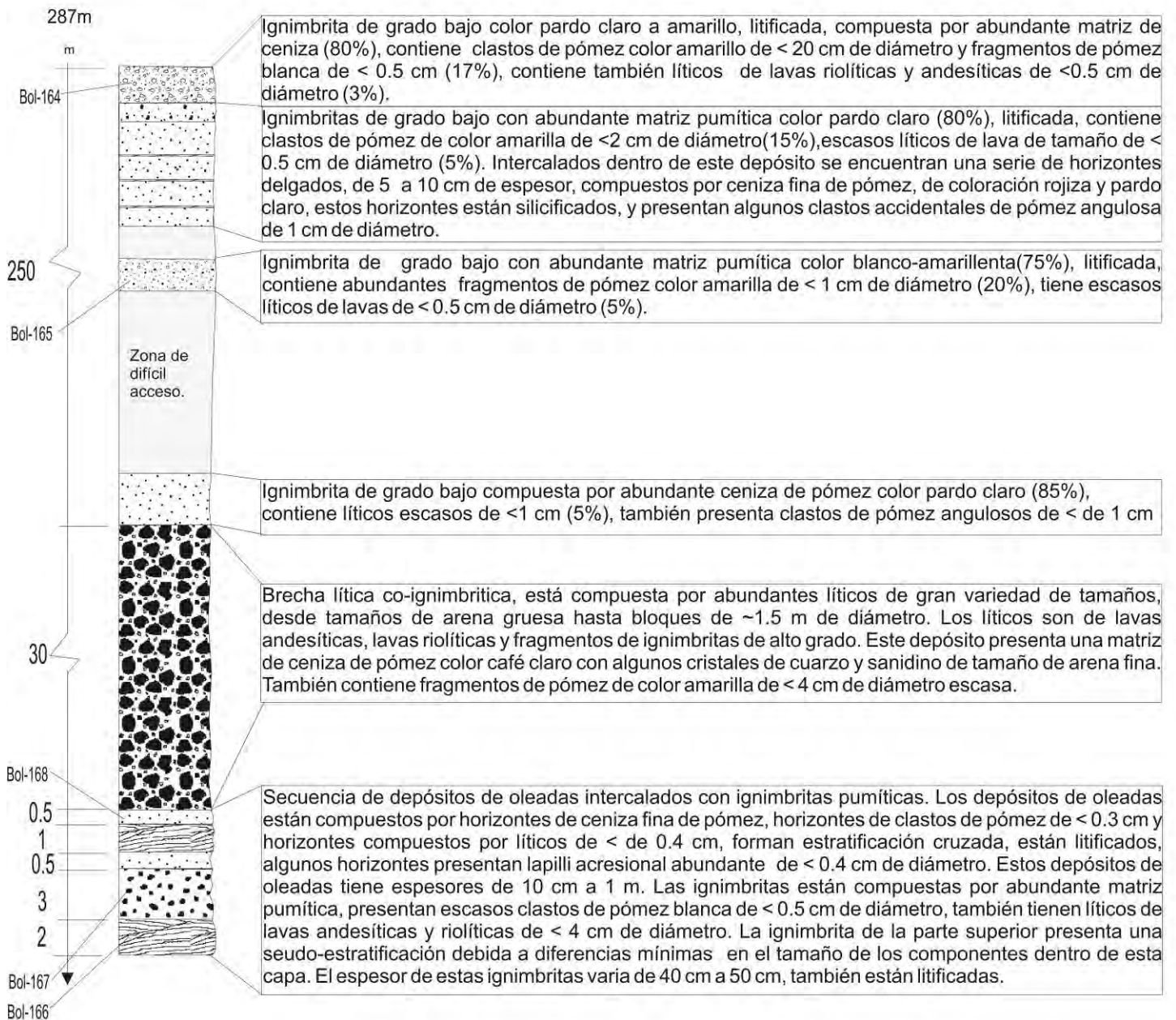
Sección El Águila (S1)



Coord UTM 13Q 628283
2414721

Figura 9.- Sección estratigráfica El Águila (S1).

Sección Goteras (S2)



Coord UTM: 13Q 628468
2417688

Figura 10.- Sección estratigráfica Goteras (S2).

Sección Astillero (S4)

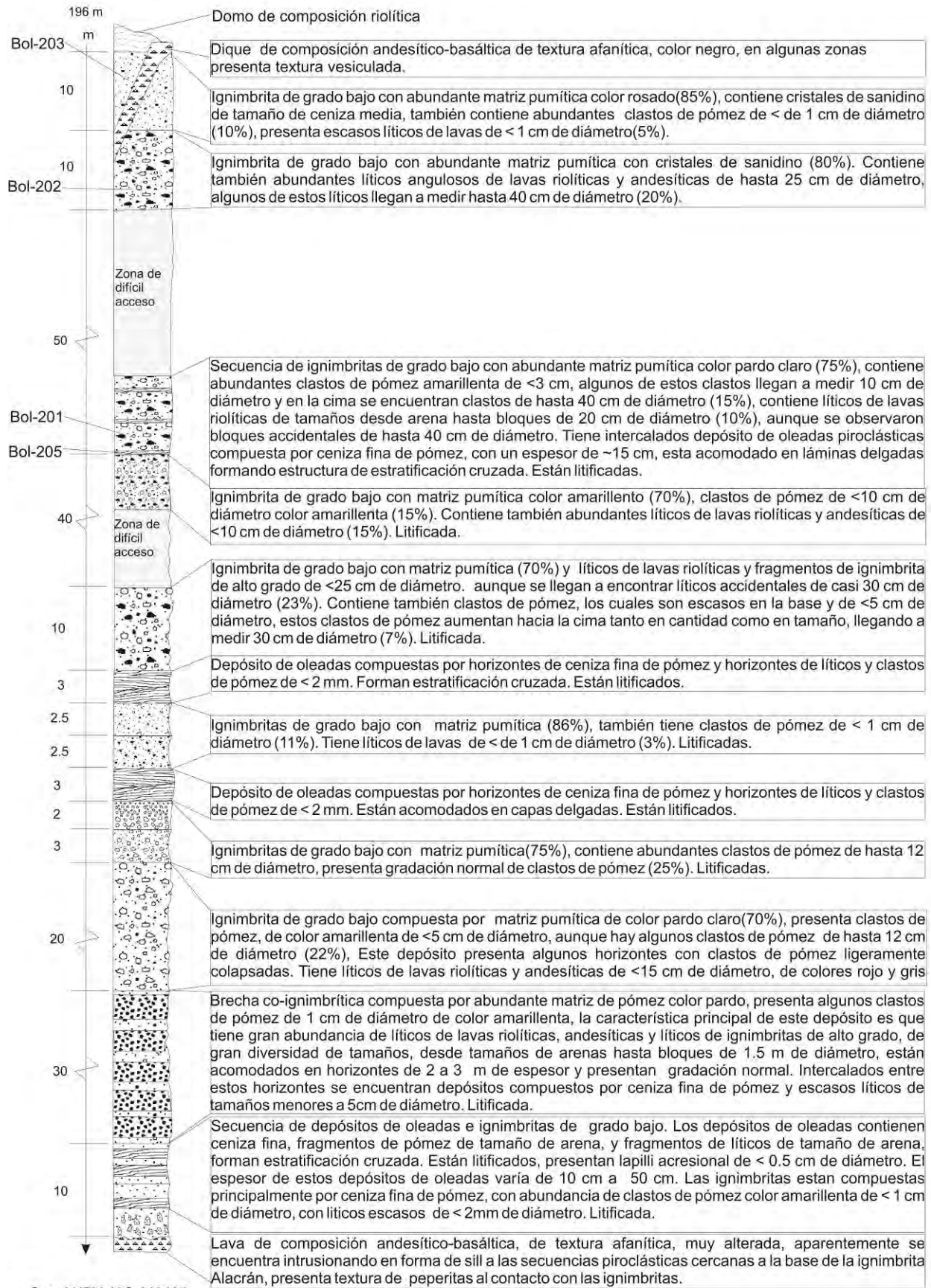


Figura 11.- Sección estratigráfica Astillero (S4).

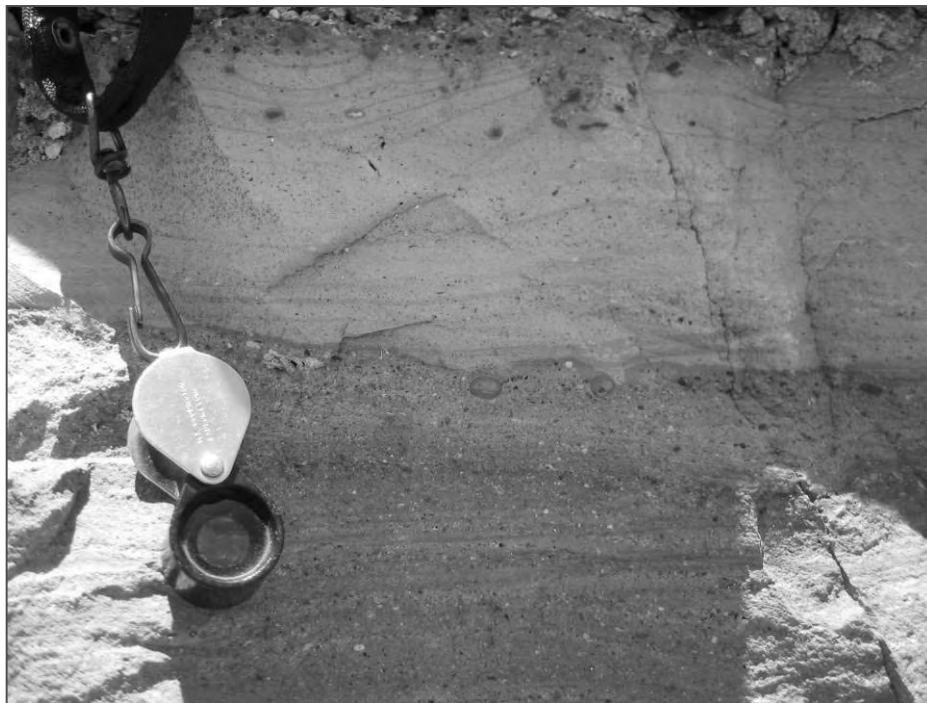


Figura 12.- Depósitos de oleadas piroclásticas pertenecientes a la secuencia basal pre-ignimbrita. Se observan lapilli acrecional y láminas con estratificación cruzada. La lupa utilizada como escala mide 4.5 cm. Estos depósitos están silicificados.

Los otros depósitos piroclásticos que componen esta secuencia son ignimbritas de bajo grado (sin soldar) derivadas de flujos de ceniza, con espesores que varían de 2 a 4 m. Presentan una coloración pardo clara, de apariencia masiva, y están compuestas por ceniza de pómez abundante, con líticos escasos de andesita de color gris y fragmentos de escoria color rojizo, de tamaños desde arena fina hasta 5 cm de diámetro.

Dentro de dichas secuencias piroclásticas en la base de la sección El Águila, se observaron también bloques balísticos de andesita e ignimbrita de 40-50 cm de diámetro (Fig.13). De acuerdo a la posición de estos bloques balísticos, se pudo estimar aproximadamente la dirección de sus trayectorias, midiendo la orientación del eje mayor y el desplazamiento provocado en las capas donde impactaron. Se estimaron orientaciones entre 45° y 115° respecto al Norte (Fig. 14), que indican una trayectoria proveniente del margen oriental del graben de Bolaños, ubicado actualmente a 1.5 km al oeste de los balísticos.

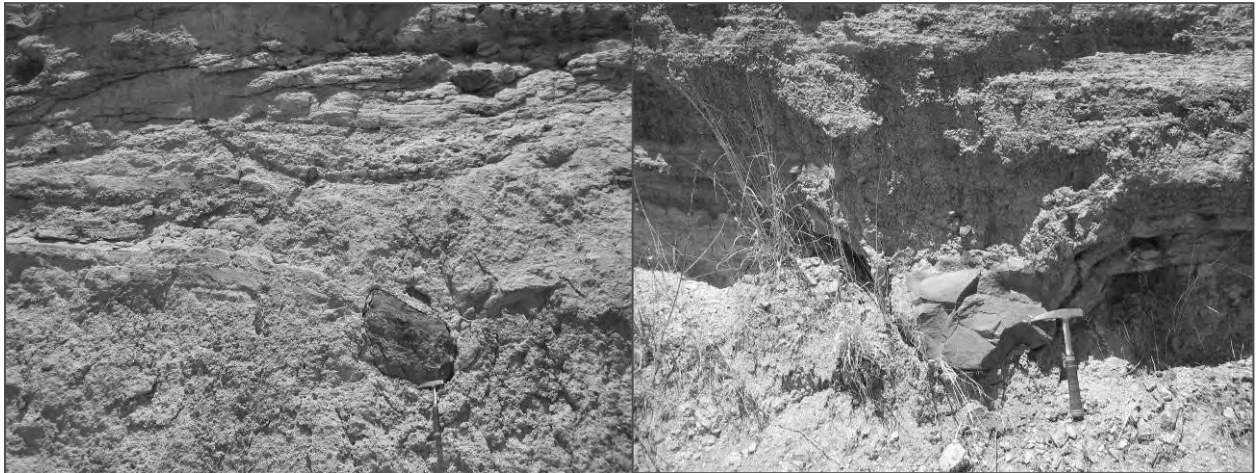


Figura 13.- Bloques balísticos de andesitas e ignimbritas dentro de la secuencia basal pre-ignimbrita. Los bloques alcanzan un tamaño de 40-50 cm de diámetro. El martillo usado como escala mide 33 cm.

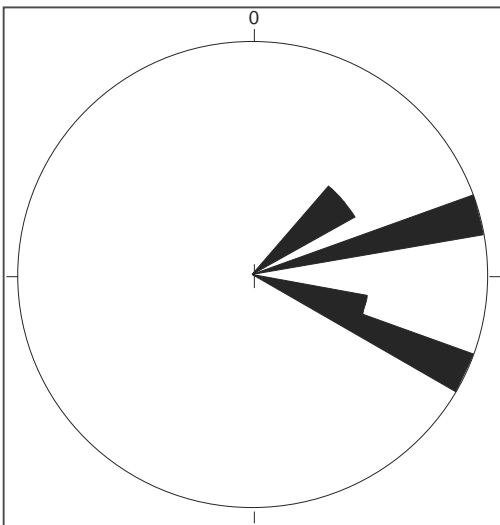


Figura 14.- Diagrama de roseta donde se observa la orientación de los ejes mayores de los bloques balísticos medidos en la base de la sección el Águila.

El contacto inferior de esta secuencia es con la andesita Guásima, en la parte oriental de graben es horizontal, aunque en algunas partes parece erosivo. En la pared occidental del graben no se observa claramente el contacto, debido al intenso fallamiento presente en la zona, y también a que existen diques y sills pertenecientes al basalto Huila que están intrusionando tanto a la andesita Guásima como a la secuencia piroclástica.

III.2 Ignimbrita Alacrán

La ignimbrita Alacrán se encuentra formando escarpes verticales en las paredes del graben y en los cañones que cortan oblicuamente a los *horsts* (Fig. 15, 16), y se extiende lateralmente hacia ambos lados del graben de Bolaños. En la parte superior de los *horsts* forma mesetas (Fig. 17), aunque sólo se aprecia en las cercanías del graben de Bolaños debido a que a mayor distancia está sepultada por depósitos de flujos piroclásticos más jóvenes provenientes de fuentes aún desconocidas. Dentro del graben se observa en la cima de algunos bloques basculados en diferentes direcciones, pero en la mayor parte del interior del graben está sepultada tanto por flujos piroclásticos más jóvenes como por secuencias fluvio-lacustres desarrolladas dentro del graben.



Figura 15.- Escarpe vertical de aproximadamente 100 m de altura de la ignimbrita Alacrán en la margen occidental del graben de Bolaños. Nótese vehículo como escala.



Figura 16.-
Escarpe vertical
de
aproximadament
e 250 metros de
altura de la
ignimbrita
Alacrán
(coloración
pardo claro) en
la margen
oriental del
graben de
Bolaños.

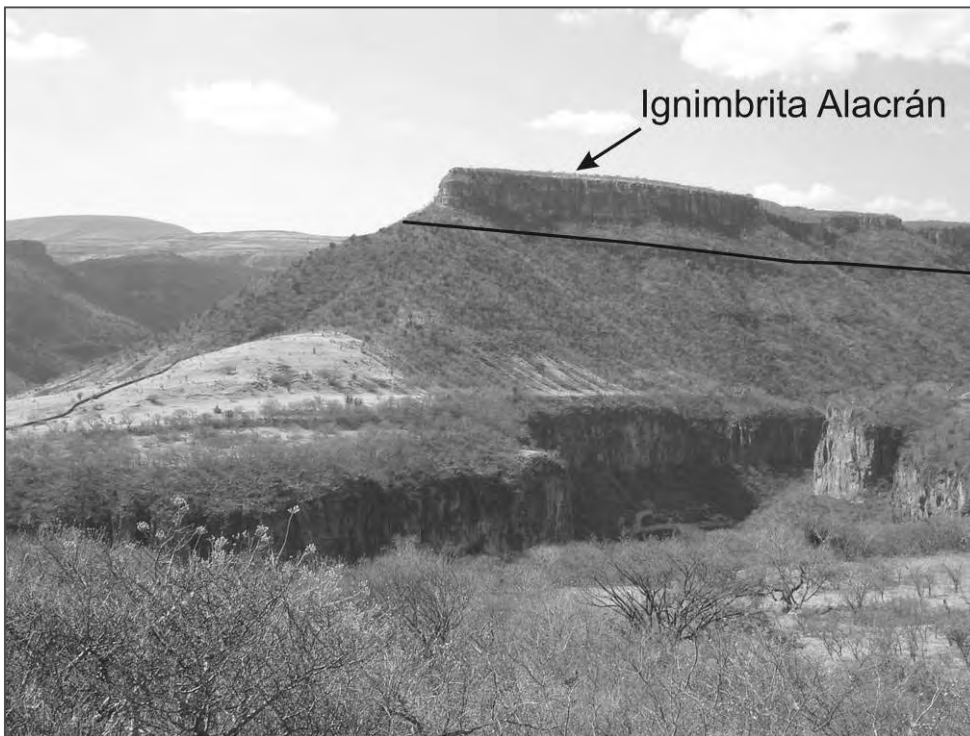


Figura 17.-
Meseta formada
por la ignimbrita
Alacrán a 17
km al Este del
graben de
Bolaños (parte
superior de la
secuencia).

Durante las campañas de campo se midieron 8 secciones estratigráficas a detalle, las cuales se describirán más adelante. El estudio de estas secciones estratigráficas permitió determinar algunas de sus características físicas, tales como cambios de facies, tanto verticales como horizontales; la diversidad, tamaño y forma de líticos accesorios y clastos de pómez, la proporción de estos líticos accesorios y clastos de pómez respecto a la matriz mediante estimación visual en las diferentes secciones estratigráficas medidas, así como las estructuras que forman a nivel megascópico y las texturas observadas a nivel microscópico, el grado de soldamiento, el espesor en las facies próximas al graben de Bolaños así como en las facies más distales mapeadas, su extensión y su volumen mínimo, basados en los afloramientos encontrados a lo largo de toda el área de estudio. En la Figura 18 se muestra la localización de las secciones estratigráficas, así como la ubicación de las muestras de roca recolectadas en campo.

La ignimbrita Alacrán está compuesta por una secuencia piroclástica estratificada con dos miembros principales, 1) una brecha-co-ignimbrítica de rezago, y 2) el depósito principal. (Fig. 19).

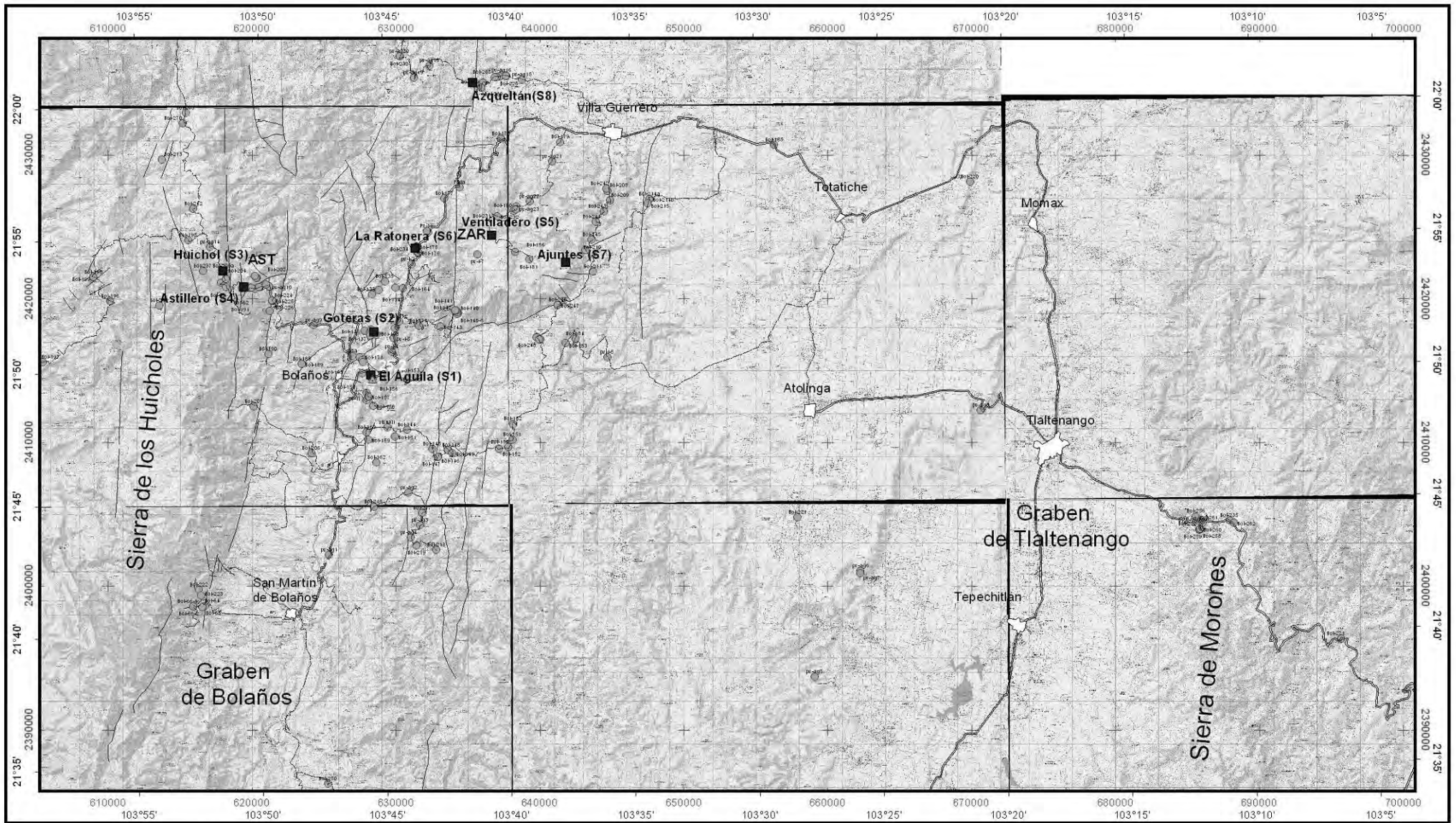
III.2.1 Brecha co-ignimbrítica de rezago

Al igual que la secuencia basal, la brecha co-ignimbrítica aflora únicamente en las márgenes oriental y occidental del graben de Bolaños.

En la margen oriental del graben el depósito muestra una estructura masiva en la cual los líticos están acomodados en forma caótica. El depósito presenta un espesor de 50 metros medidos en la sección El Águila (S1), y de aproximadamente 30 metros medidos en la sección Goteras (S2).

En la margen occidental la brecha está distribuida en horizontes de 2 a 4 m de espesor con abundantes líticos, intercalados con depósitos de ceniza fina de pómez y escasos líticos con diámetros menores a 5 cm (Fig. 20). En este lado del graben se midió un espesor de 30 metros en la sección estratigráfica El Astillero (S4).

La característica principal de este depósito es la gran abundancia de líticos, provenientes de lavas riolíticas, andesíticas e ignimbritas de grado alto de tamaño variable desde arena hasta bloques de 1.5 m de diámetro (Fig. 21).



Simbología

● Muestras representativas para descripción y petrografía	□ Poblaciones importantes	Carreteras
■ Secciones Estratigráficas	∩ Falla normal	▬ Carretera pavimentada
▲ Edad 40Ar/39Ar de la Ign Alacrán***		▬ Terracería

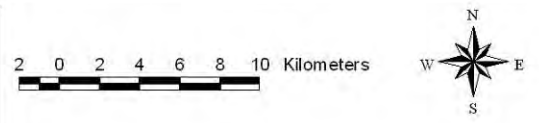


Figura 18.- Figura índice donde se muestra la localización de las secciones estratigráficas y la ubicación de las muestras de roca recolectadas en el área de estudio, abarcando hasta la sierra de Morones.

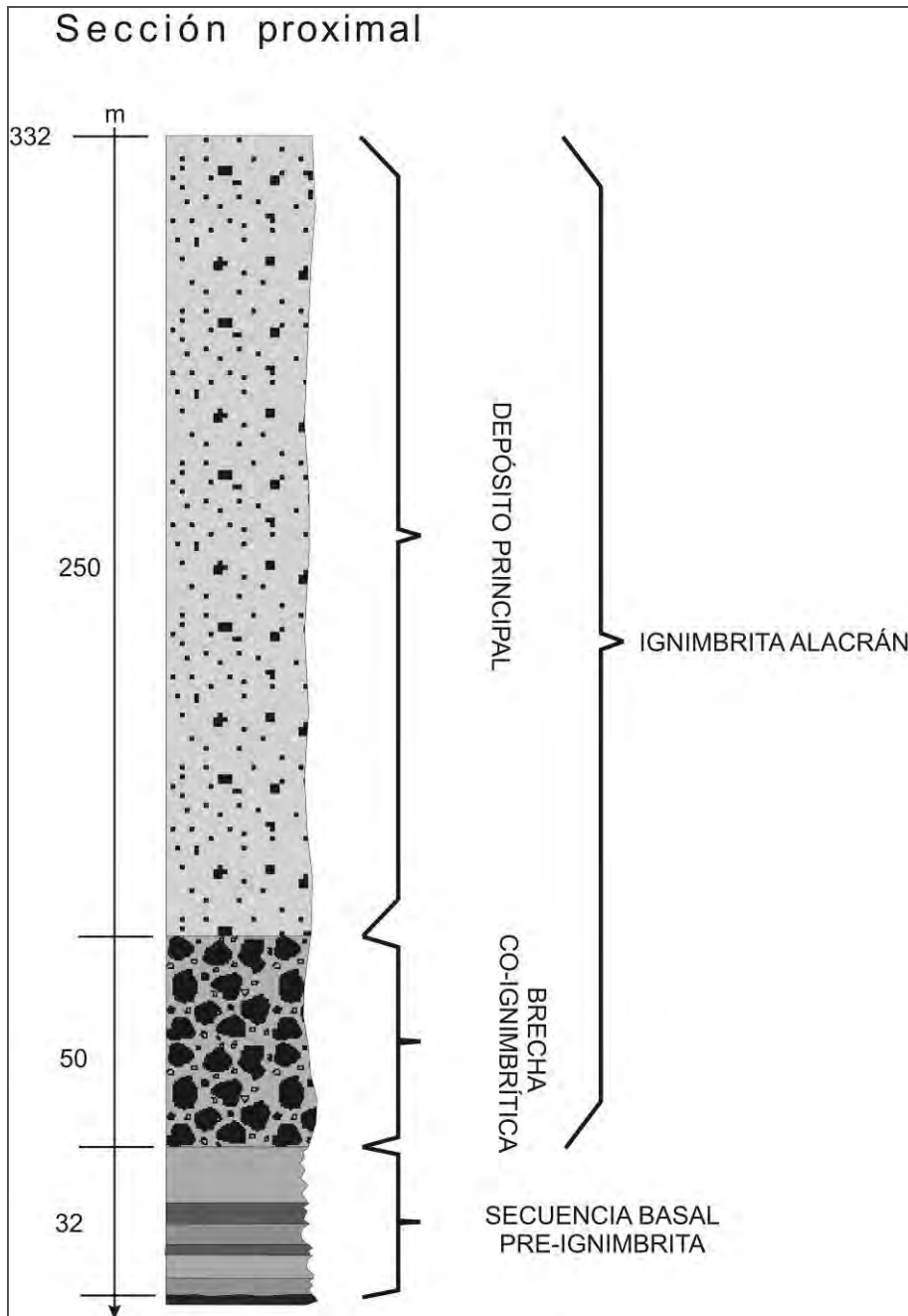


Figura 19.- Sección compuesta idealizada de la ignimbrita Alacrán donde se muestran los miembros principales mencionados en el texto.

La matriz está litificada, y se compone de ceniza de pómez color café claro, con algunos cristales de cuarzo y sanidino. También contiene clastos de pómez color amarillenta de <4 cm de diámetro relativamente abundantes. En la cima del depósito, la matriz se encuentra endurecida por procesos secundarios de silicificación.

En lámina delgada se observan cristales de cuarzo subhedrales a anhedrales, sanidino euedral de forma tabular con macla tipo Carlsbad, y fragmentos de riolitas

devitrificadas con textura esferulítica, embebidos en una matriz muy fina de ceniza de vidrio casi totalmente devitrificada; también se observan fragmentos de pómez con texturas axiolíticas.

En el contacto de la brecha co-ignimbrítica con la secuencia basal pre-ignimbrítica se observa erosión ocasionada por el emplazamiento de la brecha sobre la parte superior de la secuencia basal pre-ignimbrítica.



Figura 20.- Brecha co-ignimbrítica en la base de la sección Astillero. Se observa la intercalación de horizontes ricos en líticos y horizontes sin líticos compuestos principalmente por ceniza de pómez. El martillo usado como escala mide 33 cm



Figura 21.- Brecha co-ignimbrítica donde se aprecian bloques de gran variedad de tamaños, de 1.5 m de diámetro (izquierda) y 45 cm de diámetro (derecha). El martillo usado como escala mide 33 cm.

III.2.2 Depósito principal

El depósito principal está constituido por una secuencia de ignimbritas de grado bajo (de acuerdo con la terminología usada por Branney y Kokelaar, 1992 para el grado de soldamiento de una ignimbrita), es decir no soldadas a ligeramente soldadas, con apariencia pseudo-estratificada, litificadas, y presenta coloraciones que van desde café claro a amarillento.

En la pared oriental se aprecia completamente en la sección el Águila, cuyo espesor medido fue de ~250 m, y en la sección Goteras, con un espesor de ~260 m. Un poco más al oriente del graben se midió parcialmente en las secciones La Ratonera (S6) y Ventiladero (S5) las cuales se localizan a 3 y 9 km de distancia respectivamente de la pared del graben. A 17 km hacia el occidente del graben se midió un espesor de aproximadamente 150 metros; en estas secciones no se aprecia la base del depósito, debido a que no aflora o a que el lugar es inaccesible, por lo que solo se pudo describir la parte superior.

En la pared occidental se aprecia completamente en las secciones El Astillero (S4) y Huichol (S3) (Fig. 22) con un espesor de ~150 metros en ambas secciones.

Estas secuencias de ignimbritas están compuestas por líticos accesorios y clastos de pómez juvenil (mayores a 2 mm) embebidos en una matriz de ceniza (se consideró como matriz a todo el material menor de 2 mm). La proporción de matriz respecto a líticos accesorios y clastos de pómez fue obtenida mediante estimación visual a lo largo de las

secciones estratigráficas medidas, determinándose que la proporción de cada uno de estos varía para cada horizonte de la ignimbrita.

Sección Huichol (S3)

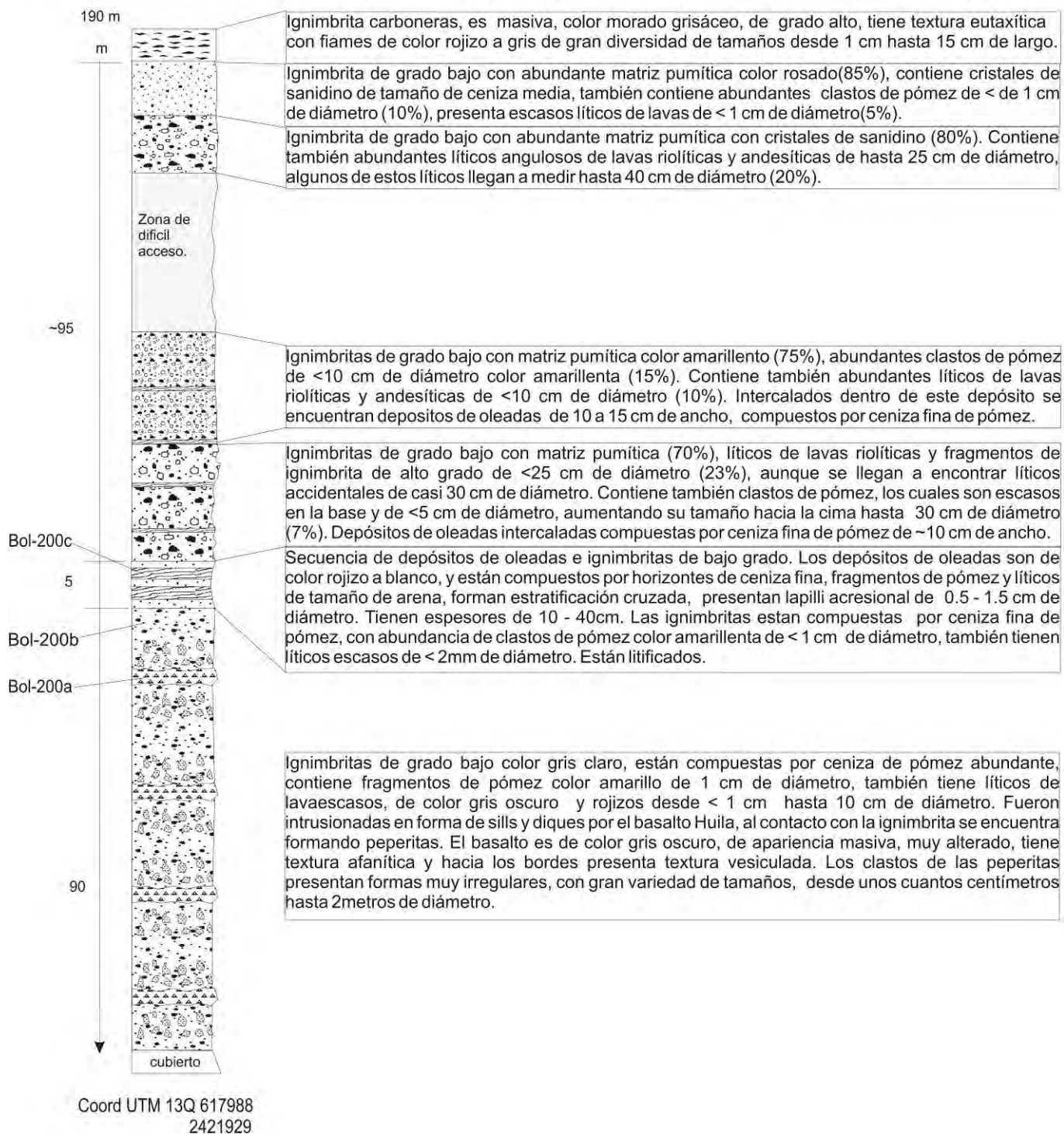


Figura 22.- Sección estratigráfica Huichol (S3).

La matriz contiene ceniza fina de pómez color pardo claro y fragmentos de cristales de cuarzo y sanidino. En lámina delgada se observaron dentro de la matriz fenocristales de cuarzo anhedrales y subhedrales (de 1 a 3 %), fenocristales euedrales y subhedrales de sanidino (de 3 a 5 %) los cuales presentan macla tipo Carlsbad; también se observan cristales de plagioclasa subhedrales con macla polisintética muy escasos (menos de 1 %); en algunas láminas se observaron líticos de andesita muy oxidados, así como líticos de riolita devitrificada con texturas esferulíticas. También se observaron clastos de pómez de ~1 mm con texturas axiolíticas. Los fenocristales, líticos y clastos de pómez están embebidos en una matriz compuesta por vidrio la cual se encuentra en su mayoría devitrificada formando texturas esferulíticas. En algunas láminas delgadas se aprecian esquirlas de vidrio sin colapsar o poco colapsadas, lo cual indica un grado de soldamiento bajo.

A nivel macroscópico, el porcentaje de la matriz respecto a los clastos de pómez y líticos accesorios mayores a 2 mm varía de 70 % a 86 %.

Los líticos tienen forma angulosa a subangulosa, son de lavas riolíticas, andesíticas y de ignimbritas de grado alto, de coloraciones rojizas y grises, algunos líticos se encuentran alterados. El tamaño de los líticos varía en cada horizonte, pudiéndose encontrar clastos de diámetro máximo de 30-40 cm, como se observa en la parte media y hacia la cima de las secciones Huichol (S3) y Astillero (S4), así como en la parte superior de la sección Azqueltán (S8), aunque en la mayoría de los horizontes el tamaño de los líticos no excede los 10 cm de diámetro. En términos generales, la proporción de líticos varía de 3 % a 23 %, aunque es importante mencionar que existen horizontes a lo ancho de todo el depósito que no presentan líticos, solo se componen de matriz y clastos de pómez.

Los clastos de pómez son de color blanco y amarillento, de tamaños desde 2 mm hasta 15 cm, aunque en algunos horizontes se encuentran clastos de pómez de 20 a 40 cm de diámetro (Fig. 23), como se observa en la parte media de la sección Astillero (S4) y la sección Huichol (S3), en la base de la sección Astillero (S4), en la cima de la sección Goteras (S2), sección El Águila (S1) y la sección Azqueltán (S8). De manera general los clastos de pómez no están colapsados; sin embargo, en algunos horizontes se observan moderadamente colapsados. La proporción de clastos de pómez varía en términos generales de 12 % a 28 %.

La mayoría de los horizontes identificados en esta secuencia presentan una cierta gradación de tipo normal, es decir con clastos tanto de pómez como líticos más grandes en la base y van disminuyendo su tamaño hacia la cima de cada depósito. Otros horizontes presentan gradación normal de líticos y gradación inversa de clastos de pómez; otros presentan gradación normal de clastos de pómez y gradación inversa de líticos. En algunos otros horizontes no se observa gradación alguna.



Figura 23.- En la fotografía de arriba, se muestra un horizonte de la ignimbrita Alacrán con abundantes fragmentos de pómez de 10-15 cm de diámetro (fragmentos color blanco); sin embargo, llega a presentar fragmentos de hasta ~30 cm de diámetro. El flexómetro mide 5.5 cm. En contraste, en la fotografía de la derecha se observa un horizonte de la ignimbrita Alacrán donde se observa gran cantidad de matriz y relativa abundancia de fragmentos de pómez color amarillo de menos de 3 cm de diámetro. El martillo usado como escala mide 33 cm.

Intercalados en la secuencia de ignimbritas se identificaron depósitos con espesores que varían de 5 cm a ~30 cm, compuestos por líticos y clastos de pómez de <0.5 centímetros de diámetro, así como depósitos compuestos por ceniza muy fina de pómez y esquirlas de vidrio. Estos depósitos están acomodados en láminas delgadas formando estructuras de estratificación cruzada de ángulo bajo; la mayoría de estos horizontes presentan mayor grado de silicificación por procesos secundarios como fase de vapor. Estos

depósitos pueden ser interpretados como depósitos de oleadas piroclásticas relacionados al emplazamiento de las ignimbritas como depósitos de oleadas de tipo *ground surge* (compuestos por líticos y clastos de pómez) y *ash-cloud surge* (compuestos por ceniza y esquirlas de pómez), depositándose antes (*ground surge*) o después (*ash-cloud surge*) del flujo piroclástico (Sparks *et al.*, 1973; Cas y Wright, 1987 y referencias) (Fig. 24).



Figura 24.- Horizontes de oleadas piroclásticas intercaladas dentro del depósito principal de la ignimbrita Alacrán. En la foto de arriba se observa que el contacto entre la ignimbrita y las oleadas es transicional. La pluma usada como escala mide 15 cm. En la foto de la derecha se observa un escarpe de la ignimbrita Alacrán con apariencia estratificada provocada por la intercalación de estos depósitos de oleadas piroclásticas.

En la Sección Huichol (S3), la porción inferior de la ignimbrita Alacrán está intrusionada por varios diques y horizontes de sills pertenecientes al basalto Huila. En el contacto entre estos cuerpos subvolcánicos y los depósitos de flujo piroclástico se han observado estructuras de peperitas (Fig. 25); este tipo de estructuras se forman cuando un cuerpo intrusivo entra en contacto con depósitos no consolidados y saturados en agua, esta interacción produce una mezcla entre el magma súbitamente enfriado y los depósitos saturados en agua (Cas y Wright, 1987 y referencias). El espesor de los sills varía de 2 a 5 metros, mientras que la zona de peperitas presenta espesores que varían de 3 a 5 metros. El

tamaño de los fragmentos de lava que forman las peperitas varía desde menos de 1 cm hasta bloques de 1.5 metros de diámetro.

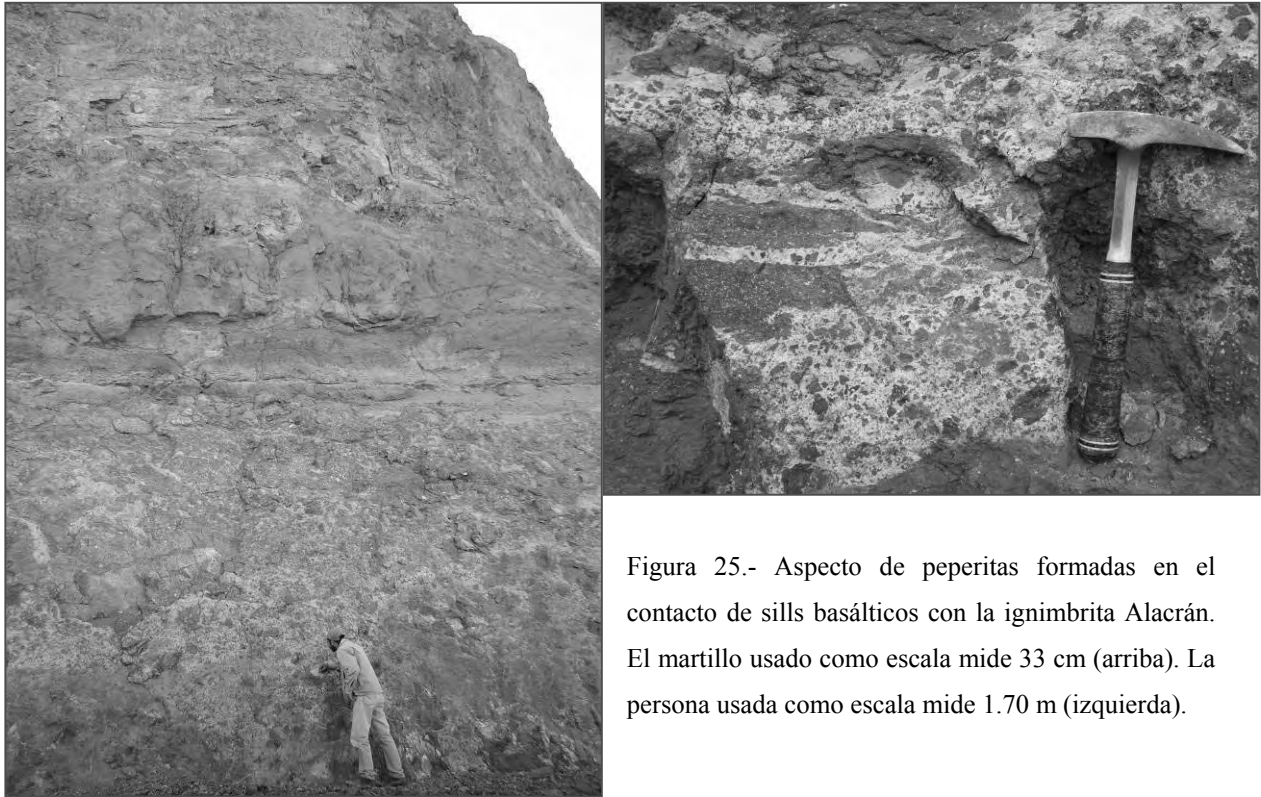


Figura 25.- Aspecto de peperitas formadas en el contacto de sills basálticos con la ignimbrita Alacrán. El martillo usado como escala mide 33 cm (arriba). La persona usada como escala mide 1.70 m (izquierda).

III.3 Domos riolíticos post-ignimbrita

En ambos lados del graben y dentro de éste se puede observar una serie de domos riolíticos alineados a lo largo de las trazas de las fallas principales del graben de Bolaños orientadas casi N-S, los cuales fueron emplazados directamente encima de la ignimbrita Alacrán (Fig. 26). Su espesor y extensión varían en forma considerable dependiendo de la localidad. Estos domos se pueden confundir a la distancia con la ignimbrita Alacrán, debido a que presentan características similares tales como coloración, juntas columnares, formación de escarpes verticales, etc. Estos grandes escarpes y la escasez de caminos hacen muy difícil poder muestrear este tipo de rocas.

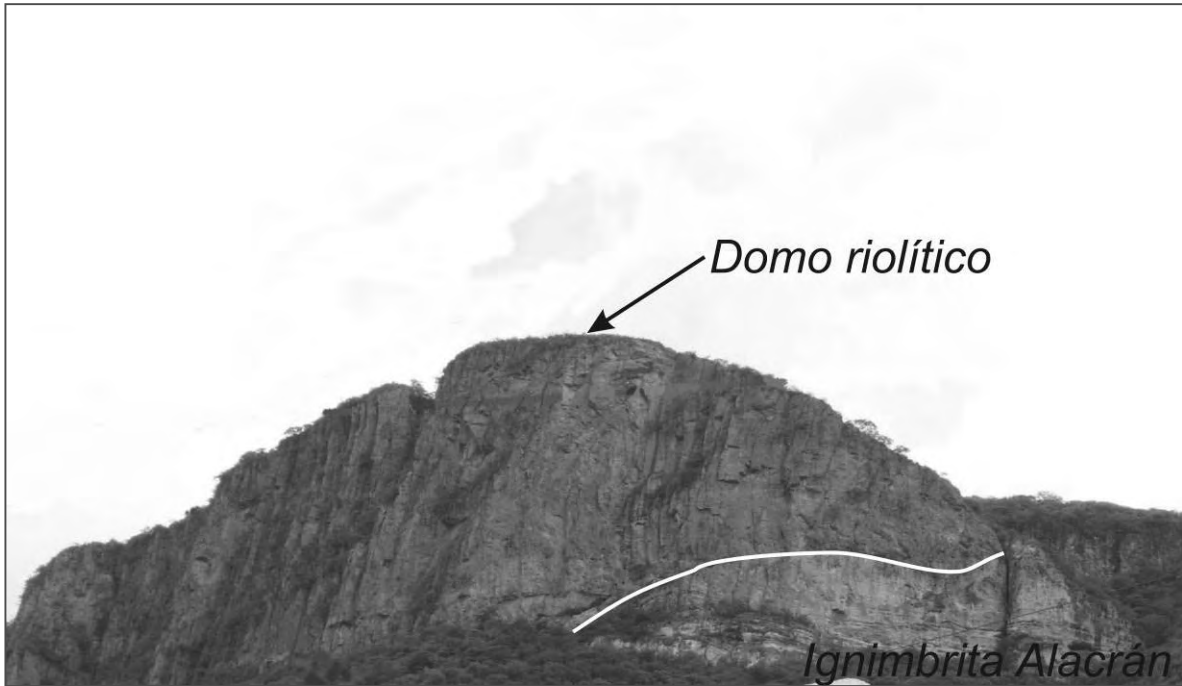


Figura 26.- Domo de composición riolítica emplazado sobre la ignimbrita Alacrán, la línea blanca delimita el contacto entre las dos unidades.

III.4 Edad de la ignimbrita Alacrán

Para determinar la edad de la ignimbrita Alacrán se utilizó la técnica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; los análisis fueron realizados por Margarita López Martínez en el Laboratorio de Geocronología del CICESE, para lo cual se utilizó el método de calentamiento por pasos y el espectrómetro MS-10-1. Para más detalles sobre la técnica empleada véase Cerca *et al.* (2000). Se seleccionó una muestra representativa de la matriz de la ignimbrita Alacrán en la sección tipo El Águila (S1), de la cual se preparó un concentrado de sanidino. La muestra seleccionada resultó con una edad de 25.2 ± 0.3 Ma, que es una edad de isócrona cuyo espectro se muestra en el Anexo 4.

III.5 Área de cobertura y volumen mínimos estimados de la ignimbrita Alacrán

El régimen de extensión regional al que fue sometida esta área desde el Oligoceno Tardío al Mioceno Medio, dio como resultado la formación de grabenes con orientación casi Norte-Sur, provocando el desplazamiento vertical de las unidades litoestratigráficas. Este fenómeno hace muy difícil el seguir una unidad litoestratigráfica debido a los desplazamientos verticales asociados a los grabenes, y a la existencia de depósitos de ignimbritas más jóvenes, depósitos vulcanoclásticos y fluviolacustres que se encuentran cubriéndola dentro de las cuencas de los grabenes.

En el presente trabajo se buscaron afloramientos de la ignimbrita Alacrán en la parte interna del graben de Bolaños, así como en las paredes y en los alrededores, determinándose una zona de cobertura mínima para esta ignimbrita.

En la parte norte del área de estudio (ver Anexo 1) se observaron afloramientos en el camino que va hacia el poblado de Azqueltán, a 21 km al norte del poblado de Bolaños; en esta zona se midió la sección estratigráfica Azqueltán, (S8) (Fig. 27). Sin embargo, solo se observó en bloques caídos desplazados por fallas normales y basculados dentro del graben, y no se aprecia su base. La sección Azqueltán está intrusionada por el basalto Huila; el contacto entre las dos litologías es totalmente irregular con presencia de peperitas.

En la parte sur del área de estudio (ver Anexo1), la ignimbrita Alacrán aflora en los alrededores del poblado de San Martín de Bolaños, que está ubicado 17 km al sur del poblado de Bolaños. En esta zona, presenta espesores de alrededor de 150-200 m en las paredes del graben; estos mismos espesores también están reportados por la compañía minera el Pílon en la margen occidental del graben, donde actualmente tiene obras mineras. Con base en observaciones de campo y a los reportes hechos por Scheubel (1988), la ignimbrita Alacrán se extiende hasta el final de la hoja San Martín de Bolaños F13D24 con escala 1: 50000, a 36 km al sur del poblado de Bolaños, con espesores de 100-200 metros, cubriendo la secuencia denominada como Tafu (Scheubel, 1983) descrita en el Capítulo II.

Al oeste del área de estudio (ver Anexo 1), se observan afloramientos sobre el camino que va hacia el poblado de Tuxpan de Bolaños. Se midieron espesores de alrededor de 200 metros en el escarpe occidental del graben de Bolaños en la sierra de Los Huicholes, a 8 kilómetros de Bolaños. En esta zona se midieron las secciones estratigráficas Astillero

(S4) y Huichol (S3). Pasando la Sierra de los Huicholes, al ir bajando hacia el graben de Atengo se observaron escarpes de la ignimbrita Alacrán con alturas de aproximadamente 150 metros; sin embargo, sobre el camino no se encontraron buenos afloramientos para determinar su espesor directamente, debido a que éstos se encontraban con intenso fallamiento, basculados, caídos o cubiertos por talud. Se encontraron afloramientos de la ignimbrita a 22 kilómetros al oeste de Bolaños, ya dentro del escarpe oriental del graben de Atengo. Dentro del graben de Atengo está cubierta por ignimbritas más jóvenes, así como por depósitos de talud y fluviolacustres.

Al este de área de estudio (ver Anexo1), se midieron varias secciones estratigráficas a detalle. Las secciones El Águila (S1) y Goteras (S2) permitieron determinar un espesor sobre la margen oriental del graben de Bolaños de alrededor de 300 m. En las secciones Ventiladero (S5) (Fig. 28) y La Ratonera (S6) (Fig. 29) solo se describió la parte superior de la ignimbrita debido a que en estas localidades no aflora la base o no fue posible acceder a ella por lo accidentado del terreno.

En la sección Ajuntes (S7) (Fig. 30), la cual se localiza a 17 kilómetros al este del poblado de Bolaños dentro de la barranca de los Cardos, se midió un espesor de aproximadamente 150 metros.

A 4 kilómetros al este de la barranca de los Cardos, la ignimbrita Alacrán se encuentra cortada por una falla normal con orientación Norte-Sur, que la pone en contacto con ignimbritas más jóvenes, posiblemente provenientes de otra fuente.

A lo largo de la barranca de los Cardos se observa la ignimbrita Alacrán, así como los depósitos subyacentes y sobreyacentes (Fig. 31); la estratigrafía concuerda con la descrita dentro del graben de Bolaños por Lyons (1988).

El área de cobertura mínima de la ignimbrita Alacrán se determinó de acuerdo a los afloramientos encontrados en el área de estudio; también se hicieron estudios fotogeológicos con el fin de identificarla en áreas donde fue imposible acceder debido a lo accidentado del terreno y a la falta de caminos.

El volumen mínimo de esta ignimbrita se calculó uniendo todos los afloramientos mapeados dentro del área de estudio, y extrapolando los valores de espesores medidos en las secciones estratigráficas a las zonas donde la ignimbrita se encuentra cubierta. Un factor importante que hay que considerar es que no fue posible medir los espesores de las facies

intra-graben de la ignimbrita Alacrán, debido a que están sepultados por ignimbritas mas jóvenes y depósitos fluviolacustres. Algunos datos de pozos de exploración dentro del graben de Bolaños proporcionados por las compañías mineras arrojan espesores mínimos de 400 m sin alcanzar la base de esta secuencia piroclástica. Sin embargo, se cree que la ignimbrita intra-graben debe ser mucho más gruesa que este valor mínimo.

Sección Azqueltán (S8)

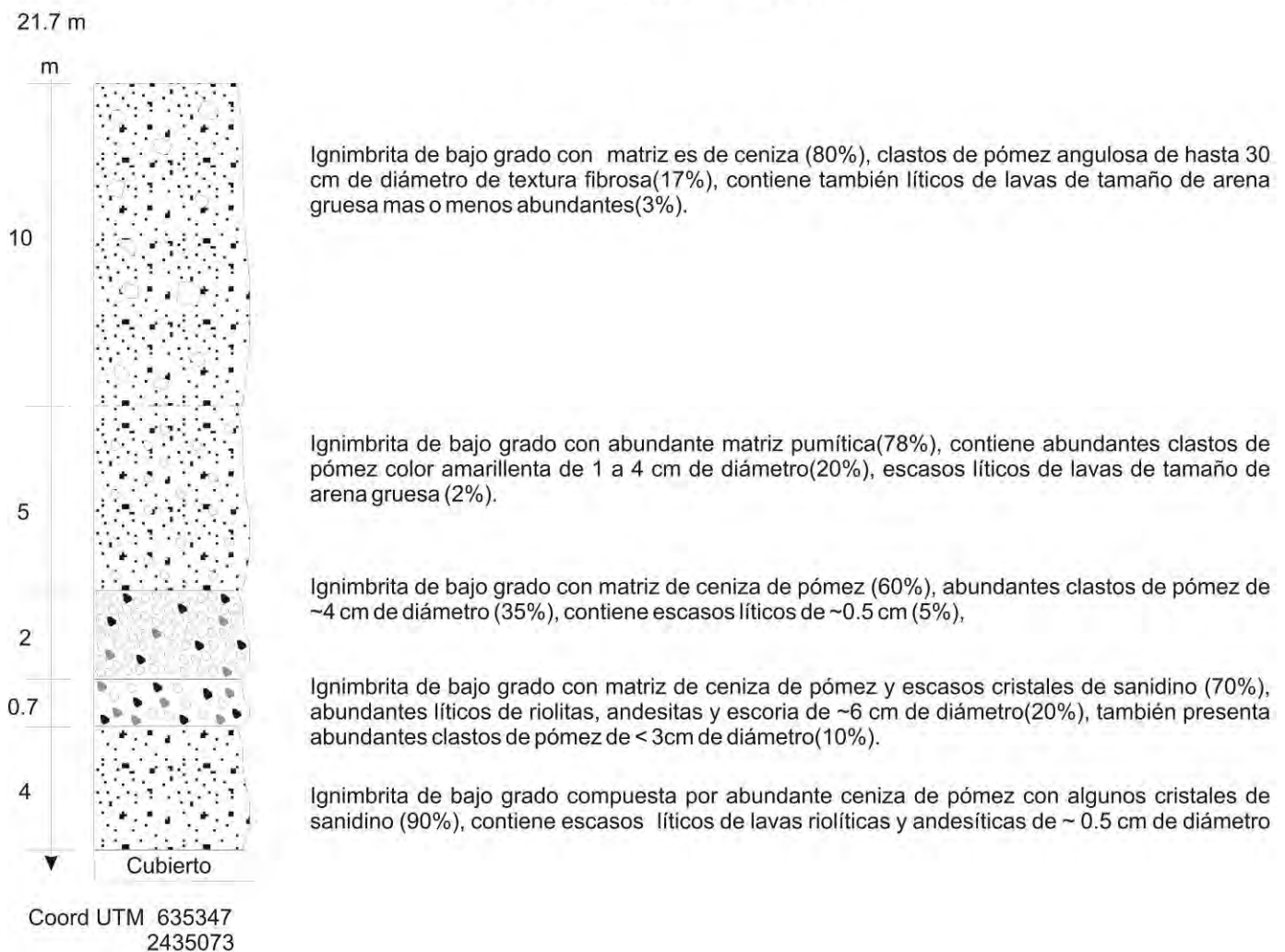


Figura 27.- Sección estratigráfica Azqueltán (S8).

Sección Ventiladero (S5)

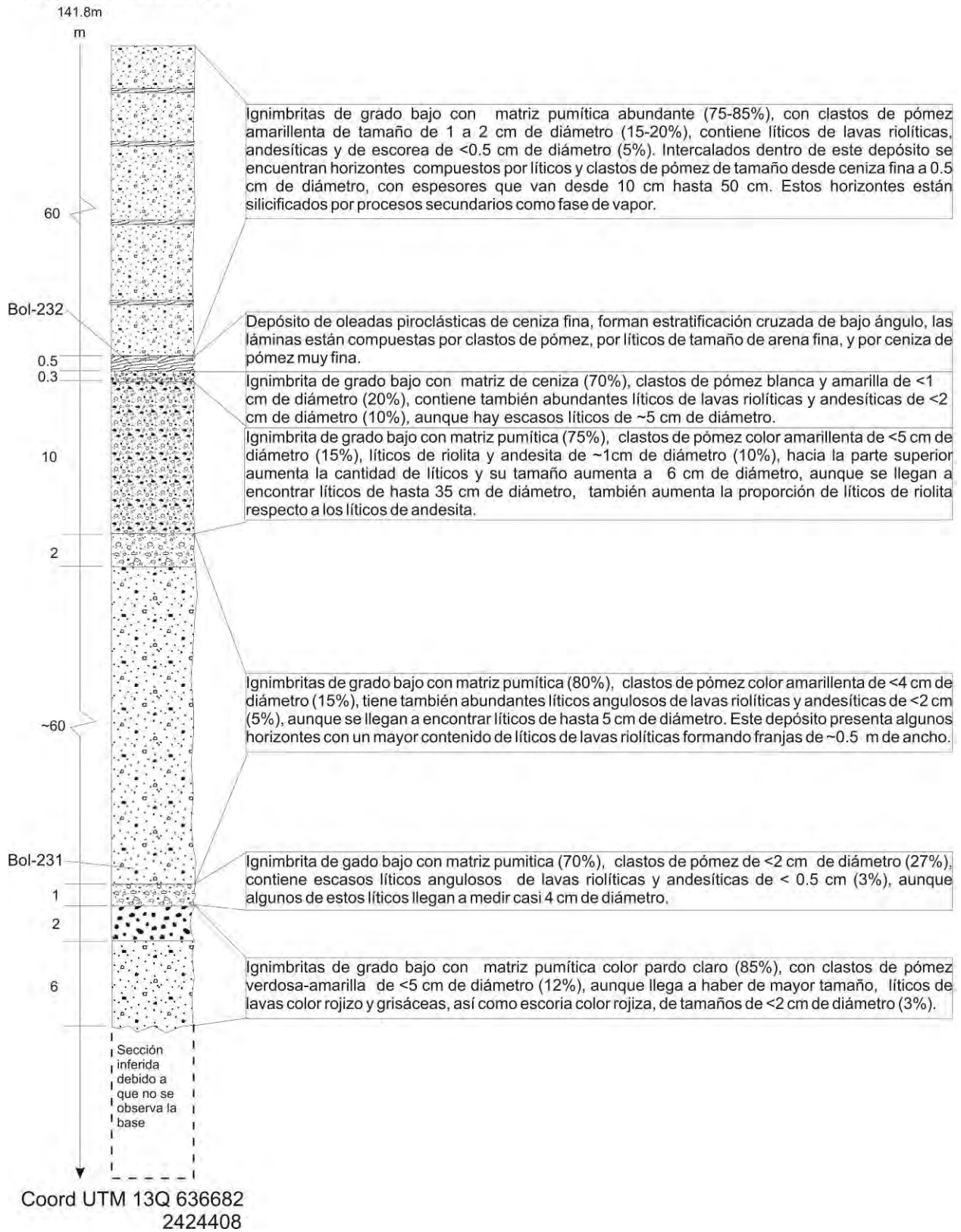


Figura 28.- Sección estratigráfica Ventiladero (S5).

Sección La Ratonera (S6)

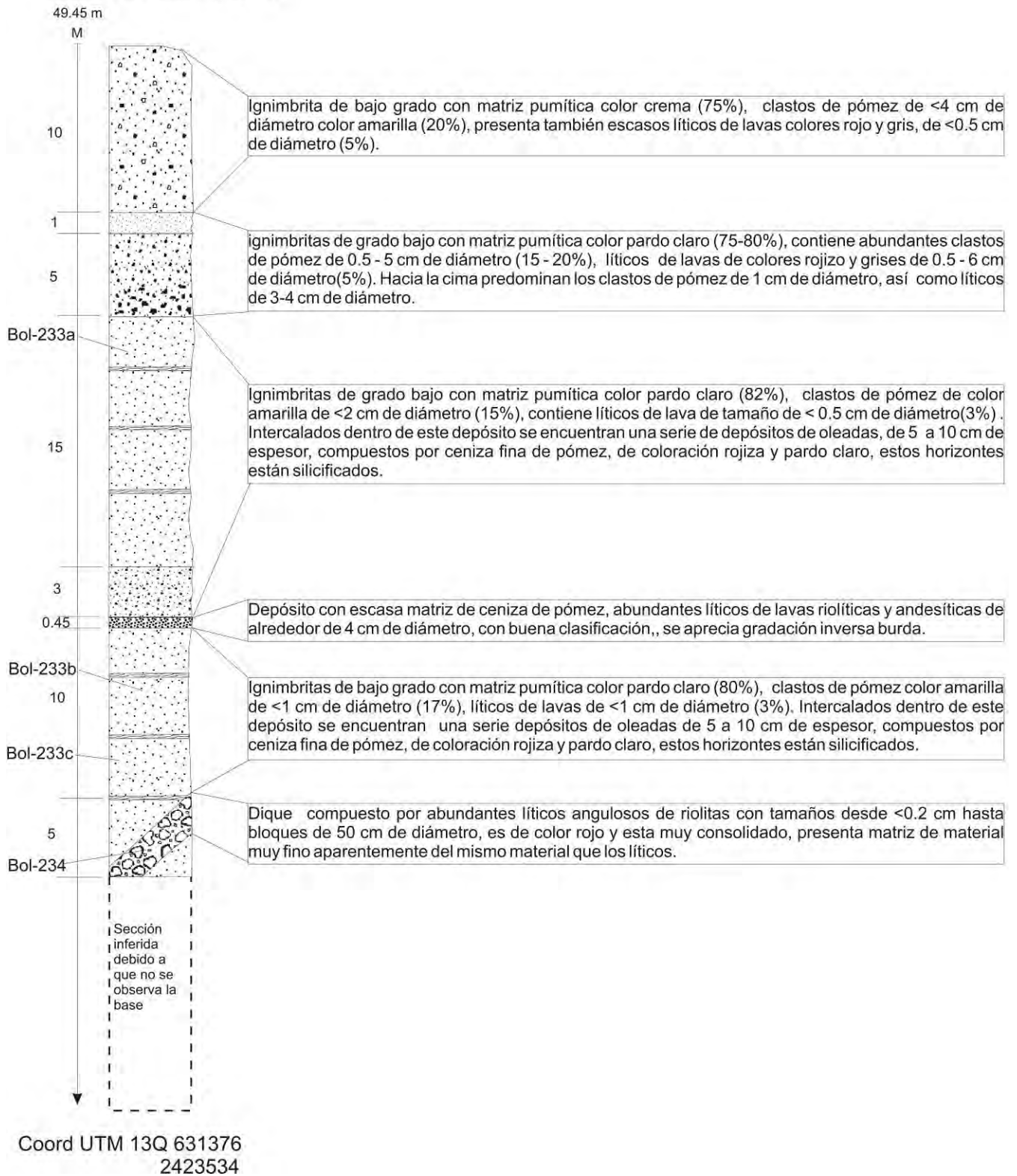
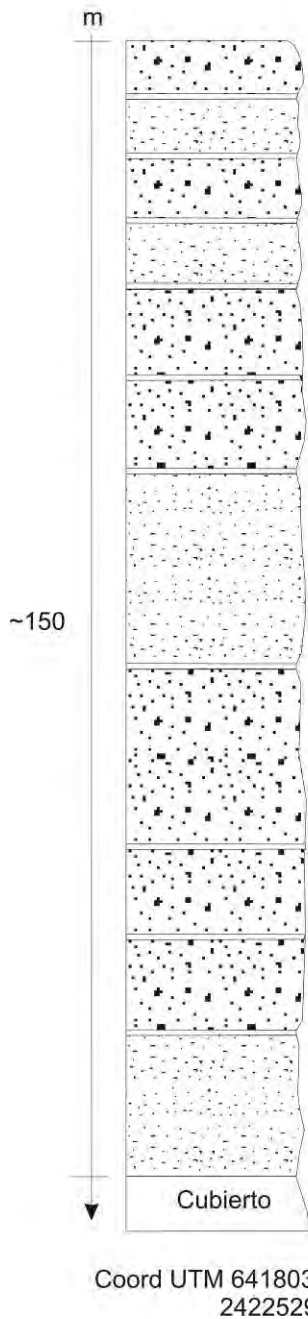


Figura 29.- Sección estratigráfica La Ratonera (S6).

Sección Ajuntes (S7)



Secuencia de ignimbritas de grado bajo color pardo claro compuestas por matriz pumítica (75-80%), dentro de la matriz se observan algunos cristales de sanidino y cuarzo escasos, contienen clastos de pómez amarilla y verdosa de tamaños de 0.5 cm - 5 cm (15-20%), también contiene líticos de lavas riolíticas, lavas andesíticas y fragmentos de ignimbritas soldadas, los cuales presentan tamaños de 0.5 cm - 2 cm de diámetro (5%). Estos horizontes presentan espesores de entre 2 a 15 m.

Dentro de esta secuencia están intercalados varios depósitos de oleadas de 10 a 30 cm de espesor algunos de los cuales están compuestos por abundantes clastos de pómez de ~1 cm de diámetro, otros están compuestos por abundantes líticos de ~1 cm de diámetro y otros por ceniza muy fina de pómez. Toda la secuencia está litificada.

Figura 30.- Sección estratigráfica Ajuntes (S7).

Sección Barranca Los cardos (sur de Villa Guerrero)

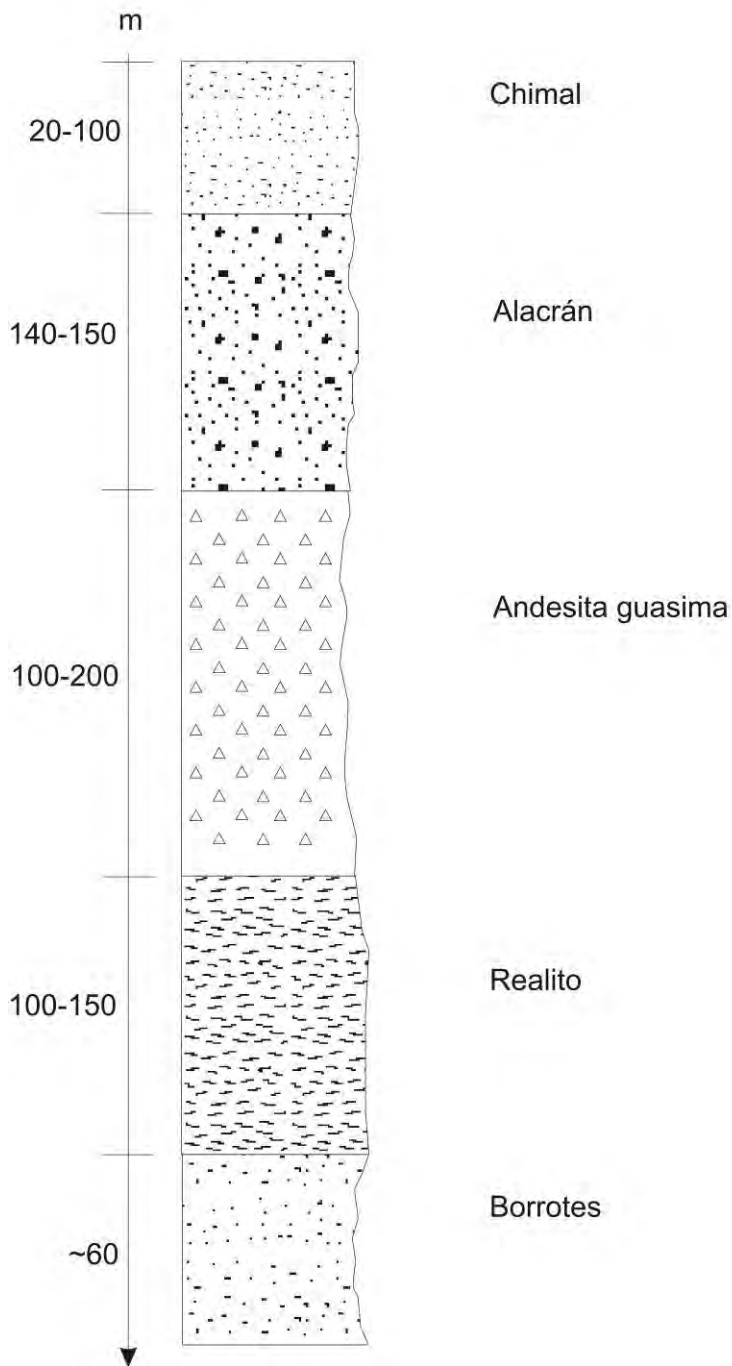


Figura 31.- Esquema donde se muestra la relación estratigráfica de la ignimbrita Alacrán con los depósitos sobreyacentes y subyacentes a lo largo de la barranca de los Cardos, al Sur de Villa Guerrero. Los espesores de las secuencias varían a lo largo de la barranca. No se observa la base de la ignimbrita Borrotes en esta área.

Los valores de área y volumen solo incluyen los afloramientos encontrados dentro del área de estudio, debido a que más allá de esta zona la ignimbrita se encuentra sepultada por depósitos más jóvenes. El único lugar distante donde se encontraron algunos depósitos de flujos piroclásticos con características físicas similares a los depósitos de la ignimbrita Alacrán, fue en la sierra de Morones. Estas características son: 1) son ignimbritas de bajo grado, 2) están compuestas por abundante matriz de pómez color pardo claro, 3) contiene clastos de pómez color blanca menor a 2 cm de diámetro, 4) presenta escasos líticos de lavas andesíticas menores a 1 cm de diámetro, 5) en lámina delgada se observan cristales anhedrales de cuarzo (3% obtenido mediante estimación visual) y cristales subhedrales de sanidino (5% obtenidos mediante estimación visual).

La sierra de Morones tiene una orientación casi N-S y se localiza entre el graben de Tlaltenango (al oeste) y el graben de Juchipila (al este), a una distancia de aproximadamente 60 km en línea recta al Este del graben de Bolaños. Estos afloramientos fueron muestreados para realizar análisis de anisotropía magnética, con el fin de determinar si su procedencia apunta hacia el graben de Bolaños, y poder tener una herramienta mas para correlacionarlos con la ignimbrita Alacrán. Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron los esperados, es decir la procedencia apuntaba en otra dirección diferente al graben de Bolaños. El desarrollo y los resultados de los análisis de anisotropía magnética se presentan en el Capítulo IV.

Considerando que los resultados de anisotropía magnética no son infalibles y a veces dan valores contrarios a los que se obtienen con otras evidencias geológicas, como es este caso, se calcularon el área y volumen de la ignimbrita Alacrán, asumiendo que los depósitos de ésta llegaron al menos hasta la sierra de Morones, como lo sugieren las características texturales y mineralógicas, así como la posición estratigráfica de los depósitos en estos sitios distales. Para confirmarlo, será necesario obtener más evidencia de otro tipo, como geoquímica de los componentes y una edad radiométrica. Estos datos se presentan en la Tabla 1. El volumen de roca estimado para la ignimbrita Alacrán en el área de estudio hasta la sierra de Morones es de 642 km^3 . El volumen equivalente de roca densa (VERD) es de 571 km^3 , el procedimiento para la obtención de este valor se explica a continuación. Cabe señalar que estos valores se consideran como mínimos probables; sin embargo, es muy posible que el volumen real de la ignimbrita Alacrán haya llegado al

menos al doble de la cantidad estimada, pues no se consideraron en su estimación las facies más distales ni las facies intra-graben completas, a las cuales, como ya se mencionó, no se tuvo acceso directo.

III.5.1 Cálculo del volumen equivalente de roca densa (VERD)

El equivalente de roca densa (ERD) es el valor que representa la densidad del magma antes de su expansión co-eruptiva, es decir la densidad del magma dentro de la cámara magmática, sin vesicularidad o porosidad. Para la obtención del ERD se elaboraron tabletas comprimidas de forma cilíndrica en el laboratorio de trituración y pulverizado del Centro de Geociencias. La metodología fue la siguiente: primero se seleccionaron tres muestras representativas del material juvenil que forma a la ignimbrita Alacrán, es decir matriz y pómez; estas muestras se trituraron hasta un tamaño adecuado ($< 5\text{mm}$) para poder pulverizarlas con ayuda del pulverizador “*Shatterbox*”. Con esta máquina se redujo el tamaño de las partículas hasta 5Φ . Posteriormente, se colocó la muestra pulverizada dentro de la prensa “*Graseby*” a una presión de 30 Ton/cm^2 durante 30 segundos, obteniéndose de esta forma las tabletas comprimidas. Esta metodología fue utilizada por Rossotti (2005) y Hernández-Rojas (2007) para la obtención del ERD en pómez. Finalmente, las tabletas comprimidas se pesaron en una balanza obteniéndose su masa, y se midieron sus dimensiones (altura del cilindro y radio de la sección circular) para la obtención de su volumen. Con estos datos se calculó la densidad de cada una de las muestras y se obtuvo una densidad ERD promedio de 1609.6 kg/m^3 para la ignimbrita Alacrán. En Tabla 1 se muestran el valor del VERD mínimo estimado para el área de estudio y el valor del VERD mínimo estimado considerando un área de cobertura de la ignimbrita Alacrán abarcando hasta la sierra de Morones.

Tabla 1.- Área, volumen de roca, y volumen equivalente de roca densa (VERD) estimados para la ignimbrita Alacrán, se presentan los valores calculados para el área de estudio así como los valores calculados considerando un área de cobertura hasta la sierra de Morones.

<i>Área usada en estimación de volumen</i>	<i>ignimbrita Alacrán</i>
Área cubierta por afloramientos (km ²)	280 km²
Área estimada uniendo todos los afloramientos dentro del área de estudio (km ²)	2100 km²
Área estimada extendiendo la zona de cobertura hasta la sierra de Morones (km ²)	5208 km²
Volumen de roca mínimo estimado uniendo todos los afloramientos del área de estudio (km ³)	409 km³
Volumen equivalente de roca densa (VERD) mínimo estimado uniendo todos los afloramientos del área de estudio (km ³)	364 km³
Volumen de roca estimado extendiendo el área de cobertura hasta la sierra de Morones (km ³)	642 km³
Volumen equivalente de roca densa (VERD) mínimo estimado extendiendo el área de cobertura hasta la sierra de Morones (km ³)	571 km³

III.6 Correlación estratigráfica

Como se describió en este Capítulo, la ignimbrita Alacrán está compuesta por varios depósitos piroclásticos, de los cuales algunos se pueden correlacionar muy bien dentro de las cercanías del graben, como por ejemplo los depósitos de oleadas piroclásticas y los depósitos de brecha co-ignimbrítica que se encuentran en los alrededores de las paredes que limitan al graben de Bolaños. Desafortunadamente no existen afloramientos suficientes para poder correlacionar estos depósitos mas allá de los alrededores del graben debido a

que la secuencia completa está cubierta por ignimbritas más jóvenes, y no existen cañones o cortes de ríos donde afloren las secuencias basales de la ignimbrita Alacrán.

Las secuencias que forman el depósito principal fueron más difíciles de correlacionar, debido a que éstas presentan características de tamaño de grano y concentración de líticos accesorios y clastos de pómez similares a lo largo y ancho de todo el depósito, y no se aprecian horizontes guía con características particulares que puedan dar la pauta para una correlación más exacta. A esto hay que añadirle el enorme espesor que presenta la ignimbrita, lo cual hace muy difícil realizar un estudio de análisis de componentes a detalle que pudiera evidenciar características particulares para correlacionar horizontes.

Sin embargo, se realizaron correlaciones de algunos horizontes tomando como base características macroscópicas tales como tamaño máximo de líticos y clastos de pómez, cantidad de matriz respecto a líticos y clastos de pómez, estructura de los depósitos, relación con los depósitos subyacentes y sobreyacentes, etc.

Las secuencias pertenecientes al depósito principal presentan la misma problemática que las secuencias basales en facies distales, es decir están sepultadas por depósitos más jóvenes. A pesar de esto, se pudieron correlacionar de manera general algunos de los depósitos de la cima de la ignimbrita Alacrán en las zonas más alejadas en donde se encontraron afloramientos, es decir a 17 km al Este y 22 km al Oeste respecto al graben de Bolaños.

En la Figura 32 se muestra la correlación estratigráfica de las secciones medidas en campo, y en la Figura 33 se muestra la localización de las secciones estratigráficas en el mapa de afloramientos de la ignimbrita Alacrán.

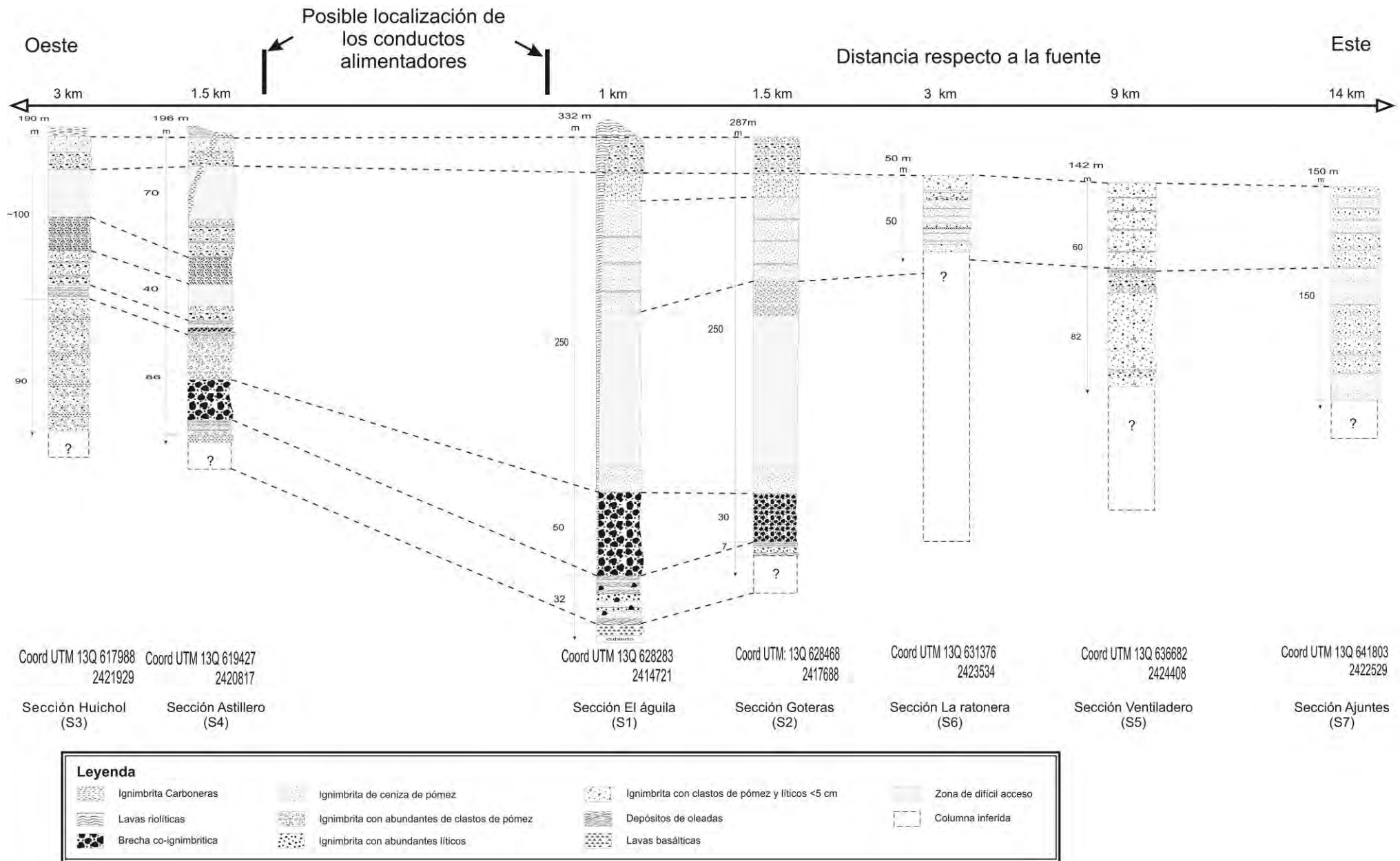
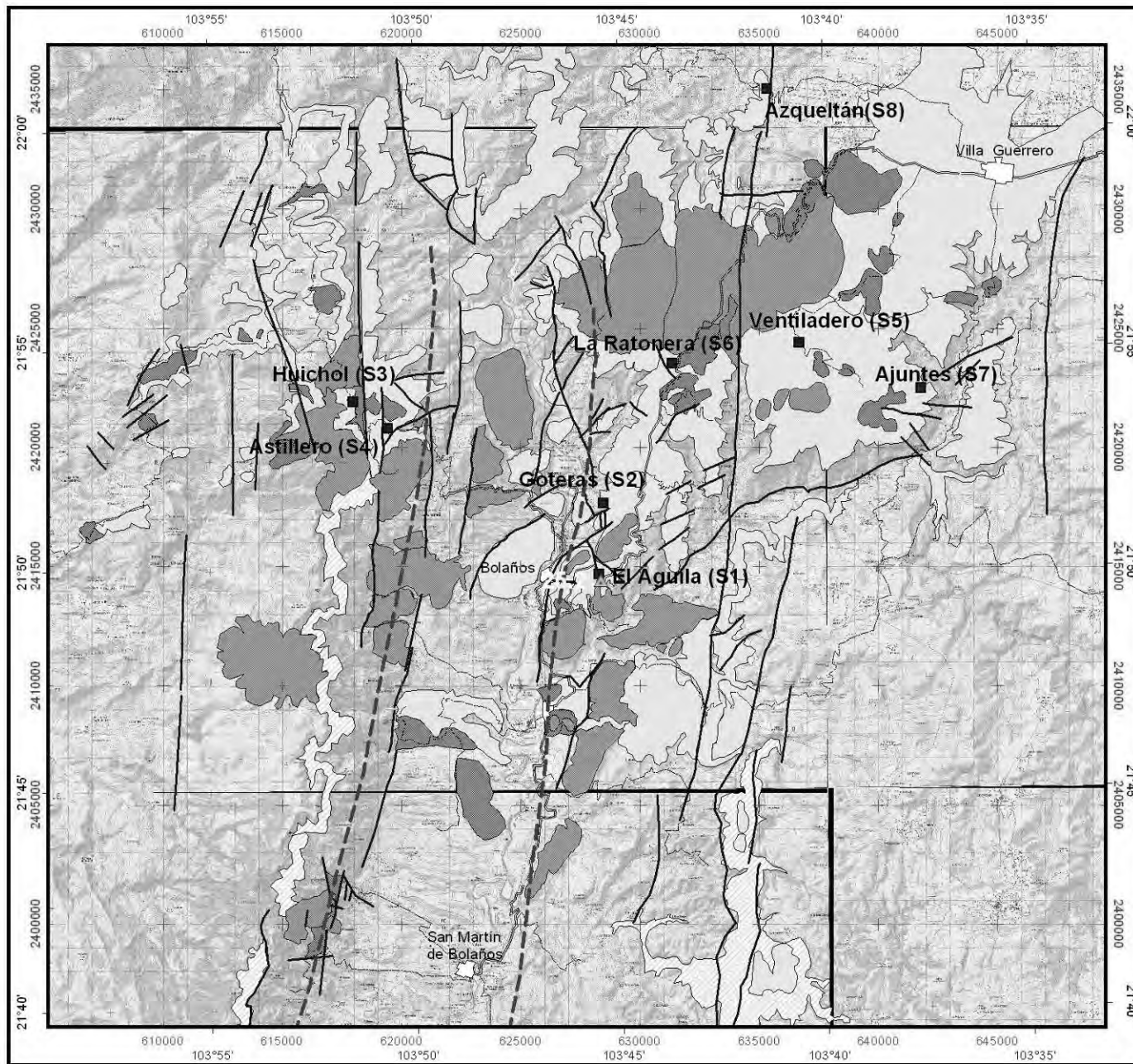
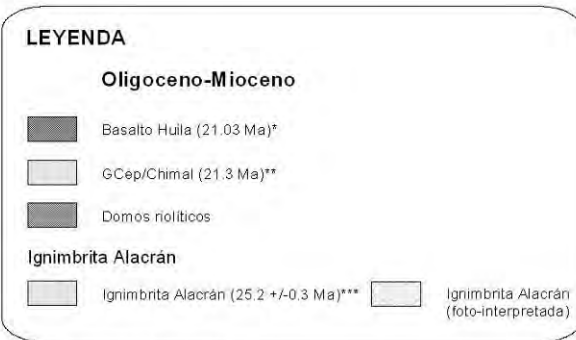


Fig. 32.- Correlación estratigráfica de las secciones medidas en campo pertenecientes a la ignimbrita Alacrán.



Mapa de afloramientos de la Ignimbrita Alacrán



* edad tomada de Lyons (1988)
 ** edad tomada de Scheubel (1983)
 *** edad obtenida por Aguirre-Díaz

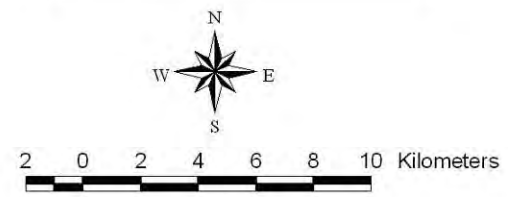
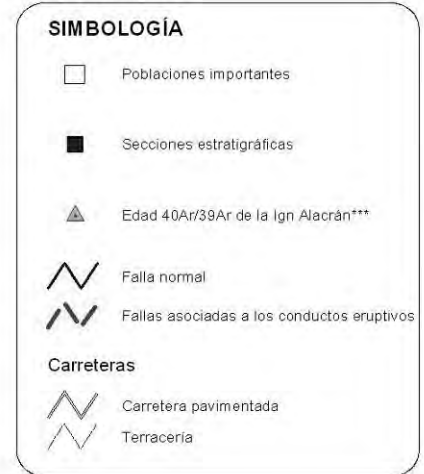


Fig. 33.- Mapa de afloramientos de la ignimbrita Alacrán donde se muestra con un cuadro color azul la localización de las secciones estratigráficas.

Capítulo IV.- Anisotropía de Susceptibilidad Magnética

IV.1 Descripción del método

En este trabajo se utilizó el método paleomagnético de anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS, por sus siglas en inglés, *Anisotropy of Magnetic Susceptibility*) con el fin de tener una herramienta adicional que ayude a identificar la fuente que dio origen a la ignimbrita Alacrán.

El método de AMS ha sido utilizado para determinar direcciones de flujo en ignimbritas donde varios estudios han demostrado que las proyecciones de los ejes de máxima susceptibilidad magnética se intersectan cerca de la fuente ya conocida para estas ignimbritas (Knight *et al.*, 1986; MacDonald y Palmer, 1990; Seaman *et al.*, 1991; Ellwood, 1992; Lamarche y Froggatt, 1993; Palmer *et al.*, 1996; Palmer y McDonald, 1999). También ha sido propuesto que el flujo de una ignimbrita produce imbricación del plano de foliación magnética, definido por los ejes de susceptibilidad máxima e intermedia (Palmer y McDonald, 1999; Geoffroy *et al.*, 2002; Branney y Kokelaar, 2002)

La susceptibilidad magnética K está definida como la relación de la magnetización inducida M respecto al campo magnético aplicado H . Las unidades en el Sistema Internacional para M y H son $A\ m^{-1}$ y para K son adimensionales. Para la mayoría de las rocas, M varía con la dirección de aplicación de H , y K es un tensor simétrico de segundo rango que relaciona el momento magnético inducido al campo magnético aplicado. A diferencia de la remanencia magnética que persiste después de haber removido el campo magnético, la magnetización inducida por la susceptibilidad de una roca existe solo cuando un campo magnético aplicado está presente. Los datos de AMS para un espécimen de roca son convencionalmente expresados como un elipsoide triaxial cuyos ejes mayor, intermedio y menor representan las magnitudes y orientaciones de la susceptibilidad máxima (K_{max}), intermedia (K_{int}), y mínima (K_{min}) respectivamente. En otras palabras, estos valores describen el elipsoide de susceptibilidad magnética.

En términos generales, la anisotropía magnética en las rocas puede presentarse debido a una forma preferencial, distribución, o alineamiento cristalográfico de una amplia gama de minerales diamagnéticos, paramagnéticos, y ferrimagnéticos (Borradaile, 1988;

Rochette *et al.*, 1992). Para la mayoría de las ignimbritas o “*ashflow tuffs*” que han sido examinadas por la técnica AMS, la anisotropía ha sido adscrita al alineamiento preferencial de forma de la magnetita o maghemita, las cuales son cúbicas y ocurren típicamente como granos casi equidimensionales. Como consecuencia, el grado de anisotropía magnética debido al alineamiento preferencial de ejes largos en estos granos es pequeño; diferencias típicas entre K_{\min} y K_{\max} están en el orden de 1-3%. Para la mayoría de los tamaños de los granos accesorios de magnetita (unas micras a decenas de micras), el eje K_{\max} corresponde a la dirección larga del grano, mientras que la dirección de menor susceptibilidad, la K_{\min} , corresponde a la dirección más corta. De esta manera, para un agregado de granos ferrimagnéticos K_{\max} define la alineación magnética, mientras que K_{\min} define el polo al plano de foliación magnética. Aunque la fábrica mesoscópica de una ignimbrita puede variar desde casi imperceptible hasta una foliación fuertemente desarrollada en las porciones más soldadas, el grado de foliación magnética (K_{int}/K_{\min}) y el echado del plano de foliación magnética no varían significativamente con el grado de soldamiento (Hillhouse y Wells, 1991; Palmer *et al.*, 1996). La foliación magnética se presenta como una foliación debida a flujo laminar durante el emplazamiento (Palmer y MacDonald, 1999).

Knight *et al.* (1986) muestran que se puede obtener un sentido de flujo mediante datos de AMS. Mediante el estudio de secciones delgadas orientadas determinaron una pequeña imbricación de la fábrica de la roca, con buzamientos hacia la fuente de menos de 30°, y debido a que la dirección del buzamiento de K_{\max} coincide con la dirección del echado del plano de foliación magnético (el plano que contiene a los ejes K_{\max} y K_{int}), el buzamiento de K_{\max} indica la procedencia del flujo.

IV.2 Obtención de muestras

En primer lugar se seleccionaron afloramientos adecuados para la obtención de núcleos de roca: los afloramientos deben estar sanos, es decir que no estén alterados o intemperizados, debido a que la roca debe estar bastante consolidada para que los núcleos puedan obtenerse completos sin que se fracturen, ya que la alteración puede destruir los minerales portadores de la fábrica. Algunos de los afloramientos donde se obtuvieron los núcleos no presentaban basculamiento o presentaban basculamientos de entre 4° a 11°, y

sólo uno de 17°. En total se perforaron 18 sitios; en cada sitio se obtuvo un promedio de 15 núcleos. El procedimiento para la obtención de los núcleos fue el siguiente:

1. Para la obtención de los núcleos se utilizó una perforadora de núcleos portátil que funcionaba mediante un motor de combustión interna, con brocas con punta de diamante de 2.54 cm de diámetro (Fig. 34a). Cada núcleo se perforó a una profundidad de al menos 6 cm.
2. Antes de remover los núcleos del afloramiento, se midió su orientación por medio de un orientador diseñado específicamente para ese fin. El orientador se inserta en el núcleo, y se nivela la brújula que está fija en el orientador respecto a la horizontal (Fig. 34b y Fig. 35).
3. En esta posición, se midieron el azimut y la inclinación de los núcleos, apuntando estos datos en la libreta de campo, y asignando un número a cada núcleo.
4. Se marcó una línea en los núcleos utilizando un alambre de bronce siguiendo la ranura en la parte cilíndrica del orientador (marca fiducial).
5. Se desprendieron los núcleos del afloramiento usando una herramienta diseñada para este fin.
6. Se marcaron flechas en la línea de orientación, de tal manera que las flechas apunten hacia la base del núcleo (Fig. 34c). Posteriormente se almacenan en bolsas de tela para su transporte.

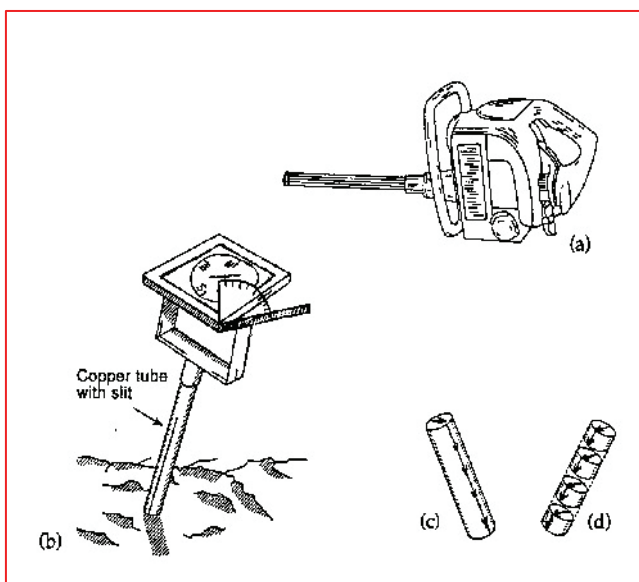


Fig. 34. Se muestran dibujos de los aparatos utilizados para la obtención de núcleos: (a) perforadora, (b) orientador, (c) los núcleos y la orientación de la flecha, (d) especímenes. Figura tomada de *Instruction manuals* en <http://www.agico.com/>

Adicionalmente, se tomaron datos estructurales donde se observaron basculamientos con el fin de hacer las correcciones estructurales al momento de analizar los datos (Tabla 2).



Fig. 35. (A) Obtención de núcleos en un afloramiento de la ignimbrita Alacrán. (B) El núcleo se orienta cuando todavía esta adherido al afloramiento. Se obtienen el azimut y buzamiento de su eje principal, así como su azimuth solar cuando es posible.

Tabla 2. Se muestran las coordenadas de localización de los sitios de muestreo, el tipo de roca, y el basculamiento de las capas donde se realizaron los muestreos.

Nombre del sitio de muestreo	Coordenadas ITRF92		Tipo de roca	ignimbrita	Basculamiento de las capas
	Este - 13Q	Norte			
BOR	633231	2417986	ignimbrita	Alacrán-base	352°/10°
GAV	630497	2420758	ignimbrita	Alacrán-cima	274°/11°
ZAR	636708	2424419	ignimbrita	Alacrán-150 m debajo de la cima	-
PIN	638286	2423253	ignimbrita	Alacrán-cima	-
AML	609359	2420692	ignimbrita	Chimal	-
CUE	617988	2421929	ignimbrita	Alacrán-secuencias inferiores de flujos de pómez, base secc. Huichol	135°/17SW
SEC	619427	2420817	ignimbrita	Alacrán- a 76 m sobre las secuencias de oleadas de la base de la ign Alacrán, secc. Astillero	255°/4°
BRE	628550	2414552	ignimbrita	matriz de la brecha co-ignimbrítica de la sección El Águila	114°/9°SW
AGU	628321	2414529	ignimbrita	flujos de pómez basales de la secc El Águila, entre dos oleadas	114°/9°SW
MOR	687770	2404729	ignimbrita	¿?	horizontales
TUL	613087	2429726	ignimbrita	Alacrán	-
BAJ	615404	2432939	ignimbrita	Alacrán	horizontales

AST	619527	2420821	ignimbrita	Alacrán	255°/4°
PRI	620320	2421531	ignimbrita	Alacrán	255°/11°
CUR	619541	2420530	ignimbrita	Alacrán	255°/4°
FRE	685934	2403974	ignimbrita	¿?	89°/6°
CAJ	695723	2396380	ignimbrita	¿?	-
AJU	641719	2422300	ignimbrita	Alacrán	horizontales

IV.3 Procesamiento de las muestras

Una vez en el laboratorio, se marca la línea de orientación con un plumón indeleble y se procede a cortar los núcleos para obtener especímenes de 2 cm de espesor, generando por cada núcleo de uno a dos especímenes, y en algunos casos hasta tres. Los especímenes se identifican de la base hacia la cima con las letras “z”, “y”, “x” dependiendo del largo de cada núcleo (Fig. 36). Cada espécimen se marca en la parte superior con una flecha a fin de indicar la marca de orientación que fue medida en campo, también llamada marca fiducial.

Para medir la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) se utilizó el instrumento *KLY-3 Kappabridge “Magnetic Susceptibility and Anisotropy Meter”*. Este instrumento consiste de una unidad de soporte (donde se colocan los especímenes, *pick-up unit*), una unidad de control (*control unit*) y una computadora. El *KLY-3* mide la anisotropía de susceptibilidad magnética de un espécimen estático colocado en un porta-muestras (Fig. 37).



Fig. 36. En la foto (A) se muestran los especímenes ya cortados con un espesor de 2.5 cm; en la foto (B) se muestra la cortadora de núcleos.



Fig. 37. En la fotografía (A) se muestra el instrumento *KLY-3 Kappabridge “Magnetic Susceptibility and Anisotropy Meter”*; de izquierda a derecha se observa la unidad de soporte (donde se colocan los especímenes, *pick-up unit*), la computadora que procesa los datos, y la una unidad de control (*control unit*). La fotografía (B) muestra el porta-muestras, donde se coloca cada uno de los especímenes para introducirlos a la unidad de soporte y medir su susceptibilidad magnética en 15 posiciones diferentes.

La susceptibilidad del espécimen es medida en 15 diferentes orientaciones siguiendo una tabla de orientaciones de la muestra. La posición del espécimen se cambia manualmente durante las mediciones, es decir se cambia 15 veces de posición. Mediante el software SUSAM se calcula automáticamente el tensor de susceptibilidad así como el error estadístico, el cual debe ser menor a 1 % para obtener datos confiables. Una vez calculados estos valores, se introducen los valores de orientación de cada espécimen medidos en campo, y el programa SUSAM hace las correcciones necesarias. También se pueden introducir los datos estructurales de rumbo y echado de las capas cuando éstas presentan basculamiento, para que el programa haga las correcciones pertinentes. En este trabajo las correcciones estructurales se realizaron utilizando el software Stereonet, el procedimiento se describirá más adelante. El programa SUSAM entrega como resultado dos archivos, uno con extensión ASC y otro con extensión RAN, los archivos ASC son archivos que se pueden abrir con un procesador de textos y se pueden ver las orientaciones de K_{max} , K_{int} y K_{min} de cada uno de los especímenes medidos, y otros parámetros que describen el elipsoide de AMS.

Los archivos RAN se utilizan para realizar los estereogramas mediante la utilización del software ASTA el cual fue proporcionado por AGICO (Advanced Geoscience Instruments Company, Brno, República Checa). Las direcciones de los ejes de susceptibilidad se grafican en redes estereográficas. Los estereogramas son proyecciones de igual-área sobre el hemisferio inferior, y muestran las orientaciones de susceptibilidad máxima K_{\max} (cuadros), intermedia K_{int} (triángulos) y mínima K_{\min} (círculos) del tensor de susceptibilidad de cada espécimen individual (símbolos pequeños) y del tensor promedio (símbolos grandes) perteneciente a cada uno de los sitios. Las elipses de confianza alrededor de las direcciones principales del tensor promedio son calculadas para un nivel de confianza del 95%, de acuerdo a Jelinek (1978).

Una vez que se obtuvieron los estereogramas para cada sitio, se calculó con la ayuda de una red estereográfica la orientación del plano de foliación magnética definido por las direcciones promedio de K_{\max} y K_{int} del elipsoide de susceptibilidad, así como del polo de dicho plano el cual está definido por K_{\min} . Posteriormente se introdujeron los valores de estos planos al software Stereonet con el fin de hacer las correcciones estructurales pertinentes para cada sitio. La corrección estructural consistió en rotar a la posición horizontal las capas de la ignimbrita Alacrán que presentaran basculamiento; al hacer este procedimiento cambian las orientaciones de los ejes principales del elipsoide de susceptibilidad. La magnitud y dirección del giro son diferentes para cada sitio dependiendo del valor del basculamiento medido. Una vez hechas estas correcciones, se obtuvo la dirección de flujo corregida para cada sitio, indicándola con una flecha con línea continua en el estereograma, y mostrando estas direcciones en el mapa.

IV.4 Resultados

La forma de la mayoría de los elipsoides de anisotropía es oblada (Fig. 38), los valores del parámetro de forma (T) varían desde $T = 0.055$ para el sitio CAJ hasta $T = 0.839$ para el sitio GAV. Sólo el sitio CUE presentó un tensor promedio con forma ligeramente prolada ($T=-0.045$). Si $0 < T \leq 1$, la forma del elipsoide es oblada, mientras que si $-1 \leq T < 0$, la forma del elipsoide será prolada (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982, Talring y Hrouda, 1993).

El grado de anisotropía P_J (Jelinek, 1981, Tarling y Hrouda, 1993) para estas muestras varía de $P_J= 1.003$ para el sitio GAV a $P_J=1.015$ para el sitio SEC. En la Tabla 3 se muestran estos valores así como el número de especímenes analizados por cada sitio.

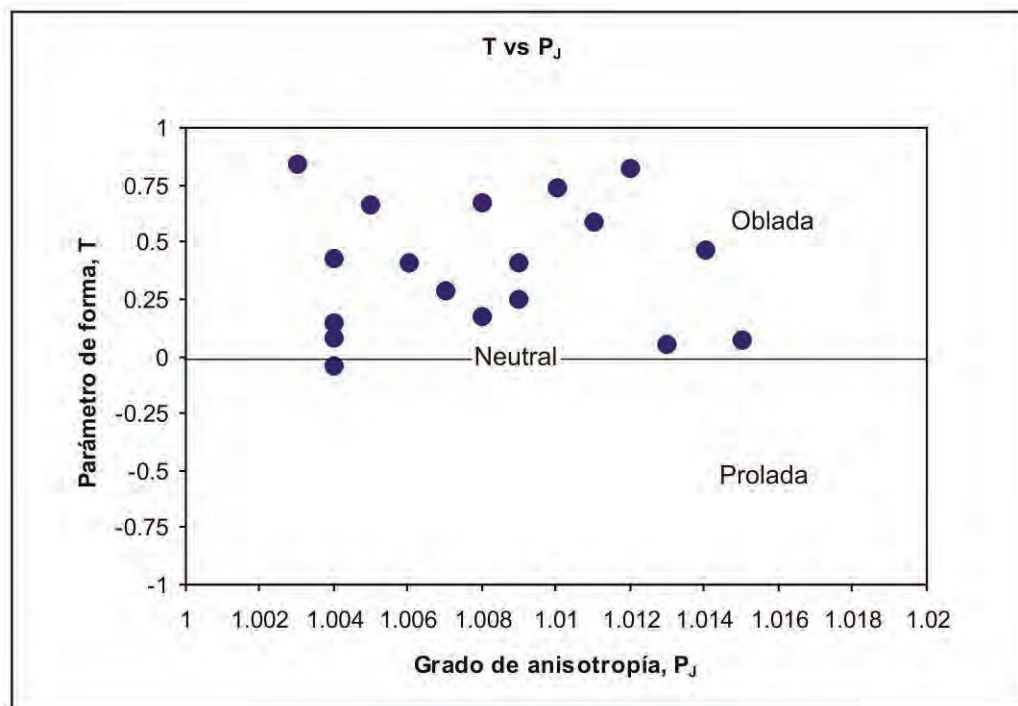


Fig. 38. Gráfica T vs P_J . Se observa que la mayoría de los elipsoides de anisotropía presentan forma oblada (ver texto).

Tabla 3. Tabla donde se muestra el número de especímenes analizados y el parámetro de forma (T) de los elipsoides promedio de cada sitio. Si T es positivo y se aproxima a +1, la forma del elipsoide tiende a ser más oblada; si T es negativo y se aproxima a -1, la forma tiende a ser más prolada (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982, Tarling y Hrouda, 1993). También se muestran los valores del grado de anisotropía (P_J) (Jelinek, 1981, Tarling y Hrouda, 1993) para cada sitio.

	N° de especímenes	Valor de T (parámetro de forma)	Forma del elipsoide de anisotropía	Grado de anisotropía (P _J)
BOR	19	0.410	Oblada	1.006
GAV	17	0.839	Oblada	1.003
ZAR	15	0.660	Oblada	1.005
PIN	22	0.423	Oblada	1.004
AML	15	0.173	Oblada	1.008
CUE	16	-0.045	Débilmente Prolada	1.004
SEC	16	0.070	Débilmente Oblada	1.015
BRE	14	0.080	Débilmente Oblada	1.004
AGU	19	0.741	Oblada	1.010
MOR	10	0.289	Oblada	1.007
TUL	14	0.671	Oblada	1.008
BAJ	14	0.824	Oblada	1.012
AST	13	0.411	Oblada	1.009
PRI	13	0.591	Oblada	1.011
CUR	13	0.147	Oblada	1.004
FRE	10	0.467	Oblada	1.014
CAJ	11	0.055	Débilmente Oblada	1.013
AJU	14	0.253	Oblada	1.009

En la Tabla 4 se muestran las direcciones de flujo y buzamiento de K_{max} del tensor promedio, obtenidas para cada sitio de muestreo después de haber procesado los datos con la ayuda de los programas ASTA y Stereonet. Se muestran los datos sin corrección estructural y con corrección estructural; los valores se presentan en datos azimutales referidos al sistema de coordenadas geográficas. En los sitios ZAR, PIN, AML, CAJ y TUL no se hizo corrección estructural debido a que los afloramientos presentaban estructura masiva, por lo que no se pudo determinar si las capas estaban basculadas. Se asume que su actitud es horizontal. En los sitios MOR, BAJ y AJU se determinó que las capas mantenían una posición horizontal, por lo que no hubo necesidad de hacer la corrección estructural. Adicionalmente se calculó el valor de *alfa 95* (α_{95}), que es el valor del semi-ángulo del cono de confianza alrededor del eje definido por K_{min} promedio, es decir alrededor del polo del plano de foliación. Para la obtención de α_{95} , se introdujeron al software “Mean2” las

orientaciones de los ejes de K_{\min} de cada uno de los especímenes de roca. El programa entrega como resultado el valor de α_{95} ; este procedimiento se repite para cada uno de los sitios. Con este valor se construyeron los abanicos de incertidumbre para cada sitio, el abanico se abre hacia la dirección de buzamiento de K_{\max} .

Tabla 4. Direcciones de flujo y buzamiento de K_{\max} de cada uno de los sitios muestreados sin corrección estructural y con corrección estructural. También se muestran los valores de alfa95 para cada uno de los sitios.

Sitio de muestreo	Dirección de flujo sin corrección estructural	Buzamiento de K_{\max}	Dirección de flujo con corrección estructural	Buzamiento de K_{\max} con corrección estructural	α_{95}
BOR	340°	12°	24°	14°	11.4°
GAV	198°	20°	213°	10°	15.7°
ZAR	227°	3°	-	-	10.9°
PIN	258°	26°	-	-	13.4°
AML	40°	18°	-	-	11.1°
CUE	88°	6°	207°	13°	13.2°
SEC	49°	30°	43°	32°	14.8°
BRE	25°	18°	26°	9°	16.7°
AGU	74°	3°	186°	7°	7.1°
MOR	262°	14°	-	-	27°
TUL	76°	12°	-	-	8.7°
BAJ	87°	10°	-	-	6.9°
AST	58°	18°	47°	19°	12.6°
PRI	106°	10°	41°	10°	4.1°
CUR	64°	10°	44°	11°	20.8°
FRE	177°	3°	178°	9°	13.9°
CAJ	140°	46°	-	-	29.2°
AJU	85°	18°	-	-	13.4°

En Figuras 39-a a 39-r se muestran las proyecciones estereográficas de los datos de cada sitio. La flecha con línea discontinua es la dirección de flujo sin corrección estructural, la flecha con línea continua es la dirección de flujo con corrección estructural. Algunos diagramas muestran flechas con doble sentido: esto se debe a que a pesar de que existe buzamiento de K_{max} no se pudo determinar con exactitud el sentido de flujo por una de las siguientes causas o la combinación de éstas:

- 1) existe gran dispersión de los datos
- 2) K_{max} presenta un ángulo de buzamiento muy bajo
- 3) no fue posible hacer la corrección estructural puesto que los afloramientos eran masivos y por lo tanto no se observó un plano adecuado para medir un posible basculamiento de las capas.

En la Figura 40 se muestra la localización de los sitios de muestreo para AMS en los alrededores del graben de Bolaños y en la sierra de Morones.

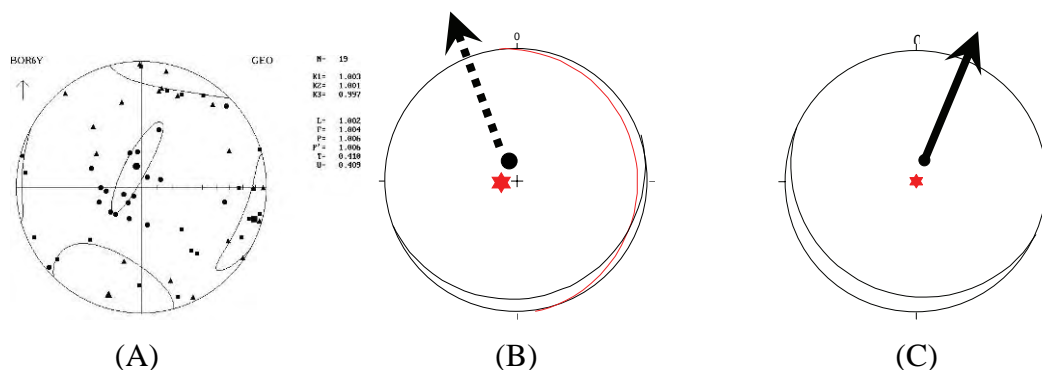


Figura 39-a. Sitio **BOR**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 10° en la dirección 352° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $114^\circ/14^\circ$, dirección de flujo: 24° .

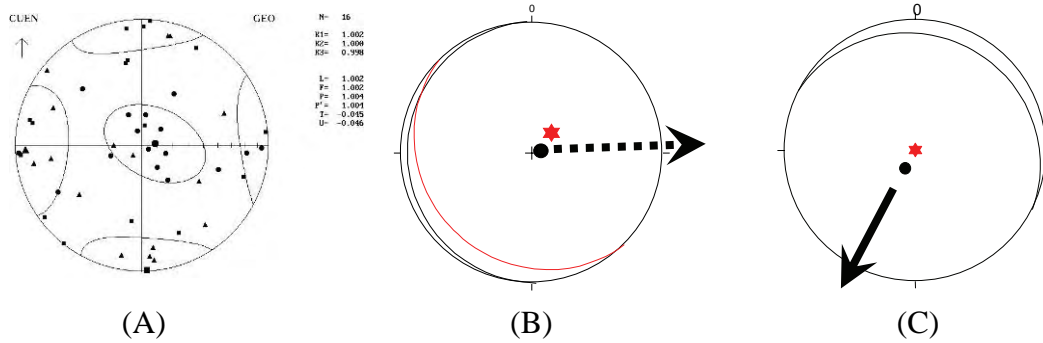


Figura 39-b. Sitio CUE. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 17° en la dirección 135° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $297^\circ/13^\circ$, dirección de flujo: 207° .

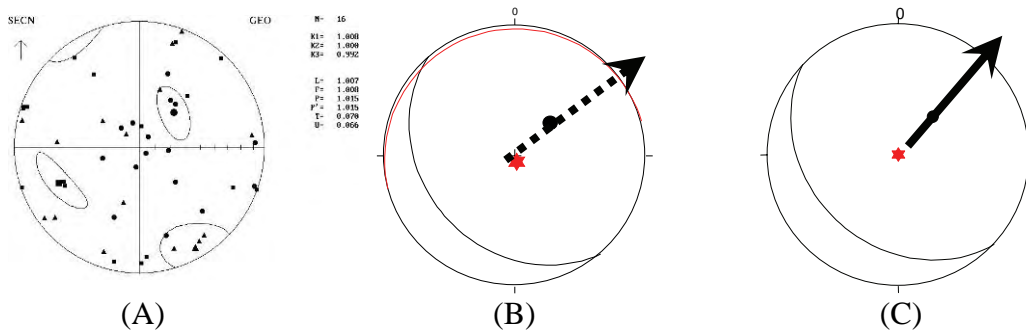


Figura 39-c. Sitio SECN. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 4° en la dirección 255° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $133^\circ/32^\circ$, dirección de flujo: 43° .

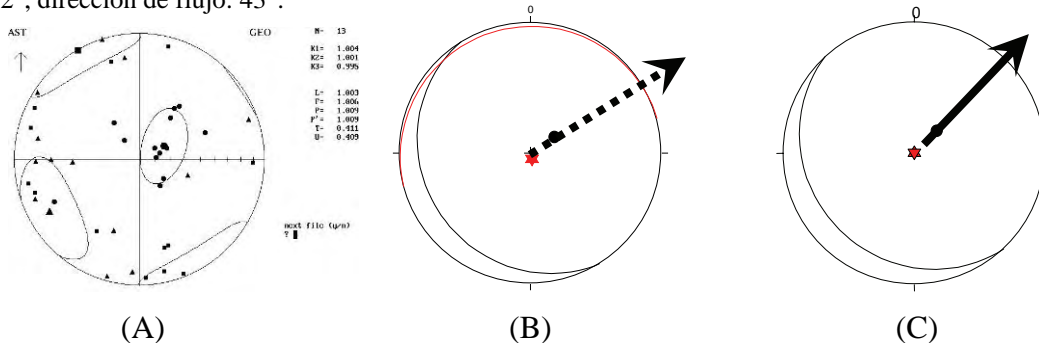


Figura 39-d. Sitio AST. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 4° en la dirección 255° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $137^\circ/19^\circ$, dirección de flujo: 47° .

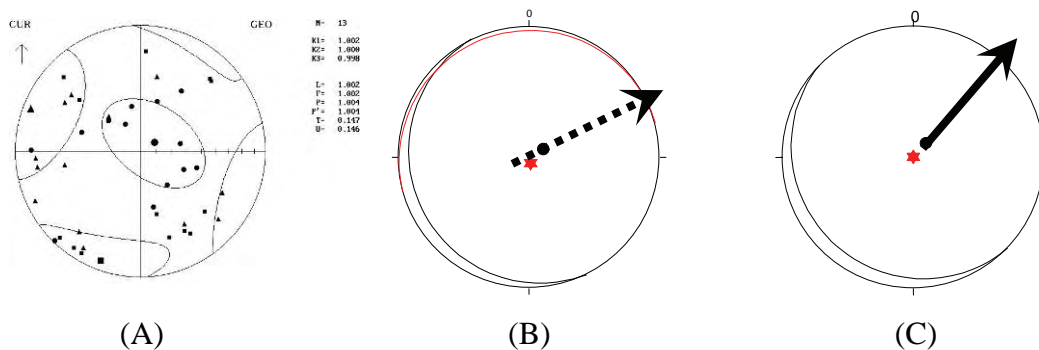


Figura 39-e. Sitio **CUR**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 4° en la dirección 255° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $134^\circ/11^\circ$, dirección de flujo: 44° .

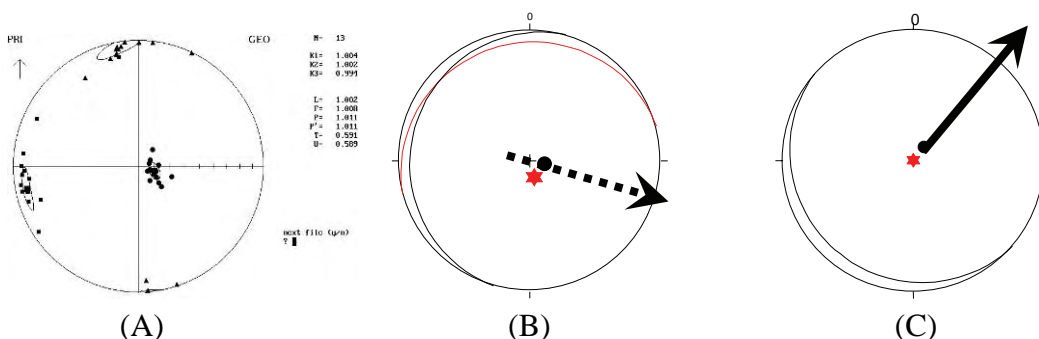


Figura 39-f. Sitio **PRI**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 11° en la dirección 255° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $131^\circ/10^\circ$, dirección de flujo: 41° .

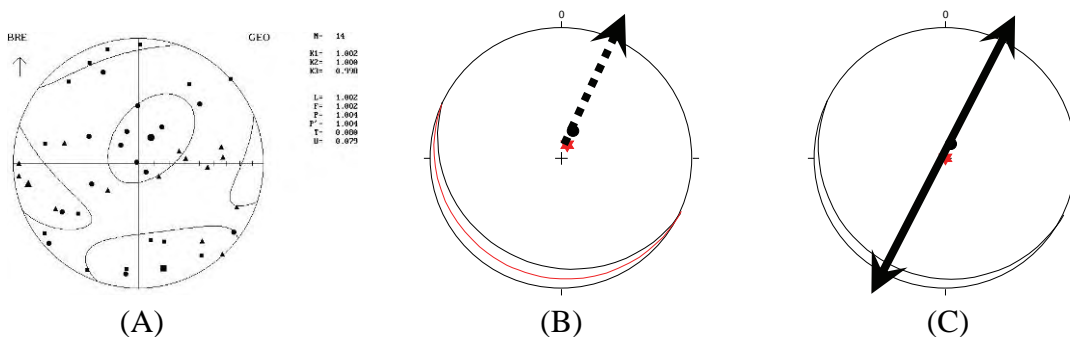


Figura 39-g. Sitio **BRE**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 9° en la dirección 114° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $116^\circ/9^\circ$, dirección de flujo: 26° .

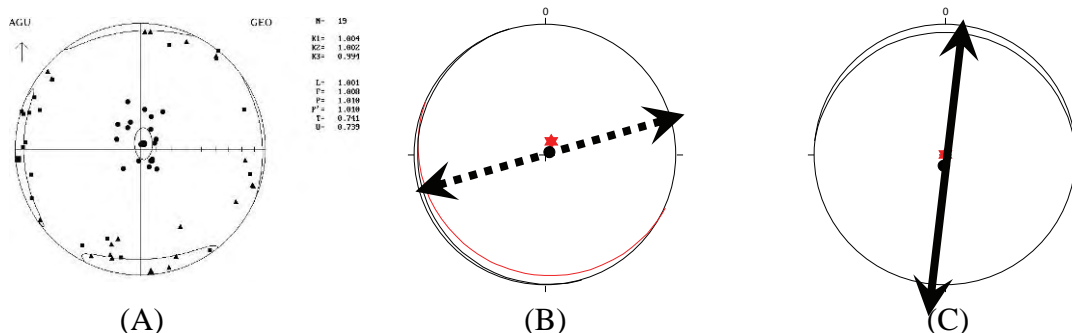


Figura 39-h. Sitio **AGU**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 9° en la dirección 114° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $276^\circ/7^\circ$, dirección de flujo: 186° .

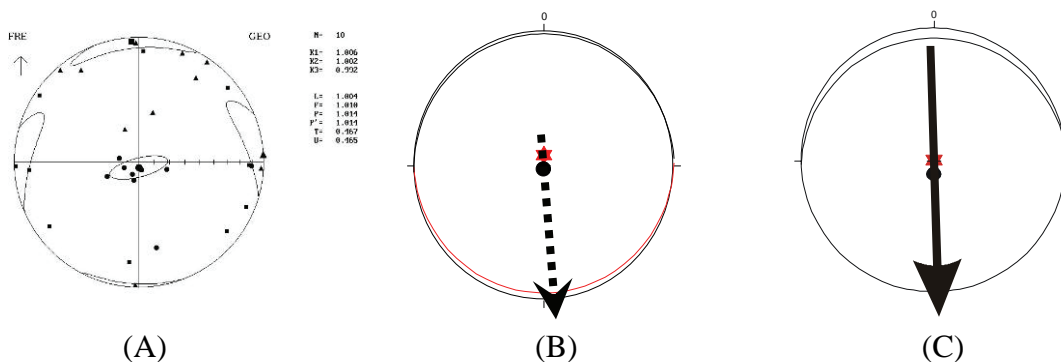


Figura 39-i. Sitio **FRE**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 6° en la dirección 89° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $268^\circ/9^\circ$, dirección de flujo: 178° .

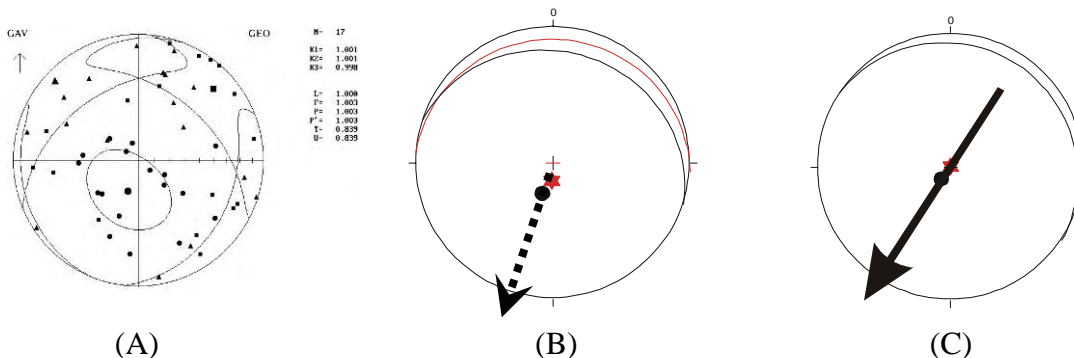


Figura 39-j. Sitio **GAV**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, así como del plano de pseudo-estratificación de la ignimbrita Alacrán en este sitio (curva y estrella rojas); (C) datos con corrección estructural de 11° en la dirección 274° en sentido antihorario, plano de foliación magnética $303^\circ/10^\circ$, dirección de flujo: 213° .

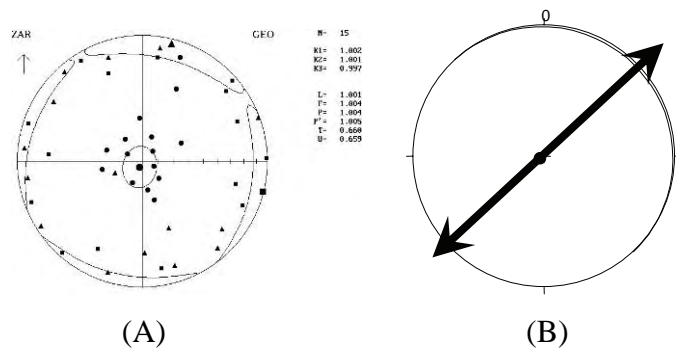


Figura 39-k. Sitio **ZAR**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $317^{\circ}/3^{\circ}$, dirección de flujo: 227° .

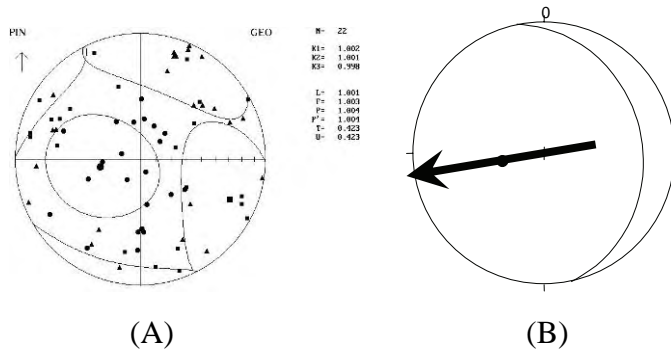


Figura 39-l. Sitio **PIN**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $348^{\circ}/26^{\circ}$, dirección de flujo: 258° .

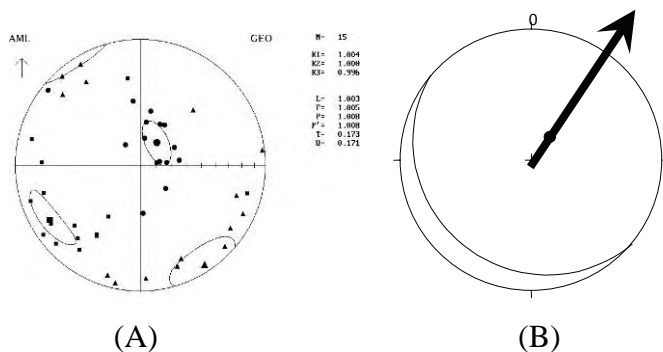


Figura 39-m. Sitio **AML**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $130^{\circ}/18^{\circ}$, dirección de flujo: 40° .

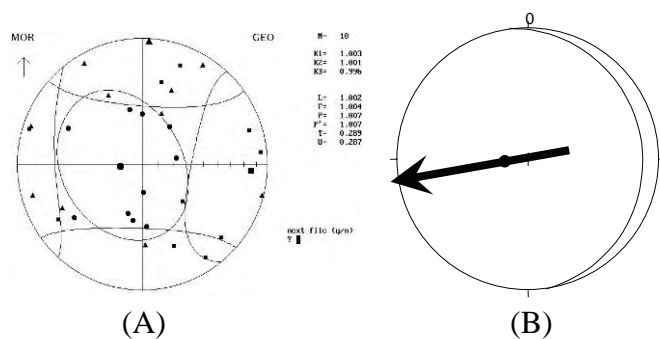


Figura 39-n. Sitio **MOR**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $352^{\circ}/14^{\circ}$, dirección de flujo: 262° .

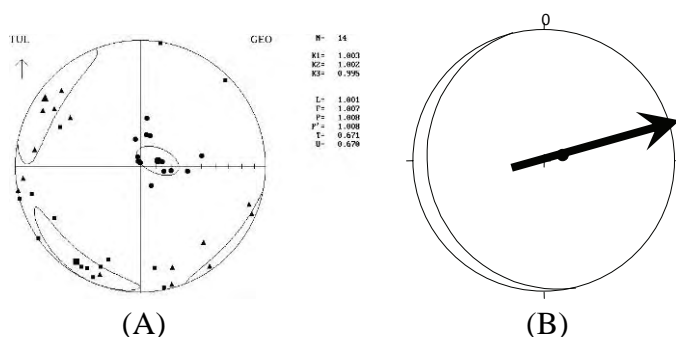


Figura 39-o. Sitio **TUL**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $166^{\circ}/12^{\circ}$, dirección de flujo: 76° .

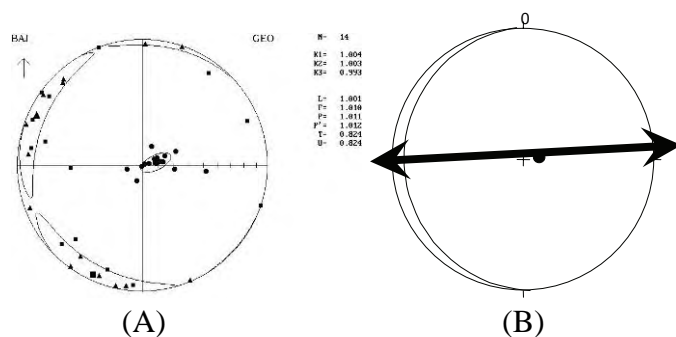


Figura 39-p. Sitio **BAJ**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $177^{\circ}/10^{\circ}$, dirección de flujo: 87° .

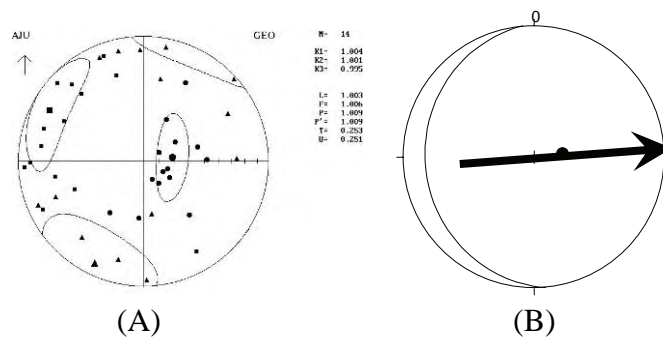


Figura 39-q. Sitio **AJU**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $175^{\circ}/18^{\circ}$, dirección de flujo: 85° .

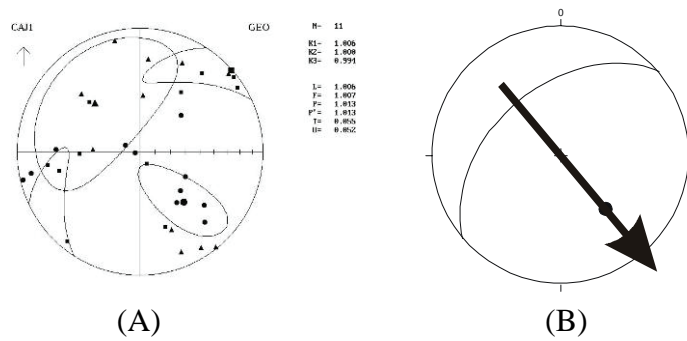
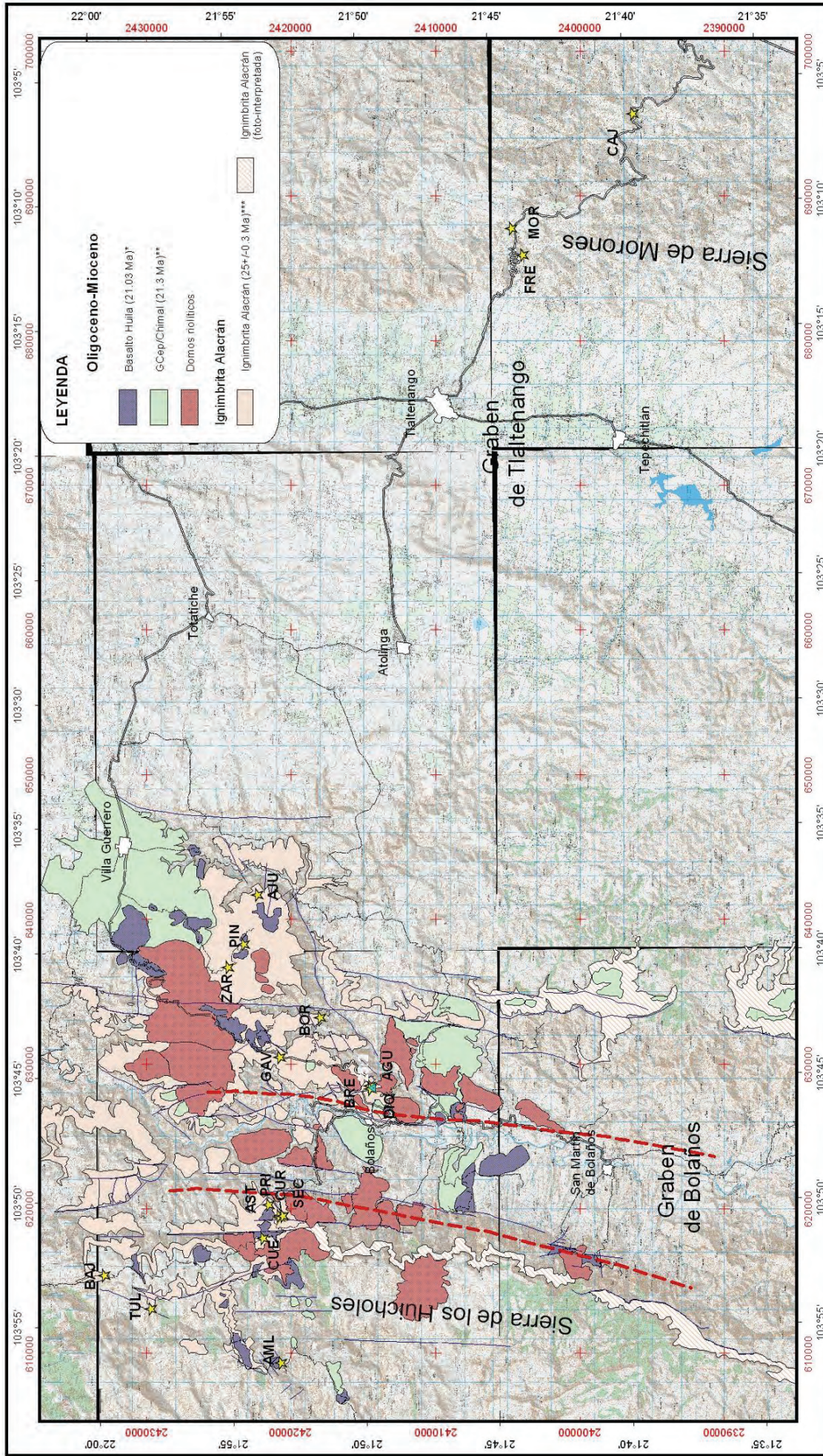


Figura 39-r. Sitio **CAJ**. (A) Diagrama estereográfico donde se muestran las direcciones de los ejes principales de susceptibilidad (K_{max} , K_{int} y K_{min} con su intervalo de confianza); (B) representación estereográfica del plano de foliación magnética y polo (curva negra y círculo negro) promedio de los datos de A, plano de foliación magnética $230^{\circ}/46^{\circ}$, dirección de flujo: 140° .



LEYENDA

Oligoceno-Mioceno

- Basalto Huila (21.03 Ma)*
- G Cep/Chimal (21.3 Ma)**
- Domos riolíticos

Ignimbrita Alacran

- Ignimbrita Alacran (25±0.3 Ma)***
- Ignimbrita Alacran (foto-interpretada)

Simbología

- ★ Sitios de muestreo para AMS
- ▲ Edad 40Ar/39Ar de la Ign Alacran***
- Poblaciones importantes
- ↗ Fallas asociadas a los conductos eruptivos
- ↘ Falla normal
- ↗ Carreteras
- ↘ Carretera pavimentada
- ↘ Terracería



Figura 40.- Localización de los sitios de muestreo para AMS dentro del área de estudio en la sierra de Morones.

Capítulo V.- Interpretación

V.1 Interpretación de los datos de campo

Los flujos piroclásticos de la ignimbrita Alacrán se relacionan con conductos fisurales controlados por el sistema de fallas maestras que formaron al graben de Bolaños (Scheubel *et al.*, 1988; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003). Aguirre-Díaz *et al.* (2005; Aguirre-Díaz *et al.* 2007, 2008) propusieron que el origen de esta secuencia piroclástica está relacionado a la actividad eruptiva del “guben-caldera” de Bolaños. Este graben-caldera está localizado dentro del graben de Bolaños entre las coordenadas 21.4° y 21.9° Latitud N, y fue inferido con base en las evidencias geológicas encontradas en campo, tales como brechas co-ignimbríticas y domos post-colapso, ambos alineados a lo largo de las márgenes del graben-caldera, al acomodo caótico de bloques que se observan dentro del graben-caldera y a la ignimbrita Alacrán, la cual es una secuencia de flujos piroclásticos de gran volumen relacionados al colapso de este graben-caldera (Aguirre-Díaz *et al.*, 2005; 2007; 2008)

Como se ha descrito en el Capítulo III, la ignimbrita Alacrán presenta cambios de facies tanto verticales como horizontales. Algunas de estas facies se pueden identificar inmediatamente por sus características de tamaños de grano, proporción y tipo de componentes (como las brechas co-ignimbríticas y los depósitos de oleadas piroclásticas), mientras que otras son más difíciles de distinguir y correlacionar debido a que no se observan horizontes guía que puedan seguirse o encontrarse en los afloramientos más distantes.

Con la finalidad de hacer una distinción que tomara en cuenta las características principales que presentan las diversas secuencias que constituyen a esta ignimbrita, se dividió en dos miembros principales, 1) una brecha-co-ignimbrítica de rezago, y 2) el depósito principal. Debido a que el contacto entre estas dos secuencias piroclásticas es transicional, se interpretó que dichas secuencias formaron parte del mismo evento eruptivo que originó el colapso del graben-caldera de Bolaños.

En la secuencia basal pre-ignimbrita se encontró una alternancia de depósitos de oleadas y depósitos de flujos de ceniza; también se observaron bloques balísticos de lavas e

ignimbritas de hasta 40 cm de diámetro dentro de estas secuencias. Estas evidencias indican que el evento eruptivo que dio origen a la formación Alacrán comenzó con una fase freatomagmática, como lo indican los depósitos de oleadas y la presencia de lapilli acrecional encontrados dentro de éstas, los cuales son evidencia de un ambiente húmedo. La secuencia de depósitos de oleadas pre-ignimbríticas y depósitos de flujos de ceniza menores puede ser interpretada como una fase progresiva de descompresión de una cámara magmática previa al colapso de una caldera.

En la parte cercana a la caldera, sobre la secuencia basal pre-ignimbrítica, se localiza la brecha co-ignimbrítica, que se observó en ambos lados del graben, con espesores que varían de 30 a 50 m. Del lado oriental del graben se presenta con una estructura masiva, y del lado occidental está intercalada con depósitos de ceniza muy fina. Estas características se interpretaron como la continuación de la fase de despresurización de la cámara magmática, pero con un mayor aporte de líticos de grandes dimensiones (hasta 1.5 m de diámetro) posiblemente debido al ensanchamiento de los conductos eruptivos.

Sobre la brecha co-ignimbrítica se emplazó el depósito principal; el contacto entre estas dos litologías es transicional. El depósito principal es una ignimbrita de gran volumen. Se observaron espesores totales de la ignimbrita Alacrán (brecha co-ignimbrítica y depósito principal) de casi 300m en las paredes del graben, y éste espesor disminuye progresivamente hacia ambos lados del graben: a 15 km al oeste se midió un espesor de alrededor de 150 m y a 17 km hacia el este del graben se midió un espesor de 100 – 150 m. Desafortunadamente más allá de esas distancias no se pudieron observar afloramientos de la ignimbrita Alacrán debido a que está sepultada por otros flujos piroclásticos más jóvenes o por sedimentos fluviolacustres que se acumularon dentro de los grabenes localizados en la parte sur de la Sierra Madre Occidental.

El depósito principal está compuesto por una alternancia de ignimbritas con diferentes proporciones de líticos accesorios, clastos de pómez y matriz, así como de diferentes tamaños de estos componentes. Estas ignimbritas presentan gradación normal e inversa tanto para líticos como para clastos de pómez; se identificaron tres tipos de gradación:

1) Donde los clastos de pómez y líticos presentan gradación normal. La gradación normal de los líticos puede deberse a que la competencia del flujo que forma a la ignimbrita es

decreciente, es decir que el tamaño máximo de clasto que la corriente puede transportar a una localidad en particular decrece con el tiempo, y/o puede ser debido a un decremento en el suministro de líticos debido al decremento de la capacidad erosiva del flujo en el conducto o en el terreno (Branney y Kokelaar, 2002). La gradación normal de clastos de pómez podría deberse a que el suministro de pómez en la fuente decreció con el tiempo.

2) Donde los líticos presentan gradación normal y los clastos de pómez presentan gradación inversa. Como en el caso anterior, la gradación normal de líticos puede deberse a un decremento en la competencia del flujo, por lo que cada vez se depositan líticos más pequeños, y/o por que el suministro de líticos disminuye. La gradación inversa de los clastos de pómez podría deberse a una filtración selectiva durante un flujo decreciente, es decir que los clastos más grandes de pómez son más difíciles de depositar debido a su menor densidad respecto a los líticos (por lo tanto tendremos líticos grandes con clastos de pómez pequeños) y conforme pasa el tiempo la filtración selectiva se vuelve menos efectiva y consecuentemente podrán depositarse clastos de pómez cada vez más grandes (Branney y Kokelaar, 2002). También puede deberse a un incremento en la disponibilidad de clastos de pómez. Este comportamiento también podría interpretarse como un depósito de flujo piroclástico depositado en masa de acuerdo al modelo de emplazamiento de ignimbritas de Sparks et al. (1973), donde los líticos que son más densos que la matriz y los clastos de pómez, se quedan en las partes media e inferior, y los clastos de pómez que son menos densos que los líticos y la matriz, se acumulan en la parte superior.

3) Donde los clastos de pómez presentan gradación normal y los líticos presentan gradación inversa. Este tipo de gradación puede deberse a una competencia creciente de la corriente, donde el tamaño máximo de clasto que la corriente puede soportar se incrementa con el tiempo, y/o a la mayor disponibilidad de líticos de mayor tamaño con el tiempo (Branney y Kokelaar, 2002). La gradación normal de pómez podría deberse a un decremento en la disponibilidad de clastos de pómez en la corriente.

Adicionalmente se identificaron horizontes de ignimbritas donde no se observó gradación alguna: esto implica que este tipo de depósitos se formó sin cambios deposicionales a través del tiempo (Branney y Kokelaar, 2002). Es importante remarcar que la ausencia de gradación no significa necesariamente que no esté presente, pues también podría deberse a que debido a las condiciones del afloramiento no fue posible identificarla.

Otra de las características especiales de este depósito es que presenta horizontes delgados de 10 a 30 cm de espesor identificados como oleadas piroclásticas de dos tipos diferentes, los que están formados exclusivamente por ceniza fina de pómez y los formados por líticos y clastos de pómez de tamaños de arena media a arena gruesa. La presencia de estas oleadas sugiere que el depósito principal se formó por varios pulsos consecutivos pertenecientes al mismo evento eruptivo. Las oleadas formadas por líticos y clastos de pómez de tamaño de arena se pueden interpretar como el comienzo de un pulso explosivo que precede al emplazamiento de un flujo piroclástico; este tipo de oleadas son llamadas en la literatura como oleadas de terreno o “*ground surge*” (Sparks et al., 1973; Cas and Wright, 1987 y referencias). Las oleadas formadas por ceniza fina de pómez se pueden interpretar como la parte superior de un flujo individual, identificadas en la literatura como oleadas de nube de ceniza o “*ash-cloud surge*” (Sparks et al., 1973; Cas and Wright, 1987 y referencias). Esta intercalación de oleadas e ignimbritas le dan una apariencia pseudoestratificada al depósito principal de la ignimbrita Alacrán.

V.2 Discusión de resultados de AMS e interpretación

La orientación de los abanicos de procedencia fue definida con el azimut y buzamiento de K_{\max} promedio; su apertura se determinó con el valor de α_{95} . Los abanicos muestran el patrón de flujo en cada uno de los sitios, abriéndose hacia donde se localiza la posible fuente de la ignimbrita. Algunos de los sitios presentan abanicos opuestos: esto se debe a que no se pudo definir con exactitud el sentido de flujo, debido a que el buzamiento de K_{\max} promedio es muy pequeño (casi horizontal), o a que la dispersión de los datos es demasiado grande.

En total se analizaron 14 sitios pertenecientes a la ignimbrita Alacrán (el sitio AML no se presenta en los resultados debido a que pertenece a la formación Chimal), localizados en las inmediaciones del graben de Bolaños a distancias de 0.7-14 km. Los otros 3 sitios: MOR, CAJ y FRE se localizan sobre la sierra de Morones, a una distancia de 60 km al E del graben de Bolaños. Estos sitios fueron muestreados debido a que los afloramientos presentaban características físicas similares a la ignimbrita Alacrán; sin embargo, la dirección de flujo obtenida para los tres sitios fue diferente a la esperada.

En la margen oriental se localizan los sitios ZAR, PIN y AJU, a distancias de entre 9 a 14 km al Este de la falla oriental asociada a los conductos eruptivos, y los sitios GAV, BOR, AGU y BRE se localizan a distancias de 1.5 km a 6 km al Este de la misma falla, (Fig. 41).

La orientación del eje definido por K_{max} promedio de cada uno de los 7 sitios presenta una orientación NE-SW. Las proyecciones de los abanicos de los sitios AJU, ZAR, BOR, BRE, GAV y AGU coinciden con las localidades donde se han encontrado evidencias que indican cercanía de los conductos alimentadores de esta ignimbrita, tales como brechas co-ignimbríticas, bloques balísticos y domos riolíticos post-colapso. Estas evidencias se observan en las secciones estratigráficas El Águila y Goteras, las cuales se encuentran cerca de las fallas con orientación N-S que definen la parte oriental del graben (Fig. 41).

El abanico del sitio PIN se abre en sentido contrario (Tabla 5) a lo esperado (se abre en sentido contrario que la mayoría). Este sitio no se pudo corregir estructuralmente ya que no fue posible tomar datos estructurales que pudieran definir un cierto basculamiento de las zonas de muestreo, debido a que los afloramientos presentaban estructura masiva. Adicionalmente, la distribución de las direcciones de K_{max} , K_{int} y K_{min} de los especímenes de este sitio en las proyecciones estereográficas tuvo una gran dispersión. La combinación de estas causas pudo haber ocasionado que la dirección de flujo de este sitio apuntara en sentido contrario al de la mayoría de los sitios muestreados en esta parte del graben.

Tabla 5. Alineamiento y buzamiento de K_{max} con respecto a las fallas principales del graben de Bolaños de los 7 sitios de la margen oriental.

	Alineamiento del flujo hacia las fallas principales del graben	Buzamiento hacia las evidencias de cercanía del conducto	Distancia (km)
ignimbrita Alacrán	7/7 (100%)	6/7 (86%)	0.5 - 8

En la margen occidental del graben se localizan los sitios BAJ, TUL y CUE, a distancias de entre 0.5 km a 5 km al Oeste respecto a la falla occidental que define al graben. Los sitios PRI, AST, SEC y CUR se localizan dentro del graben, a distancias de 1 a

2 km hacia el Este de dicha falla (Fig. 41) Todos estos sitios presentan una orientación NE-SW de su eje definido por K_{max} promedio.

La orientación de los abanicos de los 7 sitios de la margen occidental se alinea en dirección al graben de Bolaños (Tabla 6). Los abanicos de los sitios BAJ y CUE se abren en dirección del graben, por lo que podría inferirse que la posible fuente está relacionada a las fallas N-S que lo forman. Sin embargo, los abanicos de los sitios TUL, PRI, AST, SEC y CUR se abren en dirección opuesta al graben; las posibles causas que podrían explicar este comportamiento se explican a continuación.

Tabla 6. Alineamiento y buzamiento de K_{max} con respecto a las fallas principales del graben de Bolaños de los 7 sitios de la margen occidental.

	Alineamiento del flujo hacia las fallas principales del graben	Buzamiento hacia las evidencias de cercanía del conducto	Distancia (km)
ignimbrita Alacrán	7/7 (100%)	2/7 (29%)	0.5 - 5

El afloramiento donde se tomaron las muestras del sitio TUL presentaba una estructura masiva y no fue posible la medición de datos estructurales; sin embargo, mediante observaciones de campo y con la ayuda de fotografías aéreas, se determinó que el muestreo en este sitio se realizó en un bloque fallado y posiblemente con un cierto grado de basculamiento y rotación; sin embargo, debido a la falta de afloramientos que permitieran la medición de datos estructurales confiables no se pudo realizar la corrección estructural, por lo tanto el valor del buzamiento de K_{max} para este sitio no debe tomarse como definitivo.

Los sitios PRI, AST, SEC y CUR se tomaron a diferentes alturas de la sección estratigráfica Astillero (S4). Las muestras en PRI corresponden a la cima de la sección, AST Y SEC a la parte media y CUR corresponde a la base. En estos sitios el valor de azimut de K_{max} varía de 221° a 227° (este es el valor de azimut hacia donde está el buzamiento del eje definido por K_{max} promedio, el cual indica la dirección de proveniencia del flujo), la variación en la dirección de K_{max} para estas muestras es de apenas 6° . Los valores de buzamiento para estos sitios varían de 10° a 32° en el intervalo de direcciones mencionado anteriormente. De acuerdo con las observaciones de campo, se ha interpretado

que los casi 200 metros de espesor que muestra la ignimbrita en este sitio, se emplazaron durante el mismo evento volcánico puesto que se observa una continuidad en los depósitos a lo largo de esta sección estratigráfica. El hecho de que las direcciones y sentido de flujo de K_{\max} a lo largo de esta sección sean prácticamente iguales concuerda con la interpretación de campo. La variación en los componentes, texturas y estructuras que se observan a lo largo de esta sección sugiere que existieron cambios en la energía y régimen de aporte de los materiales que originaron a la ignimbrita Alacrán. Posiblemente ésta sea también la causa de los diferentes valores de buzamiento de K_{\max} encontrados a lo largo de la sección Astillero.

Debido al intenso fallamiento presente en esta parte del graben, es muy difícil inferir la posición original de las capas, por lo que los valores de basculamientos medidos posiblemente no sean absolutos. Ésta puede ser la razón por lo que las proyecciones de los abanicos de procedencia en estos sitios apunten en dirección opuesta al graben.

Los sitios MOR, FRE y CAJ se localizan sobre la sierra de Morones, a 60 km al E del Graben de Bolaños; la orientación del buzamiento de sus ejes K_{\max} promedio es 82° , 358° , y 320° respectivamente. Estos sitios fueron muestreados con el fin de poderlos correlacionar mediante AMS con la ignimbrita Alacrán, debido a que presentan características petrográficas y de componentes muy similares a los descritos para esta ignimbrita; sin embargo, las proyecciones de los abanicos de procedencia no se intersectan con las fallas N-S del graben de Bolaños; aunado a esto, los datos de AMS resultaron con una dispersión muy grande, y en el caso de los sitios MOR y CAJ tampoco se pudieron medir datos estructurales debido a que los afloramientos eran masivos, por lo que no se realizaron correcciones estructurales. Para confirmar o desechar si estos afloramientos pertenecen a la ignimbrita Alacrán, como lo sugieren las características texturales y mineralógicas, así como la posición estratigráfica de los depósitos en estos sitios distales, será necesario obtener más evidencia de otro tipo, como geoquímica de los componentes y una edad radiométrica.

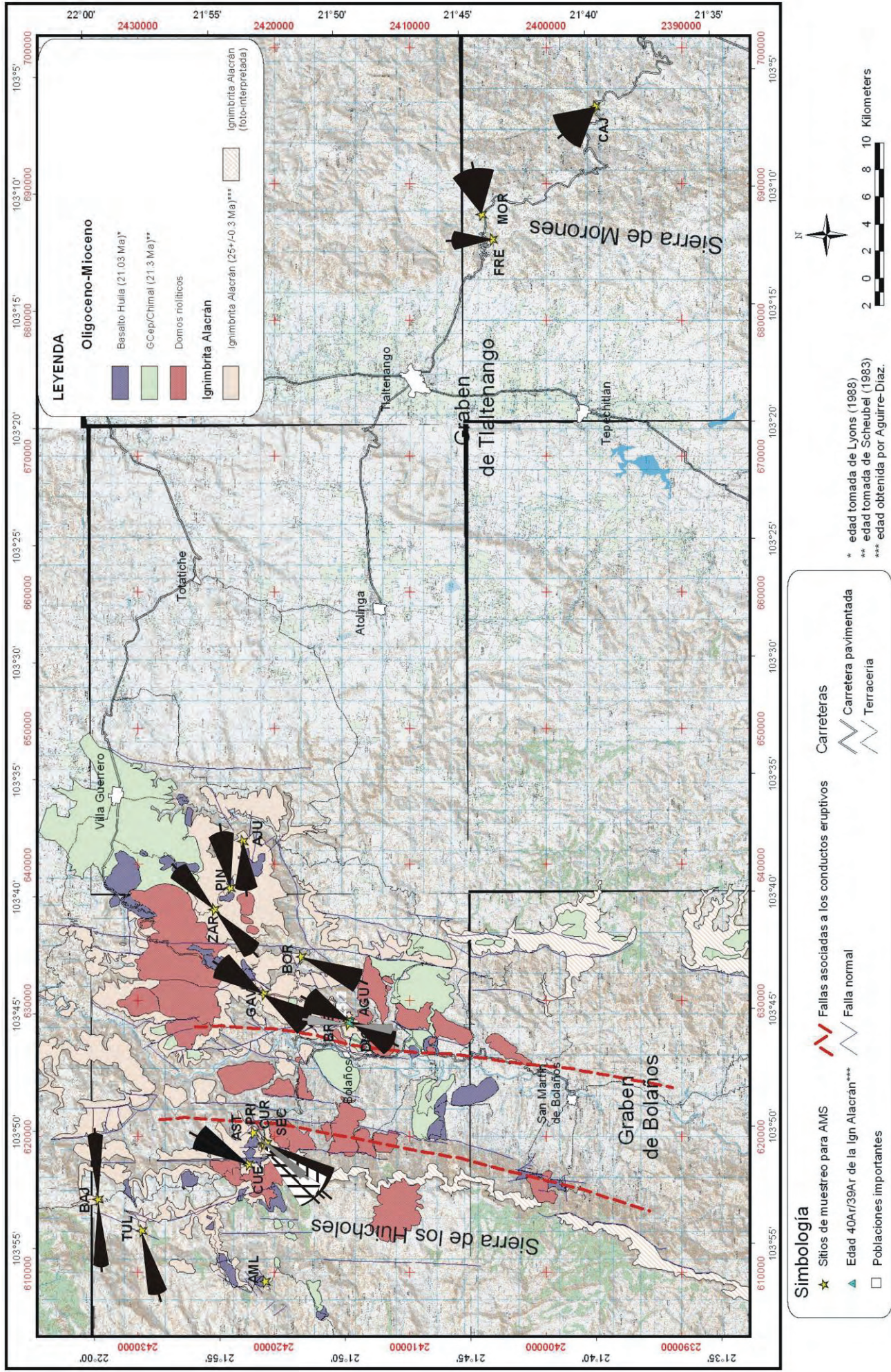


Figura 41. Mapa donde se muestran los abanicos de procedencia del flujo de cada uno de los sitios de muestreo de AMS orientados de acuerdo a los valores de azimut y buzamiento de K_{max} promedio. Los abanicos se abren hacia la dirección de buzamiento de K_{max} la cual está dibujada al centro de cada abanico, es decir se abren hacia donde proviene el flujo, el ápice esta ubicado en el sitio de muestreo (ver texto para referencia).

Capítulo VI.- Conclusiones

- 1) De los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética se concluye que las proyecciones de los abanicos de K_{\max} promedio de los 14 sitios muestreados en las cercanías del graben de Bolaños no se intersectan en un punto en particular, ni definen una zona concéntrica como se esperaría encontrar si la ignimbrita hubiese sido producida por una estructura caldérica semicircular, sino que apuntan hacia las fallas N-S del graben de Bolaños. Algunas de estas proyecciones coinciden con las evidencias de cercanía de la fuente encontradas y definidas en campo, tales como brechas co-ignimbríticas, bloques balísticos y domos riolíticos post-caldéricos, las cuales se encuentran alineadas con las fallas N-S que formaron el graben de Bolaños. Estos resultados sugieren que los conductos alimentadores de la ignimbrita Alacrán pueden estar relacionados a estas fallas. Sin embargo, con los datos disponibles no es posible determinar una localización exacta del conducto o los conductos por donde se emplazó la secuencia ignimbrítica. El método de anisotropía de susceptibilidad magnética resultó en este caso muy útil como una herramienta más para poder proponer junto con las evidencias de campo, la fuente de donde proviene la ignimbrita Alacrán. Sin embargo, para tener una mayor certeza de la localización de los conductos alimentadores de la ignimbrita, es necesario realizar una mayor cantidad de muestreos de AMS distribuidos en los alrededores del graben de Bolaños, así como en las facies más distales conocidas. Desafortunadamente este tipo de trabajo requiere de un mayor tiempo para muestreo y procesado de las muestras, por lo que se saldría de los tiempos determinados para la realización de esta tesis.
- 2) La ignimbrita Alacrán aflora en las paredes del graben de Bolaños, dentro del graben y a distancias de entre 15 y 17 km al este y al oeste del graben. Presenta evidencias de facies proximales a la fuente que se localizan justo en los bordes del graben, tales como: brechas co-ignimbríticas de rezago alineadas a lo largo de las fallas del graben, presencia de bloques balísticos en las paredes del graben, domos riolíticos post-colapso caldérico emplazados sobre las fallas del graben y dentro de

éste, el acomodo caótico de bloques que se observan dentro del graben, y la presencia de la ignimbrita Alacrán, la cual es una secuencia de flujos piroclásticos de gran volumen.

- 3) La ignimbrita Alacrán se dividió en dos partes de acuerdo a sus características físicas principales: 1) una brecha-co-ignimbrítica de rezago, y 2) el depósito principal. Estas secuencias se formaron en un mismo ciclo eruptivo, siendo el depósito principal la porción de mayor importancia por su extensión y volumen. Esta secuencia piroclástica presenta espesores medidos en las paredes del graben (facies proximales) de 200 a 300 m del lado occidental y oriental respectivamente, adelgazándose hacia el occidente y el oriente a alrededor de 150 metros en las facies más distales que se pudieron medir (de 15 a 17 km de distancia). No fue posible medir el espesor en las facies intra-graben, pero de acuerdo a datos de las compañías mineras localizadas en la región se estima en más de 400 m.
- 4) El depósito principal está compuesto por una secuencia de ignimbritas y oleadas piroclásticas que pudieron distinguirse de acuerdo a características tales como tamaños y proporción de líticos y clastos de pómez, así como las estructuras que forman estos componentes. Los depósitos de oleadas piroclásticas pueden ser interpretadas como de tipo *ground surge* (compuestos por líticos y clastos de pómez) y *ash-cloud surge* (compuestos por ceniza y esquirlas de pómez), depositándose antes (*ground surge*) o después (*ash-cloud surge*) del flujo piroclástico correspondiente.
- 5) El emplazamiento de la mayoría de estos depósitos piroclásticos puede interpretarse mediante el modelo de emplazamiento de agradación progresiva. Sin embargo, las características físicas de algunos de los depósitos que forman a esta ignimbrita coinciden también con el modelo de emplazamiento en masa, y representan la sucesión de varios pulsos eruptivos discretos.

Referencias Bibliográficas

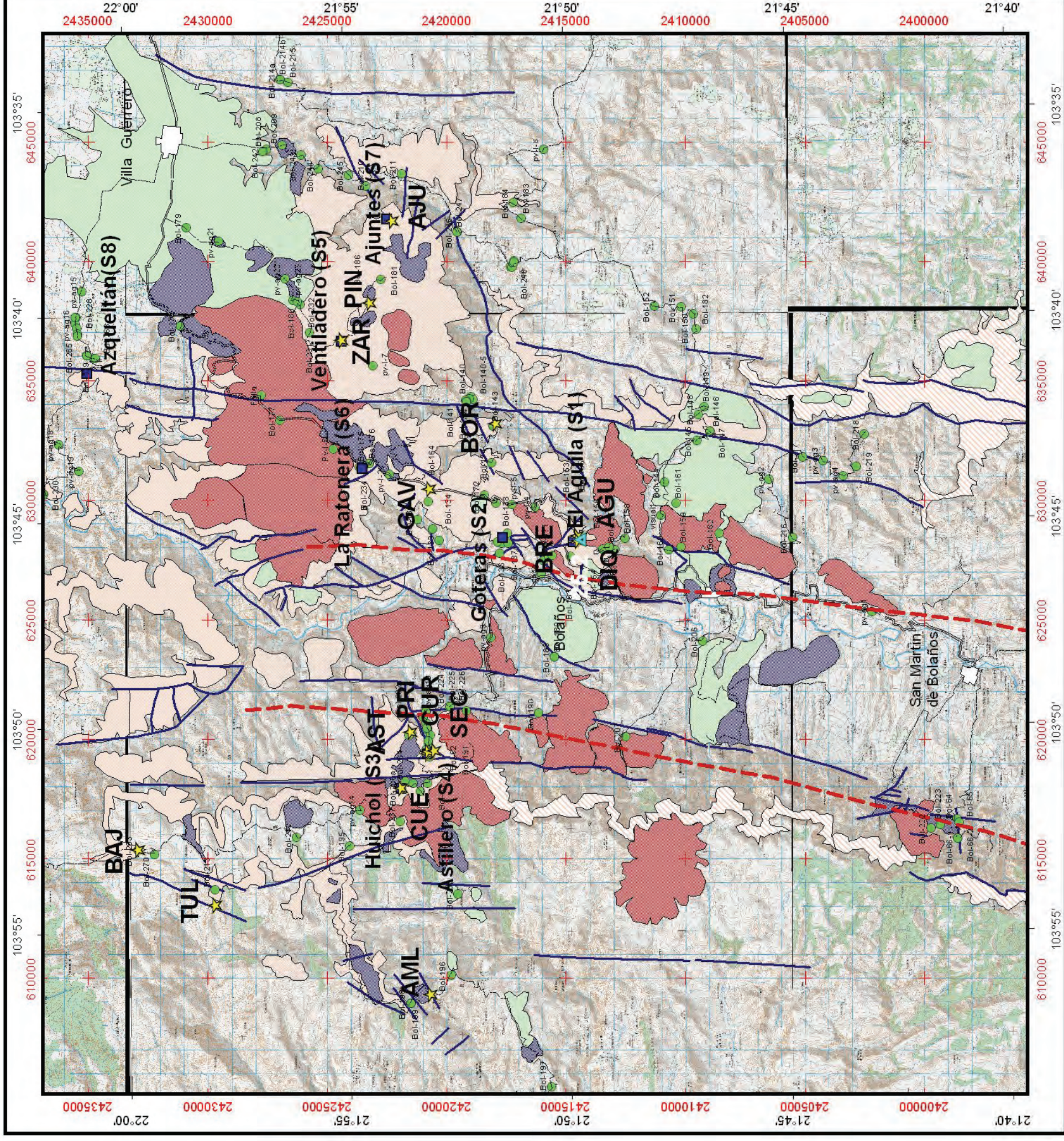
- Aguirre-Díaz, G.J., Labarthe-Hernández, G., 2003. Fissure ignimbrites: Fissure-source origin for voluminous ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and its relationship with Basin and Range faulting. *Geology*, 31 (9), 773-776.
- Aguirre-Díaz, G.J., Labarthe-Hernández, G., Carranza-Castañeda, O., Tristán-González, M., Nieto-Obregón, J., Gutiérrez-Palomares, I., 2005. Graben-calderas de la Sierra Madre Occidental, México. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Libro de resúmenes GEOS, 25 (1), 201.
- Aguirre-Díaz, G.J., Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Nieto-Obregón, J., Gutiérrez-Palomares, I., 2007. Graben-calderas. Volcano-tectonic explosive collapse structures of the Sierra Madre Occidental, Mexico. European Geosciences Union Annual Meeting at Viena, Geophysical Research Abstracts 9, 04704.
- Aguirre-Díaz, G.J., Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Nieto-Obregón, J., Gutiérrez-Palomares, I., (2008, in press), Ignimbrite Flare-up and graben-calderas of the SMO, Mexico: in J. Gottsmann and J. Martí (eds.), "Caldera Volcanism", Developments on Volcanology, Elsevier, New York.
- Aguirre-Díaz, G.J., McDowell, F.W., 1991. The volcanic section at Nazas, Durango, Mexico and the possibility of widespread Eocene volcanism within the Sierra Madre Occidental. *Journal of Geophysical Research*, 96, 13373-13388.
- Aguirre-Díaz, G.J., McDowell, F.W., 1993. Nature and timing of faulting and synextensional magmatism in the southern Basin and Range, central-eastern Durango, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 105, 1435-1444.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1975. Extent and development of the craton under part of the Sierra Madre Occidental, northwestern México. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 7, 141.
- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D., Luhr, J.F., 2000. Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 59-71.
- Borradaile, G.J., 1988. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*, 156, 1-20.
- Branney, M.J., Kokelaar, B.P., 1992. A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite. *Bulletin of Volcanology*, 54, 504-520.
- Branney, M.J., Kokelaar, P., 2002. Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society, London, Memoirs*, 27, 143 pp.
- Burkart, J., 1836. *Aufenthalt und Reisen in Mexico in den Jahren 1825 bis 1834*. 2, Stuttgart, Schweizenbart, 286 p.
- Cas, R.A.F., Wright, J.V., 1987. *Volcanic Successions, Modern and ancient*. Allen & Unwin Ltd, London, UK, 528 p.
- Cerca, L.M., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2000. The Geologic Evolution of the Southern Sierra de Guanajuato, Mexico: A Documented example of the Transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *International Geology Review*, 42, 131-151.

- Clemons, R.E., McLeroy, D.F., 1965. Hoja Torreón 13R-I(1) con resumen de la geología de la Hoja Torreón, Estados de Coahuila y Durango, Universidad Nacional Autónoma de México, carta Geológica de México, Serie de 1:100,000.
- de Cserna, Z., 1976. Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico. Geological Society of America Bulletin, 87, 1191-1199.
- Ellwood, B.B. 1982. Estimates of flow direction for calc-alkaline welded tuffs and paleomagnetic data reliability from anisotropy of magnetic susceptibility measurements: central San Juan Mountains, southwest Colorado. Earth and Planetary Science Letters, 59, 303-314.
- 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), 24 p.
- 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 volumen conmemorativo del centenario, Temas selectos de la Geología Mexicana, 57 (3), 343-378.
- Fredrikson, G., 1974. Geology of the Mazatlan area, Sinaloa, western Mexico, Ph.D. thesis, Austin, University of Texas at Austin, 158 p.
- Geoffroy, L., Callot, J.P., Aubourg, C., Moreira, M., 2002. Magnetic and plagioclase linear fabric discrepancy in dykes: a new way to define the flow vector using magnetic foliation. Terra Nova, 14 (3), 183-190.
- Henry, C.D., 1975. Geology and geochronology of the granitic batholithic complex, Sinaloa, Mexico. Austin, University of Texas at Austin, PhD thesis, 158 p.
- Henry, C.D., y Fredrikson, G., 1987. Geology of part southern Sinaloa, Mexico, adjacent to the Gulf of California. Geological Society of America Map and Chart Series no. MCH063, 14 p.
- Hernández-Rojas, J., 2007. Reconstrucción de la dinámica eruptiva de la pómez Ezequiel Montes, Qro. Tesis de Maestría, UNAM Campus Juriquilla, 120 p.
- Hillhouse, J.W., Wells, R.E., 1991. Magnetic fabric, flow directions, and source area of the Lower Miocene Peach Springs Tuff in Arizona, California, and Nevada. Journal of Geophysical Research, 96, 12443-12460.
- Hisazumi, H., 1929. Informe geológico preliminar de la parte norte del estado de Sinaloa. Instituto Geológico de México Anales, 3, 95-109.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. Surveys in Geophysics, 5, 37-82.
- INEGI, 2002a. Carta topográfica Chimaltitán 1:150 000, F13D14, primera impresión, Dirección General de Geografía, México, D.F.
- INEGI, 2002b. Carta topográfica Villa Guerrero 1:150 000, F13D15, primera impresión, Dirección General de Geografía, México, D.F.
- INEGI, 2002c. Carta topográfica Ignacio Allende 1:150 000, F13D25, primera impresión, Dirección General de Geografía, México, D.F.
- INEGI, 2002d. Carta topográfica Tlaltenango de Sánchez Román 1:150 000, F13D16, primera impresión, Dirección General de Geografía, México, D.F.
- INEGI, 2002e. Carta topográfica Tepechitlán 1:150 000, F13D26, primera impresión, Dirección General de Geografía, México, D.F.
- INEGI, 2003a. Carta topográfica San Martín de Bolaños 1:150 000, F13D24, primera impresión, Dirección General de Geografía, México, D.F.

- Jelinek, V., 1978. Statistical processing of magnetic susceptibility measured in groups of specimens. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 22, 50-62.
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, 63-67.
- King, R.E., and others, 1944. Geology and paleontology of the Permian area northwest of Las Delicias, southwestern Coahuila, Mexico. *Geological Society of America Special Paper*, 52, 172 p.
- Knight, M.D., Walker, G.P.L., Ellwood, B.B., Diehl, J.F., 1986. Stratigraphy, paleomagnetism, and magnetic fabric of the Toba Tuffs: constraints on the sources and eruptive styles. *Journal of Geophysical Research*, 91, 10355-10382.
- Lamarche, G., Froggatt, P.C., 1993. New eruptive vents for the Whakamaru Ignimbrite (Taupo Volcanic Zone) identified from magnetic fabric study. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 36, 213-222.
- Lipman, P.W., 1997. Subsidence of ash-flow calderas: Relation to caldera size and magma chamber geometry. *Bulletin Volcanologique*, 59, 198-218.
- Lyons, J.I., 1988. Geology and Ore Deposits of the Bolaños Silver District, Jalisco, Mexico. *Economic Geology*, 83, 1560-1582.
- Mammerickx, J., Klitgord, K.D., 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m.y. B.P. to the present. *Journal of Geophysical Research*, 87, 6751-6759.
- McDonald, W.D., Palmer, H.C., 1990. Flow directions in ash-flow tuffs: a comparison of geological and magnetic susceptibility measurements, Tshirege member (upper Bandelier Tuff), Valles caldera New Mexico, USA. *Bulletin of Volcanology*, 53, 45-59.
- 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., Keizer, R.P., 1977. Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental Between Durango City and Mazatlán, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 1479-1487.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., y Connelly, J.N., 2001. Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113, 521-531.
- McDowell, F.W., Wark, D.A., Aguirre-Díaz, G.J., 1990. The Tertiary ignimbrite flare-up in western Mexico. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 22 (3), 366.
- McLeroy, D.F., Clemons, R.E., 1965. Hoja Pedriseñas 13R-I(4) con resumen de la geología de la Hoja Pedriseñas, estados de Coahuila y Durango, México, Universidad Nacional Autónoma Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000.
- Nemeth, K.E., 1976. Petrography of the Lower Volcanic group, Tayoltita-San Dimas district, Durango, México. M.A. thesis, Austin, University of Texas at Austin, 141 p.
- Nieto-Obregón, J., Delgado-Argote, L.A., Damon, P.E., 1981. Relaciones petrológicas y geocronológicas del magmatismo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico en Nayarit, Jalisco y Zacatecas. *Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria, XIV Convención Nacional*, 327-361.
- Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S.A., Labarthe-Hernández, G., Rosas-Elguera, J., 1999. Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern

- Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111(3), 347-363.
- Palmer, H.C., MacDonald, W.D., 1999. Anisotropy of magnetic susceptibility in relation to source vents of ignimbrites: empirical observations. *Tectonophysics*, 307, 207-218.
- Palmer, H.C., MacDonald, W.D., Gromme, C.S., Ellwood, B.B., 1996. Magnetic properties and emplacement of the Bishop tuff, California. *Bulletin of Volcanology*, 58, 101-116.
- Pantoja-Alor, J., 1963. Hoja San Pedro Gallo 13R-k(3) con resumen de la geología de la Hoja San Pedro Gallo, Estado de Durango, México, Universidad Nacional Autónoma Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000.
- Rangin, C., Córdoba, D.A., 1976. Extensión de la cuenca Cretácica Chihuahuense en Sonora septentrional y sus deformaciones. III congreso latinoamericano de Geología, Acapulco, resúmenes, 114.
- Rochette, P., Jackson, M., Aubourg, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Reviews of Geophysics*, 30(3), 209-226.
- Rossotti, A., 2005. Reconstrucción de la historia eruptiva de la "Pómez Citlaltépetl" (Volcán Pico de Orizaba). Tesis de Doctorado, UNAM Campus Juriquilla, 142 p.
- Scheubel, F.R., 1983. The Geology and mineralization of the San Martin de Bolaños mining district, Jalisco, Mexico. M.A. thesis, Austin, University of Texas at Austin, 173 p.
- Scheubel, F.R., Clark, K.F., Porter, E.W., 1988. Geology, tectonic environment, and structural controls in the San Martín de Bolaños district, Jalisco, México. *Economic Geology*, 83, 1703-1720.
- Seaman, S.J., McIntosh, W.C., Geissman, J.W., Williams, M.L., Elston, W.E., 1991. Magnetic fabrics of the Bloodgood Canyon and Shelley Peak Tuffs, southwestern New Mexico: Implications for emplacement and alteration processes. *Bulletin of Volcanology*, 53, 460-476.
- Sparks, R.S.L., Self, S., Walker, G.P.L., 1973. Products of Ignimbrite Eruptions. *Geology*, 1, 115-118.
- Swanson, E.R., Keizer, R.P., Lyons, J.I., Clabaugh, S.E., 1978. Tertiary volcanism and caldera development in the Durango City area, Sierra Madre Occidental, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 89, 1000-1012.
- Swanson, E.R., McDowell, F.W., 1984. Calderas of the Sierra Madre Occidental volcanic field western Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8787-8799.
- Tarling, D.H., Hrouda, F., 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall London, UK, 217 p.

Anexo 1.- Mapa de afloramientos de la ignimbrita Alacrán.



Mapa de afloramientos de la Ignimbrita Alacrán

LEYENDA

Oligoceno-Mioceno

- Basalto Huila (21.03 Ma)*
- G.Cep/Chimal (21.3 Ma)**
- Domos riolíticos

Ignimbrita Alacrán

- Ignimbrita Alacrán (25.2 +/-0.3 Ma)***
- Ignimbrita Alacrán (foto-interpretada)

* edad tomada de Lyons (1988)
 ** edad tomada de Scheubel (1963)
 *** edad obtenida por Aguirre-Díaz.

SIMBOLOGÍA

- Poblaciones importantes
- Muestras representativas para descripción y petrografía
- Secciones estratigráficas
- Sitios de muestreo para AMS
- Edad 40Ar/39Ar de la Ign Alacrán***
- Falla normal
- Fallas asociadas a los conductos eruptivos

Carreteras

- Carretera pavimentada
- Terracería



Anexo 2.- Ubicación geográfica de las muestras.

N° de Muestra	Coordenadas geográficas		Coord UTM, ITRF92		Tipo de roca	Formación
	Lat N (°)	Long W (°)	zona de gradícula: 13Q			
			X	Y		
Bol- 60	21.88796	-103.83157	620707	2420885	riolita	Alacrán
Bol- 61-0	21.88737	-103.83398	620458	2420818	andesita	Guásima
Bol- 61-1	21.88737	-103.83398	620458	2420818	andesita	Guásima
Bol- 61-2	21.88737	-103.83398	620458	2420818	ignimbrita	
Bol- 61-3	21.88737	-103.83398	620458	2420818	andesita	Guásima
Bol- 62	21.88628	-103.8364514	620204	2420695	ignimbrita	Alacrán
Bol- 63	21.89016896	-103.8590399	617867	2421108	andesita	Guásima
Bol- 64	21.68737202	-103.8716433	616729	2398649	andesita	Guásima
Bol- 65	21.68646966	-103.8731195	616577	2398548	ignimbrita	Bolaños
Bol- 66-1	21.68704586	-103.8794943	615917	2398607	ignimbrita	Borrotos
Bol- 66-2	21.68704586	-103.8794943	615917	2398607	ignimbrita	Borrotos
Bol-133	21.88229764	-103.7575462	628360	2420318	ignimbrita	Bolaños
Bol-134	21.88475527	-103.7528502	628843	2420594	ignimbrita	
Bol-135	21.89049781	-103.7489481	629241	2421233	ignimbrita	Bolaños
Bol-136	21.85948419	-103.7629208	627825	2417788	basalto	Huila
Bol-137	21.85875957	-103.7590563	628225	2417711	ignimbrita	Borrotos
Bol-138	21.8602806	-103.7583174	628300	2417880	ignimbrita	Realito
Bol-139	21.85633715	-103.7588547	628248	2417443	basalto	Huila
Bol-140	21.86994456	-103.6996176	634357	2419000	ignimbrita	Realito
Bol-140-5	21.86927439	-103.7005431	634262	2418925	ignimbrita	Borrotos
Bol-140-6	21.87061892	-103.7003664	634279	2419074	ignimbrita	Borrotos
Bol-140-7	21.87178913	-103.7009945	634213	2419203	dique	
Bol-141	21.87172207	-103.7016532	634145	2419195	dique	
Bol-142	21.87172207	-103.7016532	634145	2419195	andesita	Huila
Bol-143	21.86165561	-103.7115371	633133	2418072	ignimbrita	Alacrán
Bol-144	21.79679663	-103.7347129	630797	2410872	ignimbrita	Chimal
Bol-145	21.78468905	-103.7179131	632545	2409546	ignimbrita	Chimal
Bol-146	21.77974679	-103.7142819	632925	2409002	basalto	Huila
Bol-147	21.77974679	-103.7142819	632925	2409002	ignimbrita	Alacrán
Bol-148	21.78385801	-103.7074848	633624	2409463	ignimbrita	Chimal
Bol-149	21.78186422	-103.7043498	633950	2409245	ignimbrita	Temastian
Bol-150	21.78558397	-103.6666647	637843	2409690	ignimbrita	Chimal
Bol-151	21.79022276	-103.6639137	638123	2410206	basalto	Huila
Bol-152	21.80004773	-103.6635517	638151	2411294	ignimbrita	Temastian
Bol-153	21.82999239	-103.7583275	628326	2414527	oleadas	Alacrán
Bol-154	21.82989259	-103.7582703	628332	2414516	ignimbrita	Alacrán
Bol-155	21.82891262	-103.7576886	628393	2414408	brecha co-ignimbritica	Alacrán
Bol-156	21.82050597	-103.7617276	627983	2413474	riolita	
Bol-157	21.81796942	-103.7607627	628085	2413194	riolita	Alacrán
Bol-158	21.81209095	-103.7574469	628433	2412546	ignimbrita	Chimal
Bol-159	21.79091625	-103.7609471	628090	2410199	riolita	Alacrán
Bol-160	21.79559463	-103.7620385	627973	2410716	ignimbrita	Carboneras
Bol-161	21.79270584	-103.743154	629928	2410412	ignimbrita	Temastian
Bol-162	21.77654884	-103.7555386	628662	2408613	ignimbrita	Temastian

Bol-163	21.83263964	-103.7644096	627695	2414815	brecha	
Bol-164	21.88590756	-103.7369384	630486	2420735	ignimbrita	Alacrán
Bol-165	21.88625248	-103.7418714	629976	2420769	ignimbrita	Alacrán
Bol- 166	21.85853408	-103.7567068	628468	2417688	oleadas	base Alacrán
Bol- 167	21.85853408	-103.7567068	628468	2417688	ignimbrita	secuencia base Alacrán
Bol- 168	21.85853408	-103.7567068	628468	2417688	ignimbrita	secuencia base Alacrán
Bol-169	21.85651526	-103.7549245	628654	2417466	vitrofito	
Bol-170	21.84097	-103.76465	627672	2415722	ignimbrita	Alacrán
Bol-171	21.83959281	-103.7640886	627722	2415585	riolita	
Bol-172	21.86513292	-103.7394921	630241	2418433	ignimbrita	Temastian
Bol-173	21.86073028	-103.7425789	629926	2417943	ignimbrita	Alacrán
Bol-174	21.86221337	-103.7263378	631603	2418121	ignimbrita	Alacrán
Bol-175	21.90840764	-103.7262276	631572	2423235	ignimbrita	Alacrán
Bol-176	21.90840764	-103.7262276	631572	2423235	brecha	Alacrán
Bol-177	21.94211492	-103.7083736	633385	2426982	riolita	Alacrán
Bol-178	21.97960963	-103.6698283	637330	2431167	ignimbrita	Carboneras
Bol-179	21.9770322	-103.6299621	641449	2430918	ignimbrita	Temastian
Bol-180	21.93419792	-103.6616053	638223	2426147	ignimbrita	Alacrán
Bol-181	21.90368612	-103.6518044	639265	2422778	ignimbrita	Alacrán
Bol-182	21.78435162	-103.6729142	637198	2409548	ignimbrita	Chimal
Bol-183	21.85048952	-103.6275048	641828	2416911	ignimbrita	Chimal
Bol-184	21.85330001	-103.6211692	642480	2417228	ignimbrita	Temastian
Bol-185	21.97397779	-103.4860197	656316	2430720	ignimbrita	Chimal
Bol-186	21.90805384	-103.6612398	638286	2423253	ignimbrita	Alacrán
Bol-188	21.83892026	-103.8051862	623475	2415477	lava	Huila
Bol-189	21.83892026	-103.8051862	623475	2415477	lava	Huila
Bol-190	21.84512522	-103.827699	621143	2416146	riolita	
Bol-191	21.87249702	-103.8265368	621240	2419177	lava	Huila
Bol-192	21.88772997	-103.8269252	621187	2420863	lava	Huila
Bol-193	21.8870609	-103.839581	619880	2420779	ignimbrita	Alacrán
Bol-194	21.88757241	-103.8558665	618197	2420823	ignimbrita	
Bol-195	21.9170315	-103.8809857	615578	2424065	ignimbrita	Carboneras
Bol-196	21.87912502	-103.9337294	610159	2419830	ignimbrita	Chimal
Bol-197	21.84121861	-103.9791593	605493	2415602	ignimbrita	Chimal
Bol-198	21.89440033	-103.9448733	608996	2421513	ignimbrita	Chimal
Bol-199	21.89440033	-103.9448733	608996	2421513	ignimbrita	Chimal
Bol-200a	21.89757683	-103.8578097	617988	2421929	basalto	Huila
Bol-200b	21.89757683	-103.8578097	617988	2421929	ignimbrita	Alacrán
Bol-200c	21.89757683	-103.8578097	617988	2421929	oleadas	Alacrán
Bol-201	21.88736397	-103.8441373	619409	2420809	ignimbrita	Alacrán
Bol-202	21.89344336	-103.835164	620331	2421489	ignimbrita	Alacrán
Bol-203	21.89340873	-103.8353772	620309	2421485	ignimbrita	
Bol-204	21.89450007	-103.8364137	620201	2421605	basalto	Huila
Bol-205	21.8879739	-103.8422353	619605	2420878	oleadas	
Bol-206	21.78288755	-103.799113	624151	2409279	basalto	Huila
Bol-207	21.81233172	-103.837582	620149	2412508	riolita	
Bol-208	21.94620014	-103.5985386	644725	2427534	ignimbrita	Chimal
Bol-209	21.94019784	-103.5969418	644896	2426871	basalto	Huila
Bol-210	21.90898885	-103.6138484	643181	2423400	ignimbrita	Realito
Bol-211	21.89543446	-103.6089465	643701	2421904	ignimbrita	Alacrán o Chimal
Bol-212	21.93692549	-103.8773736	615935	2426270	ignimbrita	Carboneras
Bol-213	21.96818686	-103.8982403	613755	2429715	ignimbrita	Carboneras

Bol-214a	21.94081884	-103.5705044	647626	2426965	matriz	Temastian
Bol-214b	21.94081884	-103.5705044	647626	2426965	litico	Temastian
Bol-215	21.9379289	-103.5715982	647516	2426644	ignimbrita	Carboneras
Bol-216	21.74884119	-103.7575953	628474	2405544	ignimbrita	
Bol-217	21.74458308	-103.7250956	631839	2405100	ignimbrita	Chimal
Bol-218	21.72126924	-103.7158658	632815	2402527	ignimbrita	Chimal
Bol-219	21.72428892	-103.729074	631446	2402850	ignimbrita	Carboneras
Bol-220	21.949618	-103.3547205	669904	2428163	ignimbrita	
Bol-221	21.73993522	-103.4728903	657929	2404822	ignimbrita	
Bol-222	21.69725366	-103.8754619	616326	2399740	riolita	
Bol-223	21.69364763	-103.873895	616491	2399342	basalto	Huila o Guásima
Bol-224	21.87890677	-103.824723	621422	2419888	riolita	
Bol-225	21.87890677	-103.824723	621422	2419888	riolita devitrificada	
Bol-226	21.87890677	-103.824723	621422	2419888	riolita devitrificada	
Bol-227	22.01887105	-103.6659843	637689	2435517	ignimbrita	Carboneras
Bol-228	22.01863555	-103.6703458	637239	2435487	ignimbrita	Alacrán
Bol-229	22.01214199	-103.6827669	635963	2434757	ignimbrita	
Bol-230	22.03172448	-103.7377029	630274	2436877	depositos piroclasticos	
Bol-231	21.91918828	-103.6764698	636702	2424472	ignimbrita	Alacrán
Bol-232	21.93070428	-103.6729942	637050	2425750	oleadas	
Bol-233a	21.9122481	-103.7275777	631429	2423659	ignimbrita	Alacrán
Bol-233b	21.91166452	-103.7280379	631382	2423594	ignimbrita	Alacrán
Bol-233c	21.91166452	-103.7280379	631382	2423594	ignimbrita	Alacrán
Bol-234	21.91112302	-103.7281008	631376	2423534	brecha litica o brecha de domo	
Bol-235	21.734751	-103.182778	687945	2404572	ignimbrita	
Bol-236	21.887038	-103.8387	619971	2420777	ignimbrita	Alacrán
Bol-237	21.897859	-103.8711654	616608	2421950	ignimbrita	Alacrán
Bol-238	21.876271	-103.900728	613571	2419538	ignimbrita	Chimal
Bol-239	21.895895	-103.854929	618287	2421745	ignimbrita	Alacrán
Bol-240	21.887436	-103.843962	619427	2420817	oleadas	Alacrán
Bol-241a	21.887436	-103.843962	619427	2420817	litico riolita	brecha co-ignimbrita
Bol-241b	21.887436	-103.843962	619427	2420817	litico ignimbrita	brecha co-ignimbrita
Bol-242	21.94771	-103.599492	644625	2427700	ignimbrita	Alacrán
Bol-243	21.933342	-103.600939	644490	2426108	andesita	Guásima
Bol-244	21.92686	-103.606618	643910	2425385	andesita	Guásima
Bol-245	21.915359	-103.609537	643620	2424109	ignimbrita	Realito
Bol-246	21.87468	-103.632731	641264	2419584	ignimbrita	Bolaños
Bol-247	21.87468	-103.632731	641264	2419584	ignimbrita	Bolaños
Bol-248	21.85415	-103.64717	639792	2417298	ignimbrita	brecha
Bol-249	21.853303	-103.645262	639990	2417206	ignimbrita	Chimal
Bol-250	21.574834	-103.78968	625306	2386255	ignimbrita	Chimal
Bol-251	21.5296	-103.786869	625636	2381250	ignimbrita	Chimal
Bol-252	21.502394	-103.795918	624722	2378231	ignimbrita	Chimal
Bol-253	21.502394	-103.795918	624722	2378231	ignimbrita	Chimal
Bol-254	21.507637	-103.741392	630366	2378856	ignimbrita	Chimal
Bol-255	21.465966	-103.701179	634570	2374277	ignimbrita	
Bol-256	21.737668	-103.205216	685620	2404868	ignimbrita	sierra de Morones
Bol-257	21.729517	-103.203095	685850	2403968	ignimbrita	sierra de Morones
Bol-258	21.729517	-103.203095	685850	2403968	ignimbrita	sierra de Morones

Bol-259	21.729517	-103.203095	685850	2403968	ignimbrita	sierra de Morones
Bol-260	21.729627	-103.202426	685919	2403981	ignimbrita	sierra de Morones
Bol-261	21.733557	-103.200831	686079	2404418	ignimbrita	sierra de Morones
Bol-262	21.733409	-103.179915	688243	2404427	ignimbrita	sierra de Morones
Bol-263	21.997202	-103.882043	615404	2432939	ignimbrita	Alacrán
Bol-264	22.019074	-103.666186	637668	2435539	ignimbrita	Temastian
Bol-265	22.018312	-103.673662	636897	2435448	ignimbrita	Temastian
Bol-266	22.014826	-103.681579	636083	2435055	andesita	Guásima
Bol-267	22.014826	-103.681579	636083	2435055	ignimbrita	
Bol-268	22.01172	-103.682867	635953	2434710	ignimbrita	
Bol-269	21.892821	-103.855766	618203	2421404	peperita	
Bol-270	21.990757	-103.884069	615200	2432224	ignimbrita	
Bol-271	21.659844	-103.108514	695729	2396370	ignimbrita	sierra de Morones

Anexo 3.- Ubicación geográfica de las secciones estratigráficas.

N° de Sección	Nombre de la sección	Coordenadas geográficas		Coord UTM, ITRF92		Bascamiento de las capas	Espesor (m)
		Longitud W (°)	Latitud N (°)	zona de gradícula: 13Q			
				X	Y		
S1	El Águila	-103.75872	21.83174	628283	2414721	114°/9°SW	332
S2	Goteras	-103.756707	21.858536	628468	2417688	-	287
S3	Huichol	-103.857809	21.897578	617988	2421929	135°/17°SW	190
S4	Astillero	-103.843962	21.887436	619427	2420817	255°/4°	196
S5	Ventiladero	-103.676668	21.918614	636682	2424408	-	142
S6	La Ratонера	-103.728101	21.911125	631376	2423534	-	50
S7	Ajuntres	-103.62726	21.90124	641803	2422529	-	150
S8	Azquitán	-103.688707	22.015046	635347	2435073	25°/32°SE	21.7

Anexo 4.- Gráfica de espectro de edad para la ignimbrita Alacrán

Espectro de edad obtenido en un concentrado de sanidino para la muestra Bol-9-15 de la ignimbrita Alacrán colectada por Gerardo J. Aguirre-Díaz y analizada por la Dra. Margarita López Martínez en el laboratorio de Geocronología del CICESE. Se tomó la edad de la isocrona de 25.2 ± 0.3 Ma como la más representativa de los análisis obtenidos.

Las coordenadas del sitio de muestreo son: 21.8289° Lat N, -103.7577° Long W.

