



**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**División de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Geología**

Tesis

**GEOLOGÍA DEL CERRO LIBERTAD EN LA REGIÓN DE  
PUERTO LIBERTAD: *Contribución al estudio petrológico  
del magmatismo orogénico en Sonora, México.***



Presentada para obtener el grado de

**GEÓLOGO**

Por:

**JAVIER ALEXIS GARCÍA HUERTA**

**Hermosillo, Sonora a jueves 06 de Agosto de 2015**

Tesis financiada por los proyectos CONACYT 180784 y 166018 intitulados: 1) "Evolución geodinámica del Proto-Golfo de California: énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México" a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano; y 2) "Frente de cabalgadura laramídica en la región de Caborca-Santa Ana, Norte de Sonora: una alternativa a la hipótesis de la megacizalla de Mojave-Sonora" a cargo del Dr. César Jacques Áyala.

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**División de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Geología**

Tesis

**GEOLOGÍA DEL CERRO LIBERTAD EN LA REGIÓN DE  
PUERTO LIBERTAD: *Contribución al estudio petrológico  
del magmatismo orogénico en Sonora, México.***

Presentada para obtener el grado de

**GEÓLOGO**

Por:

**JAVIER ALEXIS GARCÍA HUERTA**

**SINODALES**

**PRESIDENTE** Dr. Ricardo Vega Granillo<sup>1</sup>

**SECRETARIO** Dr. Jesús Roberto Vidal Solano<sup>1</sup>

**VOCAL** M.C. Alejandra Marisela Gómez Valencia<sup>2</sup>

**VOCAL** Dr. Juan Carlos García y Barragán<sup>3</sup>

**VOCAL** Dr. César Jacques Ayala<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología de la Universidad de Sonora

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la Universidad de Sonora

<sup>3</sup>Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México

**Hermosillo, Sonora a jueves 06 de Agosto de 2015**

Tesis financiada por los proyectos de CONACYT 180784 y166018 intitulados: 1) "Evolución geodinámica del Proto-Golfo de California: énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México" a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano; y 2) "Frente de cabalgadura laramídica en la región de Caborca-Santa Ana, Norte de Sonora: una alternativa a la hipótesis de la megacizalla de Mojave-Sonora" a cargo del Dr. César Jacques Áyala.



EL SABER DE MIS  
HARA MI GRANDEZA

# UNIVERSIDAD DE SONORA

Hermosillo, Sonora a 29 de Junio del 2015

**DR. INOCENTE GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO**

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

UNIVERSIDAD DE SONORA

Presente.-

Por este medio nos permitimos someter a su consideración, de la manera más atenta, el siguiente tema de tesis para su aprobación:

**“Geología del Cerro Libertad en la región de Puerto Libertad: Contribución al estudio petrológico del magmatismo orogénico en Sonora, México”.**

Lo anterior es con el fin de que el alumno **Javier Alexis GARCÍA HUERTA** pueda presentar su tesis profesional, requerida para la obtención de su título de licenciatura en Geología.

Sin otro en particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“El saber de mis hijos hará mi grandeza”

**M. C. Alejandra Marisela GÓMEZ VALENCIA**  
Directora

**Dr. Jesús Roberto VIDAL SOLANO**  
Co-Director

C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora, 30 de junio del 2015

**M.C. ALEJANDRA MARISELA GÓMEZ VALENCIA**  
DIRECTORA DE TESIS  
**DR. JESÚS ROBERTO VIDAL SOLANO**  
CO-DIRECTOR DE TESIS  
Presente.-

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes intitulado:

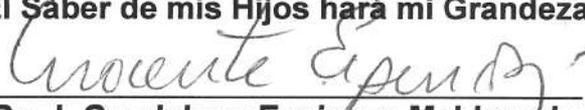
**"GEOLOGÍA DEL CERRO LIBERTAD EN LA REGIÓN DE PUERTO LIBERTAD:  
CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO PETROLÓGICO DEL MAGMATISMO  
OROGÉNICO, EN SONORA, MÉXICO"**

Esto es en fin de que **Javier Alexis García Huerta** con **Expediente No: 210209640**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo les comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>Presidente</b> | <b>Dr. Ricardo Vega Granillo</b>              |
| <b>Secretario</b> | <b>Dr. Jesús Roberto Vidal Solano</b>         |
| <b>Vocal</b>      | <b>M.C. Alejandra Marisela Gómez Valencia</b> |
| <b>Vocal</b>      | <b>Dr. Juan Carlos García y Barragán</b>      |
| <b>Vocal</b>      | <b>Dr. César Jacques Ayala</b>                |

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Ustedes.

**Atentamente**  
**"El Saber de mis Hijos hará mi Grandeza"**

  
**Dr. I. Guadalupe Espinoza Maldonado**  
Jefe del Departamento

C.c.p. Archivo.



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
**DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

**NOMBRE DE LA TESIS:**

**"GEOLOGÍA DEL CERRO LIBERTAD EN LA REGIÓN DE PUERTO  
LIBERTAD: CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO PETROLÓGICO DEL  
MAGMATISMO OROGÉNICO, EN SONORA, MÉXICO."**

**NOMBRE DEL SUSTENTANTE:**

**JAVIER ALEXIS GARCÍA HUERTA**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

**DR. RICARDO VEGA GRANILLO**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

**DR. JESUS ROBERTO VIDAL SOLANO**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

**M.C. ALEJANDRA MARISELA GÓMEZ VALENCIA**

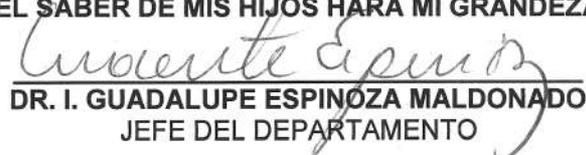
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

**DR. JUAN CARLOS GARCÍA Y BARRAGÁN**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

**DR. CÉSAR JACQUES AYALA**

**ATENTAMENTE**  
**"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"**

  
**DR. I. GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO**



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
**DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo.

***DEDICATORIA***

*Esta tesis está dedicada a muchas personas, que me han apoyado durante mi formación académica, a quienes agradezco y admiro infinitamente...*

*A mis padres*

*A mis abuelos*

*A mis hermanos*

*A todas esas personas que omito, mis amigos y amigas*

*Y a todo el resto de mi familia*

**AGRADECIMIENTOS**

Quiero aprovechar este espacio para agradecer a todas las personas que me apoyaron y que de alguna manera participaron en la realización de este trabajo de investigación: Mi tesis de licenciatura.

En primer lugar quiero agradecer a mi directora de tesis y amiga, la M.C. Alejandra Marisela Gómez Valencia, por depositar su confianza en mí, por asesorarme y ayudarme enormemente a concluir este nuestro trabajo. Además le agradezco mucho su paciencia, sus palabras de motivación y por transmitirme sus valiosos conocimientos.

También quiero agradecer a mi Co-director de tesis, el Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, por permitirme formar parte de su proyecto de investigación, por la confianza, consejos y por estar siempre al pendiente del progreso de esta tesis de licenciatura.

Agradezco por el financiamiento y por el apoyo de los proyectos de investigación **CONACYT** intitulados: 1) **“Evolución geodinámica del Proto-Golfo de California: énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México”** a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano; y 2) **“Frente de cabalgadura laramidica en la región de Caborca-Santa Ana, Norte de Sonora: una alternativa a la hipótesis de la megacizalla de Mojave-Sonora”** a cargo del Dr. César Jacques Ayala; a ambos doctores, muchas gracias por hacerme participe de sus proyectos de investigación científica.

Además quiero agradecer enormemente a los miembros del Comité de Titulación: Dr. Ricardo Vega Granillo, Dr. Juan Carlos García y Barragán, Dr. César Jacques Ayala, Dr. Jesús Roberto Vidal Solano y a la M.C. Alejandra Marisela Gómez Valencia, quienes aceptaron ser parte de este jurado y además tengo el gusto de sentirme privilegiado porque todos ellos me acompañaron a realizar mi trabajo de campo. Muchas gracias por sus correcciones, comentarios y observaciones que mejoraron enormemente este manuscrito.

De igual manera agradezco al Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO-UNAM), particularmente al Químico Pablo Peñaflor Escárcega por su apoyo en el Laboratorio de Preparación de muestras para Geoquímica de la ERNO-UNAM y por su confianza y hospitalidad brindada al prestarme su cubículo para el trabajo de gabinete de esta tesis; a la Geóloga Adriana Aimée Orcí Romero por su apoyo en la elaboración de secciones delgadas para petrografía en el Laboratorio de Petrografía de la ERNO-UNAM y al Dr. Juan Carlos García y Barragán por su apoyo en el Laboratorio de Petrografía de la ERNO-UNAM. Por otra parte en la etapa de elaboración de análisis geoquímicos recibí la invaluable ayuda de los técnicos de

los laboratorios de Fluorescencia de Rayos X (FRX), de química ultrapura (LABQUIO) y de química de espectrometría de masas con láser acoplado inductivamente (Q-ICP-MS) del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México en Ciudad Universitaria: en la preparación de perlas y pastillas para FRX agradezco al técnico Santiago Avilés Puntos, en el análisis de muestras por la técnica de FRX y en el apoyo brindado para que se pudiera efectuar la pulverización de muestras de roca y en general por todo el apoyo otorgado, agradezco al Químico Rufino Lozano Santacruz y finalmente <en el análisis de muestras con la técnica de ICP-MS agradezco al M.C. Ernesto Hernández Mendiola quién es técnico de los laboratorios LABQUIO y Q-ICP-MS, infinitas gracias a todos ellos por su apoyo en la etapa de laboratorio.

Por su ayuda en la etapa de campo, agradezco a mis amigos Jesús Ángel Zapata Martínez y Luis Alonso Velderrain Rojas, quién además me ayudo a pulverizar las muestras para geoquímica. También agradezco a mi amigo Farid Cruz Méndez, por ayudarme en la etapa de trituración de rocas, gracias por su apoyo. De igual manera quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Jesús Roberto Vidal Solano por el apoyo logístico para realizar el trabajo de campo, al Dr. César Jacques, al Dr. Juan Carlos García y Barragán y al Dr. Raúl Lugo, por las facilidades otorgadas para la impresión de este manuscrito de tesis.

Sin lugar a duda, nuevamente agradezco a la Geol. Aimée Orcí y al Dr. Raúl Lugo, por estar al pendiente de mi estómago durante la redacción del trabajo de tesis, gracias por las comidas.

Agradezco también el apoyo del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, en particular al personal administrativo, especialmente a la MA. Norah Olivia Armenta Icedo, por agilizar los trámites para el apoyo logístico de la etapa de campo y en general todo el apoyo brindado. También agradezco a Araceli Ramírez Villegas, por apoyarme con los trámites y requisitos para la presente tesis.

Una pieza fundamental para el desarrollo de este trabajo es mi Familia y amigos: gracias a mi madre Alejandra Huerta Garibay, por todo el apoyo que me brindas y por tu cariño, sin ti este trabajo no hubiera sido posible. Gracias a mi padre Wenceslao García González y a mis abuelos: Fausto García, Teófila González, Encarnación Huerta, agradezco su apoyo y cariño incondicional. Al señor Edgar Luis Vargas Ramírez, gracias por consejos, y por su apoyo en mi formación personal y estudiantil. A todos los integrantes de la Familia García González y también a todos los que integran a la familia Huerta Garibay, gracias por ser parte de mi vida, por todas las muestras de cariño y por las palabras de aliento que siempre me brindan.

Por ultimo agradezco a la Familia Monge Simón, por todo su cariño, apoyo incondicional, por alentarme a lograr esta tesis y por estar siempre al pendiente de mí persona.

## RESUMEN

Del Cretácico al Neógeno en Sonora, se produjo una variedad importante de unidades magmáticas asociadas a un contexto orogénico producto de la subducción de la placa Farallón por debajo de la Norteamericana, tal es el caso de la Formación Tarahumara, del magmatismo laramidico y de los magmas asociados a etapas finales de esta subducción.

En la región del Cerro Libertad ubicada a 23 km al noroeste de Puerto Libertad, Sonora, ocurren distintas unidades magmáticas, epiclásticas, tobáceas y sedimentarias, que corresponden a al menos 10 secuencias litológicas: [1] Complejo volcánico Libertad (Cretácico Tardío); [2] Granitoides Laramide (Cretácico Tardío); [3] Sill dacítico (Cretácico Tardío?); [4] Dique basáltico (Mioceno temprano?); [5] Basalto El Puente (Mioceno temprano); [6] Unidad detrítica tipo Báucarit (Oligoceno-Mioceno temprano); [7] Conductos alimentadores del Cerro San Judas (Mioceno temprano); [8] Basalto Las Lomitas (Mioceno temprano?); [9] Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (Mioceno temprano?) y [10] Unidad detrítica Plioceno-Cuaternario. Estas secuencias litológicas se encuentran fuertemente afectadas por distintas etapas estructurales, dominando la que corresponde a un sistema extensional con la presencia de fallas normales, fallas laterales de comportamiento izquierdo y derecho y fallas lítricas que basculan y repiten algunas de las secuencias litológicas.

Particularmente en las secuencias magmáticas del Cretácico Tardío, fue posible establecer una correlación entre el Complejo volcánico Libertad (CVL) con formaciones de la misma naturaleza que se han reconocido en Sonora, como lo son: la Formación Tarahumara, la Formación Tuli y el Complejo volcánico El Charro, identificando que en la región del Cerro Libertad, estas secuencias litológicas representan la existencia de amplias cuencas que fueron alimentadas por detritos y magmatismo, evidencia de ello es la actual presencia de depósitos epiclasticos-tobáceos, depósitos piroclásticos y derrames volcánicos de composición intermedia que, además y en general, muestran una importante alteración propilítica. El CVL está en contacto con el Granitoide laramide, generándose entre ellos una aureola de metamorfismo con mineralización de Cu. Por otra parte, en el caso del magmatismo Mioceno temprano, tras la realización de estudios de campo y petroquímicos, se reconocieron algunos de los conductos alimentadores del magmatismo del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (MVLCC), y éste además pudo ser reconocido como miembro superior de la Formación Báucarit y ser correlacionado con otras secuencias magmáticas de la misma naturaleza que afloran en otras localidades de Sonora, considerándose que las rocas del MVLCC a diferencia de las rocas del CVL, forman parte de las etapas finales de la subducción en el noroeste de México.

El estudio petrográfico realizado a estas secuencias magmáticas, muestra que las rocas del Complejo volcánico Libertad, varían de dacitas a andesitas con intensa alteración propilítica, presentando cuatro grupos mineralógicos distintivos: (1) Pl>Anf>Biot>OxFe-Ti; (2) Pl>Cpx>OxFe-Ti; (3) Pl>FA>>OxFe-Ti; y (4) Pl>OxFe-Ti>Anf. Mientras que las rocas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, varían de traquiandesitas, dacitas y andesitas con una sutil alteración propilítica, destacando, al menos 5 grupos mineralógicos: (1) Pl>Anf; (2) Pl>Anf>FA>Biot>>Opx>OxFe-Ti; (3) Pl>Anf>Cpx>OxFe-Ti; (4) Pl>Cpx>Anf>FA>OxFe-Ti y (5) Pl>Cpx>Anf>OxFe-Ti.

En general las rocas volcánicas intermedias tanto del CVL, como las del MVLCC, presentan elevados contenidos de sílice (57-69%) con valores similares en álcalis (6-7%), sin embargo las rocas del Complejo volcánico Libertad muestran concentraciones de Sr que varían de 530 a 1143 ppm, concentraciones de Ba de 399 a 406 ppm y valores de K<sub>2</sub>O de 0.36 a 2.32, mientras que las rocas volcánicas Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, tienen valores de Sr de 924 a 2922 ppm, valores de Ba de 1033 a 1761 ppm, y valores de K<sub>2</sub>O de hasta 3.48 ppm.

Estos resultados ayudan a establecer una evolución espacio-temporal, mostrando claras diferencias petroquímicas entre el volcanismo Cretácico y el volcanismo Neógeno de las unidades de roca que ocurren en la región del Cerro Libertad.

**CONTENIDO****Dedicatoria y Agradecimientos****Resumen**

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>I</b>    | <b>INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1         | Localización de la zona de estudio.....                                 | 2         |
| 1.2         | Vías de acceso.....   | 2         |
| 1.3         | Justificación del estudio.....  | 4         |
| 1.4         | Objetivos.....  | 5         |
| 1.5         | Metodología.....  | 6         |
| <b>II</b>   | <b>GEOLOGÍA GENERAL.....</b>  | <b>8</b>  |
| 2.1         | Fisiografía y Geomorfología.....  | 8         |
| 2.2         | Geología Regional.....  | 9         |
| <b>III</b>  | <b>GEOLOGIA DE LA REGION DEL CERRO LIBERTAD.....</b>                    | <b>14</b> |
| 3.1         | Granitoide larámide (Cretácico Tardío).....                             | 14        |
| 3.2         | Complejo volcánico Libertad (Cretácico Tardío?).....                    | 17        |
| 3.3         | Basalto El Puente (Oligoceno-Mioceno Temprano?).....                    | 22        |
| 3.4         | Unidad detrítica tipo Báucarit (Oligoceno-Mioceno Temprano?).....       | 22        |
| 3.5         | Basalto Las Lomitas (Oligoceno-Mioceno Temprano?).....                  | 24        |
| 3.6         | Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (Mioceno Temprano).....           | 26        |
| 3.7         | Unidad detrítica Plioceno-Cuaternario.....                              | 32        |
| <b>IV</b>   | <b>PETROGRAFÍA.....</b>   | <b>33</b> |
| 4.1         | Granitoide larámide (Cretácico Tardío).....                             | 33        |
| 4.2         | Complejo volcánico Libertad (Cretácico Tardío?).....                    | 35        |
| 4.3         | Basalto El Puente (Oligoceno-Mioceno Temprano?).....                    | 39        |
| 4.4         | Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (Mioceno Temprano).....           | 40        |
| <b>V</b>    | <b>GEOQUÍMICA.....</b>  | <b>45</b> |
| 5.1         | Técnicas analíticas.....  | 45        |
| 5.2         | Elementos mayores.....  | 49        |
| 5.3         | Elementos traza y tierras raras.....                                    | 55        |
| <b>VI</b>   | <b>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA.....</b>                            | <b>61</b> |
| 6.1         | Estructuras del Complejo volcánico Cerro Libertad.....                  | 66        |
| 6.2         | Estructuras del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.....              | 67        |
| 6.3         | Interpretación estructural regional.....                                | 73        |
| <b>VII</b>  | <b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>                                    | <b>75</b> |
| 7.1         | Nomenclatura estratigráfica para las rocas Cretácico Tardío.....        | 75        |
| 7.2         | Correlación del magmatismo Mioceno Temprano.....                        | 76        |
| 7.3         | Presencia de la Formación Báucarit en la porción costera de Sonora..... | 77        |
| 7.4         | Conclusiones petrológicas del magmatismo de la región.....              | 77        |
| 7.5         | Conclusiones generales.....   | 80        |
| <b>VIII</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>  | <b>83</b> |

## I INTRODUCCIÓN

La evolución volcánica durante la etapa del Cretácico al Neógeno en Sonora, está enmarcada dentro de diversos eventos tectónicos y magmáticos, como la orogenia *laramide* o la apertura del Golfo de California. En estos periodos ocurrieron diversos eventos volcánicos que dieron como resultado una geología compleja. Uno de estos eventos es el arco volcánico *laramide* durante el Cretácico Superior-Paleógeno, cuyo registro conocido es la Formación Tarahumara (McDowell et al., 2001; Roldán-Quintana, 2002; García y Jacques, 2011; González-León et al., 2000). Durante el Oligoceno temprano y Mioceno temprano se produjo un evento volcánico efusivo y explosivo félsico de gran volumen que formó la base de la Sierra Madre Occidental (SMO, McDowell y Clabaugh, 1979; Cochemé, 1985; Cochemé y Demant 1991; Aranda-Gómez et al., 1997; Ferrari et al., 2005) y es conocido como “ignimbrite flare-up”. A este evento le sigue una intercalación de rocas máficas y félsicas en diferentes episodios, Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario, conocido como magmatismo bimodal (Cochemé y Demant, 1991). A las rocas máficas-intermedias de este evento se les conoce como *Southern Cordillera Basaltic Andesite* (SCORBA, Cameron et al., 1989). Durante el Mioceno, en las etapas finales de la subducción, se produjeron pulsos magmáticos calca-lcalinos (Mora-Álvarez, y McDowell, 2000; Till et al., 2009; Vidal-Solano, 2012; Gómez-Valencia 2014) y de rocas volcánicas adakíticas (Gómez-Valencia, 2014 y Gómez-Valencia et al., 2015). Todas estas secuencias volcánicas con afinidades químicas calca-lcalinas se desarrollaron en un contexto tectónico de margen convergente, que se relaciona con la subducción de la placa Farallón por debajo la placa Norteamericana (Cochemé y Demant, 1991).

Particularmente en la región del Cerro Libertad, Puerto Libertad, Sonora, afloran distintas unidades magmáticas probablemente correlacionables con las rocas de la Formación Tarahumara, y también las lavas que probablemente correspondan a las etapas finales de la subducción. En este estudio se intenta verificar la presencia del magmatismo Cretácico en la región, por medio de la cartografía, de la correlación de las rocas volcánicas, y además de caracterizar y analizar los diferentes cuerpos de roca que afloran en la región del Cerro Libertad.

En este primer capítulo se muestra la ubicación de las región de estudio, se plantea la justificación de este trabajo, los objetivos y la metodología que se utilizó para el desarrollo de esta investigación.

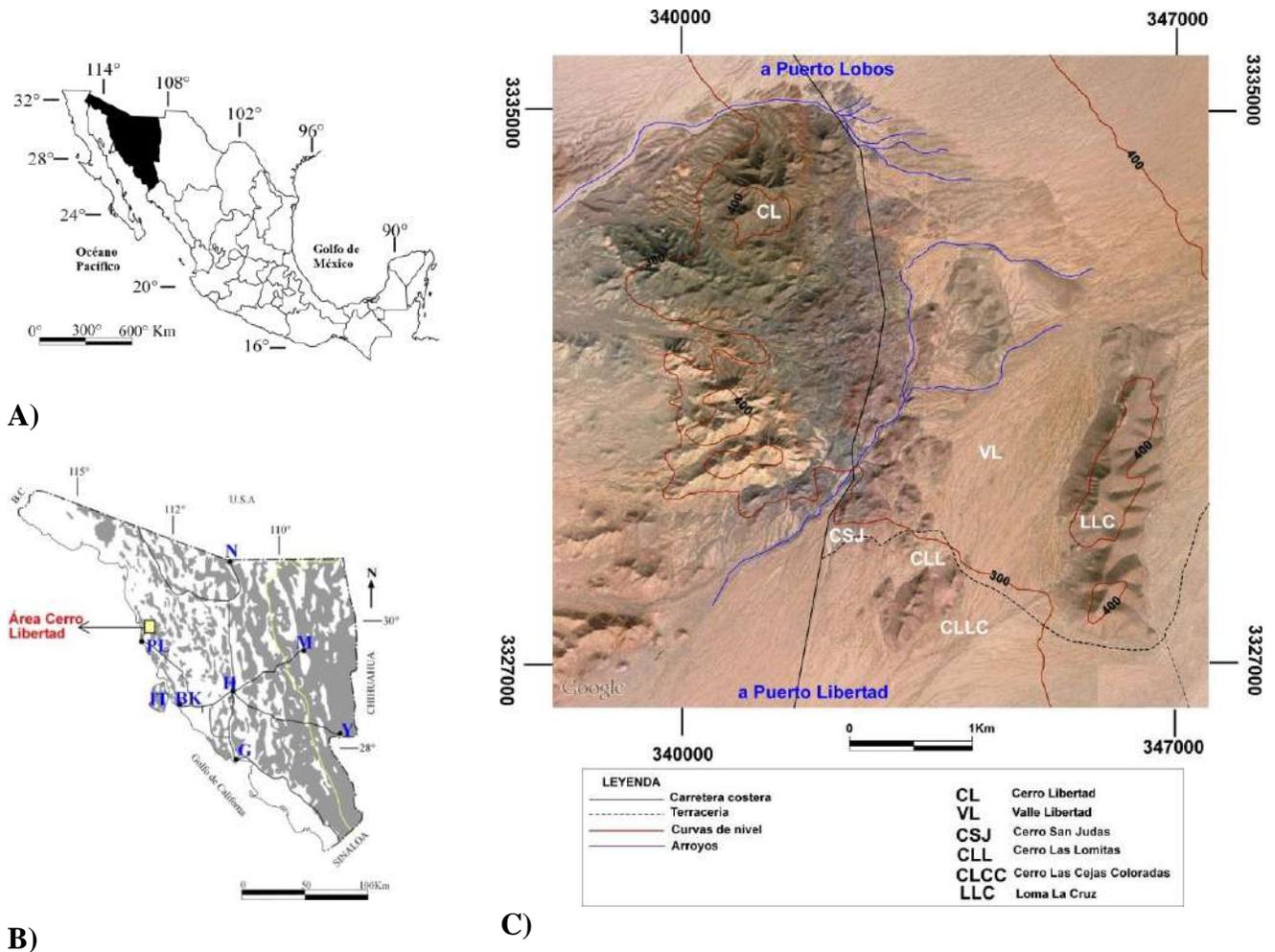
### 1.1 Localización de la zona de estudio

El área de estudio se localiza en la porción noroeste del estado de Sonora dentro del límite noroeste del municipio de Pitiquito (**Figura 1**), aproximadamente a 23 Km al noreste de Puerto Libertad y 27 Km al sureste de Puerto Lobos. Esta región se encuentra delimitada por las coordenadas 340000 a 347000 E y 3326000 a 3336000 N, y cubre una superficie total de 90 Km<sup>2</sup>. Los rasgos de relieve, hidrología y toponimia están representados dentro de la carta topográfica H12-A85 *El Caracol* a escala 1:50,000 realizada por **Morales-Morales et al. (2007)**, donde el mayor rasgo topográfico en las inmediaciones del área de estudio corresponde al cerro Libertad con una máxima elevación de 480 m.s.n.m.

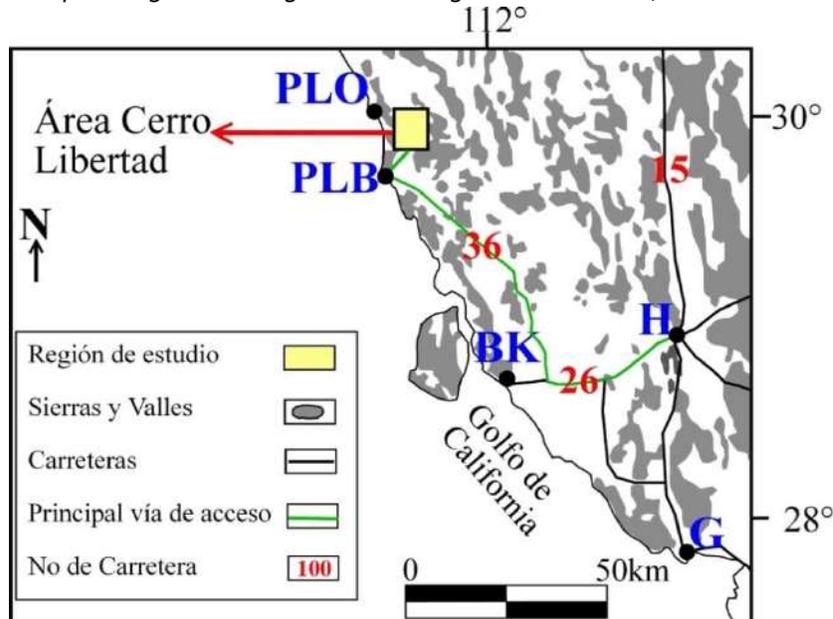
### 1.2 Vías de acceso

La principal vía de acceso a la región de estudio, se logra partiendo desde la ciudad de Hermosillo, Sonora, tomando inicialmente el camino que va por la carretera Estatal No. 26 Hermosillo-Bahía Kino dirigiéndose en un trayecto de 85 km al entronque que lleva a Puerto Libertad, para posteriormente tomar la carretera costera alterna denominada 36 Norte cuyo recorrido hasta Puerto Libertad es de aproximadamente 175 Km (**Figura 2**). Es de remarcar que en tiempo el trayecto dura normalmente 2 h y media, sin embargo, debido a que el tramo costero de la carretera 36 Norte hasta Puerto Libertad se encuentra en muy malas condiciones, el tiempo para llegar puede durar hasta 4 h. Otra posibilidad de acceso, es transitar por la carretera Estatal No. 26 Hermosillo-Bahía Kino partiendo de Hermosillo, y a la altura del poblado y cerros conocidos como Siete Cerros (aproximadamente 40 km al SW de Hermosillo), se toma la carretera denominada Calle 0, que conecta con la carretera 36 Norte, esto con la intención de acortar un poco el camino. Desde Puerto Libertad, la carretera costera continúa hacia el norte hasta conectarse a la carretera El Desemboque. La carretera Costera,

pasa exactamente por el centro de la región correspondiente al área de trabajo de tesis, a partir de ahí, existen algunos caminos de terracería que comunican algunos de los diferentes afloramientos litológicos de la localidad.



**Figura 1.-** Localización de la región de estudio: **A)** Ubicación del estado de Sonora en el NW de México; **B)** Mapa del estado de Sonora que muestra la morfología de las Sierras en color gris y los valles en color blanco, además se indica la localización de la región de estudio en el estado de Sonora (modificado de Cochemé (1985). Poblados principales: N.- Nogales; PL.- Puerto Libertad; H.- Hermosillo; IT.- Isla Tiburón; BK.- Bahía de Kino; M.- Moctezuma; Y.- Yécora y G.- Guaymas; y **C)** Imagen satelital modificada de Google Earth, donde se aprecian los principales rasgos morfológicos del sector de estudio que corresponde al Cerro Libertad.



**Figura 2.-** Mapa de accesibilidad a la región correspondiente a la tesis de licenciatura. Las abreviaturas corresponden a los principales poblados: PLO Puerto Lobos, PLB Puerto Libertad, BK Bahía de Kino, H Hermosillo, G Guaymas, imagen modificada de [Cochemé, \(1985\)](#).

### 1.3 Justificación del estudio

La presente tesis de licenciatura en Geología, forma parte de los proyectos de investigación financiados por el CONACYT intitulados: 1) *“Evolución geodinámica del Proto-Golfo de California: énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México”* a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano; y 2) *“Frente de cabalgadura laramidica en la región de Caborca-Santa Ana, Norte de Sonora: una alternativa a la hipótesis de la megacizalla de Mojave-Sonora”* a cargo del Dr. César Jacques Ayala. Por otra parte, este manuscrito de tesis, también forma parte del proyecto de investigación doctoral titulado: *“El magmatismo adakítico Neógeno asociado al cese de la Subducción en Sonora y Baja California: Significado geodinámico en el NW de México”* a cargo de la M.C. Alejandra Marisela Gómez Valencia. La idea fundamental de este trabajo de licenciatura es encontrar las principales similitudes y/o diferencias en las características petrológicas, petrográficas, geoquímicas y estructurales que guardan los vestigios magmáticos de la región del Cerro Libertad y que unen en investigación científica a los proyectos académicos mencionados.

## 1.4 Objetivos

Este estudio tiene como objetivo general conocer con claridad la geología y estratigrafía de las secuencias litológicas en la región del Cerro Libertad, haciendo énfasis en las diferentes unidades volcánicas de la etapa Cretácico-Neógeno, con la finalidad de conocer la posible relación de los vestigios magmáticos de la región, con las rocas de la Formación Tarahumara (Cretácico) y con las secuencias magmáticas de las etapas finales de la subducción de la placa Farallón debajo de la placa Norteamericana (Neógeno).

Los objetivos específicos de este estudio son:

- (1) Se busca mostrar la interrelación que guardan los distintos eventos magmáticos presentes en la región, mediante la caracterización geológica, petrográfica y geoquímica.
- (2) Conocer el origen del volcanismo Cretácico en la región, haciendo hincapié en rocas correlacionables con la Formación Tarahumara. En este caso, será posible resolver un problema de nomenclatura estratigráfica si se pudiera establecer una clara relación entre esta formación y las secuencias sedimentarias estudiadas por otros autores en otras partes de Sonora.
- (3) Definir el significado petrológico de los afloramientos orogénicos del magmatismo de posible edad Oligoceno-Mioceno y su correlación con unidades de la misma naturaleza estudiadas en otros sectores de Sonora.
- (4) Aclarar la presencia de unidades detríticas posiblemente correlacionadas con la Formación Báucarit.
- (5) Mostrar el control estructural de las unidades litológicas del sector Cerro Libertad en relación con la tectónica regional del noroeste de México.

## 1.5 Metodología

Como parte de la etapa inicial de trabajo, se realizó un reconocimiento fotogeológico de la región del Cerro Libertad, mediante el apoyo de los rasgos geomorfológicos detectados en el análisis de imágenes de satélite con el programa Google Earth®.

Una vez seleccionada la región a estudiar se trabajó en la etapa inicial de gabinete que consistió en la recopilación y análisis de la literatura existente, percatándonos que la mayor parte de las investigaciones han sido orientadas a rocas con mineralización económicamente explotable. Posteriormente se realizó una fotointerpretación para la obtención del mapa geológico preliminar, el cuál fue corroborado con la carta geológica H12-A85 del Servicio Geológico Mexicano (Morales-Morales et al., 2007). Finalmente se realizaron dos campañas de campo, la primera del 18 al 20 de Marzo y la segunda, del 13 al 16 de Mayo del presente año, esto con la finalidad de corroborar la fotointerpretación realizada, efectuar la cartografía escala 1:50,000, obtener el levantamiento estructural y de secciones estratigráficas, así como el de obtener un muestreo para análisis petrográficos y geoquímicos.

Durante estas visitas a campo se llevó a cabo un reconocimiento general de la litología y en algunos casos se realizaron observaciones a detalle tratando de obtener una mayor comprensión del magmatismo atribuido al Mesozoico-Cenozoico.

La preparación de muestras se realizó en varias etapas y bajo el siguiente orden:

### 1.- Preparación de muestras de roca para la fabricación de láminas delgadas

La elaboración de láminas delgadas se llevó a cabo en el Laboratorio de Laminación del Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO-UNAM), con el apoyo de la Geol. Adriana Aimée Orcí Romero.

### 2.- Preparación de muestras y obtención de datos geoquímicos:

La trituración de esquirlas de roca, se realizó en el Laboratorio de Preparación de Muestras para Geoquímica del Instituto de Geología de la ERNO-UNAM, con la asesoría y apoyo del Quím. Pablo Peñaflor Escárcega. La fragmentación de las muestras, se realizó con

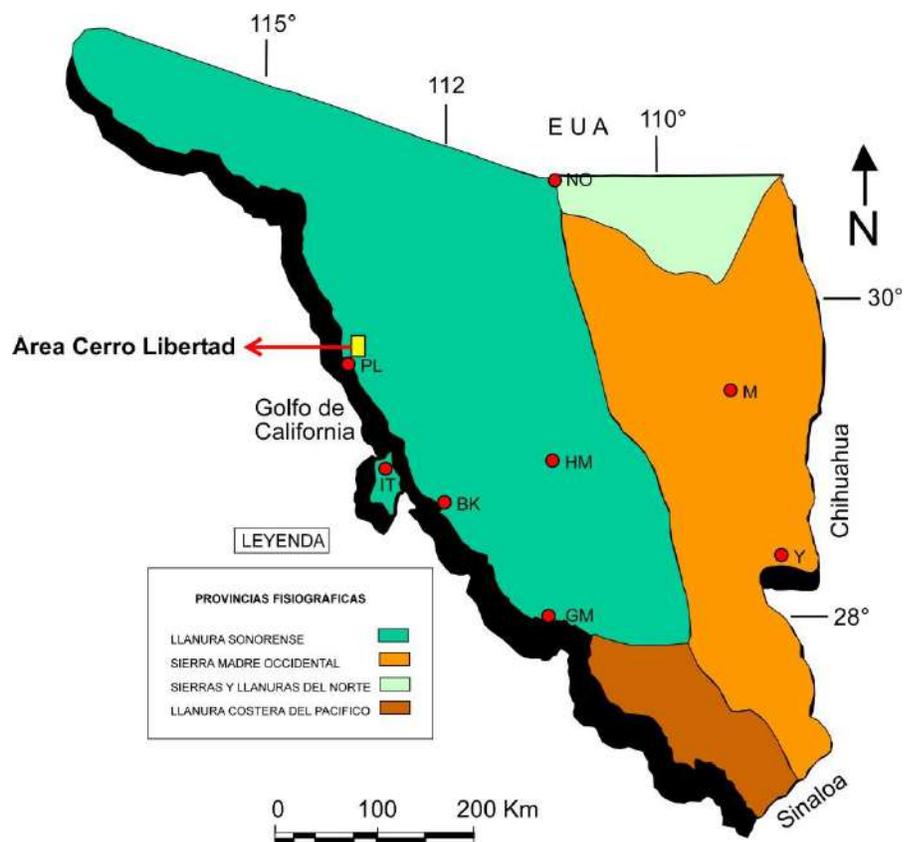
una trituradora de quijadas de acero marca Braun Chipmunk. Posteriormente se realizó un cuarteo de las muestras convertidas en gravilla para obtener proporciones estadísticamente equitativas y tomar una fracción para pulverizar. La molienda se llevó a cabo en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) del Instituto de Geología de la UNAM en Ciudad Universitaria (CU), con la pulverizadora de canicas y contenedor de tungsteno marca SPEX. Los análisis geoquímicos de elementos mayores y algunos elementos traza, se llevaron a cabo en el Laboratorio de FRX del Instituto de Geología de la UNAM-CU, gracias al apoyo del Quím. Rufino Lozano Santacruz. Por otra parte, también se analizaron elementos traza y elementos de tierras raras de algunas muestras en el laboratorio de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) del Instituto de Geología de la UNAM, con el apoyo del M.C. Ernesto Hernández Mendiola.

Finalmente la presente tesis de licenciatura, se elaboró durante tres meses, tiempo en el que se incluyó trabajo de campo, gabinete y laboratorio. De manera simultánea, se realizó la compilación de toda la información recabada en las diferentes etapas de trabajo para elaborar una interpretación de los resultados obtenidos y por último, redactar esta tesis.

II GEOLOGIA REGIONAL

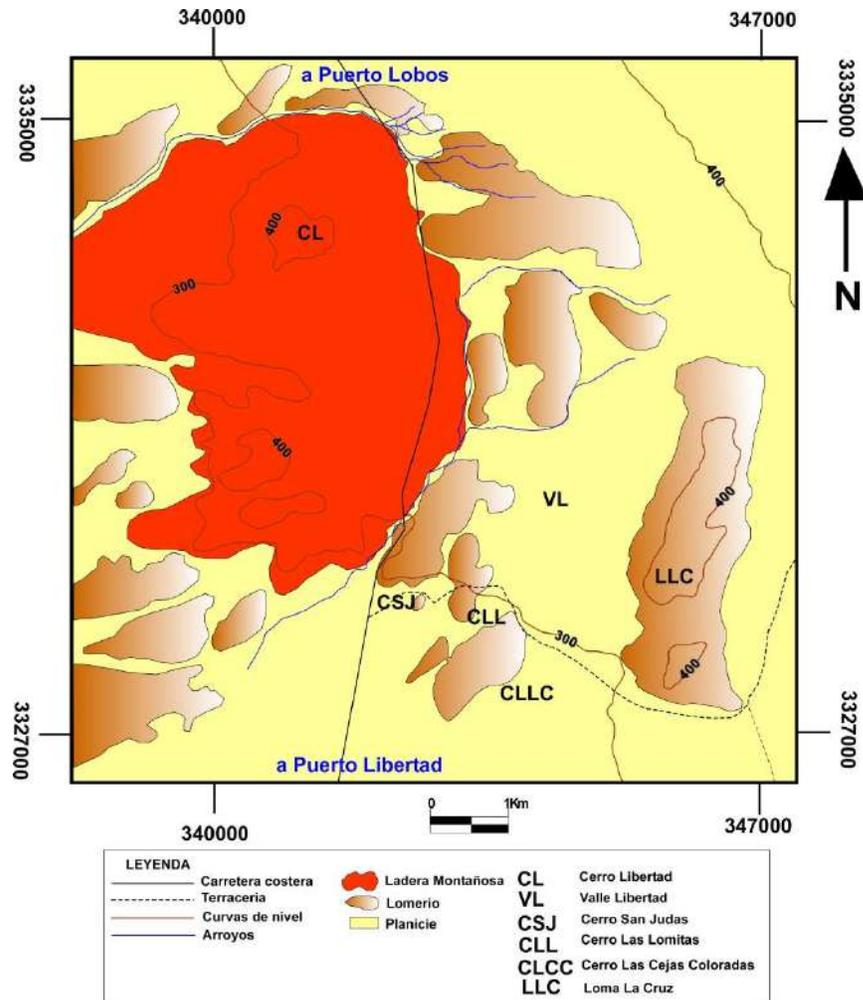
2.1 Fisiografía y Geomorfología

El estado de Sonora incluye parte de cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Llanura Sonorense, Sierras y Llanuras del Norte, Llanura Costera del Pacífico (INEGI, 1991). La provincia Llanura Sonorense abarca más del 50% del estado de Sonora y se divide en tres subprovincias: Desierto de Sonora, Llanura Costera y Sierra de Piamonte (Raisz, 1964; Humprey, 1956, Figura 3). Por lo que el área de estudio se ubica en la provincia Llanura Sonorense, dentro de la subprovincia del Desierto de Sonora.



**Figura 3.-** Imagen que muestra las Provincias Fisiográficas del Estado de Sonora; modificado de Humprey. (1956) y Raisz. (1964). Las abreviaturas corresponden a los principales poblados: NO Nogales, PL Puerto Libertad, IT Isla Tiburón, BK Bahía Kino, HM Hermosillo, GM Guaymas, M Moctezuma y Yécora; el recuadro amarillo marca la región de estudio.

Geomorfológicamente la región de estudio consiste en una serie de lomeríos y también una ladera montañosa (Figura 4), con una orientación preferente NE-SW. El rasgo más sobresaliente de la región es el Cerro Libertad compuesto por un cuerpo intrusivo y presenta la morfología más escarpada de la región.



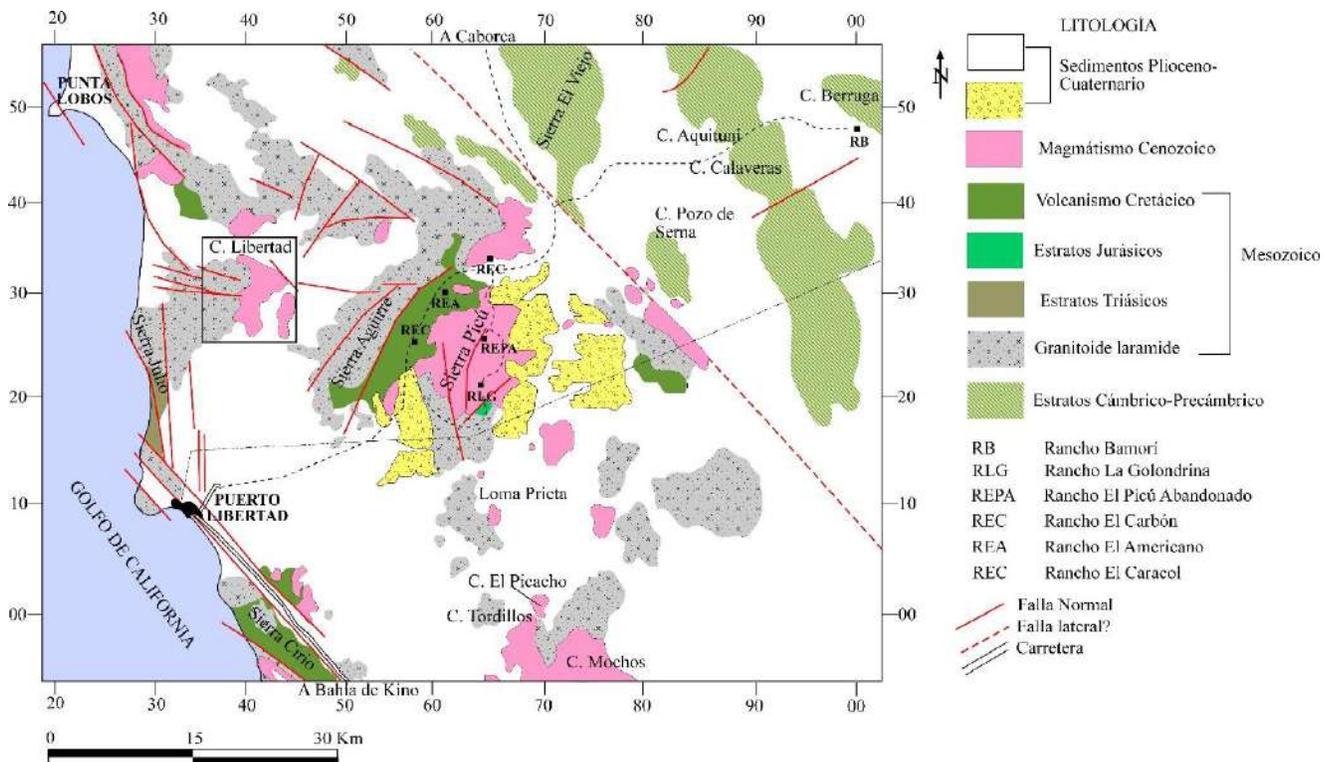
**Figura 4.-** Mapa geomorfológico general de la región correspondiente a Cerro Libertad.

## 2.2 Geología Regional

La porción noroeste del estado de Sonora ha sido objeto de varios estudios encaminados a determinar la geología, la estratigrafía y los eventos tectónicos, por parte de

investigadores e instituciones del sector público y privado. Algunos estudios son de carácter local pero gran parte de estos estudios son de tipo regional.

El principal interés se enfoca en el basamento Cámbrico-Precámbrico, existiendo un amplio conocimiento estratigráfico, paleontológico, estructural y en interpretaciones tectónicas (Cooper y Arellano, 1952; Eells, 1972; Gastil y Krummenacher, 1977, Longoria y González, 1978; Anderson y Silver, 1981; Stewart et al., 1984). También se ha reconocido en este sector rocas volcánicas en el límite entre secuencias sedimentarias fechadas del Cámbrico-Precámbrico (Centeno García et al., 2002) con un estudio de rocas máficas de la Formación La Ciénega y, recientemente, un estudio petrogenético de metabasitas anorogénicas del Cámbrico-Precámbrico de la Formación Puerto Blanco (Barrón- Díaz, 2013), en las inmediaciones del Rancho Bámuri (Figura 5).



**Figura 5.-** Geología regional del área de Puerto Libertad, Sonora; modificado de Gastil y Krummenacher (1977), Morales-Morales et al. (2007) y Gómez-Valencia (2014). En el recuadro se marca la región de estudio, en donde se sitúa el Cerro Libertad.

Los estratos triásicos (**Figura 5**) están representados por metasedimentos, esquistos y gneises que afloran a manera de techos colgantes sobre el batolito laramidico, siendo estos posiblemente correlacionables con la Formación Antimonio ([García-Cortés et al., 2002](#)), aunque [González-León, et al., \(2010\)](#), considera que esta formación, va del Pérmico al Jurásico Inferior.

Cubriendo discordantemente a la secuencia anterior, se presentan estratos jurásicos en las sierras Los Seris y Picú (**Figura 5**), que consisten en dos unidades sedimentarias de facies turbidíticas ([Morales-Morales et al., 2007](#)). En la Sierra Picú, [Gastil y Krummenacher \(1977\)](#), efectuaron un trabajo de reconocimiento, donde describieron 55 metros de capas rojas volcanoclásticas y más de 150 m de calizas con restos de algas, gasterópodos y otros restos orgánicos no identificados, lamentablemente no se tiene prueba directa de la edad de esta secuencia. Ambas unidades son intrusionadas por un granito atribuido al Cretácico. El batolito laramidico (Cretácico Superior-Paleoceno), fechado por [Gastil y Krummenacher \(1977\)](#) en  $70.1 \pm 1.19$  Ma, aflora en buena parte de la región de Puerto Libertad, principalmente en las sierras Julio, Los Seris y Picú (**Figura 5**), donde se presentan cuerpos intrusivos de composiciones félsicas a intermedias ([García-Cortez et al., 2002](#); [Morales-Morales et al., 2007](#)).

[Gastil y Krummenacher \(1977\)](#), hicieron un reconocimiento geológico entre Puerto Lobos y Bahía de Kino, dividiendo esta región en cuatro subprovincias y realizando dataciones isotópicas de rocas intrusivas y volcánicas del Mesozoico y Cenozoico, en el norte de Puerto Libertad fecharon una granodiorita en  $70.1 \pm 1.19$  Ma, un dique dacítico en  $63.9 \pm 2.0$  Ma y al este del Cerro Libertad fecharon una andesita obteniendo una edad de  $14.0 \pm 3.0$  Ma. Por otra parte, [Morales-Morales et al., \(2007\)](#) levantaron la cartografía geológica a escala 1:50:000 de esa región. Ellos mencionan la presencia de rocas posiblemente correlacionables con la Formación Tarahumara, aunque no mencionan los argumentos para esta comparación. Dicha cartografía, además, hace énfasis en las zonas de mineralización generadas por la intrusión de cuerpos graníticos laramidicos. [Verdugo-Mariscal \(1985\)](#), realizó una historia geológica del noroeste del Estado de Sonora, donde incluye parte de la región de estudio, en esta síntesis menciona diferentes etapas de magmatismo con los respectivos eventos tectónico-estructurales involucrados con los eventos comprensivos y extensivos.

Si bien se ha mencionado la presencia de rocas mesozoicas, estas pueden ser correlacionables con las formaciones Tarahumara de la parte central-este de Sonora (Wilson y Rocha 1949; McDowell et al., 2001 y Roldán-Quintana et al., 2002), El Tuli de la parte noreste de Sonora (Rodríguez-Castañeda 1994; García y Barragán, 2003) o con el Complejo volcánico El Charro (Jacques-Ayala 1983), en la porción noroeste de Sonora. Las tres secuencias corresponden a rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias del Cretácico Superior (McDowell et al., 2001; Roldán-Quintana, 2002; García y Jacques, 2011; González-León et al., 2000). Jacques Ayala (1983), realizó un estudio en la región de la Sierra el Chanate al noreste de Caborca, donde el Grupo El Chanate varía en espesor de 1200 a 3500 m, dividiéndose en tres unidades litoestratigráficas distintivas: las formaciones Sásabe, El Chanate y El Charro.

Las rocas volcánicas intermedias de la base de la Sierra Picú al este de Puerto Libertad (Morales-Morales et al., 2007 y Gómez-Valencia 2014), han experimentado intrusión de rocas graníticas, estas rocas volcánicas han sido correlacionadas tentativamente con rocas de la Formación Tarahumara (McDowell et al., 2001; Roldán-Quintana, 2002; García y Jacques, 2011; González-León et al., 2000). En la región de Puerto Libertad y en la Sierra Picú, dichas rocas volcánicas tienen una composición andesítica y riolítica, con manifestaciones efusivas y explosivas.

Finalmente, pocos estudios han sido realizados en las rocas del volcanismo cenozoico en la región (Figura 5). Destacan los trabajos de Gastil y Krummenacher (1977), que identificaron una secuencia volcánica andesítica-dacítica en las inmediaciones del Rancho La Golondrina en la Sierra Picú (Figura 5), donde fecharon la cima de la secuencia en  $12.7 \pm 0.4$  Ma. Gómez-Valencia (2014), describe una serie de unidades magmáticas miocénicas efusivas y explosivas de carácter orogénico las cuales son hasta el momento, la máxima representación de rocas con tendencia adakítica en el estado de Sonora. En ellas encontró vestigios de lavas y tobas ignimbríticas las cuales dividió en tres grandes unidades: Formación Volcánica La Golondrina, Formación Volcánica Cerro Picú y Formación Volcánica Las Lomitas. La Formación Volcánica La Golondrina se encuentra dividida en cuatro partes que son: derrames dacíticos-andesíticos, dacita vítrea, toba lítica dacítica y toba vítrea dacítica. La Formación Volcánica Cerro Picú muestra un apilamiento menor a 30 metros, que incluye por lo menos

cuatro derrames volcánicos constituidos de andesita-latita. La Formación Volcánica Las Lomitas se describió como un apilamiento de al menos, tres pulsaciones magmáticas de traquita-traquiandesita.

Oskin (2003), reconoció una unidad detrítica bien consolidada en las inmediaciones de Puerto Libertad, la cual sobreyace a las rocas volcánicas anteriores, fechando un clasto incluido en esta unidad en 12.44 Ma; este clasto se correlaciona con la Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe (IH/TSF).

Por último, las unidades geológicas más recientes son sedimentos del Plioceno-Cuaternario generados por la tectónica extensiva en la región, la cual provocó el comportamiento estructural controlado por fallas regionales laterales derechas propuesto por Gastil y Krummenacher (1977, Figura 5) y retomado por Harrison-Darin (2011).

### III GEOLOGÍA DE LA REGIÓN CERRO LIBERTAD

La región de Cerro Libertad para su estudio, fue dividida en siete unidades correspondiendo cronológicamente a las siguientes secuencias: [I] Granitoide *laramide*; [II] Complejo volcánico Libertad; [III] Basalto El Puente; [IV] Unidad detrítica tipo Báucarit; [V] Basalto Las Lomitas y [VI] Miembro volcánico Las Cejas Coloradas y [VII] Unidad detrítica plioceno-cuaternario.

#### 3.1 Granitoide *laramide* (Cretácico Tardío)

Aflora exclusivamente en la porción oeste del área de estudio (**Figura 6**), y está afectado en cierto grado por fracturamiento. [Morales-Morales, et al. \(2007\)](#), en su plano geológico H12A-85 escala 1:50,000, cartografiaron cuerpos intrusivos descritos como: (1) Granito-Granodiorita; (2) Granodiorita-Diorita y (3) Pórfido Riolítico. Ellos describen que este cuerpo intrusivo granitoide es sobreyacido por un apilamiento volcánico afín a la *Formación Tarahumara* del Cretácico Superior (descrita en otras localidades por [Jacques - Ayala, 1983](#); [McDowell et al., 2001](#); [Roldán-Quintana, 2002](#)), y nombrada en este trabajo como Complejo volcánico Libertad. En el intrusivo granitoide es donde se concentra una alteración argílica y potásica, además [Morales-Morales, et al. \(2007\)](#), reportan en estas rocas, la localización de dos importantes prospectos mineros de Au-Ag, correspondientes a las Minas El Cascarrabias y El Julio.

En la región de estudio, el intrusivo granitoide reconocido se manifiesta al menos de tres maneras distintas, consistentes de diferencias tanto composicionales como morfológicas, las cuales se describen a continuación. El primer cuerpo plutónico es predominantemente de composición granodiorítica, y morfológicamente muestra escarpes muy pronunciados (**Figura 7A**), este cuerpo tiene un color gris claro con tonos en color crema, en superficie de intemperismo. El segundo cuerpo intrusivo se encuentra cortando al cuerpo anterior (**Figura 7A**) y también es de composición granodiorítica de tonalidad melanocrática con abundancia de anfíbol y con una intensa alteración propilítica (epidota+calcita+cuarzo+calcita); en superficie

de intemperismo presenta un color café amarillento y en superficie fresca un color verde oscuro con algunas manchas blancas.

Por otra parte, en el sector de estudio también existen otros dos cuerpos, uno plutónico de composición granodiorita-diorita y un pórfido de composición riolítica, los cuales son afectados por una alteración argílica y potásica, siendo además estos cuerpos los que presentan una mineralización Au-Ag, según [Morales y Morales et al., \(2007\)](#).

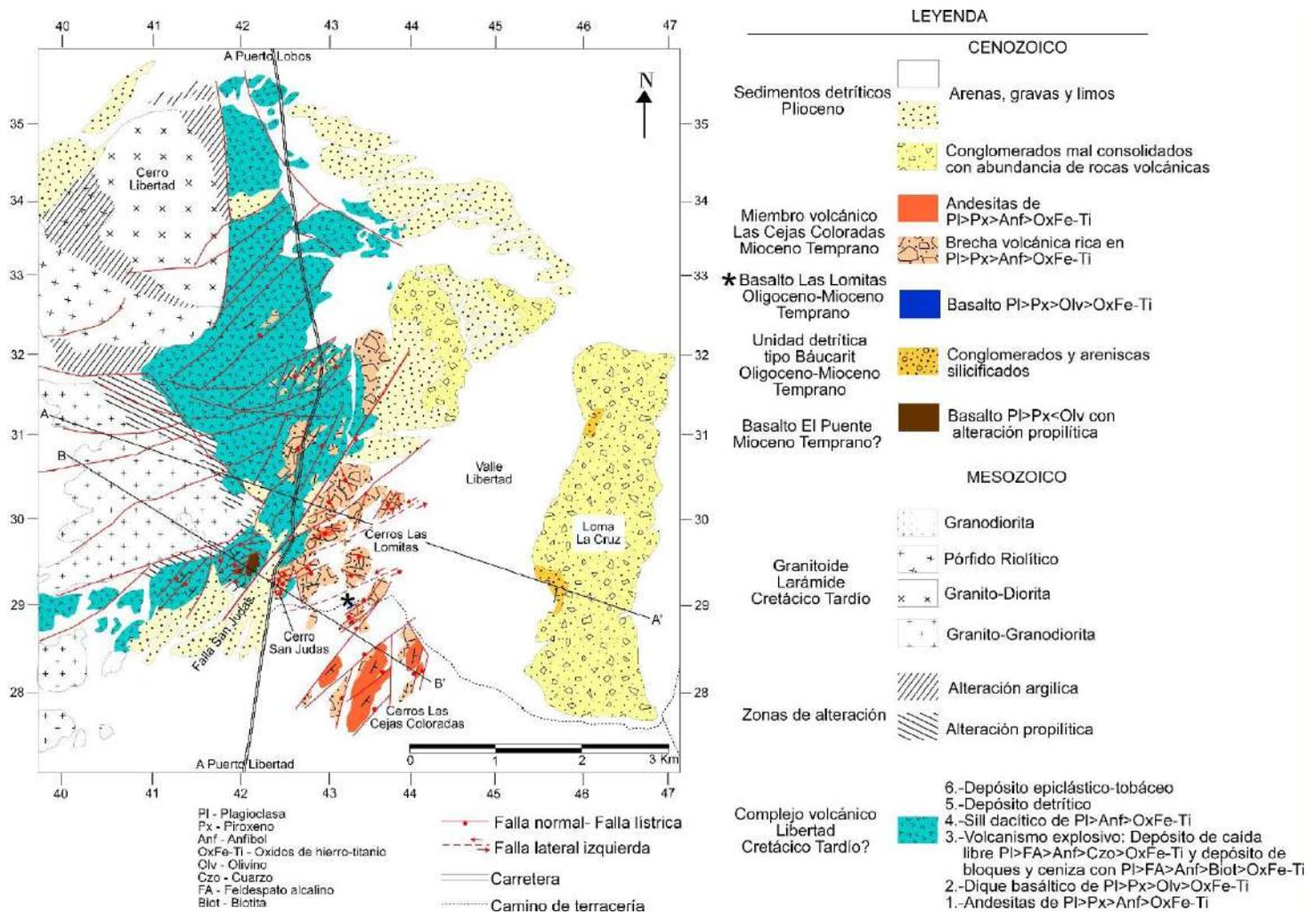
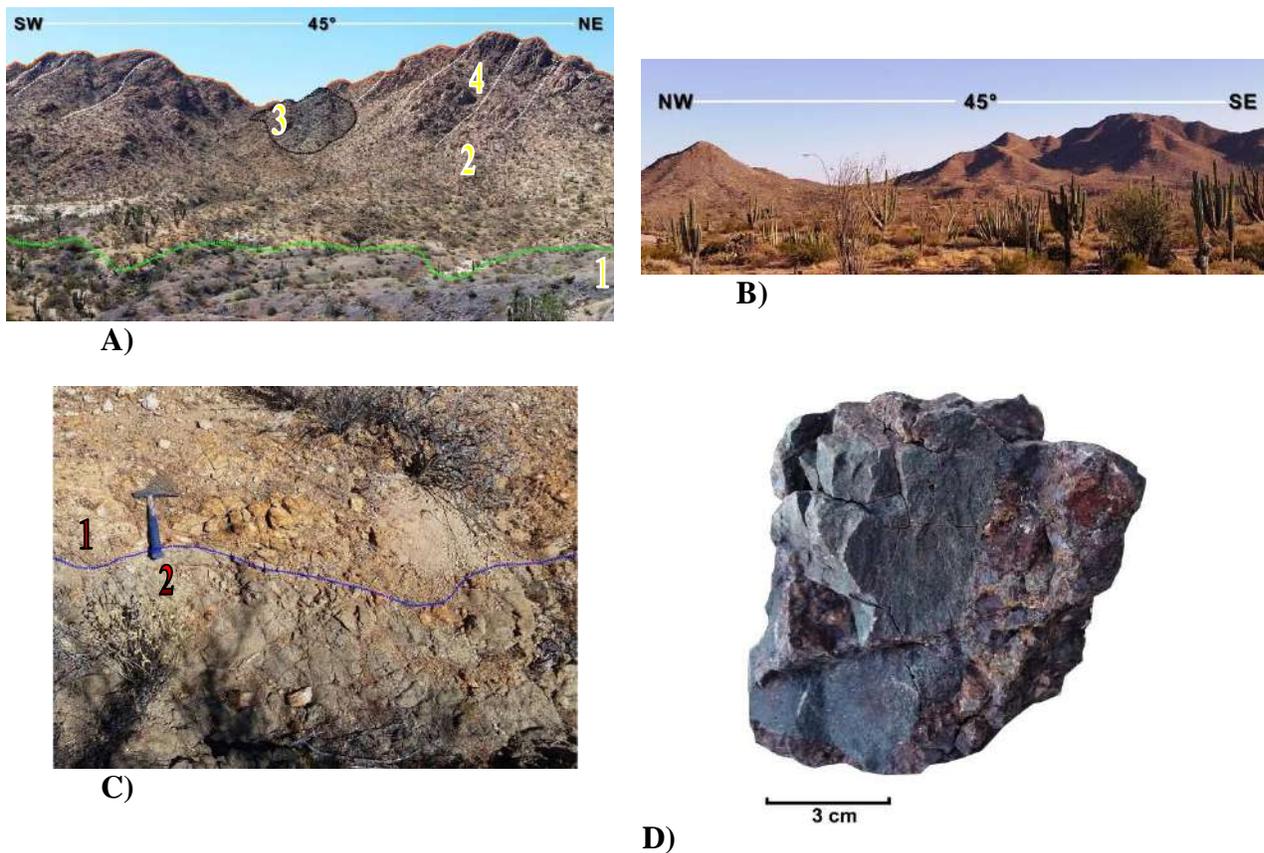


Figura 6.- Mapa geológico de la región de Cerro Libertad, Puerto Libertad, Sonora.

Estos intrusivos suelen mostrar morfologías abruptas (Figura 7A) y ocasionalmente suaves a manera de lomeríos (Figura 7B), y zonas de contacto donde se incrementa el grado de alteración argílica y por sectores propilítica. (Figura 7C).

Finalmente, se pudo reconocer una relación de corte que muestra que el granitoide *laramide*, intrusiona al Complejo volcánico Libertad ocasionando una aureola de contacto donde se desarrolla un incremento de la alteración propilítica en esta zona, además se detectó la presencia de minerales verdes como malaquita (Figura 7D).



**Figura 7.-** A) Fotografía panorámica que muestra: 1.- Afloramiento del Complejo volcánico Libertad en contacto con 2.- Granitoide *laramide*, el cual presenta sectores con diaclasas inclinadas en dirección noreste. El cuerpo plutónico anterior se encuentra intrusionado por 3.- Cuerpo granodiorítico; B) Intrusivo granítico con morfología suave en lomeríos. C) Contacto entre cuerpos intrusivos de composición 1.-granítica y 2.- granodiorítica, que intrusiona al cuerpo granítico 1, donde se destaca el alto fracturamiento y la intensidad de alteración; y D) Muestra de mano de una brecha andesítica muy alterada, esta muestra fue tomada en la zona de contacto entre el granitoide *laramide* y el Complejo volcánico Libertad.

### 3.2 Complejo volcánico Libertad (Cretácico Tardío?)

Se nombra por primera vez en la región de Puerto Libertad, al Complejo volcánico Libertad, compuesto por seis unidades litológicas asociadas a pulsos volcánicos fluidales, volcanismo explosivo, rocas hipabisales, secuencias epiclásticas-tobáceas y secuencias detríticas (Figura 6 y 8), unidades que se describen a continuación de la base a la cima:

(1) Pulsos volcánicos andesíticos de base.- La secuencia comienza con una alternancia de rocas intermedias de composición principalmente andesítica (Figura 8) con textura porfídica que varían en composición:  $Pl > Px > OxFe-Ti$  y  $Pl > Px > Anf > OxFe-Ti$  con diferencias en la intensidad de alteración propilítica con epidota + calcita + óxidos de hierro, lo que ocasiona que las rocas presenten color verde con varias tonalidades. En la porción centro-noroeste de la región de estudio, este tipo de rocas comienzan con porciones brechoides ricas en clastos de andesita y dacita (Figuras 9A y 9B) y abundancia en vetillas rellenas de carbonatos de calcio. Particularmente en el sector centro, esta secuencia presenta foliación primaria (Figura 9C) y muestra sitios con evidente plegamiento tectónico, por ejemplo, en la Sierra El Chanate se ha reportado que las rocas cretácicas tienen este tipo de deformación (Jacques - Ayala, 1983).

(2) Dique basáltico 1.- Cuerpo hipabisal fuertemente oxidado de composición basáltica, con textura porfídica de  $Pl > Px > Olv > OxFe-Ti$  (Figura 8). Este cuerpo se encuentra muy afectado por alteración propilítica, en superficie de intemperismo presenta un color amarillo grisáceo y en superficie fresca tiene color gris claro con manchas rojizas. En el campo, se encontró que este cuerpo es discordante y corta a las rocas volcánicas de base descritas anteriormente (Figura 8), además de presentar un intenso fracturamiento (Figura 9D).

(3) Rocas volcánicas de origen explosivo.- Constituidas por dos conjuntos litológicos de al menos 30 metros de espesor, que de la base a la cima son: una brecha volcánica color rojizo fuertemente fracturada, seguida de un depósito piroclástico de caída libre con fenocristales de  $Pl > FA > Anf > Czo > OxFe-Ti$ , este depósito piroclástico silicificado muestra estratificación con gradación normal (Figura 9E). Este depósito tiene color blanco a blanco verdoso y está cubierto por un depósito de bloques y ceniza, moderadamente consolidados (Figura 8). Presenta estratificación con intervalos de 20 cm de espesor, con horizontes un poco más consolidados, los cuales a su vez están

afectados por alteración propilítica con calcita + epidota, presentando un color gris púrpura a gris rojizo (Figura 9E).

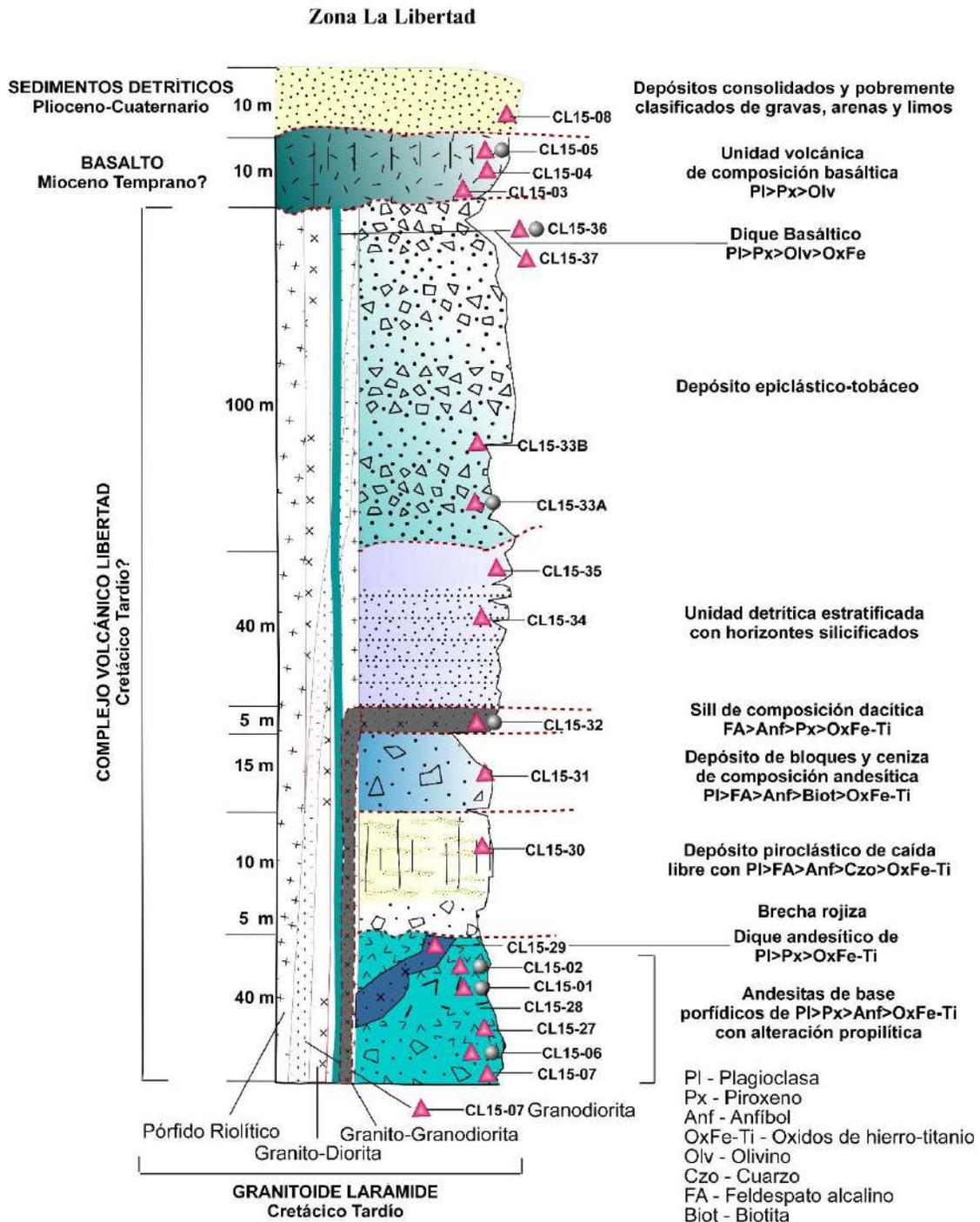


Figura 8.- Columna estratigráfica del Complejo volcánico Libertad.

(4) Sill dacítico.- Este sill aflora concordantemente entre el volcanismo explosivo y el depósito detrítico de color rojizo (Figura 8 y 9E), de composición dacítica con una textura porfídica de fenocristales de FA>Anf>Px >OxFe-Ti. En superficie de intemperismo presenta un color café rojizo y en superficie fresca un color gris claro.

(5) Depósito detrítico.- Esta unidad está estratificada con horizontes silicificados, tiene un espesor aproximado de 40 metros y presenta color gris a gris amarillento.

(6) Depósito epiclástico-tobáceo.- Este depósito está formado por tufitas y detritos, predominando un paraconglomerado polimíctico con 30% de matriz sostenida, con clastos subredondeados, moderadamente consolidados (Figura 9H), los clastos son de composición andesítica a dacítica con tamaños que van desde 1 a 3 cm, contenido de cristales de Pl>Anf>FA>Bta.

(7) Dique basáltico 2.- En general, es de color gris claro con manchas rojizas en superficie fresca, mientras que en superficie de intemperismo tiene un color amarillo grisáceo. Este cuerpo presenta una ligera vesicularidad y abundantes huecos relictos de minerales preexistentes, presenta una textura porfídica de Pl>Px>Anf>Olv>OxFe-Ti en una matriz microcristalina, este dique podría ser más joven y no ser parte del CVL.

Hacia los bordes, este cuerpo intrusivo se vuelve de grano fino, sin embargo sigue guardando las mismas características a nivel afloramiento. Este dique presenta una fuerte alteración propilítica con epidota y calcita.



A)



B)

Las figuras continúan en la siguiente página...



C)



D)



E)



F)



G)



H)

Las figuras continúan en la siguiente página...



I)



J)

**Figura 9.-** Fotografías de afloramiento de las rocas que componen el Complejo volcánico Libertad. **A)** Brecha andesítica, con clastos de la misma composición; **B)** Brecha andesítica con clastos de composición andesítica a dacítica; **C)** Cuerpo de roca andesítico, donde las líneas amarillas muestran una estructura sigmoide; **D)** Dique de composición basáltica fuertemente fracturado; **E)** Imagen panorámica donde se aprecia el contacto entre las siguientes unidades del Complejo volcánico Libertad: 1.- depósito de caída libre, 2.- depósito de bloques y ceniza, 3.- sill dacítico, 4.- depósito epiclástico-tobáceo y 5.- intrusivo granodiorítico; **F)** Fotografía que muestra la parte superior del Complejo volcánico Libertad: 1.- depósito epiclástico-tufáceo, 2.- depósito detrítico estratificado y al fondo se aprecia el 3.- intrusivo granodiorítico; **G)** Unidad superior del Complejo volcánico Libertad correspondiente al depósito epiclástico-tobáceo; **H)** Paraconglomerado polimíctico, moderadamente consolidado, correspondiente al depósito epiclástico-tobáceo; **I)** Autobrecha de composición basáltica correspondiente a la base del Basalto El Puente; **J)** Facies superior muy fracturada del Basalto El Puente.

El Complejo volcánico Libertad, es afectado por una alteración propilítica intensa a moderada, el reconocimiento de estas unidades en campo se vuelve un poco difícil debido a la importante afectación estructural dominada por fallas normales, laterales y lítricas. Las secuencias litológicas son correlacionables con otras secuencias similares en otras localidades de Sonora y asignadas al Mesozoico, como por ejemplo la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha 1949; McDowell et al., 2001 y Roldán-Quintana et al., 2002), Formación El Tuli (Rodríguez-Castañeda 1994) y Complejo volcánico El Charro (Jacques-Ayala 1983 y Harrar, 1989). Por tal motivo, esta correlación litológica permite proponer una edad Cretácico Superior al Complejo volcánico Libertad (En el capítulo de discusión y conclusiones se abordará más de esta temática).

### 3.3 Basalto El Puente

En discordancia a la secuencia del Complejo volcánico Libertad, en la porción suroeste del área de estudio (**Figura 6**), se observan escasos afloramientos de una unidad máfica con tres facies litológicas: facies brechoide, facies masiva y facies superior prismática (**Figura 8**).

Es decir de la base a la cima se reconoció:

- a) La base presenta una brecha altamente fracturada (**Figura 9I**);
- b) La parte intermedia presenta una facies masiva muy fracturada con intensa alteración propilítica donde la mayoría de los minerales se presentan a manera de pseudomorfos de piroxenos con centros epidotizados y bordes rojizos de oxidación.
- c) La cima presenta una facies prismática, intemperizada en bloques y con importante silicificación (**Figura 9J**).

De forma general la textura del Basalto El Puente, es porfídica con pseudomorfos de  $Pl > Px > Ol > OxFe-Ti$ ; a nivel afloramiento tiene una tonalidad café rojizo, café púrpura a café verdoso claro, con alto fracturamiento, silicificación y alteración propilítica.

### 3.4 Unidad detrítica tipo Báucarit

La unidad detrítica tipo Báucarit aflora principalmente en la porción Este de la región de estudio en la base de la loma La Cruz (**Figura 6**). Esta loma había sido mapeada en su totalidad como Formación Báucarit (**Morales-Morales et al., 2007**), sin embargo, en este trabajo se reconoció que las rocas tipo Báucarit afloran exclusivamente en la base de la loma La Cruz y está cubierta por sedimentos detríticos del Plioceno-Cuaternario, cuyos sedimentos son ricos en rocas volcánicas de composición andesítica-dacítica, posiblemente derivados de la destrucción del volcanismo del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas. Morfológicamente se presenta como lomeríos con el clásico intemperismo en ruinas que caracteriza a esta unidad en otras localidades de Sonora (**Figura 11A**). Esta secuencia tiene un espesor de 70 metros, está estratificada (**Figura 10**), tiene una abundantes líticos volcánicos intermedios ricos en anfíbol, y localmente se observa gradación normal y algunos horizontes tienen gradación

inversa (Figura 11B). De forma general estas rocas están bien consolidadas y presentan color gris amarillento rojizo en el afloramiento intemperizado y gris claro a gris amarillento en superficies frescas; por otro lado concentran carbonatos de calcio en planos de debilidad (Figura 11C).

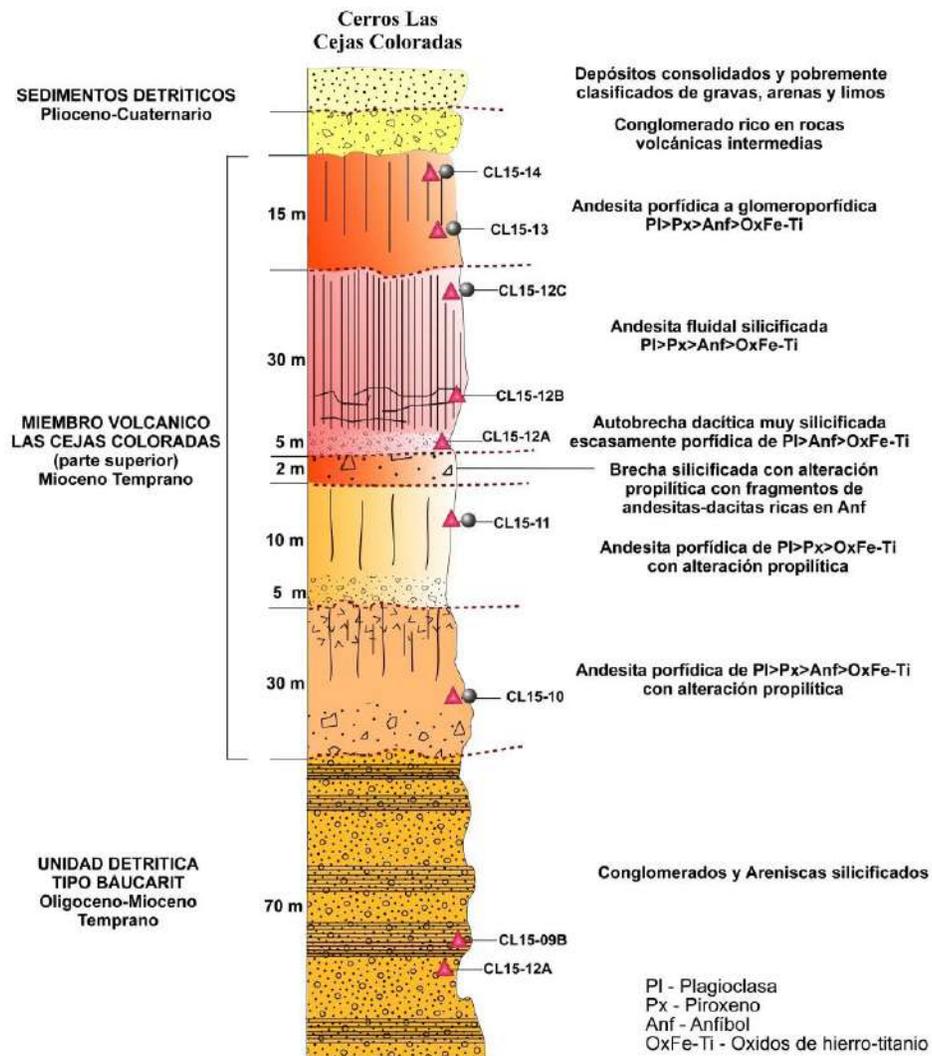
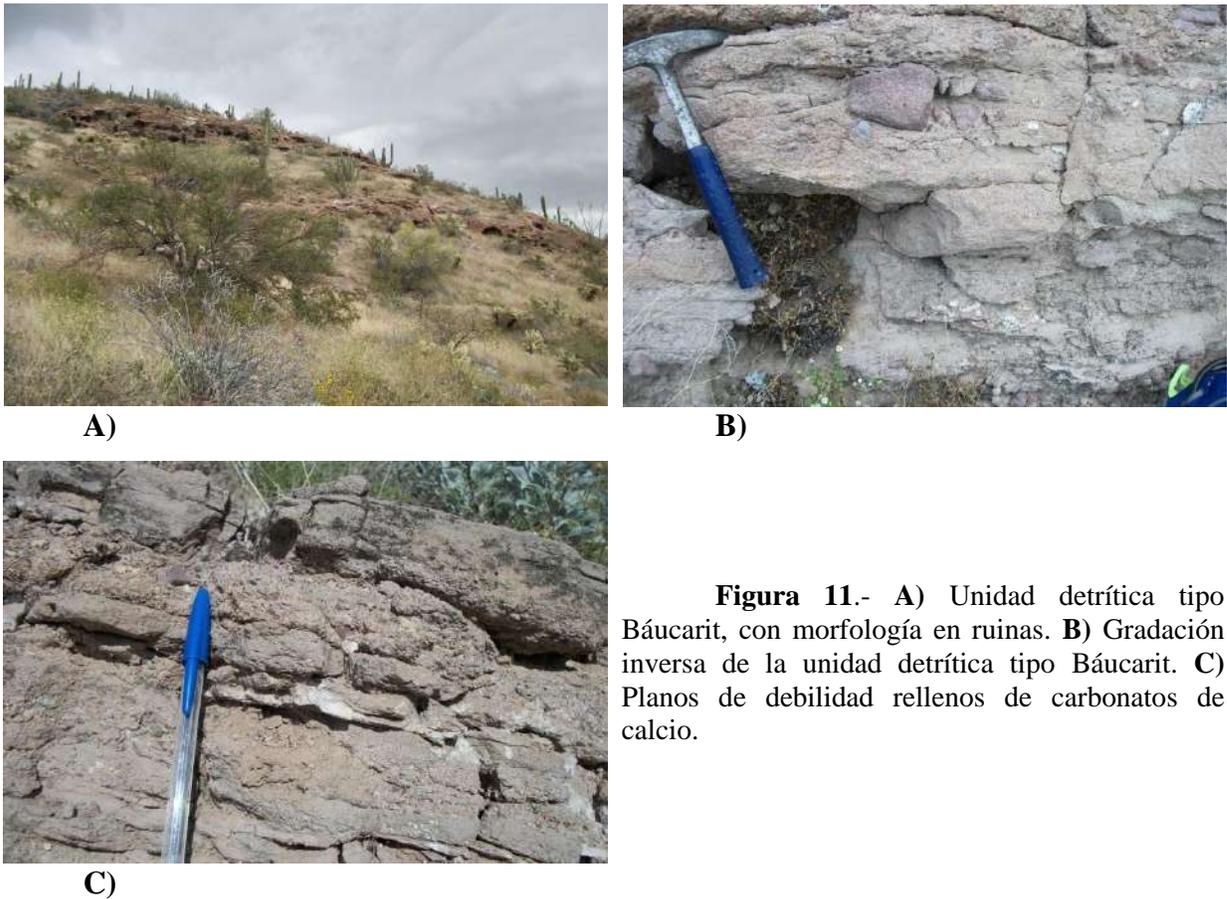


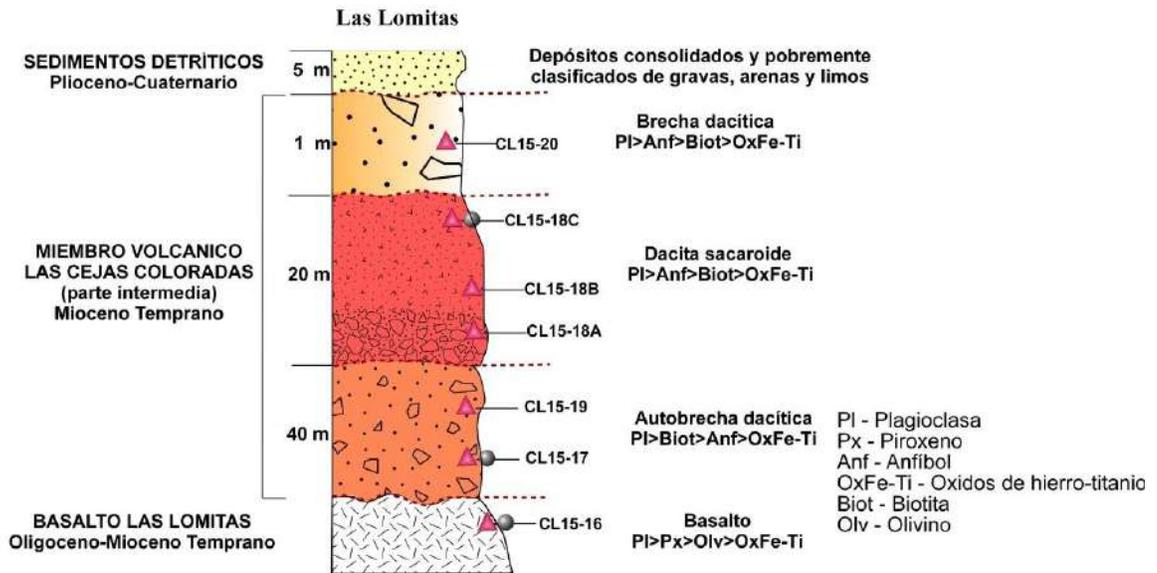
Figura 10.- Columna estratigráfica compuesta del área Cerro Las Cejas Coloradas.



**Figura 11.-** A) Unidad detrítica tipo Báucarit, con morfología en ruinas. B) Gradación inversa de la unidad detrítica tipo Báucarit. C) Planos de debilidad rellenos de carbonatos de calcio.

### 3.5 Basalto Las Lomitas

El Basalto Las Lomitas aflora al sur de la zona denominada Cerros Las Lomitas, al sureste del área de estudio (Figura 6). Esta unidad es de composición basáltica con textura porfídica a glomeroporfídica de  $Pl > Px > Ol > OxFe-Ti$  (Figura 12); se presentan en afloramientos muy reducidos, con un espesor aproximado de 5 metros, se encuentra intensamente fracturado, alterado y tiene color café oscuro (Figura 13). Esta unidad aflora en la base de la secuencia litológica de Las Lomitas (Figura 12) y presenta una intensa alteración propilítica con predominancia de calcita, epidota y zeolitas en planos de debilidad.



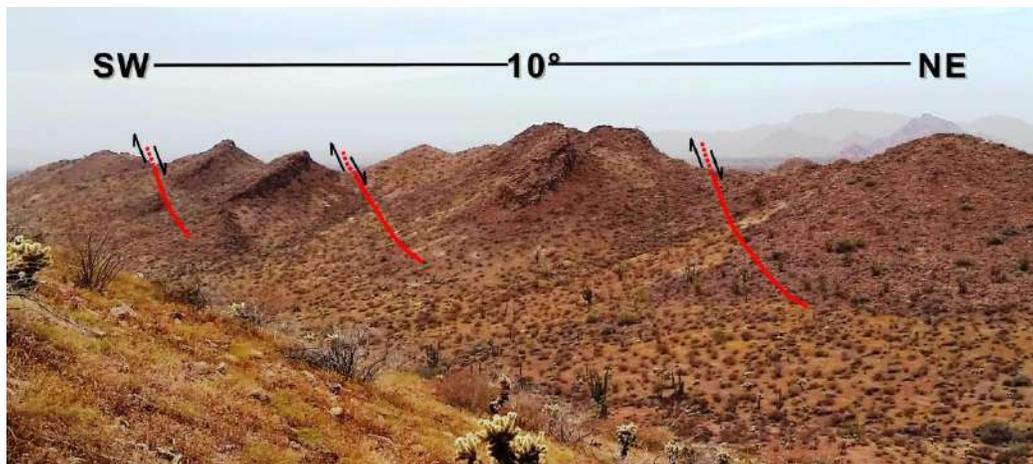
**Figura 12.-** Columna estratigráfica de la región de los Cerros Las Lomas.



**Figura 13.-** Vestigios del afloramiento del Basalto Las Lomas; nótese el intenso fracturamiento que caracteriza a la unidad litológica.

### 3.6 Miembro volcánico Las Cejas Coloradas

Se designa como Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (MVLCC), a una serie de derrames volcánicos de composición andesítica a dacítica que forman parte o se incluyen en la parte superior de la unidad detrítica tipo Báucarit. Este volcanismo está representado por brechas de base, facies fluidales y facies prismáticas, seccionadas por fallas normales y lístricas (**Figura 14**).



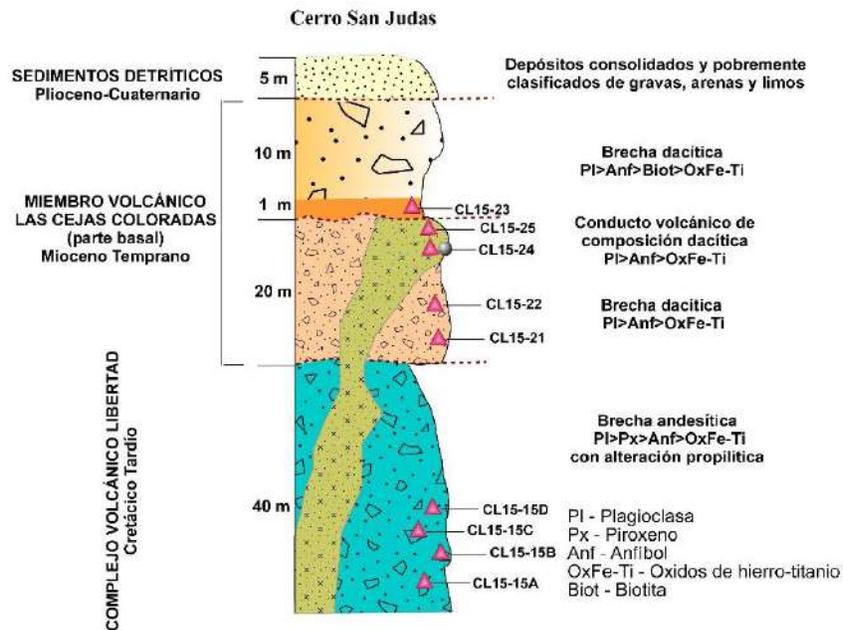
**Figura 14.-** Fotografía de las rocas volcánicas del MVLCC, donde se muestra el seccionamiento causado por la presencia de fallas lístricas.

Con la finalidad de tener una mejor comprensión de este miembro volcánico y así poder diferenciar las características de estos derrames, se decidió dividir en tres localidades, al sector donde aflora esta importante secuencia: Cerro San Judas, Cerros Las Lomitas y Cerros Las Cejas Coloradas.

#### Cerro San Judas

La secuencia de rocas presente en el Cerro San Judas (**Figura 6 y 16**), comienza con una alternancia de rocas intermedias de composición principalmente andesítica con textura porfídica de Pl>Px>OxFe-Ti y Pl>Px>Anf>OxFe-Ti (**Figura 16A**). La variación de la intensidad de alteración propilítica con epidota + calcita + óxidos de hierro, ocasiona que las

rocas de color verde cambien sus tonalidades; estas rocas corresponden al Complejo volcánico Libertad (Figura 6). En la porción centro-noroeste de la región de estudio, este tipo de rocas comienzan con sectores brechoides ricos en clastos de andesita, dacita y abundancia en vetillas rellenas de carbonatos de calcio.



**Figura 15.-** Columna estratigráfica del Cerro San Judas.

Sobreyaciendo al Complejo volcánico Libertad, se reconoció una secuencia de brechas de composición dacítica de PI>Anf>OxFe-Ti (Figura 15), que contiene clastos de tamaños variables que llegan a alcanzar de 1 a 2 m (Figura 16B). En algunos casos se reconoce una textura fluidal con cristales pseudomorfos de anfíbol; se sigue presentando la alteración propilítica de epidota + calcita, con planos de debilidad rellenos de carbonatos de calcio. Hacia la cima de estas rocas, con un espesor de 10 metros aproximadamente, corona a la secuencia una brecha dacítica rica en PI>Anf>OxFe-Ti (Figura 16C).

La secuencia litológica anteriormente descrita, es cortada por un cuerpo intrusivo hipabisal, que por las relaciones de campo se reconoce como el remanente de un conducto alimentador o una inyección magmática (Figuras 16 D, E y F), prueba de ello es que no presenta vesicularidad, tiene una matriz cristalina y un brechamiento hacia los bordes. Una de

las características importantes reconocidas en este cuerpo intrusivo, es que presenta una ligera textura tipo huella de pavo (*turkey track*). Morfológicamente este cuerpo aflora a manera de crestones (**Figura 16D**), con estructuras sigmoides que se atribuyen a cizallamiento (**Figura 16F**) y está cortado por fallas, algunas con espejos de falla y estrías (**Figura 16G**). En superficie de intemperismo este intrusivo presenta un color morado rojizo y en superficie fresca, un color morado grisáceo.



A)



B)



C)



D)

Las figuras continúan en la siguiente página...



E)



F)



G)

**Figura 16.-** **A)** Escarpe en el Cerro San Judas, donde aflora gran parte de la secuencia de brechas andesíticas del Complejo volcánico Libertad; **B)** Cuerpo de roca andesítico, mostrando la abundancia en líticos de grandes dimensiones; **C)** Cambio de facies en la brecha dacítica superior del Cerro San Judas; **D)** Fotografía que muestra un crestón correspondiente al cuerpo intrusivo que corta la secuencia de rocas del Cerro San Judas; **E)** Sección esquemática del Cerro San Judas afectado por fallas normales, donde en color amarillo se delimita a diques o conductos magmáticos; **F)** Estructuras sigmoidales que se forman en los crestones de los conductos magmáticos, las cuales son dominadas por fallas laterales izquierdas; **G)** Espejo de falla con estrías, evidencia de falla normal que afecta a los conductos magmáticos.

### Cerros Las Lomitas

Los afloramientos correspondientes a los Cerros las Lomitas, se localizan en la porción centro sureste de la región de estudio (Figura 6). La secuencia comienza en la base con una

roca de composición basáltica, color café oscuro, la cual se identificó como Basalto Las Lomitas (Figuras 12 y 13). Sobreyaciendo a este basalto, aflora una auto-brecha de color rojizo de composición dacítica, porfídica a glomeroporfídica de Pl>Biot>FA>Anf>OxFe-Ti (Figura 13 y Figura 17A), esta unidad presenta un fuerte fracturamiento y planos de debilidad rellenos de carbonatos de calcio + manganeso. En discordancia le sobreyace litológicamente una dacita sacaroide porfídica de Pl>Anf>Bta>OxFe-Ti (Figura 17B), la cual se encuentra intensamente fracturada con abundancia en alteración propilítica y un fuerte contenido en carbonatos de calcio, esta dacita está seccionada hasta cuatro veces por fallamiento lístrico. A ambas unidades les sobreyace otra brecha de composición dacítica. Debido a la intensidad del fallamiento pareciera que existen cambios en el tipo de roca, ya que este fracturamiento propicia una alteración más intensa.



A)



B)

**Figura 17.-** A) Brecha rojiza de composición dacítica y B) Facies masiva de la dacita sacaroide con alteración propilítica.

#### Cerro Las Cejas Coloradas

Se nombran como unidad Cerro Las Cejas Coloradas, a un conjunto de derrames volcánicos de composición andesítica a dacítica en la porción sureste del área de estudio (Figura 6), los cuales corresponden a mesetas basculadas de color rojizo (Figuras 18 A y B). En esta localidad se encuentra aflorando la parte superior del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas compuesto, por lo menos, por cinco pulsos volcánicos que generaron derrames de composición intermedia (Figura 10).

Esta serie de derrames comienza por dos secuencias volcánicas de  $Pl>Px>Anf>OxFe-Ti$  y  $Pl>Px>OxFe-Ti$ , con sus respectivas brechas de base y una alteración propilítica muy importante. En discordancia, le sobreyace una brecha de base, andesítica a dacítica, de  $Pl>Px>Anf>OxFe-Ti$ , muy silicificada, con alteración propilítica y abundancia de anfíbol (Figura 19A), con fragmentos líticos que van de 1 a 3 cm, y presenta planos de debilidad rellenos de sílice y caliche. Sobreyaciendo a esta unidad, se encuentra una auto-brecha con textura porfídica de composición andesítica de  $Pl>Anf>OxFe-Ti$ , de color gris violeta (Figura 19B), con fragmentos de roca que llegan a medir hasta 4 cm, presenta una alta silicificación. En la cima de esta brecha se presenta otro cambio de facies, a una más fluidal de composición andesítica, con textura porfídica a glomeroporfídica, de  $Px>Anf>OxFe-Ti$ , con una intensa silicificación y de un color morado grisáceo en superficie fresca y color amarillento naranja en superficie de intemperismo. Finalmente, se reconoce otro cambio de facies prismática (Figura 19C), de composición andesítica, porfídica de  $Pl>Anf>Px$ ; existe una diferencia notoria en estas facies prismáticas, ya que en la cima de este derrame, la roca se vuelve mucho más rica en anfíbol.

**A)****B)**

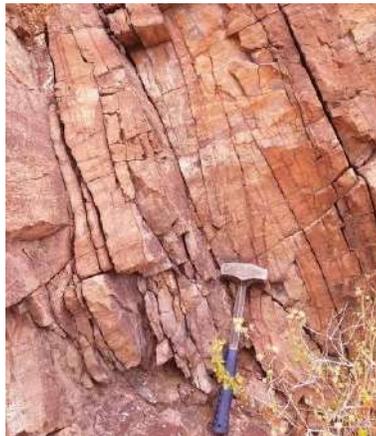
**Figura 18.-** Morfología de los afloramientos del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas: **A)** Con vista en dirección oeste se aprecian lomeríos de rocas volcánicas de composición andesítica-dacítica; con escarpes pronunciados; y **B)** Viendo al sur se encuentra un lomerío con elevaciones bajas, menores a 200 m, compuesto de rocas volcánicas de composición andesítica-dacítica y con escarpes pronunciados.



A)



B)



C)

**Figura 19.-** A) Brecha de base de composición andesítica – dacítica, con planos de debilidad rellenos de carbonatos de calcio; B) Autobrecha porfídica de composición andesítica muy silicificada; y C) Facies prismática del pulso volcánico superior.

### 3.7 Unidad detrítica Plioceno-Cuaternario

Esta unidad se presenta en forma de terrazas (Figura 6), en las cuales se depositó material detrítico como grava, arena y limo (Figura 20), dando origen a terrazas aluviales moderadamente consolidadas. Esta unidad tiene características especiales ya que es la cobertura de la mayoría de las rocas descritas anteriormente y además está formada por la destrucción de las mismas.



**Figura 20.-** Imagen donde se aprecia en la base el Complejo volcánico Libertad y el contacto, hacia la cima, con una terraza aluvial moderadamente consolidada con materiales como grava, arenas y limo.

#### IV PETROGRAFÍA DEL CERRO LIBERTAD

Se realizaron secciones delgadas de 30 muestras de roca representativas, de un total de 52 ejemplares recolectados en la región de estudio. El análisis petrográfico se llevó a cabo utilizando un microscopio marca LEICA del Laboratorio de Petrografía del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, un microscopio modelo Nikon Eclipse E400 y un microscopio modelo OLYMPUS BX51, estos últimos del Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México. Con base en este análisis se pudo agrupar la gran variedad de rocas magmáticas, epiclásticas, tobáceas y sedimentarias del área de estudio, mediante sus asociaciones mineralógicas y texturales, apoyado de las descripciones obtenidas en el trabajo de campo.

A continuación se muestra en orden cronológico el resultado del análisis petrográfico de la región del Cerro Libertad en Puerto Libertad. Los minerales identificados se representan con las siguientes abreviaturas: Pl.- Plagioclasa; FA.- Feldespato Alcalino; Oliv.- Olivino; Anf.- Anfíbol; Cpx.- Clinopiroxeno; Opx.- Ortopiroxeno; Czo.- Cuarzo; Biot.- Biotita; y OxFe-Ti.- Óxidos de hierro-titanio.

##### 4.1 Granitoide *laramide* (Cretácico Tardío)

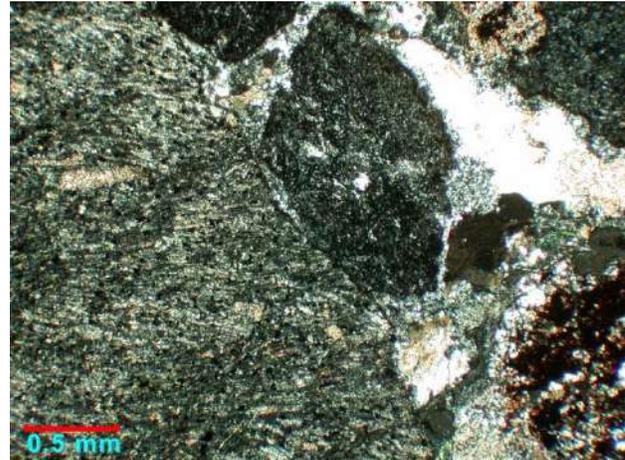
El granitoide *laramide* en sección delgada presenta una asociación mineralógica de Pl>FA>Czo>Anf>Biot>OxFe-Ti (**Figura 21A**), con una textura granular, de grano medio, con formas predominantemente subhedral, con una intensa alteración propilítica. Las plagioclasas presentan una textura en criba y una alteración selectiva a sericita; en el caso del anfíbol, la alteración es selectiva a actinolita. En este ejemplar se presenta abundante de anfíbol y OxFe-Ti, además tanto las plagioclasas como los anfíboles presentan golfos de corrosión. La forma de los cristales va de subhedral a anhedral, con tamaños que van desde 1 a 2.5 mm.

Se tomó una muestra de la aureola de metamorfismo de contacto entre el granitoide *laramide* y el Complejo volcánico Libertad, la cual corresponde a una brecha con clastos de

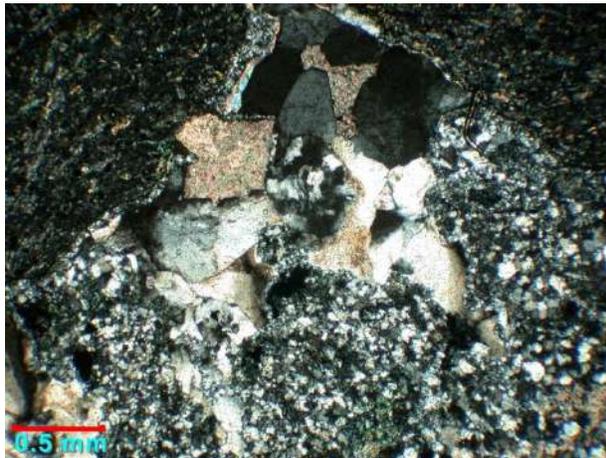
composición andesítica (Figura 21B), con sectores que presentan evidencias de deformación con ligera foliación y minerales de cuarzo secundario (Figura 21C), además presenta alteración propilítica con minerales como calcita+sericita+clorita+epidota.



A)



B)



C)

**Figura 21.**-Fotomicrografías representativas del granitoide *laramide* y de la brecha andesítica de la aureola de metamorfismo de contacto, tomadas con un objetivo 4x y con luz polarizada: **A)** Granodiorita de Pl, FA, Czo y Anf; en esta imagen se ilustra la alteración propilítica; **B)** Brecha de composición andesítica, en donde se puede observar una ligera foliación en un clasto de la misma composición; y **C)** Imagen que muestra la recrystalización de cuarzo secundario y espacios rellenos con calcita.

**Tabla 1.-** Muestras correspondientes a el granitoide *laramide* y a la brecha andesítica; coordenadas UTM 12R datum NAD 27.

| Muestra | N       | E      | Roca              | Textura   | Fenocristales              |
|---------|---------|--------|-------------------|-----------|----------------------------|
| CL15-38 | 3329782 | 341366 | Granodiorita      | Granular  | Pl>FA>Czo>Anf>Biot>OxFe-Ti |
| CL15-39 | 3329762 | 341448 | Brecha andesítica | Porfídica | Pl>Cpx                     |

## 4.2 Complejo volcánico Libertad (Cretácico Tardío?)

La base de esta secuencia está representada por una serie de derrames volcánicos, el primer derrame (muestra CL15-06) se caracteriza petrográficamente como una dacita de Pl>Anf>Biot>OxFe-Ti (Figura 22A), con textura porfídica a glomeroporfídica y ligeramente traquítica con, al menos, dos tipos de glómeros (1) Pl>Anf y (2) Pl>Pl>OxFe-Ti, en una matriz vítrea a microcristalina, con microcristales y cristalitos de Pl>OxFe-Ti. Los fenocristales de Pl y Anf, varían de 2 a 3 mm y se presentan a manera de pseudomorfos con bordes oxidados; en general esta muestra se encuentra intensamente alterada.

El segundo derrame (muestra CL15-27) se trata de una dacita que exhibe las texturas porfídica con fenocristales de Pl>Anf>Opx>OxFe-Ti (Figura 22B), traquítica bien desarrollada y amigdaloides. En esta muestra los minerales de anfíbol se encuentran reemplazados por sericita y jarosita. Además, presenta alteración propilítica intensa con minerales como clorita>epidota, así como amígdalas rellenas de cuarzo. El tamaño de cristales de esta roca varía en el rango de 0.5 a 1 mm.

Sobreyaciendo a estos dos derrames, se analizó una roca de composición andesítica (muestra CL15-01). Se trata de una andesita (Figura 22C) con textura porfídica de Pl>Cpx>OxFe-Ti a glomeroporfídica con tres tipos de glómeros (1) Pl>Cpx>OxFe-Ti, (2) Pl>Pl y (3) Pl>OxFe-Ti. Esta roca presenta una matriz microcristalina de Pl>OxFe-Ti, y en general, el tamaño de los minerales varía de 0.25 a 0.75 mm, siendo los más abundantes las plagioclasas, algunas con textura en criba. Esta roca presenta una fuerte alteración con calcita+sericita+OxFe-Ti.

Estos derrames volcánicos son cortados por un dique de composición andesítica, (muestra CL15-29) el cual exhibe una textura afieltrada y porfídica con fenocristales de Pl>Opx>Cpx>OxFe-Ti (Figura 22D). En una matriz microcristalina, intergranular, con microfenocristales de Pl>Opx>Cpx y minerales secundarios de alteración como calcita+sericita+OxFe-Ti. El tamaño promedio de los cristales es de 0.25 mm. Esta roca presenta pseudomorfos de piroxeno y sectores en parches donde se concentran OxFe-Ti y sericita.

Cubriendo discordantemente a estas unidades, se encuentra un depósito piroclástico (muestra CL15-30), clasificándose como una toba de ceniza lítica de composición dacítica con textura porfídica la cual contiene fragmentos líticos de dacita, andesita, perlita y escasos lapilli, inmersos en una matriz de ceniza con cristales de Pl>FA>OxFe-Ti (Figura 22E). El tamaño de los cristales y líticos varía de 1 a 3 mm.

Concordante a esta unidad se encuentra un sill de composición dacítica (muestra CL15-32), se trata de una dacita con textura porfídica a glomeroporfídica, ligeramente traquítica (Figura 22F). Presenta tres tipos de glómeros (1) Pl>Anf, (2) Pl>Pl>OxFe-Ti y (3) Anf>OxFe, en una matriz microcristalina con cristalitas de Pl>OxFe-Ti>Anf. En esta muestra se reconocieron fenocristales de plagioclasas que presentan texturas en reloj de arena. También contiene pseudomorfos de anfíbol, los cuales se encuentran alterados a sericita>biotita>OxFe-Ti, con bordes oxidados. El tamaño de los fenocristales va de 0.75 a 1 mm y los cristales en la matriz son inferiores a 0.25 mm.

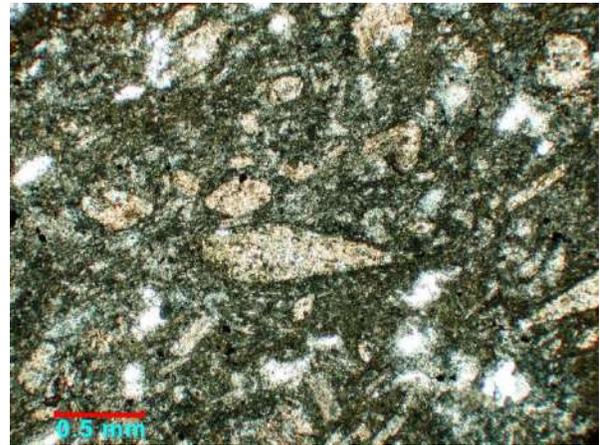
Sobreyaciendo concordantemente al sill, se encuentra una unidad detrítica estratificada de la cual se seleccionó como muestra representativa al ejemplar CL15-34, que petrográficamente se clasifica como una arcosa lítica (Folk 1968) moderadamente clasificada, con granulometría uniforme, granos sub-angulares a redondeados, con tamaños que van de 0.25 a 1 mm (Figura 22G). La composición de los granos es de plagioclasas, cuarzo, feldespato alcalino y abundan los fragmentos de roca, en una matriz muy arcillosa.

En la cima de esta unidad yaciendo concordantemente sobre la unidad detrítica, se reconoció un depósito epiclástico. De esta unidad se seleccionó un clasto representativo (CL15-33A). Se clasifica como una dacita (Figura 22H) con textura porfídica de fenocristales de Pl>FA>Anf>Biot>OxFe-Ti, a glomeroporfídica con tres tipos de glómeros (1) Pl>Biot, (2) Anf>OxFe y (3) Pl>Pl. Los fenocristales varían en dimensiones de 2 a 3 mm y están embebidos en una matriz microcristalina de Pl>FA>Anf>Czo>OxFe-Ti, con tamaños de cristales que son inferiores a 0.25 mm. Esta roca presenta una alteración propilítica que es selectiva en fenocristales de anfíbol, con golfos de corrosión y cristalización de biotita en ellos. También se reconoció la presencia de xenocristales de plagioclasas.

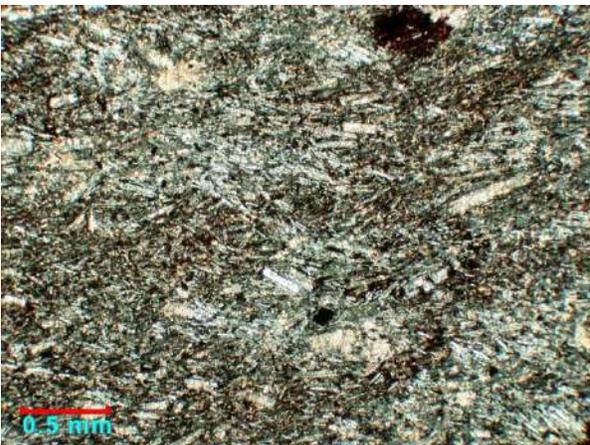
Por último cortando a toda esta secuencia, se reconoció un dique basáltico, (muestra CL15-36), con textura porfídica de Pl>Olv>Opx>OxFe-Ti (Figura 22 I), a glomeroporfídica con dos tipos de glómeros: (1) Olv>Olv y (2) Olv>OxFe-Ti, en una matriz dolerítica de Pl>OxFe-Ti. Esta muestra contiene grandes pseudomorfos de olivinos iddingsitizados, con textura esquelética, fuerte alteración propilítica, y vetillas que están rellenas por sericita y calcita. El tamaño de los fenocristales es de 2 mm y los cristales en la matriz con tamaños inferiores a 0.25 mm.



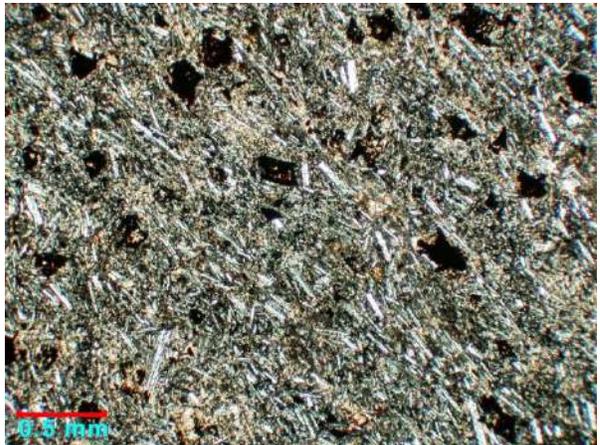
A)



B)



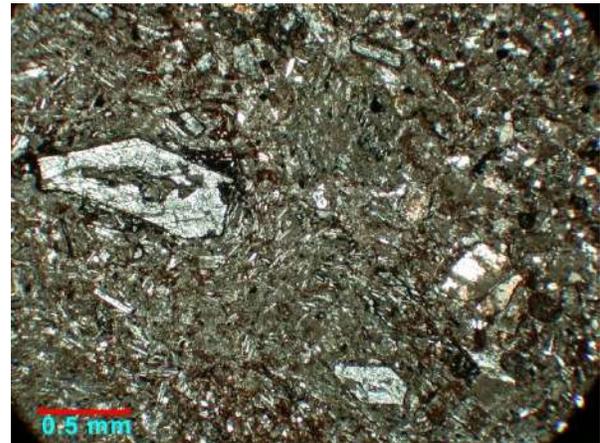
C)



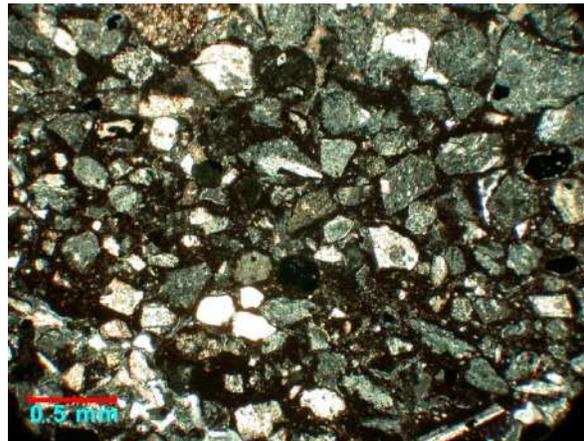
D)



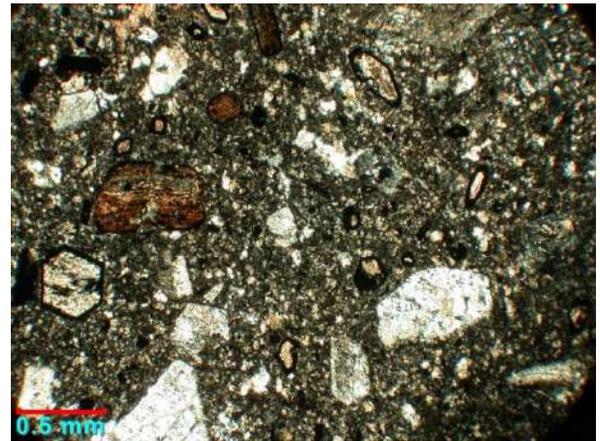
E)



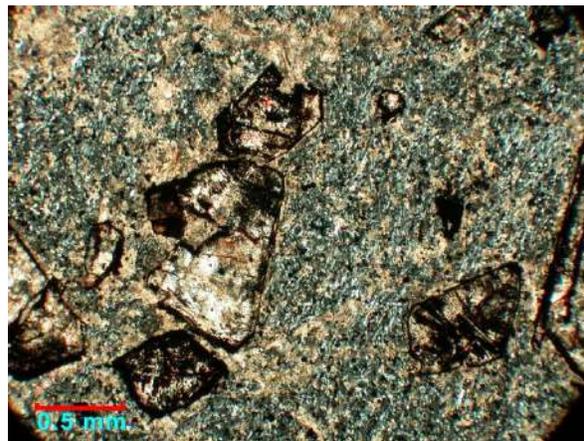
F)



G)



H)



I)

**Figura 22.-** Fotomicrografías representativas del CVL, tomadas con un objetivo 4x y luz polarizada: **A)** Dacita con pseudomorfos de anfíbol y biotita; **B)** Dacita fuertemente alterada, en donde los fenocristales de anfíbol fueron reemplazados completamente por sericita y jarosita; **C)** Andesita con textura afieltrada y fuerte alteración propilítica; **D)** Dique andesítico con pseudomorfos de piroxenos oxidados y una fuerte alteración propilítica; **E)** Toba de ceniza de composición dacítica, donde destaca un lítico de perlita y recristalización de cuarzo; **G)** Arcosa lítica moderadamente clasificada, con abundancia de feldspatos y plagioclasas; **H)** Dacita porfídica con pseudomorfos de anfíbol y biotita con golfos de corrosión y con fuerte alteración propilítica; y **I)** Dique basáltico en donde se observan grandes pseudomorfos de olivinos iddingsitizados.

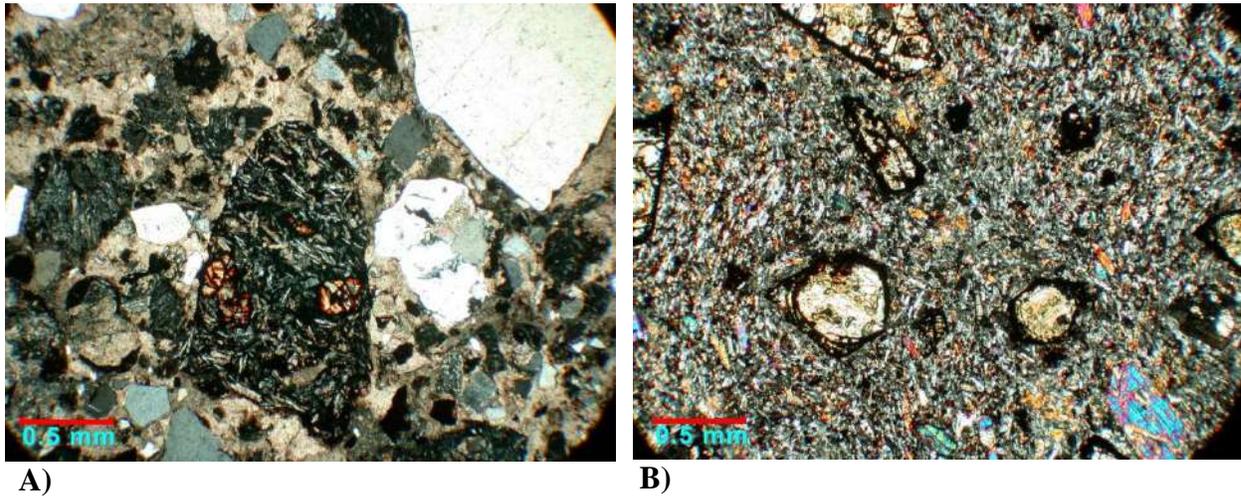
**Tabla 2.-** Relación de muestras del Complejo volcánico Libertad, del Sill y del Dique basáltico analizadas petrográficamente; coordenadas UTM 12R datum NAD 27.

| Muestra  | E      | N       | Roca          | Facies del derrame | Textura  | Fenocristales              | Glómeros  | Matriz   |
|----------|--------|---------|---------------|--------------------|--|----------------------------|---|--|
| CL15-06  | 342330 | 3329902 | Dacita        | Nivel de base      | Porfídica a glomeroporfídica, ligeramente traquítica | Pl>Anf>Biot>OxFe-Ti        | (1) Pl>Anf y (2) Pl>Pl>OxFe-Ti                      | Vítrea a microcristalina de Pl>OxFe-Ti                   |
| CL15-27  | 341716 | 3329234 | Dacita        | Nivel de base      | Porfídica, traquítica, amigdaloidal                  | Pl>Anf>Opx>OxFe-Ti         | NP  | Microcristalina de Pl>Anf>OxFe-Ti                        |
| CL15-01  | 341968 | 3329586 | Andesita      | Nivel intermedio   | Porfídica a glomeroporfídica                         | Pl>Cpx>OxFe-Ti             | (1) Pl>Cpx>OxFe-Titanio, (2) Pl>Pl y (3) Pl>OxFe-Ti | Microcristalina de Pl>OxFe-Ti                            |
| CL15-29  | 341582 | 3329307 | Andesita      | Dique              | Porfídica, afieltrada                                | Pl>>Opx>Cpx>OxFe-Ti        | NP  | Microcristalina, intergranular de Pl>Opx>Cpx>Ca>Sericita |
| CL15-30  | 341570 | 3329349 | Dacita        | Piroclástica       | Porfídica  | Pl>FA>OxFe-Ti              | NP  | Matriz de ceniza   |
| CL15-32  | 341564 | 3329366 | Dacita        | Sill               | Porfídica a glomeroporfídica                         | Pl>OxFe-Ti>Anf             | (1) Pl>Anf, (2) Pl>Pl>OxFe-Ti y (3) Anf>OxFe        | Microcristalina de Pl>OxFe-Ti>Anf                        |
| CL15-34  | 341559 | 3329372 | Arcosa Lítica | Detrítica          | Incluida   | Pl>fragmentos de roca >Czo | NP  | NP   |
| CL15-33A | 341430 | 3329618 | Dacita        | Epiclástica        | Porfídica a glomeroporfídica                         | Pl>FA>Anf>Biot>OxFe-Ti     | (1) Pl>Biot>;(2) Anf>OxFe y (3) Pl>Pl.              | Microcristalina de Pl>FA>Anf>Czo>OxFe-Ti                 |
| CL15-36  | 341434 | 3329669 | Basalto       | Dique              | Porfídica a glomeroporfídica                         | Pl>Olv>Opx>OxFe-Ti>        | (1) Olv>Olv y (2) Olv>OxFe-Ti                       | Dolerítica de Pl>OxFe-Ti.                                |

### 4.3 Basalto El Puente

Por encima de las secuencias del Complejo volcánico Libertad, en la porción suroeste del área de estudio, se encuentra el Basalto El Puente. La brecha de base de esta unidad (muestra CL15-03), petrográficamente es de composición andesítica (Figura 23A), con líticos de andesitas y basaltos, así como cristales de Pl>FA>Czo, en una matriz microcristalina de Pl>Cpx, que además es rica en sericita y calcita.

Otras dos facies (muestra CL15-04), son un basalto porfídico de fenocristales de Pl>Olv>Opx>Cpx>OxFe-Ti (Figura 23B) a glomeroporfídico con dos tipos de glómeros (1) Olv>OxFe-Ti y (2) Pl>Olv>OxFe-Ti, en una matriz intergranular ligeramente dolerítica, con cristales de Cpx>Pl>OxFe-Ti. Esta roca presenta pseudomorfos de olivinos iddingsitizados con textura esqueletal y con bordes oxidados.



**Figura 23.-** Fotomicrografías representativas del Basalto El Puente tomadas con un objetivo 4x y con luz polarizada: **A)** Brecha de composición andesítica, en donde se puede apreciar que contiene líticos de andesita y basalto; y **B)** Basalto con grandes pseudomorfos de olivinos iddingsitizados, con textura esquelética; presenta fenocristales de clinopiroxeno.

**Tabla 3.-** Relación de muestras del Basalto El Puente analizadas petrográficamente; coordenadas UTM 12R datum NAD 27.

| Muestra | E      | N       | Roca              | Facies del derrame | Textura                      | Fenocristales          | Glómeros                             | Matriz   |
|---------|--------|---------|-------------------|--------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--|
| CL15-03 | 341839 | 3329554 | Brecha andesítica | Brecha de base     | Porfídica                    | Pl>FA>Qzo              | NP                                   | Microcristalina de Pl>Cpx  |
| CL15-04 | 341834 | 3329549 | Basalto           | Masiva             | Porfídica a glomeroporfídica | Pl>Olv>Opx>Cpx>OxFe-Ti | (1) Olv>OxFe-Ti y (2) Pl>Olv>OxFe-Ti | Intergranular, ligeramente dolerítica, con cristales de Cpx>Pl>OxFe-Ti |

#### 4.4 Miembro volcánico Las Cejas Coloradas

El Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (MVLCC) consiste en una serie de derrames volcánicos de composición andesítica – dacítica, los cuales están representados por brechas de base, facies fluidales y prismáticas. Este miembro volcánico se dividió en tres localidades: Cerro San Judas, Cerros Las Lomitas y Cerros Las Cejas Coloradas.

### Cerro San Judas

La secuencia de rocas del cerro San Judas comienza en la base con rocas del Complejo volcánico Libertad, que consisten en una serie de derrames volcánicos andesíticos - dacíticos de base, los cuales se describieron anteriormente (Figura 22). Por encima del Complejo volcánico Libertad se reconoció una serie de brechas de composición dacítica. Esta unidad de brechas (muestra CL15-26), tiene los siguientes rasgos petrográficos: es una dacita porfídica de Pl>Anf>Cpx, en una matriz vítrea a microcristalina de Pl>OxFe (Figura 24A). Esta roca presenta una intensa alteración propílitica y también algunos pseudomorfos de anfíbol con golfos de corrosión, rellenos de calcita. El tamaño de los fenocristales va de 1 a 3 mm y la matriz contiene cristales inferiores a los 0.75 mm.

Dicha secuencia de brechas es cortada por un cuerpo dacítico con textura porfídica a glomeroporfídica (muestra CL15-24) de Pl>Anf, y traquítica con glómeros de plagioclasas, en una matriz microcristalina de Pl>OxFe-Ti (Figura 24B). Esta roca presenta pseudomorfos de anfíbol reemplazado por calcita y en algunas zonas por clorita, por lo que en general se le atribuye una leve alteración propílitica.

### Cerros Las Lomitas

La secuencia de rocas de los Cerros Las Lomitas comienza en la base con un basalto. Petrográficamente se reconoció como un basalto porfídico (muestra CL15-16) de Pl>Opx>Olv>OxFe-Ti (Figura 24C) a glomeroporfídico con tres tipos de glómeros (1) Olv>Opx>OxFe-Ti; (2) Pl>Cpx y (3) Pl>Opx>Olv, todos ellos inmersos en una matriz vítrea ligeramente intersertal con abundante OxFe-Ti. Esta roca presenta pseudomorfos de olivinos, con texturas esqueletales y con bordes iddingsitizados; el tamaño de los cristales va de 0.5 a 1.5 mm.

Sobreyaciendo al basalto, se encuentra una brecha de composición dacítica. En el análisis petrográfico se reconoció como una dacita (muestra CL15-17) con textura porfídica de Pl>Anf>FA>Biot>Opx>OxFe-Ti a glomeroporfídica con glómeros de plagioclasas, en una

matriz vítrea pilotaxítica (Figura 24D). Presenta xenocristales con bordes de reacción y en sectores presenta parches de calcita y OxFe-Ti; el tamaño de los fenocristales va de 1 a 2.5 mm.

Esta brecha está cubierta discordantemente por una dacita (muestra CL15-18C), con textura porfídica o sacaroide de Pl>Anf>Cpx (Figura 24E), en una matriz microcristalina a vítrea. Esta muestra presenta pseudomorfos de anfíbol, algunos en forma de agujas y con tamaños de 0.5 a 1 mm. La roca presenta abundancia en alteración propilítica y un fuerte contenido en carbonatos de calcio.

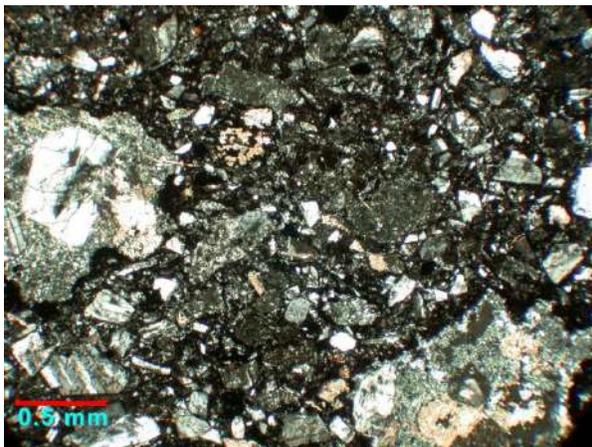
#### Cerros Las Cejas Coloradas

Petrográficamente se analizaron tres muestras que corresponden a los derrames volcánicos representativos de esta localidad.

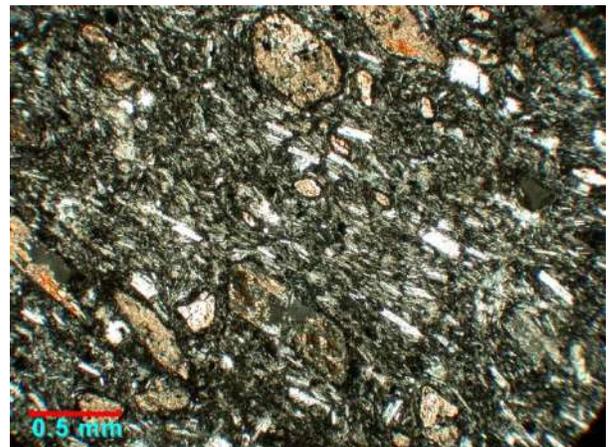
La base de la secuencia es una andesita (muestra CL15-10B) con una asociación mineralógica de Pl>Cpx>Anf>OxFe-Ti (Figura 24F), con textura porfídica a glomeroporfídica, con dos tipos de glómeros (1) Pl>Pl y (2) Pl>Cpx>OxFe-Ti. Esta muestra se distingue por su abundancia en cristales de plagioclasas, algunas con texturas en “reloj de arena”; algunos con fracturas rellenas con OxFe-Ti.

La parte intermedia de la secuencia, de facies “prismática”, es una andesita (muestra CL15-12C) de Pl>Anf>Cpx>OxFe-Ti (Figura 24G), con textura porfídica a glomeroporfídica, ligeramente traquílica, con dos tipos de glómeros (1) Pl>Pl>OxFe-Ti y (2) Pl>Cpx>OxFe-Ti, inmersos en una matriz microcristalina con cristales de Pl>Cpx>OxFe-Ti. Esta muestra presenta abundancia en cristales de plagioclasas, con tamaños que van de 1 a 2.5 mm.

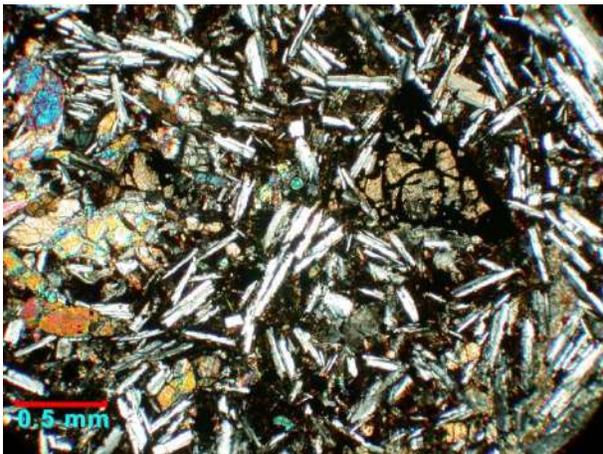
Por último, la cima de esta secuencia, es una andesita (muestra CL15-14) de Pl>Cpx>Anf>FA>OxFe-Ti (Figura 24H), con textura porfídica a glomeroporfídica; presenta glómeros de plagioclasas, en una matriz vítrea a microcristalina de Pl>Cpx>OxFe-Ti. Esta roca presenta abundancia en cristales de plagioclasas y además pseudomorfos de anfíbol con bordes de reacción y golfos de corrosión.



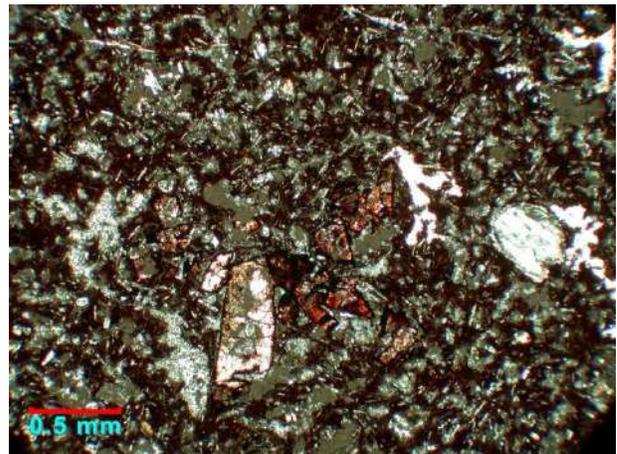
A)



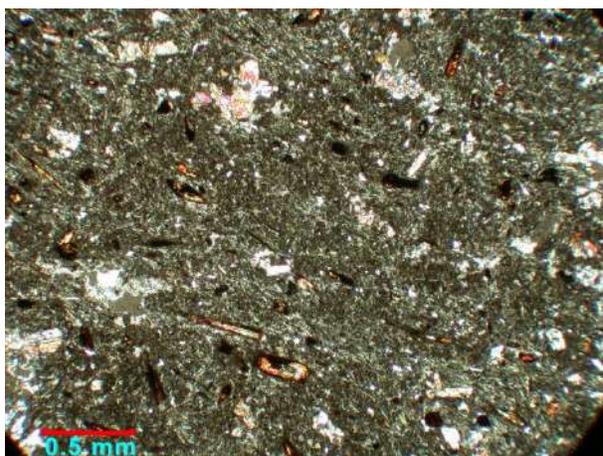
B)



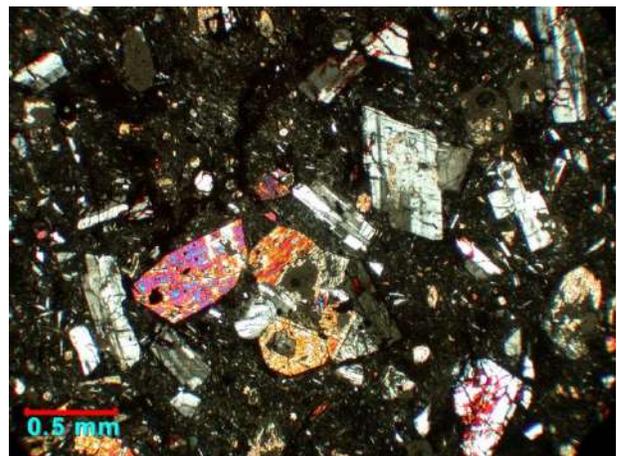
C)



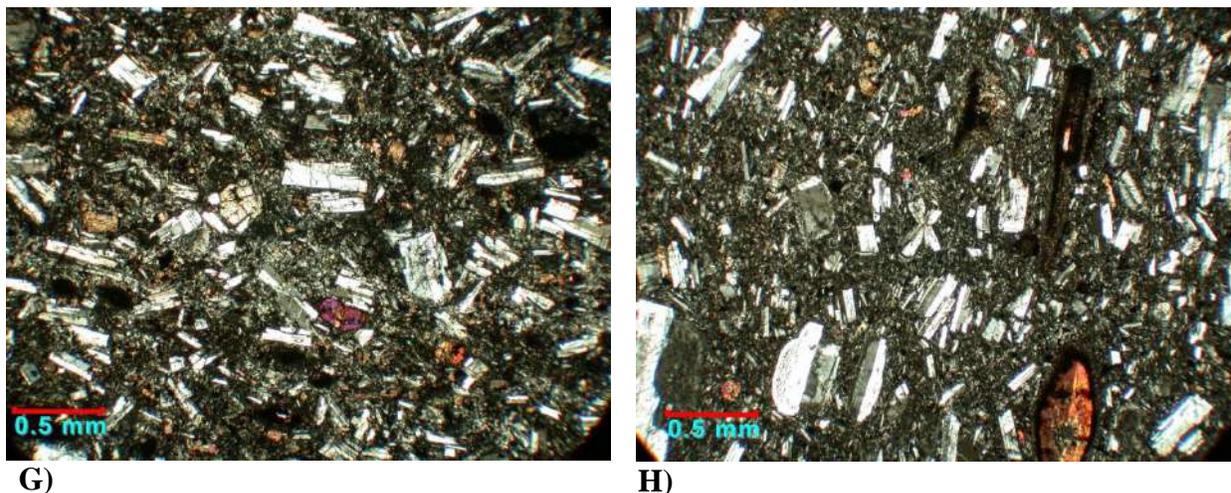
D)



E)



F)



**Figura 24.-** Fotomicrografías representativas del MVLCC, tomadas con un objetivo 4x y luz polarizada: **A)** Brecha dacítica porfídica con intensa alteración propilítica, con grandes líticos rellenos de calcita; **B)** Dacita con textura traquítica y pseudomorfos de anfíbol rellenos de calcita; **C)** Basalto con textura intersertal, con pseudomorfos de olivino con textura esqueletal; en una matriz de plagioclasas, clinopiroxenos y ortopiroxenos; **D)** Brecha de composición dacítica con textura pilotaxítica, presenta xenocristales con bordes de reacción; **E)** Dacita porfídica con pseudomorfos de plagioclasas y anfíboles en forma de agujas, en una matriz de plagioclasas; **F)** Andesita con fenocristales de plagioclasas y clinopiroxenos fracturados, rellenos de OxFe-Ti y plagioclasas que presentan texturas en “reloj de arena”, en una matriz de plagioclasas y anfíbol; **G)** Andesita con textura ligeramente traquítica y abundancia de cristales de plagioclasas, con escasos ortopiroxenos en una matriz microcristalina de plagioclasas; y **H)** Andesita porfídica con fenocristales de plagioclasas y anfíboles alterados, en una matriz microcristalina de plagioclasas.

**Tabla 4.-** Relación de muestras del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas analizadas petrográficamente; coordenadas UTM 12R datum NAD 27.

| Muestra  | E      | N       | Roca     | Facies del derrame   | Textura  | Fenocristales              | Glómeros   | Matriz                                     |
|----------|--------|---------|----------|----------------------|--|----------------------------|--|--|
| CL15-26  | 342194 | 3329188 | Dacita   | Intermedia           | Porfídica  | Pl>Anf>Cpx                 | NP   | Vítrea a microcristalina de Pl>OxFe        |
| CL15-24  | 342134 | 3329248 | Dacita   | Conducto alimentador | Porfídica a glomeroporfídica, traquítica             | Pl>Anf                     | (1) Pl>Pl  | Microcristalina de Pl>OxFe-Ti              |
| CL15-16  | 342987 | 3328906 | Basalto  | Intermedia           | Porfídica a glomeroporfídica, intersertal            | Pl>Opx>Olv>OxFe-Ti         | (1) Olv>Opx>OxFe-Ti; (2) Pl>Cpx y (3) Pl>Opx>Olv | Vítrea                                     |
| CL15-17  | 342988 | 3328894 | Dacita   | Brecha de base       | Porfídica a glomeroporfídica, pilotaxítica           | Pl>Anf>FA>Biot>Opx>OxFe-Ti | Pl>Pl  | Vítrea                                     |
| CL15-18C | 342993 | 3328862 | Dacita   | intermedia           | Porfídica  | Pl>Anf>Cpx                 | NP   | Microcristalina a vítrea de Pl             |
| CL15-10B | 343308 | 3328441 | Andesita | intermedia           | Porfídica a glomeroporfídica                         | Pl>Cpx>Anf>OxFe-Ti         | (1) Pl>Pl y (2) Pl>Cpx>OxFe-Ti                   | Vítrea a microcristalina de Pl>OxFe-Ti     |
| CL15-12C | 343677 | 3328253 | Andesita | Fluidal              | Porfídica a glomeroporfídica, ligeramente traquítica | Pl>Anf>Cpx>OxFe-Ti         | (1) Pl>Pl>OxFe-Ti y (2) Pl>Cpx>OxFe-Ti           | Microcristalina a vítrea de Pl>Cpx>OxFe.   |
| CL15-14  | 343632 | 3327896 | Andesita | Prismática           | porfídica a glomeroporfídica                         | Pl>Cpx>Anf>FA>OxFe-Ti      | Pl>Pl  | Vítrea a microcristalina de Pl>Cpx>OxFe-Ti |

## V GEOQUIMICA

Se realizaron análisis geoquímicos de roca total para determinar las concentraciones de los elementos mayores, elementos trazas y elementos de tierras raras, en un total de 16 muestras de rocas volcánicas, identificadas en la región de Cerro Libertad Puerto Libertad Sonora, México.

Los ejemplares analizados, se seleccionaron a partir de la logística, interés y, la visualización de cambios tanto litológicos como mineralógicos. La recolección de muestras fue llevada de manera sistemática procurando obtener una cantidad de 1000 g de esquirlas (tamaño aproximado a 5 cm) que cumplieran con la homogeneidad y mejor calidad posible, procurando esquirlas libres de intemperismo, vetillas y amígdalas rellenas de algún material.

A la par del muestreo para geoquímica, se tomaron ejemplares para realizar un estudio petrográfico, mismo que permite cerciorarse de la viabilidad del análisis y, por lo tanto, de la confiabilidad de los resultados; finalmente se procedió al etiquetado y al control de las muestras.

### 5.1 Técnicas analíticas

La etapa de laboratorio inició con la preparación de muestras para el análisis geoquímico; este paso consiste en la trituración de las esquirlas de roca en el Laboratorio de Preparación de muestras del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste (UNAM – ERNO) a cargo del Quím. Pablo Peñaflores Escárcega. La trituración de esquirlas se hizo en una quebradora de quijadas de acero inoxidable Braun Chipmunk (Figura 25). Teniendo la muestra de un tamaño homogéneo, se realizó una delicada separación manual (Figura 26): se cuarteó la gravilla limpia, usando papel bond, hasta obtener aproximadamente 50 g (Figura 27), mediante un submuestreo aleatorio para obtener un porcentaje estadístico de muestra para su pulverización.

La pulverización y los análisis geoquímicos de roca total se llevaron a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional Autónoma de México

(UNAM), bajo la asesoría del Químico Rufino Lozano Santa-Cruz. En el caso de la preparación y análisis de muestras para obtención de elementos traza y elementos de tierras raras, se llevó a cabo en los laboratorios de química ultrapura (LABQUIO) y de química de espectrometría de masas con láser acoplado inductivamente (Q-ICP-MS) del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM con el apoyo del M.C. Ernesto Hernández Mendiola.



**Figura 25.-** Quebradora de quijadas de acero inoxidable Braun Chipmunk.



**Figura 26.-** Separación manual de la gravilla obtenida, mediante la trituradora Braun Chipmunk.



**Figura 27.-** Obtención aleatoria de gravilla, para su pulverización.

Los análisis efectuados en este trabajo contemplaron: siete muestras del CVL y nueve muestras del MVLCC. Los resultados de los 16 análisis de roca por elementos mayores y traza, así como el cálculo de la norma CIPW se presentan en la **Tabla 5**.

Para este estudio geoquímico se siguieron manejando los mismos grupos identificados bajo el reconocimiento de campo y el análisis petrográfico, a excepción de las rocas basálticas, que se trabajaron por separado con la finalidad de comparar sus rasgos geoquímicos entre sí. Los grupos quedaron divididos de la siguiente manera: [1] Complejo volcánico Libertad (CVL); [2] Basaltos, compuesto por una serie de tres basaltos nombrados anteriormente como: Basalto el Puente (BEP), Basalto Las Lomitas (BLL) y Dique Basáltico (DB) y por último [3] Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (MVLCC).

Los diagramas que se presentan a continuación y el cálculo de la norma CIPW se realizaron en el programa IGPET 2007 en base anhidra y recalculando los datos al 100%.

*“Geología del Cerro Libertad en la región de Puerto Libertad: Contribución al estudio petrológico del magmatismo orogénico en Sonora, México”*

**Tabla5.-** Geoquímica de los elementos mayores, traza y minerales normativos de las rocas representativas de cada grupo geoquímico. Las abreviaturas mostradas en la tabla corresponden a: D, Dacita; A, Andesita; B, Basalto; TA, Traquiandesita. n.a: no analizado.

| Muestra                        | Complejo volcánico Libertad |             |         |         |          | DB           | BEP          | BLL     | Miembro volcánico Las Cejas Coloradas |         |         |             |         |             |          |         |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------|---------|---------|----------|--------------|--------------|---------|---------------------------------------|---------|---------|-------------|---------|-------------|----------|---------|
|                                | CL15-06                     | CL15-01     | CL15-02 | CL15-32 | CL15-33A |              |              |         | CL15-36                               | CL15-05 | CL15-16 | CL15-24     | CL15-17 | CL15-18C    | CL15-10B | CL15-11 |
| Roca                           | D                           | A           | A       | D       | D        | B            | B            | B       | D                                     | TA      | TA      | A           | D       | A           | TA       | A       |
| UTM                            | 342330                      | 341968      | 341903  | 341564  | 341430   | 341434       | 341829       | 342987  | 342134                                | 342988  | 342993  | 343308      | 343302  | 343677      | 343743   | 343632  |
| 12R                            | 3329902                     | 3329586     | 3329600 | 3329366 | 3329618  | 3329669      | 3329544      | 3328906 | 3329248                               | 3328894 | 3328862 | 3328441     | 3328280 | 3328253     | 3328100  | 3327896 |
| NAT 27                         |                             |             |         |         |          |              |              |         |                                       |         |         |             |         |             |          |         |
| <b>Mayores %</b>               |                             |             |         |         |          |              |              |         |                                       |         |         |             |         |             |          |         |
| SiO <sub>2</sub>               | 65.89                       | 55.38       | 56.20   | 66.47   | 64.75    | 42.89        | 48.97        | 47.68   | 62.93                                 | 57.25   | 57.72   | 60.65       | 62.42   | 60.70       | 56.63    | 60.94   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.32                       | 18.48       | 18.73   | 15.45   | 15.88    | 14.22        | 13.60        | 17.36   | 15.67                                 | 15.04   | 14.58   | 17.08       | 16.50   | 17.36       | 14.83    | 17.33   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.09                        | 5.91        | 5.57    | 3.38    | 3.76     | 7.96         | 8.08         | 8.17    | 4.09                                  | 5.99    | 5.20    | 5.13        | 4.45    | 4.67        | 5.71     | 4.96    |
| CaO                            | 2.88                        | 5.41        | 7.06    | 1.15    | 2.84     | 12.04        | 9.13         | 10.35   | 4.72                                  | 5.17    | 5.63    | 5.43        | 4.97    | 5.58        | 7.57     | 5.55    |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.59                        | 4.35        | 3.83    | 2.48    | 4.55     | 2.19         | 2.01         | 2.40    | 4.30                                  | 3.13    | 3.25    | 4.03        | 3.88    | 4.00        | 3.37     | 4.07    |
| K <sub>2</sub> O               | 2.32                        | 1.31        | 1.86    | 0.36    | 2.18     | 2.01         | 2.78         | 2.33    | 2.46                                  | 3.48    | 3.16    | 2.58        | 2.63    | 2.22        | 2.95     | 2.24    |
| MgO                            | 1.14                        | 2.97        | 2.02    | 4.39    | 1.54     | 5.92         | 10.66        | 5.64    | 1.72                                  | 5.11    | 5.67    | 2.49        | 2.28    | 2.32        | 5.34     | 2.39    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.55                        | 0.87        | 0.88    | 0.56    | 0.59     | 1.13         | 1.20         | 1.76    | 0.65                                  | 0.88    | 1.08    | 0.81        | 0.76    | 0.71        | 1.21     | 0.73    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.22                        | 0.37        | 0.38    | 0.24    | 0.25     | 0.69         | 0.61         | 0.86    | 0.24                                  | 0.46    | 0.61    | 0.31        | 0.29    | 0.32        | 0.67     | 0.32    |
| MnO                            | 0.03                        | 0.07        | 0.06    | 0.03    | 0.06     | 0.11         | 0.13         | 0.26    | 0.06                                  | 0.07    | 0.06    | 0.07        | 0.05    | 0.05        | 0.07     | 0.09    |
| BaO                            | 0.47                        | 0.11        | 0.12    | 0.04    | 0.20     | 0.29         | 0.29         | 0.21    | 0.17                                  | 0.14    | 0.16    | 0.16        | 0.16    | 0.12        | 0.18     | 0.11    |
| LOI                            | 4.51                        | 4.78        | 3.30    | 5.46    | 3.41     | 10.56        | 2.54         | 2.97    | 2.99                                  | 3.29    | 2.88    | 1.28        | 1.62    | 1.94        | 1.46     | 1.28    |
| Total                          | 99.53                       | 99.89       | 99.88   | 99.96   | 99.81    | 99.71        | 99.71        | 99.79   | 99.83                                 | 99.86   | 99.84   | 99.85       | 99.84   | 99.88       | 99.82    | 99.89   |
| <b>Trazas (PPM)</b>            |                             |             |         |         |          |              |              |         |                                       |         |         |             |         |             |          |         |
| V                              | 58                          | 96          | 101     | 102     | 57       | 162          | 192          | 229     | 60                                    | 92      | 115     | 100         | 93      | 89          | 136      | 88      |
| Cr                             | 31                          | 8           | 13      | 49      | 17       | 516          | 541          | 149     | 52                                    | 196     | 65      | 41          | 55      | 20          | 77       | 23      |
| Co                             | 13                          | 22          | 22      | 16      | 12       | 35           | 42           | 34      | 16                                    | 24      | 22      | 20          | 19      | 19          | 26       | 19      |
| Ni                             | 20                          | 8           | 6       | 23      | 15       | 293          | 328          | 49      | 34                                    | 42      | 125     | 43          | 44      | 35          | 150      | 38      |
| Cu                             | 11                          | 5           | 12      | 35      | 8        | 20           | 60           | 46      | 11                                    | 21      | 32      | 27          | 24      | 90          | 43       | 21      |
| Zn                             | 32                          | 85          | 75      | 81      | 63       | 71           | 81           | 82      | 71                                    | 83      | 83      | 78          | 59      | 74          | 86       | 67      |
| Rb                             | 42                          | 23          | 36      | 4       | 54       | 16           | 54           | 63      | 43                                    | 66      | 43      | 58          | 58      | 38          | 52       | 40      |
| Sr                             | 530                         | 1003        | 1143    | 584     | 1042     | 2006         | 1685         | 1416    | 971                                   | 924     | 1973    | 1098        | 1011    | 1213        | 2922     | 1231    |
| Y                              | 12                          | 20          | 21      | 10      | 13       | 24           | 25           | 35      | 17                                    | 24      | 18      | 18          | 18      | 16          | 20       | 18      |
| Zr                             | 171                         | 239         | 254     | 180     | 191      | 302          | 348          | 298     | 236                                   | 194     | 322     | 219         | 213     | 199         | 371      | 206     |
| Nb                             | 10                          | 8           | 9       | 7       | 6        | 0            | 1            | 16      | 12                                    | 9       | 0       | 8           | 10      | 7           | 0        | 7       |
| Ba                             | 4306                        | 985         | 1112    | 399     | 1751     | 2672         | 2920         | 1998    | 1592                                  | 1284    | 1469    | 1432        | 1467    | 1043        | 1761     | 1033    |
| Pb                             | 15                          | 11          | 13      | 2       | 20       | 27           | 19           | 9       | 16                                    | 10      | 17      | 17          | 16      | 11          | 18       | 9       |
| Th                             | 6                           | 3           | 3       | 4       | 5        | 7            | 4            | 5       | 5                                     | 7       | 10      | 5           | 5       | 4           | 10       | 4       |
| <b>REE (PPM)</b>               |                             |             |         |         |          |              |              |         |                                       |         |         |             |         |             |          |         |
| La                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>76.0</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>40.7</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>38.1</b> | n.a.    | <b>39.3</b> | n.a.     | n.a.    |
| Ce                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>162.6</b> | n.a.         | n.a.    | <b>76.8</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>72.6</b> | n.a.    | <b>77.5</b> | n.a.     | n.a.    |
| Pr                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>20.8</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>8.9</b>                            | n.a.    | n.a.    | <b>9.1</b>  | n.a.    | <b>9.4</b>  | n.a.     | n.a.    |
| Nd                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>83.3</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>33.6</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>35.2</b> | n.a.    | <b>36.3</b> | n.a.     | n.a.    |
| Sm                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>14.64</b> | n.a.         | n.a.    | <b>6.17</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>6.55</b> | n.a.    | <b>6.60</b> | n.a.     | n.a.    |
| Eu                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>4.03</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>1.83</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>1.97</b> | n.a.    | <b>1.89</b> | n.a.     | n.a.    |
| Gd                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>12.47</b> | n.a.         | n.a.    | <b>5.75</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>6.05</b> | n.a.    | <b>6.07</b> | n.a.     | n.a.    |
| Tb                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>1.42</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>0.69</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>0.74</b> | n.a.    | <b>0.73</b> | n.a.     | n.a.    |
| Dy                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>6.22</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>3.25</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>3.47</b> | n.a.    | <b>3.43</b> | n.a.     | n.a.    |
| Ho                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>1.13</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>0.60</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>0.65</b> | n.a.    | <b>0.64</b> | n.a.     | n.a.    |
| Er                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>3.10</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>1.65</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>1.80</b> | n.a.    | <b>1.75</b> | n.a.     | n.a.    |
| Tm                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>0.38</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>0.21</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>0.23</b> | n.a.    | <b>0.23</b> | n.a.     | n.a.    |
| Yb                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>2.49</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>1.44</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>1.56</b> | n.a.    | <b>1.54</b> | n.a.     | n.a.    |
| Lu                             | n.a.                        | n.a.        | n.a.    | n.a.    | n.a.     | <b>0.39</b>  | n.a.         | n.a.    | <b>0.23</b>                           | n.a.    | n.a.    | <b>0.24</b> | n.a.    | <b>0.23</b> | n.a.     | n.a.    |
| <b>Min Normativos</b>          |                             |             |         |         |          |              |              |         |                                       |         |         |             |         |             |          |         |
| Q                              | 28.15                       | 8.57        | 9.32    | 21.31   | 41.99    | 0            | 0            | 0       | 16.75                                 | 7.98    | 8.89    | 12.24       | 15.97   | 13.69       | 6.23     | 13.19   |
| or                             | 14.57                       | 8.14        | 11.4    | 13.34   | 2.27     | 13.41        | 16.76        | 14.32   | 15.01                                 | 21.3    | 19.23   | 15.54       | 15.85   | 13.45       | 17.68    | 13.45   |
| ab                             | 34.41                       | 40.98       | 35.74   | 42.44   | 23.8     | 12.87        | 18.5         | 22.5    | 39.94                                 | 29.14   | 30.03   | 36.77       | 35.65   | 36.74       | 30.73    | 37.11   |
| an                             | 13.69                       | 25.6        | 29.57   | 13      | 4.42     | 25.95        | 20.26        | 30.91   | 16.81                                 | 17.28   | 16.27   | 21.24       | 20.25   | 23.35       | 16.9     | 22.77   |
| ne                             | 0                           | 0           | 0       | 0       | 0        | 5.6          | 0            | 0       | 0                                     | 0       | 0       | 0           | 0       | 0           | 0        | 0       |
| C                              | <b>1.42</b>                 | <b>1.08</b> | 0       | 1.65    | 11.07    | 0            | 0            | 0       | 0                                     | 0       | 0       | 0           | 0       | 0           | 0        | 0       |
| di                             | 0                           | 0           | 3.43    | 0       | 0        | 29.09        | 17.53        | 13.36   | 4.7                                   | 4.94    | 6.68    | 3.3         | 2.43    | 2.24        | 13.43    | 2.49    |
| hy                             | 4.24                        | 11.03       | 5.92    | 4.66    | 12.96    | 0            | 7.54         | 7.1     | 3.08                                  | 14.58   | 13.32   | 6.69        | 5.75    | 6.48        | 9.03     | 6.96    |
| ol                             | 0                           | 0           | 0       | 0       | 0        | 6.76         | <b>13.56</b> | 3.88    | 0                                     | 0       | 0       | 0           | 0       | 0           | 0        | 0       |
| mt                             | 2.22                        | 2.52        | 2.53    | 2.21    | 1.98     | 2.91         | 2.84         | 3.5     | 2.28                                  | 2.52    | 2.72    | 2.43        | 2.4     | 2.34        | 2.86     | 2.34    |
| il                             | 0.82                        | 1.27        | 1.27    | 0.85    | 0.83     | 1.77         | 1.71         | 2.55    | 0.94                                  | 1.27    | 1.54    | 1.15        | 1.09    | 1.02        | 1.71     | 1.02    |
| hem                            | 0                           | 0           | 0       | 0       | 0.16     | 0            | 0            | 0       | 0                                     | 0       | 0       | 0           | 0       | 0           | 0        | 0       |
| ap                             | 0.49                        | 0.81        | 0.82    | 0.52    | 0.53     | 1.62         | 1.31         | 1.88    | 0.5                                   | 0.98    | 1.32    | 0.65        | 0.61    | 0.69        | 1.42     | 0.67    |

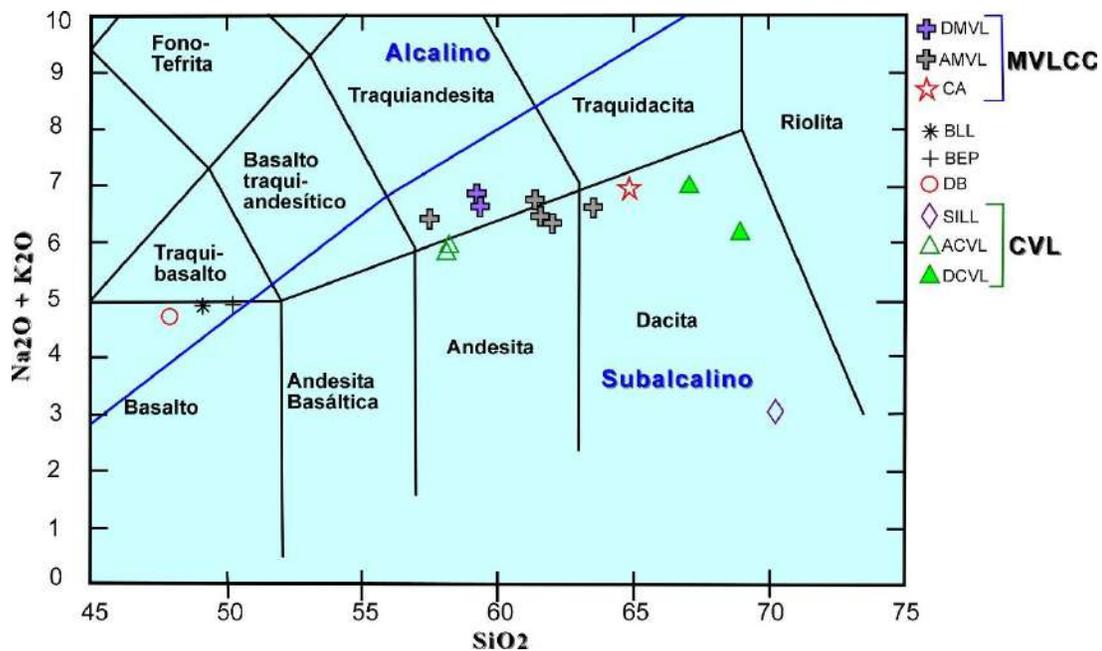
## 5.2 Elementos Mayores

El análisis geoquímico de los elementos mayores para la región del Cerro Libertad, Puerto Libertad, Sonora, permiten clasificar a las rocas de esta región, mediante el diagrama TAS propuesto por [Le Bas et al., \(1986\)](#) ([Figura 28](#)). En este diagrama se observan contenidos elevados en sílice (58-69%) para las rocas del **CVL**, que corresponden a rocas intermedias y valores en álcalis entre 6 y 7%; sin embargo la muestra CL15-32 (dacita) de este complejo volcánico, varía en la concentración de álcalis con valores de 3% y concentraciones de sílice de hasta 70%, lo cual se refleja en el cálculo de la norma con abundancia en cuarzo normativo. Comparando estas concentraciones con las del **MVLCC**, se puede observar que la relación álcalis-sílice de estas muestras es más uniforme, con valores en álcalis de 6-7% y valores de sílice de 57 a 62%. A pesar de estas diferencias, las rocas del **CVL** y el **MVLCC**, quedan dentro del dominio subalcalino ([Figura 28](#)) (marcado por la línea discriminante de estos dominios, de [Irvine y Baragar, 1971](#)). El cálculo de la norma CIPW ([Tabla 5](#)) en los análisis geoquímicos de estos grupos, muestra abundancia en cuarzo normativo, que muestra una sobresaturación en sílice para estos magmas.

En el diagrama TAS ([Le Bas et al., 1986](#)), las rocas con la simbología ACVL, con base en sus contenidos de sílice vs. álcalis quedan ubicadas dentro del campo de las andesitas, apenas debajo de la línea que las divide de las traquiandesitas; las rocas con la simbología DCVL se ubican en el campo de las dacitas, el sill que contiene altos valores en sílice se clasifica como dacita, en cambio el DB y el BEP con bajas concentraciones en sílice se clasifican como basaltos, todas estas rocas pertenecen al CVL.

En las rocas del MVLC, el BLL se encuentra apenas debajo del límite que divide a los basaltos de los traquibasaltos, por lo cual se clasifica como basalto, las rocas con la simbología DMVL, quedan en el campo de la traquiandesita, en cambio las rocas con la simbología ADMVL, se encuentran muy dispersas, quedando dos en el campo de las traquiandesitas, dos en el campo de las andesitas y una se mueve al campo de las dacitas, por último el CA se ubica en el campo de la dacita.

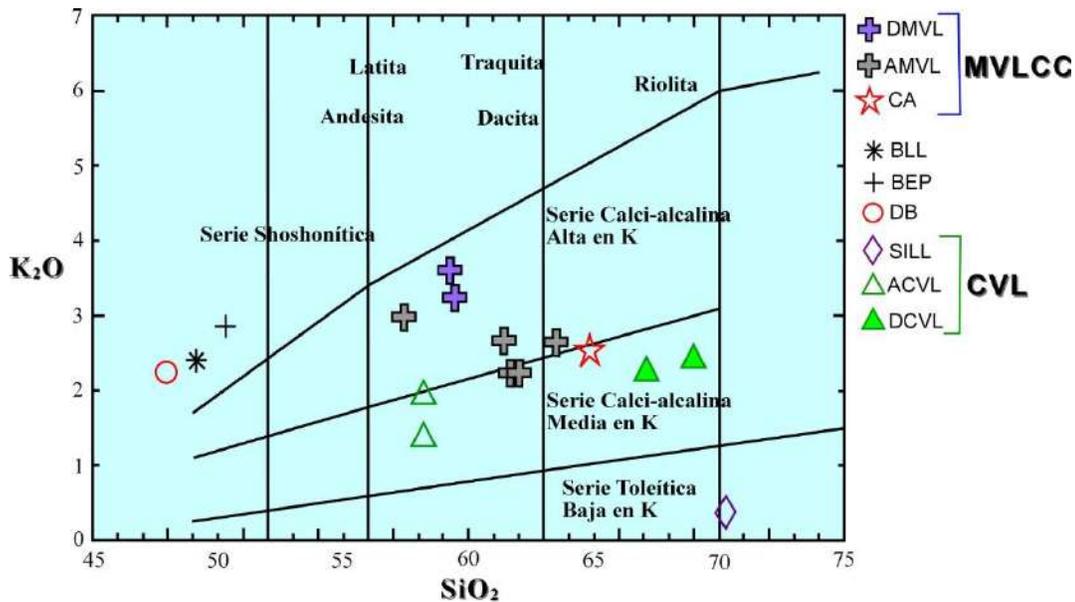
Por otra parte, el grupo de rocas máficas muestra diferencias muy marcadas, con los grupos anteriores, en cuanto a los contenidos de álcalis (4-5%) y sílice (47-51%), reflejando que estas rocas tienden a un polo básico. Los resultados en los análisis químicos del cálculo de la norma CIPW (Tabla 5) de este grupo, indica la presencia nula de cuarzo y la abundante presencia de olivino, mostrando congruencia con las descripciones petrográficas. Con base en los contenidos de álcalis y sílice y se clasifican como basaltos alcalinos (marcados por la línea de Irvine y Baragar 1971, Figura 28).



**Figura 28.-** Diagrama TAS (álcalis vs. sílice) propuesto por Le Bas et al. (1986), con la línea azul que divide la serie magmática alcalina de la sub-alcalina, propuesto por Irvine y Baragar (1971). Las abreviaturas corresponden a: ACVL Andesitas del Complejo volcánico Libertad, DCVL Dacitas del Complejo volcánico Libertad, DB Dique basáltico, BEP Basalto El Puente, BLL Basalto Las Lomitas, DMVL Dacitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, CA Conducto alimentador y AMVL Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

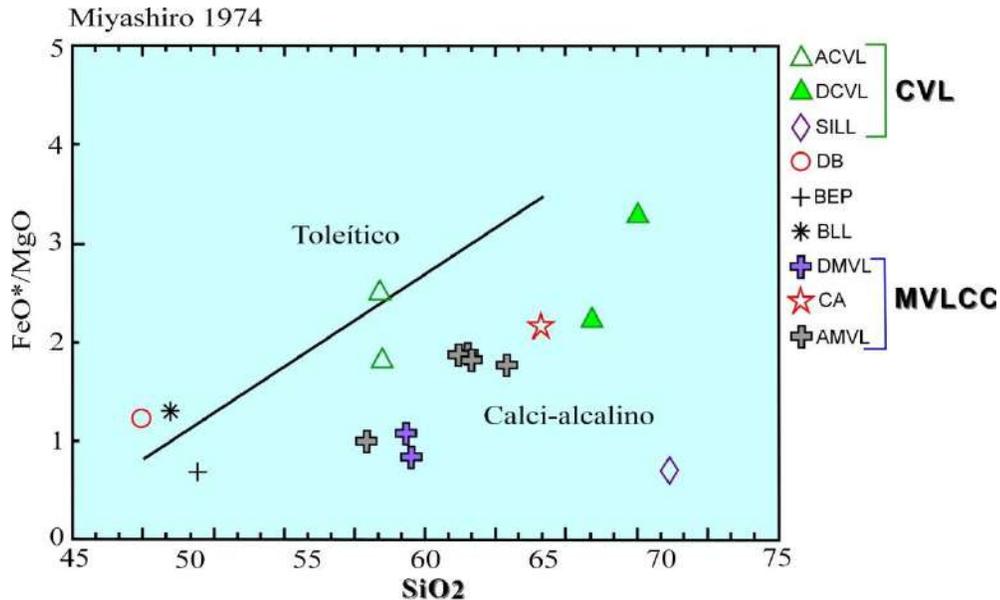
De acuerdo al diagrama propuesto por Peccerillo y Taylor (1976) (Figura 29) la relación potasio-sílice de los tres grupos permite afirmar, que existe una clara diferencia entre ellos. Las rocas del CVL, quedan por lo general dentro del campo de la serie calci-alcalina media en potasio, en cambio las rocas del MVLCC son ubicadas en el campo de la serie calci-

alcalina alta en potasio. Por otra parte, el grupo de los basaltos se ubican en el campo de la serie shoshonítica. Sin embargo, se puede apreciar que estos rasgos no son tan marcados, ya que cuatro muestras quedan en el límite entre la serie calci-alcalina media en potasio y alta en potasio, de las cuales tres pertenecen al **MVLCC** y una es del **CVL**. Por último, la muestra CL15-32 (dacita), que pertenece al **CVL**, presenta en este diagrama una muy baja concentración en potasio y valores de sílice hasta 70%.



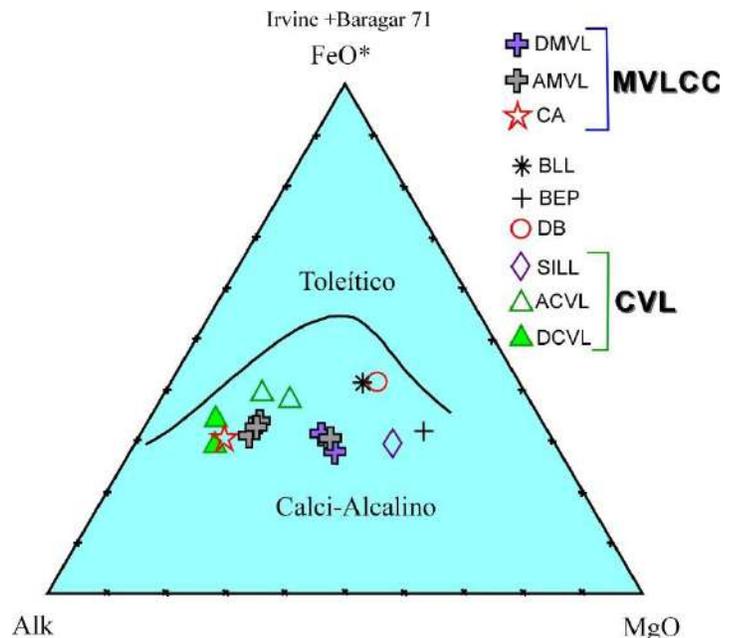
**Figura 29.-** Diagrama ( $K_2O$  vs.  $SiO_2$ ) propuesto por Peccerillo y Taylor (1976). Las abreviaturas corresponden a: **ACVL** Andesitas del Complejo volcánico Libertad, **DCVL** Dacitas del Complejo volcánico Libertad, **DB** Dique basáltico, **BEP** Basalto El Puente, **BLL** Basalto Las Lomitas, **DMVL** Dacitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, **CA** Conducto alimentador y **AMVL** Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

En cambio en el diagrama propuesto por Miyashiro (1974) (Figura 30), tanto las muestras del **CVL** así como las del **MVLCC**, se ubican en la serie calci-alcalina; sin embargo, se puede apreciar que al menos dos muestras de estos grupos presenta altos valores de hierro y magnesio, desplazando una muestra de estos grupos al límite de la serie toleítica, en donde también se encuentran dos de los basaltos



**Figura 30.-** Diagrama de discriminación entre la serie calci-alcalina y toleítica (SiO<sub>2</sub> vs FeO/MgO) propuesto por Miyashiro (1974). Las abreviaturas corresponden a: ACVL Andesitas del Complejo volcánico Libertad, DCVL Dacitas del Complejo volcánico Libertad, DB Dique basáltico, BEP Basalto El Puente, BLL Basalto Las Lomitas, DMVL Dacitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, CA Conducto alimentador y AMVL Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

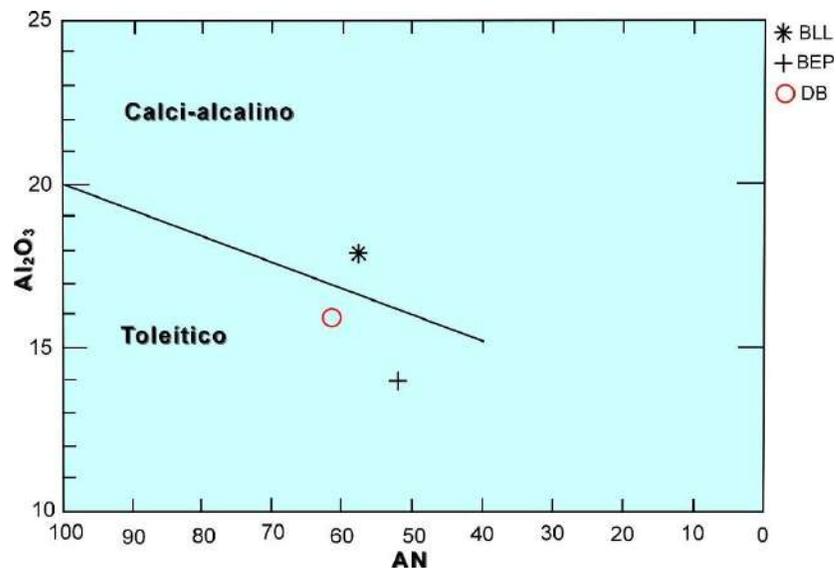
Se ha empleado el diagrama AFM (Álcalis, Hierro total y magnesio, Figura 31) propuesto por Kuno (1986), para la discriminación entre las series magmáticas de tipo calci-alcalino y toleítico, en donde la afinidad química hacia la serie calci-alcalina fue corroborada para estas rocas, quedando las muestras en su totalidad con una tendencia calci-alcalina.



**Figura 31.-** Diagrama AFM (Álcalis, hierro y magnesio), propuesto por Kuno (1986). Las abreviaturas corresponden a: ACVL Andesitas del Complejo volcánico Libertad, DCVL Dacitas del Complejo volcánico Libertad, DB Dique basáltico, BEP Basalto El Puente, BLL Basalto Las Lomitas, DMVL Dacitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, CA Conducto alimentador y AMVL Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

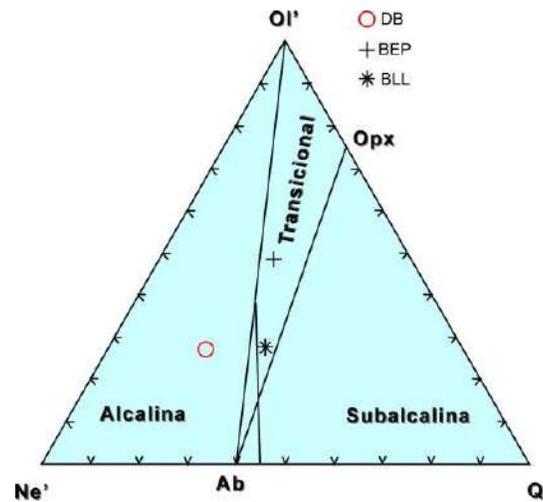
De este modo se implementaron otros diagramas que se utilizan para clasificar a las rocas básicas, con el fin de caracterizarlos geoquímicamente.

Se graficaron los tres ejemplares máficos en el diagrama de [Irving y Baragar \(1971, Figura 32\)](#), donde se toma en cuenta el contenido de aluminio contra el porcentaje de anortita normativa, para diferenciarlos de las serie magmática toleítica y calci-alcalina, en donde se puede observar claramente que dos muestras (**DB** y **BEP**) quedan dentro del campo toleítico y la otra muestra (**BLL**) queda en el campo calci-alcálido.



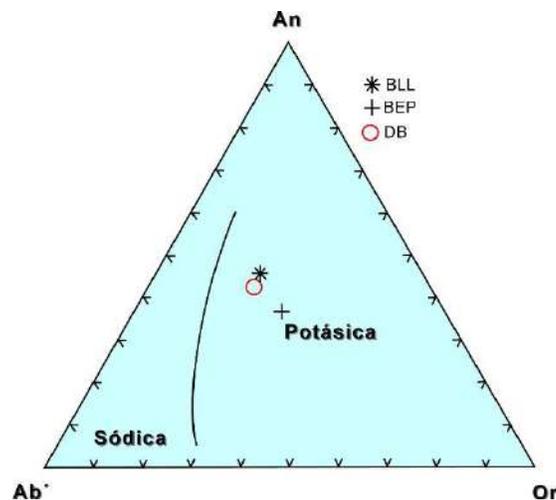
**Figura 32.-** Diagrama de discriminación entre la serie calci-alcaldina y toleítica (AN vs. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), para basaltos, propuesto por [Irvine y Baragar \(1971\)](#). Las abreviaturas corresponden a: **DB** Dique basáltico, **BEP** Basalto El Puente, **BLL** Basalto Las Lomitas.

A partir de estos datos, se utilizó el diagrama ternario Ol-Ne-Q ([Irvine y Baragar 1971, Figura 33](#)), con la finalidad de tener una idea más clara sobre su afinidad química, con base en los contenidos de minerales normativos, identificándose que dos basaltos (**BEP** y **BLL**) se clasifican como transicionales y uno como alcalino (**DB**). El Dique basáltico queda en la serie alcalina, con base en su contenido de Ne normativa que es mayor al 5%, se clasifica en la subserie fuertemente alcalina.



**Figura 33.-** Diagrama ternario para discriminación entre la serie alcalina, sub-alcalina y transicional, para basaltos, propuesto por [Irvine y Baragar \(1971\)](#). Las abreviaturas corresponden a: **DB** Dique basáltico, **BEP** Basalto El Puente, **BLL** Basalto Las Lomitas.

En el diagrama de [Irvine y Baragar \(1971\)](#) An-Ab-Or ([Figura 34](#)), para discriminar entre las subseries sódica y potásica, las tres rocas basálticas quedan en la subserie potásica, esto ya se había reflejado por sus altos valores en potasio en el diagrama propuesto por [Miyashiro \(1974, Figura 30\)](#).



**Figura 34.-** Diagrama de discriminación entre la serie sódica y potásica para basaltos, propuesto por [Irvine y Baragar \(1971\)](#). Las abreviaturas corresponden a: **DB** Dique basáltico, **BEP** Basalto El Puente, **BLL** Basalto Las Lomitas.

### Diagramas de variación tipo Harker para elementos mayores

Se graficaron los elementos mayores en diagramas tipo [Harker \(1909\)](#) con el fin de identificar mejor las relaciones y variaciones de los grupos geoquímicos en las rocas estudiadas; las tendencias se muestran en la [Figura 35](#).

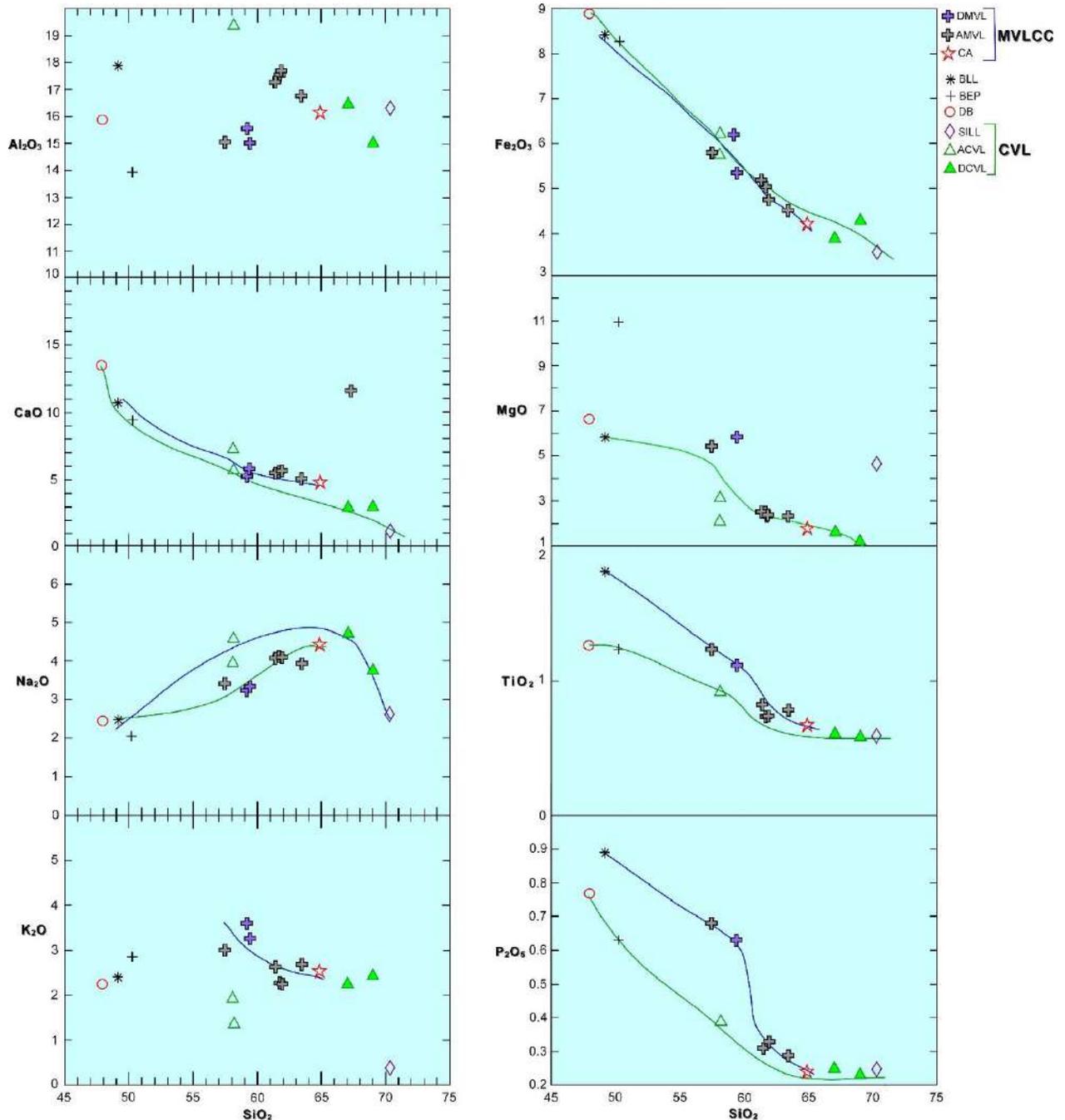
La relación existente en los diagramas de variación de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  con respecto al  $\text{SiO}_2$ , en general muestran un comportamiento curvilíneo, lo que sugiere que se derivan de una diferenciación causada por cristalización fraccionada. Esto solo rige para las rocas del **CVL** y el **MVLCC**. En cambio para los basaltos, su comportamiento es un poco más confuso; sin embargo, en diagramas como el del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y el de  $\text{CaO}$ , se pueden observar altos valores en estos elementos, pero con el mismo comportamiento curvilíneo.

Las rocas intermedias muestran un paulatino empobrecimiento en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ , y enriquecimiento en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , y  $\text{K}_2\text{O}$ ; esto posiblemente en respuesta al fraccionamiento de feldespatos, ferromagnesianos y óxidos de hierro-titanio que presentan estas rocas.

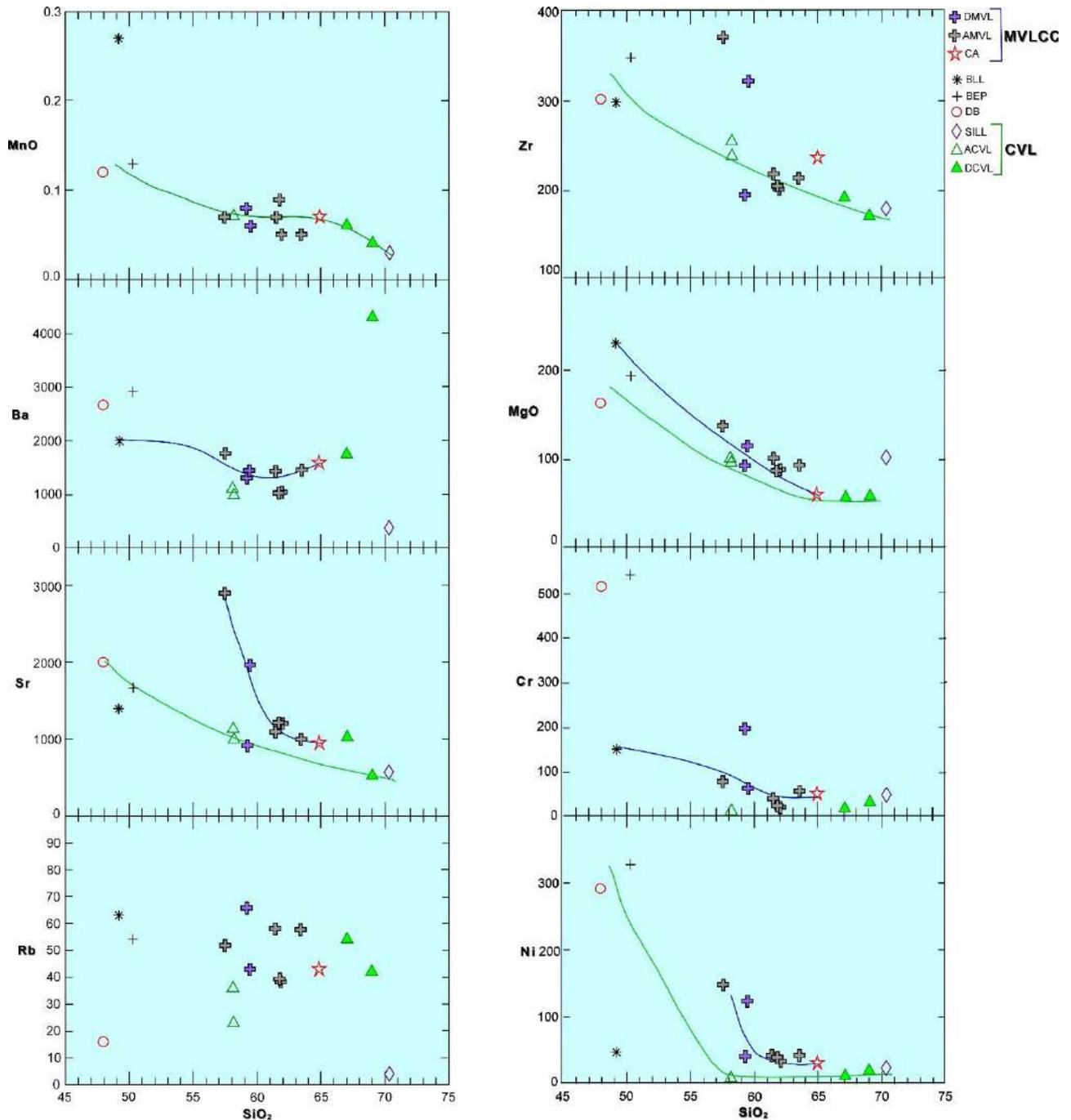
### 5.3 Elementos traza y tierras raras

Los diagramas de variación de Harker para elementos traza ([Figura 36](#)), con respecto al sílice, de las rocas de **CVL**, **MCLCC** y los basaltos, muestran un comportamiento que no corrobora del todo las gráficas para elementos mayores; sin embargo en elementos como el Zr, Va, Cr y Ni, existe una ligera tendencia curvilínea, que puede reflejar la cristalización fraccionada que se había mencionado con anterioridad.

También sobresale que algunas rocas del **MVLCC** presentan altas concentraciones en Zr, Sr y Rb, en cambio en el caso de las rocas que pertenecen a los basaltos, no muestran un claro comportamiento o patrón en estos diagramas de elementos traza, mostrando enriquecimiento significativo en elementos como Ba, Zr y Va y para las rocas máficas **DB** y **BEP**, se pone en realce una importante concentración en Cromo y Níquel.



**Figura 35.-** Diagramas de variación de Harker (1909) para elementos mayores de los grupos de roca de la región del Cerro Libertad, Puerto Libertad. Las abreviaturas corresponden a: ACVL Andesitas del Complejo volcánico Libertad, DCVL Dacitas del Complejo volcánico Libertad, DB Dique basáltico, BEP Basalto El Puente, BLL Basalto Las Lomitas, DMVL Dacitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, CA Conducto alimentador y AMVL Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

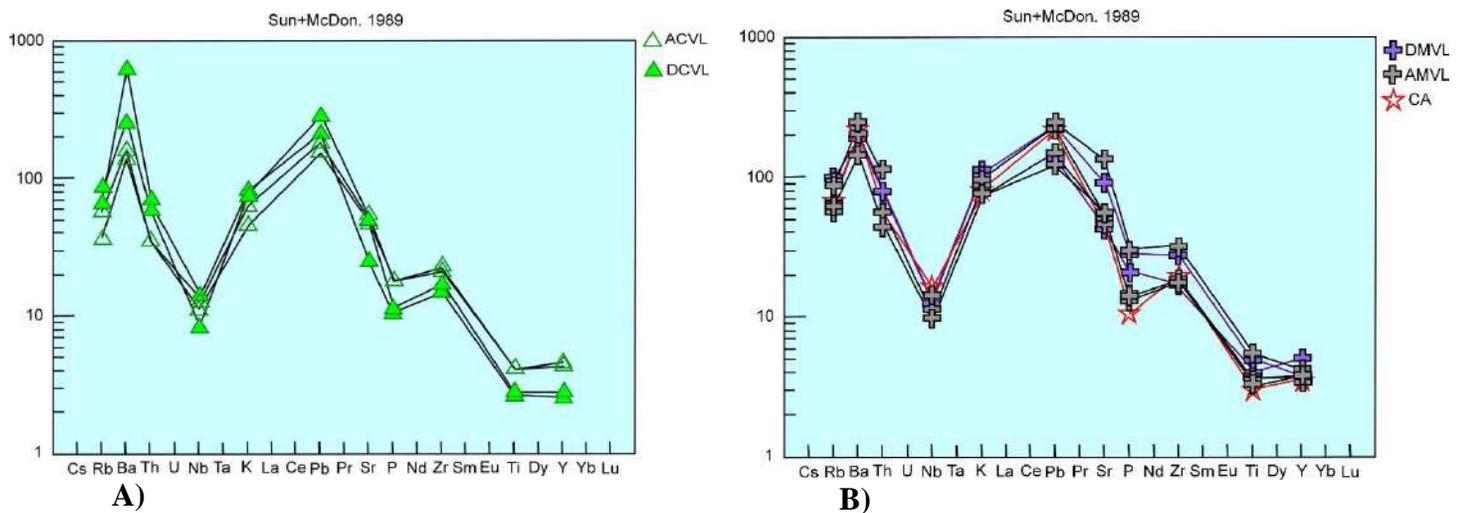


**Figura 36.-** Diagramas de variación de Harker (1909) para elementos traza, de los grupos de roca de la región del Cerro Libertad, Puerto Libertad. Las abreviaturas corresponden a: ACVL Andesitas del Complejo volcánico Libertad, DCVL Dacitas del Complejo volcánico Libertad, DB Dique basáltico, BEP Basalto El Puente, BLL Basalto Las Lomitas, DMVL Dacitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, CA Conducto alimentador y AMVL Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

## Diagramas Multielementales

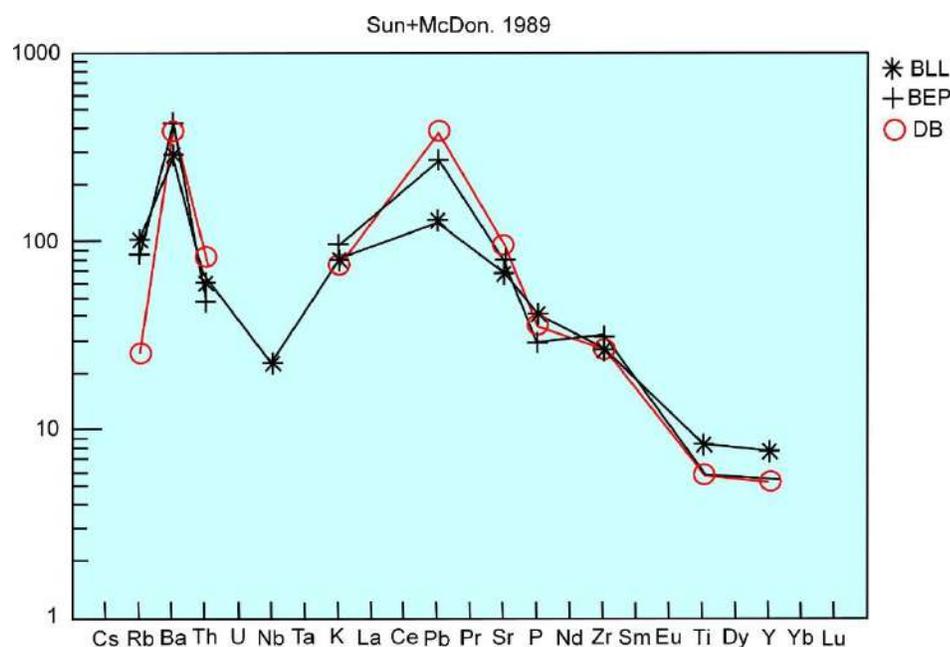
Se utilizaron diagramas de tierras raras normalizados a Manto Primitivo de Sun y McDonought (1989, Figuras 37A, B), para las rocas del CVL en donde se muestra un cierto paralelismo en los espectros de estas rocas. En el caso de las rocas del MVLCC de igual forma, exhiben un claro paralelismo. Sin embargo, comparando los espectros de estos dos grupos de rocas, se puede ver que existen claras diferencias entre sus espectros y las concentraciones en diferentes elementos traza, lo que sugiere que estos grupos de rocas han sufrido procesos genéticos diferentes. El CVL muestra anomalías positivas significativas en Ba, Pb y Sr, que corresponden al incremento de los elementos más incompatibles (LFS, Low Field Strength), y anomalías negativas en elementos como el Nb, P y Ti (HFS High Field Strength), que decrecen en su enriquecimiento en función de su incompatibilidad.

Para el caso de las rocas del MVLCC, se puede observar el mismo comportamiento de los elementos, pero con la diferencia de que las concentraciones de algunos elementos como el Ba, contrastan demasiado en estos dos grupos.



**Figura 37.- A)** Diagrama multielementos normalizado a Manto Primitivo (Sun y McDonought, 1989) de las unidades de roca del CVL: ACVL Andesitas del Complejo volcánico Libertad, DCVL Dacitas del Complejo volcánico Libertad; **B)** Diagrama multielementos normalizado a Manto Primitivo, para las unidades de roca del MVLCC: DMVL Dacitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, CA Conducto alimentador y AMVL Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

En el caso del grupo de los basaltos, se observa una clara diferencia entre ellos (Figura 38), siendo el **BEP** y el **DB** los que presentan los espectros más parecidos, lo que podría sugerir una relación más estrecha. En cambio el **BLL** muestra un arreglo espectral que difiere de ellos mostrando principalmente un enriquecimiento en los elementos trazas más compatibles. El ligero empobrecimiento en P y Ti de estas rocas indica que una insignificante cristalización fraccionada derivada de magmas más máficos está involucrada en su formación.

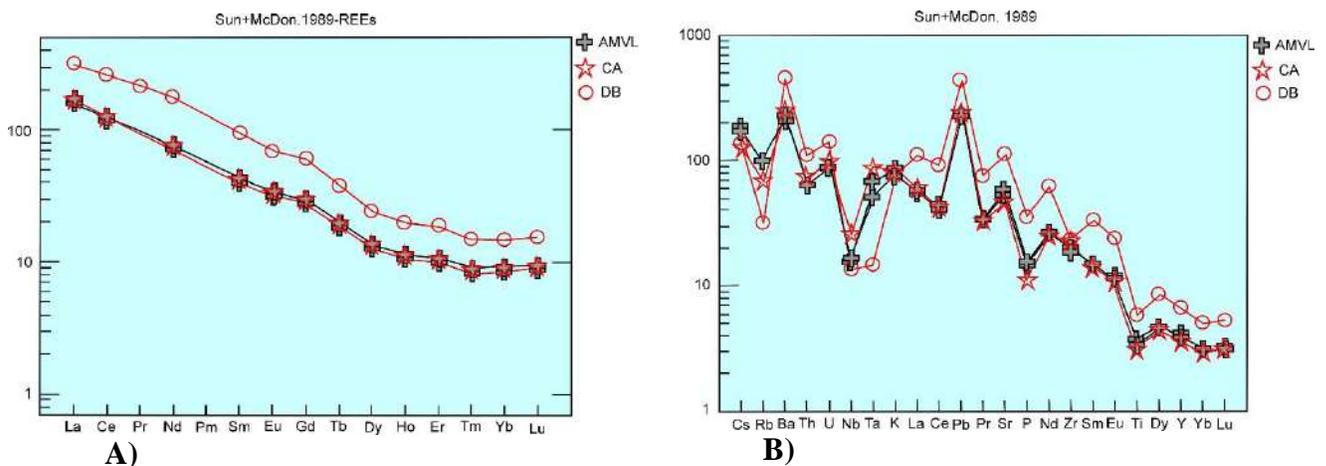


**Figura 38.-** Diagrama multielementos normalizado a Manto Primitivo, valores de normalización de Sun y McDonough (1989), para los basaltos de la región del Cerro Libertad, Puerto Libertad; DB Dique basáltico, BEP Basalto El Puente, BLL Basalto Las Lomitas.

Con el fin de identificar una cantidad mayor de elementos traza, que normalmente no se pueden obtener en la técnica de FRX, se analizaron cuatro muestras mediante la técnica ICP-MS (Espectrometría de masas con plasma inductivamente acopado). Las muestras analizadas corresponden a las claves: CL15-36 del grupo de los basaltos, específicamente es el que se nombró **DB**, CL15-10B, CL15-12C y CL15-24 son del **MVLCC**. Estas muestras se graficaron en dos diagramas multielementos, para ver el comportamiento de estas rocas. Primeramente se utilizó un diagrama de tierras raras (REE) normalizado a Condrita de Sun y McDonough (1989, Figura 39A); en este se puede observar que los espectros de estos dos

grupos de rocas guardan cierto paralelismo, además de tener una forma de “L”, con valores elevados en LREE y una pendiente pronunciada entre La y Gd, así como una anomalía inexistente de Eu, lo que sugiere que no existió un fraccionamiento de la plagioclasa (o que esta mineral es residual en la fuente). También se muestran valores de HREE relativamente horizontales. Aun así, existe una notable diferencia entre estos dos grupos, en donde las rocas del MVLCC presentan, constantemente, un espectro considerablemente más empobrecido que el DB, que son las rocas más pobres en sílice o menos diferenciadas.

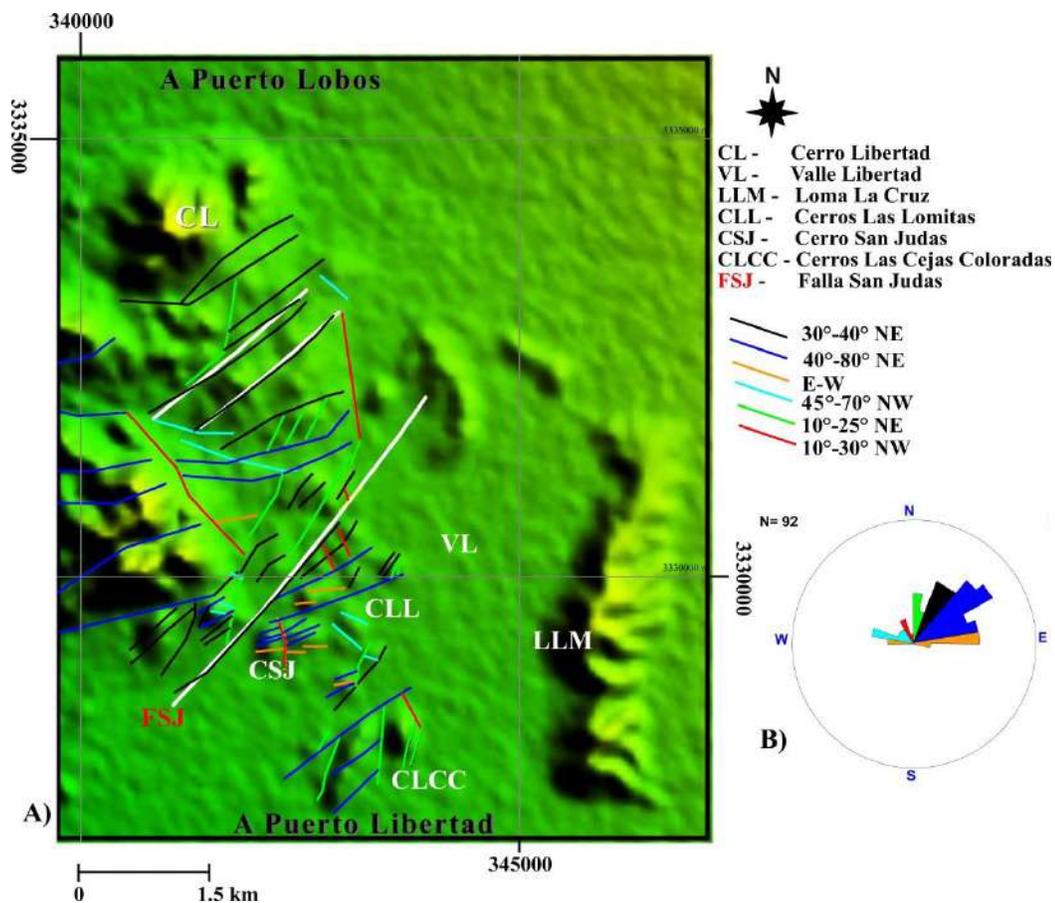
En el diagrama multielementos normalizado al manto primitivo (Figura 39B) se puede apreciar que existe cierta similitud en las concentraciones de elementos traza de estos dos grupos de rocas y un enriquecimiento progresivo en los elementos más incompatibles. Los espectros presentan anomalías negativas en Rb, Nb-Ta, P y Ti, que aumentan con el grado de diferenciación de los magmas en cada grupo. Anomalías positivas en Pb y Ba ocurren de manera independiente a este fenómeno, indicando que su presencia pueda atribuirse a una contaminación o asimilación cortical. Además, se sigue presentando un empobrecimiento general en todos los elementos del MVLCC y un notable enriquecimiento en Sr.



**Figura 39.-** A) Diagrama de tierras raras (REE) normalizado a Condrita (Sun y McDonough, 1989), de las rocas analizadas por ICP. B) Diagrama multielementos normalizado a Manto Primitivo (Sun y McDonough 1989) para las rocas analizadas por ICP; DB Dique basáltico, CA Conducto alimentador y AMVL Andesitas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

## VI GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA

Se realizó un reconocimiento de las fallas y fracturas que existen en el área de estudio, de las cuales algunas se tomaron medidas en campo bajo la regla de la mano derecha y otras se identificaron por medio de reconocimiento y análisis de imágenes satelitales, obteniendo un total de 124 lineaciones (Figura 40A). Se realizó un análisis de estas estructuras con la finalidad de entender los grupos o familias de estructuras y de obtener una interpretación. En el mapa de relieve o modelo de elevación digital (Figura 40A), se plasman las principales estructuras reconocidas a partir del análisis de imágenes de satélite, siendo un total de 92 lineaciones reconocidas.



**Figura 40.-** Interpretación estructural; A) Mapa de relieve o modelo de elevación digital, extraído del programa Global Mapper, mostrando la abundancia de lineaciones en el área de estudio; y B) Diagrama de roseta, realizado en el programa Stereonet, en el cual se muestra la distribución de los rumbos en los grupos de estructuras obtenidos, diferenciándoles con diversos colores.

Se procedió a realizar el análisis estructural de las lineaciones, y como resultado se obtuvieron al menos al menos seis grupos de estructuras (**Figura 40B**): (1) en color negro, lineaciones paralelas a las fallas principales, con direcciones entre 30°-40°NE, (2) en color azul rey, lineaciones 40°-80° NE, (3) en color naranja, lineaciones que tienden en dirección E-W, (4) en color azul cielo, lineaciones predominantemente NW pero con rangos que varían de 45°-70°NW, (5) en color verde, lineaciones de 10°-25° NE, (6) en color rojo lineaciones entre 10°-30 NW.

Se graficaron los datos tomados en campo, correspondientes a rumbos y echados de 23 fallas (**Tabla 6**).

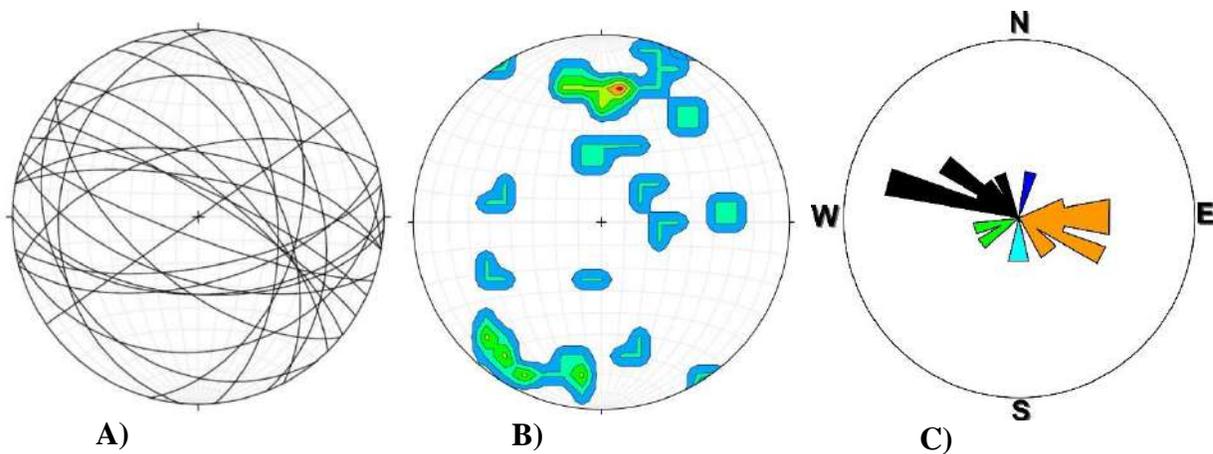
**Tabla.6-** Actitudes de las fallas medidas en campo en la región de Cerro Libertad; UTM 12R datum NAD 27

|    | Tipo de estructura    | Rumbo | Echado   | Pitch         | Plunge    | Observaciones                            | Coordenadas     |
|----|-----------------------|-------|----------|---------------|-----------|--|-----------------|
| 1  | Falla normal          | 185   | 26       | al echado     | al echado | Falla listrica                           | 343748 3328096  |
| 2  | Falla lateral oblicua | 333   | 55       | al rumbo      | al rumbo  |  | 343744 3328098  |
| 3  | Falla normal          | 309   | 76       |               |           |  |                 |
| 4  | Falla normal          | 316   | 69       | al echado     |           | Presenta estrias marcadas por silice     |                 |
| 5  | Falla normal          | 295   | 78       |               |           | Presenta una brecha formando un sigmoide | 343753 3328108  |
| 6  | Falla normal          | 175   | 55 NE    |               |           |  |                 |
| 7  | Falla lateral         | 111   | 35 SW    |               |           |  |                 |
| 8  | Falla normal          | 140   | 23 SW    |               |           |  |                 |
| 9  | Falla normal          | 280   | 73 NE    |               |           | Harina de falla                          | 343742 33282106 |
| 10 | Falla normal          | 80    | 29 SE    |               |           |  | 343632 3327895  |
| 11 | Falla normal          | 75    | 61 SE    |               |           | Rellena de OxFe-Ti                       |                 |
| 12 | Falla normal          | 80    | 68 SE    |               |           |  |                 |
| 13 | Falla normal          | 302   | 81 NE    |               |           | Rellena de carbonatos                    | 342990 3328889  |
| 14 | Falla normal          | 130   | 61 SW    |               |           | Rellena de carbonatos                    | 342990 3328890  |
| 15 | Falla normal          | 107   | 62 SW    |               |           | sistema conjugado                        |                 |
| 16 | Falla normal          | 280   | 62 NE    |               |           | sistema conjugado                        |                 |
| 17 | Falla normal          | 94    | 56 SW    | al echado     |           | Falla rellena de caliche                 | 342984 3328884  |
| 18 | Falla normal          | 255   | 60 NW    | al echado     |           | Paralela a las fallas principales        | 342995 3328768  |
| 19 | Falla lateral oblicua | 235   | vertical | al rumbo      |           | Falla lateral derecha                    | 342989 3328771  |
| 20 | Falla normal oblicua  | 110   | 81       | 30 hacia el E | 77        |  | 342989 3328771  |
| 21 | Falla normal oblicua  | 15    | 45 SE    | 40 al S       | 28        | Rellena de OxFe-Ti y Carbonatos          | 342184 3329162  |
| 22 | Falla normal          | 280   | 26 NE    |               |           |  |                 |
| 23 | Falla normal oblicua  | E- W  | 56 S     | 60 desde el E | 52 al S   |  |                 |

Los datos obtenidos de fallas se plasmaron en un estereograma (**Figura 41A**), en un diagrama de polos (**Figura 41B**) y en un diagrama de roseta (**Figura 41C**) con el fin de obtener una descripción general de estas estructuras.

En el área del Cerro Libertad las fallas más evidentes que controlan los afloramientos de roca, son fallas normales; algunas con tendencia lístrica, y se midieron bajo la regla de la mano derecha. En la porción este de la región de estudio se midieron fallas que buzaban al noroeste, que provocan que los cuerpos de roca estén inclinadas en dirección sureste, en cambio en el lado oeste del área de estudio, se midieron fallas que buzaban al sureste, provocando las que los cuerpos de roca tengan inclinación en dirección noroeste.

Lo anterior se ve reflejado en los diagramas graficados a continuación, en el estereograma (**Figura 40A**), se pueden interpretar sistemas conjugados de fallas con planos de falla buzando en dirección noroeste y sureste respectivamente. En el diagrama de contornos de polos (**Figura 40B**), se aprecia ligeramente esta tendencia, pero aun mostrando echados en dirección noroeste y sureste. El diagrama de rosetas representa los principales rumbos (**Figura 40C**) y sugiere que la mayoría de los rumbos se concentran en dirección noroeste-noreste (color negro) y en dirección suroeste (color verde), lo que refleja concretamente lo visto en campo.

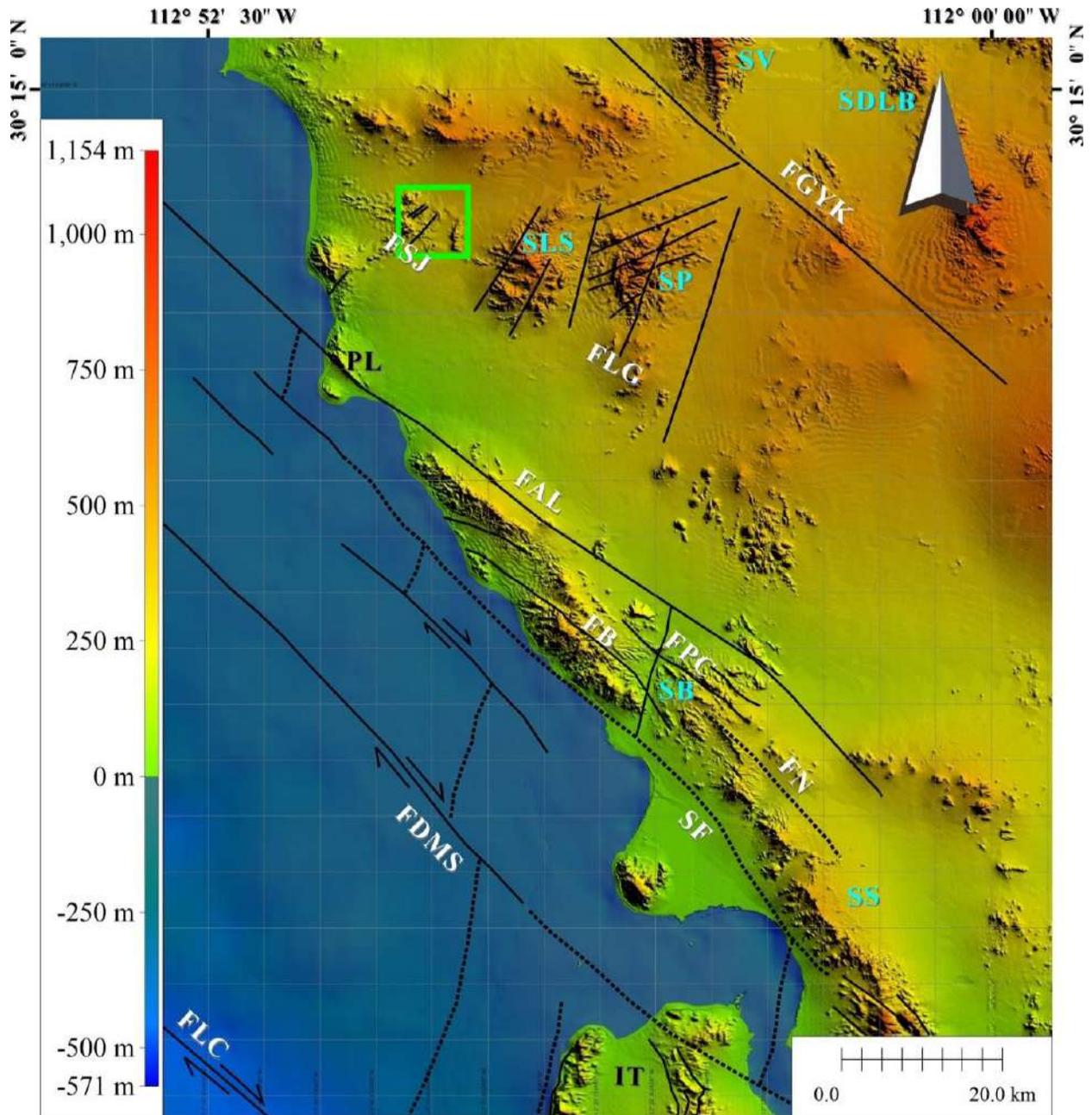


**Figura.41-** Diagramas de fallas realizados en el programa Stereonet; **A)** Estereograma donde se grafican las fallas que fueron medidas en el área del Cerro Libertad (Proyección de Schmidt, hemisferio inferior); **B)** Diagrama de contornos que muestra los polos de las fallas; **C)** Diagrama de roseta mostrando el rumbo de las fallas.

La región del Cerro Libertad, Puerto Libertad, Sonora, queda ubicada dentro de la Provincia Extensional del Golfo de California, producto de la distensión cenozoica que afectó a Sonora y Baja California (Gans, 1997; Lee et al., 1996). En la región de Cerro Libertad existen secuencias litológicas del Mesozoico y Cenozoico; en el área estudiada, durante estas eras ocurrieron varios eventos geológicos incluyendo magmatismo cretácico y neógeno asociado a la subducción de la placa Farallón en el noroeste de México, magmatismo que en las etapas finales de esta subducción se encuentra comúnmente intercalado con unidades detríticas, y en general, presenta tendencias calci-alcalinas, calci-alcalinas altas en potasio y shoshoníticas.

En el noroeste de México, Gastil y Krummenacher (1977), realizaron una interpretación tectónica en donde definen una serie de provincias estructurales, delimitadas principalmente por fallas de desplazamiento lateral derecho, que se generaron posiblemente en el Cenozoico; también reconocieron y nombraron sistemas de fallas y fallas principales o maestras de desplazamiento lateral, nombrando la falla Libertad, misma que más tarde Harrison-Darin (2011) la renombró como falla Amado-Libertad, debido a que la estructura se extiende hasta la cuenca Amado en el Golfo de California. Otra de las fallas regionales importantes para la zona de estudio, también de régimen lateral derecho, fue propuesta por Gastil y Krummenacher (1977), y se localiza al este del Cerro Libertad, en las inmediaciones de la Sierra Picú (Figura 42), aunque no le dieron nombre específico en este trabajo se decidió nombrarla Falla Gastil y Krummenacher. Así mismo, Harrison-Darin (2011) menciona que haciendo una proyección de los lineamientos que cruzan la costa de Sonora, cerca de Puerto Libertad, se encuentran pruebas de que estas fallas tienen tendencias similares a las fallas del Golfo de California.

60 kilómetros al sureste del Cerro Libertad, en la Sierra Bacha, Harrison-Darin (2011) estudio la deformación de esa sierra y propuso que durante el Mioceno la región fue afectada por un cizallamiento derecho en la región costera, el cuál debilitó mecánicamente la litósfera y ayudó a facilitar la ruptura continental. En su trabajo Harrison-Darin (2011), retoma una falla lateral con desplazamiento derecho, a la cual la llamo Falla Amado Libertad; esta falla delimita a la región en estudio en la porción suroeste (Figura 42).



**Figura 42.**-Mapa tectónico regional mostrando una porción del Golfo de California y parte de Sonora ilustrando las principales estructuras relacionadas a un proceso de “rift”, modificado de [Gastil y Krummenacher \(1977\)](#) y [Harrison-Darin \(2011\)](#). Los nombres de las fallas, sierras y poblados se resumen de la siguiente manera: FGYK Falla Gastil y Krummenacher; FSJ Falla San Judas; FLG Falla Las Golondrinas; FAL Falla Amado Libertad; FB Falla Bacha; FPC Falla Pozo Coyote; FN Falla Noriega; SF Falla Seri; FDMS Falla De Mar Sacrificio; FLC Falla La Cruz; SV Sierra Viejo; Sierra De La Berruga; SLS Sierra Los Seris; SP Sierra Picú; SB Sierra Bacha; SS Sierra Seri; PL Puerto Libertad; IT Isla Tiburón

## 6.1 Estructuras del Complejo volcánico Cerro Libertad

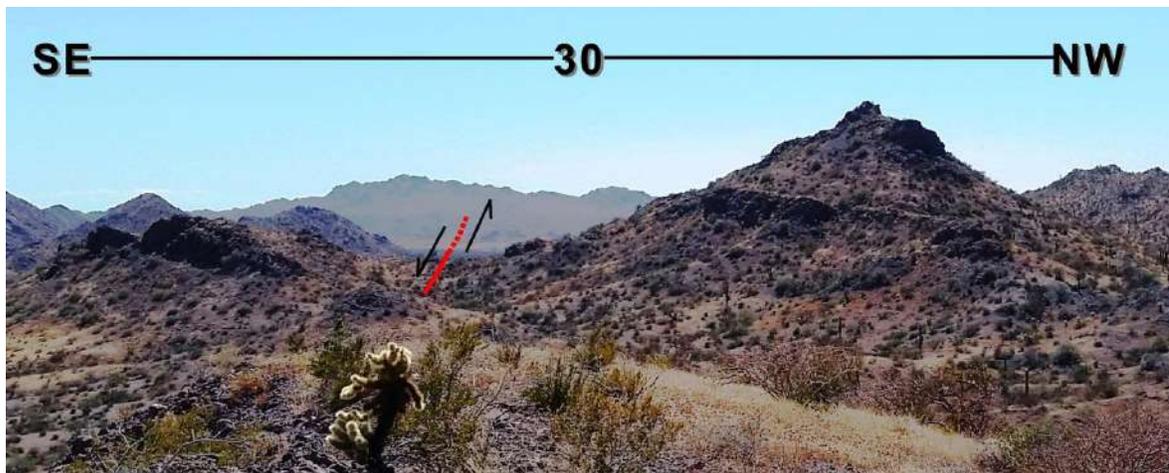
Este complejo ha sido afectado por varios eventos tectónicos, por lo cual la mayoría de los afloramientos presentes se encuentra muy fracturados (**Figura 43A y B**), de este modo resulta muy difícil reconocer una cronología de estructuras y lineamientos que se hayan generado en este complejo. Sin embargo, estos afloramientos se encuentran afectados principalmente por fallas lístricas (**Figura 43C**), esto hace que las unidades de roca se basculen. En los afloramientos de este complejo se lograron identificar algunas estructuras geológicas, como fallas y fracturas (**Figuras 43D y 43E**).



A)

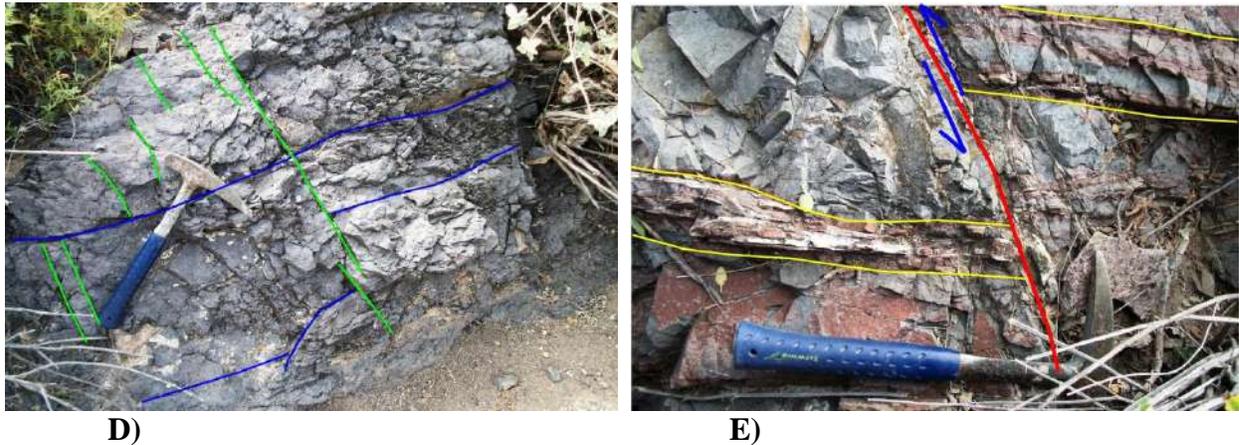


B)



C)

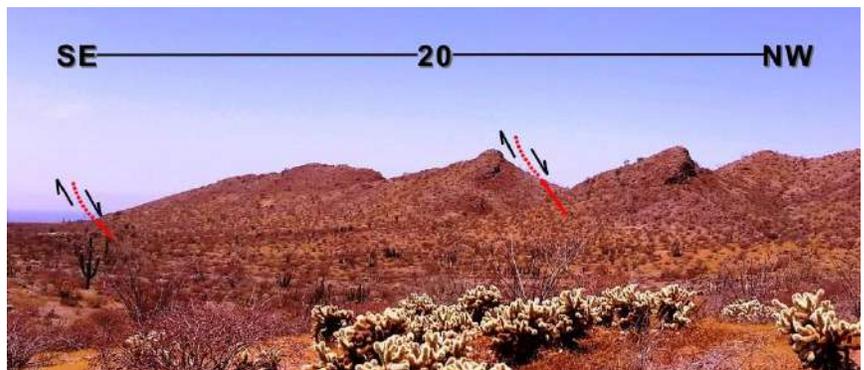
Las figuras continúan en la siguiente página...



**Figura 43.-** **A)** Cuerpo de roca de composición andesítica del Complejo volcánico Libertad, afectado por intenso fracturamiento; **B)** Dique hipabisal, afectado por fuerte fracturamiento; **C)** Unidad superior del Complejo volcánico Libertad, desplazada por una falla lístrica; **D)** Unidad volcánica de base, en donde se reconocieron dos familias de fracturas, en donde las de color verde cortan a las azules y **E)** Falla inversa observada en los derrames volcánicos de base del Complejo volcánico Libertad.

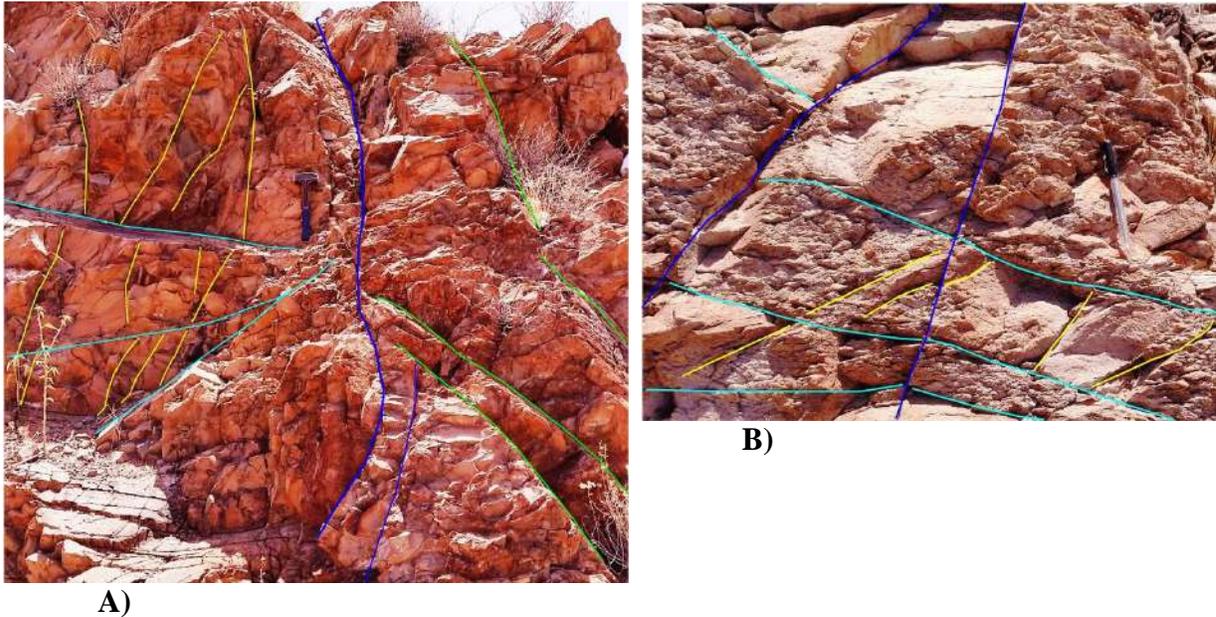
## 6.2 Estructuras del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas.

Los afloramientos de roca del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, se encuentran controlados por un sistema de fallas normales y lístricas, esto hace que las unidades de roca presentes en este miembro volcánico, estén basculadas, y a su vez, que la secuencia de rocas se repita (**Figura 44**).



**Figura 44.-** Unidades de roca correspondientes al MVLCC, las cuales son desplazadas por una serie de fallas lístricas.

Se detectaron fallas normales que desplazan a las unidades de roca de composición dacítica (**Figura 44**) de la parte superior Miembro volcánico Las Cejas Coloradas, así como sistemas de fracturas (**Figura 45A y 45B**) que afectan a estas unidades de roca.



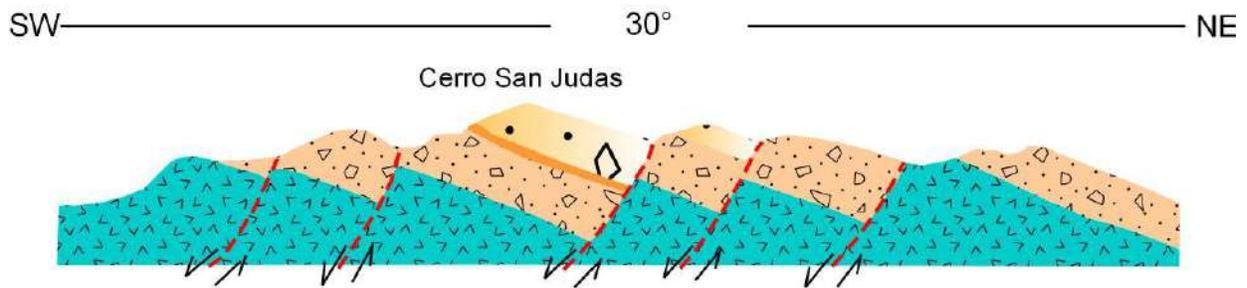
**Figura 45.- A)** Sistema de fracturas, donde las primeras fracturas en afectar este cuerpo de roca, son las de color amarillo, que posteriormente son cortadas por las fracturas que se indican con el color azul cielo, después se generaron las fracturas que se señalan con el color azul rey y que cortan a todas las anteriores y a su vez se formaron otras fracturas que se ponen en realce en color verde; **B)** Cuerpo de roca afectado por un sistema de fracturas, en donde la primera familia de fracturas en afectar este cuerpo, son las que se señalan con el color amarillo, que después son cortadas por las fracturas en color azul cielo y por último las fallas en color azul rey cortan a las preexistentes.

#### Estructuras de la localidad Cerro San Judas

Esta localidad muestra con una serie de fallas normales que por su cambio de ángulo se clasifican como lítricas, desplazando y repitiendo las unidades de roca presentes (**Figura 46 A, B y C**). En este afloramiento se presentan una serie de diques, en el que su emplazamiento pudo ser regido por estas fallas, pero al mismo tiempo éstos están afectados por una segunda etapa de deformación, formando estructuras sigmoides con una ligera foliación (**Figura 46D**) y estructuras en cola de caballo (**Figura 46D y E**).



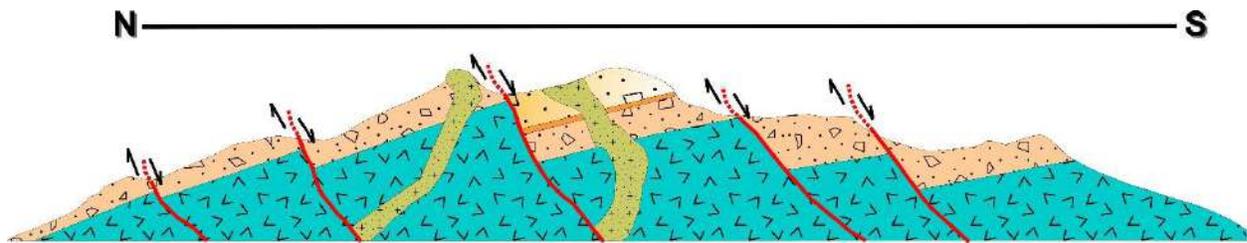
A)



B)

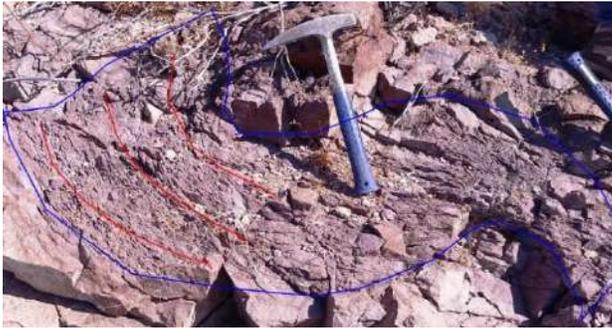


C)



D)

Las figuras continúan en la siguiente página...

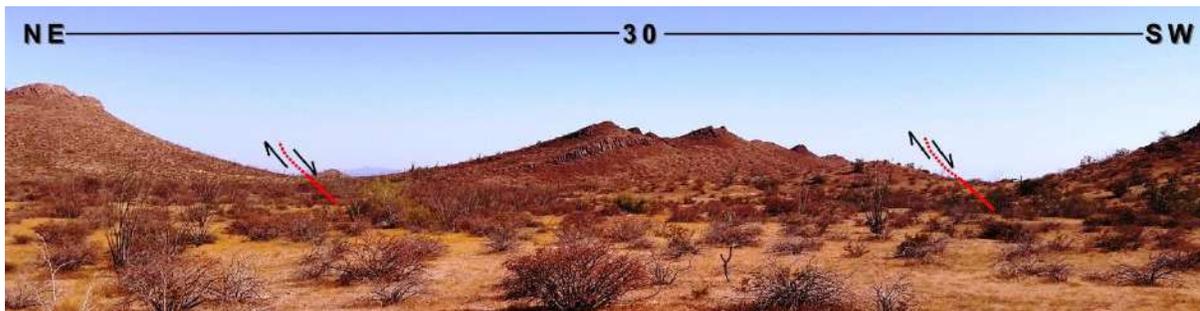


F)

**Figura 46.-** **A)** Unidades de roca en la localidad Cerro San Judas, que son desplazadas, por un conjunto de fallas lítricas; **B)** Sección esquemática que ejemplifica el arreglo estructural de la litología que compone el Cerro San Judas; **C)** Otra perspectiva del Cerro San Judas, donde se aprecia que las unidades de roca desplazadas son intrusionadas por dos conductos alimentadores; **D)** Sección esquemática con otra perspectiva, que ejemplifica el arreglo estructural de la litología del Cerro San Judas; **E)** Estructura sigmoide con cierta foliación secundaria; **F)** Estructura en forma de cola de caballo, reconocida en la parte superior del Cerro San Judas.

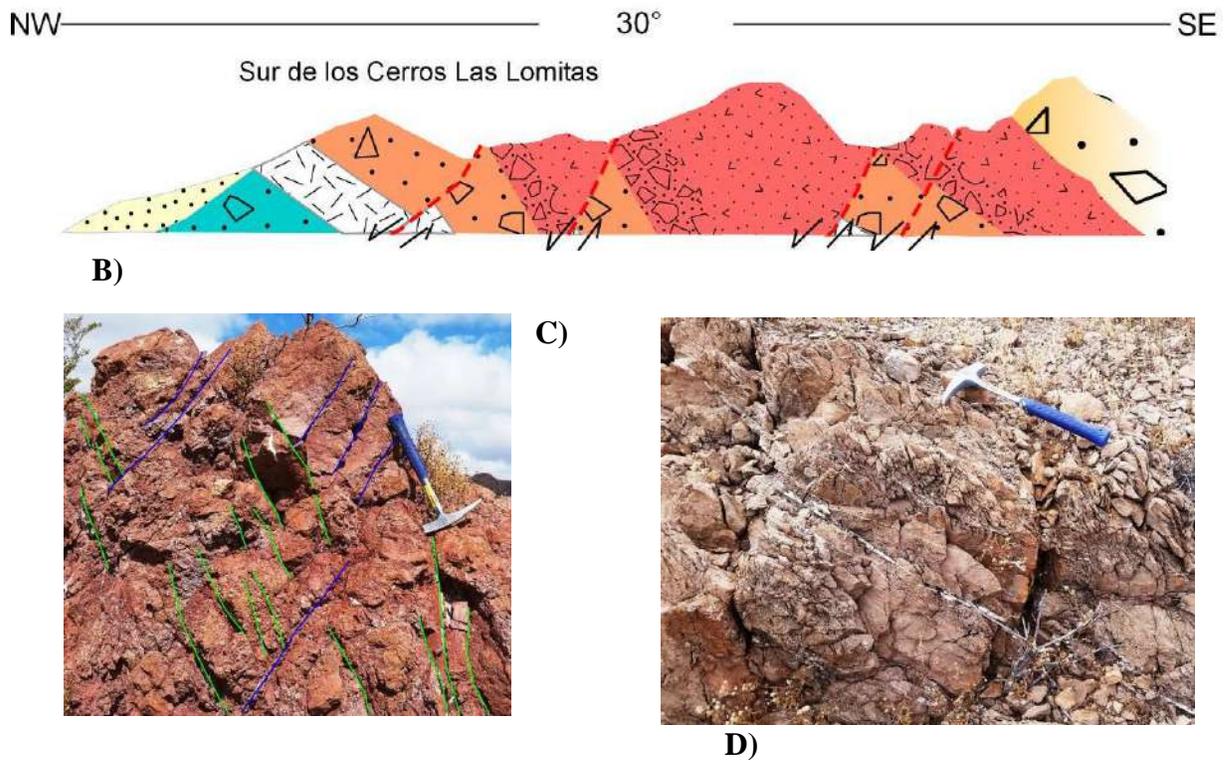
#### Estructuras de la localidad Las Lomitas

Las unidades de roca de esta localidad, están controladas principalmente por fallas normales con tendencia lítrica (**Figura 47A y B**), que disectan y desplazan a estas unidades de roca. También se reconocieron sistemas de fracturas (**Figura 47C**), que afectan estos cuerpos de roca; estas fracturas están rellenas de sílice y carbonatos (**Figura 47D**).



A)

Continúa en la siguiente página...



**Figura 47.-** A) Unidades de roca que se encuentran desplazadas por fallas normales; B) Sección esquemática de la porción sur de los Cerros Las Lomitas, nótese la repetición de las unidades debido al fallamiento; C) Sistema de fracturas, en el que se reconocen dos familias de fracturas; las marcadas en color verde son cortadas por las que se marcaron en color azul; y D) Cuerpo de roca que está afectado por alto fracturamiento, y que presenta vetillas que están rellenas de calcita y sílice.

Con el fin de visualizar con mayor detalle la relación estructural de la región de Cerro Libertad, se realizaron dos secciones representativas en la porción centro sur, donde afloran la mayoría de las unidades litológicas presentes en el área (Figura 48):

#### Sección A-A´

En esta sección se aprecia que las estructuras que dominan el sector de estudio, son fallas de tipo lístrico que basculan y desplazan a las unidades de roca presentes. Dichas unidades son desplazadas por fallas laterales; se nombró falla San Judas a una posible falla lateral izquierda. Uno de los grandes rasgos de esta sección es que al oeste de la falla San

Judas, el basculamiento de la sección es en dirección noroeste, y en el lado este de la falla San Judas éste se presenta en sentido contrario, predominantemente con dirección sureste.

Sección B-B´

En esta sección se busca mostrar la distribución espacial de todas las unidades de roca que afloran en la región de estudio. Se puede observar que se sigue repitiendo el mismo patrón de fallas lítricas, que hace que las unidades de roca se basculen y se desplacen. Uno de los rasgos importantes de esta sección se observa en el lado oeste de la falla San Judas, en donde se puede apreciar que afloran la mayoría de las unidades del basamento, gracias al desplazamiento y exhumación de las mismas.

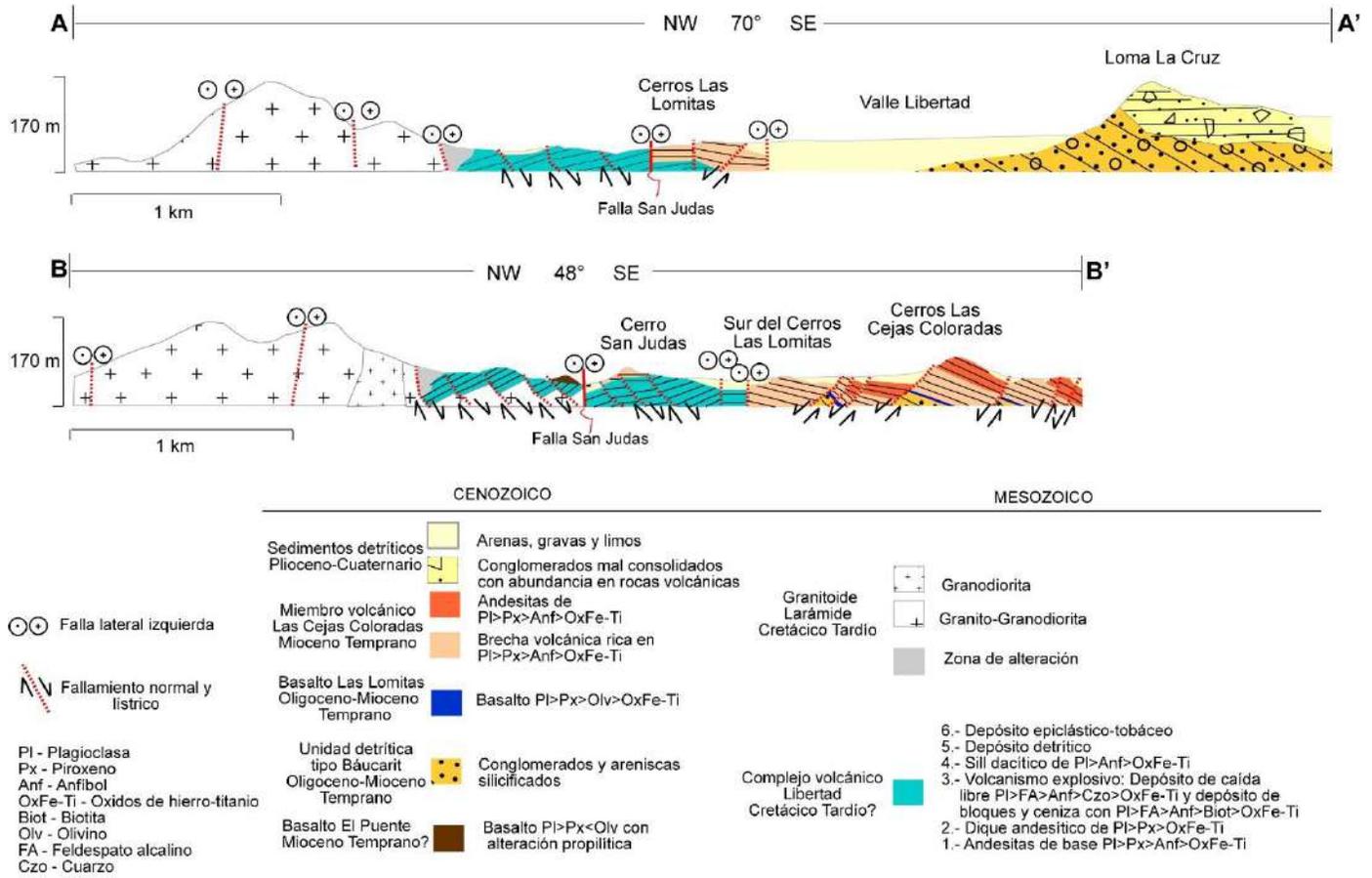


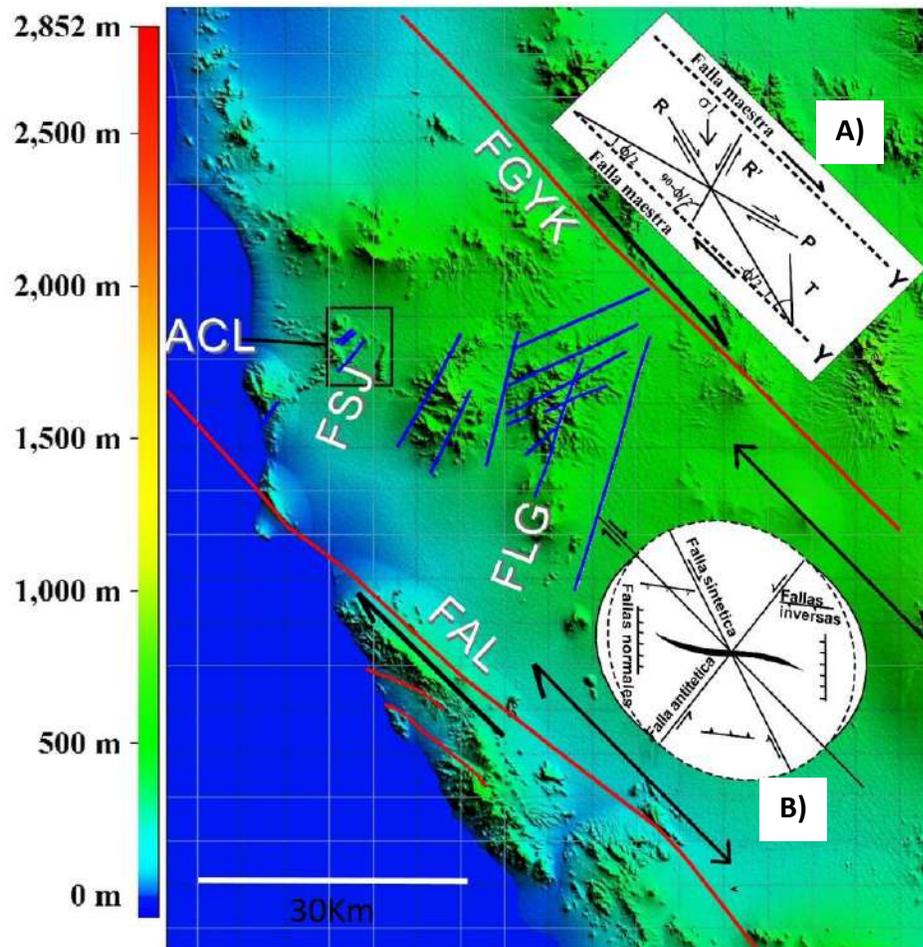
Figura 48.- Secciones representativas de la región de Cerro Libertad.

### 6.3 Interpretación estructural regional

Un modelo que explica parte del el sistema estructural que delimita la región de estudio, se conoce como flores negativas negative flowers (Woodcock y Fischer, 1986) y su origen ha sido explicado mediante procesos de deformación tipo Riedel (Davis y Reynolds, 1996), el cual según modelos experimentales y estudios de campo, está constituido por cinco familias de fallas. Las fallas Y, o maestras, son cizallas generadas en un ángulo de 45° con respecto a  $\sigma_1$ . Por su parte, las estructuras R, R' y P son también fallas de desplazamiento lateral, siendo R y P sintéticas mientras que R' es antitética (Figura 49A).

Otro modelo que puede explicar el sistema estructural de la región de estudio, es un modelo para una zona de deformación asociada a fallas regionales con desplazamiento lateral derecho (Figura 49B). Algunas de las fallas normales que se aprecian en la región de estudio, son relativamente paralelas a las fallas normales en las cuencas tipo “pull-apart” en el Golfo de California (ver Figura 37). Estas fallas no son Riedel propiamente sino fallas extensionales relacionadas a relevos de extensión entre dos fallas de deslizamiento lateral.

De manera general en la región del Cerro Libertad, la historia geológica estructural es un tanto compleja, ya que en ella posiblemente estén involucradas varias etapas de deformación durante el evento larámide, Basin and Range y eventos extensionales asociados al Proto-Golfo de California, destacando que durante el Cenozoico se evidencia una tectónica de carácter extensivo asociado a una transtension y que está regida por una serie de fallas de desplazamiento lateral derecho, lateral izquierdo, fallas normales y fallas lítricas (Figura 49).



FSJ - Falla San Judas  
 FGK - Falla Gastil y Krummenacher  
 FLG - Falla La Golondrina  
 FAL - Falla Amado Libertad  
 PL - Puerto Libertad  
 ACL - Área Cerro Libertad

**Figura 49.-** Mapa regional estructural, que corresponde a un modelo de elevación digital, donde se plasman las principales estructuras regionales del área de Cerro Libertad: **A)** Sistema Riedel; y **B)** Modelo para una zona de deformación con fallas laterales de desplazamiento derecho.

## VII DISCUSION Y CONCLUSIONES

### 7.1 Nomenclatura estratigráfica para las rocas del Cretácico Tardío

Una de las principales problemáticas de la geología en la localidad del Cerro Libertad es asignar una clasificación al volcanismo de la región. Esta involucra una terminología relacionada a la Formación Tarahumara y una correlación con otras denominaciones estratigráficas establecidas en Sonora, como el Complejo volcánico El Charro y la Formación El Tuli, sin embargo, en el presente trabajo, se decidió proponer una nueva denominación llamada el Complejo volcánico Libertad.

El complejo volcánico el Charro fue fechado por medio del método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en una unidad litológica que arrojó una edad de 71 Ma (Jacques-Ayala, 1993), la Formación Tuli fue fechada por el método U/Pb en 76 Ma por García y Barragán (2003), mientras que en la Formación Tarahumara han sido fechadas varias unidades por diversos autores bajo una edad de  $74.01 \pm 07$  Ma (dato tomado en Jacques-Ayala, 1993). Esto establece que ambas secuencias pertenecen al Cretácico Tardío. Sin embargo, la falta de estudios petrogenéticos en las unidades magmáticas no permite el esclarecimiento de un vínculo entre ellas y un origen para su formación, aún menos una correlación con el Complejo volcánico Libertad (CVL). Esto podría ser aclarado fechando algunas rocas del CVL y haciendo un estudio petrográfico y geoquímico sistemático de las rocas volcánicas del complejo volcánico El Charro, así como de las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, ya que la mayoría de estudios que se han realizado en este tipo de unidades, se han enfocado principalmente en secuencias sedimentarias. Por lo tanto, si se lograra confirmar una correlación petrogenética entre todas estas secuencias de rocas, se consideraría como parte del arco volcánico continental *laramídico* de Sonora que se desarrolló durante el Cretácico Tardío y el Paleoceno (Wilson y Rocha, 1946; McDowell *et al.*, 2001), y su emplazamiento y evolución sería contemporáneo con los cuerpos plutónicos graníticos (de acuerdo a las fechas reportadas por Gastil y

[Krummenacher 1977](#)), que ampliamente afloran en los batolitos a lo largo y ancho del Estado de Sonora, incluyendo en las inmediaciones del área de estudio.

## 7.2 Correlación del magmatismo Mioceno Temprano

En la región de Caborca, Sonora (al noreste del Cerro Libertad), [Izaguirre-Pompa \(2006\)](#), reportó una secuencia volcánica de 24.34 Ma de composición intermedia y afinidad química calci-alkalina, identificando en ella dos principales grupos: 1) Dacitas calci-alkalinas ricas en potasio y 2) Dacitas y latitas calci-alkalinas con valores en potasio más elevados hasta llegar a las rocas shoshoníticas.

Por otra parte al este del Cerro Libertad, [Gómez-Valencia \(2014\)](#) reconoció, en la Sierra Picú, siete pulsos magmáticos calci-alkalinos distribuidos en tres formaciones volcánicas (Formación volcánica La Golondrina, Formación volcánica Cerro Picú y Formación volcánica Las Lomitas) en donde existe una fecha de  $12.7\pm 0.4$  Ma para la unidad lávica superior ([Gastil y Krummenacher, 1977](#)). [Gómez-Valencia \(2014\)](#), menciona que esta secuencia magmática de la Sierra Picú presenta una importante presencia de anfíbol, además de una afinidad química particular con tendencia adakítica y que además muestra altas concentraciones químicas elevadas en algunos elementos como el Sr (de 579 a 1640 ppm).

En el presente estudio las rocas magmáticas que constituyen al Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (MVLCC), presentan rasgos muy similares a las rocas magmáticas reportadas por [Izaguirre-Pompa \(2006\)](#) y [Gómez-Valencia \(2014\)](#), sin embargo, la edad difiere un poco debido a que [Gastil y Krummenacher \(1977\)](#) fecharon una roca de los afloramientos de los cerros Las Cejas Coloradas en  $14.0\pm 3$  Ma, asignándose el MVLCC al Mioceno temprano. No obstante, en este miembro volcánico es notable la importante presencia de anfíbol y las altas concentraciones de Sr (de 924 a 2922 ppm) como ha sido reportado en el magmatismo de la Sierra Picú ([Gómez-Valencia, 2014](#)).

El MVLCC en el Cerro Libertad, forma la parte oeste y cubre a la unidad detrítica tipo Báucarit (por su afinidad a la Formación Báucarit en otras partes de Sonora) como en la región de Rayón, Sonora, donde también se reportó magmatismo calci-alkalino coronando a esta secuencia detrítica ([Gómez-Valencia et al., 2015](#)). Se trata del Complejo volcánico Las

Agujas, que se conforma de un apilamiento de dacitas y dacitas hipabisales con una importante presencia de anfíbol, y elevadas concentraciones de elementos como el Sr, de hasta 700 ppm. Este complejo volcánico fue fechado en  $14.88 \pm 0.47$  Ma (Gómez-Valencia et al., 2015) y se correlaciona con el MVLCC en Puerto Libertad.

### 7.3 Presencia de la Formación Báucarit en la porción costera de Sonora

La Formación Báucarit (Unidad detrítica tipo Báucarit en este trabajo), ha sido ampliamente reconocida en el Estado de Sonora pero por lo general hacia la serranía de la región en el límite tectónico conocido como provincia de Sierras y Valles (provincia *Basin and Range*). Esta Formación poco se conoce en la porción costera de Sonora y cuando es descrita comúnmente es confundida con los sedimentos detríticos consolidados más recientes (Mioceno temprano-Plioceno). Aun así, Morales-Morales et al., (2007), reconoció extensos afloramientos de la formación Báucarit en su carta Geológico-Minera 1:50,000 El Caracol, principalmente en la porción oeste de la carta. En la región del Cerro Libertad (al oeste de la carta anterior), se detectaron reducidos afloramientos de esta formación, que son cubiertos por amplias secuencias detríticas del Plioceno-Cuaternario. La presencia de la Unidad detrítica tipo Báucarit en la región de Cerro Libertad, se atribuye aquí a un desplazamiento de bloques originalmente pertenecientes a la provincia *Basin and Range* y que han sido controlados por fallas regionales de comportamiento lateral durante el evento Proto-Golfo de California, como la falla Amado-Libertad y la falla Gastil-Krummenacher mencionadas en el capítulo de geología estructural de este trabajo.

### 7.4 Conclusiones Petrológicas del magmatismo de la región

Los resultados petrológicos permiten distinguir algunas diferencias entre el magmatismo de la región del Cerro Libertad:

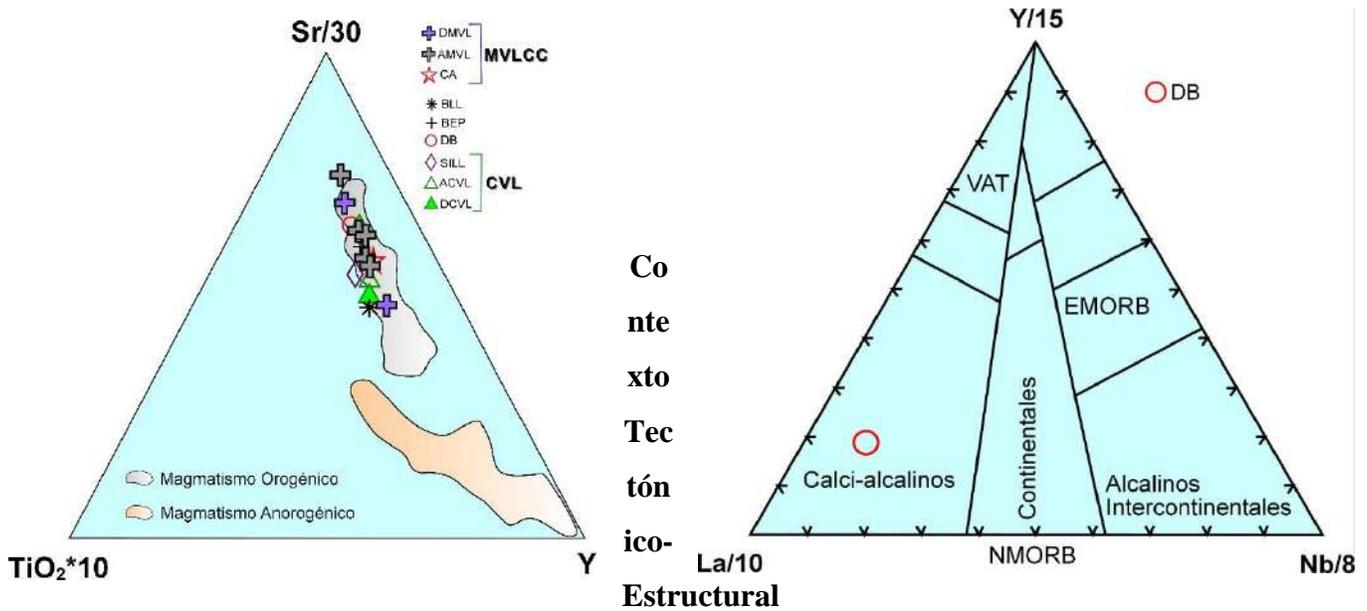
A.- Petrográficamente, se detectó que las rocas del Complejo volcánico Libertad (CVL), varían de Dacitas a Andesitas con intensa alteración propilítica con la presencia de cuatro grupos mineralógicos distintivos: (1) Pl>Anf>Biot>OxFe-Ti; (2) Pl>Cpx>OxFe-Ti; (3)

Pl>FA>>OxFe-Ti; y (4) Pl>OxFe-Ti>Anf. Las rocas del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (MVLCC), que varían de Traquiandesitas, Dacitas y Andesitas con una sutil alteración propilítica y la presencia de al menos 5 grupos mineralógicos: (1) Pl>Anf; (2) Pl>Anf>FA>Biot>>Opx>OxFe-Ti; (3) Pl>Anf>Cpx>OxFe-Ti; (4) Pl>Cpx>Anf>FA>OxFe-Ti y (5) Pl>Cpx>Anf>OxFe-Ti. Se concluye que al menos para estos dos grupos (CVL y MVLCC), es dominante la presencia de anfíbol para el MVLCC, mientras que para el CVL un rasgo característico es la mayor intensidad de alteración propilítica. Por otra parte, en el caso de los basaltos que se reconocieron en la estratigrafía de la región, se evidencia que en el caso del Dique basáltico (DB) y el Basalto El Puente (BEP), existe una mayor concentración y mayor tamaño en los fenocristales de olivino, además de una tendencia textural dolerítica, mientras que el Basalto Las Lomitas (BLL), se caracteriza por mostrar una abundancia en piroxenos y pseudomorfos de piroxeno además de escasos fenocristales de olivino en una matriz vítrea a intersecional.

B.- Geoquímicamente, las rocas del volcanismo Cretácico Tardío (CVL), presentan concentraciones de Sr de 530 a 1143 ppm, valores de Ba de 399 a 406 ppm y valores de K<sub>2</sub>O de 0.36 a 2.32 y por lo general tiende a reflejar valores más bajos en las HREE. Las rocas volcánicas del Mioceno temprano (MVLCC), por su parte tienen valores de Sr de 924 a 2922 ppm, valores de Ba de 1033 a 1761 ppm, valores de K<sub>2</sub>O de hasta 3.48 ppm, mayores concentraciones de Cr y Ni respecto a las rocas del CVL. Además, parece ser que existe una preferencia por las rocas del MVLCC a generar diópsida (di) normativa, particularidad que ocurre rara vez en los datos geoquímicos que se tienen de las rocas del CVL. En el caso de los basaltos, dos elementos discriminantes entre ellos son el Cr y Ni, debido a que el DB y BEP (Cr.- 516-541 ppm y Ni.- 293-328 ppm) tienen valores más elevados con respecto al BLL (Cr.- 149 y Ni.- 49 ppm).

Considerando las características de los magmas del Cerro Libertad, se decidió utilizar el diagrama ternario discriminante de tendencias magmáticas Orogénicas vs. Anorogénicas de Gómez-Valencia (2014, Figura 50A), donde se grafica el elemento traza móvil Sr, con

respecto al  $TiO_2$  y el elemento inmóvil Y. En este diagrama se puede apreciar que las rocas del Cerro Libertad cubren ampliamente el campo del magmatismo orogénico. En el caso de las rocas máficas, el diagrama de la **Figura 50B** es comúnmente utilizado para la discriminación de magmas orogénicos vs. anorogénicos, confirmando la tendencia del dique basáltico (DB) hacia el magmáticos calci-alcálico de arco volcánico continental.



**Figura 50.-** A) Diagrama ternario discriminante  $TiO_2*10$ , Sr/30 e Y de Gómez-Valencia (2014), mostrando las dos principales tendencias magmáticas reconocidas para magmas de Sonora; y B) Diagrama ternario discriminante para basaltos entre ambientes tectónicos orogénicos y anorogénicos de Cabanis y Lecolle (1989).

### 7.5 Contexto Tectónico-Estructural

Los magmas orogénicos de la región de Cerro Libertad, Puerto Libertad, Sonora, están asociados a la subducción de la placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana, y fueron generados en un ambiente de arco continental. Para estos magmas se considera la intervención de varias etapas de deformación, incluyendo la intervención del arco magmático laramide (que generó el magmatismo Cretácico Tardío del Complejo volcánico Libertad y de los Granitoides Laramide), la deformación *Basin and Range* y deformación extensional que dio paso al

establecimiento de las rocas detríticas de la Formación Báucarit y de sus miembros volcánicos como el asignado en este trabajo como Miembro volcánico Las Cejas Coloradas del Mioceno temprano. En general, estructuralmente existe un fuerte dominio extensional resultado de la intervención de la transtension producto del evento Proto-Golfo de California, dando origen a fallas regionales de comportamiento lateral.

## 7.6 Conclusiones generales

Las rocas estudiadas en la región del Cerro Libertad en Puerto Libertad, Sonora, corresponden a magmas orogénicos generados en un ambiente de arco continental producto de la subducción de la placa Farallón por debajo de la placa Norteamericana. Estas rocas se encuentran fuertemente afectadas por distintas etapas estructurales, dominando la que corresponde a un sistema extensional con la presencia de fallas normales, fallas laterales de comportamiento izquierdo y derecho y fallas lítricas que basculan y repiten algunas de las secuencias litológicas. En esta localidad se lograron identificar, al menos, 10 secuencias litológicas tanto magmáticas como detríticas (Figura 51): [1] Granitoides Laramide (Cretácico Tardío); [2] Complejo volcánico Libertad (Cretácico Tardío); [3] Sill dacítico (Cretácico Tardío?); [4] Dique basáltico (Mioceno temprano?); [5] Basalto El Puente (Mioceno temprano); [6] Unidad detrítica tipo Báucarit (Oligoceno-Mioceno temprano); [7] Conductos alimentadores del Cerro San Judas (Mioceno temprano); [8] Basalto Las Lomitas (Mioceno temprano?); [9] Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (Mioceno temprano?) y [10] Unidad detrítica Plioceno-Cuaternario.

En la secuencias magmáticas del Cretácico Tardío, fue posible establecer una correlación entre el Complejo volcánico Libertad (CVL) y la Formación Tarahumara así como la Formación Tuli y el Complejo volcánico El Charro, identificando que en la región del Cerro Libertad, estas secuencias litológicas en la región, representan la existencia de amplias cuencas que fueron alimentadas por detritos y magmatismo, evidencia de ello es la actual presencia de depósitos epiclasticos-tobáceos, depósitos piroclásticos y derrames volcánicos de composición intermedia que, además y en general, muestran una importante alteración

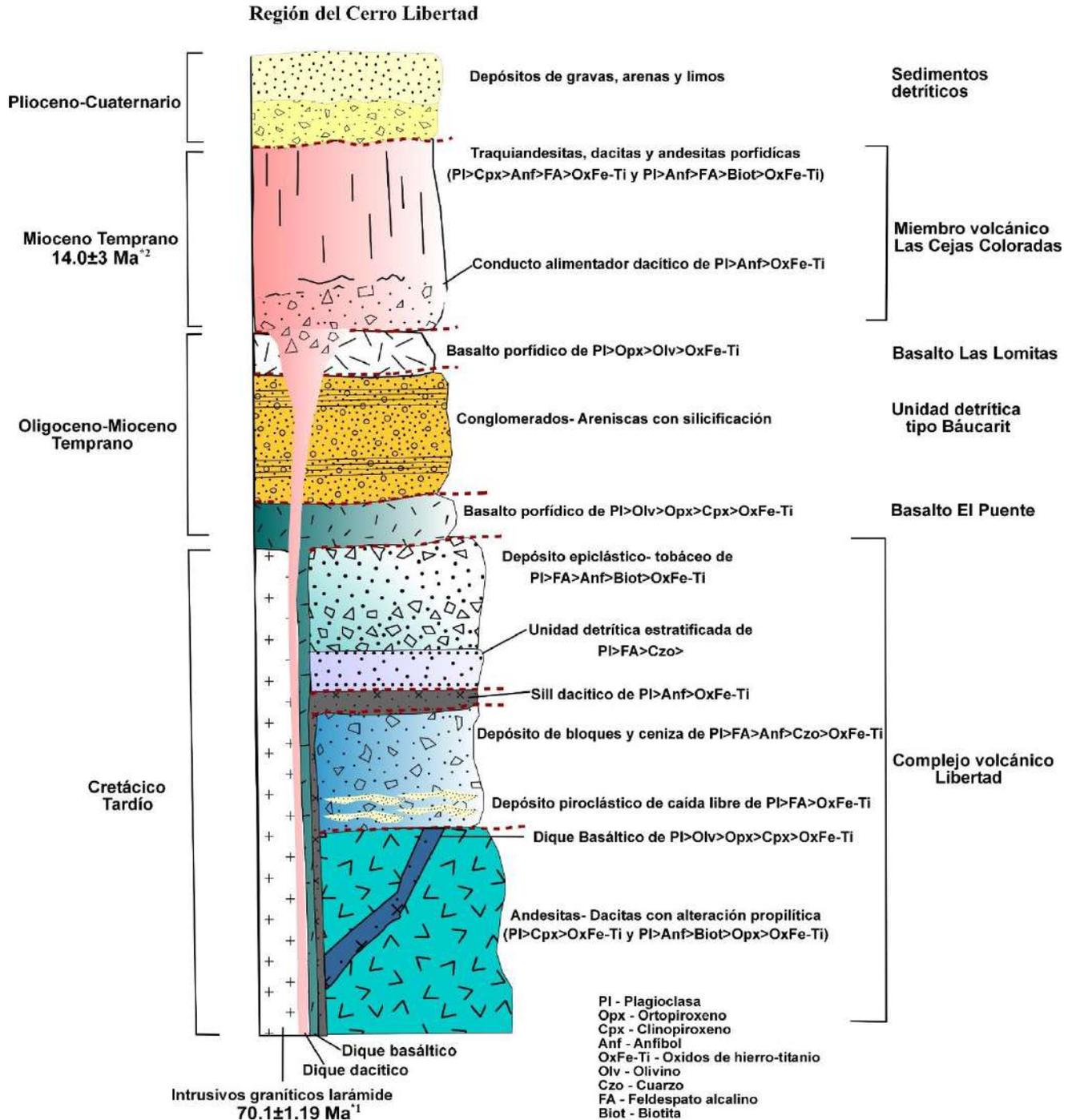
propilítica. El CVL está en contacto con el Granitoide Laramide, generándose entre ellos una aureola de metamorfismo con mineralización de Cu.

Por otra parte, en el caso del magmatismo Mioceno temprano, tras la realización de estudios de campo y petroquímicos, se reconocieron algunos de los conductos alimentadores del magmatismo del Miembro volcánico Las Cejas Coloradas (MVLCC), y éste además pudo ser correlacionado con otras secuencias magmáticas de la misma naturaleza que afloran en otras localidades de Sonora, considerándose que las rocas del MVLCC a diferencia de las rocas del CVL, forman parte de las etapas finales de la subducción en el noroeste de México. Es importante denotar que en el caso de los magmas máficos, el Dique basáltico y el Basalto El Punte, lo que sugiere que este dique bien puede ser el conducto alimentador del Basalto El Punte y que el Basalto Las Lomitas podría ser otro de los miembros volcánicos de la Unidad detrítica tipo Báucarit o Formación Báucarit.

Se pudo corroborar la presencia de secuencias detríticas tipo Báucarit y su relación con el magmatismo Mioceno temprano (MVLCC), siendo éste su miembro superior.

Dentro de los resultados petroquímicos, es observable que el CVL y el MVLCC pueden ser diferenciados tanto en campo como geoquímicamente, en campo porque el MVLCC tiene a generar amplios depósitos de brechas, morfologías en mesetas mientras que el CVL tiende a formar afloramientos complejos, muy erosionadas con importantes zonas de alteración. Geoquímicamente existen elementos discriminantes entre ambos grupos, tal como los elevados valores de Sr, Ba, Cr, Ni y K en el MVLCC y más bajos valores de HREE en los magmas del CVL, destacando también una preferencia al formarse diópsido como mineral normativo en las rocas del MVLCC.

Finalmente, el control estratigráfico de las secuencias litológicas Cretácico Tardío y del Mioceno temprano (Mesozoico-Cenozoico), permitió realizar un trabajo petrológico a detalle, el cual se considera pionero para la región y además fue posible con este trabajo de licenciatura en geología, actualizar la porción oeste de la carta geológica El Caracol escala 1:50,000, contribuyendo al conocimiento de la geología y del magmatismo de Sonora.



**Figura 51.-** Columna estratigráfica compuesta de la región del Cerro Libertad en Puerto Libertad, Sonora, México: \*1 y \*2 son edades geocronológicas tomadas de [Gastil y Krummenacher 1977](#).

## VIII BIBLIOGRAFÍA

**Anderson, T.H., and Silver, L.T., 1981**, An overview of Precambrian rocks in Sonora, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 5, no. 2, p. 131–139.

**Aranda–Gómez, J.J., Henry, C.D., Luhr, J.F., McDowell, F.W., 1997**, Cenozoic volcanism and tectonics in NW Mexico a transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces, in Aguirre–Díaz, G.L., Aranda–Gómez, J.J., Carrasco–Nuñez, G., Ferrari, L. (eds.), Magmatism and tectonics in the central and northwestern Mexico a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions: Mexico, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 41–84.

**Barragán R., Campos-Madrigal E., Ferrusquía-Villafranca I., López-Palomino I., Tolson G., 2010**, Código Estratigráfico Norteamericano: Por la Comisión Norteamericana De Nomenclatura Estratigráfica (Traducido al español), Boletín del Instituto de Geología, UNAM 117: 48p.

**Barrón-Díaz A., 2013**, Caracterización Petrogenética de las Metabasitas Anorogénicas del límite Cámbrico-Precámbrico, Municipio de Pitiquito, Sonora, México. *Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Universidad de Sonora*. 95pp.

**Cameron, K. L., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S., Gunn, S., 1989**, Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, México; a link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America: Journal of Geophysical Research, 94, 7817-7840.

**Centeno-García E., Maytorena, F., Calmus, T., Solis-Pichardo G., Lozano, R., 2002**, Proterozoic OIB Magmatism in the Caborca Terrane, northwestern México: Denver Annual Meeting, Colorado Convention Center: C205, Session No. 245.

**Cochemé, J. J., 1985**, Le magmatisme dans le Nord-Ouest du Mexique. Cartographie de la région de Yécora-Maicoba-Mulatos. Illustration magmatique de la fin d'un regime en subduction et du passage a un régime distensif: Université Aix-Marseille III, Thèse d'Etat, 209 pp.

**Cochemé, J. J., Demant, A., 1991**, Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico, en Pérez-Segura E., Jacques-Ayala C. (eds.), Studies of Sonoran geology: Geological Society of America, Special Paper 254, 81-94.

**Cooper, G. A., Arellano, A. R. V. , Johnson, J. H., Okulitch, V. J. , Stoyanow, A. and Lochman, C., 1952**, Cambrian stratigraphy and paleontology near Caborca, northwest Sonora, Mexico. Smithsonian Miscellaneous Collections, v. 119, no 1, 184 pp.

**Harrison-Darin, M., 2011**, Late Miocene Extensional Deformation in the Sierra Bacha, Coastal Sonora, Mexico: Implications for the Kinematic Evolution of the Proto-Gulf of California: University of Oregon, thesis of master science, 95pp.

**Davis, G. H. and Reynolds, S. J. 1996**, Structural geology of rocks and regions (2nd edition): New York, John Wiley and Sons, Inc., 776 p.

**Ells, J.L., 1972**, The Geology of the Sierra de la Berruga, Northwestern Sonora, Mexico: *San Diego California State University, M.S. Thesis*, 77 pp.

**Ferrari, L., M. Valencia-Moreno, S. Bryan. 2005**. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Bol. Soc. Geol. Mex. 57(3): 343-378.

**Folk, R. L., 1968**, Petrology of Sedimentary Rocks: Austin, TX, Hempill Pub. Co., 170 p.

**Gans, P.B., 1997**, Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico: *Tectonics*, 16(3), 388-408.

**García y Barragán J.C., Jacques-Ayala C., 2011**, Estratigrafía del Cretácico de Sonora, México: Panorama de la geología de Sonora, México, Boletín del Instituto de Geología, UNAM 118:113-200.

**García y Barragán, J.C., 2003**, Stratigraphy, sedimentology and tectonic interpretation for the origin of the Late Cretaceous El Tuli Formation in northern Sonora, Mexico: El Paso, Texas, University of Texas at El Paso, disertación doctoral, 194 p. (inédita).

**García-Cortés, J.A., Siqueiros-López, C., 2002**, Carta Geológico-Minera Guaymas G12-2, 1:250000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.

**Gastil, G., & Krummenacher, D., 1977**, Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino; Geological Society of America Bulletin, no. 2, p. 189-198.

**Gómez-Valencia, A.M., 2014**, Evolución espacio-temporal y petrológica del magmatismo Oligoceno-Mioceno en Sonora, México: Énfasis en el magmatismo adakítico relacionado al cese de la subducción: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Tesis de Maestría, 275 pp.

**Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano. J.R., López-Martínez M., Vega-Granillo R., Pallares C., 2015**, Petrografía, geoquímica y geocronología del magmatismo orogénico en Rayón: Características petrológicas de los últimos magmas asociados a la subducción en Sonora, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. xx, núm. X, p. xx (*artículo en prensa*).

**Harker, A., 1909**, The Natural History of Igneous Rocks. London: Methuen.

**Harrar, W.G., 1989**, Geology and paleomagnetism of the central sierra El Batamote, northwestern Sonora, Mexico: Cincinnati, Ohio, University of Cincinnati, tesis de maestría, 134p. (inédita).

**Harrison-Darin, M., 2011**, Late Miocene Extensional Deformation in the Sierra Bacha, Coastal Sonora, Mexico: Implications for the Kinematic Evolution of the Proto-Gulf of California: University of Oregon, thesis of master science, 95pp.

**Humphrey, W.E., 1956**, Tectonic framework of northeast Mexico: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 6, 25–35.

**INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1991**, Datos básicos de la Geografía de México, 142 pp.

**Irvine, T.N., & Baragar, W.R., 1971**, A guide to the Chemicals classification of the common volcanic Rocks. Can. J. Earth Sci., 8, p. 523-548.

**Izaquirre-Pompa A., 2006**, Estudio Petrológico y Geocronológico del volcanismo orogénico intermedio-ácido de edad Oligo-Mioceno del Norte de Caborca, Sonora, México; Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, 80 pp.

**Jacques-Ayala, César, 1983**, Sierra El Chanate, NW Sonora, Mexico—stratigraphy, sedimentology and structure: Cincinnati, Ohio, University of Cincinnati, tesis de maestría, 148 p. (inédita).

**Kuno, H. 1968**, Differentiation of basalt magmas. In: Hess, H. H. & Poldervaart, A. A. (eds) Basalts: The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition, 2. New York: Interscience, pp. 623–688.

**Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., & Zanettin B., 1986**, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal Petrology, 27, p. 745-750.

**Lee, J., Miller, M. M., Crippen, R., Hacker, B., Ledesma-Vázquez, J., 1996**, Middle Miocene extension in the Gulf Extensional Province, Baja California-Evidence from the southern Sierra Juarez: Geological Society of America Bulletin, v. 108, p.505-525.

**Longoria J. F. y González, M. A. 1978**, Estudios estratigráficos-estructurales en el Precámbrico de Sonora: Geología de los Cerros Gamuza y El Arpa, *Boletín del Departamento de Geología UNISON*, Hermosillo, Sonora, México, 2(2): 106-149pp.

- McDowell, F. W., Clabaugh, S. E., 1979**, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western México: Geological Society of America Special Paper, 180, 113- 124.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001**, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, México: Bulletin of the Geological Society of America, 113(4), 521-531.
- Miyashiro, A., 1974**, Volcanic rock series in island arc and active continental margins. Am. J. Sci., 274, p. 321-355.
- Mora-Álvarez, G., McDowell, F.W., 2000**, Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Úrsula of western Sonora, Mexico, in Delgado-Granados H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M. (eds.), Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 334, 123–141.
- Morales-Morales, H., Hernández-Rábago P.Y., Cendejas-Cruz F., Vázquez-Mendoza R., 2007**, Carta Geológico-Minera El Caracol H12-A85 escala 1:50 000: SGM (Servicio Geológico Mexicano).
- Oskin, M.E., Stock, J.M., 2003**, Pacific–North America plate motion and opening of the Upper Delfín basin, northern Gulf of California: Geological Society of America Bulletin, 115, 1173–1190.
- Peccerillo A., Taylor, S. R., 1976**, Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic Rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contrib. Mineral. Petrol., 58, p. 63-81.
- Raisz, Erwin, 1964**, Landforms of Mexico: Cambridge, Mass., Office of Naval Research, Geography Branch, mapa con texto, escala 1:3'000,000. 2<sup>a</sup> ed.
- Rodríguez-Castañeda, J.L., 1994**, Geología del área El Téguachi, estado de Sonora, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 11, p. 11–28.

**Roldán-Quintana, Jaime; McDowell, F.W.; y Valencia-Moreno, Martín, 2002**, Datos geoquímicos e isotópicos de las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara en el sur de Sonora: GEOS, v. 22, núm. 2, p. 239.

**Rollinson, Hug R., 1993**, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: Pearson Education Limited, p. 10-11.

**Stewart, J. H., McMenamin, A. S., and Morales-Ramirez, J. M., 1984**, Upper Proterozoic and Cambrian rocks in the Caborca region, Sonora, Mexico. *Physical Stratigraphy, Biostratigraphy, Paleocurrent Studies, and Regional Relations.*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1390.

**Sun, S.S., McDonough W.F., 1989**, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and process en Saunders A.D. Norry, M.J. (eds), Magmatism in the ocean basins: Geological Society, London, Special Publications, 42, 313-345, doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

**Till, B.C., Gans, P.B., Spera, F.J., MacMillan, I., Blair, D.K., 2009**, Perils of petrotectonic modeling: A view from southern Sonora, Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 186(3), 160-168.

**Verdugo-Mariscal, F., 1985**, Aporte al estudio de la Geología Histórica del Noroeste de Sonora: Notas Geológicas del Boletín de la asociación de egresados de geología de la Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora. Publicación no. 6.

**Vidal-Solano, J.R., 2012**, Estudio petrológico de los Paleo-Volcanes hiperalcalinos de Sonora, México. Revista Epistemus, Ediciones de la Universidad de Sonora, 13, p. 21-26.

**Wilson, F.I., Rocha, S.V., 1949**, Coal deposits of the Santa Clara district near Tónichi, Sonora, México: United States Geological Survey Bulletin, 962A, 80 pp.

**Woodcock N.H., y Fisher M., 1986**, Strike-slip duplexes. J. Struct. Geol., 8, 725-735.