



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**CENTRO DE GEOCIENCIAS**

**ESTRATIGRAFÍA DE LA PARTE SUR DEL DISTRITO MINERO DE**  
**GUANAJUATO, MÉXICO**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:**  
**JAVIER ANTONIO BAEZ LÓPEZ**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. ÁNGEL FRANCISCO NIETO SAMANIEGO**  
**CENTRO DE GEOCIENCIAS**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

Dr. José Jorge Aranda Gómez	Centro de Geociencias	<b>PRESIDENTE</b>
Dr. Ángel Francisco Nieto Samaniego	Centro de Geociencias	<b>SECRETARIO</b>
Dr. Gilles Pierre René Levesse	Centro de Geociencias	<b>VOCAL</b>
Dr. Margarito Tristán González	UASLP - Centro de Investigación y Estudios de Posgrado FI	<b>SUPLENTE</b>
Dr. Raúl Miranda Avilés	UG - Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología	<b>SUPLENTE</b>

**MÉXICO, D.F. JUNIO DE 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## ***Agradecimientos***

*A Fresnillo Plc (Oficina de exploración Toluca) por darme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría, en especial al Dr. Benito Noguéz, Ing. Arturo Hernández e Ing. Juan Figueroa, que en su momento, me apoyaron para iniciar y poder concluir este proceso, así como sus consejos y observaciones. A los diferentes departamentos de la oficina que me apoyaron en los diferentes procesos de edición de la tesis.*

*Al Dr. Ángel Nieto por aceptar ser mi tutor, por sus críticas atinadas durante mi estancia en el CGEO y apoyarme en la culminación del trabajo de tesis. A mis sinodales por sus correcciones y comentarios para enriquecer este trabajo.*

*Al Proyecto CONACYT número 80142 por haber apoyado en dos edades de este trabajo.*

*Al personal de Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias en especial al Dr. Carlos Ortega por su valiosa colaboración en el análisis de las muestras. Al laboratorio de Geocronología del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) en especial a la Dra. Margarita López por su apoyo en el análisis de muestras. A Juan Tomás Vázquez por su apoyo en la realización de láminas delgadas. A Manuel Albarrán M. por su apoyo en el laboratorio de molienda y pulverización. Al personal administrativo del CGEO, en especial a Marta Pereda por todo el apoyo brindado antes, durante y posterior a mi estadía en Juriquilla.*

*A mis compañeros de Fresnillo y CGEO por estarme apoyando con sus comentarios, consejos y críticas; por darme su apoyo incondicional, por hacer más llevadero este proceso.*

*A mi familia, por siempre apoyarme en lo que deseo realizar; a todos, muchas gracias.*

## Contenido

Lista de figuras y tablas .....	3
RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	7
1.- INTRODUCCIÓN .....	9
1.2.- Hipótesis, Objetivos y metas.....	16
1.3.- Localización del Área de Estudio.....	17
2.- METODOLOGÍA .....	18
2.1.- Cartografía.....	19
2.2.- Estratigrafía .....	19
2.2.1.- Eoceno (Cenozoico volcánico).....	21
Formación Losero (TEo-Lo) .....	21
Localización y distribución .....	22
Descripción litológica.....	22
Límites y espesor .....	23
Correlación y edad.....	24
2.2.2.- Rupeliano (Oligoceno temprano).....	24
Formación Bufa (TO-Bu).....	24
Localización y distribución .....	24
Descripción litológica.....	25
Límites y espesor .....	26
Correlación y edad.....	27
Formación Calderones (TO-Ca).....	28
Localización y distribución .....	28
Descripción litológica.....	29
Límites y espesor .....	33
Correlación y edad.....	33
Formación Cedro (TO-Ce) .....	33
Localización y distribución .....	34
Descripción litológica.....	34
Límites y espesor .....	34
Correlación y edad.....	35
Formación Chichíndaro (TO-Ch).....	36
Localización y distribución .....	36
Descripción litológica.....	36
Límites y espesor .....	37
Correlación y edad.....	37
Ignimbrita Cañada La Virgen (TO-Cv).....	37
Localización y distribución .....	38
Descripción litológica.....	38
Límites y espesor .....	39
Correlación y edad.....	39
2.3.- Fechamientos.....	39
2.3.1.- Metodología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .....	40
2.3.2.- Metodología U / Pb en zircón. ....	42



2.3.3.- Resultados geocronológicos Ar-Ar y U-Pb.....	43
2.3.3.1.- Formación Bufa.....	46
2.3.3.2.- Formación Calderones.....	48
2.3.3.3.- Formación Cedro.....	50
2.3.3.4.- Diques (Formación Cedro).....	52
2.3.3.5.- Formación Chichíndaro.....	53
2.3.3.6.- Ignimbrita Cañada La Virgen.....	54
3.- Geología Estructural.....	59
3.1.- Descripción de Estructuras.....	59
3.2.- Análisis de lineamientos.....	63
3.2.- Análisis datos estructurales medidos en el campo .....	66
3.2.1.- Estratificación .....	67
3.2.2.- Fallas .....	68
3.2.3.- Vetas.....	69
3.3.- Retrodeformación de las capas.....	71
4. Discusión .....	73
5. Conclusiones.....	76
BIBLIOGRAFÍA .....	77
ANEXOS .....	82
<b>ANEXO A1. Petrografía .....</b>	<b>82</b>
<b>MUESTRA: Los04 (alto) Depósito de pómez y cenizas. ....</b>	<b>82</b>
<b>MUESTRA: Los04 (bajo) Depósito de pómez y cenizas. ....</b>	<b>84</b>
<b>MUESTRA: BUF011803A (Parte superior de la muestra) Ignimbrita.....</b>	<b>86</b>
<b>MUESTRA: BUF011803B (Parte inferior de la muestra) Ignimbrita. ....</b>	<b>87</b>
<b>MUESTRA: BUF021803 Ignimbrita. ....</b>	<b>88</b>
<b>MUESTRA: BUF031803 Depósito de pómez y ceniza. ....</b>	<b>89</b>
<b>MUESTRA: BUF041903 Ignimbrita. ....</b>	<b>90</b>
<b>MUESTRA: BUF051903 Ignimbrita. ....</b>	<b>91</b>
<b>MUESTRA: BUF062203 Ignimbrita. ....</b>	<b>92</b>
<b>MUESTRA: Ced06 Andesita.....</b>	<b>93</b>
<b>MUESTRA: Ced07 Andesita.....</b>	<b>94</b>
<b>MUESTRA: Cal020903 Ignimbrita. ....</b>	<b>95</b>
<b>MUESTRA: Cal030903 Ignimbrita. ....</b>	<b>96</b>
<b>MUESTRA: Cal040903A Ignimbrita. ....</b>	<b>97</b>
<b>MUESTRA: Cal051003 Ignimbrita. ....</b>	<b>98</b>
<b>MUESTRA: Cal081203 A Toba de lapilli (Depósitos de pómez y ceniza). ....</b>	<b>99</b>
<b>MUESTRA: Cal081203 B Toba de cenizas (Depósitos de pómez y ceniza). ....</b>	<b>101</b>
<b>MUESTRA: Cal081203 C Toba de cenizas (Depósitos de pómez y ceniza). ....</b>	<b>102</b>
<b>MUESTRA: Cal081203 D Toba de cenizas (Depósitos de pómez y ceniza). ....</b>	<b>103</b>
<b>MUESTRA: Cal101703 Ignimbrita. ....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO A4. Metodología <math>^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}</math> y U/Pb.....</b>	<b>107</b>
Metodología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .....	107
Metodología U / Pb en zircón.....	110
<b>Anexo A2. Tablas resumen de datos Geocronológicos.....</b>	<b>118</b>
<b>Anexo A3. Mapas.....</b>	<b>118</b>

## Lista de figuras y tablas

FIGURA 1.1.- COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL, DEL ÁREA. ....	11
FIGURA 2.1.- COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA REGIÓN SUR DEL DISTRITO MINERO DE GUANAJUATO REALIZADA CON LOS DATOS DE ESTE TRABAJO Y LA FECHA DEL CONGLOMERADO GUANAJUATO TOMADO DE ARANDA-GÓMEZ ET AL. (1997). ....	21
FIGURA 2.2.- FOTOGRAFÍA DE LA FORMACIÓN LOSERO. VARIACIÓN DE LOS ESTRATOS DE LOS DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS, SE OBSERVA VARIACIÓN EN EL ESPESOR DE CADA ESTRATO. ZONA SUR DEL DISTRITO MINERO GUANAJUATO, CERCANO A LA FALLA EL CARRIZAL. ....	23
FIGURA 2.3.- FOTOGRAFÍA DE LA FORMACIÓN BUFA. CONTACTO ENTRE EL CONGLOMERADO GUANAJUATO (TCG), FORMACIÓN LOSERO (TEO-LO) Y FORMACIÓN BUFA (TO-BU). LA FORMACIÓN BUFA TIENE APROXIMADAMENTE EN ESTA ZONA 80 M DE POTENCIA. ZONA AL NORTE DEL CERRO DE LAS GACHAS. ....	27
FIGURA 2.4.- FOTOGRAFÍA DE LAS DIFERENTES UNIDADES DE LA FORMACIÓN CALDERONES. A) CONTACTO ENTRE DEPÓSITOS DE IGNIMBRITAS SOBREYACIENDO A UN HORIZONTE DE DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS CAÍDA (TO-C) EN UN AFLORAMIENTO CERCA DE LA ROSA DE CASTILLA. B) COLADAS DEL MIEMBRO ANDESÍTICO DE LA FORMACIÓN CALDERONES SOBREYACIENDO DISCORDANTEMENTE A DEPÓSITOS IGNIMBRITICOS DE LA FORMACIÓN BUFA, EN LA ZONA DEL POBLADO DE CARBONERAS. C) HORIZONTES DE DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS DE CAÍDA. D) HORIZONTES PIROCLÁSTICOS (TO-CA – FORMACIÓN CALDERONES) PLEGADOS EN LA ZONA ADYACENTE A LA FALLA LA LEONA (FL). ....	29
FIGURA 2.5.- COLUMNA LITOLÓGICA LEVANTADA EN LA ZONA DE FALLA LA LEONA (SECCIÓN D DEL MAPA GEOLÓGICO). ESTA SECCIÓN CORRESPONDE AL MIEMBRO 1 DE LA FORMACIÓN CALDERONES DESCRITO EN EL TEXTO. LAS FALLAS QUE CORTAN A LOS MIEMBROS SE COLOCARON CON LÍNEAS DE COLOR AZUL. ....	32
FIGURA 2.6.- FOTOGRAFÍA VIENDO HACIA EL SE DEL CONTACTO POR LA FALLA EL CUBO (FALLA NORMAL) ENTRE LA FORMACIÓN CALDERONES (IZQUIERDA) Y LA FORMACIÓN CEDRO (DERECHA). ....	35
FIGURA 2.7.- FOTOGRAFÍA DE FORMACIÓN CHICHÍNDARO, DEPÓSITOS DE LAVAS CON TEXTURA FLUIDAL. AL SUR DE LA FALLA CARRIZAL. ....	37
FIGURA 2.8.- FOTOGRAFÍA DEL CONTACTO DISCORDANTE ENTRE LA IGNIMBRITA CAÑADA LA VIRGEN (IZQUIERDA) Y DEPÓSITOS ANDESITICOS DE LA FORMACIÓN CEDRO (DERECHA). AL ORIENTE DEL POBLADO TACUBAYA. ....	38
TABLA 2.1.- RESUMEN DE EDADES OBTENIDAS POR LOS MÉTODOS DE U/Pb Y 40Ar/39Ar. ....	45
FIGURA 2.9.- DATOS DE U/Pb DE ZIRCONES OBTENIDOS CON LA TÉCNICA LA-ICP-MS DE LA MUESTRA DE IGNIMBRITAS DE LA FORMACIÓN BUFA. A) GRÁFICO DE CONCORDIA TIPO TERA-WASSERBURG CON LOS DATOS DE LA MUESTRA G-02. B) GRÁFICO DE EDAD $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ MEDIA PONDERADA DE LA MUESTRA G-02. EN ROJO LOS DATOS DE EDADES MÁS RECIENTES UTILIZADOS PARA OBTENER LA EDAD DE CRISTALIZACIÓN. ....	47
FIGURA 2.10.- DATOS DE Ar/Ar DE FELDESPATO K DE LA MUESTRA DE IGNIMBRITAS DE LA FORMACIÓN BUFA. A) ESPECTROS DE EDAD. B) FRACCIONES DE AR LIBERADO. ....	48
FIGURA 2.11.- DATOS DE U/Pb DE ZIRCONES OBTENIDOS CON LA TÉCNICA LA-ICP-MS DE LA MUESTRA DE IGNIMBRITAS DE LA FORMACIÓN CALDERONES. A) GRÁFICO DE CONCORDIA TIPO TERA-WASSERBURG CON LOS DATOS DE LA MUESTRA G-01. B) GRÁFICO DE EDAD $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ MEDIA PONDERADA DE LA MUESTRA G-01. EN ROJO LOS DATOS DE EDADES MÁS RECIENTES UTILIZADOS PARA OBTENER LA EDAD DE CRISTALIZACIÓN. ....	49
FIGURA 2.12.- DATOS DE Ar/Ar DE SANIDINO (Y PLAGIOCLASA) DE LA MUESTRA DE IGNIMBRITAS DE LA FORMACIÓN CALDERONES (GTO-05) A) ESPECTROS DE EDAD B) FRACCIONES DE AR LIBERADO. ....	50
FIGURA 2.13.- DATOS DE U-Pb DE ZIRCONES OBTENIDOS CON LA TÉCNICA LA-ICP-MS DE LA MUESTRA DE ANDESITA DE LA FORMACIÓN CEDRO. A) GRÁFICO DE CONCORDIA TIPO TERA-WASSERBURG CON LOS DATOS DE LA MUESTRA CED-04. B) GRÁFICO DE EDAD $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ MEDIA PONDERADA DE LA MUESTRA CED-04. EN ROJO, LOS DATOS UTILIZADOS PARA OBTENER LA EDAD DE LA MUESTRA. ....	51
FIGURA 2.14.- DATOS DE U-Pb DE ZIRCONES OBTENIDOS CON LA TÉCNICA LA-ICP-MS DE LA MUESTRA DE ANDESITA DE LA FORMACIÓN CEDRO. A) GRÁFICO DE CONCORDIA TIPO TERA-WASSERBURG CON LOS DATOS DE LA MUESTRA CED-05B. B) GRÁFICO DE EDAD $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ MEDIA PONDERADA DE LA MUESTRA CED-05B. EN ROJO, LOS DATOS DE EDADES MÁS RECIENTES UTILIZADOS PARA OBTENER LA EDAD DE CRISTALIZACIÓN. ....	52
FIGURA 2.15.- DATOS DE U/Pb DE ZIRCONES OBTENIDOS CON LA TÉCNICA LA-ICP-MS DE LA MUESTRA DE UN DIQUE ANDESÍTICO QUE ALIMENTAN A LOS DERRAMES DE LA FORMACIÓN CEDRO. A) GRÁFICO DE CONCORDIA TIPO TERA-WASSERBURG CON LOS DATOS DE LA MUESTRA JBCAL01. B) GRÁFICO DE EDAD $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ DE ZIRCONES DE LA MUESTRA JBCAL01. ....	53
FIGURA 2.16.- DATOS DE U/Pb DE ZIRCONES OBTENIDOS CON LA TÉCNICA LA-ICP-MS DE LA MUESTRA DEL DOMO DE CHICHÍNDARO A) GRÁFICO DE CONCORDIA TIPO TERA-WASSERBURG CON LOS DATOS DE LA MUESTRA R_CHI_2. B) GRÁFICO DE EDAD	

*Estratigrafía de la parte sur del Distrito Minero de Guanajuato, México.*

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ MEDIA PONDERADA DE LA MUESTRA R_CHI_2. EN ROJO, LOS DATOS UTILIZADOS PARA OBTENER LA EDAD DE LA MUESTRA. ....	54
FIGURA 2.17.- DATOS DE U/Pb DE ZIRCONES OBTENIDOS CON LA TÉCNICA LA-ICP-MS DE LA MUESTRA DE IGNIMBRITA CAÑADA LA VIRGEN. A) GRÁFICO DE CONCORDIA TIPO TERA-WASSERBURG CON LOS DATOS DE LA MUESTRA M-01. B) GRÁFICO DE EDAD $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ MEDIA PONDERADA DE LA MUESTRA M-01. EN ROJO SE GRAFICAN LOS DATOS DE EDADES MÁS RECIENTES UTILIZADOS PARA OBTENER LA EDAD DE CRISTALIZACIÓN. ....	55
TABLA 2.3- RESUMEN DE EDADES OBTENIDAS CERCANAS O DENTRO DEL DISTRITO MINERO DE GUANAJUATO. ....	56
FIGURA 3.1.- A. IMAGEN DE SATÉLITE LANSAT. SE OBSERVAN RESALTADOS CON LÍNEAS NEGRAS LOS PRINCIPALES LINEAMIENTOS DEL ÁREA DE TRABAJO. LA IMAGEN SE DIVIDIÓ EN LOS SECTORES OESTE, UBICADO AL PONIENTE DE VETA MADRE Y EL SECTOR ESTE UBICADO AL ORIENTE DE VETA MADRE. B. IMAGEN DE SATÉLITE RASTER, CON RESALTE DE BANDAS 3 2 1. SE OBSERVAN RESALTADOS CON LÍNEAS AZULES LOS PRINCIPALES LINEAMIENTOS DEL ÁREA DE TRABAJO. ....	65
FIGURA 3.2.- DIAGRAMA DE ROSETA DEL TOTAL DE LINEAMIENTOS MEDIDOS (FRECUENCIA DE DATOS).....	65
TABLA 3.1.- FRECUENCIA Y LONGITUD DE LINEAMIENTOS POR SECTOR Y ORIENTACIÓN. ....	66
FIGURA 3.3. ROSETA DE DATOS Y CONTORNOS DE DATOS DE ESTRÍAS DE FALLAS EN LA FORMACIÓN CALDERONES. SE REALIZARON LOS GRAFICOS CON EL SOFTWARE TECTONICSFP®. ....	69
FIGURA 3.4. CONTORNOS DE DATOS ESTRUCTURALES. EN LA PRIMER COLUMNA SE GRAFICAN LOS DATOS DE DIRECCIÓN DE INCLINACIÓN DE LA ESTRATIFICACIÓN, LA SEGUNDA COLUMNA PROYECTA LOS CONTORNOS DE POLOS DE LOS PLANOS DE FALLA Y LA TERCER COLUMNA, DATOS DE RUMBO DE VETAS. SE REALIZARON LOS CONTORNOS CON EL SOFTWARE TECTONICSFP®. ....	71
FIGURA 3.7.- GRAFICOS DE DATOS ROTADOS DE LAS CAPAS DE LAS FORMACIONES CONGLOMERADO GUANAJUATO Y CALDERONES, ASÍ COMO LA FOLIACIÓN EUTAXÍTICA DE LA FORMACIÓN BUFA. EN A) SE MUESTRA LA ORIENTACIÓN DE LAS FOLIACIONES EUTAXÍTICAS DE LA FORMACIÓN BUFA, Y EN B) DEL CONGLOMERADO GUANAJUATO, AMBAS ROTADAS AL RESTAURAR LAS CAPAS DE LA FORMACIÓN CALDERONES A LA HORIZONTAL. EN C) SE MUESTRA LA ORIENTACIÓN DE LAS CAPAS DEL CONGLOMERADO GUANAJUATO UNA VEZ RESTAURADAS A LA HORIZONTAL LAS FOLIACIONES MOSTRADAS EN A). LOS DIAGRAMAS MUESTRAN CONTORNOS DE POLOS EN EL HEMISFERIO INFERIOR DE ESTEREOFALCILLAS EQUIAREALES. ....	72

## **RESUMEN**

Sobre el Distrito Minero de Guanajuato (DMG) se han escrito numerosos trabajos desde hace más de un siglo, la gran mayoría de ellos están dedicados al estudio de los depósitos minerales, tocando solamente de manera indirecta aspectos estratigráficos y estructurales. El ordenamiento estratigráfico de las rocas cenozoicas ha permanecido sin modificaciones desde la década de los 70, sin que se haya refinado la estratigrafía y sin que se hayan fechado las unidades volcánicas para su mejor ubicación en el tiempo geológico. En el presente trabajo se describe la estratigrafía cenozoica del DMG, conformada por rocas volcánicas y sedimentarias que tienen un alcance estratigráfico del Priaboniano (Eoceno tardío) al Rupeliano (Oligoceno temprano). La columna estratigráfica cenozoica está formada de la base a la cima por: Conglomerado Guanajuato, que es un conglomerado polimíctico formado de sedimentos continentales con intercalación de depósitos volcánicos; Formación Losero, constituida por un conjunto de depósitos de caída; Formación Bufa, que es una secuencia de ignimbritas de composición riolítica; Formación Calderones, formada por depósitos volcanoclásticos estratificados y depósitos piroclásticos de composición intermedia a andesítica; Formación Cedro, compuesta por derrames fisurales de lava, y diques de composición andesítica; Formación Chichíndaro, constituida de derrames, domos y rocas piroclásticas asociadas, todas de composición riolítica; y sobreyaciendo a estas rocas se encuentra la Ignimbrita Cañada La Virgen, formada por depósitos piroclásticos de composición riolítica. Se obtuvieron fechamientos isotópicos en zircones por el método U/Pb, realizadas en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (CGEO). Se fecharon las siguientes unidades: Formación La Bufa ( $33.40^{+0.40}/_{-0.50}$  Ma), Formación Calderones ( $31.84 \pm 0.27$  Ma), Formación

Cedro y diques de la misma formación (~32.5 Ma), Formación Chichíndaro ( $30.46 \pm 0.40$  Ma) y depósitos de la Ignimbrita Cañada La Virgen ( $29.46 \pm 0.19$  Ma). También se fecharon, por el método Ar/Ar, la Formación Bufa ( $33.53 \pm 0.48$  Ma) y la Formación Calderones ( $31.33 \pm 0.29$  Ma). Considerando que las Formaciones Chichíndaro y Cañada La Virgen afloran principalmente, y de manera muy amplia fuera del DMG, además de que son posteriores al fallamiento principal del distrito, se propone que no son producto del centro volcánico que allí se ubicó en el Rupeliano (Oligoceno temprano), el cual representa el vaciado de una cámara magmática que generó el depósito de las unidades Losero, Bufa, Calderones y Cedro, y que ocurrió sincrónicamente con fallamiento de tipo normal. El conjunto de fallas contemporáneo al evento volcánico formó los semigrábenes El Cubo y Veta Madre, cuya actividad ocultó o inhibió la formación de estructuras semi-circulares típicas de una caldera.

## **ABSTRACT**

There is an extensive literature about the Guanajuato mining district (DMG), mainly about mineral deposits. The stratigraphy and structure of the DMG are indirectly addressed only in some publications. The Cenozoic stratigraphy has remained unchanged since the 70 decade, without refinements to the stratigraphy and without new dates of the volcanic units that could allow a better location in geologic time. Cenozoic stratigraphy of the DMG consists of volcanic and sedimentary rocks that have a stratigraphic range from the Priabonian (late Eocene) to Rupelian (late Oligocene). The Cenozoic stratigraphic column is formed of: the Guanajuato conglomerate, a polymictic conglomerate formed of continental sediments with intercalated volcanic deposits; the Losero Formation, which is a unit formed mainly of fall deposits; the Bufa Formation, a group of rhyolitic ignimbrites; the Calderones Formation, formed of volcanoclastic beds and pyroclastic deposits of intermediate to andesitic composition; the Cedro Formation, composed of andesitic fissural lavas and dikes; the Chichínaro formation, a group of lava flows, domes and associated pyroclastic rocks of rhyolitic composition; and the Cañada La Virgen ignimbrite, formed of rhyolitic pyroclastic deposits. In this thesis isotopic ages were obtained by U/Pb LA-ICPMS technique in zircons, in the Laboratory of Isotope Studies (LEI) of the Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (CGEO). The following units were dated: the Bufa Formation ( $33.40^{+0.40}/_{-0.50}$  Ma), the Calderones Formation ( $31.84 \pm 0.27$  Ma), the Cedro Formation and dykes of the same formation ( $\sim 32.5$  Ma), the Chichínaro Formation ( $30.36 \pm 0.40$  Ma) and the Cañada La Virgen ignimbrite ( $29.46 \pm 0.19$  Ma). Also the following dates were obtained by using by Ar/Ar technique, yielding: the Bufa Formation  $33.53 \pm 0.48$  Ma, and the Calderones Formation  $31.33 \pm 0.29$  Ma.

Considering that Chichíndaro and Cañada La Virgen Formations mainly crop out outside the GMD, as well as they were deposited after the main faulting event in the GMD, it is proposed that those units were not produced by the volcanic center developed during the Rupelian (early Oligocene) in the GMD. This volcanic event represents the evolution of a magma chamber, which produced the Losero, Bufa, Calderones and Cedro Formations, and was coeval with normal faulting. The normal faulting formed the Veta Madre and El Cubo half-grabens, at the time of the volcanic activity, inhibiting the formation of semi-circular structures typical of calderas.

## **1.- INTRODUCCIÓN**

En este trabajo se realizó la cartografía geológica de las partes sur y oriente del Distrito Minero de Guanajuato (DMG). El énfasis se puso en revisar la estratigrafía y ubicar las unidades litoestratigráficas en el tiempo geológico, por medio de dataciones isotópicas. Se pretende entender cómo se depositaron las rocas volcánicas cenozoicas que conforman al distrito. Este estudio se centró en los depósitos volcánicos cenozoicos. Las técnicas geocronológicas utilizadas fueron U/Pb (LA-ICPMS en zircón) y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , realizándose dataciones de las mismas unidades por ambos métodos, con el fin de corroborar las edades obtenidas y obtener mayor detalle sobre las edades de los eventos volcánicos que tuvieron lugar en el área de estudio.

En el Distrito Minero de Guanajuato (DMG) existe uno de los depósitos minerales más importantes de México. Se ha clasificado como un depósito de vetas de relleno de fisuras de clase mundial. Su importancia radica en la producción de plata y oro que ha generado. Este Distrito se descubrió en 1548 y hasta la fecha sigue produciendo volúmenes importantes de plata y considerables cantidades de oro. Hasta el momento existe actividad minera en la región, las minas más importantes son: Las Torres, El Cubo, Peregrina, Guanajuatito, Rayas, San Vicente, Cebada y Bolañitos.

Por su historia, el distrito minero de Guanajuato es uno de los más conocidos de México, se han escrito más de 650 trabajos sobre él (Davis *et al.*, 2009), esos trabajos comprenden temas como historia, métodos de minado, metalurgia, ingeniería de minas, depósitos minerales y en una proporción menor geología general del distrito.



En la literatura reciente se ha propuesto un origen calderico para las rocas volcánicas y el fallamiento del Distrito Minero de Guanajuato (Randall *et al.* 1994; Davis *et al.*, 2009). Por otra parte, Randall *et al.* (1994); Davis *et al.* (2009) han sugerido la contemporaneidad de los eventos de fallamiento y el vulcanismo, no solo en el Distrito Minero de Guanajuato (DMG), sino en toda la Mesa Central, (Aranda-Gómez *et al.*, 2012, Nieto *et al.*, 2005) lo que reviste de especial importancia el lograr un mejor control de las edades de las unidades litoestratigráficas.

En la presente investigación se realizaron estudios de campo, petrográficos y de fechamientos isotópicos (Ar/Ar en Feldespato potásico y U/Pb en Zirrones) en la cubierta volcánica del DMG. Dichos fechamientos de las unidades litoestratigráficas cenozoicas se hicieron por métodos isotópicos modernos y se compararon con los ya existentes en la literatura. También se aportan nuevos datos litológicos, estructurales y geocronológicos de las unidades volcánicas cenozoicas. Con base en esta nueva información se propone una interpretación más refinada de la evolución geológica de la zona.

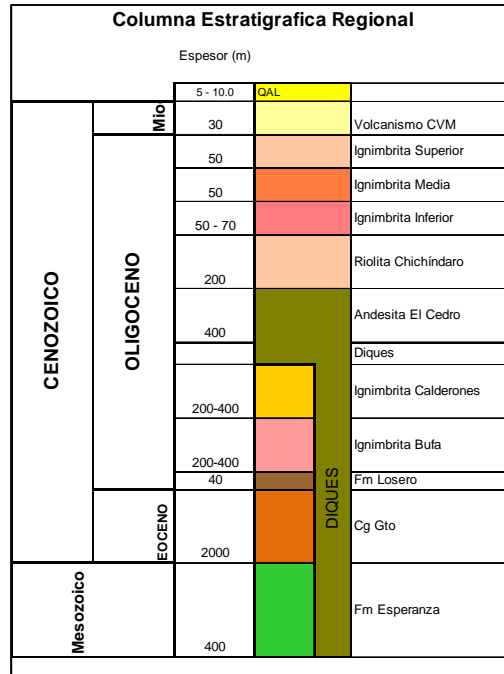


Figura 1.1.- Columna estratigráfica regional, del área.

Iniciaré con la breve descripción de trabajos previos que considero más relevantes, con el fin de que el lector ubique la presente contribución en un contexto histórico (ver figura 1.1.):

Uno de los primeros trabajos, importante desde un punto de vista geológico, es el de Wandke y Martínez (1928), en donde propone el nombre del “conglomerado rojo”, identificándolo como rocas post-Triásico. Define a la “arenisca Bufa” yaciendo sobre el conglomerado, y la describe como “una ceniza bandeada compuesta por fragmentos largos “ácidos”, con unos 6 m de potencia”; este depósito es la Formación Losero, como actualmente se la conoce. Yaciendo sobre este paquete de rocas describió rocas estratificadas cuarzo – riolíticas con espesores de 400 m, esta unidad corresponde a la Formación Bufa. Sobre esas riolitas describió flujos de tobas y brechas de composición andesítica, denominándolas andesitas y andesitas de hiperstena, que corresponden a la Formación Cedro. Por último identificó pórfidos de cuarzo, descritos como “estructuras perlíticas con grandes cristales de cuarzo” que corresponden a la Formación Chichindaro. Define las principales estructuras que se

encuentran presentes en el distrito como las vetas: Veta Madre, La Luz - San Cayetano, El Monte, Peregrina y El Cubo.

Edwards (1955) dividió al “conglomerado rojo” en dos partes separadas por una discordancia. En la parte inferior del conglomerado el contenido de rocas volcánicas, calizas y pedernal es mayor, mientras que en la parte superior del conglomerado el contenido de granito y aplita es mayor. Describe que: “La matriz del conglomerado y las capas de areniscas con las que está estratificado, consisten de los productos de desintegración de las rocas volcánicas”. La edad del conglomerado fue determinada con base en el estudio del cráneo de un roedor encontrado por Fries *et al.* (1955) en la parte inferior del conglomerado, ubicándolo entre el “Eoceno medio” y principios del Oligoceno.

Meave *et al.* (1959), propone las primeras descripciones para la Formación Calderones, la define como un conjunto de tobas y brechas andesíticas, así como de andesitas masivas. Describe a las tobas como “productos volcánicos estratificados con una coloración verde claro y una granulometría de grano fino y grano grueso. Las brechas están irregularmente distribuidas, presentan una matriz de grano grueso de carácter tobáceo, material fragmentario claramente anguloso, compuesto de los mismos elementos que la toba”. Además de las tobas y brechas andesíticas describe algunas pequeñas áreas de andesita, caracterizadas por su color pardo rojizo, indica que las andesitas presentan “fenocristales de plagioclasa y silicatos negros de hiperstena”.

Echegoyen-Sánchez *et al.* (1970), realizan una de las principales compilaciones acerca de la estratigrafía del distrito de una manera completa y detallada. La nomenclatura estratigráfica establecida en ese trabajo es la más usada hasta el momento.

Las rocas más antiguas que ellos describen en el distrito es la Formación Esperanza y la definen como: “sedimentos marinos formados por lutitas, areniscas y calizas del Triásico Superior, metamorfoseados en su mayor parte a pizarras, filitas, esquistos, cuarcitas y mármol por movimientos orogénicos y emplazamientos de cuerpos intrusivos”.

La unidad más antigua del Terciario que afloran en la zona es el “conglomerado Guanajuato”. Lo describe como: “un conglomerado con una alta proporción de fragmentos volcánicos, le siguen en importancia los de granito, caliza, pedernal y aplita. El tamaño de los fragmentos de caliza y esquistos varían de 3 a 10 cm, en cambio los fragmentos de rocas intrusivas y extrusivas alcanzan tamaños de 5 cm hasta 1 m de diámetro”.

La siguiente unidad que define Echegoyen-Sánchez *op. cit.* es la Formación Losero. La describe como: “rocas constituidas principalmente por cenizas volcánicas de grano fino, granos angulosos ligeramente redondeados de cuarzo y feldespato, gran proporción de material volcánico silíceo, cementado por calcita; se presenta en capas delgadas a gruesas que varían de unos cuantos milímetros hasta 30 cm de espesor”. Sobreyaciendo a esta unidad definen a la riolita Bufa, y la describen como: “un conjunto de potentes tobas, brechas y corrientes riolíticas”.

Sobreyaciendo a la unidad anterior Echegoyen-Sánchez *op. cit.* definen a la Formación Calderones. La describe como un conjunto de: “areniscas, conglomerados, brechas y tobas de composición andesítica con algunas interestratificaciones de tobas dacíticas”. También define a la Formación Cedro, como: “derrames andesíticos y basálticos de textura porfirítica”. La unidad que sobreyace a la Formación Cedro es la riolita Chichíndaro, la define como: “unidad constituida por derrames riolíticos con capas de brecha y de tobas interestratificadas”.

Taylor (1971), sugiere: “La fuente de los metales del yacimiento del distrito Guanajuato son los flujos volcánicos y las tobas”. Él considera que los flujos de lava del Terciario de Guanajuato pueden ser una secuencia normal diferenciada de material del manto. Análisis químicos realizados por Taylor (1971) indican que muestras de lava sin contaminación de material de veta contienen desde 0.04 a 0.10 g de oro y de 0.2 a 0.8 g de plata por tonelada métrica. También sugiere que el agua caliente meteórica que circula a través de las lavas desplaza material formador de vetas desde las lavas hacia las fallas, donde las fallas fueron formadas en áreas de menor presión y temperatura.

Petruk y Owens (1974), hacen una descripción petrográfica y minerográfica de las especies minerales que componen a los tres sistemas de vetas del distrito, estos son: sistema de vetas de la Sierra, Veta Madre y las de la Luz. Definen las principales especies minerales en el distrito: aguilarita, acantita, pirargirita, naumantita, polibasita, pirargirita, electrum, plata, oro; sulfuros como: pirita, esfalerita, galena, calcopirita y tetrahedrita; como minerales de ganga: cuarzo, calcita, nontronita y como productos de la alteración: clorita, adularia, siderita, dolomita y montmorillonita.

Gross (1975) clasificó a las zonas mineralizadas del sistema de vetas de la Sierra y de la Veta Madre de manera arbitraria en: parte superior (arriba de 2100 msnm), inferior (entre 1700 y 2100 msnm) y profundas (por debajo de los 1700 msnm.). También propone que las responsables de precipitar la mineralización a lo largo de fallas, fueron soluciones alcalinas a temperaturas de *ca.* 350 °C que estuvieron asociadas al volcanismo oligocénico de la zona. Gross (1975) realiza dos fechamientos por el método K-Ar en roca entera, la primera fecha pertenece a la Formación Chichíndaro con una edad de  $32.1 \pm 1.0$  Ma, la segunda fecha es de la Formación Bufa con una edad de  $37.0 \pm 3.0$  Ma.

Otro trabajo que produjo un cambio en el conocimiento del distrito fue el realizado por Buchanan (1979). En ese trabajo describe detalladamente a la Veta Madre en la zona de la mina Las Torres. Ese autor hace una descripción de la distribución de la alteración hidrotermal: La alteración propilítica presenta una amplia distribución y se genera antes del depósito de las menas, está compuesta por: clorita, pirita, montmorillonita y rara epidota. La alteración potásica también es pre-depósito de menas, está restringida a la zona de las vetas y compuesta por adularia, sericita, illita y cuarzo. La alteración argílica está asociada al evento de mineralización, consiste de caolinita y haloisita, se encuentra dentro y fuera de las vetas. El modelo de depositación de la mineralización que propone es el siguiente: después de que las soluciones pre-mineralización han generado alteración propilítica y potásica en las rocas encajonantes, se depositan a profundidad los sulfuros de metales base y las vetillas son rellenadas con cuarzo estéril, adularia y calcita. Las soluciones por debajo del nivel de depósito de los sulfuros ebulliciona y después del depósito de los metales base se presenta un nuevo fracturamiento. La depositación de menas de oro y plata sella las fracturas y finaliza el flujo de los fluidos hacia la palosuperficie.

Mango *et al.* (1991) realizaron un estudio geoquímico para determinar las condiciones a las cuales la mineralización se presenta en la mina de Rayas y la Veta Madre. Con un análisis de isótopos de Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  y  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ), concluyen que: las rocas volcánicas del Oligoceno tienen valores muy cercanos a los valores que presenta la galena, lo que sugiere que las rocas volcánicas son fuente de metales para la mineralización o las soluciones hidrotermales y las rocas volcánicas tienen una fuente común magmática. Los datos que obtiene de isótopos de oxígeno y de carbono sugieren que los fluidos hidrotermales en la mina de Rayas se sometieron a un intercambio isotópico durante la interacción con las rocas

encajonantes del distrito. La composición de los isótopos de carbono, sugieren que el carbono ha sido derivado de una roca rica en materia orgánica como la Formación Esperanza.

Randall *et al.* (1994) y Davis *et al.* (2009), propusieron la existencia de una caldera. Consideran a dicha estructura como responsable de los depósitos volcánicos y de la mineralización del distrito.

Nieto-Samaniego (1990) y Nieto-Samaniego *et al.* (1996) describieron el estilo del volcanismo de la parte meridional de la Mesa Central incluyendo al distrito minero de Guanajuato. El volcanismo resulta ser heterogéneo para el Eoceno. El Oligoceno inicia con la presencia de domos riolíticos pasando a un volcanismo que generó cubiertas ignimbríticas y finaliza con depósitos de composición andesítica. También define al menos 5 fases de fallamiento, así como tres direcciones preferenciales de las fallas. En el trabajo de Nieto-Samaniego *et al.* (1996) reportan edades K-Ar en sanidino de  $30.1 \pm 0.8$  Ma y de  $30.8 \pm 0.8$  Ma para la Formación Chichíndaro.

### **1.2.- Hipótesis, Objetivos y metas.**

Hipótesis:

El volcanismo cenozoico en la parte sur del DMG registra la evolución de un centro volcánico tipo caldera que fue contemporáneo a un sistema tipo graben. Dicho evento no generó una estructura elíptica visible y no generó “herencia” en las rocas más jóvenes.

Objetivo General:

- Refinar la columna estratigráfica cenozoica y determinar la geometría y edad de las estructuras principales formadas por del fallamiento en el Distrito Minero de Guanajuato.

Objetivos Particulares:

- Mejorar la descripción litológica las rocas volcánicas en la parte sur de DMG.
- Determinar la edad de los eventos volcánicos y de fallamiento del área de estudio.
- Establecer una nueva versión, mejorada, de la Columna Estratigráfica del DMG.

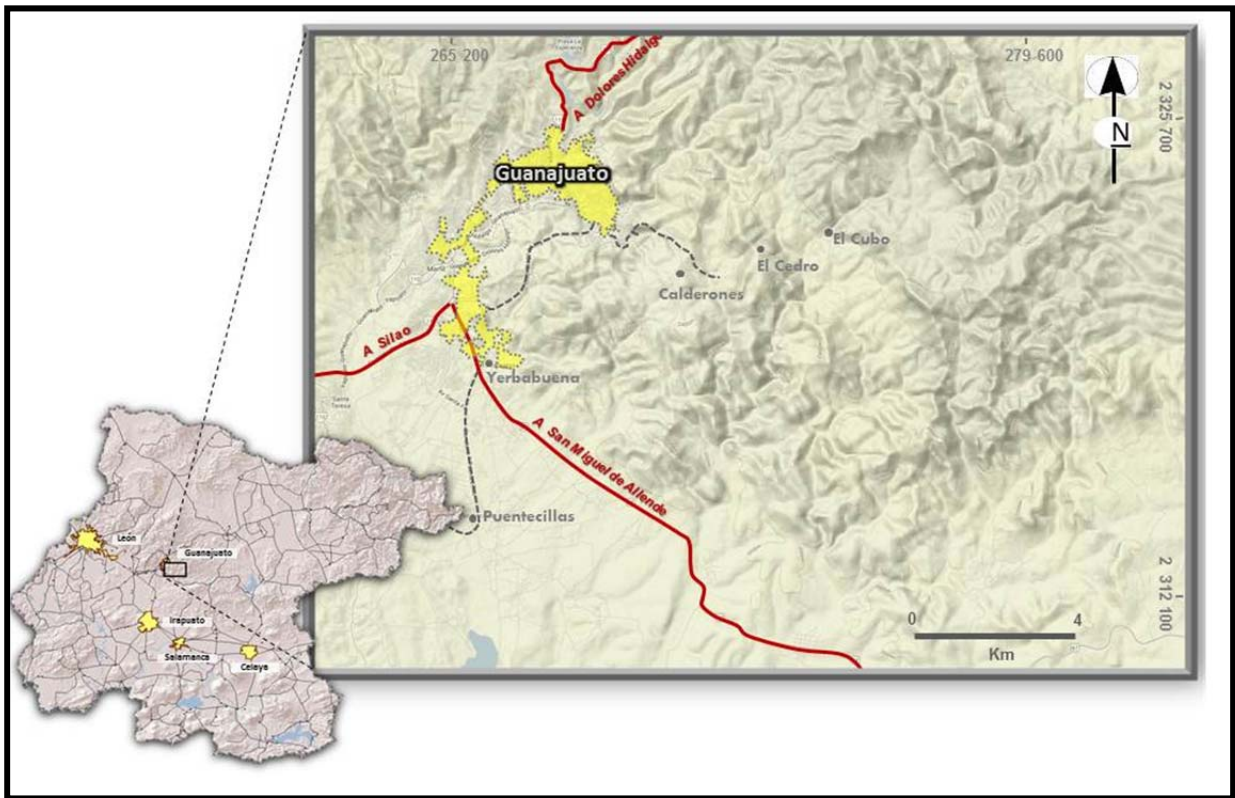
Para el cumplimiento de los objetivos planteados se trazaron las siguientes metas:

- Realizar cartografía geológica a detalle de la región, escala 1:10,000 de la parte sur del Distrito Minero de Guanajuato.
- El reconocimiento de las principales estructuras de la región estudiada.
- La elaboración de secciones para estimar la magnitud de los desplazamientos de las fallas utilizando datos estructurales y estratigráficos.
- Ubicar las unidades estratigráficas en el tiempo geológico por medio de fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y U-Pb.

### ***1.3.- Localización del Área de Estudio***

El área de estudio se encuentra localizada al sur de la Ciudad de Guanajuato, entre las coordenadas UTM 14Q 264,000E, 2'324,000N a 14 Q 276,000E 2'316,000N. Se puede ubicar en las cartas topográficas escala 1:50,000, F14C43-Guanajuato y F14C53-Aldama del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), cubriendo un área de 88 km<sup>2</sup>. Dentro del área de estudio las ciudades o poblaciones más importantes son: Guanajuato, Calderones, El Cedro y El Cubo (Figura 1.2).





*Figura 1.2.- Área de Estudio, principales poblaciones que existen en el área.*

## **2.- METODOLOGÍA**

Se llevó a cabo la cartografía geológica a escala 1:10,000; se hizo el estudio petrográfico de las unidades litoestratigráficas identificadas, así como el fechamiento isotópico de ellas. El trabajo se hizo con dos enfoques principales: el reconocimiento de la estratigrafía del área y el análisis estructural.

El estudio inició con la recopilación bibliográfica y el análisis de aquellos artículos que tratan sobre estratigrafía y geología estructural del área de estudio. El análisis estructural consistió en recabar los datos estructurales de capas y de fallas (rumbo, echado, ángulo de pitch, espesores, tipos de roca de falla, etc.), realizando la interpretación del tipo de estructuras a partir de indicadores cinemáticos y desplazamientos de unidades litoestratigráficas. Se prestó especial atención a establecer la cronología relativa de las estructuras identificadas en el

campo, basándose en relaciones de corte entre capas y estructuras y en la identificación de discordancias.

## **2.1.- Cartografía**

Para el trabajo de estratigrafía y análisis estructural se realizó fotointerpretación de fotografías aéreas escala 1:20:000 para definir las principales estructuras y los cambios litológicos en el área de estudio. La base topográfica que se utilizó es la perteneciente a las cartas escala 1:50,000 de INEGI (1998), Guanajuato F14C43 y Aldama F14C53.

Se realizaron varias campañas de campo con el propósito de generar un mapa geológico – estructural. En el trabajo de campo se hizo la cartografía a detalle, construcción de secciones, medición de datos estructurales y toma de muestras. Se integraron los datos estratigráficos y estructurales y se elaboró un mapa escala 1:10,000.

La preparación de muestras para la descripción petrográfica fue realizada en el laboratorio de laminación del Centro de Geociencias, describiendo un total de 40 láminas delgadas con la finalidad de identificar a detalle las unidades litoestratigráficas descritas en el trabajo de campo.

## **2.2.- Estratigrafía**

En la columna estratigráfica del DMG se tiene bien reconocida la presencia de dos conjuntos de rocas: El conjunto más antiguo aflora no solo en el DMG sino en toda la Sierra de Guanajuato y es el que ha sido más estudiado. Está formado por rocas volcánicas y sedimentarias marinas; un conjunto de rocas plutónicas, principalmente tonalita y diorita; enjambres de diques doleríticos, y un afloramiento de rocas ultramáficas. La edad de estas

unidades se ubica entre el fin del Jurásico y el Cretácico Temprano, todas ellas presentan deformación por acortamiento y metamorfismo de grado bajo en facies esquistos verdes (e. g., Echevoyén-Sánchez *et al.*, 1970; Martínez-Reyes, 1992; Lapierre *et al.* 1992; Ortiz *et al.* 2003; Mortensen *et al.*, 2008; Martini *et al.*, 2011). El segundo grupo consiste de unidades continentales de edad cenozoica y que cubren en discordancia angular al conjunto mesozoico. En la base de este segundo grupo de rocas aparecen conglomerados continentales que presentan algunas intercalaciones de rocas volcánicas, principalmente andesitas (Aranda-Gómez *et al.*, 1998). Cubriendo a esos conglomerados hay una cubierta gruesa volcánica que incluye al conjunto de unidades que afloran en el área de trabajo (e. g. Echevoyén-Sánchez *et al.*, 1970; Martínez-Reyes, 1992).

En este apartado se describen las unidades estratigráficas volcánicas cenozoicas que afloran en el DMG (Figura 2.1). No se presentan descripciones de las unidades mesozoicas ni de los sedimentos continentales cenozoicos, por considerar que quedan fuera de los objetivos de esta tesis.

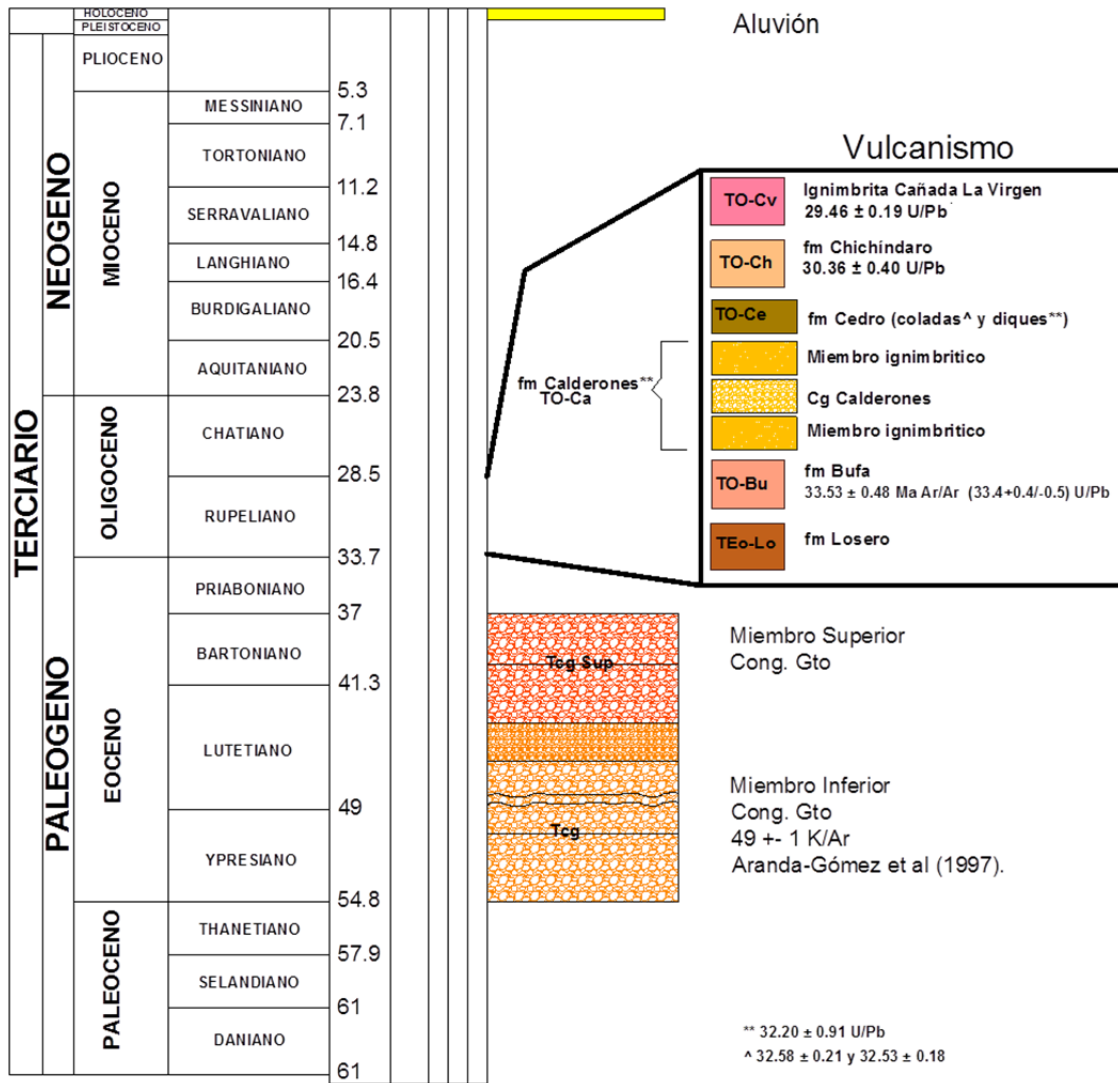


Figura 2.1.- Columna estratigráfica de la regi3n sur del Distrito Minero de Guanajuato realizada con los datos de este trabajo y la fecha del conglomerado Guanajuato tomado de Aranda-G3mez *et al.* (1997).

### 2.2.1.- Eoceno (Cenozoico volcánico)

#### Formaci3n Losero (TEo-Lo)

Originalmente Edwards (1955) la designa como arenisca La Bufo, Guiza (1949) la llama tobas “losero”, nombre que posteriormente se conserv3 para designar a un horizonte delgado,

de 5 a 30 m de espesor de material tobáceo, situado estratigráficamente entre el Conglomerado Guanajuato y la Formación Bufo.

### **Localización y distribución**

La Formación Losero se encuentra ampliamente distribuida en el DMG, también existen algunos afloramientos pequeños en la parte norte de la Sierra del Chorro (fuera del área de estudio) (Labarthe-Hernández *et al.*, 1995). Se pueden apreciar muy bien los espesores de esta formación en la parte sur del distrito, muy cerca de la falla el carrizal (ver mapa 1).

### **Descripción litológica**

Esta unidad es un depósito de cenizas y pómez, contiene horizontes con una gradación normal y también con gradación inversa, aunque la mayoría de los depósitos presentan una gradación normal. Los horizontes van de 5 cm hasta 40 cm de espesor (Figura 2.2). La mayoría de los afloramientos se encuentran horizontales o buzantes con ángulos entre 10° y 25° hacia el sur.

En la mayoría de los afloramientos estudiados se observaron al menos tres horizontes; los horizontes de la cima y de la base contienen fragmentos que van de gruesos a finos (base a cima, gradación normal). La parte superior de los depósitos piroclásticos presentan abundantes cristales y líticos de forma angular a subangular. El horizonte intermedio es un horizonte con gradación inversa ya que tiene fragmentos que varían de finos a gruesos (de base a cima). En estos horizontes se observa laminación paralela y en algunos sitios se observa laminación cruzada.

En estos tres horizontes se observan fragmentos de líticos (~1% - 3%) y fragmentos de cristales (2-5%) asociados a juveniles volcánicos. Los cristales son de plagioclasa, cuarzo y pirita; también hay fragmentos aislados de pómez (ver anexo A1, muestra Los04), los

fragmentos mayores llegan al límite de las cenizas de grano grueso (entre 0.032 mm y 2 mm). Los fragmentos finos se encuentran en el límite de las cenizas de grano fino (menores a 0.032 mm). La matriz es de material de grano fino, menor al 0.032 mm, presenta un color verdoso (por alteración hidrotermal y de posible composición riolítica) y se le observa una débil oxidación a los ferromagnesianos, estos horizontes pertenecen a depósitos de caída.



Figura 2.2.- Fotografía de la Formación Losero. Variación de los estratos de los depósitos piroclásticos, se observa variación en el espesor de cada estrato. Zona sur del Distrito Minero Guanajuato, cercano a la falla el Carrizal.

### **Límites y espesor**

Los depósitos de la Formación Losero sobreyacen en ligera discordancia angular al Conglomerado Guanajuato y subyacen a la Formación Bufa, con un contacto concordante. Se encuentra ampliamente distribuida en la parte sur del Distrito Minero de Guanajuato. Los espesores de esta formación varían entre 5 y 30 m. Los mayores espesores están medidos en las zonas cercanas a la falla el carrizal (zona Sur) y cercanos al cerro de la cueva (parte norte del DMG) (ver mapa geológico anexo).

## **Correlación y edad**

La edad de esta unidad se encuentra definida de acuerdo a la posición estratigráfica que guarda, sobreyace al Conglomerado Guanajuato que tiene una edad de  $49.3 \pm 1$  Ma (K/Ar, roca entera) obtenida en flujos de lava andesítica intercalada hacia la parte baja del conglomerado (Aranda-Gómez *et al.*, 1998) y subyace a la Formación Bufa, la cual tiene una edad de  $33.53 \pm 0.48$  Ma (Ar/Ar en feldespatos potásicos, muestra JB-001, en este trabajo), lo que sitúa a la Formación Losero en el lapso Lutetiano (Eoceno medio)-Priaboniano (Eoceno tardío).

### **2.2.2.- Rupeliano (*Oligoceno temprano*)**

#### **Formación Bufa (TO-Bu)**

Originalmente la mencionan Wandke y Martínez (1928) como “Riolita”, posteriormente Echegoyen-Sánchez *et al.* (1970) la llama informalmente “riolita Bufa”.

#### **Localización y distribución**

La Formación Bufa cubre una extensa área de la parte sur del Distrito Minero Guanajuato. Hacia el N y E del distrito disminuyen tanto la cantidad de sus afloramientos, como su espesor. Hacia el sur del graben de la Saucedá no se tiene registro de su depósito.

Esta unidad aflora de manera extensa desde el cerro de las Gachas y el cerro de San Miguel de Cardones, llegando hasta el poblado de El Cubo. También se puede observar al norte de la falla el Carrizal (mapa geológico anexo).

## **Descripción litológica**

La Formación Bufa presenta varias unidades de flujo piroclástico, distinguiéndose al menos tres depósitos ignimbríticos principales, los cuales presentan características distintivas.

Hacia la parte de la base aparecen depósitos ignimbríticos de moderado a intenso grado de soldamiento, se observa la roca de color rosa a crema, contiene cristales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas, que llegan a constituir hasta el 10% de la roca. La matriz es de grano fino, presenta una gran cantidad de pómez con texturas de flamas (*fiamme*), las pómez se aprecian muy colapsadas y en general recristalizadas a un material criptocristalino. Además, en la parte basal se presentan los líticos de mayor tamaño, hasta de 10 cm de diámetro. Desarrolla fracturamiento por enfriamiento, lo que genera en algunos sitios prismas columnares.

El depósito, que sobreyace al anterior, es un conjunto de ignimbritas de color café claro a rosado. Se observan fragmentos líticos subangulosos a angulosos, los líticos accidentales son de ignimbríta y de andesita, no sobrepasan el centímetro de diámetro. Se aprecian cristales euhedrales a subeuhedrales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Se observa también fragmentos de pómez con una débil a moderada alineación y moderadamente colapsados. Los cristales y líticos se encuentran inmersos en una matriz de grano fino. La matriz presenta una débil alteración argílica.

El tercer grupo de depósitos, que sobreyace al anterior, no se encuentra en todas las áreas donde aflora la Formación Bufa, y está constituido por depósitos de pómez y cenizas. Los depósitos se aprecian bien clasificados, con horizontes que van de cenizas de grano fino a



fragmentos del tamaño de cenizas de grano grueso. Se observa una gradación normal. Los horizontes con este tipo de características presentan un moderado soldamiento y una relación de contacto cristal – cristal, se aprecian microlitos de cuarzo, plagioclasa y pómez. Presenta fragmentos de líticos de diferentes coloraciones que van del café claro a oscuro, además de fragmentos cloritizados. Se observan cristales parcialmente alterados a sericita. (Ver anexo A1, muestras BUF011803A, BUF011803B, BUF021803, BUF041903, BUF051903, BUF062203).

### **Límites y espesor**

La Formación Bufa sobreyace de manera concordante a la Formación Losero y discordante al Conglomerado Guanajuato y subyace de manera discordante a la Formación Calderones (Figura 2.3). La Formación Bufa tiene un espesor aproximado de 400 m, medidos entre el cerro el Coronel y el poblado de El Cubo (mapa geológico).

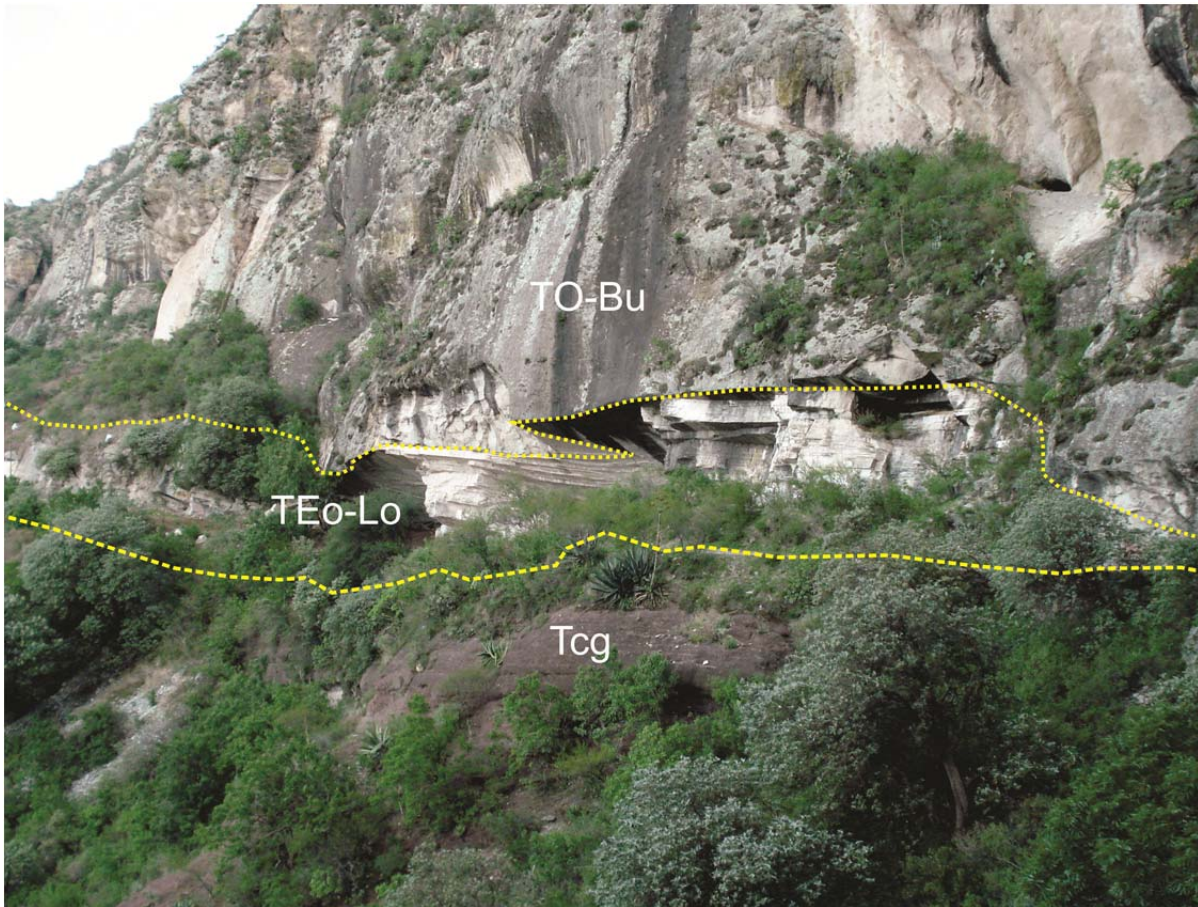


Figura 2.3.- Fotografía de la Formación Bufa. Contacto entre el conglomerado Guanajuato (Tcg), Formación Losero (Teo-Lo) y Formación Bufa (TO-Bu). La Formación Bufa tiene aproximadamente en esta zona 80 m de potencia. Zona al norte del cerro de Las Gachas.

### **Correlación y edad**

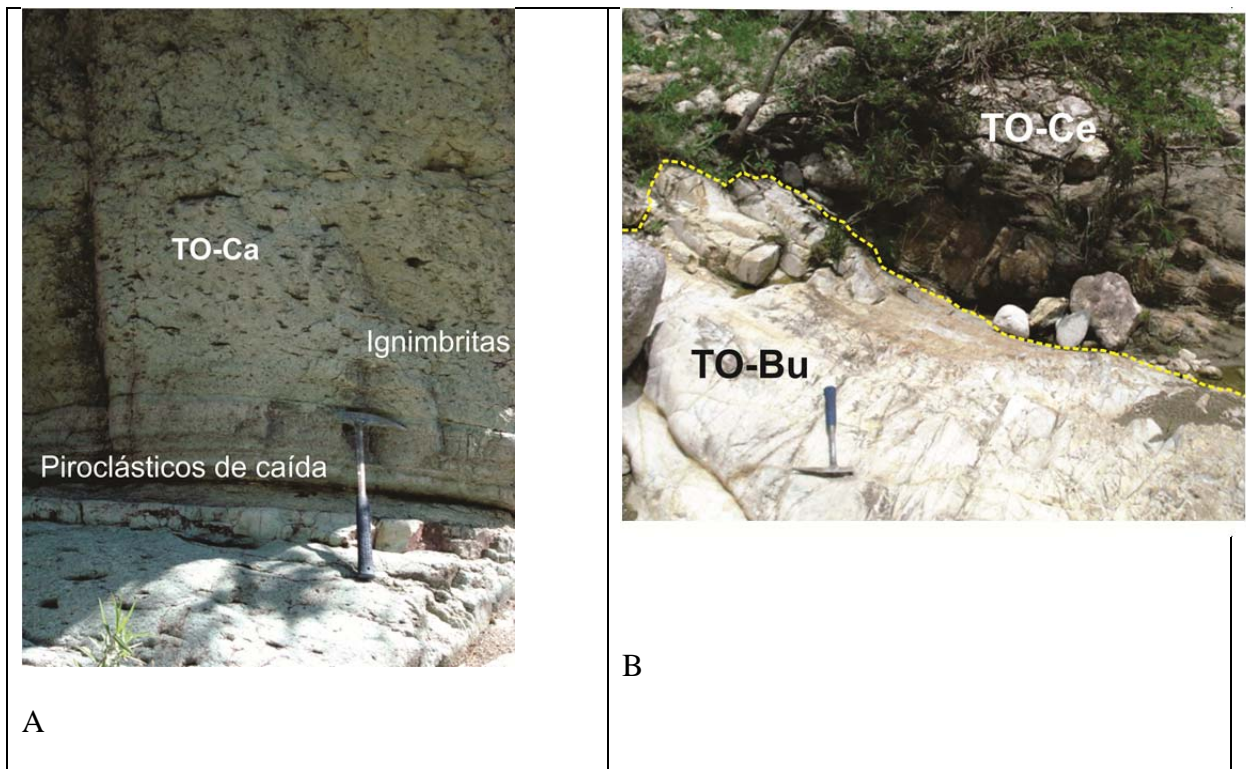
Se obtuvieron edades de  $33.53 \pm 0.48$  Ma, con el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en feldespato potásico (muestra, JB-001) y  $33.4^{+0.4}/_{-0.5}$  Ma, usando el método de U/Pb en zircones (muestra, G02), ambas obtenidas en este trabajo (la información completa se expone en el apartado 3.2.3 “Resultados geocronológicos Ar/Ar y U/Pb”), lo que la ubica hacia la base del Rupeliano (Oligoceno temprano).

### **Formación Calderones (TO-Ca)**

Originalmente fue denominada así por Echegoyen-Sánchez *et al.* (1970) quien la definió como: “areniscas, conglomerados, brechas y tobas de composición andesítica con algunas intercalaciones de tobas dacíticas” y le asignó como localidad tipo el pueblo de Calderones.

### **Localización y distribución**

Se distribuye ampliamente en el DMG, en sus afloramientos de la zona del cerro las Gachas y hasta el poblado de La Rosa de Castilla se aprecia que sobreyace a la Formación Bufa. En la parte norte del área cartografiada aflora desde el poblado de Calderones hasta la cercanía del Poblado de El Cubo (véase mapa geológico anexo). Los afloramientos de esta unidad desaparecen hacia el este de la población El Cubo y hacia el sur del graben de la Sauceda (mapa geológico anexo). Algunos aspectos de campo se muestran en la Figura 2.4.





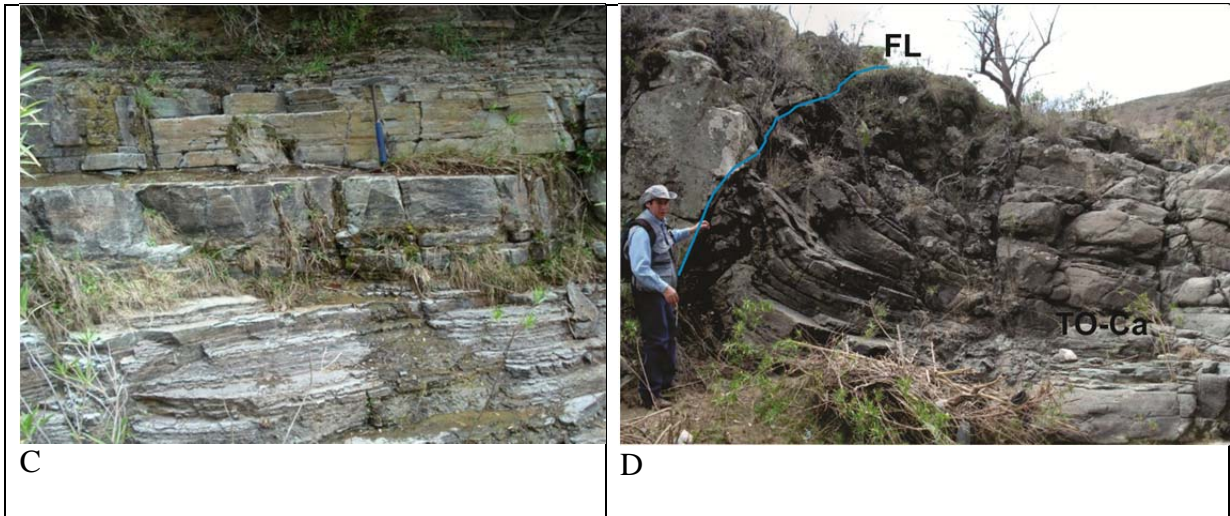


Figura 2.4.- Fotografía de las diferentes unidades de la Formación Calderones. A) Contacto entre depósitos de ignimbritas sobreyaciendo a un horizonte de depósitos piroclásticos caída (To-C) en un afloramiento cerca de La Rosa de Castilla. B) Coladas del miembro andesítico de la Formación Calderones sobreyaciendo discordantemente a depósitos ignimbríticos de la Formación Bufo, en la zona del poblado de Carboneras. C) Horizontes de depósitos piroclásticos de caída. D) Horizontes piroclásticos (To-Ca – Formación Calderones) plegados en la zona adyacente a la falla La Leona (FL).

### **Descripción litológica**

La Formación Calderones está compuesta al menos por 4 miembros. El primer miembro, que se ubica en la base está formado por paquetes de tobas de lapilli, presentan un soporte clasto a clasto, los líticos y los cristales van del tamaño de las cenizas de grano grueso a cenizas de grano fino. Se observa una buena gradación y una buena clasificación. Se presenta una estratificación cruzada a la base de este paquete de depósitos. Este miembro tiene al menos 50 m de espesor. Contiene fragmentos de líticos de colores café oscuro, muy semejantes a fragmentos de la Formación Bufo, los líticos son subangulosos a subredondeados. Se observan cristales de plagioclasa, cuarzo y fragmentos de pómez (Figura 2.5). Se puede observar muy bien en las cercanías del cerro El Nayal y en los alrededores del poblado La Rosa de Castilla (Figuras 2.4).

El segundo miembro es un conglomerado polimítico, este miembro tiene un espesor de 130 m en la carretera Guanajuato a Santa Rosa, fuera del área cartografiada (Labarthe-Hernández *et al.*, 1995), se observa heterogéneo y mal clasificado, está compuesto por fragmentos angulosos a subangulosos de rocas volcánicas, fragmentos de lutita y fragmentos del Conglomerado Guanajuato. Los fragmentos van de 1 a 20 cm de diámetro, soportados por una matriz de grano fino que presenta cloritización. Este tipo de depósitos se aprecian al norte del distrito Guanajuato.

El tercer miembro lo conforma un conjunto de diversos depósitos ignimbríticos. Cada paquete de ignimbritas muestra diferencias notables. Algunos depósitos presentan una buena gradación normal. La mayoría de estos paquetes son masivos y se observan mal clasificados. Este grupo de depósitos tienen espesores hasta de 650 m. Están compuestos por fragmentos líticos de ignimbritas preexistentes (Formación Bufa) y de andesitas. Los fragmentos son angulosos a subangulosos y van de un milímetro hasta 10 centímetros de longitud. También se observa material juvenil, representado por pómez cloritizada, soportada por una matriz de grano fino, la matriz se encuentra cloritizada. Estas ignimbritas son ricas en plagioclasas >> feldespato potásico >> cuarzo y fragmentos juveniles. Buenos afloramientos de este miembro se puede apreciar desde el cerro Las Gachas hasta la población del Cubo.

El cuarto miembro de la Formación Calderones lo denominamos miembro Carbonera, ya que aflora en las cercanías del poblado Carbonera. Se trata de un conjunto de coladas andesíticas que en ocasiones se encuentran sobreyaciendo a la Formación Bufa (Figura 2.3B) y en otras a los depósitos ignimbríticos del tercer miembro de la Formación Calderones. Este miembro está compuesto de coladas de lava de composición andesítica, las cuales en algunos lugares

están yaciendo bajo depósitos piroclásticos que por su litología y color son indistinguibles de los otros miembros de la Formación Calderones, solamente es de señalarse que contienen una mayor cantidad de fragmentos de andesita.

Las lavas andesíticas del miembro carboneras son masivas, con coladas de aproximadamente 0.20 m a 2 m de espesor y están formadas por una matriz de microcristales de andesina y biotita, presentando fenocristales también de andesina y biotita, se observa también, aunque en muy poca cantidad, cristales de hornblenda carcomidos en sus bordes y reabsorbidos. Los cristales de biotita se presentan alterados a clorita, también aparecen algunos cristales de clorita en la matriz.

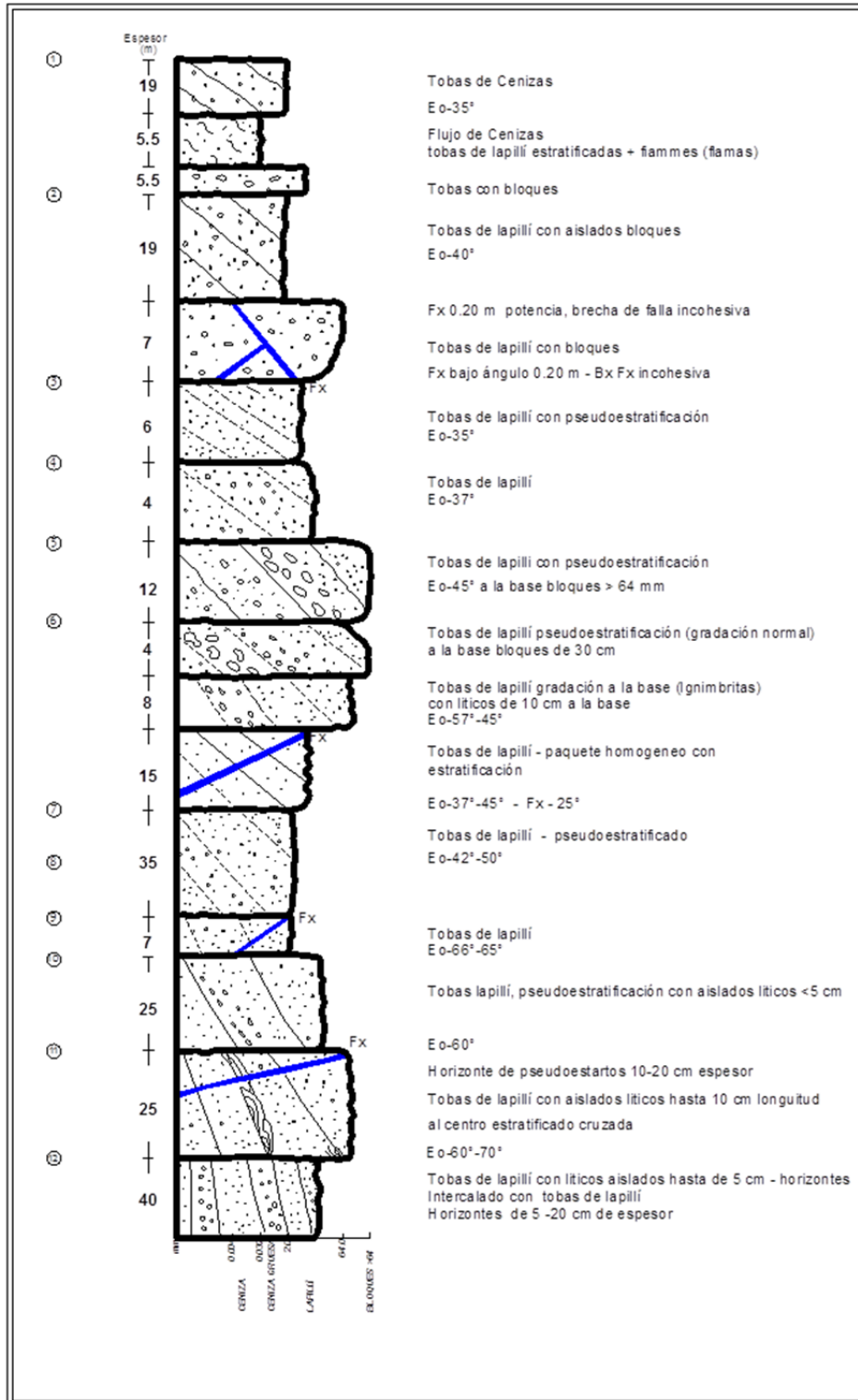


Figura 2.5.- Columna litológica levantada en la zona de falla La Leona (sección D del mapa geológico). Esta sección corresponde al miembro 1 de la Formación Calderones descrito en el texto. Las fallas que cortan a los miembros se colocaron con líneas de color azul.

## **Límites y espesor**

La Formación Calderones se encuentra sobreyaciendo discordantemente a la Formación Bufa o al Conglomerado Guanajuato y subyace también discordantemente a la Formación Cedro.

En una sección medida en las cercanías del poblado El Cubo, la cual abarca de la falla la Leona a la falla del Cubo, se midió un espesor de 237 m. Se debe considerar que su espesor total es más grande en esa zona, ya que el contacto inferior no aflora en la sección medida. Por otra parte la presencia de numerosas fallas menores introduce un error en la medida debido a la repetición de capas, consideramos que el espesor es variable y que debe ser de entre 200 y 300 m.

## **Correlación y edad**

Para obtener la edad de la Formación Calderones se tomó una muestra del miembro ignimbrítico (tercer miembro). Se separó plagioclasa y se analizó por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , obteniéndose una edad de meseta de:  $31.33 \pm 0.29$  Ma. (Muestra Gto-05), también de esta misma unidad se analizaron zircones por el método U/Pb obteniéndose una edad de cristalización de zircones, la que nos arroja una edad de  $31.84 \pm 0.27$  Ma. (Muestra G-01) del grupo homogéneo más joven de los zircones fechados.

## **Formación Cedro (TO-Ce)**

Guiza (1949), la menciona simplemente como “andesita”. Echegoyen-Sánchez *et al.* (1970) la describen como Formación Cedro, siendo su localidad tipo la población con el mismo nombre, localizada al sureste de la ciudad de Guanajuato.



### **Localización y distribución**

Se encuentra la localidad tipo en la población El Cedro. Se distribuye ampliamente en todo el DMG, principalmente en la parte oriente, desde la población El Cedro hasta la Veta Madre. Se puede apreciar también en la zona del cerro El Nayal y al E de la población del Cubo. También aflora fuera del área de estudio hacia el sur del poblado la Saucedá y en la región de la Mesa de San José (véase mapa geológico anexo).

### **Descripción litológica**

La Formación Cedro está compuesta por un conjunto de coladas de lava de composición andesítica. Es muy notorio su aspecto en el cual se puede apreciar una pseudoestratificación, la mayoría de depósitos son masivos y sin estructuras apreciables. Hacia la zona del Nayal y del poblado Rosa de Castilla, se aprecian depósitos poco consolidados, más oscuros que el resto de la unidad, al parecer se tratan de depósitos de caída. No fue posible observar texturas primarias de depósito debido a lo intemperizado de las rocas en esos afloramientos. Se aprecia de color gris verdoso a verde oscuro.

Las lavas de la Formación Cedro presentan comúnmente una intensa alteración hidrotermal. Cuando la alteración no es tan intensa se observan cristales de plagioclasas (andesina) entre un 70% a 80% del total de la roca, también se observa hornblenda aislada y esporádica; cuando la alteración propilítica es intensa, se puede apreciar pirita diseminada hasta un 2%, clorita y en ocasiones cristales esporádicos de epidota.

### **Límites y espesor**

La Formación Cedro se encuentra sobreyaciendo discordantemente a la Formación Bufa o a la Formación Calderones y subyace, también discordantemente, ya sea a la Formación

Chichíndaro o a la ignimbrita Cañada La Virgen. En una sección medida en los alrededores del poblado El Cubo, tiene un espesor mínimo aproximado de 400 m, debe considerarse que en esa sección no aflora el contacto superior ya que está en contacto por falla normal con la Formación Calderones (Figura 2.6) (véase también mapa geológico). Hay diques de composición andesítica que alimentan a los derrames de la Formación Cedro y que por ese motivo se consideran parte de esta unidad.

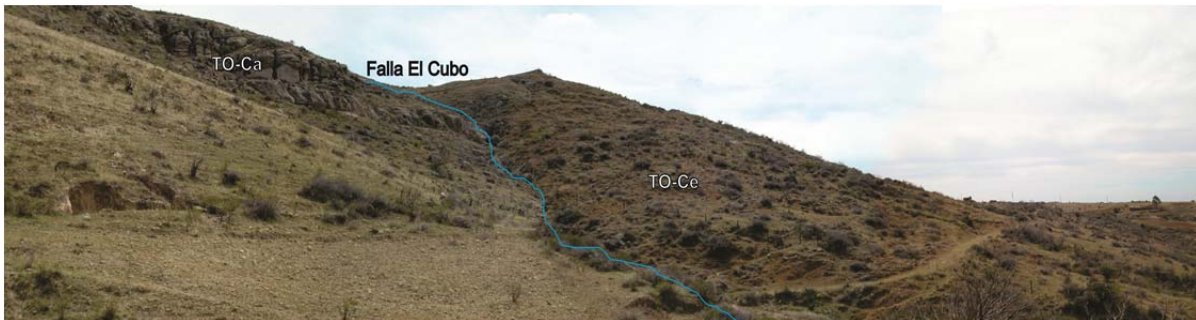


Figura 2.6.- Fotografía viendo hacia el SE del contacto por la Falla el Cubo (falla normal) entre la Formación Calderones (izquierda) y la Formación Cedro (derecha).

### **Correlación y edad**

Para la Formación Cedro se obtuvieron dos edades por el método U/Pb en zircones. De la primera muestra (Ced04) se obtuvo una edad de:  $32.58 \pm 0.21$ ; de la segunda muestra (Ced05B) se obtuvo una edad de  $32.53 \pm 0.18$  Ma. También se fechó un dique que al parecer es alimentador de las coladas andesíticas (muestra JBCAL01), y se obtuvo una edad de  $32.20 \pm 0.91$  Ma. Las edades que se obtuvieron son muy cercanas a la edad obtenida para la Formación Bufa que es la base de la columna volcánica, y más antiguas que la Formación Calderones que subyace a la Formación Cedro; pero considerando las limitaciones y resolución del método utilizado, se considera que están dentro de un rango aceptable para su ubicación dentro de la columna estratigráfica. Los afloramientos de la Formación Cedro dentro del DMG fueron correlacionados por Cerca *et al.*, (2000) con las andesitas que ocupan

la misma posición estratigráfica y que afloran en la zona de la Sierra de Codornices - Celaya (fuera del área de estudio). Dichas rocas tienen edades K/Ar de  $30.6 \pm 0.4$  Ma obtenida en matriz y de  $30.7 \pm 0.6$  Ma en roca total.

### **Formación Chichíndaro (TO-Ch)**

La riolita Chichíndaro constituye una unidad que toma su nombre del cerro así llamado, que se ubica muy cercano a la ciudad de Guanajuato (Echegoyén-Sánchez *et al.*, 1970).

### **Localización y distribución**

La localidad tipo se encuentra en el cerro Chichíndaro, cercano a la ciudad de Guanajuato. Estas rocas afloran ampliamente en la parte sur del DMG, y fuera de este distrito en gran parte de la Mesa Central (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999).

### **Descripción litológica**

La Formación Chichíndaro está compuesta por derrames de lava que forman domos, y depósitos piroclásticos de composición riolítica que sobreyacen a los derrames (Figura 2.7). En los domos se pueden encontrar depósitos de lavas con texturas fluidal y tobas. Los derrames de lava son de composición riolítica con fenocristales de cuarzo y feldespatos potásico, soportados por una matriz afanítica. Los depósitos piroclásticos, están formados principalmente por depósitos de caída y volcanoclásticos; aparecen intercalados con derrames o entre los domos, y se observaron principalmente en la zona de la Sierra de las Codornices.

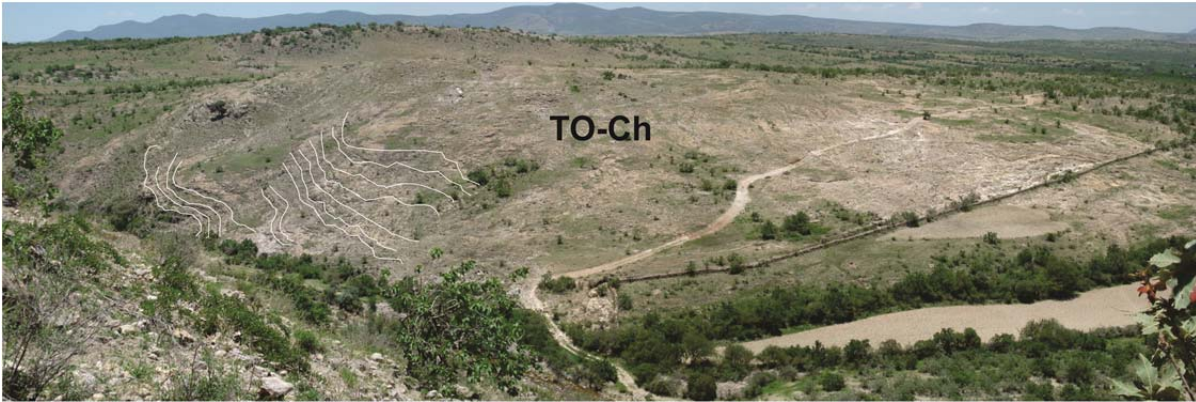


Figura 2.7.- Fotografía de Formación Chichíndaro, depósitos de lavas con textura fluidal. Al sur de la Falla Carrizal.

### **Límites y espesor**

La Formación Chichíndaro se encuentra sobreyaciendo a la Formación Cedro o a la Formación Calderones y subyace en algunos sitios (cerca del poblado Tacubaya), a la ignimbrita Cañada La Virgen. En la sección C del mapa geológico anexo se midió un espesor mínimo aproximado de 200 m, y en la zona sur del distrito (al sur de la Falla Carrizal) se estimó un espesor de 400 m.

### **Correlación y edad**

Nieto-Samaniego *et al.*, (1996), obtuvieron dos edades para la Formación Chichíndaro la primera de  $30.1 \pm 0.8$  Ma y la segunda de  $30.8 \pm 0.8$  Ma en Sanidino, ambas por el método K/Ar. Para esta unidad se obtuvo una edad por el método U/Pb en zircones en la muestra (R\_CH\_2) de  $30.36 \pm 0.40$ .

### **Ignimbrita Cañada La Virgen (TO-Cv)**

Nieto-Samaniego *et al.*, (1996), la describieron por primera vez. Esta unidad aflora en la parte suroriental de la Sierra de Codornices, ubicada al suroeste de San Miguel de Allende, Gto.

## **Localización y distribución**

En el distrito Guanajuato no se conocían depósitos de esta edad, ya que se pensaba que las ignimbritas que sobreyacen a toda la columna volcánica de Guanajuato pertenecían a la Formación Chichíndaro. Se ubicaron sus afloramientos al sur de la población Tacubaya, al suroeste de la Ciudad de Guanajuato (véase mapa geológico anexo).

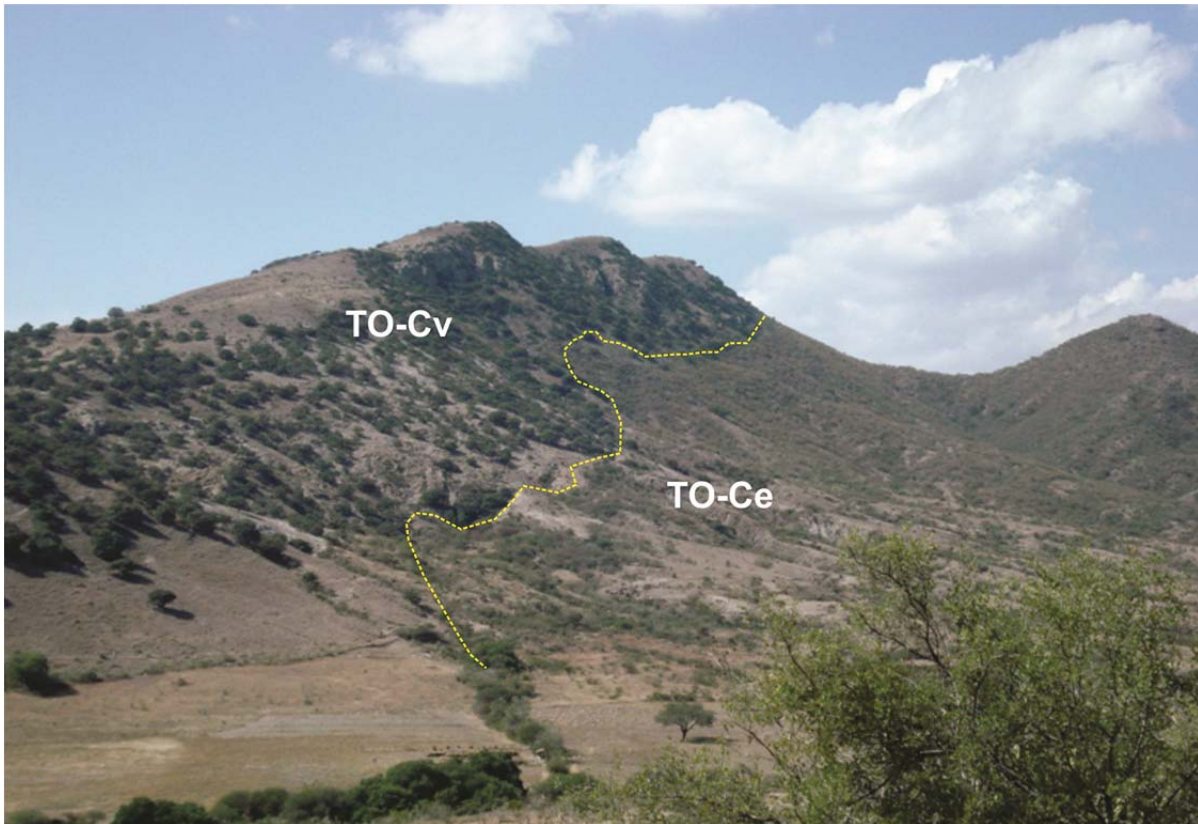


Figura 2.8.- Fotografía del contacto discordante entre la ignimbrita Cañada la Virgen (izquierda) y depósitos andesíticos de la Formación Cedro (derecha). Al oriente del poblado Tacubaya.

## **Descripción litológica**

La ignimbrita Cañada La Virgen está formada por depósitos moderadamente soldados a fuertemente soldados, presenta algunos depósitos aislados de caída. Los horizontes son masivos y homogéneos. Se observan abundantes cristales de sanidino, plagioclasa y poco cuarzo. También se pueden apreciar algunos líticos que no sobrepasan los 5 cm de diámetro.

Los líticos son angulosos y la mayoría son de color café claro. Se observa material juvenil formado por pómez, la pómez no sobrepasa los 2 cm de diámetro y en ocasiones se aprecian con texturas de flama, con un grado de soldamiento moderado a intenso.

### **Límites y espesor**

La ignimbrita Cañada la Virgen se encuentra sobreyaciendo discordantemente a la Formación Cedro y/o la Formación Chichíndaro. En una sección medida al sur de la población Tacubaya se le ha estimado un espesor entre 50 a 100 m.

### **Correlación y edad**

Para la ignimbrita Cañada La Virgen se obtuvieron zircones y se analizaron por el método U/Pb para obtener una edad de cristalización. De la muestra (M01) se obtuvo una edad de:  $29.46 \pm 0.19$  Ma; Nieto-Samaniego *et al.* (1996) obtuvieron una edad de  $28.6 \pm 0.7$  Ma en sanidino utilizando el método K/Ar. Con estas edades se puede ubicar a la ignimbrita Cañada La Virgen en el límite entre el Rupeliano (Oligoceno temprano) y el Chatiano (Oligoceno tardío).

### **2.3.- Fechamientos**

Para fechar las unidades litoestratigráficas del área de estudio se determinaron 5 edades isotópicas U/Pb en zircones; también se obtuvieron 2 edades isotópicas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en feldespato potásico y plagioclasa. De las muestras que se recolectaron en los trabajos de campo, se escogieron las más representativas de las unidades litoestratigráficas que conforman el área, posteriormente se prepararon para la separación y montaje de los minerales para efectuar las determinaciones isotópicas.

### **2.3.1.- Metodología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$**

Se escogieron dos muestras de ignimbrita para obtener sus edades de enfriamiento utilizando el método Ar/Ar, previamente se habían obtenido sus edades de cristalización por el método de U/Pb. De la muestra G-1 correspondiente a la Formación Calderones, en su facies de ignimbrita, se realizó el separado de feldespato potásico en el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), la otra muestra, muestra G-02 correspondiente a una ignimbrita de la Formación Bufa se procesó en el Centro de Geociencias de la UNAM. Para realizar los fechamientos Ar/Ar se decidió utilizar separados minerales de feldespato potásico para la muestra G1 y de feldespato potásico (sanidino) para la muestra G2. Se inició con la molienda de aproximadamente 2 kg de roca con la ayuda de una prensa hidráulica hasta llegar al tamaño de gravas, posteriormente se utilizó un mortero para pulverizar la muestra. Se tamizó la muestra con mallas 20, 40, 60 y 80, y se seleccionó la malla en la cual se obtiene el mejor tamaño y concentrado con mayor pureza del mineral a separar. Posteriormente la muestra fue lavada para retirar el material fino y puesto en ultrasonido por un periodo de 15 minutos, para una mejor limpieza de los cristales.

Para obtener un mejor concentrado se utilizó un separador magnético Franz, aplicándole 2.0 amperes, recuperándose la fracción no magnética, posteriormente se escogieron los cristales con pinzas hasta obtener la cantidad deseada. Por último el concentrado fue lavado con agua desionizada en un baño con ultrasonido, por un periodo de 15 minutos y posteriormente con acetona.

Los concentrados minerales fueron irradiados en el reactor de uranio enriquecido de la Universidad de McMaster en Hamilton, Ontario, Canadá, el cual trabaja normalmente a una potencia de 3 MWatts. La cápsula de irradiación que contiene las muestras y los monitores de

irradiación se cubren con una lámina de cadmio, lo cual inhibe la reacción que forma  $^{40}\text{Ar}$  a partir de la reacción del  $^{40}\text{K}$  con neutrones térmicos.

El análisis isotópico de las muestras fue realizado en el Laboratorio de Geocronología del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), utilizando un espectrómetro de masas VG5400 para el análisis de gases nobles.

Los experimentos fueron realizados por la metodología de calentamiento por pasos, incrementando la potencia del láser en cada paso de desgasificación, llegando hasta una potencia de 6.9 w. La metodología utilizada en el Laboratorio de Geocronología del CICESE, consistió en una corrida en blanco o “inlet” antes de cada paso de desgasificación. Se realiza esta metodología con el fin de conocer el valor de fondo (background) de Ar contenido dentro de la línea de extracción y el espectrómetro para restar éste a la señal obtenida durante la lectura de cada paso de calentamiento.

La reducción y presentación gráfica de los datos se hizo con los programas RaDan y AgeCalcVG5400, diseñados específicamente para el Laboratorio de Geocronología del CICESE y que contiene los parámetros específicos con los cuales se irradian las muestras en el reactor de McMaster, incluyendo las correcciones debidas al uso de la lámina de cadmio.

Los espectros de edad se utilizan para representar edades cuando el experimento presenta una edad de meseta ( $t_p$ ). En este tipo de gráficos, una edad de meseta se define cuando dos o más fracciones continuas de gas extraído constituyen más del 50% del  $^{39}\text{Ar}$  total y además si las edades que éstas representan se encuentran en un rango de confiabilidad del 95% entre ellas. La edad de meseta constituye el promedio ponderado de las edades obtenidas para cada fracción incluida en la meseta (McDougall y Harrinson, 1999).

Los diagramas de correlación o isócrona ( $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) permiten definir una edad, la cual es calculada del inverso de la intercepción de la línea recta definida por los datos con



el eje de las abscisas. Los datos pueden provenir de una muestra o de una serie de muestras genéticamente relacionadas, dando mejores resultados cuando las muestras presentan diferentes relaciones de isótopos hijos *vs.* Isótopos padres.

En la metodología de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  se utiliza el diagrama de correlación ( $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  *vs.*  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) para el cálculo de las edades de isócrona, con el fin de usar el isótopo  $^{40}\text{Ar}$  como referencia, ya que es el isótopo de mayor abundancia y por lo tanto se puede medir con mejor precisión. Por esta razón, el  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_i$  se calcula del inverso de la intercepción de la línea recta con el eje de las ordenadas es decir, es  $1/Y_0$ . De igual manera, el inverso de la intercepción de esta línea con el eje de las abscisas  $1/X_0$  representa el  $(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k)$  que determina la edad de isócrona. (Ver Anexo A4, para mayor detalle de la metodología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ).

### **2.3.2.- Metodología U / Pb en zircón.**

El análisis de las muestras fue realizado en las instalaciones del Centro de Geociencias de la UNAM, campus Juriquilla (CGEO), donde se utilizó para la ablación un equipo láser Resolution M-50, láser excímero de ArF operado a 193 nm, 5 Hz y  $\pm 8 \text{ J/cm}^2$ ; estas condiciones permiten realizar cráteres de ablación de 32  $\mu\text{m}$  de diámetro. El láser se encuentra adaptado a una estación de trabajo micro-controlada, con una celda de ablación y un flujo de  $\text{N}_2$  y Ar transporta la muestra a un ICP-MS cuádruplo Thermo Xii. (Solari *et al.*, 2009).

Por cada una de las muestras analizadas se realizaron 40 análisis puntuales en zircones, previamente seleccionados. La reducción de los datos de cada análisis fue realizado mediante un script para el software estadístico R, llamado Upb.Age (Tanner y Solari, 2009). El script realiza automáticamente el proceso de integración de las señales del ICP-MS y su respectiva

corrección por blancos. Identifica mediante regresión matemática, posibles “outliers” e inclusiones y los presenta para que éstos sean evaluados por el usuario. Posteriormente calcula las relaciones isotópicas  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  y  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  al igual que sus respectivos errores estándar a 1 sigma (Tanner y Solari, 2009). Para cada experimento o grupo de zircons desconocidos, se analizó primero dos veces el vidrio sintético NIST para usarlo en la calibración del detector y en el cálculo de las concentraciones elementales. Enseguida se hicieron 5 análisis zircon estándar “Plesovice” (PL) que tiene una edad U/Pb concordante de  $337.13 \pm 0.37$  Ma ( $2\sigma$ ) obtenida mediante la técnica ID-TIMS (Sláma *et al.*, 2008). Posteriormente se analizaron alternadamente 5 zircons de edades desconocidas con un zircon estándar PL, de forma cíclica.

La metodología usada actualmente para el fechamiento por LA-ICP-MS no permite realizar corrección por plomo común. Por lo que se utilizó la metodología propuesta por Andersen (2002) para realizar dicha corrección por métodos matemáticos. La presentación gráfica de los datos se realizó utilizando diagramas de concordia de Tera y Wasserburg, (1972), éstos permiten, de manera gráfica, evaluar el aporte de Pb común que posee el análisis (Parrish y Noble, 2003).

Después de seleccionar los datos, estos fueron graficados y se calculó la edad, usando para esto la macro para Excel “Isoplot 3.0” (Ludwing, 2004). (Para mayores detalles sobre el método, ver Anexo A4).

### **2.3.3.- Resultados geocronológicos Ar-Ar y U-Pb.**

En esta sección se presentan los resultados de 5 fechamientos U-Pb en zircons obtenidos mediante la técnica LA-ICP-MS (Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) realizados en CGEO de la UNAM. También se presentan los resultados de 2

fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  realizados en el CICESE. En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de las edades obtenidas para diferentes unidades fechadas en el área de estudio. En el Apéndice B se muestran imágenes de catodoluminiscencia de los zircones fechados y las tablas con los datos isotópicos. Las edades U/Pb, medias ponderadas y las edades de intersección en la concordia se calcularon con la macro en Excel Isoplot 3.0 de Ludwig (2004).

*Estratigrafía de la parte sur del Distrito Minero de Guanajuato, México.*

Muestra	Localidad	14Q UTM E	14Q UTM N	Roca	Minerales Accesorios	Método	Edad Ma	MS WD	Mineral
G-02	Formación Bufo	266,813	2,322,331	Ignimbrita	Kfs+Pla+Qtz Bt+Zrn	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Promedio	33.40 <sup>+0.40</sup> / <sub>-0.50</sub>	1.3	Zircón
G-02	Formación Bufo	266,106	2,322,295	Ignimbrita	Kfs+Pla+Qtz Bt+Zrn	Ar/Ar Meseta	33.53 ± 0.48	0.64	Feld-K
GTO-05	Formación Calderones	266,981	2,321,981	Ignimbrita	Kfs+Pla+Qtz Bt+Zrn	Ar/Ar Meseta	31.33 ± 0.29	0.11	Feld-K
G-01	Formación Calderones	266,106	2,322,295	Ignimbrita	Kfs+Pla+Qtz Bt+Zrn	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Promedio	31.84 ± 0.27	1.4	Zircón
CED-04	Formación Cedro	273,782	2,322,327	Andesita	Pl+Hbl Ep+Zrn	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Promedio	32.58 ± 0.21	0.8	Zircón
CED-05B	Formación Cedro	272,646	2,319,885	Andesita	Pl+Hbl Ep+Zrn	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Promedio	32.53 ± 0.18	0.32	Zircón
JBCAL01	Diques (Formación Cedro)	267,709	2,322,556	Andesita	Pl+Hbl Ep+Zrn	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Promedio	32.20 ± 0.91	3.0	Zircón
M-01	Cañada La Virgen	269,488	2,316,919	Ignimbrita	Kfs+Pla+Qtz Bt+Zrn	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Promedio	29.46 ± 0.19	1.0	Zircón
R_CH_2	Formación Chichindaro	269,076	2,324,750	Ignimbrita	Kfs+Pla+Qtz Bt+Zrn	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Promedio	30.36 ± 0.40	7.2	Zircón

Tabla 2.1.- Resumen de edades obtenidas por los métodos de U/Pb y <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar.

Datum: Nad27. MSWD: Mean Squared Weigthed Deviate (Desviación media cuadrática ponderada). Abreviaciones de minerales: Bt=biotita, Chl=clorita, Ep=epidota, Hbl=hornblenda, Kfs=feldespatos potásico, Pl=plagioclasa, Qtz=cuarzo, Zrn=zircón. Datos referenciados con Datum NAD27

### **2.3.3.1.- Formación Bufa.**

La muestra G-02 pertenece a la Formación Bufa, la cual está formada por una serie de ignimbritas de composición riolítica. De esa muestra se obtuvieron zircones y feldespatos potásicos en el proceso de separación mineral. Se analizaron, por la técnica LA-ICP-MS, 35 zircones euhedrales entre los de mayor tamaño ( $>40\mu\text{m}$ ), de un total de 94 zircones obtenidos. Los datos U/Pb de zircones se graficaron en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg (Figura 2.9A) mostrando que son concordantes. El grupo de circones analizados no arroja una buena edad para esta muestra, ya que aparecen circones tan jóvenes como 30 Ma (Figura 2.9B) y el conjunto de circones más jóvenes indica una edad de  $30.1\pm 0.2$  Ma, edad que no se ajusta ni a la posición estratigráfica y la edad de enfriamiento Ar/Ar obtenida para la misma muestra de la Formación Bufa (véase Tabla 2.1). La agrupación de nueve análisis concordantes mostrada en rojo en la Figura 2.9B arroja la edad que mejor se ajusta, tanto a la posición estratigráfica, como a la edad Ar-Ar que se obtuvo para esa misma muestra. La edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada para ese conjunto de zircones de  $33.40^{+0.40}/_{-0.50}$  Ma (MSWD=1.3, n=9). El MSWD (*Mean Square of Weighted Deviates*) es un indicador del grado de ajuste estadístico de la regresión de datos experimentales que generan incertidumbre y sirve para expresar la dispersión en los análisis, en este caso en los datos de zircones. Comúnmente los valores de MSWD menores a 2.5 indican un ajuste aceptable de los datos. Debe considerarse que esta edad la presento solo para indicar la presencia de zircones con edades muy cercanas a la edad de enfriamiento de la roca. No se cuenta con una explicación de la presencia de zircones más jóvenes y en general, esta muestra no arroja datos confiables.

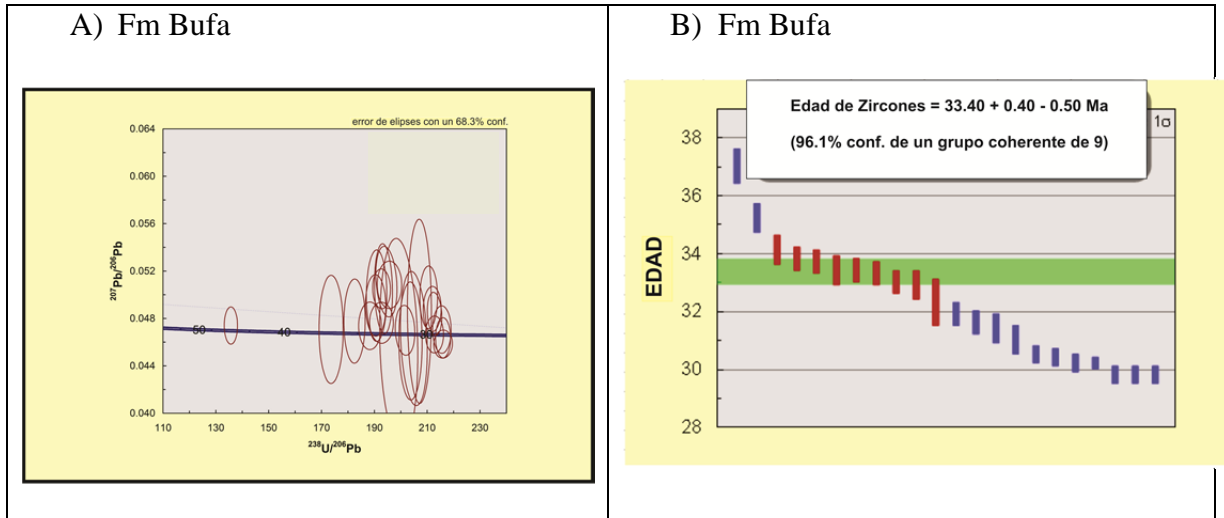


Figura 2.9.- Datos de U/Pb de zircons obtenidos con la técnica LA-ICP-MS de la muestra de ignimbritas de la Formación Bufa. A) Gráfico de concordia tipo Tera-Wasserburg con los datos de la muestra G-02. B) Gráfico de edad  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  media ponderada de la muestra G-02. En rojo los datos de edades más recientes utilizados para obtener la edad de cristalización.

También se analizó sanidino en la misma muestra (G-02; JB-001) con la técnica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en el laboratorio de geocronología CICESE. Para esta muestra se realizó un experimento de calentamiento por pasos, utilizando un láser como sistema de calentamiento. Para el concentrado de feldespato potásico se hizo un experimento de desgasificación, realizándose 6 pasos de calentamiento. Por este método se obtuvo una buena meseta, con edad es de  $33.53 \pm 0.48$  Ma (Figura 2.10A). En las relaciones  $^{37}\text{Ar}_{(\text{Ca})}/^{39}\text{Ar}_{(\text{k})}$  (Figura 2.10B) se aprecia una mezcla de concentraciones de K y de Ca, lo que podría indicar una baja concentración de K en los feldespatos potásicos, o más probablemente, la presencia de plagioclasas en los minerales analizados.

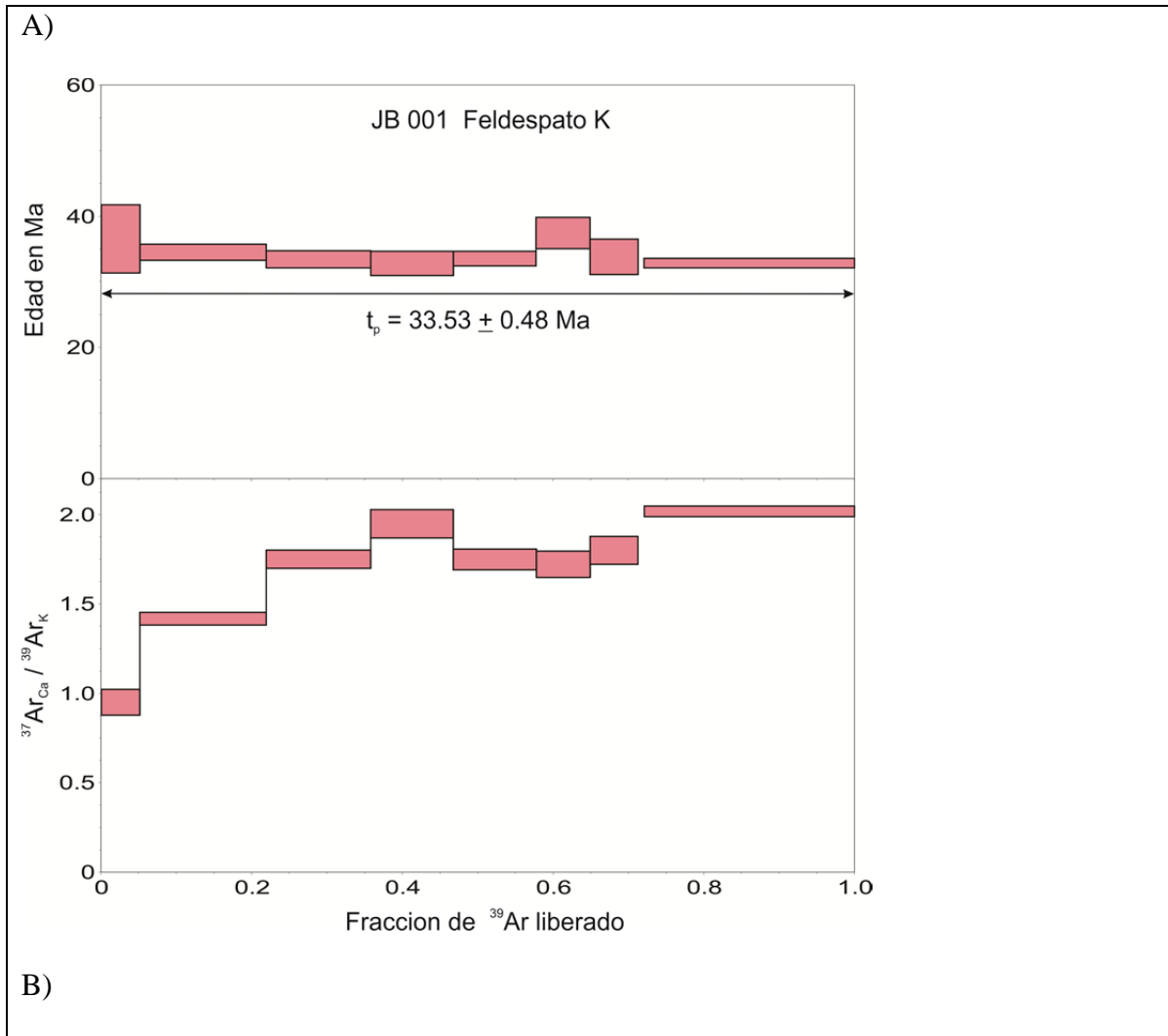


Figura 2.10.- Datos de Ar/Ar de feldespato K de la muestra de ignimbritas de la Formación Bufa. A) Espectros de edad. B) fracciones de Ar liberado.

### 2.3.3.2.- Formación Calderones.

La muestra G-01 corresponde a la Formación Calderones, pertenece a un depósito de ignimbrita de composición intermedia a andesítica. De esa muestra se obtuvieron zircones en el proceso de separación mineral. Se analizaron 38 zircones euhedrales, de entre los de mayor tamaño ( $>40\mu\text{m}$ ), de un total de 102 que fueron separados. Los datos de U/Pb se graficaron en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg mostrando que los 10 análisis en zircones

usados para obtener la edad son concordantes (Figura 2.11A). Los zircones concordantes se usaron para obtener la edad  $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de  $31.84 \pm 0.27$  Ma (MSWD = 1.3, n = 10) (Figura 2.11B) que se interpreta como la edad más joven de cristalización de zircones.

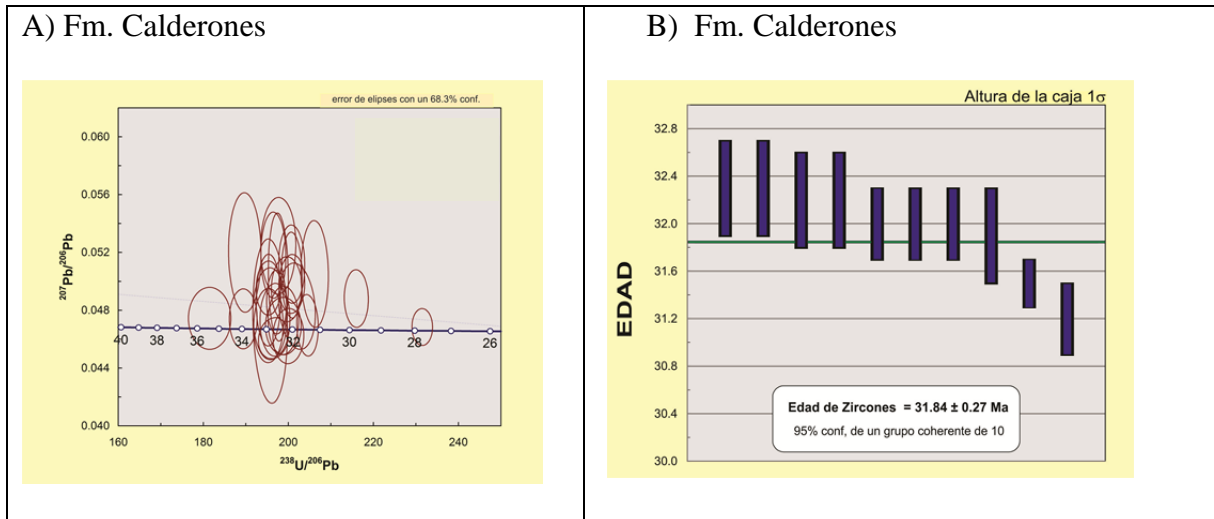


Figura 2.11.- Datos de U/Pb de zircones obtenidos con la técnica LA-ICP-MS de la muestra de ignimbritas de la Formación Calderones. A) Gráfico de concordia tipo Tera-Wasserburg con los datos de la muestra G-01. B) Gráfico de edad  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  media ponderada de la muestra G-01. En rojo los datos de edades más recientes utilizados para obtener la edad de cristalización.

También se analizó una muestra de esta unidad (GTO-05) con la técnica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en el laboratorio de geocronología del CICESE. Para esa muestra (GTO-05) se utilizó desgasificación por calentamiento en pasos utilizando un láser como sistema de calentamiento. Se realizaron 6 pasos de calentamiento, obteniéndose una edad de meseta de los pasos 3, 4 y 5. La edad de meseta es de  $31.33 \pm 0.29$  Ma (Figura 2.12). En las relaciones  $^{37}\text{Ar}(\text{Ca})/^{39}\text{Ar}(\text{K})$  se aprecia una mezcla de concentraciones de K y de Ca (Figura 2.12B), lo que indica una mezcla de cristales de plagioclasa y sanidino (Tabla A2.2).



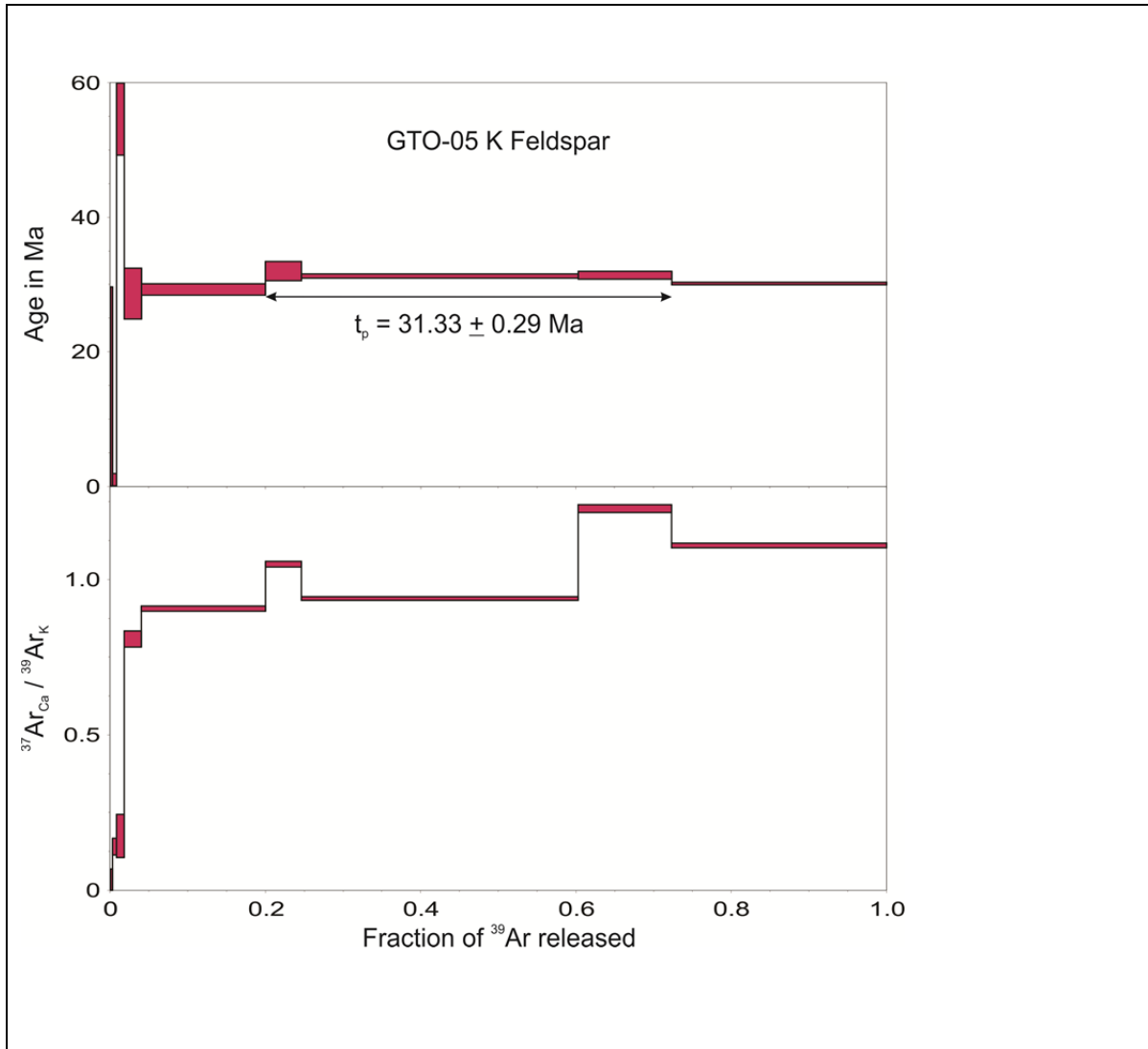


Figura 2.12.- Datos de Ar/Ar de sanidino (y plagioclasa) de la muestra de ignimbritas de la Formación Calderones (Gto-05) A) Espectros de edad B) fracciones de Ar liberado.

### 2.3.3.3.- Formación Cedro.

De la Formación Cedro se analizaron dos muestras: una de ellas es la muestra CED-04, que corresponde a una colada de andesita. De esa muestra se obtuvieron 81 zircones en el proceso de separación mineral, de los cuales se analizaron 36 euhedrales, de entre los de mayor tamaño ( $>40\mu\text{m}$ ). Los datos de U-Pb obtenidos se graficaron en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg mostrando que hay un grupo coherente de 10 zircones concordantes, los

cuales fueron usados para obtener la edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de  $32.58 \pm 0.21$  Ma (MSWD=0.8, n=10) (Figura 2.13). Obsérvese que hay un número importante de circones con edades cercanas a 32.5 Ma.

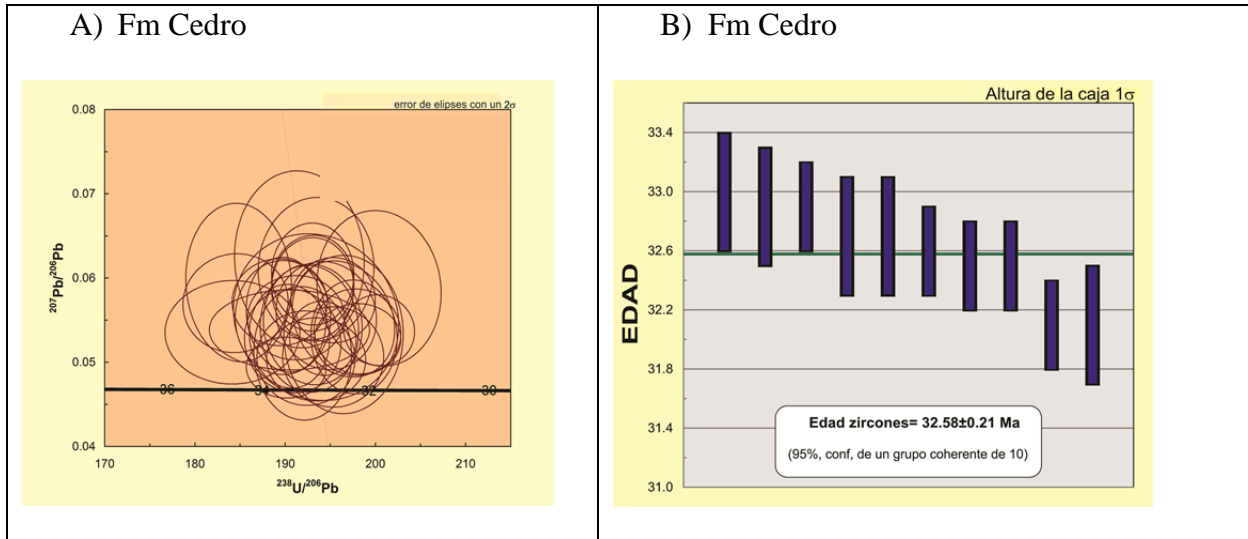


Figura 2.13.- Datos de U-Pb de zircons obtenidos con la técnica LA-ICP-MS de la muestra de andesita de la Formación Cedro. A) Gráfico de concordia tipo Tera-Wasserburg con los datos de la muestra CED-04. B) Gráfico de edad  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  media ponderada de la muestra CED-04. En rojo, los datos utilizados para obtener la edad de la muestra.

La muestra CED-05B también corresponde a una colada de andesita. De esa muestra se obtuvieron 103 zircons en el proceso de separación mineral, de los cuales se analizaron 39 zircons euhedrales de mayor tamaño ( $>40\mu\text{m}$ ). Los datos de U-Pb obtenidos se graficaron en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg mostrando que hay un grupo coherente de 15 zircons concordantes (Figura 2.14). La agrupación de análisis concordante se usó para obtener la edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de  $32.53 \pm 0.18$  Ma (MSWD=0.32, n=15). Obsérvese que la dispersión es muy grande y que hay edades de zircons desde los *ca* 32.5 hasta *ca*. 33.8 Ma, donde las edades varían de manera uniforme. Considerando esto y que en la muestra CED-04 hay un número significativo de los zircons más jóvenes que dan una edad

de  $32.6 \pm 0.2$  Ma, se considera 32.5 Ma como la edad más próxima al emplazamiento de las andesita de la Formación Cedro.

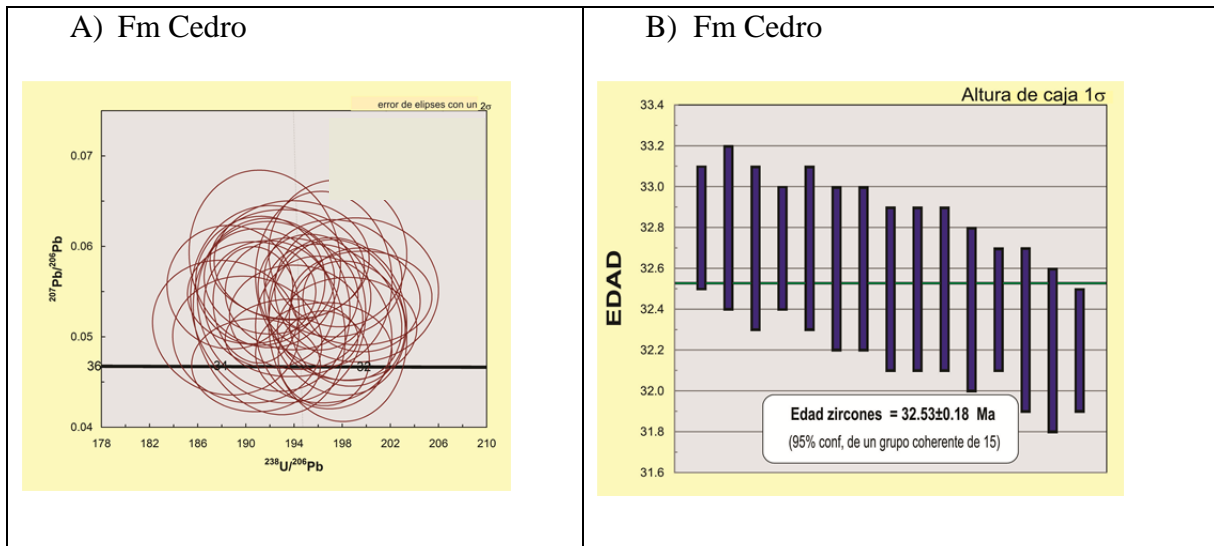


Figura 2.14.- Datos de U-Pb de zircons obtenidos con la técnica LA-ICP-MS de la muestra de andesita de la Formación Cedro. A) Gráfico de concordia tipo Tera-Wasserburg con los datos de la muestra CED-05B. B) Gráfico de edad  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  media ponderada de la muestra CED-05B. En rojo, los datos de edades más recientes utilizados para obtener la edad de cristalización.

### 2.3.3.4.- Diques (Formación Cedro)

De los diques que intrusionan a la Formación Calderones y que alimentan a los derrames de la Formación Cedro se analizó una muestra (JBCAL01), que fue tomada de un dique emplazado en la Formación Calderones, ubicado 1 km al poniente del poblado de Calderones, sobre el camino que va al cerro las Gachas. De esa muestra se analizaron 72 zircons, de los cuales se usaron 58 en el cálculo de la edad, los euhedrales y de mayor tamaño ( $>40\mu\text{m}$ ). Los datos de U-Pb obtenidos se graficaron en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg mostrando zircons concordantes con edades que van de *ca.* 32 a *ca.* 42 Ma (figura 2.15). Se interpretó que esta muestra contiene zircons heredados de todo el conjunto volcánico del distrito minero. Interpretamos también que la edad del emplazamiento de los diques es la edad de los zircons más jóvenes (muestra: JBCAL01):  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de  $32.20 \pm 0.91$  Ma

(MSWD=3.0, n=8) y corresponde también a la edad de las lavas de la Formación Cedro. En conjunto, se considera que la edad más probable de cristalización de los circones más jóvenes de diques y lavas es de ~32.5 Ma (Figura 2.15).

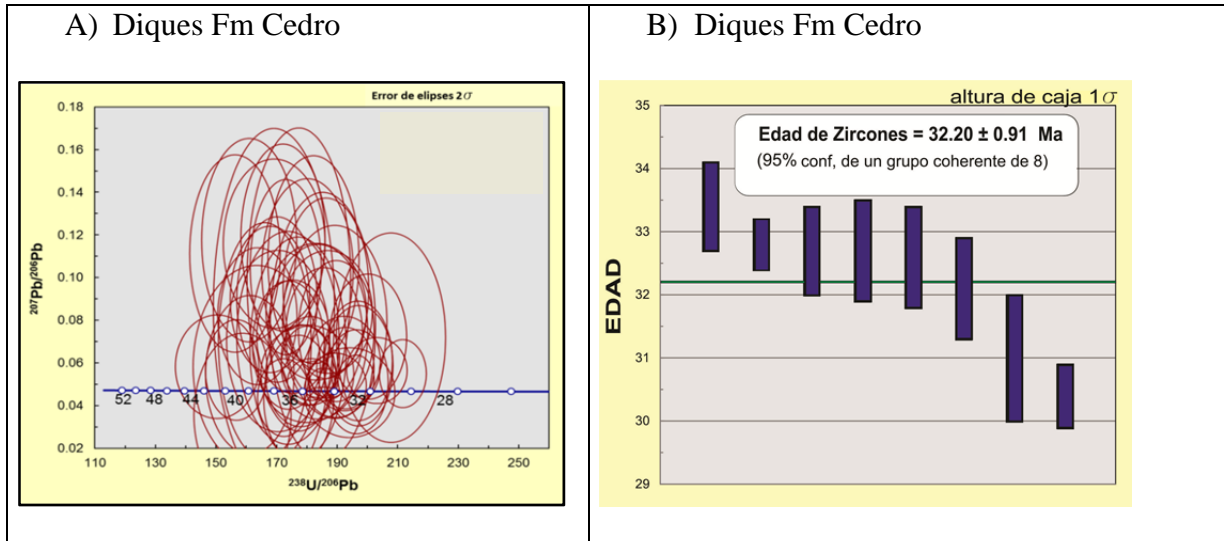


Figura 2.15.- Datos de U/Pb de zircones obtenidos con la técnica LA-ICP-MS de la muestra de un dique andesítico que alimentan a los derrames de la Formación Cedro. A) Gráfico de concordia tipo Tera-Wasserburg con los datos de la muestra JBCAL01. B) Gráfico de edad  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  de zircones de la muestra JBCAL01.

### 2.3.3.5.- Formación Chichíndaro

De la Formación Chichíndaro se analizó una muestra, la R\_CHI\_2 que corresponde a un derrame de Riolita tomada en el lado sur del domo Chichíndaro (fuera del Mapa). De esta muestra se obtuvieron 50 zircones en el proceso de separación mineral, de los cuales se analizaron 37 euhedrales entre los de mayor tamaño ( $>40\mu\text{m}$ ). Los datos de U/Pb obtenidos se graficaron en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg mostrando que hay un grupo de 10 zircones concordantes, los cuales fueron usados para obtener la edad:  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de  $30.36\pm 0.4$  Ma (MSWD = 7.2 n=10) (Figura 2.16), que se interpreta como edad de cristalización de zircones más próxima al emplazamiento de la riolita que formó al domo Chichíndaro.

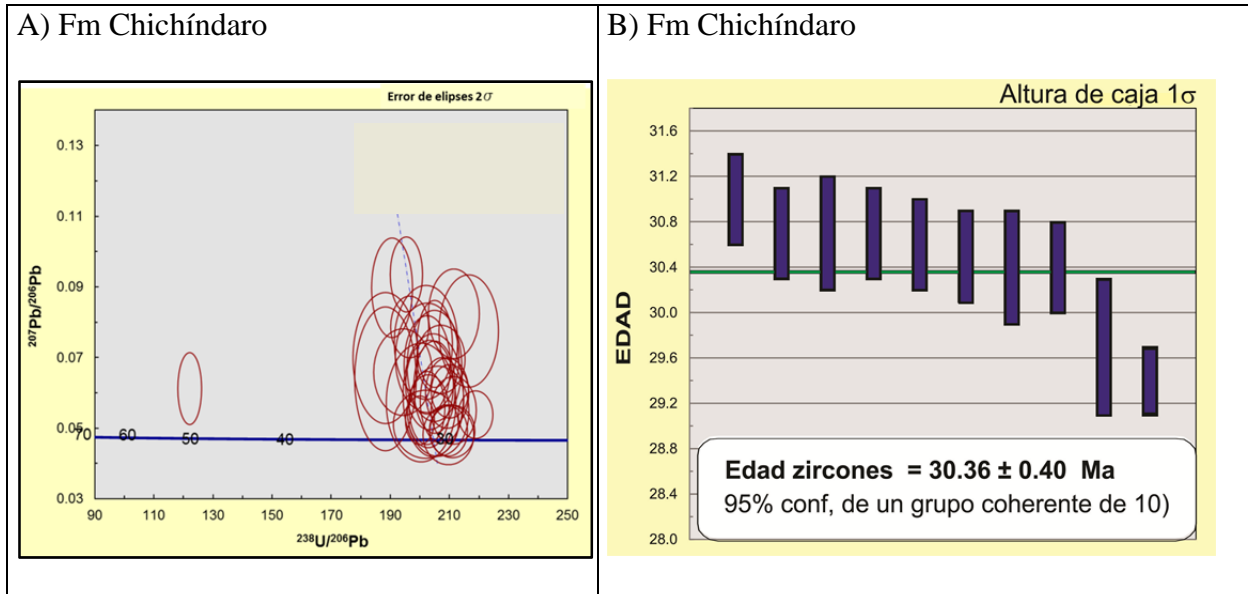


Figura 2.16.- Datos de U/Pb de zircons obtenidos con la técnica LA-ICP-MS de la muestra del domo de Chichíndaro A) Gráfico de concordia tipo Tera-Wasserburg con los datos de la muestra R\_CHI\_2. B) Gráfico de edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de la muestra R\_CHI\_2. En rojo, los datos utilizados para obtener la edad de la muestra.

### 2.3.3.6.- Ignimbrita Cañada La Virgen

La muestra M-01 pertenece a un depósito de ignimbrita que se puede correlacionar con la ignimbrita Cañada La Virgen, descrita por Nieto-Samaniego *et al.* (1996) aproximadamente 25 km en línea recta hacia el sureste del área de estudio. Se obtuvieron 110 zircons en el proceso de separación mineral, de los cuales se analizaron 39 zircons, entre los de mayor tamaño ( $>40\mu\text{m}$ ). Los datos de U-Pb se graficaron en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg mostrando que hay un grupo coherente de 10 zircons concordantes (Figura 2.17). El grupo concordante se usó para obtener una edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de  $29.46 \pm 0.19$  Ma (MSWD=1.0, n=10) que se interpreta como la edad de cristalización de zircons más próxima al emplazamiento de la ignimbrita Cañada La Virgen.

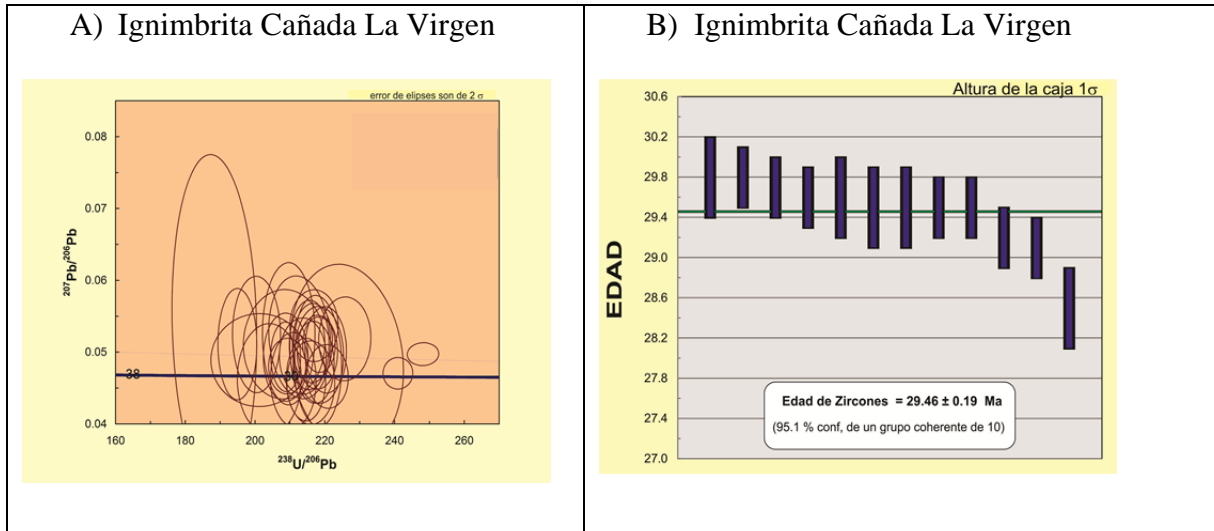


Figura 2.17.- Datos de U/Pb de zircones obtenidos con la técnica LA-ICP-MS de la muestra de ignimbrita Cañada La Virgen. A) Gráfico de concordia tipo Tera-Wasserburg con los datos de la muestra M-01. B) Gráfico de edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  media ponderada de la muestra M-01. En rojo se grafican los datos de edades más recientes utilizados para obtener la edad de cristalización.

Estratigrafía de la parte sur del Distrito Minero de Guanajuato, México.

**Columna Estratigrafica Regional**

Espesor (m)		1	2	3	4	5	Este Trabajo	Este Trabajo		
		Gross	Nieto Samaniego	Nieto Samaniego	Aranda	Cerca	UPb Zircones	Ar/Ar Feld K		
<b>CENOZOICO</b>	<b>MIOCENO</b>	5 - 10.0	1975	2005	1996	1997	2000			
		30					10.0±0.2 Ar/Ar 10.8±0.5 Ar/Ar 12.1±0.3 Ar/Ar			
		50					18.6±0.2 Ar/Ar			
		50		24.7±1.1 K/Ar	24.8 ±0.6 k/Ar Sanidino		23.0±0.6 K/Ar		Ign San Nicolas	
		50 - 70			28.6±0.7 k/Ar Sanidino			29.46 ±0.19	Ign Cañada La Virgen	
	<b>OLIGOCENO</b>	200		32 <sup>+1/-1</sup> Whole rock	30.1±0.8 sanidino K/Ar 30.8±0.8 sanidino K/Ar			30.36 ± 0.40		
							30.6±0.4 K/Ar ground mass 30.7±0.6 K/Ar whole rock	32.58 ± 0.21 32.53 ±0.18		
		400						32.20 ± 0.91		
		200-400						31.84 ± 0.27	31.33 <sup>+0.29/-0.29</sup>	
		200-400		37 <sup>+3/-3</sup> whole rock				33.4 <sup>+0.4/-0.5</sup>	33.53 ± 0.48	
		40								
		<b>EOCENO</b>	2000				49.3±1 whole rock, en lavas andesíticas K/Ar			
	<b>Mesozoico</b>	400								

- 1 Gross, W.H., 1975. New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, Mexico. *Economic Geology*, 70(7), 1175-1189.
- 2 Nieto-Samaniego, A.F.; Alaniz-Álvarez, S.A. y Camprubi-Cano A., 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen conmemorativo del centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, 57(3), p. 285-318.
- 3 Nieto-Samaniego, A.F.; Macías-Romo, Consuelo y Alaniz-Álvarez, S.A., 1996. Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 13, no. 1 p. 117-122.
- 4 Aranda-Gómez J.J. y McDowell F., 1998. Paleogene Extension in the Southern Basin and Range Province of México: Syndepositional Tilting of Eocene Red Beds and Oligocene Volcanic Rocks in the Guanajuato Mining District. *International Geological Review*, v 40. 116-134.
- 5 Cerca Martínez L.M. Aguirre Díaz, G. Lopez Martínez M. 2000. The Geology 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*. Vol 42. p. 131-151

Tabla 2.3- Resumen de edades obtenidas cercanas o dentro del Distrito Minero de Guanajuato.

En el Distrito Minero de Guanajuato y sus alrededores se han obtenido edades isotópicas, con las cuales se ha intentado ubicar en el tiempo geológico la columna estratigráfica de la región (Tabla 2.3).

En el trabajo de Aranda-Gómez *et al.* (1998) reportan una edad de 49.3±1 Ma en roca entera, por el método K/Ar, obtenida en horizontes de lavas andesíticas contenidas en el miembro inferior del conglomerado Guanajuato y Gross (1975) reporta una edad para la Formación Bufa de 37.0 ± 3 Ma, por el método K/Ar en roca entera.

En el presente estudio se fechó la Formación Bufa por dos métodos, U/Pb y Ar/Ar. En el primer método se utilizaron zircones y se obtuvo una edad de  $33.4^{+0.4}/_{-0.5}$  Ma para un grupo coherente de nueve zircones, aunque aparece una cantidad importante de zircones más jóvenes, cuyas edades van de *ca.* 32 Ma a *ca.* 30 Ma. Por otra parte se obtuvo por el método Ar/Ar en sanidino una edad de  $33.53 \pm 0.48$  Ma (Figuras 2.9 y 2.10), la cual se considera como la más significativa de las edades obtenidas para esta unidad, representando el momento de depósito de la Formación Bufa. Se desconoce el por qué la dispersión de las edades en los zircones.

En el presente trabajo también se fechó una ignimbrita de la Formación Calderones por los métodos U/Pb y Ar/Ar. Por el método U/Pb se obtuvo una edad de  $31.84 \pm 0.27$  utilizando zircones, por el método Ar/Ar se utilizó feldespatos K y se obtuvo una edad de  $31.33 \pm 0.29$  Ma. Tenemos una diferencia *ca.* 0.51 millones de años entre el depósito de las ignimbritas (método Ar/Ar) y la edad de cristalización de los zircones (U/Pb) contenidos en los magmas que producen dichas rocas.

Cerca *et al.* (2000) reportaron dos edades para la Formación Cedro, una realizada en roca entera y otra en matriz, ambas por el método K/Ar. La primera edad es de  $30.7 \pm 0.6$  Ma, y la segunda de  $30.6 \pm 0.4$  Ma. Son edades muy semejantes que no muestran variación entre materiales analizados. En este trabajo se están reportando dos edades U/Pb en zircones; también se fechó un dique andesítico alimentador de la Formación Cedro. Las edades obtenidas indican como la edad más joven de cristalización de zircones  $\sim 32.5$  Ma. Es importante señalar que la distribución de edades individuales en los zircones en las figuras 2.13B, 2.14B y 2.15, correspondientes a la Formación Cedro y sus diques alimentadores, no muestra un claro agrupamiento, sino que se aprecia una variación sistemática en las edades de los zircones, que van desde *ca.* 34 Ma hasta *ca.* 32 Ma, lo que hace pensar que, en conjunto,



representan el lapso de residencia del magma en la cámara magmática de donde provienen estas rocas. Quedando la edad K-Ar obtenida por Cerca *et al.* (2000) como la más probable edad de emplazamiento (enfriamiento) de las lavas.

Gross (1975) fechó la Formación Chichíndaro ( $32.0 \pm 1$  Ma) por el método K/Ar en roca entera. Posteriormente Nieto-Samaniego *et al.* (1996) fecharon la Formación Chichíndaro en  $30.1 \pm 0.8$  Ma y  $30.8 \pm 0.8$  Ma, ambas edades por el método K/Ar en sanidino. La diferencia en la edad reportada por estos autores es debida, muy probablemente, a que los fechamientos fueron realizados, en un caso en roca entera y otro en un separado de sanidino. La fecha en roca entera representa un promedio de las temperaturas de cierre de minerales, matriz y zonas alteradas de la roca, mientras que en el segundo caso, representa la temperatura de cierre de un solo mineral. La edad en sanidino la considero una mejor edad para el emplazamiento de estas rocas, ya que en ese caso se sabe que se está datando el paso del material a una sola temperatura de cierre, y por otra parte, el proceso de separación mineral evita o minimiza incorporar material alterado en el análisis. En este trabajo se fechó la Formación Chichíndaro por el método U/Pb, obteniendo  $30.36 \pm 0.40$ , siendo consistente con la mencionada edad de enfriamiento en sanidino.

En el trabajo de Nieto-Samaniego *et al.* (1996), fecharon a la Formación Cañada La Virgen en  $28.6 \pm 0.7$  por el método K/Ar en sanidino. En esta tesis se obtuvo una fecha U/Pb en  $29.46 \pm 0.19$ . En este caso, al igual que en los anteriores, la edad de cristalización en zircones es ligeramente más antigua que la edad K/Ar de emplazamiento.

### **3.- Geología Estructural**

#### **3.1.- Descripción de Estructuras**

En el área de estudio se observan 5 estructuras principales que constituyen contactos entre unidades estratigráficas. Cuatro de esas fallas tienen una orientación general N20-30°W (Falla del Cubo, La Leona, Veta Madre y Las Gachas, ver mapa geológico anexo), la quinta estructura, Falla El Carrizal, tiene una orientación N60-80°E (véase mapa geológico anexo).

**Falla El Cubo-Villalpando.** Esta estructura está formada por dos fallas principales, El Cubo y Villalpando, en conjunto tienen una longitud aproximada de 6 km dentro del área de estudio y presenta un rumbo N20-30°W con inclinaciones de 50-70° al SW. Ambas son fallas con desplazamiento de tipo normal. Los mejores afloramientos en el área se encuentran aproximadamente a un kilómetro al norte de la población de Rosa de Castilla, donde se pueden medir estrías en los planos de falla.

La falla El Cubo pone en contacto a la Formación Cedro que se encuentra al alto, con la Formación Calderones que está al bajo; en la porción norte la falla tiene la a Formación Calderones a ambos lados. En la porción sur aparecen rocas de la Formación Chichíndaro cubriendo a la falla, lo que permite inferir que la última actividad, o al menos la actividad más importante de la estructura en esa zona, fue previa al depósito de esa unidad.

La geometría de la falla muestra las siguientes características: en superficie tiene inclinaciones de 50° a 70° al W, en el bloque del alto se pueden medir datos de estratificación de la Formación Cedro, que en general, tienen inclinaciones de 10° a 15° al NE. De acuerdo con las secciones que se elaboraron, los desplazamientos del sistema El Cubo-Villalpando es del orden de 200 m.

**Falla Veta Madre.** Esta estructura es una falla con movimiento de tipo normal, tiene una longitud en el área de estudio de casi 7 km y se extiende hacia el norte del área cartografiada, por al menos una decena de kilómetros. Su rumbo promedio en el área estudiada es N10-30°W con inclinaciones de 40-60° al SW. Sus mejores afloramientos se encuentran cerca de la unidad minera de Las Torres (véase mapa geológico anexo), en la cual se observan espejos de falla y se pueden medir estrías en los planos. Se observa una brecha de falla formada por fragmentos de líticos del conglomerado Guanajuato y cementada por sílice.

La falla pone en contacto rocas del Conglomerado Guanajuato (bloque del bajo) con rocas volcánicas tanto de la Formación Calderones como de la Formación Cedro (bloque del alto). En la parte sur de la falla, en el bloque del bajo están las rocas de la Formación Bufa y en el bloque del alto rocas de la Formación Calderones (véase mapa geológico anexo).

La geometría de la falla tiene las siguientes características: Su bloque hundido es el SW. En la unidad minera Las Torres se le midió un desplazamiento al echado de 1400 m (Gross, 1975). En superficie se le midieron echados de entre 40° y 60°. En general, los bloques limitados por la falla se inclinan hacia el NE, con ángulos de inclinación de las capas, en el bloque del bajo, de entre 07° y 20° y en el bloque del alto, de entre 20° y 50°. Estas características sugieren una geometría lítrica. Existen fallas oblicuas a Veta Madre que se forman debido a la compensación que produce el movimiento entre bloques de Veta Madre. La última fase de actividad de la Veta Madre es posterior a la Formación Cedro y anterior a la Riolita Chichíndaro. Aunque no se puede descartar que haya tenido fases de actividad más antiguas, éstas no han sido documentadas, y no fue posible hacerlo durante el desarrollo de esta tesis.

**Falla La Leona.** Esta estructura es una falla con movimiento de tipo normal, tiene una longitud de 4 km dentro del área de estudio, sus mejores afloramientos se observan aproximadamente a 500 m al W de El Cubo. Se pueden observar brecha de falla cohesiva y no

cohesiva, con espesores de hasta 4 m. Los fragmentos de líticos van de 1 cm hasta 15 cm, y están dentro de una matriz de grano fino débilmente argilizada. La falla pone en contacto rocas de la Formación Bufa (bloque del bajo) con rocas de la Formación Calderones (bloque del alto). La geometría de la falla tiene las siguientes características: tiene un rumbo N20-30°W con inclinaciones de 40°-70° principalmente al NE y termina en una bifurcación (véase mapa geológico anexo).

A lo largo de secciones recorridas en el campo, con rumbo S70°W, se observó que al aproximarse a las fallas más grandes las inclinaciones de la estratificación o pseudoestratificación empiezan a aumentar (en la Formación Calderones), llegando hasta los 90° en el caso de la falla La Leona, lo que sugiere una geometría lítrica para esas estructuras (véase mapa geológico anexo). Los desplazamientos de la falla La Leona no fueron medidos, pero considerando el desnivel de los escarpes, los desplazamientos de las unidades litoestratigráficas y las inclinaciones de las capas, se le estima un desplazamiento al echado cercano a 200 m. Sus principales desplazamientos fueron anteriores a la Formación Cedro, ya que no se observa con claridad, que disloque a dicha unidad.

**Falla Las Gachas.** Esta estructura es una falla con movimiento de tipo normal que tiene una longitud de 7 km y un rumbo N20°-40°W con inclinaciones 70°-40° principalmente al SW. Sus mejores afloramientos se observan a un kilómetro al W de la población Calderones. La estructura pone en contacto rocas de la Formación Calderones y Formación Cedro, ubicadas en el bloque del alto, con rocas de la Formación Bufa, que aparecen en el bloque del bajo.

La geometría de la falla tienen las siguientes características: su echado varía de 50° a 70° al SW. Es de destacar que en el bloque hundido las capas buzán suavemente (*ca.* 10°) al SW, en dirección contraria al buzamiento que tienen las capas que en el resto de la sección (véase mapa geológico anexo) debido a la rotación que genera la falla. Los desplazamientos de la

estructura no fueron medidos, pero considerando el desnivel de los escarpes, los desplazamientos de las unidades litoestratigráficas y las inclinaciones de las capas, se le estima un desplazamiento al echado cercano a 350 m. La última fase de actividad fue posterior a la Formación Cedro.

**Falla El Carrizal.** Esta falla muestra desplazamiento de tipo normal, tiene una longitud aproximada de 6 km, con un rumbo N60-70°E e inclinaciones de 65-85° al SE. Hay pocos afloramientos que permitan observarla directamente, un lugar donde aflora es a 1.5 km del arroyo El Cedro (véase mapa geológico anexo). Solo en ese afloramiento se han podido medir estrías de falla y se observó que tiene una pequeña componente de movimiento lateral izquierdo. La falla pone en contacto rocas de la Formación Chichíndaro (bloque del alto) con rocas de Formación Bufa, Formación Calderones y Formación Cedro (bloque del bajo). La falla El carrizal trunca a todas las fallas de rumbo NW del DMG y forma parte del Graben de la Saucedá descrito por Nieto-Samaniego (1990). El desplazamiento de esta falla es muy difícil de estimar por la falta de marcadores estratigráficos, Nieto-Samaneigo (1990) lo consideró “mayor que 250 m”. En este trabajo, considerando el espesor de la Formación Chichíndaro y que esa unidad no aflora en el bloque del bajo, se infiere que posiblemente tenga entre 100 – 200 m de desplazamiento vertical. La última fase de actividad de la falla fue posterior a la Formación Chichíndaro.

Hay numerosos diques alimentadores de la Formación Cedro, los cuales tienen longitudes cercanas a 1.5 km, rumbo preferencial N60-70°E e inclinaciones entre 80-85° buzantes en su mayoría al SE, aunque los hay inclinados al NW. Los diques tienen anchos de entre 1 y 3 m y están emplazados en las Formaciones Bufa, Calderones y Cedro. Se los pueden observar en la zona del Cerro Coronel y en el camino que va hacia el cerro Las Gachas (véase mapa geológico anexo). La edad de los diques es cercana a 32 Ma, véase la Tabla 2.1.

Las fallas El Cubo-Villalpando y Veta Madre forman cada una de ellas un medio graben, la Falla La Leona es antitética a Falla del Cubo, y la falla Las Gachas es sintética a la falla Veta Madre. En conjunto, todas estas estructuras forman un sistema de semigrábenes con bloques rotados hacia el NE y sus desplazamientos principales ocurrieron antes del depósito de la Formación Chichíndaro. Por otra parte, la falla el Carrizal trunca al sistema de semigrábenes y sus desplazamientos principales fueron posteriores a la Formación Chichíndaro (véase mapa geológico y secciones A-A', B-B' y C-C' anexos).

Entre las fallas Veta Madre y La Leona aflora el conglomerado Guanajuato dentro de una estructura tipo horst. Allí aparecen fallas y vetas de dirección N20°-60°W con inclinaciones entre 80°-55° tanto al NE como al SW con una marcada componente lateral y que guardan una disposición semejante a estructuras Riedel, evidenciando una componente lateral derecha en esa porción de la falla Veta Madre.

### **3.2.- Análisis de lineamientos**

Se analizaron 18 fotografías aéreas escala 1:40,000 (INEGI-SINFA, 1994) (Figura 3.1). Se trazaron los lineamientos fotointerpretados como posibles trazas de fallas, diques, y contactos litológicos que son rectilíneos. Cada fotografía fue orientada al norte y posteriormente se midieron la orientación y la longitud de cada lineamiento. Las fotografías fueron agrupadas en un mosaico para posteriormente unir los lineamientos y obtener el patrón característico del área de trabajo. Enseguida se realizó la medición y conteo de los lineamientos fotointerpretados, con el objeto de identificar patrones de acuerdo a su orientación y cuantificar su longitud. Para cada fotografía analizada, se realizó un conteo de lineamientos a intervalos de 10 grados, después se calculó el porcentaje para cada intervalo de orientación. El

área de trabajo está dividida en dos sectores, el primero ubicado al Oeste de la Veta Madre y el segundo al Este de la misma estructura (Figura 3.1). Se pudo observar que en el primer sector (Oeste) existe una mayor cantidad de lineamientos con dirección este – oeste, mientras que en el segundo sector (Este), se observan lineamientos con direcciones  $N20^{\circ} - 30^{\circ}W$ . En la figura 3.2 y la Tabla 3.1 se observan dos grupos principales de lineamientos, uno tiene una dirección preferencial  $N50^{\circ} - 70^{\circ} E$ , y el otro  $N20^{\circ}-30^{\circ}W$ .

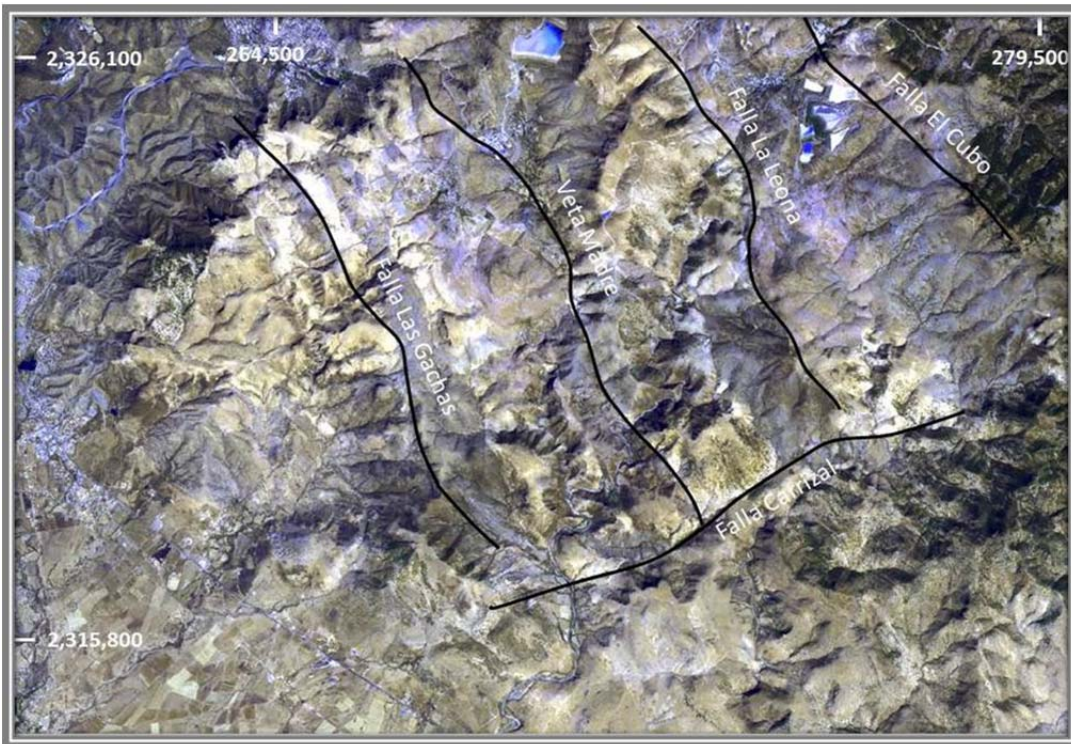


Figura 3.1 A Principales Fallas del área de estudio.



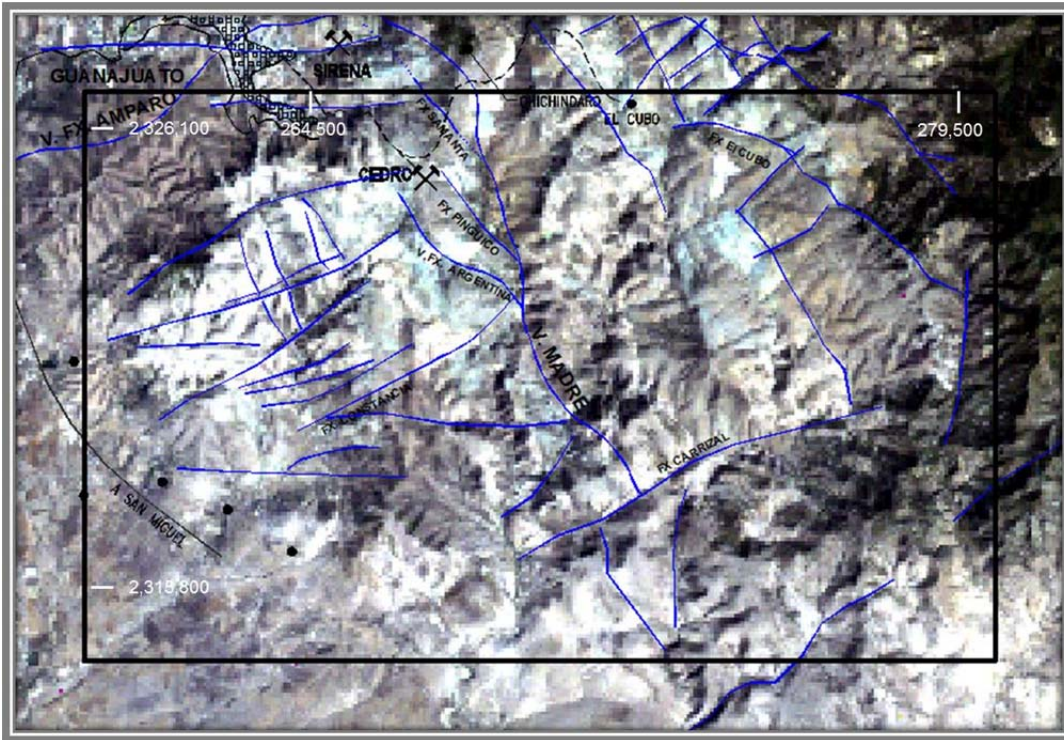


Figura 3.1.- A. Imagen de satélite Lansat. Se observan resaltados con líneas negras los principales lineamientos del área de trabajo. La imagen se dividió en los sectores Oeste, ubicado al poniente de Veta Madre y el sector Este ubicado al oriente de Veta Madre. B. Imagen de satélite Raster, con resalte de bandas 3 2 1. Se observan resaltados con líneas azules los principales lineamientos del área de trabajo.

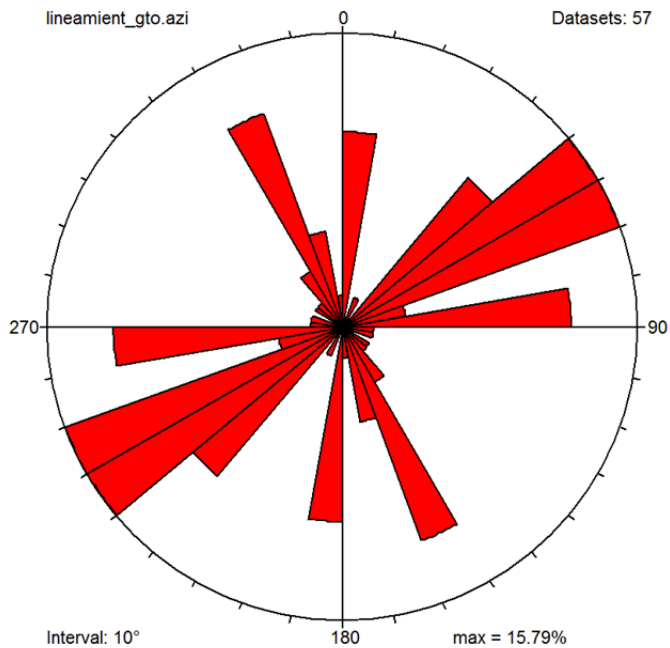


Figura 3.2.- Diagrama de roseta del total de lineamientos medidos (frecuencia de datos).



Azimut	Área Oeste		Área Este	
	Frecuencia (número)	Longitud (km)	Frecuencia (número)	Longitud (km)
0-10	4	11.767	2	7.762
11 -20				
21-30	1	2.009		
31-40				
41-50	3	8.525	3	8.733
51-60	5	16.603	4	4.808
61-70	7	26.796	2	2.725
71-80	1	1.93		
81-90	3	9.535	2	11.902
91-100	1	2.81		
251-260	1	1.48		
261-270	2	6.81		
271-280				
281-290			1	1.08
291-300				
301-310			1	2.23
311-320			1	4.85
321-330	3	5.217	2	6.716
331-340	3	4.241	2	4.015
341-350	2	1.49		
351-360	1	5.6		
<b>n</b>	<b>37</b>	<b>104.813</b>	<b>20</b>	<b>54.821</b>

Tabla 3.1.- Frecuencia y longitud de lineamientos por sector y orientación.

### **3.2.- Análisis datos estructurales medidos en el campo**

En el levantamiento cartográfico se identificaron estructuras susceptibles de ser medidas, se puso énfasis en las fallas que desarrollan “gauge” de falla, brechas de falla, que ponen en contacto distintas unidades litológicas y en aquellas que tienen planos de falla con estrías, además se midieron otros datos como estratificación y foliaciones de flujo de rocas volcánicas. En donde existían algunas de estas características se procedió a establecerlas

como estaciones estructurales de medición. Cada estación se localizó geográficamente con un GPS. El proceso de trabajo consistió en identificar las fallas y estructuras, registrar los datos de rumbo e inclinación de las estructuras, medir el pitch de la estría donde fuese posible, así como determinar el movimiento relativo de las fallas identificando indicadores cinemáticos.

Se organizaron los datos en una base de datos, capturando el número de estación, fecha, localidad, unidades litológicas, estratificación o foliación de flujo, en caso de tener esta información. Para las fallas se midió: azimut, inclinación y dirección de inclinación, en caso de tener datos de estrías, se midió el pitch y/o plunge, y se determinó el tipo de deslizamiento: derecho, izquierdo, normal o inverso.

### **3.2.1.- Estratificación**

La estratificación en el Conglomerado Guanajuato presenta rumbos preferenciales de N10°-20°E con inclinaciones tanto al SE como al NW, aunque es notable que la mayoría de los datos se encuentran inclinándose hacia el SE, las inclinaciones varían entre 10° y 40°. (Figura 3.4). La estratificación en la Formación Loseros muestra orientaciones de N20°-60°E con inclinaciones preferenciales hacia el SE, con 10 grados de inclinación (Figura 3.4). La pseudoestratificación en la Formación Bufa presenta rumbos preferenciales entre N10°W y N10°E, con inclinaciones de entre 10° y 20° grados. Los datos de estratificación de la Formación Calderones muestran rumbos preferenciales al N30°W con inclinaciones promedio de 25° al NE (Figura 3.4).

Es evidente que las orientaciones promedio del conglomerado Guanajuato y la Formación Calderones son sustancialmente distintas, en la primera los rumbos son hacia el NE y en la segunda hacia el NW. También llama la atención que los rumbos varían de NE a NW al subir

en la columna estratigráfica, de la Formación Losero hasta la Formación Calderones. Se interpreta lo anterior como el efecto de la acumulación progresiva en los desplazamientos de las fallas NW (El Cubo-Villalpando, La Leona, Veta Madre y Las Gachas). Considérese que al tener una orientación NW, paulatinamente imprimieron un buzamiento hacia el NE a las capas de toda la zona. De esta manera se documenta que la etapa principal de actividad de dichas estructuras ocurrió entre los ~33 y ~31 Ma.

### **3.2.2.- Fallas**

Durante el trabajo de campo se midieron tanto fallas asociadas y cercanas a las fallas mayores, como aquellas localizadas dentro de los bloques limitados por dichas fallas mayores. Los datos se organizaron de acuerdo a la unidad en la cual se encuentran encajonadas. Se elaboraron diagramas de contornos y diagramas de rosetas (Figura 3.4). En el conglomerado Guanajuato se midieron fallas que tienen rumbos N20°-50°W con inclinaciones de 70° a 80° al SW (Figura 3.4). En la Formación Bufa se observó el grupo más numeroso de fallas y presentan una mucho mayor dispersión en sus rumbos, siendo las concentraciones más importantes N20°-60°W y N60-80°E (Figura 3.4). En la Formación Calderones se observa que forman un grupo de rumbo N20°-40°W, con inclinaciones al NE y SW.

Dentro de la Formación Calderones se registraron la mayor cantidad de estrías medidas sobre los planos de falla (pitch). Se realizó un análisis de estrías en los cuales se analizó el rumbo preferencial de estos datos. [Elaborando](#) un diagrama de rosetas con las estrías de las fallas (líneas), se obtiene una mayor cantidad de datos en 230° y 40-50° de inclinación (*plunge*). Realizando un contorno de datos de las estrías, se obtiene un rumbo preferencia de 204°/49°, es decir que las estrías presentan una componente lateral. (Ver figura 3.3).

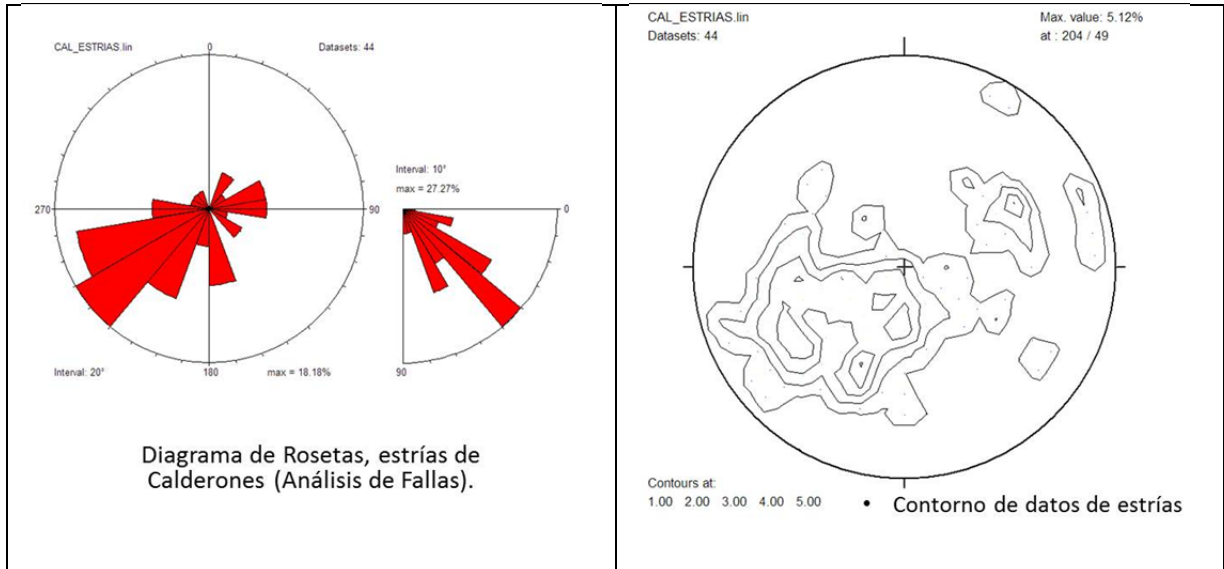
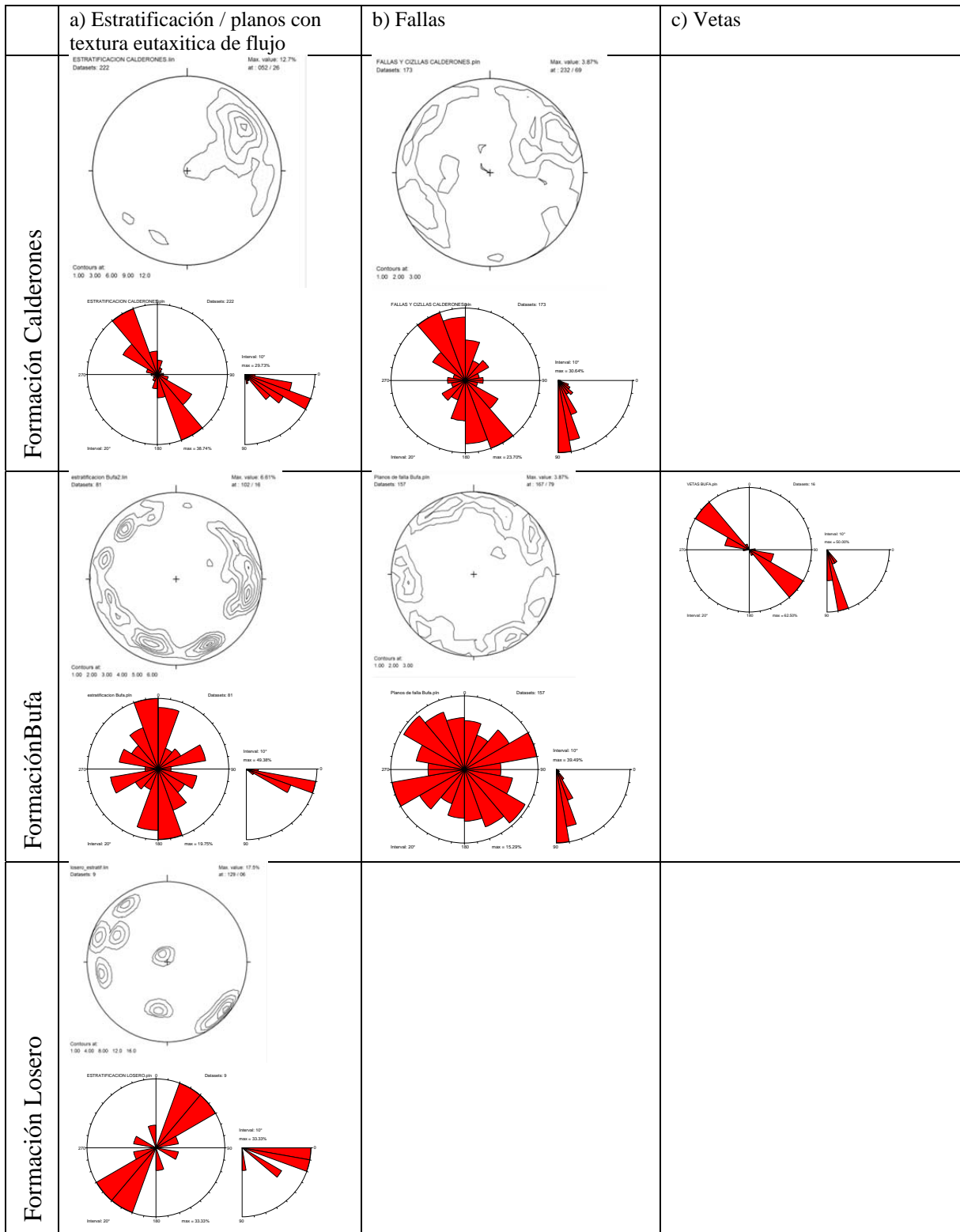


Figura 3.3. Roseta de datos y Contornos de datos de estrías de Fallas en la Formación Calderones. Se realizaron los graficos con el software TectonicsFP®.

### **3.2.3.- Vetas**

En algunas unidades se emplazan vetas de cuarzo que aprovechan fallas y fracturas preexistentes, por lo que los rumbos preferenciales de las vetas concuerdan con los datos de las fallas mayores ya descritas. Las Vetas encajonadas en el conglomerado Guanajuato tienen rumbos preferenciales N20° - 60°W con inclinaciones de 60° a 80° al NE. En la Formación Bufa, las vetas observadas tienen un rumbo N40°-50°W con inclinaciones de 70° al NE y SW.

Estratigrafía de la parte sur del Distrito Minero de Guanajuato, México.



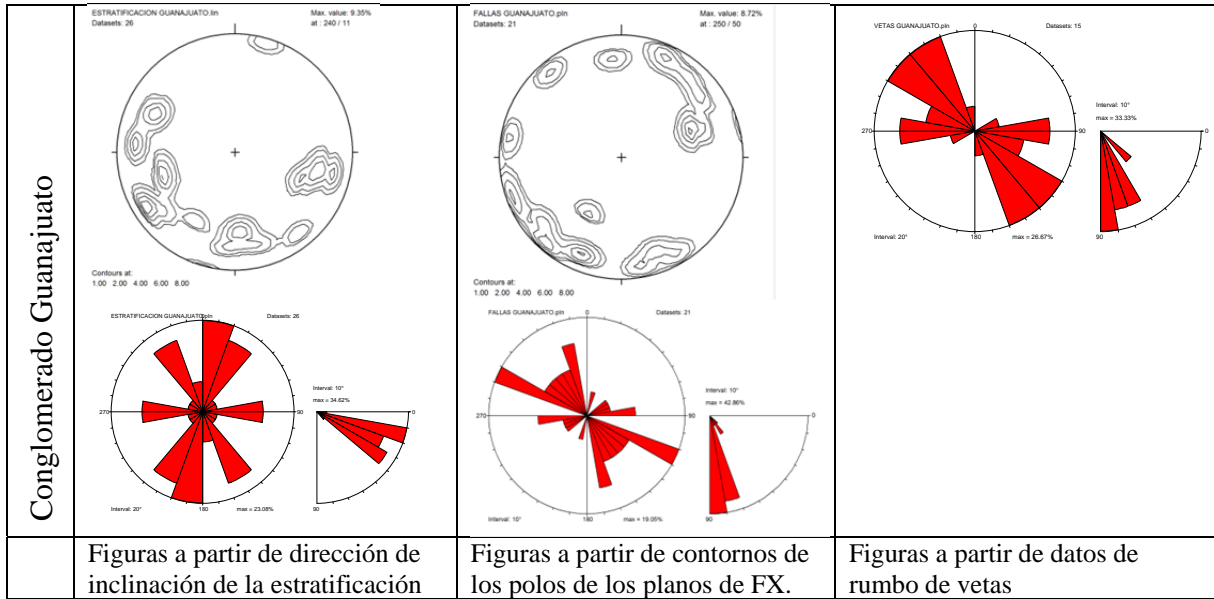


Figura 3.4. Contornos de datos estructurales. En la primer columna se grafican los datos de dirección de inclinación de la estratificación, la segunda columna proyecta los contornos de polos de los planos de Falla y la tercer columna, datos de rumbo de vetas. Se realizaron los contornos con el software TectonicsFP®.

### 3.3.- Retrodeformación de las capas

El estado deformado que actualmente se observa representa la suma de fases de deformación a través del tiempo, por lo que se ha tenido que rotar los datos de estratificación que se han tomado en campo para conocer su actitud en etapas previas. Se trabajó con superficies y planos que se han establecidos que en su depósito tuvieron tendencia horizontal, es el caso de los planos de foliación eutaxítica para el caso de los depósitos ignimbríticos.

Para obtener la posición original en la cual se depositó el Conglomerado Guanajuato, se procedió a quitar rotaciones de la más joven a la más antigua, es decir a los datos de foliación eutaxítica de la Formación Bufa y de estratificación de la Conglomerado Guanajuato se le restó la rotación (promedio) de la estratificación de la Formación Calderones. El resultado obtenido se observa en las figuras 3.7 a y b. Posteriormente hizo la misma operación restando a la estratificación del conglomerado Guanajuato (ya con la primera corrección) la rotación

promedio de la foliación eutaxítica de la Formación Bufa (ya con la primera corrección), el resultado final se observa en la figura 3.7 (c). Se puede apreciar que el conglomerado muestra datos de inclinación de sus capas muy dispersos y de muy bajo ángulo, menores a  $15^\circ$ , lo que apoya que las etapas principales de actividad de las fallas, que produjeron las mayores rotaciones, ocurrieron durante y/o posteriormente al depósito de las Formaciones Bufa y Calderones.

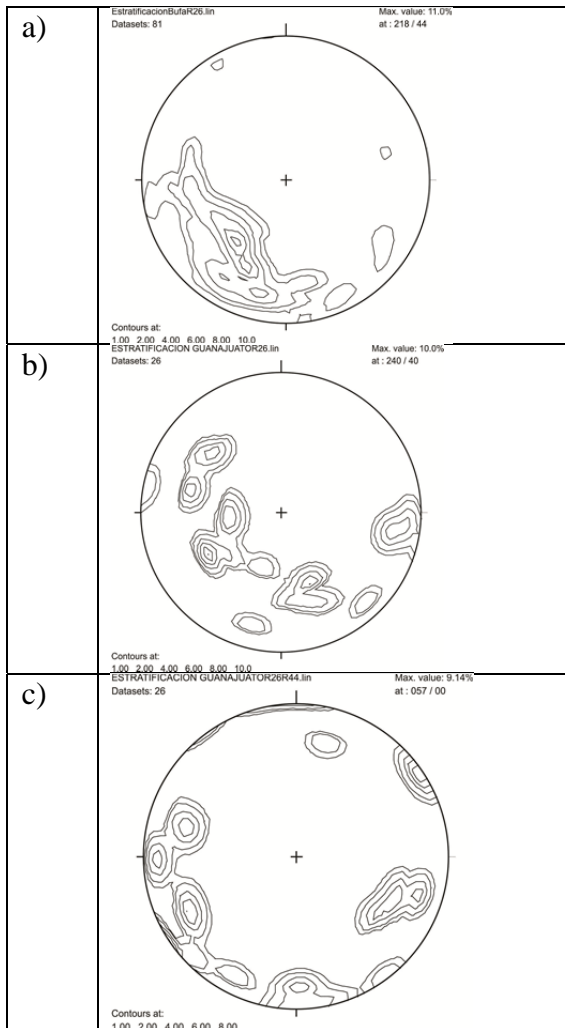


Figura 3.7.- Graficos de datos rotados de las capas de las Formaciones Conglomerado Guanajuato y Calderones, así como la foliación eutaxítica de la Formación Bufa. En a) se muestra la orientación de las foliaciones eutaxíticas de la Formación Bufa, y en b) del conglomerado Guanajuato, ambas rotadas al restaurar las capas de la Formación Calderones a la horizontal. En c) se muestra la orientación de las capas del conglomerado Guanajuato una vez restauradas a la horizontal las foliaciones mostradas en a). Los diagramas muestran contornos de polos en el hemisferio inferior de estereofalcillas equiareales.

La característica más prominente es que los bloques separados por las fallas se inclinan consistentemente hacia el nordeste, lo que sugiere la presencia de una zona de despegue a profundidad que permite dar una sola polaridad a las rotaciones.

#### **4. Discusión**

La actividad volcánica cenozoica del DMG se concentra principalmente a lo largo de *ca.* 3 millones de años, de los ~33.53 Ma a los ~30.8 Ma. Se considera que el conjunto de rocas que se asocian al centro volcánico del DMG son las Formaciones: Losero, Bufa, Calderones y Cedro ya que, además de ser muy próximas en sus edades de emplazamiento, su distribución espacial está restringida al distrito, lo cual sugiere fuertemente que son producto de un centro volcánico localizado en la parte sur del DMG. A diferencia de esas unidades, la riolita Chichíndaro, que aflora en el DMG, también lo hace fuera de él, prácticamente en toda la parte sur de la Mesa Central (Nieto-Samaniego, 2005); además, su emplazamiento es posterior a la actividad de las fallas del área de estudio, por lo que no parece estar asociada al centro volcánico del DMG. Por otra parte, también se excluyó a la ignimbrita Cañada La Virgen, ya que no aflora dentro del distrito minero, aparece siempre en sus márgenes y al parecer depositada lateralmente sobre un alto topográfico formado por las rocas del DMG; esto, junto con su presencia en zonas muy alejadas, indican que su fuente se ubicó fuera y, probablemente, muy alejada de la zona de estudio.

De las edades obtenidas en este trabajo, junto con las publicadas en la literatura, permiten inferir lo siguiente: entre las edades de cristalización de zircones y las edades de enfriamiento de las mismas unidades hay una diferencia de aproximadamente de medio millón de años, (Tablas 2.1 y 3.1). Esto se explica porque las edades U/Pb son la última cristalización



detectada en los zircones, la cual ocurrió aún en la cámara magmática, previa al emplazamiento de la roca en superficie. Es más probable que las unidades más jóvenes contengan zircones con edades más viejas, pues en el tiempo de su emplazamiento habrá más zircones (o partes de circones) con edades que registran todo el tiempo de permanencia de la cámara magmática. Si se observan en su conjunto las edades de los circones de todas las unidades fechadas, se puede ver que hay consistentemente un grupo de edades que va de ~33 a ~30 Ma, Interpretamos que esa es la edad aproximada de residencia de la cámara magmática que dio lugar al conjunto volcánico presente en el DMG. Es de resaltarse que las edades, áreas de afloramiento y facies observadas en las Formaciones Losero, Bufa, Calderones y Cedro son consistentes con la hipótesis de que provienen de una caldera, la cual fue propuesta por Randall *et al.* (1994) y Davis *et al.* (2009).

El fallamiento extensional está registrado regionalmente en las Sierras de Guanajuato y Codornices desde el Ypresiano (*ca.* 50 Ma) hasta, al menos, el Serravaliano (post 13.5 Ma). Dentro del DMG se pudieron documentar dos fases de extensión principales, una que produjo fallas de rumbo NW-SE que fueron activas contemporáneamente con el emplazamiento de las Formaciones Losero, Bufa y Calderones, y la segunda que produjo fallas y diques de rumbo NE-SW, que inició en un tiempo cercano al depósito de las lavas de la Formación Cedro y se extendió hasta después del emplazamiento de la Formación Chichíndaro; durante esta fase hubo reactivación de algunas fallas de dirección NW. Considerando lo anterior, se observa que el fallamiento extensional estuvo presente previa y posteriormente al depósito de las unidades asociadas al centro volcánico del DMG (Formaciones Losero, Bufa, Calderones y Cedro), las cuales representan la evolución y vaciado de una cámara magmática en un lapso aproximado de 2 Ma, correspondiente a la “caldera” propuesta por Randall *et al.* (1994) y Davis *et al.* (2009). Dicho evento volcánico ocurrió durante la formación de los medios

grábenes de El Cubo y Veta Madre, y el fallamiento extensional prosiguió, probablemente hasta por más de veinte millones de años, si se consideran las edades del fallamiento extensional en la Sierras de Guanajuato y la Mesa Central (Nieto-Samaneigo *et al.*, 1997; 2005). Esa es la razón que consideramos más probable para explicar la ausencia de una estructura elíptica en el DMG. Es más probable que la estructura caldéica que haya existido fuera del tipo “trap caldera”, que se haya formado al mismo tiempo que los semigrábenes El Cubo y Veta Madre, y que fuera borrada por las fases posteriores de fallamiento, las cuales se extendieron al menos hasta el Chatiano, ya que hay fallas que afectan a la Formación Chichíndaro de 30 Ma.

## **5. Conclusiones**

- En esta tesis se presenta un refinamiento de la columna estratigráfica del Distrito Minero de Guanajuato: Se documenta que el volcanismo explosivo inició con el depósito de la Formación Bufa, prosiguiendo con el depósito de la Formación Calderones, en la cual se reconocieron tres depósitos piroclásticos de composición andesítica y un miembro de lavas andesíticas. Yaciendo sobre ese conjunto de rocas aparece la Formación Cedro, formada principalmente de derrames de lava de composiciones máficas (andesita-basalto), con algunos depósitos piroclásticos subordinados.
- El conjunto de rocas volcánicas del DMG representa la evolución de una cámara magmática que fue emplazada alrededor de los 35 Ma y que se vació entre los ~33 y ~31 Ma.
- El fallamiento normal presente en el DMG predata y posdata al emplazamiento del conjunto volcánico del DMG, evidenciando que dicho fallamiento obedece a un régimen tectónico regional y no al volcanismo local.
- Las edades obtenidas muestran que la cámara magmática tuvo una residencia de aproximadamente 5 millones de años y el volcanismo ocurrió en un lapso cercano a 2 millones de años.
- La hipótesis caldérica propuesta previamente por otros autores es apoyada por los datos geocronológicos obtenidos en este trabajo. Las unidades asociadas a esa estructura son las Formaciones Losero, Bufa, Calderones y Cedro. La ausencia de estructuras semicirculares se explica por la formación de los semigrabenes El Cubo y Veta Madre contemporáneamente al depósito de las rocas volcánicas, y a que el fallamiento extensional continuó posteriormente borrando los rasgos semicirculares que pudieron haber existido.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Andersen, T., 2002, Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ : *Chemical Geology*, 192, 59-79.
- Aranda-Gómez, J.J., Dávila-Harris P., Vasallo-Morales L. F., Godchaux M., Bonnicksen B., Martínez-Reyes J., Aguirre-Díaz G. J., Ortega-Rivera M.A., 2012, Geology and tectonics of the southeastern portion of the Sierra de Guanajuato: *Field Guide 25, GSA*, 135-162.
- Aranda-Gómez, J.J., McDowell F., 1998, Paleogene Extension in the Southern Basin and Range Province of México: Syndepositional Tilting of Eocene Red Beds and Oligocene Volcanic Rocks in the Guanajuato Mining District: *International Geological Review*, 40(2), 116-134.
- Brent Dalrymple, G., Lanphere, M.A., 1971,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  technique of K Ar dating: a comparison with the conventional technique: *Earth and Planetary Science Letters*, 12 (3), 300-308.
- Buchanan, L.J., 1979, The Las Torres mine, Guanajuato, Mexico; ore controls of a fossil geothermal system: Golden, Colorado School of Mines, Ph.D. dissertation, 111 pp.
- Cerca-Martínez, L.M., Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., 2000, The geologic evolution of the southern sierra de Guanajuato, México: a Documented Example of the Transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42, 131-151.
- Davis, J.B., Clark, K., Randall, R., 2009, Relación de una caldera con la mineralización en el distrito minero de Guanajuato, *in* Clark, K.F., Salas Piza, G.A., Cubillas Estrada, R., *Geología Económica de México: México, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A. C., Servicio Geológico Mexicano*, 584-635.

- Echegoyen-Sánchez, J., Romero-Martínez, S., Velázquez-Silva, S., 1970, Geología y yacimientos minerales de la parte central del distrito minero de Guanajuato: Consejo de Recursos Naturales no Renovables (México), 75, 48 pp.
- Edwards, D.J., 1955, Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico: United States Geological Surveys, Profesional Paper 264-H, 153-185.
- Faure, G., Mensing, T.M., 2005, Isotopes: Principles and Applications: New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 897pp.
- Fries, C. Jr., Hibbard, C.W., Dunkle, D.H., 1955, Early Cenozoic vertebrates in the red conglomerate at Guanajuato, Mexico, Smithsonian Miscellaneous Collection, 123(7), 25 pp.
- Gross, W.H., 1975, New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, Mexico: Economic Geology, 70(7), 1175-1189.
- Guiza, R., 1949, Estudio geológico del distrito minero de Guanajuato: Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales (México), boletín 22, 75pp.
- Holmes, A., 1913, The age of the Earth: Harper & Brothers (Ed), London, 195 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1998a, Carta topográfica Aldama F14C53, Escala 1:50,000, México, D.F. Secretaria de Economía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1998b, Carta topográfica Guanajuato F14C43, Escala 1:50,000, México, D.F. Secretaria de Economía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Labarthe-Hernández, G., Jiménez-López, L.S., Tristán-González M., Mata-Segura J.L., Aguillón-Robles A., Almaguer-Tapia R., Barboza-Gudino J.R., 1995, Cartografía Geológica 1:25:000 de la Sierra de Guanajuato: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Informe no publicado. 185 pp.

- Lapierre, H., Ortiz, H.E., Abouchami, N.V., Monod, O., Coulon, C., Zimmermann, J.L., 1992, A crustal section of an intra-oceanic island arc: The Late Jurassic±Early Cretaceous Guanajuato magmatic sequence (central Mexico). *Earth and Planetary Sciences Letters*, 108, 61-77.
- Ludwing, K., 2004, Isoplot/Ex, ver. 3, A geochronological toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center, Publication 4.
- Mango, H., Zantop, H., Oreskes, N., 1991, A fluid inclusion and isotope study of the Rayas Ag-Au-Cu-Pb-Zn mine, Guanajuato, Mexico: *Economic Geology*, 86(7), 1554-1561.
- Martínez-Reyes, J., 1992, Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Cartas Geológicas y Mineras*, 8, 1 mapa con resumen de la geología.
- Martini, M., Mori, L., Solari, L., Centeno-García, E., 2011, Sandstone provenance of Arperos Basin (sierra de Guanajuato, central Mexico): Late Jurassic-Early Cretaceous back arc spreadings as the foundation of the Guerrero *terrane*: *The Journal of Geology* 119, 597-617.
- McDougall, M., Harrison, T., 1999, *Geochronology and thermochronology by the <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar method*: New York, Oxford University Press.
- Meave, E., Gómez, J., Nava-Arrieta, J., 1959, Estudio Geológico Minero de la zona “El Pinguico” Distrito Minero de Guanajuato, Guanajuato: Consejo de Recursos Naturales no Renovables (México), 52 pp.
- Mortensen, J.K., Hall, B.V., Bissig, T., Friedman, R.M., Danielson, T., Oliver, J., Rhys, D.A., Ross, K.V., 2008, U-Pb zircon age and Pb isotopic constrains on the age and origin of volcanogenic massive sulfide deposits in the Guerrero terrane of central Mexico, *in* 99th

Annual Meeting Cordilleran Section: Geological Society of America, Abstracts with Programs, 35, 61-62.

Nieto-Samaniego, Á.F., 1990, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato: *Revista del Instituto de Geología*, 9(2), 146-155.

Nieto-Samaniego, Á.F.; Macías-Romo, C., Alaniz-Álvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(1), 117-122.

Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Alvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., 1997, La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 14, p. 13-25.

Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz Alvarez, S. A., Camprubi Cano, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario, Tomo LVII, núm. 3, p. 285-317.

Ortiz-Hernández, L.E., Acevedo-Sandoval, O.A., Flores-Castro, K., 2003, Early Cretaceous intraplate seamounts from Guanajuato, central Mexico: geochemical and mineralogical data: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(1), 27-40.

Parrish, R., Noble, S., 2003, Zircon U-Th-Pb Geochronology by Isotope Dilution-Thermal Ionization Mass Spectrometry (ID TIMS): *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 183-213.

Petruk, W., Owens, D., 1974, Some Mineralogical Characteristics of the Silver Deposits in the Guanajuato Mining District, Mexico: *Economic Geology*, 69(7), 1078-1085.

Randall, J.A., Saldaña, A., Clark, K.F., 1994, Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, Mexico: *Economic Geology*, 89(8), 1722-1751.

- Sláma, J., Košler, J., Condon, D., Crowley, J., Gerdes, A., Hanchar, J., Horstwood, M., Morris, G., nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B.B., Tubrett, M., Whitehouse, M., 2008, Plesovice zircon- a new natural reference material for U-Pb and HF isotopic microanalysis: *chemical Geology*, 249(1-2),1-35.
- Solari, L., Gómez-Tuena, A., Bernal, J., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2009, U /Pb zircon geochronology by an integrated LA-ICPMS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy: *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(1), 5-18.
- Tanner, M., Solari, L., 2009. Fast reduction of U-Pb data using R. Goldschmidt Conference Abstracts: *Geochimica et Cosmochimica Acta*. p. 1313.
- Taylor, P.S., 1971, *Mineral Variations in silver veins of Guanajuato, Mexico*: Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, Ph.D. thesis, p. 139.
- Tera, F., Wasserburg, G., 1972, U-Th-Pb systematics in lunar highland samples from the Luna 20 and Apollo 16 missions: *Earth and Planetary Science Letters*, 17(1), 36-51.
- Wandke, A., Martinez, J., 1928, *The Guanajuato mining district, Guanajuato, Mexico*: *Economic Geology*, 23(1), 1-44.



## **ANEXOS**

### **ANEXO A1. Petrografía**

#### **MUESTRA: Los04 (alto) Depósito de pómez y cenizas.**

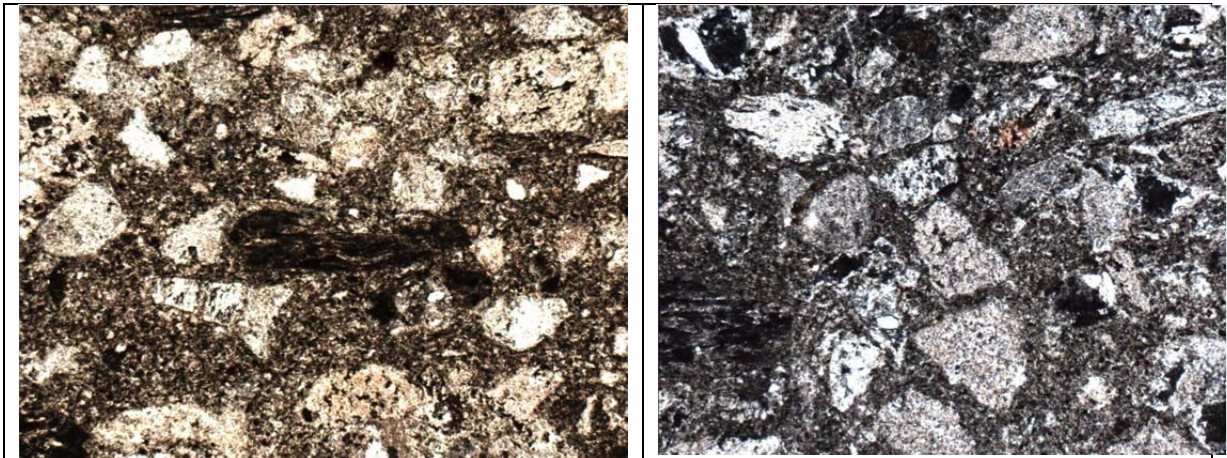
**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponden a la Formación Losero, la parte superior de estos depósitos en muestra de mano corresponden a horizontes de cristales y líticos angulosos a subangulosos, los cuales presentan una buena clasificación, muestran dos tipos de gradación, tanto inversa como normal, en estos horizontes existe un dominio de gradación inversa, (fragmentos gruesos a fragmentos finos).

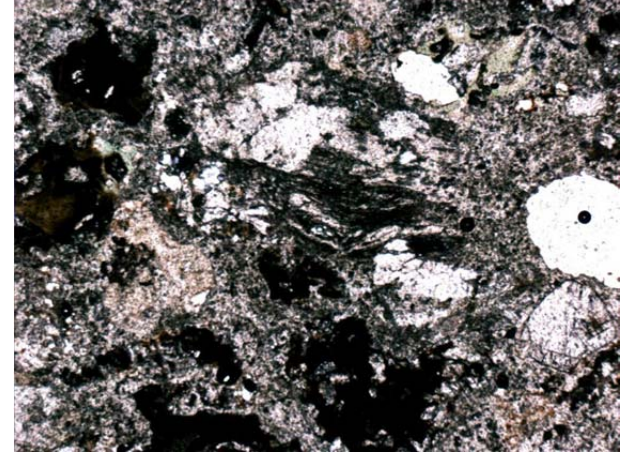
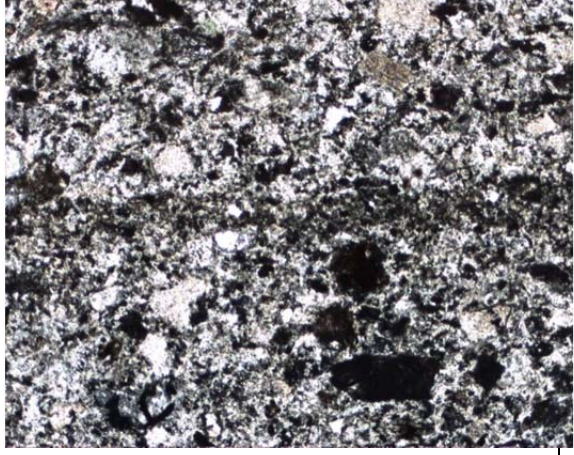

En estas muestras se observan tres horizontes, el horizonte de la cima y de la base, van de fragmentos gruesos a fragmentos finos (gradación inversa). El horizonte intermedio, es un horizonte con gradación normal, fragmentos finos a gruesos. En estos tres horizontes se observan fragmentos de líticos y fragmentos de cristales. Se observan plagioclasas, cuarzo, pirita y alguna pómez, con un soporte de material muy fino, menor al 1 mm. Los fragmentos mayores llegan al límite de las cenizas de grano grueso (0.032mm a 2mm). La parte fina, se encuentra en el límite de las cenizas de grano fino (menores a 0.032mm).

La matriz presenta un color verdoso y se encuentra dentro del rango de las cenizas de grano fino.

#### **DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observan líticos angulosos a subangulosos, así como cristales euhedrales de cuarzo, plagioclasas alteradas y ferro magnesianos singenéticos al depósito. Se presentan relaciones clasto - clasto así como un soporte de matriz en otros sitios. En general se aprecia una buena clasificación, una gradación normal, de gruesos a finos, aunque existen algunos horizontes que presentan una gradación inversa. El tamaño de los cristales en promedio se encuentra en el rango de las cenizas de grano grueso. La matriz se encuentra en el rango de las cenizas de grano fino. Se observa la matriz y algunos de los cristales de plagioclasa alterados a sericita.



	
	200µm 
<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. En ambas fotomicrografías se observa fragmentos de pómez en contacto con otros cristales de cuarzo y plagioclasas alteradas. Se aprecia una matriz de grano fino. Se observan cristales angulosos a subangulosos.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz transmitida. En la fotomicrografía superior se observa un mosaico de cristales de cuarzos y plagioclasas alteradas con un soporte de matriz, los fragmentos de los cristales son angulosos a subangulosos. La fotomicrografía inferior presenta una gradación de fragmentos de menor tamaño a fragmentos de mayor tamaño. Con una buena cantidad de ferro magnesianos, principalmente pirita singenética. Hacia la parte inferior de la fotomicrografía se aprecian los cristales de mayor tamaño.</p>

**Clasificación: Depósitos de pómez y cenizas.**



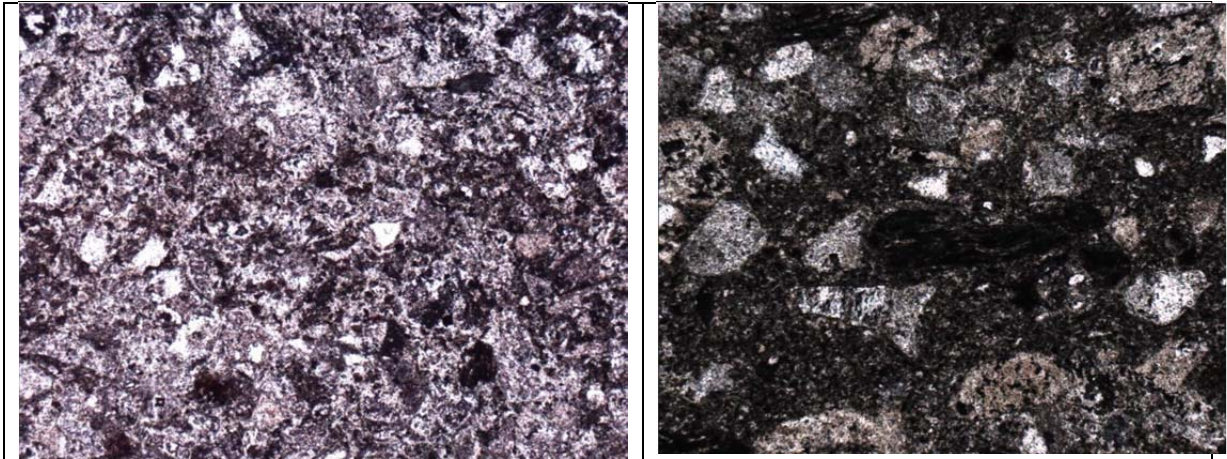
**MUESTRA: Los04 (bajo) Depósito de pómez y cenizas.**

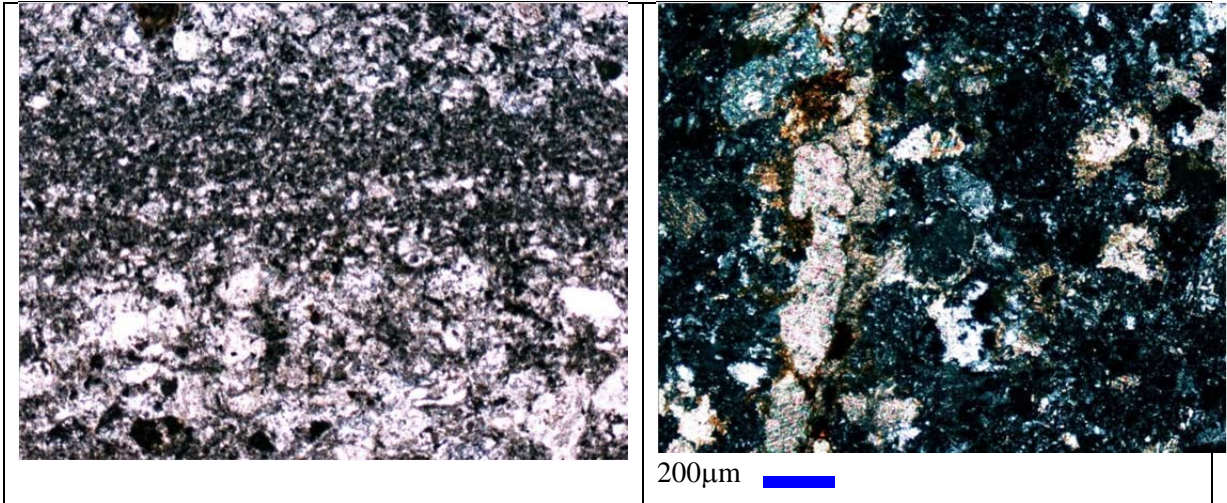
**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponden a la Formación Losero, se pueden apreciar diferentes horizontes que forman este paquete de depósitos piroclásticos. Se observan horizontes con una gradación normal y gradación inversa, los dominios son de una gradación normal, ésta se presenta a la base de la muestra, hacia la cima, se puede apreciar un cambio en el depósito, se aprecia una gradación inversa.

Los horizontes están compuestos por un conjunto de líticos, cristales de plagioclasa que presentan una moderada alteración argílica, cristales de cuarzo, pirita. El tamaño de los cristales no exceden los 2 mm. Se observa un soporte de matriz, la cual se encuentra en el rango de las cenizas de grano fino. El color de la matriz es verdoso, se observa una oxidación de los ferromagnesianos.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observan líticos angulosos a subangulosos, así como cristales euhedrales de cuarzo, plagioclasas alteradas y ferro magnesianos singenéticos al depósito. Se presentan relaciones clasto-clasto así como un soporte de matriz en la mayoría de los horizontes. En general se aprecia una buena clasificación, una gradación normal, de gruesos a la base a finos a la cima, aunque existen algunos horizontes que presentan una gradación inversa. El tamaño de los cristales en promedio se encuentra en el rango de las cenizas de grano grueso. La matriz se encuentra en el rango de las cenizas de grano fino. Se observa la matriz y algunos de los cristales de plagioclasa alterados a sericita.





Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se observa en la fotomicrografía superior la relación de los fragmentos soportados por una matriz fina, del tamaño de las cenizas de grano fino. En la fotomicrografía inferior, se aprecia la estratificación de fragmentos de grano fino a fragmentos de grano grueso. Soportados por una matriz de vidrio volcánico. Se aprecian cristales de cuarzo, plagioclasas alteradas y ferromagnesianos.

Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz polarizada. En la fotomicrografía superior se observa un mosaico de cristales de cuarzos y plagioclasas alteradas con un soporte de matriz, los fragmentos de los cristales son angulosos a subangulosos, algunos son subredondeados. Se llega a apreciar pómez. La fotomicrografía inferior presenta un mosaico de cristales subredondeados a subangulosos de plagioclasa alteradas y cuarzos principalmente, soportados por una matriz de grano fino. En la parte izquierda se aprecia una vetilla de calcita que cruza a toda la fotomicrografía.

**Clasificación: Depósitos de pómez y cenizas.**

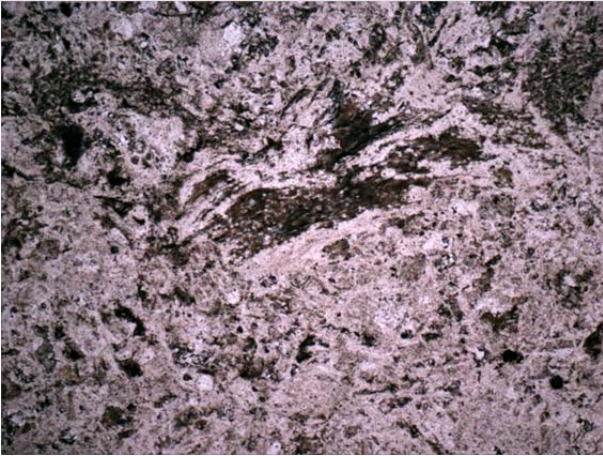
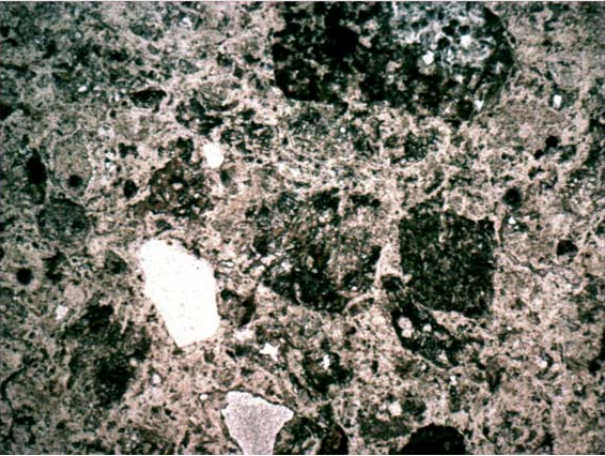


**MUESTRA: BUF011803A (Parte superior de la muestra) Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Este conjunto de muestras corresponde a la Formación Bufo. En muestra de mano se observa de color café claro con una débil alteración argílica, se aprecian fenocristales de cuarzo, feldespato potásico y algunos fragmentos de pómez. Se observan horizontes de pseudo estratificación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Es una roca heterogénea formada por fragmentos de cristales y rocas. Se observan fragmentos de cuarzo, plagioclasas y líticos de formas angulosas a subangulosas. Se encuentra mal clasificada. Tiene una matriz afanítica a criptocristalina. También se aprecia material juvenil, las pómez tienen una textura de flamas.

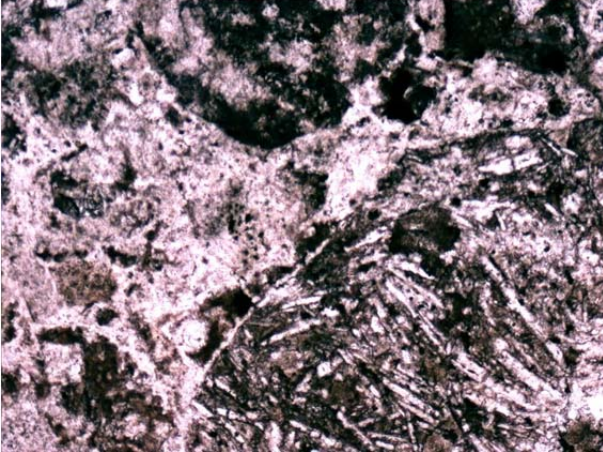
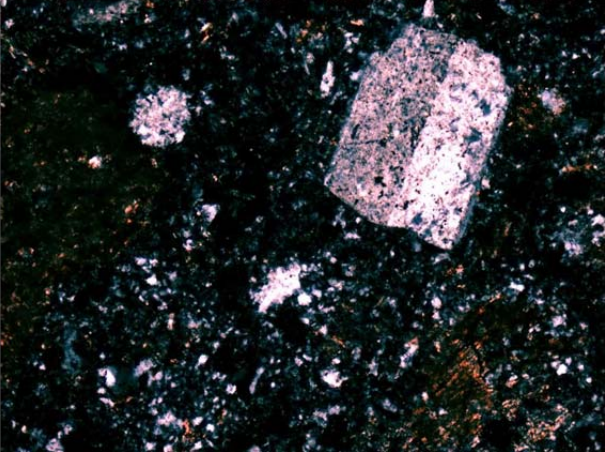


	 <p>200 <math>\mu</math>m</p>
<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 5X, con luz transmitida. Se aprecian pómez con texturas de flamas embebidas en una matriz vítrea.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 5X, con luz transmitida. Se aprecia un mosaico de líticos, cristales de cuarzo y pequeños cristales de plagioclasa, soportados en una matriz vítrea.</p>

**MUESTRA: BUF011803B (Parte inferior de la muestra) Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Este conjunto de muestras corresponde a la Formación Bufa. En muestra de mano se observa de color café claro con una débil alteración argílica, se aprecian fenocristales de cuarzo, feldespato potásico y algunos fragmentos de pómez. Se observan horizontes de pseudo estratificación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Es una roca heterogénea formada por fragmentos de cristales y rocas. Se observan fragmentos de cuarzo, plagioclasas y líticos de formas angulosas a subangulosas, los tamaños son muy variables. Se encuentra mal clasificada. Tiene una matriz afanítica a criptocristalina formada por micro cristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico (sanidino). También se aprecia material juvenil, las pómez tienen una textura de flamas. En algunas zonas como alteración se puede apreciar calcita, rellenando intersticios. Se aprecian líticos subredondeados de andesitas como posibles xenocristales.

	
100 μm 	100 μm 
Fotomicrografía tomada con objetivo 10x, con luz transmitida. Se aprecian líticos subredondeados de andesitas como causa de posibles xenocristales, feldespato potásico alterados a sericita y la matriz compuesta por microcristales de plagioclasa, cuarzo y vidrio volcánico.	Fotomicrografía tomada con objetivo 10x, con luz polarizada. Se aprecia fenocristales de Sandino con macla Carlsbad, soportada por una matriz de grano fino y calcita rellenando intersticios.

**Clasificación: Ignimbrita con un débil soldamiento.**


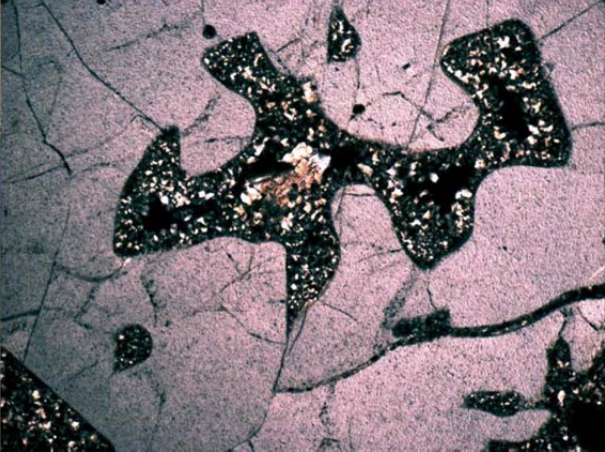


**MUESTRA: BUF021803 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** En muestra de mano se observa de color rosado, con una gran cantidad de líticos que van de mm hasta 3 cm. Los líticos son subangulosos a subredondeados. También se observan cristales de plagioclasa y cuarzo, se encuentran soportados por una matriz de grano fino. La roca presenta un moderado soldamiento. Presenta una mala clasificación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Es una roca heterogénea formada por fragmentos de cristales y líticos. Los fragmentos de los líticos se encuentran en el rango de lapilli. También se aprecian fragmentos juveniles, así como pómez con texturas de flamas, también se aprecian cristales de cuarzo y plagioclasa soportados por una matriz afanítica del tamaño de cenizas finas. Se observa una mala clasificación. Se observan cristales de cuarzo carcomidos con generación de caries, posibles pseudomorfos de cuarzo beta parcialmente reabsorbidos.

 <p>100 μm</p>	 <p>100 μm</p>
<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 10x, con luz transmitida. Se aprecian pómez con texturas de flamas, no se aprecia soldamiento. Se observan cristales de cuarzo y plagioclasa, soportados por una matriz afanítica.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 10x, con luz polarizada. Se aprecia fenocristales de cuarzo carcomidos con una generación de caries en la parte central de los cristales rellena de microcristales de plagioclasa y cuarzo; son posibles pseudomorfos de cuarzo beta parcialmente reabsorbidos.</p>

**Clasificación: Depósito de pómez y ceniza.**

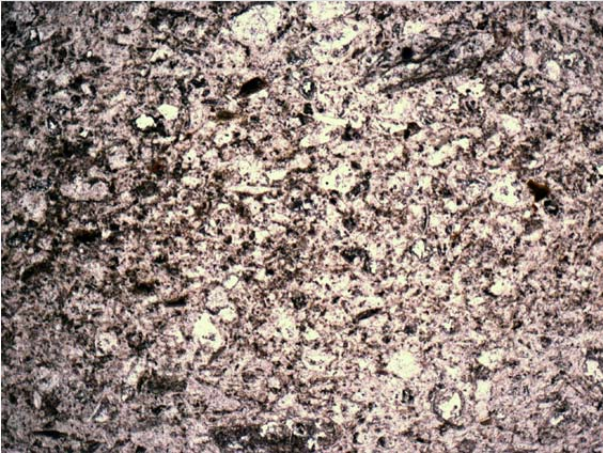
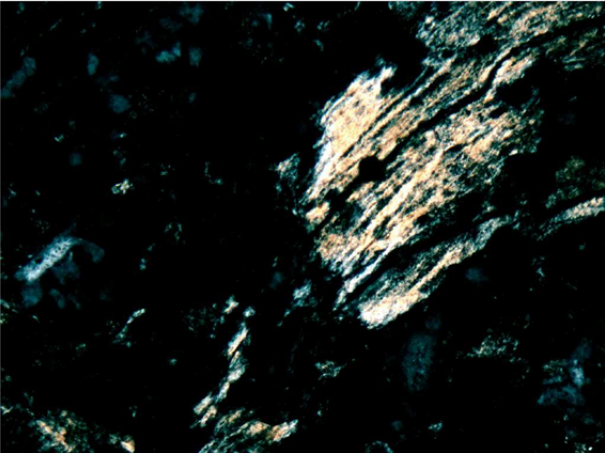


**MUESTRA: BUF031803 Depósito de pómez y ceniza.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** En muestra de mano se observa de color verde claro con presencia de líticos de diferentes coloraciones, cafés oscuros, cafés claro y líticos de tonos verdosos. También se aprecia cristales de color blanco, se observan alterados a posible sericita. Se aprecia bien clasificados, se observan horizontes que van de cenizas de grano fino a fragmentos del tamaño de cenizas de grano grueso. Presenta una gradación normal. La muestra tiene un moderado soldamiento.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

En esta muestra se aprecia una buena clasificación, presenta una gradación normal. Se aprecian cristales de cuarzo, plagioclasa, pómez con texturas de flamas y como accesorios se aprecian biotita y magnetita, en intersticios se encuentran sericita y calcita.

En la cima de la muestra se aprecian microlitos de cuarzo, plagioclasas y pómez, están en contacto cristal – cristal. Se observan líticos de diferentes tamaños, subredondeados a subangulosos y parcialmente reemplazados por sericita.

	
<p>200 μm </p>	<p>50 μm </p>
<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 5x, con luz transmitida. Es la cima de la muestra, se aprecia un conjunto de microcristales de cuarzo, plagioclasa y pómez. Presenta una buena clasificación y los cristales se encuentran en contacto cristal – cristal.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 20x, con luz polarizada. Se aprecia pómez alterada, tiene una agilización moderada, se esta alterando a sericita. Se encuentra embebida en una matriz de vidrio volcánico.</p>

**Clasificación: Depósito de pómez y ceniza.**





**MUESTRA: BUF041903 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** En muestra de mano se observa de color rojizo, se observan pómez colapsadas con presencia de cristales euhedrales de plagioclasa y cuarzo. Se observa una moderada clasificación. Presenta un moderado soldamiento y una alineación de pómez.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

En esta muestra se observan texturas de flujo y cristales euhedrales a subeuhedrales de cuarzo, Sanidino, biotita y ferro magnesianos. Las texturas de la pómez muestran un moderado soldamiento. Los cristales de cuarzo euhedrales presentan caries y golfos, al parecer son cristales parcialmente reabsorbidos. Se aprecia fragmentos de material juvenil compuesto por pómez con texturas de flamas.

	
<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 5x, con luz transmitida. Se observa cuarzo con caries, rellenas por microcristales de plagioclasa y cuarzo. Son cristales parcialmente reabsorbidos. Se encuentra embebido en una matriz de vidrio volcánico. Presenta magnetita y pirita como minerales accesorios.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz transmitida. Se aprecian biotitas parcialmente reemplazadas a óxidos de hierro. Se aprecian sanidino alterados y cuarzos subeuhedrales, todos, en una matriz de vidrio volcánico.</p>

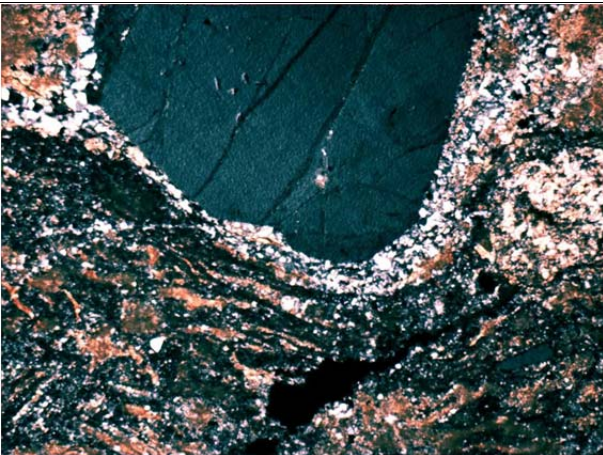
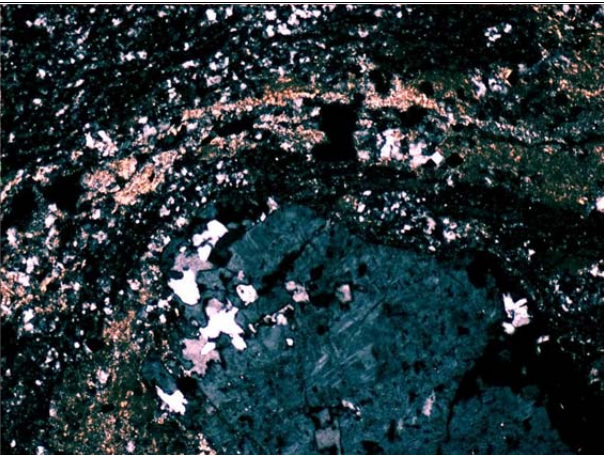

**Clasificación: Ignimbrita con moderado soldamiento.**

**MUESTRA: BUF051903 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** En muestra de mano se observa de color café claro, con pómez colapsadas con texturas de flamas, fragmentos de líticos del tamaño de lapilli (64 – 2mm), cristales euhedrales de cuarzo y plagioclasas. Se observa moderadamente soldada y tiene una mala clasificación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se presentan fragmentos de líticos y cristales euhedrales a subeuhedrales. Presenta una mala clasificación, una muestra muy heterogénea con respecto al tamaño de sus componentes. La matriz esta formada principalmente por vidrio volcánico con texturas de flujo, la matriz presenta una intensa alteración argílica. En esta muestra se observan cristales euhedrales a subeuhedrales de cuarzo, sanidino, biotita, plagioclasa y ferro magnesianos. Los cristales de cuarzo euhedrales presentan caries y golfos, al parecer son cristales parcialmente reabsorbidos. Se aprecia fragmentos de material juvenil compuesto por pómez con texturas de flamas. Las texturas de la pómez muestran un moderado soldamiento.

	 200 µm 
<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 5x, con luz polarizada. Se observa un cristal de cuarzo subeuhedral. Se encuentran en una matriz de vidrio volcánico y halos formando “coronas” de plagioclasa y cuarzo. Se observan trazas de ferro magnesianos.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz polarizada. Se aprecia sanidino embebido en una matriz con texturas de flujo, la matriz presenta una alteración a sericita. En los bordes de los cristales se aprecian microcristales de plagioclasas y cuarzo. También se aprecian ferro magnesianos como accesorios.</p>

**Clasificación: Ignimbrita con moderado soldamiento.**

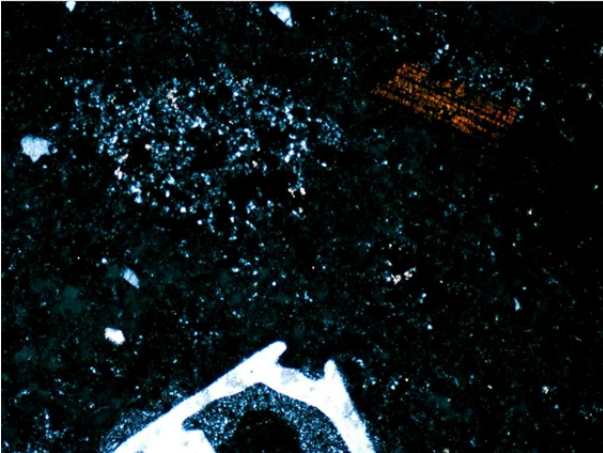
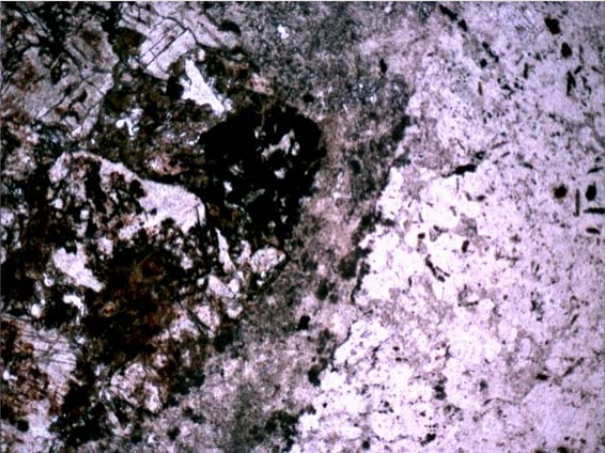



**MUESTRA: BUF062203 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** En muestra de mano se observa de color café claro, con líticos de otros eventos de ignimbritas, los fragmentos de los líticos no pasan los 3 mm. Se aprecian cristales subeuhedrales de cuarzo y plagioclasas alteradas. Se observan pómez con una débil alineación. Se observa moderadamente soldada y una regular clasificación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se presentan fragmentos de líticos de otros eventos ignimbriticos así como de líticos accidentales compuestos por andesitas. Se aprecian cristales euhedrales a subeuhedrales de cuarzo, sanidino, plagioclasa y biotita, también se aprecia material juvenil compuesto por pómez con texturas de flamas. Estos cristales se encuentran embebidos en una matriz de grano fino. La matriz presenta una débil alteración argílica. Los cristales de cuarzo presentan golfos y caries, rellenos por microcristales de cuarzo y plagioclasas. Presenta una mala clasificación, una muestra muy heterogénea con respecto al tamaño de sus componentes. Las texturas de la pómez muestran un moderado soldamiento.

	 <p>200 μm </p>
<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 5x, con luz polarizada. Se observa un cristal de cuarzo euhedral de cuarzo parcialmente reabsorbido, presentan golfos y caries. Se observa en la parte superior un cristal de biotita y en la parte central un posible cristal de sanidino alterado a sericita. Embebidos en una matriz de vidrio volcánico.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz transmitida. Se aprecia a la izquierda un fragmento accidental, compuesto por un lítico de andesita, podría representar una fuente de xenocristales. Se encuentra soportado en una matriz de grano fino moderadamente Albareda a sericita. También se aprecian ferro magnesianos como accesorios.</p>



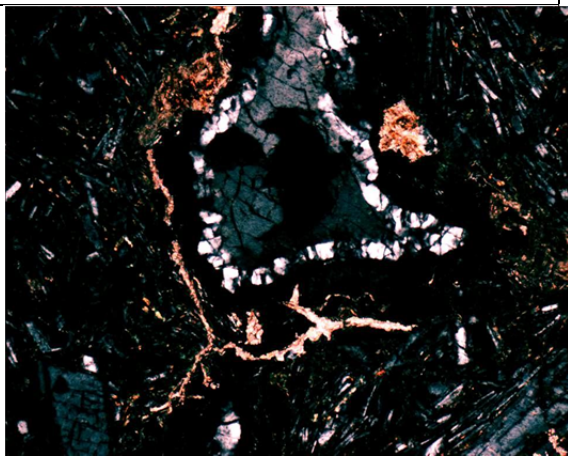

**Clasificación: Ignimbrita con moderado soldamiento.**

**MUESTRA: Ced06 Andesita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta muestra corresponde a depósitos de coladas andesíticas denominadas Carbonera. En muestra de mano se observa una roca de color gris claro. Se aprecian algunos fenocristales de plagioclasas, algunos sanos y otros con halos propilitizados y cloritizados, se encuentran soportados por una matriz de grano fino.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa principalmente plagioclasas  $An_{30}-An_{50}$  (andesina), tanto en la matriz como fenocristales. Se observan texturas intergranulares, compuesta por microcristales de andesina en la matriz e intersticialmente se presentan algunos rellenos de calcita. Se observan cristales de hornblenda reabsorbidos y alterados.

	
	 <p>200 µm </p>
<p>Fotomicrografías tomadas con objetivo 5x, con luz polarizada. Se observa en la fotomicrografía superior una textura intergranular y cristales subeuhedrales de hornblenda parcialmente reabsorbidos y alterándose a clorita. Intersticialmente se observan rellenos de calcita. En la microfotografía inferior se aprecia</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz polarizada. Se observa un cristal subeuhedral de plagioclasa reabsorbido con un borde de microcristales de plagioclasas y calcita, en una matriz con textura intergranular.</p>



fenocristales de andesina (tiene ángulos de extinción de 25° a 30° en promedio), en una textura intergranular.	
--	--


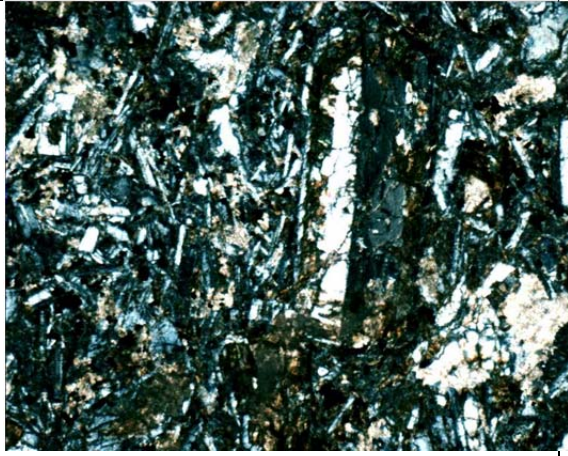


**Clasificación: Andesita.**

**MUESTRA: Ced07 Andesita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta muestra corresponde a depósitos de coladas andesíticas denominadas Carbonera. En muestra de mano se observa una roca de color gris verdoso. Se aprecian algunos fenocristales de plagioclasas en una matriz afanítica. También se aprecian cristales verdosos carcomidos. Al parecer la muestra presenta una alteración propilítica.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa principalmente plagioclasas An<sub>30</sub>-An<sub>50</sub> (andesina), tanto en la matriz como en fenocristales. Se observan texturas intergranulares, compuesta por microcristales de andesina y biotita en la matriz e intersticialmente se presentan algunos rellenos de calcita. Algunos cristales de andesina se observan carcomidos en sus bordes y reabsorbidos. Los cristales de biotita se presentan alterados a clorita y en la matriz se aprecian algunos cristales de clorita.

	
<p>200 μm </p>	<p>200 μm </p>
<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz polarizada. Se observa una textura intergranular y cristales subeuhedrales de biotita alterándose a clorita con rellenos de calcita.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz polarizada. Se observa un cristal euedral de plagioclasa con bordes carcomidos, en una matriz con textura intergranular, en la matriz se observa clorita como proceso de alteración.</p>

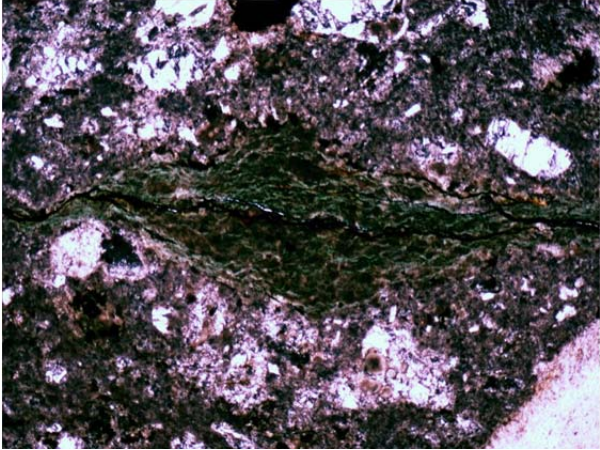



**Clasificación: Andesita.**

**MUESTRA: Cal020903 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta muestra corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Está compuesta por fragmentos polímiticos de líticos de diversas ignimbritas preexistentes, ya que algunos de los líticos presentan colores rosados y otros presentan tonos verdosos. Los líticos tienen tamaños de hasta 3 cm de longitud, son subredondeados a subangulosos, se encuentran re-trabajados. Se encuentra soportados por una matriz del tamaño de las cenizas de grano fino, llama la atención la presencia de pómez de color verde, producto de la propilitización, las pómez tienen texturas de flamas.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa una muestra muy heterogénea en sus componentes, mal clasificada, formada por líticos de diferentes eventos, así como de cristales euhedrales a subeuhedrales de feldespato potásico (Sanidino), cuarzo, plagioclasas alteradas y fragmentos juveniles de pómez. Las texturas de la pómez son flamas y se encuentran cloritizadas. Tanto los líticos como los cristales se encuentran soportados por una matriz de vidrio volcánico. Se encuentran alterados a sericita tanto la matriz como algunos cristales de Sandino.

	
<p>200µm </p>	<p>200 µm </p>
<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. En primer plano se observa pómez con texturas de flamas con una intensa alteración a clorita. Se encuentra soportada por una matriz de vidrio volcánico. Se observan alrededor cristales de sanidinos carcomidos, los cuales se encuentran parcialmente alterados a sericita. También se observan cristales subeuhedrales de cuarzo.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz polarizada. Se observa a la derecha un lítico alterado con bordes débilmente oxidados, se encuentra soportado por una matriz de grano fino, alterada a sericita. También se aprecian fenocristales de plagioclasas (albita - oligoclase).</p>

**Clasificación: Ignimbrita con un moderado soldamiento.**

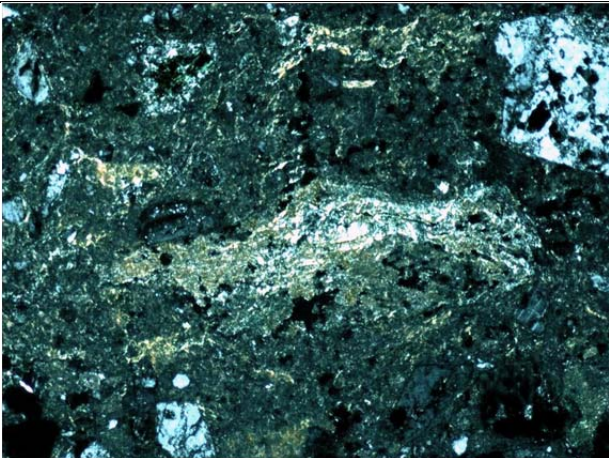
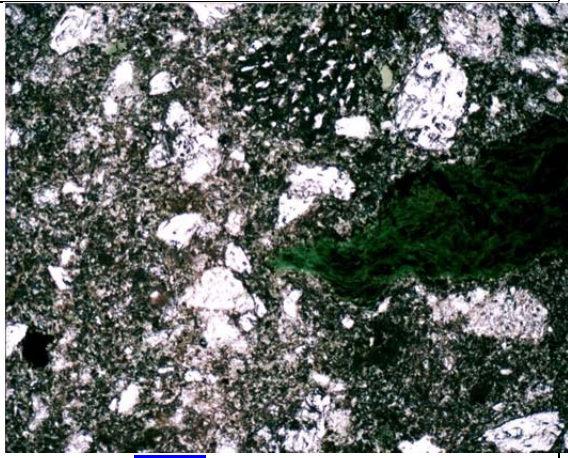


**MUESTRA: Cal030903 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta muestra corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Está compuesta por fragmentos de líticas de diversos colores de otras ignimbritas preexistentes, posiblemente de la Formación Bufo, ya que algunos de los líticos presentan colores rosados y otros presentan tonos verdosos. Los líticos tienen tamaños de hasta 1 cm de longitud, son subredondeados a subangulosos, el promedio de los líticos es de 5 mm. Se encuentra soportados por una matriz del tamaño de las cenizas de grano fino, de color verde, también presenta pómez de color verde, producto de la propilitización, las pómez tienen texturas de flamas. La muestra presenta una pseudo estratificación, así como una buena clasificación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa una muestra muy heterogénea en sus componentes, moderadamente clasificada, se puede observar una pseudo estratificación, la gradación de la base a la cima esta compuesta por fragmentos de grano fino a fragmentos de grano grueso. Esta formada por líticos de diferentes eventos, así como de cristales euhedrales a subeuhedrales de feldespato potásico (Sandino), cuarzo, plagioclasas alteradas y fragmentos juveniles de pómez. Las texturas de la pómez son flamas y se encuentran cloritizadas. Tanto los líticos como los cristales se encuentran soportados por una matriz de material volcánico. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y la matriz se encuentra cloritizada.

 <p>200µm</p>	 <p>200 µm</p>
<p>Fotomicrografía tomada con objetivo 5x, con luz polarizada. En primer plano se observa pómez con texturas de flamas con una intensa alteración a clorita. Se encuentra soportada por una matriz de vidrio volcánico, la matriz también se encuentra muy alterada a clorita. Se observan en los bordes cristales de sanidinos carcomidos, los cuales se encuentran parcialmente alterados a sericita. También se observan cristales subeuhedrales de cuarzo, los cuales son los de menor tamaño.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz transmitida. Se observa a la derecha una pómez con una intensa alteración a clorita, en la parte superior un pequeño fragmento subredondeado de un lítico accidental. La matriz es volcánica y esta soportando cristales subeuhedrales de cuarzo, Sandino, plagioclasas y líticos. Se aprecia la matriz cloritizada.</p>





**Clasificación: Ignimbrita con un moderado soldamiento.**

**MUESTRA: Cal040903A Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta muestra corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Está compuesta por aislados fragmentos de líticos de colores rosados y otros presentan colores verdes. Los líticos verdosos tienen tamaños de hasta 2 cm de longitud, son subredondeados a subangulosos, los líticos de color rosa no pasan de los 5 mm. Se encuentran soportados por una matriz del tamaño de las cenizas de grano fino, de color verde, también presenta pómez de color verde, producto de la propilitización, la pómez tiene texturas de flamas, algunas pómez alcanzan tamaños hasta de 2 cm. La muestra presenta una pseudo estratificación, así como una buena clasificación y una gradación de la base a la cima, de fragmentos gruesos a fragmentos finos.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa una muestra moderadamente clasificada, se puede observar una pseudo estratificación, la gradación de la base a la cima está compuesta por fragmentos de grano grueso a fragmentos de grano fino. Está formada por líticos de diferentes eventos, algunos líticos, los de mayor tamaño, se encuentran cloritizadas. También se observan cristales euhedrales a subeuhedrales de feldespato potásico (Sandino), cuarzo y fragmentos juveniles de pómez. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentran cloritizadas. Tanto los líticos como los cristales se encuentran soportados por una matriz de material volcánico. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y la matriz se encuentra cloritizada.

	
200µm 	200 µm 
Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. En primer plano se observa pómez con texturas de flamas con una intensa alteración a clorita. Se encuentra soportada por una matriz de vidrio volcánico, la matriz también se encuentra alterada a clorita. Se observan en los bordes cristales de sanidinos carcomidos, los cuales se encuentran parcialmente alterados a sericita.	Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz transmitida. Se observa en el centro una pómez con una intensa alteración a clorita, sin aplastar. Se aprecia una gradación homogénea. La matriz es volcánica y esta soportando cristales subeuhedrales de cuarzo y Sandino. Se aprecia la matriz cloritizada.



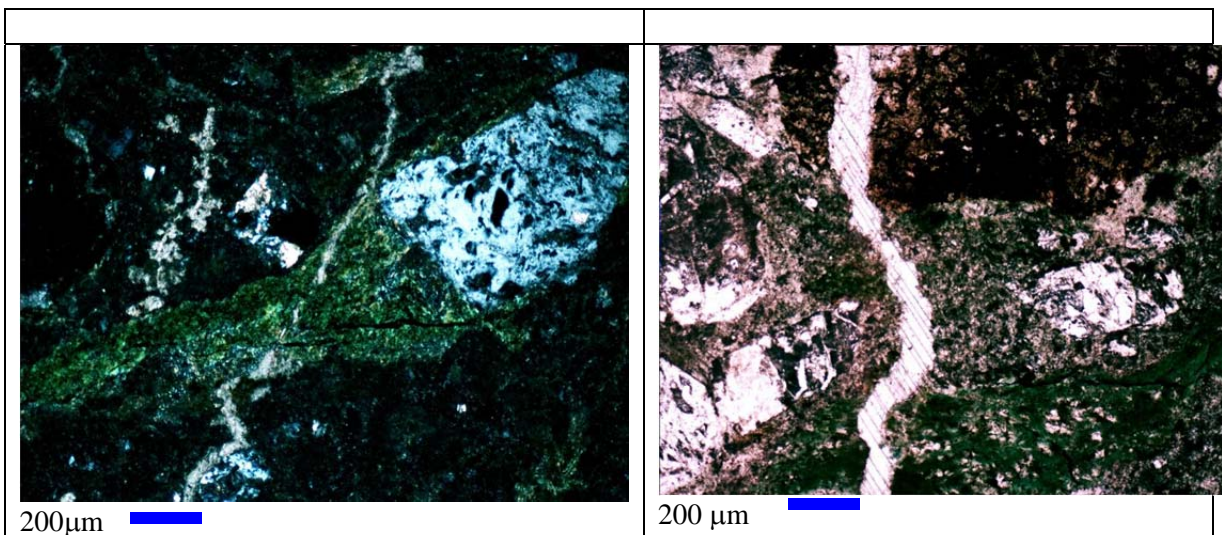
**Clasificación: Ignimbrita con un moderado soldamiento.**

**MUESTRA: Cal051003 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta muestra corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Está compuesta por fragmentos de líticos de colores rosados y otros presentan colores verdes y rojizo intenso con bordes verdosos. Los líticos verdosos tienen tamaños de hasta 2 cm de longitud, los líticos son subredondeados a subangulosos, los líticos de color rosa no pasan de los 5 mm. Se encuentran soportados por una matriz del tamaño de las cenizas de grano fino, de color verde, también presenta pómez de color verde, producto de la propilitización, la pómez tienen texturas de flamas, algunas pómez alcanzan tamaños hasta de 2 cm. La muestra presenta una pseudo estratificación, así como una buena clasificación y una gradación de la base a la cima, de fragmentos finos a fragmentos gruesos.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa una muestra moderadamente clasificada, se puede observar una pseudo estratificación, la gradación de la base a la cima está compuesta por fragmentos de grano fino a fragmentos de grano grueso. Está formada por líticos de diferentes eventos, algunos líticos, los de mayor tamaño, se encuentran cloritizadas. También se observan cristales euhedrales a subeuhedrales de feldespato potásico (Sandino), cuarzo y fragmentos juveniles de pómez. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentran cloritizadas. Tanto los líticos como los cristales se encuentran soportados por una matriz de material volcánico. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y carcomidos, la matriz se encuentra cloritizada. Se observa un débil a moderado soldamiento de la roca.



<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz polarizada. En primer plano se observa un cristal subeuhedral de sanidino alterado a clorita-sericita, se encuentra en contacto con pómez con texturas de flamas con una intensa alteración a clorita. Se encuentra soportada por una matriz de vidrio volcánico, la matriz también se encuentra alterada a clorita. Se observan en los bordes cristales de sanidinos carcomidos, los cuales se encuentran parcialmente alterados a sericita.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz transmitida. Se observa en el centro, parte superior, un lítico, en el centro, cristales de sanidino alterado a sericita y en la parte inferior, pómez con una intensa alteración a clorita, con texturas de flamas. Se aprecia una gradación homogénea. La matriz es volcánica y se encuentra cloritizada. Esta moderadamente soldada. A toda la muestra la cortan vetillas de calcita.</p>
---	--

**Clasificación: Ignimbrita con un moderado soldamiento.**


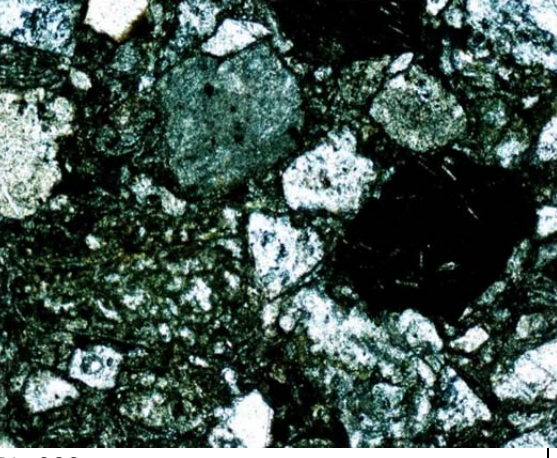


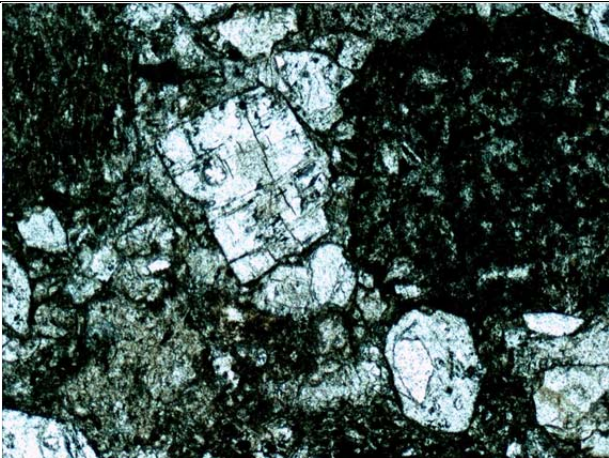



**MUESTRA: Cal081203 A Toba de lapilli (Depósitos de pómez y ceniza).**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Se analizan diferentes horizontes para observar sus variaciones verticales. Para este caso se analizaran 5 diferentes horizontes, del A al E, el horizonte A es la cima, el horizonte E es la base.

Esta muestra está compuesta por fragmentos de líticos de colores rosados, ocre oscuro y verdoso, van del tamaño de las cenizas de grano grueso hasta lapilli, no exceden el cm de longitud. Los líticos son subangulosos a subredondeados. Se observan cristales euhedrales de plagioclasas y aislados cristales de cuarzo. Presentan soporte clasto a clasto. A la base presenta una gradación a fragmentos del tamaño de las cenizas de grano fino. Se observa una buena clasificación y una buena gradación. Parecen tener los cristales y los líticos una moderada consolidación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa una muestra bien clasificada, la gradación de la base a la cima esta compuesta por fragmentos del tamaño de cenizas de grano grueso a fragmentos de cenizas de grano fino. Está formada por líticos de diferentes eventos, algunos líticos son de andesitas (xenocristales) y de ignimbritas. Algunos líticos presentan alteración a clorita. También se observan cristales euhedrales a subeuhedrales de feldespato potásico (Sandino), cuarzo y fragmentos juveniles de pómez. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentran cloritizadas. Rellenando espacios intersticiales se encuentran restos de clorita. Los soportes entre cristales y líticos son clasto – clasto. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y carcomidos. Se observa una débil a moderada consolidación de la roca.

	
<p>A) 200 <math>\mu\text{m}</math> </p>	<p>B) 200 <math>\mu\text{m}</math> </p>
<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se aprecian cristales de pómez, cuarzo y sanidinos carcomidos alterándose a sericita. Tienen soporte clasto – clasto.</p>	<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se aprecia un mosaico de líticos (andesita), fragmentos de cuarzo y sanidino, los sanidinos se encuentran parcialmente alterados a sericita y carcomidos, intersticialmente se encuentra relleno de clorita.</p>
	
<p>C) 200<math>\mu\text{m}</math> </p>	<p>D) 200 <math>\mu\text{m}</math> </p>
<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se observa mosaico de cristales y líticos. Los líticos son de andesita, parte derecha, la mayoría de los líticos se encuentran subredondeados, son los que presentan mayor re trabajo. Los cristales son de cuarzo, sanidino y plagioclasas (albita-oligoclasa). Presentan soporte clasto – clasto. En los intersticios se encuentra calcita y clorita.</p>	<p>Fotomicrografía tomada con objetivo de 5x, con luz transmitida. Se puede apreciar un conjunto de cristales principalmente de pómez, sanidino y cuarzo con soporte clasto – clasto. Los sanidinos se encuentran carcomidos y parcialmente alterados a sericita. Son euhedrales a subeuhedrales.</p>

**Clasificación: Toba de lapilli (Depósito de pómez y ceniza).**

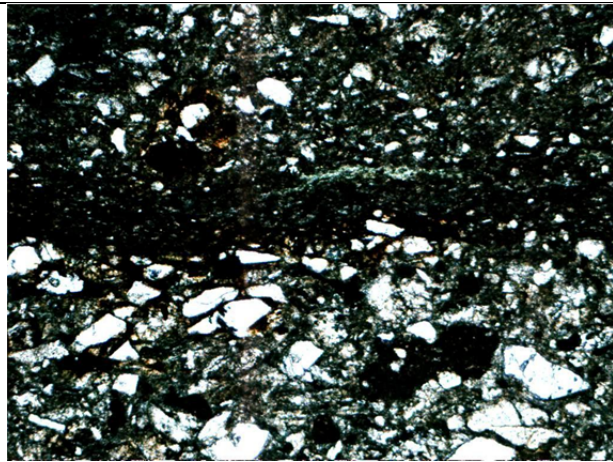


**MUESTRA: Cal081203 B Toba de cenizas (Depósitos de pómez y ceniza).**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Esta muestra está compuesta principalmente por fragmentos de cristales de plagioclasa, cuarzo y fragmentos juveniles compuestos por pómez. Van del tamaño de las cenizas de grano grueso a cenizas de grano fino. Presentan soporte clasto a clasto. A la base presenta una gradación a fragmentos del tamaño de las cenizas de grano grueso y hacia la cima se hacen de grano fino. Se observa una buena clasificación y se observan en esta lámina varios eventos cíclicos. Parecen tener los cristales y los líticos una débil consolidación.

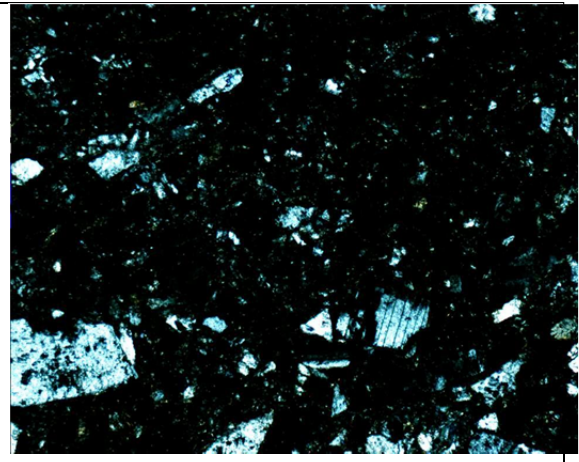
**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa en la muestra una buena clasificación, la gradación de la base a la cima está compuesta por fragmentos del tamaño de cenizas de grano grueso a fragmentos de cenizas de grano fino. Se pueden apreciar varios eventos cíclicos de depósito. Los cristales son euhedrales a subeuhedrales de feldespato potásico (Sandino), albita, cuarzo, fragmentos juveniles de pómez y ferro magnesianos. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentran cloritizadas. Rellenando espacios intersticiales se encuentran restos de clorita. Los soportes entre cristales son cristal – cristal. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y se observan carcomidos. Se observa una débil a moderada consolidación de la roca.



A) 200  $\mu\text{m}$

Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se aprecian la transición de horizontes de cristales de mayor tamaño a horizontes de menor tamaño. En el horizonte del centro, se aprecia fragmentos de pómez cloritizadas. Los cristales de cuarzo se aprecian angulosos a subangulosos. Se aprecia soporte cristal – cristal. Intersticial a los cristales se aprecia clorita.



B) 200  $\mu\text{m}$

Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz polarizada. Se aprecia un mosaico de fragmentos de cuarzo, sanidino y oligoclasa, los sanidinos se encuentran parcialmente alterados a sericita y carcomidos, intersticialmente se encuentra relleno de clorita. Se observa una gradación normal, (finos a la cima, gruesos a la base).


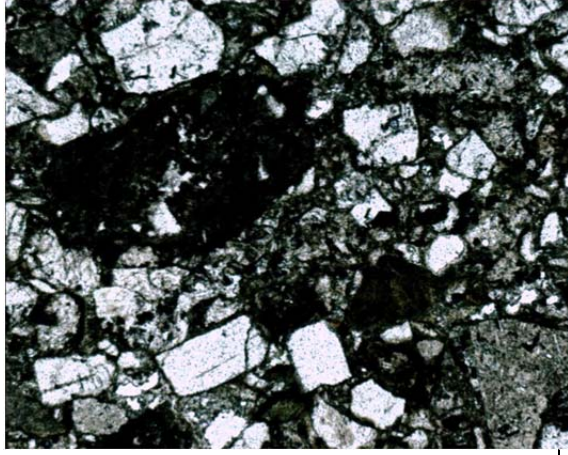
**Clasificación: Toba de cenizas (Depósito de pómez y ceniza).**

**MUESTRA: Cal081203 C Toba de cenizas (Depósitos de pómez y ceniza).**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Esta muestra está compuesta principalmente por fragmentos de líticas de colores de café oscuro y tonos rosas. Los líticos son subangulosos a angulosos. Se observan cristales de plagioclasa, cuarzo y fragmentos juveniles compuestos por pómez con texturas de flamas. Los líticos y los cristales van del tamaño de las cenizas de grano grueso a cenizas de grano fino. Presentan soporte clasto a clasto. A la base presenta una gradación de fragmentos del tamaño de las cenizas de grano grueso y hacia la cima se hacen de grano fino. Se observa una buena clasificación y una buena gradación. Los cristales y los líticos presentan una débil consolidación.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa en la muestra una buena clasificación, la gradación de la base a la cima esta compuesta por fragmentos del tamaño de cenizas de grano grueso a fragmentos de cenizas de grano fino. Los cristales son euhedrales a subeuhedrales de feldespatos potásico (Sandino), albita, cuarzo, fragmentos juveniles de pómez y ferro magnesianos. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentran cloritizadas. Rellenando espacios intersticiales se encuentran restos de clorita. Los soportes entre cristales son cristal – cristal. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y se observan carcomidos. Se observa una débil a moderada consolidación de la roca. Los líticos son principalmente de andesitas, se encuentran subredondeados a redondeados.

	
A) 200 $\mu\text{m}$	B) 200 $\mu\text{m}$
Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se observan cristales de cuarzo, albita y sanidino. Los cristales se observan euhedrales a subeuhedrales. En la parte inferior se observan líticos de andesitas que se encuentran subredondeados a redondeados. Se aprecia soporte cristal – cristal. En espacios intersticiales a los cristales se aprecia clorita.	Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se aprecia un mosaico de fragmentos de cuarzo, sanidino y oligoclase, los sanidinos se encuentran parcialmente alterados a sericita y carcomidos, en espacios intersticiales se encuentra relleno de clorita. Se observa soporte cristal – cristal.

**Clasificación: Toba de cenizas (Depósito de pómez y ceniza).**

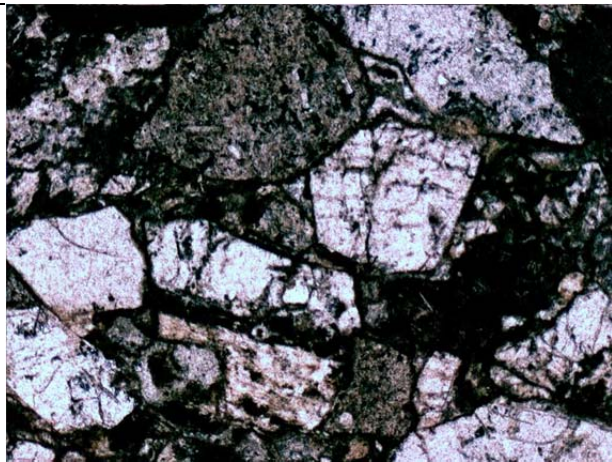


**MUESTRA: Cal081203 D Toba de cenizas (Depósitos de pómez y ceniza).**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Esta muestra está compuesta principalmente por fragmentos de líticos de colores de café oscuro. Los líticos son subangulosos a angulosos. Se observan cristales de plagioclasa, cuarzo y fragmentos juveniles compuestos por pómez con texturas de flamas. Los líticos y los cristales van del tamaño de las cenizas de grano grueso a cenizas de grano fino. Presentan soporte clasto a clasto. A la base presenta una gradación de fragmentos del tamaño de las cenizas de grano fino y hacia la cima se hacen de grano grueso. Se observa una buena clasificación y una buena gradación. Los cristales y los líticos presentan una débil consolidación y una débil propilitización.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa en la muestra una buena clasificación, la gradación de la base a la cima esta compuesta por fragmentos del tamaño de cenizas de grano fino a fragmentos de cenizas de grano grueso. Los cristales son euhedrales a subeuhedrales de feldespato potásico (Sandino), albita, cuarzo, fragmentos juveniles de pómez y ferro magnesianos. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentran cloritizadas. Rellenando espacios intersticiales se encuentran restos de clorita. El soporte entre cristales son cristal – cristal. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y se observan carcomidos. Se observa una débil a moderada consolidación de la roca. Los líticos son de andesitas, se encuentran subredondeados a redondeados.



A) 200  $\mu\text{m}$

Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Zona superior de la muestra (cima), en donde se observan cristales y líticos de mayor tamaño. Se observan cristales de cuarzo, albita y sanidino. Los cristales se observan euhedrales a subeuhedrales. En la parte inferior se observan líticos de andesitas que se encuentran subredondeados a redondeados. Se aprecia soporte cristal – cristal. En espacios intersticiales a los cristales se aprecia clorita.



B) 200  $\mu\text{m}$

Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Zona inferior de la muestra (base). Se aprecia un mosaico de fragmentos de cuarzo, sanidino y albita-oligoclasa, los sanidinos se encuentran parcialmente alterados a sericita y están parcialmente carcomidos, en espacios intersticiales se encuentran rellenos de clorita. Se observa soporte cristal – cristal.

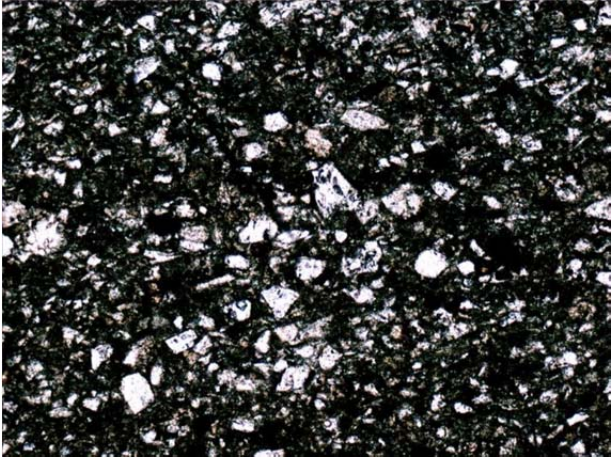
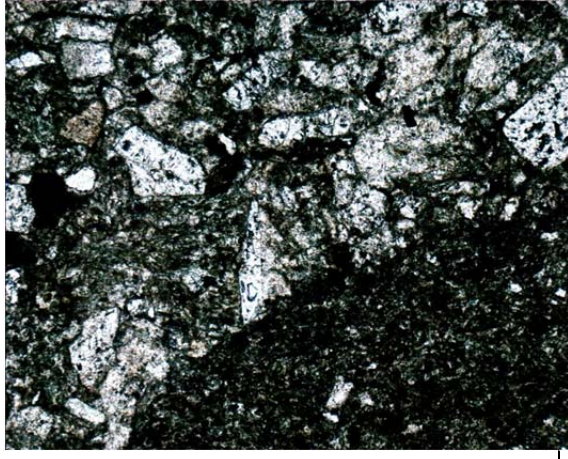


**Clasificación:** Toba de cenizas (Depósito de pómez y ceniza).

**MUESTRA: Cal081203 E Toba de cenizas (Depósitos de pómez y ceniza).**

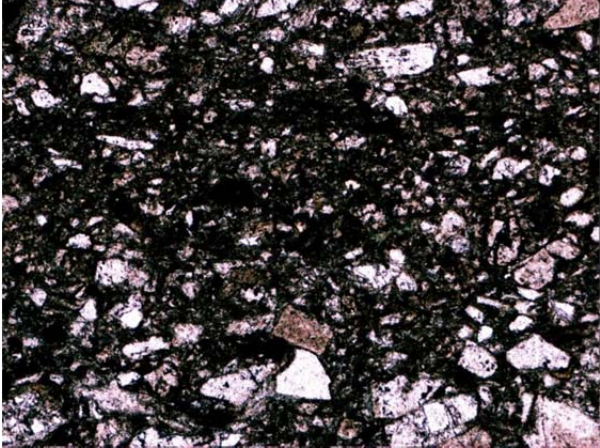

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Esta muestra está compuesta principalmente por fragmentos de líticos de colores de café oscuro. Los líticos son subangulosos a subredondeados. Se observan cristales de plagioclasa, cuarzo y fragmentos juveniles compuestos por pómez con texturas de flamas. Los líticos y los cristales van del tamaño de las cenizas de grano grueso a cenizas de grano fino. Presentan soporte clasto a clasto. A la base presenta una gradación de fragmentos del tamaño de las cenizas de grano grueso y hacia la cima se hacen de grano fino. Se observa una buena clasificación y una buena gradación. En muestra de mano se observa una estratificación cruzada a la cima de la muestra. Los cristales y los líticos presentan una débil consolidación y una débil propilitización.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Se observa en la muestra una buena clasificación, la gradación de la base a la cima esta compuesta por fragmentos del tamaño de cenizas de grano grueso a fragmentos de cenizas de grano fino. Los cristales son euhedrales a subeuhedrales de feldespatos potásico (Sandino), albita, cuarzo, fragmentos juveniles de pómez y ferro magnesianos. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentran cloritizadas. Rellenando espacios intersticiales se encuentran restos de clorita. El soporte entre cristales son cristal – cristal. Se encuentran alterados a sericita algunos de los cristales de Sandino y se observan carcomidos. Se observa una débil a moderada consolidación de la roca. Los líticos son de andesitas, se encuentran subredondeados a redondeados.

	
<p>A) 200 <math>\mu\text{m}</math> </p>	<p>B) 200 <math>\mu\text{m}</math> </p>
<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Zona superior de la muestra (cima), en donde se observan cristales principalmente. Se observan cristales de cuarzo, albita, sanidino y ferro magnesianos. Los cristales son euhedrales a subeuhedrales. Se aprecian angulosos a</p>	<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. En la parte inferior derecha se observa un fragmento de andesita subredondeados (posible xenolito). Se aprecia un mosaico de fragmentos de cuarzo, sanidino y albita, los sanidinos se encuentran</p>



<p>subangulosos. Se aprecia soporte cristal – cristal. En espacios intersticiales a los cristales se aprecia clorita.</p>	<p>parcialmente alterados a sericita y están parcialmente carcomidos, en espacios intersticiales se encuentran rellenos de clorita. Se observa soporte cristal – cristal.</p>
 <p>200 <math>\mu\text{m}</math> </p>	<p>Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Zona inferior de la muestra (base). Se aprecia un mosaico de fragmentos de cuarzo, sanidino y albita-oligoclasa, los sanidinos se encuentran parcialmente alterados a sericita y están parcialmente carcomidos, en espacios intersticiales se encuentran rellenos de clorita. Se observa soporte cristal – cristal. Se logra apreciar una gradación normal (fragmentos gruesos a finos).</p>

**Clasificación:** Toba de cenizas (Depósito de pómez y ceniza).

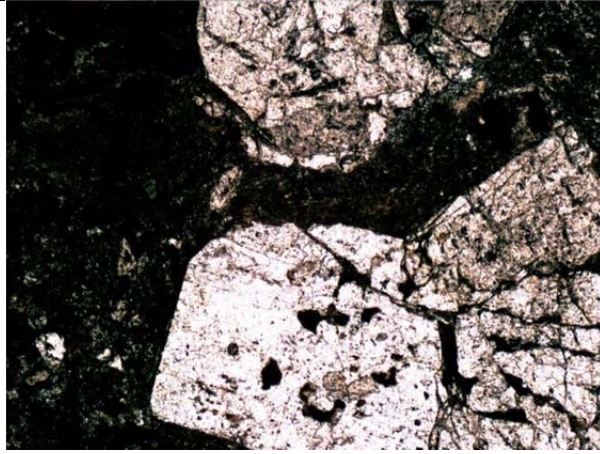
**MUESTRA: Cal101703 Ignimbrita.**

**DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:** Esta serie de muestras corresponde a depósitos de la Formación Calderones. Esta muestra está compuesta principalmente por fragmentos de líticos de colores de café oscuro. Los líticos son subangulosos a subredondeados. Se observan cristales de plagioclasa, cuarzo y fragmentos juveniles compuestos por pómez con texturas de flamas. Los líticos y los cristales van del tamaño de las cenizas de grano grueso al tamaño de lapilli. Están soportados por una matriz de grano fino. Se observa una mala clasificación y una mala gradación. La muestra presenta un moderado soldamiento y una débil propilitización.

**DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:**

Los cristales que componen a la muestra son euhedrales a subeuhedrales de sanidino, albita, cuarzo, fragmentos juveniles de pómez y ferro magnesianos. Las texturas de la pómez son de flamas y se encuentra cloritizada. Los cristales se encuentran soportados por una matriz volcánica. El tamaño promedio de los fragmentos es del tamaño de las cenizas de grano grueso. Se observa en la muestra una mala clasificación y gradación. La matriz es afanítica y se encuentra parcialmente alterada a sericita y clorita. Algunos de los cristales de sanidino se observan carcomidos. Se observa un débil soldamiento.





A) 200  $\mu\text{m}$

Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz transmitida. Se observan cristales de sanidino y albita en primer plano. Los sanidinos se aprecian carcomidos. Se observan pequeños cristales de cuarzo subangulosos. Todos los cristales se encuentran soportados por una matriz volcánica.



B) 200  $\mu\text{m}$

Fotomicrografía tomadas con objetivo 5x, con luz polarizada. Se observa la matriz parcialmente alterada a sericita y clorita, así como algunos cristales en la parte superior derecha de sanidino alterados a sericita.

**Clasificación: Ignimbrita.**

## **ANEXO A4. Metodología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y U/Pb.**

### **Metodología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .**

El método de fechamiento  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  está basado en la formación de  $^{39}\text{Ar}$  por irradiación del K presente en las muestras, con un reactor nuclear con neutrones rápidos. La reacción deseada es:  $^{39}_{31}\text{K}(n, p)^{39}_{18}\text{Ar}(n, p)$ .

El  $^{39}\text{Ar}$  es inestable y decae a  $^{39}\text{K}$  por emisión  $\beta$  con una vida media de 269 años. Debido a que es de una tasa más baja de decaimiento, aunque el  $^{39}\text{Ar}$  puede ser tratado como si fuese un isótopo estable durante un periodo de tiempo corto, como el involucrado en los análisis. Cuando el K contenido en la muestra es irradiado con neutrones en un reactor nuclear, los isótopos de Ar son formados por varias reacciones involucrando al K, Ca y Cl en la fuente. (Faure y Mensing, 2005).

Como la concentración de  $^{40}\text{K}$  es proporcional a la concentración de  $^{39}\text{K}$ , la cantidad de  $^{39}\text{Ar}$  generado por la irradiación de  $^{39}\text{K}$  es proporcional a la concentración de  $^{40}\text{K}$ , presente en la muestra. De modo se puede escribir la siguiente ecuación:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{40}\text{Ar}_k} \cdot \frac{1}{c} \cdot \left( \frac{\lambda}{\lambda_e} \right) + 1 \right] \dots (1)$$

Donde t es la edad en años,  $^{40}\text{Ar}^*$  es el argón de origen radiogénico y  $^{39}\text{Ar}_k$  es el argón producto de la irradiación del  $^{39}\text{K}$ ,  $1/c$  es un parámetro que depende de las condiciones de irradiación.

El parámetro  $1/c$  puede ser calculado de manera directa a partir de los parámetros de densidad de flujo, sección de captura de neutrones y tiempo de irradiación. Estos factores son difíciles de medir en el reactor, por lo que la constante se determina enviando a irradiar una muestra estándar cuya edad se ha determinado cuidadosamente mediante métodos convencionales,

llamada monitor, junto con las muestras de edad desconocida. Los monitores deben de tener una relación de  $^{40}\text{Ar}$  a  $^{39}\text{Ar}$  homogénea.

La edad de la muestra  $tm$  puede ser calculada por la ecuación:

$$tm = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k)_m}{(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k)_s} (e^{\lambda ts} - 1) + 1 \right] \dots (2)$$

Donde  $ts$  es la edad del monitor y  $(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k)_m$  y  $(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k)_s$  son los valores medidos de esta relación en la muestra (m) y el monitor (s) respectivamente.

Para simplificar se define el parámetro J, que depende solamente de los monitores:

$$J = \left[ \frac{e^{\lambda ts} - 1}{(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k)_s} \right] \dots (3)$$

Una vez irradiados, se mide la relación  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$  para los monitores y se calcula J (Faure y Mensing, 2005). De aquí que la formula fundamental de la técnica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  es:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{40}\text{Ar}_k} (j) + 1 \right] \dots (4)$$

Donde  $t$  es la edad aparente de la muestra. De esta manera se puede calcular la relación  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$  del argón que se libera al fundir la muestra y obtener una estimación de la edad.

Si el único contaminante fuera argón de composición atmosférica, entonces la relación podría calcularse de las relaciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y  $^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  mediante:

$$\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_k} = \left( \frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right)_m - 295.5 \left( \frac{^{36}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right)_m \dots (5)$$

Sin embargo, en el reactor se producen isótopos de interferencia de argón por reacciones no deseadas de los neutrones con otros elementos, las principales son la producción de  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  y  $^{40}\text{K}$ . Para calcular esta relación se utiliza:

$$\frac{{}^{40}\text{Ar}^*}{{}^{39}\text{Ar}} = (1 - f_1) \left( \frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}} \right)_m - 295.5(1 - f_2) \left( \frac{{}^{36}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}} \right)_m - \left( \frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}} \right)_k \dots (6)$$

Los factores  $f_1$  y  $f_2$ , se definen para simplificar:

$$f_1 = \frac{1}{1 - ({}^{37}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar})_{Ca} ({}^{39}\text{Ar}/{}^{37}\text{Ar})_m} \dots (7)$$

$$f_2 = f_1 \left[ 1 - ({}^{36}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar})_{Ca} ({}^{39}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar})_m \right] \dots (8)$$

Donde  $({}^{36}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar})_m$  es la relación isotópica medida en una fracción de argón de una roca (corregida por blanco, discriminación y fraccionamiento);  $({}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar})_k$  y  $({}^{36}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar})_{Ca}$  son las relaciones isotópicas de argón producido por la irradiación de sales de potasio y calcio de edad cero.

De estas fórmulas se puede observar que hay una combinación compleja de mediciones de abundancia isotópica, debido principalmente a los coeficientes de corrección por calcio  $f_1$  y  $f_2$ . La edad aparente no depende solamente de los picos de las masas  ${}^{36}\text{Ar}$ ,  ${}^{39}\text{Ar}$  y  ${}^{40}\text{Ar}$ , sino también implícitamente del pico  ${}^{37}\text{Ar}$ , a través del cálculo de  $f_1$  y  $f_2$ .

Las ventajas principales del método  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$  sobre el de K-Ar convencional son: solamente se requiere una pequeña alícuota de muestra; los problemas de inhomogeneidad de las muestras se eliminan al medir simultáneamente la relación de potasio y de argón de la muestra y no se requiere de mediciones de abundancia absoluta (Brent Dalrymple and Lanphere, 1971). La técnica tiene dos variaciones, fusión total, en la cual la muestra se funde totalmente una vez irradiada y la totalidad del argón liberado se analiza en un solo experimento, y la técnica de calentamiento por pasos, en la cual el argón se libera por calentamientos incrementales sucesivos de la muestra lo que resulta en una serie de edades aparentes por cada porción de gas liberada (Brent Dalrymple and Lanphere, 1971).

Suponiendo que una roca se enfrió rápidamente y no sufrió ninguna perturbación posterior, es decir, se comporta como un sistema cerrado para el argón y potasio desde el tiempo de enfriamiento inicial, entonces la edad calculada para cada paso, debe ser constante. No obstante, si hubo pérdida o ganancia de  $^{40}\text{Ar}^*$  después del enfriamiento inicial, las relaciones de  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  del gas liberado para diferentes temperaturas pueden variar y las edades obtenidas se pueden graficar contra la temperatura correspondiente. Sin embargo, se ha demostrado que es más útil graficarla contra la fracción proporcional de  $^{39}\text{Ar}$  liberado en cada incremento de temperatura, esta gráfica es conocida como espectro de edad. Las edades que se obtienen por K/Ar son comparables a la edades integradas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , es decir, el promedio ponderado de todas las edades obtenidas en el experimento del calentamiento por pasos. En ambos casos es posible inferir el tiempo que ha pasado desde el enfriamiento inicial en el espectro de edades.

### **Metodología U / Pb en zircón.**

El decaimiento de U y Th a isótopos estables de Pb es básico para diversos métodos de fechamiento. Esto surge no solo de la transformación del U y del Th a Pb, también deriva del tiempo de evolución del Pb común, desde el decaimiento de los hijos intermedios de U y del resultado de la composición isotópica del He. Las determinaciones de edades de las rocas basadas en el decaimiento del U y el resultado de la acumulación de Pb y He fueron realizadas en los primeros años del siglo veinte por Ernest Rutherford y B.B. Boltwood. Subsecuentemente A. Holmes usó datos químicos de U/Pb y U/He para propósito de la primera escala del tiempo geológico en su libro sobre la edad de la tierra publicado en 1913 (Faure y Mensing, 2005).

La acumulación de isótopos radiogénicos de Pb generados por decaimiento de sus padres respectivos está gobernada por las ecuaciones obtenidas de las leyes de radioactividad. Estas ecuaciones están escritas en relaciones atómicas de  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  y  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  debido a que  $^{204}\text{Pb}$  es solamente estable en isótopos no radiogénicos de Pb:

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_i + \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_1 t} - 1) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_i + \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_2 t} - 1) \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_i + \frac{^{232}\text{Th}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_3 t} - 1) \dots\dots\dots (11)$$

Donde  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$  son constantes de decaimiento de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , y  $^{232}\text{Th}$ ;  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$  son relaciones de estos isótopos calculados de la concentración medida de U, Th, y Pb; y el subíndice  $i$  se refiere a los valores iniciales de las relaciones  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . La relación  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  es también referida con la letra griega mu ( $\mu$ ).

En el fechamiento de los minerales de U (o de los minerales de Th) por los métodos de U, Th/Pb, las concentraciones de U, Th y Pb están medidas con una apropiada técnica analítica (por ejemplo: dilución isotópica) y la composición de los isótopos de Pb está determinada sobre una fuente sólida de un espectrómetro de masas, aunque la sonda de iones del espectrómetro de masas y el espectrómetro de masas ICP cada vez se utilizan más. Los fechamiento por U/Pb y Th/Pb están calculados con las ecuaciones 9 a 11 utilizando valores de relaciones iniciales de isótopos de Pb. Por ejemplo la ecuación 9 queda:

$$t = \frac{1}{\lambda_1} \ln \left( \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}) - ({}^{206}\text{Pb}/{}^{208}\text{Pb})_i}{{}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}} + 1 \right) \dots\dots\dots(12)$$

Las ecuaciones 9, 10 y 11 son resueltas similarmente, resultando en tres fechas independientes, basadas en cada una de las tres series de decaimiento. Los Fechamientos U/Pb y Th/Pb son concordantes sólo si las muestras satisfacen las condiciones de fechamiento:

- 1.- Los minerales de U, Th y Pb se han mantenido cerrados y todos sus hijos intermedios a través de su historia.
- 2.- Los valores correctos son utilizados para relaciones isotópicas iniciales de Pb.
- 3.- Las constantes de decaimiento de  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$  y  ${}^{232}\text{Th}$  son conocidas exactamente.
- 4.- La composición isotópica de U es normal y no ha sido modificada por fraccionamiento isotópico o por la presencia de reacción de cadenas naturales basadas sobre la fisión inducida de  ${}^{235}\text{U}$ .
- 5.- Todos los resultados analíticos son precisos y libres de errores sistemáticos

La hipótesis de que las muestras a fechar tienen remanentes cerrados de U, Th, Pb, así como de todos sus hijos intermedios, son satisfechos en casos raros esto debido a que el U es un elemento móvil en ambientes oxidantes por lo tanto tiende a perderse durante intemperismo químico. En adición, la emisión de partículas  $\alpha$  causa radiación con daño en los cristales, lo cual facilita la pérdida de Pb en los hijos intermedios en cada una de las tres cadenas de decaimiento. Consecuentemente los fechamientos de rocas con U/Pb y Th/Pb son raramente concordantes. Afortunadamente, los procedimientos han sido revisados para superar este problema.

Los cambios iniciales de las relaciones isotópicas de Pb es un problema solamente para las muestras y minerales que tienen baja relación de U/Pb (o Th/Pb) y en adición son muy

jóvenes. Los valores numéricos de las relaciones isotópicas iniciales de Pb no afectan significativamente las fechas calculadas de U/Pb (y Th – Pb) de rocas y minerales del Precámbrico que tienen una relación alta de U/Pb (y Th/Pb) debido a sus relaciones isotópicas presentes de Pb, en la mayoría de los casos, estos valores llegan a ser grandes. La abundancia isotópica del Pb común puede ser usada en cada caso para calcular las relaciones isotópicas iniciales de Pb:

$$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.21; \quad ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.78; \quad ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.43$$

Los efectos de la pérdida de Pb en fechamientos U-Pb puede ser minimizado por el cálculo del fechamiento por la relación  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  la cual es insensible a la pérdida reciente de Pb, siempre que el Pb fuera perdido del mineral que tiene la misma composición isotópica como el remanente del Pb (por ejemplo no tiene fraccionamiento isotópico). Las relaciones entre  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  y el resultado del tiempo desde la diferencia en las constantes de decaimiento (o vidas medias) de  $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$ .

La ecuación deseada se obtiene de combinar las ecuaciones 9 y 10:

$$\frac{^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i}{^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i} = \frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}} \left( \frac{e^{\lambda_2 t} - 1}{e^{\lambda_1 t} - 1} \right) \dots\dots\dots (13)$$

Esta ecuación tiene varias propiedades interesantes:

- 1.- Involucra la relación  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  la cual es una constante (=1/137.88) para todo el U de composición isotópica normal en la Tierra, en la Luna, Marte y meteoritos en tiempo presente.
- 2.- La ecuación no requiere conocer las concentraciones isotópicas de U y Pb e involucra solamente las relaciones isotópicas de Pb.
- 3.- El lado izquierdo de la ecuación 13 es igual a la relación  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  de Pb radiogénico.



$$\frac{{}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} - ({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_i}{{}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} - ({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_i} = \left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}} \right)^* \dots\dots\dots (14)$$

Donde el asterisco identifica los isótopos radiogénicos.

4.- La ecuación 13 no puede ser resuelta para t por métodos algebraicos debido a que es trascendental, pero puede resolverse por iteraciones o por interpolación en una tabla.

Una dificultad que surge de resolver la ecuación 13 es cuando t=0 ya que da el resultado indeterminado 0/0. Esta dificultad se supera por medio de la regla de L'Hopital, el cual tiene el estado:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(t)}{g(t)} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f'(t)}{g'(t)}$$

Donde f'(t) y g'(t) son las primeras derivadas de la función f y g con respecto a t. por lo tanto,

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{e^{\lambda_2 t} - 1}{e^{\lambda_1 t} - 1} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\lambda_2 e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1 e^{\lambda_1 t}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

Por lo cual el valor de  $({}^{207}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb})^*$  en el tiempo presente (t = 0) es:

$$\left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}} \right)^* = \frac{{}^{235}\text{U} \lambda_2}{{}^{238}\text{U} \lambda_1} \dots\dots\dots (15)$$

La ecuación 15 indica que la relación  $({}^{207}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb})^*$  la cual se forma por decaimiento de  ${}^{238}\text{U}$  y  ${}^{235}\text{U}$  en el tiempo presente y es igual a la relación de decaimiento de los dos isótopos de U en el presente. Este resultado es consistente con el enunciado de la ley de la radioactividad.

Por lo que:

$$\left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}}\right)^* = \frac{1}{137.88} \frac{9.8485 \times 10^{-10}}{1.55125 \times 10^{-10}} = 0.04604$$

El valor numérico de  $e^{\lambda_1 t} - 1$  y  $e^{\lambda_2 t} - 1$  se han podido calcular de diferentes fuentes (Faure y Mensing, 2005), resolviendo la ecuación 15, se han obtenido los siguientes valores:

$$\lambda_1 ({}^{238}\text{U}) = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ y}^{-1}$$

$$\lambda_2 ({}^{235}\text{U}) = 9.8485 \times 10^{-10} \text{ y}^{-1}$$

$$\left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}}\right)^* = \frac{1}{137.88} \frac{e^{\lambda_2 t} - 1}{e^{\lambda_1 t} - 1}$$

Aunque el Th y el U se presentan en un gran número de minerales, solamente son pocos los minerales que se utilizan para fechar U, por los métodos de Th/Pb. Los más usados para fechamientos son aquellos minerales que puedan ser más retentivos con respecto al U, Th y Pb, y sus hijos intermedios y que puedan estar ampliamente distribuidos en varias rocas. Los minerales que satisfacen estas condiciones son:

Zircón, Baddeleyita, Monazita, Apatito, Esfena (titanita), Granate, Rutilo, Perovskita, Ilmenita, Casiterita, Calcita.

Todos estos minerales contienen cantidades traza de U y Th pero tienen cantidades bajas de Pb, dando altas relaciones de U/Pb y Th/Pb favorables para fechar.

Las concentraciones de U y Th se encuentran en rangos de cientos a pocos miles de partes por millón y promedios de 1350 y 550 ppm respectivamente. Los zircones en pegmatitas contienen más U y Th que en rocas ígneas ordinarias. La presencia de estos elementos en zircones puede ser atribuida al reemplazamiento isomorfo del  $\text{Zr}^{4+}$  (radio iónico 0.87 Å) por  $\text{U}^{4+}$  (1.05 Å) y  $\text{Th}^{4+}$  (1.10 Å) y la presencia de torita ( $\text{ThSiO}_4$ ). La sustitución de  $\text{Zr}^{4+}$  por  $\text{U}^{4+}$  y  $\text{Th}^{4+}$ , está limitada por diferencias en sus radios iónicos. Mientras que el  $\text{U}^{4+}$  y  $\text{Th}^{4+}$  son admitidos dentro de cristales de zircón, el  $\text{Pb}^{2+}$  es excluido debido a que tiene un gran radio

iónico (1.32 Å) y es de baja carga (+2). Por lo tanto, el zircón contiene muy poco plomo y en el tiempo de formación y tiene altas relaciones de U/Pb y Th/Pb, lo cual mejora su sensibilidad como geocronómetro, por esta razón el zircón es usado más frecuentemente para fechamientos por el método isotópico de U, Pb/Th.

Para la concentración de zircones se trituró una cantidad aproximada de 3 kg de muestra con una prensa hidráulica hasta pulverizar la roca. Posteriormente se tamizó utilizando las mallas 32, 60, 80 y 100. Se seleccionó la fracción obtenida entre las mallas 80 y 100. Esta fracción fue lavada con agua varias veces, decantándola y tirando la fracción más fina. Posteriormente la muestra fue secada en un horno durante 12 horas a una temperatura promedio de 55°C. Después del secado se realizó una separación entre materiales de alta y baja susceptibilidad magnética, mediante un separador magnético Franz. Se inició con una separación manual para retirar los materiales con mayor susceptibilidad, posteriormente se utilizó el equipo Franz a 2.0 A para separar la fracción no susceptible. A la fracción no magnética se le realizó una separación por densidades, utilizando yoduro de metileno líquido (MEI) con una densidad aproximada de 3.3 g/cm<sup>3</sup>, precipitando al fondo los minerales de mayor densidad a la del MEI, entre ellos los cristales de zircón ( $\rho=4.68$ ), mientras que los cristales de menor densidad al MEI, flotan.

De los zircones recuperados se realiza una selección bajo el microscopio binocular, teniendo en cuenta que los zircones seleccionados pueden representar varias poblaciones de cristales. Los cristales encontrados se montaron en una resina epóxica, se pulieron y se le toman fotografías e imágenes de catodoluminiscencia con una cámara digital conectada a un microscopio binocular ELM 3R. Estas imágenes fueron usadas como apoyo para la selección de sitios de análisis y para la interpretación de datos obtenidos. Antes de introducir las

muestras a la celda de ablación láser se limpian sus superficies con  $\text{HNO}_3$  ultra puro (1 mol/l) para evitar impurezas o plomo común en la superficie.

**Anexo A2. Tablas resumen de datos Geocronológicos**

**Anexo A3. Mapas**









## R\_CHI\_2

Zircon_12_021	903	420	0.01	0.06121	0.00416	0.06888	0.00477	0.0082	0.00011	0.00255	0.00013	0.2	51.0	3.0	52.6	0.7	68	5	647	136	52.6	0.7
Zircon_23_034	616	203	0.00	0.11162	0.00751	0.08381	0.00583	0.0055	0.0001	0.00157	0.00004	0.3	31.8	0.8	35.0	0.6	82	5	1826	113	35.0	0.6
Zircon_07_015	520	239	0.01	0.06397	0.00832	0.04662	0.00615	0.0053	0.00012	0.00158	0.00012	0.2	32.0	2.0	34.1	0.8	46	6	741	264	34.1	0.8
Zircon_34_047	576	272	0.01	0.06986	0.00758	0.05114	0.00565	0.0053	0.00013	0.00161	0.00004	0.2	32.5	0.9	34.1	0.8	51	5	924	211	34.1	0.8
Zircon_02_009	923	271	0.00	0.08975	0.00576	0.06493	0.00426	0.0053	0.00008	0.00155	0.00003	0.2	31.3	0.6	33.7	0.5	64	4	1420	113	33.7	0.5
Zircon_16_026	634	398	0.01	0.06587	0.00501	0.04675	0.00367	0.0052	0.00011	0.00157	0.00004	0.3	31.8	0.7	33.1	0.7	46	4	802	148	33.1	0.7
Zircon_36_050	3118	957	0.00	0.09352	0.00434	0.06598	0.00315	0.0051	0.00006	0.0015	0.00003	0.3	30.4	0.5	32.9	0.4	65	3	1498	81	32.9	0.4
Zircon_27_039	2305	586	0.00	0.07866	0.00357	0.05518	0.00259	0.0051	0.00007	0.00152	0.00003	0.3	30.8	0.5	32.7	0.4	55	2	1164	83	32.7	0.4
Zircon_08_016	2037	526	0.00	0.05222	0.00282	0.03587	0.00198	0.0050	0.00005	0.00162	0.00008	0.2	33.0	2.0	32.2	0.3	36	2	295	113	32.2	0.3
Zircon_21_032	711	190	0.00	0.05726	0.00687	0.03780	0.00463	0.0050	0.00012	0.00181	0.00012	0.2	37.0	2.0	32.1	0.8	38	5	502	248	32.1	0.8
Zircon_13_022	1231	366	0.00	0.05572	0.00423	0.03778	0.00291	0.0049	0.00006	0.00173	0.00009	0.2	35.0	2.0	31.8	0.4	38	3	441	157	31.8	0.4
Zircon_15_024	779	485	0.01	0.06792	0.00569	0.04625	0.00393	0.0049	0.00008	0.0015	0.00003	0.2	30.4	0.6	31.8	0.5	46	4	866	162	31.8	0.5
Zircon_19_029	532	185	0.00	0.06992	0.00633	0.04762	0.00442	0.0049	0.00011	0.0015	0.00004	0.2	30.3	0.7	31.8	0.7	47	4	926	175	31.8	0.7
Zircon_26_038	635	498	0.01	0.07429	0.00659	0.05070	0.00462	0.0050	0.00011	0.00149	0.00004	0.3	30.1	0.7	31.8	0.7	50	4	1049	168	31.8	0.7
Zircon_31_044	700	410	0.01	0.05111	0.00394	0.03433	0.00275	0.0050	0.00011	0.00169	0.00010	0.3	34.0	2.0	31.8	0.7	34	3	246	161	31.8	0.7
Zircon_29_041	1066	421	0.00	0.05481	0.00422	0.03703	0.00290	0.0049	0.00007	0.00163	0.00011	0.2	33.0	2.0	31.7	0.4	37	3	404	160	31.7	0.4
Zircon_04_011	661	291	0.00	0.06223	0.00517	0.04187	0.00354	0.0049	0.00008	0.00149	0.00010	0.2	30.0	2.0	31.6	0.5	42	3	682	166	31.6	0.5
Zircon_06_014	1787	548	0.00	0.07386	0.00503	0.04968	0.00342	0.0049	0.00006	0.00147	0.00002	0.2	29.7	0.5	31.4	0.4	49	3	1038	128	31.4	0.4
Zircon_14_023	789	465	0.01	0.05930	0.00712	0.03901	0.00475	0.0049	0.0001	0.00164	0.00009	0.2	33.0	2.0	31.4	0.6	39	5	578	247	31.4	0.6
Zircon_18_028	876	460	0.01	0.06161	0.00534	0.04145	0.00363	0.0049	0.00007	0.0015	0.00003	0.2	30.3	0.5	31.4	0.4	41	4	661	174	31.4	0.4
Zircon_33_046	938	619	0.01	0.06763	0.00643	0.04539	0.00440	0.0049	0.00009	0.00166	0.00009	0.2	34.0	2.0	31.4	0.6	45	4	857	186	31.4	0.6
Zircon_37_051	685	397	0.01	0.05481	0.00521	0.03645	0.00354	0.0049	0.0001	0.00169	0.00009	0.2	34.0	2.0	31.2	0.6	36	3	404	197	31.2	0.6
Zircon_22_033	1535	738	0.01	0.06948	0.00396	0.04626	0.00273	0.0048	0.00008	0.00147	0.00003	0.3	29.6	0.5	31.1	0.5	46	3	913	108	31.1	0.5
Zircon_11_020	905	518	0.01	0.05780	0.00497	0.03773	0.00329	0.0048	0.00007	0.0016	0.00008	0.2	32.0	2.0	31.0	0.4	38	3	522	177	31.0	0.4
Zircon_05_012	1421	501	0.00	0.04919	0.00290	0.03242	0.00195	0.0048	0.00006	0.00147	0.00007	0.2	30.0	1.0	30.7	0.4	32	2	157	121	30.7	0.4
Zircon_20_030	920	573	0.01	0.04813	0.00347	0.03186	0.00235	0.0048	0.00008	0.00151	0.00009	0.2	30.0	2.0	30.7	0.5	32	2	106	145	30.7	0.5
Zircon_30_042	2557	1075	0.00	0.05994	0.00407	0.03950	0.00274	0.0048	0.00007	0.00148	0.00002	0.2	29.8	0.5	30.7	0.4	39	3	601	136	30.7	0.4
Zircon_10_018	2559	639	0.00	0.06044	0.00309	0.03966	0.00209	0.0048	0.00006	0.00147	0.00002	0.3	29.7	0.4	30.6	0.4	39	2	619	102	30.6	0.4
Zircon_35_048	1923	1491	0.01	0.04909	0.00304	0.03181	0.00202	0.0047	0.00007	0.00143	0.00006	0.2	29.0	1.0	30.5	0.4	32	2	152	126	30.5	0.4
Zircon_01_008	949	346	0.00	0.08239	0.00518	0.05372	0.00346	0.0047	0.00008	0.00141	0.00003	0.3	28.5	0.6	30.4	0.5	53	3	1255	124	30.4	0.5
Zircon_24_035	1125	665	0.01	0.05505	0.00391	0.03596	0.00261	0.0047	0.00007	0.00157	0.00008	0.2	32.0	2.0	30.4	0.4	36	3	414	147	30.4	0.4
Zircon_28_040	896	528	0.01	0.07751	0.00650	0.04936	0.00422	0.0046	0.00009	0.00139	0.00003	0.2	28.0	0.6	29.7	0.6	49	4	1134	156	29.7	0.6
Zircon_39_053	3641	1216	0.00	0.05383	0.00275	0.03393	0.00177	0.0046	0.00005	0.00157	0.00008	0.2	32.0	2.0	29.4	0.3	34	2	364	106	29.4	0.3

## M01

Zircon_M01-15_022_024	77	72	0.86	0.05398	0.00893	0.03949	0.00722	0.0053	0.00014	0.00166	0.00008	0.2	34.0	2.0	34.1	0.9	39	7	370	348	34.1	0.9
Zircon_M01-20_028_030	429	408	0.87	0.05102	0.00316	0.03616	0.00228	0.0051	0.00006	0.00179	0.00005	0.2	36.0	1.0	33.0	0.4	36	2	242	136	33.0	0.4
Zircon_M01-19_027_029	161	116	0.66	0.05296	0.00334	0.03609	0.00234	0.0050	0.00007	0.0016	0.00006	0.2	32.0	1.0	32.1	0.4	36	2	327	145	32.1	0.4
Zircon_M01-4_009_011	170	137	0.74	0.04970	0.00268	0.03351	0.00204	0.0050	0.00014	0.00177	0.00005	0.5	36.0	1.0	32.0	0.9	33	2	181	118	32.0	0.9
Zircon_M01-37_049_051	140	120	0.79	0.04633	0.00315	0.03127	0.00220	0.0049	0.00009	0.00154	0.00006	0.3	31.0	1.0	31.5	0.6	31	2	15	138	31.5	0.6
Zircon_M01-24_033_035	127	107	0.77	0.05146	0.00314	0.03382	0.00219	0.0048	0.00011	0.00145	0.00006	0.3	29.0	1.0	30.9	0.7	34	2	261	141	30.9	0.7
Zircon_M01-14_021_023	343	293	0.78	0.04947	0.00198	0.03260	0.00134	0.0048	0.00004	0.00145	0.00003	0.2	29.3	0.6	30.8	0.3	33	1	170	92	30.8	0.3
Zircon_M01-30_040_042	216	164	0.70	0.04949	0.00252	0.03256	0.00171	0.0048	0.00006	0.00149	0.00004	0.2	30.1	0.8	30.8	0.4	33	2	171	117	30.8	0.4
Zircon_M01-13_020_022	147	138	0.86	0.05329	0.00410	0.03457	0.00271	0.0048	0.00007	0.00151	0.00004	0.2	30.5	0.8	30.7	0.4	35	3	341	177	30.7	0.4
Zircon_M01-16_024_026	597	336	0.52	0.04822	0.00159	0.03168	0.00109	0.0048	0.00005	0.00148	0.00003	0.3	29.9	0.6	30.7	0.3	32	1	110	76	30.7	0.3
Zircon_M01-10_016_018	414	346	0.77	0.04614	0.00243	0.03018	0.00180	0.0047	0.00006	0.00152	0.00005	0.2	30.8	1.0	30.5	0.4	30	2	5	111	30.5	0.4
Zircon_M01-33_044_046	189	113	0.55	0.05205	0.00323	0.03374	0.00240	0.0047	0.00008	0.00148	0.00002	0.4	29.8	0.5	30.2	0.5	34	2	288	136	30.2	0.5
Zircon_M01-5_010_012	323	192	0.54	0.04966	0.00218	0.03191	0.00146	0.0047	0.00006	0.00151	0.00004	0.3	30.5	0.8	30.1	0.4	32	1	179	97	30.1	0.4
Zircon_M01-7_013_015	347	133	0.35	0.04664	0.00238	0.02968	0.00155	0.0047	0.00005	0.0016	0.00006	0.2	32.0	1.0	30.0	0.3	30	2	31	104	30.0	0.3
Zircon_M01-1_006_008	311	236	0.70	0.04611	0.00240	0.02921	0.00157	0.0046	0.00006	0.00145	0.00004	0.3	29.3	0.8	29.8	0.4	29	2	3	110	29.8	0.4
Zircon_M01-23_032_034	405	224	0.51	0.05122	0.00256	0.03263	0.00166	0.0046	0.00005	0.00148	0.00004	0.2	29.9	0.8	29.8	0.3	33	2	251	115	29.8	0.3
Zircon_M01-40_052_054	267	263	0.90	0.05132	0.00226	0.03265	0.00147	0.0046	0.00005	0.00145	0.00003	0.2	29.3	0.6	29.7	0.3	33	1	255	98	29.7	0.3
Zircon_M01-17_025_027	433	349	0.74	0.04864	0.00208	0.03089	0.00154	0.0046	0.00005	0.00146	0.00002	0.3	29.5	0.3	29.6	0.3	31	2	130	97	29.6	0.3
Zircon_M01-18_026_028	339	247	0.67	0.05394	0.00205	0.03413	0.00137	0.0046	0.00006	0.00148	0.00004	0.3	29.9	0.8	29.6	0.4	34	1	369	87	29.6	0.4
Zircon_M01-12_019_021	352	349	0.91	0.04876	0.00340	0.03088	0.00242	0.0046	0.00006	0.00145	0.00003	0.2	29.4	0.6	29.5	0.4	31	2	136	155	29.5	0.4
Zircon_M01-21_030_032	403	171	0.39	0.04957	0.00255	0.03133	0.00180	0.0046	0.00006													

TABLA A2.2 Experimento  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  de calentamiento en paso láser 5400

GTO-05 En feldespatos K

Pwr	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F $^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}_K$	Edad en Ma			% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
0.4	3.47	0.0031	$-3.97 \pm 7.33$	$-26.13 \pm 48.66$	a	‡	-6.89	276.47	0.037
1.4	5.794	0.0052	$-5.33 \pm 5.57$	$-35.22 \pm 37.15$	b	‡	-1.72	290.51	0.14
2.2	11.278	0.0101	$10.54 \pm 2.93$	$67.70 \pm 18.47$	c		15.84	351.13	0.175
5.2	24.321	0.0218	$4.41 \pm 0.59$	$28.65 \pm 3.78$	d		24.46	391.2	0.809
7.8	178.217	0.1598	$4.51 \pm 0.13$	$29.27 \pm 0.84$	e		62.8	794.39	0.907
10.8	51.453	0.0462	$4.93 \pm 0.22$	$31.97 \pm 1.42$	f		93.04	4246.67	1.05
11	397.59	0.3566	$4.82 \pm 0.05$	$31.28 \pm 0.32$	g		88.26	2516.89	0.939
11.5	134.128	0.1203	$4.84 \pm 0.09$	$31.39 \pm 0.60$	h		91.26	3381.93	1.229
12.2	308.649	0.2768	$4.65 \pm 0.03$	$30.15 \pm 0.22$	i		87.66	2394.8	1.11
1.5	102.894	0.039	$7.06 \pm 0.55$	$45.61 \pm 3.49$	j		13.41	341.26	0.36
6	1014.52	0.3845	$5.13 \pm 0.06$	$33.27 \pm 0.40$	k		76.1	1236.34	0.612
8	387.656	0.1469	$4.80 \pm 0.04$	$31.16 \pm 0.23$	l		86.57	2200.73	0.576
10.5	249.632	0.0946	$5.34 \pm 0.13$	$34.63 \pm 0.85$	m	‡	96.06	7496.45	0.621
11	335.472	0.1271	$4.87 \pm 0.04$	$31.58 \pm 0.29$	n		81.42	1590.05	0.855
11.5	548.302	0.2078	$5.00 \pm 0.07$	$32.45 \pm 0.45$	o		89.53	2823.08	0.919

Resultados Integrados

$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	$\frac{^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}}{K}$	Edad en Ma	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
1115	$4.70 \pm 0.06$	$30.51 \pm 0.41$	56.62	681.19000	1.004
2638	$5.12 \pm 0.04$	$33.19 \pm 0.28$	64.72	837.53000	0.692

$$J = 0.003627 \pm 0.000012$$

‡ fracción ignorada en el cálculo de la edad de la isocrona.

La edad del plateau fue calculado con la media de la fracción f de h

$$t_p = 31.33 \pm 0.29 \text{ Ma}, 52.31 \% \text{ de } ^{39}\text{Ar} \text{ liberado en 3 fracciones consecutivas, MSWD} = 0.11$$

G01 en Feldespato K

Pwr	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F $^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}_K$	Age in Ma		% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
1	26.285	0.1169	5.42 ± 0.36	33.03 ± 2.17	a	35.9	461.03	0.381
2.5	48.852	0.2173	4.92 ± 0.23	30.03 ± 1.39	b	77.1	1290.47	0.822
4	20.797	0.0925	5.47 ± 0.59	33.33 ± 3.54	c	95.67	6825.11	1.681
6	23.87	0.1062	5.14 ± 0.53	31.36 ± 3.18	d	91.86	3630.93	1.81
11	31.757	0.1413	5.79 ± 0.50	35.24 ± 3.03	e	96.78	9190.74	1.752
13	73.258	0.3259	5.35 ± 0.13	32.58 ± 0.79	f	87.02	2277.36	1.956
0.81	18.023	0.0516	6.01 ± 0.87	36.56 ± 5.22	g	36.4	464.63	0.95
1.5	58.61	0.1679	5.67 ± 0.21	34.50 ± 1.25	h	93.56	4584.98	1.417
2.15	48.272	0.1383	5.49 ± 0.21	33.42 ± 1.29	i	97.25	10746.96	1.749
2.5	38.423	0.1101	5.39 ± 0.31	32.83 ± 1.86	j	93.37	4459.36	1.948
4	38.359	0.1099	5.51 ± 0.19	33.55 ± 1.14	k	95.85	7124.12	1.748
6	24.948	0.0715	6.15 ± 0.40	37.43 ± 2.42	l	99.79	140944.88	1.721
9.8	22.182	0.0636	5.55 ± 0.44	33.80 ± 2.67	m	88.22	2508.24	1.799
12	2.862	0.0082	---	---	n	‡	---	0.269
12.5	97.348	0.2789	5.40 ± 0.12	32.87 ± 0.73	o	84.52	1908.95	2.017

Integrated results

$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	$^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}_K$	Age in Ma	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
224.8	5.32 ± 0.13	32.39 ± 0.81	74.62	1164.51	1.456
349	5.53 ± 0.10	33.67 ± 0.60	84.41	1895.45	1.738

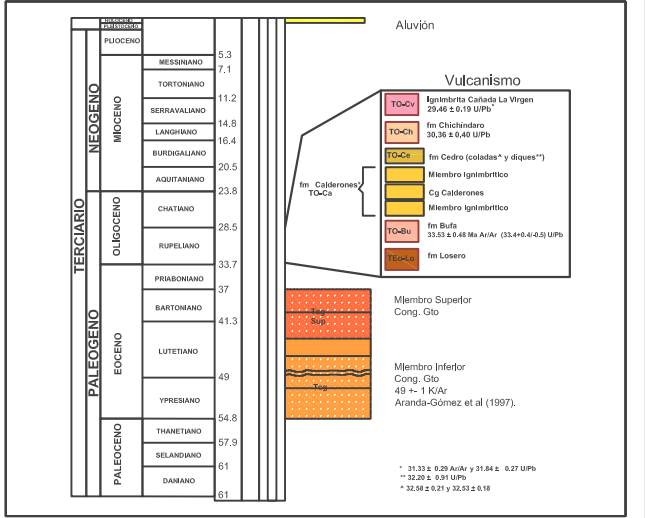
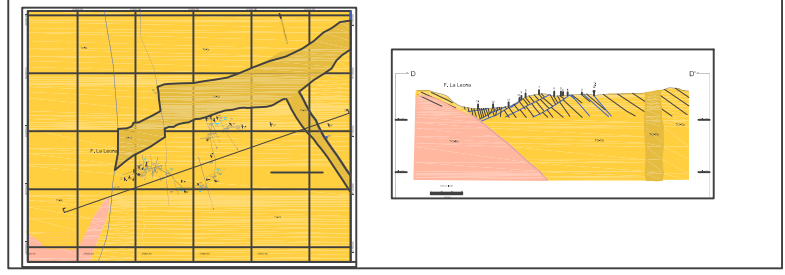
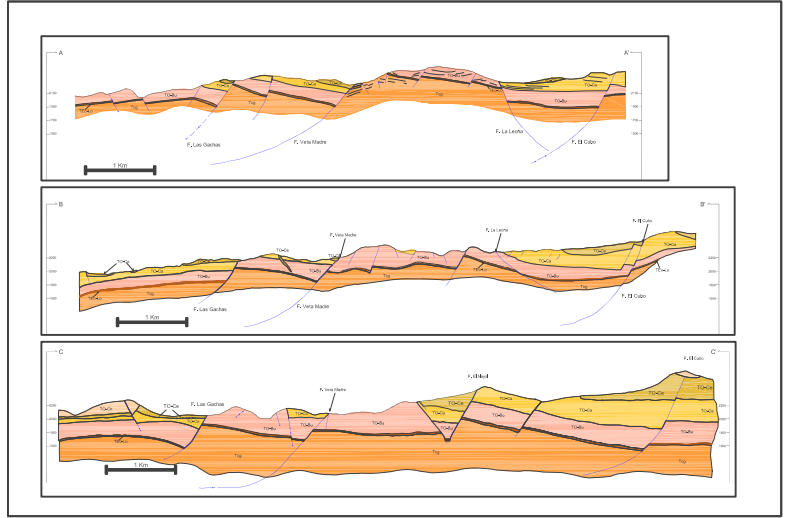
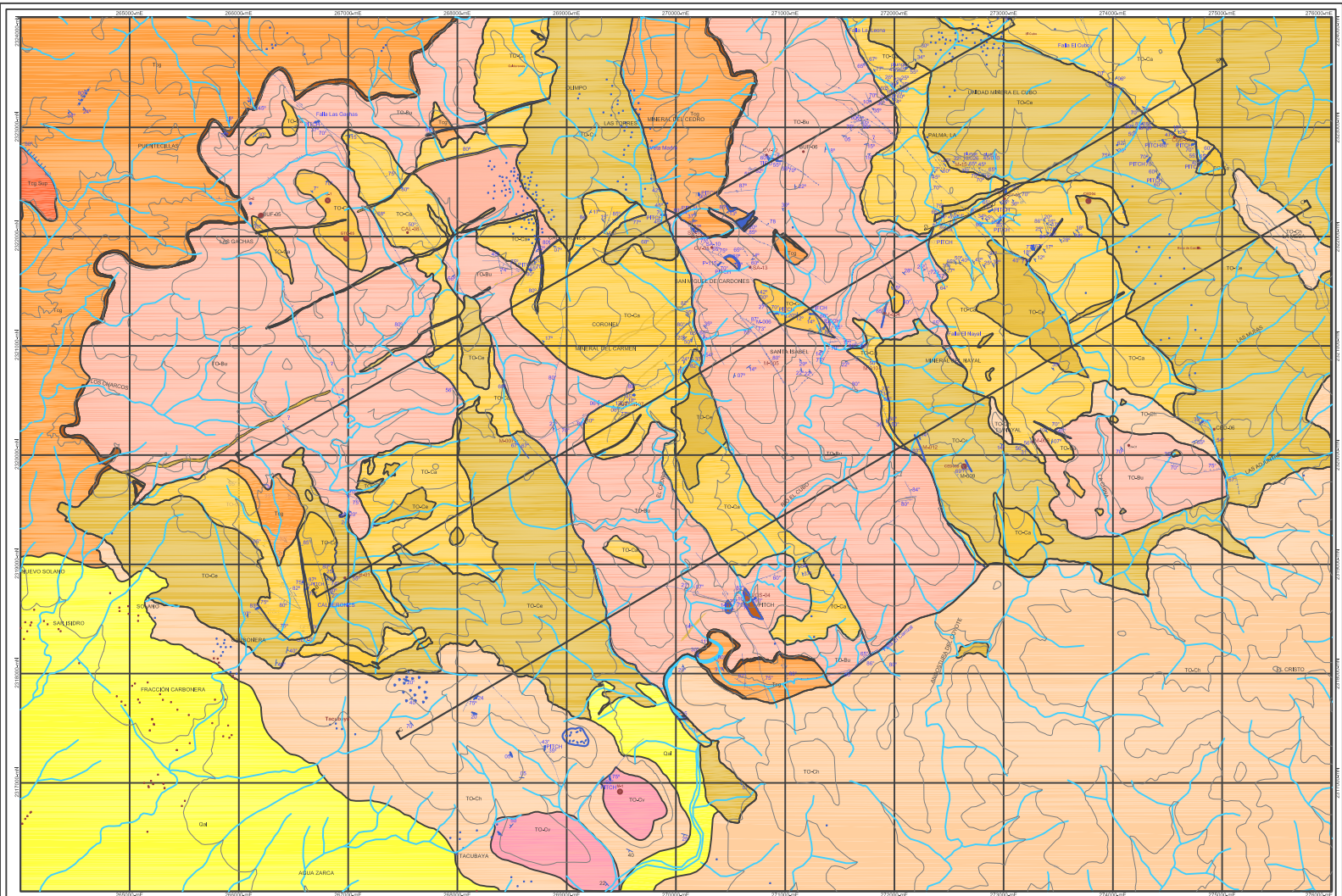
$J = 0.003408 \pm 0.000016$

Los resultados integrados para el segundo experimento son iguales en comparación. Es necesario tomar en cuenta que estos resultados no son contados desde la fracción "n" que es muy cercano al tamaño del blanco, para la fracción de la masa 36 no es posible obtener información de la edad. Sin embargo como es pequeña la fracción con el -0.82% del  $^{39}\text{Ar}$  liberado, es un efecto muy pequeño en los resultados integrados

‡ fracción ignorada en la edad de la isocrona calculada

La edad del *plateau* fue calculada con la fracción media "g" a "o", con excepción de la fracción "n".

$t_0 = 33.53 \pm 0.48 \text{ Ma}$ , 99.18 % de  $^{39}\text{Ar}$  liberado en 8 fracciones, MSWD = 0.64



**EXPLICACION**

- Falla normal
- Falla Inversa
- Estratificación
- Pkch
- Maestro Geocronología U/Pb

ESCALA 1:20,000

UTM / 14Q / P40Q7

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
 POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**GEOLÓGIA REGIONAL**

PORCIÓN SUR DEL DISTRITO MINERO GUANAJUATO

© 2014 UNAM-IGGEO