



**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**TESIS**  
ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN LA ZONA MINERALIZADA DE LA MINA LA INDIA,  
MUNICIPIO DE SAHUARIPA, SONORA, MÉXICO

**PRESENTA**  
JAVIER EDUARDO BUSTAMANTE PABLOS  
**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE**  
GEÓLOGO

**DIRECTOR DE TESIS**  
DR. RICARDO VEGA GRANILLO

HERMOSILLO, SON.

MAYO, 2019

# 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

## DEDICATORIA

A mi familia por siempre brindarme su amor y apoyo incondicional para poder culminar mis estudios hasta ahora. Entre ellos, mis abuelos por ayudarme siempre recibíendome con una rica comida, por cuidarme siempre que llegaba enfermo y por enseñarme cada día tantas cosas. A mi mamá por enseñarme lo hermoso que es vivir siendo una persona con mucho amor para dar. A mi papá por todo su apoyo, por todos esos veranos, navidades y llamadas en las que me enseñaste a enfrentar retos y el gusto por ayudar a los demás. A mi tía Nadia por todo el amor que tiene para darnos a mí y mis hermanas. A mí hermana mayor Rosa por enseñarme a tener un poco de toda la bondad que tiene y claro por haberme preparado comida tan rica estos últimos meses de la elaboración de la tesis.

A mis amigos de la colonia que me han acompañado en tantas aventuras Kevin, Fernando, Fernando, Janita, Gabo, Rogelio, Christian, Ivanna, Niko, Lore, Isaac. Mis amigos de la preparatoria que me han acompañado hasta ahora Abraham, Brandon, Nayeli, Soto, Osvaldo, Arzac, Gibran, Olivia, Ricardo, Edgar, Tere. A mis compañeros de universidad, que mientras nos compartíamos tantos conocimientos sobre esta maravillosa carrera, nos volvimos tan buenos amigos, gracias Memo, Abraham, Romario, Salvador, Jesús, Fátima, Gabriela, Cielo, Ricardo, Viri, Mariana, Paco, Angélica, Jocelyn, Anairam, Román, Gabino, Hiram, Mike, Carlos, Tapia, Melgarejo.

A ti Alexa, por enseñarme a amar y disfrutar la naturaleza, por alegrarme con tu compañía en este proceso e impulsarme a dar lo mejor de mí. Además, por ayudarme en la edición y siempre estar ahí para mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director de tesis, el Dr. Ricardo Vega por todo su gran apoyo en el desarrollo de esta tesis y todas las enseñanzas que vinieron con eso. A mis sinodales Dr. Vidal y Dr. Lugo, por su ayuda en opiniones y correcciones para mejorar este trabajo.

A mis maestros de la carrera por su paciencia y ganas al enseñarnos tanto, en especial al Dr. Vega, Dr. Cuén, Dr. Grijalva, Dr. Vidal, M.C. Lourdes, Dr. Paz, M.C. Ochoa, Dra. Sarmiento, M.C. Espinoza, L.F. Montes y Dr. Del Río.

Al Ing. Fernando Oviedo de la compañía Agnico Eagle por la oportunidad de la estancia en la mina "La India" para hacer el campo de esta tesis. Así como, a los geólogos Rafael, Estrada, Roberto, Chomina, Omar, Romeo y Romero por convertirse en mis maestros y amigos.

## RESUMEN

La mina "La India" es un proyecto minero en explotación de la empresa minera Agnico Eagle ubicado al oriente del estado de Sonora dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental. Las rocas volcánicas que afloran en el área corresponden a la parte superior del Complejo Volcánico Inferior dentro de la Formación Tarahumara, donde predominan andesitas, flujos dacíticos y tobas de lapilli líticas. La mineralización es generada en brechas hidrotermales producidas por un sistema epitermal de alta sulfuración que está controlado tanto estructural como litológicamente. El área de estudio se ubica estructuralmente en el flanco occidental de un pliegue anticlinal con un ángulo interflancos de unos  $140^\circ$ , por lo que puede clasificarse como pliegue "gentil", que provocó un basculamiento de las capas hacia el Oeste, actualmente con un promedio de  $20^\circ$ . Este plegamiento se correlaciona por estilo y edad de las rocas afectadas con la Orogenia Laramide del centro de Sonora y sureste de Arizona.

Posterior al plegamiento, se produjo un proceso extensional que generó un fallamiento normal con desplazamientos variables. Dicho proceso extensional produjo en el área tres familias principales de fallas de alto ángulo donde la de mayor densidad tiene rumbos  $N10W^\circ$ - $N10^\circ E$ , seguida de otra con rumbos  $N20^\circ$ - $40^\circ E$ , con un grupo subordinado  $N50^\circ$ - $70^\circ E$  y como tercera familia una con rumbos  $N30^\circ$ - $50^\circ W$ . Con base en el estereograma de flechas de movimiento, el 77% de los bloques de techo experimentaron un desplazamiento hacia el E, donde la región del proyecto El Realito tiene una predominancia de desplazamiento al NE y la de Los Tubos hacia el SE. Los ejes de extensión y acortamiento indican una extensión regional promedio WNW-ESE y sugiere que, aunque las fallas del área presentan actitudes distintas generando las 3 familias, todas son cinemáticamente compatibles y pudieron ser originadas por un sólo evento de deformación. La fluctuación de los rumbos pudiera atribuirse a un campo de esfuerzos no-uniforme existente en un tiempo dado o a una variación temporal del fallamiento, donde las fallas más antiguas son NW, con pequeños desplazamientos causados por las familias de fallas N-S y NE.

Dados los resultados del diagrama de ejes cinemáticos, se sugiere que el fallamiento se generó mientras las unidades volcánicas presentaban un basculamiento de  $32^\circ$  hacia el W y que una posible falla lístrica echada al Oeste, rotaría todo el sistema hacia el E, unos  $12^\circ$  dando como resultado un basculamiento actual de las capas de  $20^\circ$  W. Este evento tectónico extensional puede relacionarse con el evento tectónico que generó la provincia fisiográfica "*Basin and Range*".

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>III. METODOLOGÍA .....</b>	<b>3</b>
III.1. Trabajo de campo .....	3
III.2. Manejo estadístico de datos.....	4
III.3. Petrografía y difracción de rayos X.....	4
<b>IV. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA .....</b>	<b>6</b>
<b>V. FISIOGRAFÍA, CLIMA Y VEGETACIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>VI. TRABAJOS PREVIOS.....</b>	<b>9</b>
<b>VII. GEOLOGÍA REGIONAL.....</b>	<b>11</b>
<b>VIII. GEOLOGÍA LOCAL .....</b>	<b>16</b>
VIII.1. Unidad Andesítica.....	17
VIII.2. Unidad Dacítica.....	23
<b>IX. MINERALIZACIÓN SECUNDARIA DEL ÁREA.....</b>	<b>31</b>
IX.1. Brechas de origen hidrotermal .....	31
IX.2. Grupos de alteraciones .....	32
<b>X. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....</b>	<b>35</b>
X.1. Análisis Estructural en el Proyecto el Realito.....	38
X.2. Análisis Estructural En El Proyecto Los Tubos .....	45
X.3. Resumen Del Análisis Estructural De La Mina La India.....	52
<b>XI. DISCUSIÓN .....</b>	<b>58</b>
<b>XII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>XIII. REFERENCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>XIV. ANEXOS .....</b>	<b>74</b>
XIV.1. Anexo 1: Conceptos Teóricos.....	74
XIV.1.1. Tipos de Falla .....	74

XIV.1.2. Análisis estructural.....	80
XIV.1.3. Análisis dinámico.....	80
XIV.1.4. Actitudes de falla y orientación del elipsoide de esfuerzo. ....	82
XIV.1.5. Complicaciones debido a planos preexistentes de debilidad.....	84
XIV.1.6. Campos de esfuerzos no-uniformes.....	85
XIV.1.7. Análisis cinemático .....	85
XIV.1.8. Manejo estadístico de datos .....	86
XIV.1.9. Interpretación de estereogramas .....	86
XIV.1.10. Difracción De Rayos X (DRX).....	89
XIV.1.11. Alteración Hidrotermal De La Región: .....	91
XIV.1.11.1. Arcillas de alteración .....	91
XIV.1.11.2. Argilisita.....	91
XIV.2. Anexo 2: Difractogramas.....	92
XIV.3. Anexo 3: Tablas petrográficas de la mina la India.....	95

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localización de la mina La India.....	6
<b>Figura 2.</b> Provincias fisiográficas del estado de Sonora .....	7
<b>Figura 3.</b> Mapa de localización de proyectos El Realito y Los Tubos .....	10
<b>Figura 4.</b> Mapa geológico de la región centro-este del estado de Sonora.....	13
<b>Figura 5.</b> Mapa esquemático de la geología de la mina "La India" .....	16
<b>Figura 6.</b> Columna estratigráfica del proyecto El Realito. ....	17
<b>Figura 7.</b> Toba de lapilli de composición andesítica .....	18
<b>Figura 8.</b> Sedimentos volcanoclásticos de composición andesítica .....	18
<b>Figura 9.</b> Dacita porfídica .....	19
<b>Figura 10.</b> Toba de lapilli ignimbrítica de composición riolítica .....	20
<b>Figura 11.</b> Toba de lapilli lítica ignimbrítica de composición dacítica .....	21
<b>Figura 12.</b> Flujo andesítico .....	22

<b>Figura 13.</b> Fotografía de andesita en sección delgada .....	22
<b>Figura 14.</b> Litofacies de un flujo dacítico autobrechado.....	23
<b>Figura 15.</b> Dacita porfídica .....	25
<b>Figura 16.</b> Métodos para la descripción de las dacitas porfídicas.....	26
<b>Figura 17.</b> Intrusivo de cuarzo y feldespatos .....	27
<b>Figura 18.</b> Intrusivo hipabisal de una microdiorita.....	28
<b>Figura 19.</b> Toba de lapilli lítica .....	29
<b>Figura 20.</b> Métodos para la descripción de la toba de lapilli lítica ignimbrítica .....	30
<b>Figura 21.</b> Brechas hidrotermales .....	32
<b>Figura 22.</b> Fotografías de cristales de alunita .....	33
<b>Figura 23.</b> Sección esquemática A-A' .....	35
<b>Figura 24.</b> Mapa generalizado de la geología del Distrito Mulatos .....	36
<b>Figura 25.</b> Fallas en la mina "La India" .....	37
<b>Figura 26.</b> Estructuras en la toba de lapilli lítica.....	38
<b>Figura 27.</b> Afloramientos de estructuras en la toba de lapilli lítica .....	39
<b>Figura 28.</b> Estructuras del proyecto El Realito .....	40
<b>Figura 29.</b> Diagrama de rosas y contorno de polos del proyecto El Realito .....	41
<b>Figura 30.</b> Ejes cinemáticos del proyecto El Realito.....	42
<b>Figura 31.</b> Ejes de extensión y acortamiento del proyecto El Realito.....	43
<b>Figura 32.</b> Planos con dirección de deslizamiento del proyecto El Realito .....	44
<b>Figura 33.</b> Estructuras silicificadas del proyecto Los Tubos .....	45
<b>Figura 34.</b> Fallas en el proyecto Los Tubos .....	46
<b>Figura 35.</b> Estructuras en la dacita porfídica con alteración argílica avanzada.....	47
<b>Figura 36.</b> Posiblemente una pequeña intrusión con un fracturamiento no sistemático.....	47
<b>Figura 37.</b> Diagrama de rosas y contorno de polos del proyecto Los Tubos .....	48
<b>Figura 38.</b> Ejes cinemáticos del proyecto Los Tubos.....	49
<b>Figura 39.</b> Ejes de extensión y acortamiento del proyecto Los Tubos .....	50
<b>Figura 40.</b> Planos con dirección de deslizamiento del proyecto Los Tubos.....	51
<b>Figura 41.</b> Lineamientos principales.....	52
<b>Figura 42.</b> Diagrama de rosas y contorno de polos de la mina "La India" .....	54
<b>Figura 43.</b> Ejes cinemáticos de .....	55

<b>Figura 44.</b> Ejes de extensión y acortamiento de.....	56
<b>Figura 45.</b> Planos con dirección de deslizamiento de.....	57
<b>Figura 46.</b> Modelo de evolución estructural de la región.....	60

### INDICE DE FIGURAS EN ANEXOS

<b>Figura A1.</b> Estrías de falla.....	76
<b>Figura A2.</b> Horizontes marcadores.....	77
<b>Figura A3.</b> Diferentes tipos de fracturas Riedel.....	78
<b>Figura A4.</b> Tectoglífos .....	78
<b>Figura A5.</b> Visualización de separaciones, <i>offset</i> , <i>throw</i> y <i>heave</i> .....	79
<b>Figura A6.</b> Visualización de los esfuerzos .....	81
<b>Figura A7.</b> Relación entre los esfuerzos y las superficies conjugadas de cizalla .....	82
<b>Figura A8.</b> Diagrama de bloques en los distintos tipos de fallas.....	83
<b>Figura A9.</b> Descripción de ejes de extensión y acortamiento.....	88
<b>Figura A10.</b> Ejemplo simplificado de una configuración del tubo de rayos X .....	89
<b>Figura A11.</b> Ejemplo de difractograma a partir del polvo de una argilista .....	90

## I. INTRODUCCIÓN

La mina "La India" es un proyecto minero en explotación de la empresa minera Agnico Eagle ubicado al oriente del estado de Sonora, la cual explota Oro y Plata desde septiembre del 2013. En el 2017 se extrajeron 101,150 onzas (Oz) de oro y 313,000 Oz de plata (Agnico Eagle, 2018), lo que la convierte en uno de los productores más importantes en el estado y fuente de empleos directos en los municipios aledaños. La mineralización es generada en brechas hidrotermales, asociadas a un sistema epitermal de alta sulfuración (Staude y Barton, 2001; Cruz-Páez, 2008), siendo éstas el núcleo del sistema de alteración, que está controlado tanto estructural como litológicamente, con orientación principal NNE-SSW. En el área se han realizado reportes internos y tesis enfocados en la cartografía y en la clasificación del yacimiento, pero al no haber ningún estudio enfocado al análisis estructural detallado, se tomó la decisión de resolver esta carencia mediante un estudio integral, que contemple desde un trabajo de campo, incluyendo la observación y descripción de las estructuras, su ubicación, morfología, la textura y mineralogía de las rocas involucradas, así como la medición de la actitud de las fallas y otras estructuras contenidas en ellas. Se considera que mediante el análisis de estos elementos se ampliará el entendimiento de la geología estructural del área y su relación con los eventos de mineralización.

La meta esencial de este trabajo es elaborar un estudio estructural del depósito que incluya el análisis dinámico y cinemático basado en un estudio estadístico, que permitirá interpretar la evolución estructural de la región y la reconstrucción de la orientación del campo o campos de esfuerzo que dieron lugar a la configuración estructural actual, principalmente de las áreas incluidas en los proyectos El Realito y Los Tubos. Asimismo, la falta de una amplia comprensión estructural y mineralógica de estos nuevos proyectos conlleva a la necesidad de avanzar en la exploración, algo primordial para alargar la vida de la mina, por lo que en el primer cuarto de año del 2018, la empresa realizó una etapa de barrenación a diamante de 6,833 metros (Agnico Eagle, 2018), además de un mapeo a escala 1:1000 y un muestreo superficial.

Es por ello que además del análisis estructural, se desea aportar un estudio petrográfico y de identificación de minerales por difracción de rayos X para muestras superficiales y de núcleos de barrenación a diamante para detallar el entendimiento del área.

## **II. OBJETIVOS**

Elaborar un estudio estructural del depósito que incluya el análisis dinámico y cinemático basado en un estudio estadístico a partir de la captura de datos estructurales en los proyectos El Realito y Los Tubos.

Interpretar la evolución estructural de la región reconstruyendo la orientación del campo o campos de esfuerzo al obtener las direcciones generales de acortamiento y extensión que dieron lugar a la configuración estructural actual y con ello examinar la relación entre la orientación del esfuerzo y la formación de los grupos de fallas.

### III. METODOLOGÍA

#### III.1. Trabajo de campo

Para la recopilación de datos de campo se realizó una estancia en la mina La India, Sahuaripa, en el Departamento de exploración-operación, participando 27 días naturales en mapeo superficial a semidetalle 1:1000. Durante este periodo se obtuvieron datos estructurales y se realizó un muestreo superficial de rocas con su clave respectiva. En los afloramientos con características estructurales destacables, se llevó a cabo una descripción sistemática, que comienza por la ubicación del afloramiento, la petrología de las unidades litológicas involucradas, su mineralogía, textura, incluyendo la forma y tamaño de los granos, su color, así como también una descripción y una medición de las estructuras primarias, como laminaciones ígneas, y/o secundarias como fallas o foliaciones. Se realizaron esquemas de los afloramientos más interesantes para destacar las estructuras. Ya reconocida un área, el siguiente paso es analizar la secuencia de eventos, tipos de contactos y el comportamiento de los fallamientos en los diferentes tipos de roca, para así interpretar y crear un modelo del área estudiada.

Para conocer la secuencia estratigráfica se participó en la descripción de núcleos de barrenación tipo diamante (DDH por las siglas en inglés de *Diamond Drill Hole*), cada caja que los contiene abarca aproximadamente 2.4 metros de núcleo de roca dividido en cuatro columnas de 60 centímetros, en la descripción de núcleos se debe hacer a detalle con apoyo de diferente equipo como un rayador de dureza 7, ácido clorhídrico, imán, agua y una lupa (de 10x o 20x); se toman fragmentos y se van observando y anotando. Las secuencias de roca se describen desde la superficie, con la finalidad de ubicar las zonas en óxidos y de sulfuros, zonas brechadas y contactos litológicos. Cada barreno perforó hasta llegar finalmente a una unidad andesítica, ya que ésta no es un buen receptor aurífero en el sistema y no era necesario seguir con la barrenación.

En la medición de las fallas se utilizó una brújula tipo minitránsito Brunton, bajo la técnica de la mano derecha para determinar la actitud de los planos de falla. Para la

medición de las estrías bastó con anotar el rake, el cual se define como el ángulo, medido sobre el plano, entre la línea y el rumbo, tomado éste último de acuerdo con la regla de la mano derecha.

### **III.2. Manejo estadístico de datos**

Al registrar 191 actitudes de fallas, y de ellas 71 presentando estrías, se dio la necesidad de hacer un manejo estadístico de los datos. Donde para generar estereogramas de fallas con estrías y su dirección de deslizamiento se utilizó el programa FaultKin (Marrett y Allmendinger, 1990; Allmendinger *et al.*, 2012), además, se generaron los contornos para ejes de extensión y acortamiento, los planos con su rake y dirección de desplazamiento, así como los ejes cinemáticos. Para el manejo de todas las fallas con y sin estrías se utilizó el programa Stereonet (Allmendinger *et al.*, 2012; Cardozo y Allmendinger, 2013), donde se generaron los estereogramas para observar la roseta de diaclasas y los contornos de polos de fallas. Para comprobar los ejes cinemáticos se realizó otro procesamiento de los datos a partir del programa Win Tensor (Delvaux, 2011; 2012). El marco teórico para comprender la interpretación de los estereogramas generados en esta tesis se encuentra explicado detalladamente en el anexo 1.

### **III.3. Petrografía y difracción de rayos X**

La descripción de la secuencia litológica se hizo con la información recopilada, en base a los datos de rocas de los proyectos realizados por trabajos internos de la mina e información bibliográfica, por ejemplo, Romero et al. (2017) quienes proponen una columna estratigráfica del proyecto El Realito. Dicha información complementa los datos recabados en campo. Además, se describieron con el microscopio óptico MEIJI ML9000 de la Universidad de Sonora 26 rocas (tabla 1 y 2, capítulo XIV.3) de las cuales 14 fueron recolectadas en campo y 12 seleccionadas de barrenos de la mina.

En este estudio se realizó la difracción de rayos X de seis muestras, en apoyo al microscopio petrográfico, dado que las muestras presentaban una alta cantidad de minerales de grano fino, para los que este era un método más apropiado. Las muestras

(difractogramas del capítulo XIV.2) fueron analizadas en el difractómetro del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, marca Bruker D8, Modelo Advance, con la línea de cobre ( $\text{Cu K}\alpha$ ,  $\lambda=1.5406\text{\AA}$ ) para ser analizada.

#### IV. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA

La propiedad donde se encuentra la mina La India se localiza en el Distrito Minero de Mulatos, en la parte oriental del estado de Sonora, México (figura 1), a 30 km del límite con el estado de Chihuahua. En el acceso por tierra se requiere recorrer 318 km en 7 horas de viaje, que consta de 262 km de carretera pavimentada sobre la ruta Hermosillo-Sahuaripa-Güisamopa, siguiendo por un tramo de terracería de 56 km pasando el poblado Trigo de Corodepe. El complejo minero se encuentra dentro de la carta Mulatos H12-D67 escala 1:50,000, localizándose entre los pueblos de Tarachi y Matarachi, pero los servicios básicos disponibles se encuentran hasta Sahuaripa y Yécora (60 km de terracería al Sur). El proyecto se localiza en las coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) 3,174,000 Norte y 709,000 Este, zona R12 en el Datum NAD 27.

#### Localización Mina La India

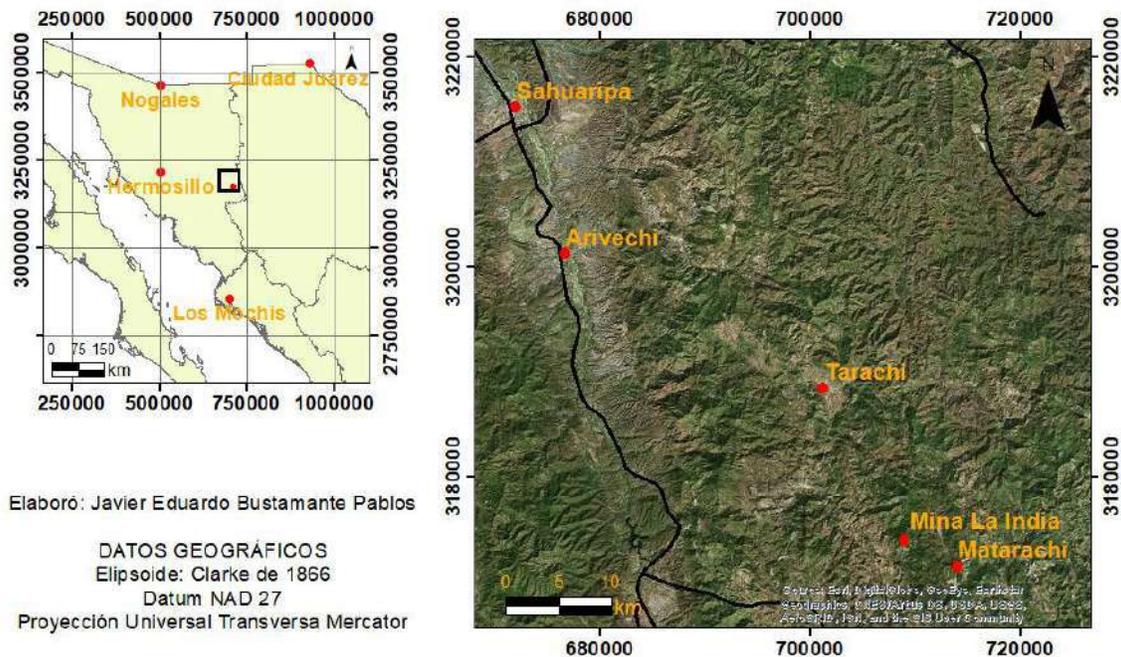
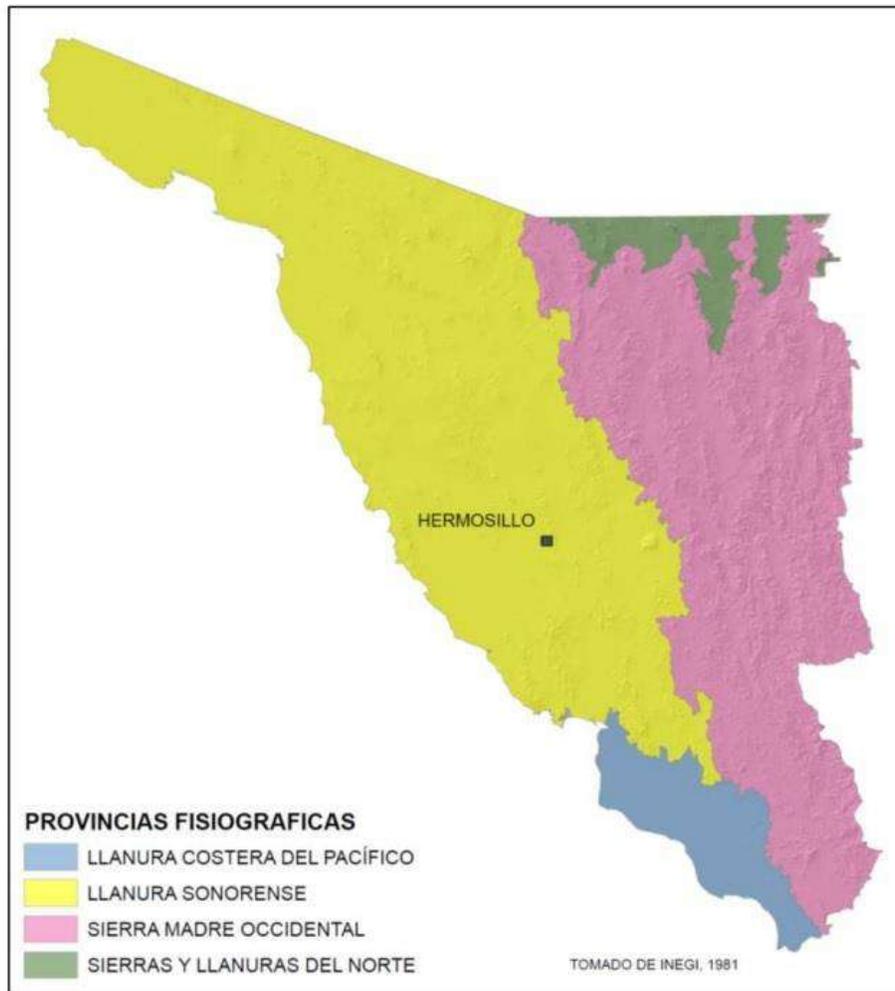


Figura 1. Mapa de Localización de la Mina La India, Sahuaripa, Sonora, México.

## V. FISIOGRAFÍA, CLIMA Y VEGETACIÓN

El área de estudio se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (figura 2), la que es reconocida por ser la tercera provincia ígnea silícica más grande del mundo. Se ubica en la subprovincia occidental descrita como de Sierras y Valles Paralelos (King, 1939) es caracterizada por fallas normales de orientación NNW-SSE limitando grandes bloques levantados o *horsts* con valles correspondientes a bloques hundidos, *graben* o *semigraben*. Esta subprovincia fue generada por un evento extensional que afectó la región durante fines del Oligoceno y el Mioceno Medio (Nourse *et al.*, 1994; Wong y Gans, 2003; Calmus *et al.*, 2000).



**Figura 2.** Provincias fisiográficas del estado de Sonora (INEGI, 1981).

El clima del sitio de estudio corresponde a la clave C(w1)(x') de la nomenclatura de Köppen y München (1936) modificado de la carta climatológica de INEGI (1992). Pertenece a un clima templado subhúmedo con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C, presentando mínimas de -3°C en el mes más frío y una máxima de 22°C en el mes más caliente.

La vegetación del área consta principalmente de Pinos (*Pinus engelmannii*) predomina en las zonas más altas, mientras que en las bajas se presentan variedades de encinos (género de árboles denominada *Quercus*) y arbustos como manzanita (*Arctostaphylos pungens*).

## VI. TRABAJOS PREVIOS

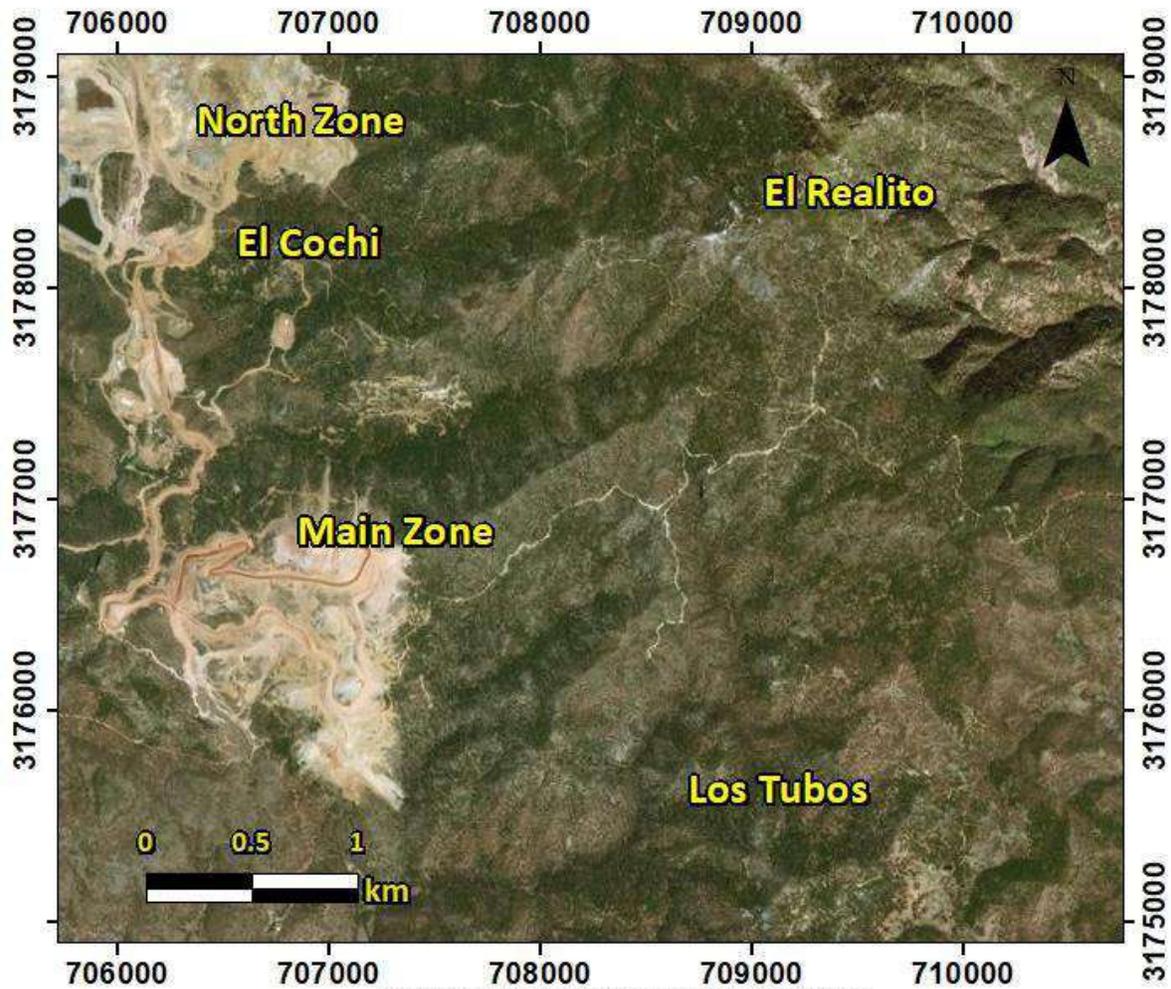
Los primeros estudios cercanos al área son en el yacimiento en Mulatos, encontrándose trabajos de genética del yacimiento y estratigrafía por Staude *et al.* (2001). Posteriormente con el fin de caracterizar el yacimiento de La India se crean trabajos internos donde Longo (2013, 2013b, 2014) hace recomendaciones para continuar la barrenación de zonas como Arroyo Honda, Cordón de Viruela, Tarachi, Jabalí y el Salto Colorado, en las cuales se introduce a la relación espacial de la mineralización aurífera con los cuerpos brechoides principalmente en las dacitas porfídicas de la región, establece la importancia de identificar horizontes, tipos y porcentaje de óxidos, tipos de roca en base a texturas y la presencia o ausencia de cristales de cuarzo primario.

Según estudios de geología estructural conocida en la Mina La India, Cruz-Páez (2008, 2012) describe las fallas como tipo normal y se presentan en tres grupos principales: NW-SE, NE-SW y N-S, de alto buzamiento. En dicho trabajo también se incluye una descripción detallada y una caracterización de la estratigrafía de la región y determinación de sus alteraciones.

Más recientemente, Romero *et al.* (2017) dan una descripción litológica del área que abarcan en esta investigación, la cual fue crucial para una completa descripción de la geología local para los proyectos El Realito y Los Tubos (figura 3).

Como antecedentes históricos existen trabajos antiguos de minería en pequeñas obras que se observan en Mina Cruz, La Viruela, El Realito, Cerro Virgen, entre otras. La exploración en la región comienza en 2004 por Resource Grayd de México S.A. DE C.V., quienes desarrollaron el proyecto hasta la evaluación económica preliminar en 2010 y para el 2011 Agnico Eagle adquiere la propiedad de La India.

## Localización de proyectos El Realito y Los Tubos



Elaboró: Javier Eduardo Bustamante Pablos

DATOS GEOGRÁFICOS

Elipsoide: Clarke de 1866

Datum NAD 27

Proyección Universal Transversa Mercator

**Figura 3.** Mapa de localización de los proyectos estudiados El Realito y Los Tubos. Además, se pueden observar los demás proyectos y zonas de explotación como El Cochi, North Zone y Main Zone.

## VII. GEOLOGÍA REGIONAL

La parte centro-norte de Sonora es subyugada por rocas con metamorfismo regional orogénico con edades Paleoproterozoicas consistentes principalmente de ortogneises, anfibolitas, esquistos y cuarcitas, que afloran de manera aislada debajo de secuencias del Proterozoico tardío al Cenozoico (Anderson y Silver, 2005). Los afloramientos más cercanos al área con rocas fechadas como Paleoproterozoicas afloran al W de Banámichi (González-León *et al.*, 2011b); al suroeste de Opodepe (Valenzuela-Navarro *et al.*, 2003) y en la Sierra Puerta del Sol (González-Bécar *et al.*, 2017). Las rocas metamórficas del basamento fueron intrusionadas por cuerpos graníticos que han sido fechados aproximadamente en 1,400 Ma y 1,100 Ma (Anderson y Silver, 1981; 2005).

Al oeste de Sahuaripa, en la Sierra Chiltepín y el Cerro El Carrizo se encuentran rocas atribuidas al Neoproterozoico, correspondientes al Grupo Las Bolas (Stewart *et al.*, 2002; Corsetti *et al.*, 2007). Dicho grupo está formado por rocas carbonatadas y siliciclásticas las cuales contienen una capa delgada de diamictitas en la base. En dicha región, el Grupo Las Bolas cabalga a rocas del Cretácico Temprano del Grupo Bisbee (Stewart *et al.*, 2002; Corsetti *et al.*, 2007). Además, el Neoproterozoico (?) y Cámbrico Inferior formado por cuarcitas, limolitas y dolomías se ubican debajo de la Cuarcita Proveedora en La Sierra Agua Verde (Stewart *et al.*, 1999) ubicada al noreste del poblado de Mátape (Villa Pesqueira).

En el municipio de Arivechi se encuentran depósitos de edad Cámbrico Medio-Tardío cuya edad es establecida principalmente mediante braquiópodos y trilobites, en rocas detrítico-carbonatadas en las Formaciones La Sata, Mogallón, La Huerta y Milpillitas (Almazán-Vázquez, 1989).

En Villa Pesqueira estratos de calizas y dolomías de la formación El Pollo son asignadas al Devónico por su contenido fosilífero (Ochoa-Granillo y Sosa-León, 1993). Palafox-Reyes (2011) reporta en el municipio de Arivechi, una secuencia carbonatada que contiene fósiles de corales y foraminíferos asignada al Devónico.

Al Este del pueblo de Arivechi aflora una secuencia calcárea denominada Formación Peñasco Blanco a la que se ha asignado una edad del Misisípico Medio (Palafox *et al.*, 1984) con base en el coral *Amplexizaphrentis clinatus* y el braquiópodo *Brachytyrina sp.* Así también, Ochoa-Granillo y Sosa-León (1993) en Villa Pesqueira definen la formación Santiago para una secuencia de calizas con edad del Misisípico.

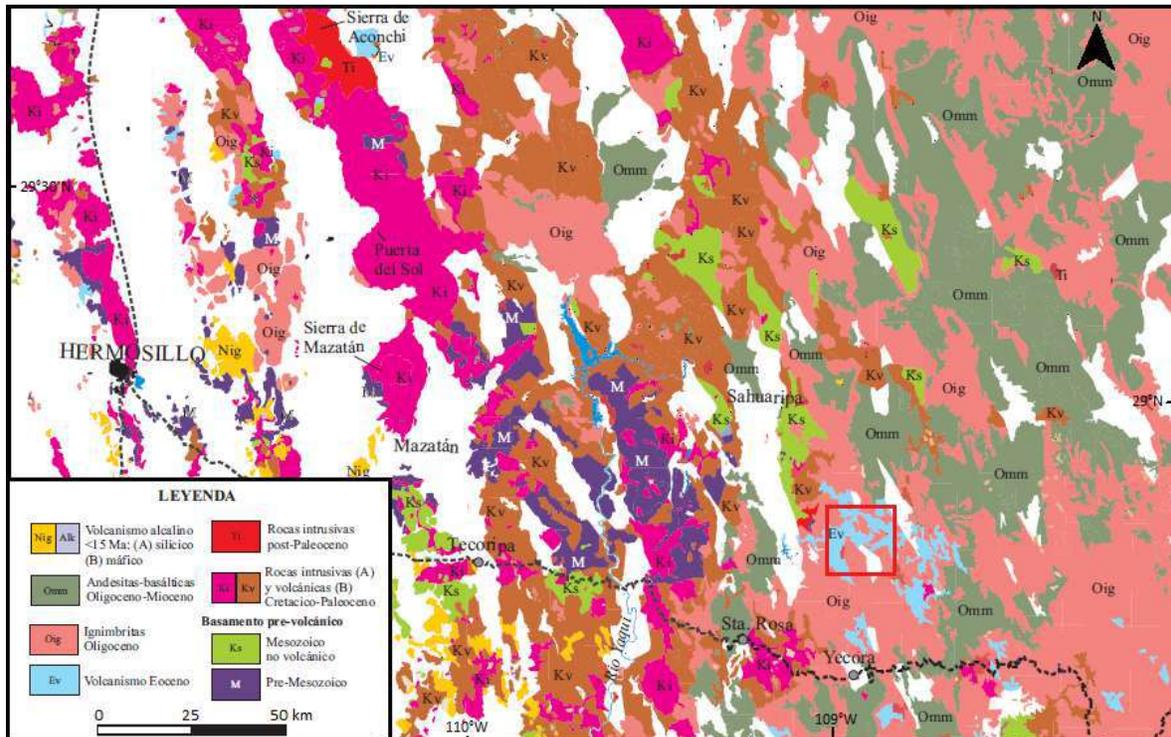
Al NE de Villa Pesqueira, en la sierra Agua Verde, la Formación Tuntunudé está formada por estratos de calizas fosilíferas y algunas areniscas, los cuales son atribuidos al Pérmico por Ochoa-Granillo y Sosa-León (1993). Secuencias de intercalaciones de calizas fosilíferas y areniscas encontradas en la Sierra La Campanería e incluidas en la Formación El Venado, también son asignadas al Pérmico Temprano con base en la presencia de fusulínidos (Vega-Granillo y Araux-Sánchez, 1985).

El Grupo Barranca (Alencáster De Cserna, 1961) formado de la base a la cima por las formaciones Arrayanes, Santa Clara y Coyotes, aflora en el sector centro-oriental de Sonora. La Formación Arrayanes está constituida mayormente por rocas detríticas donde predominan los conglomerados y areniscas y en menor medida sedimentos marinos. La Formación Santa Clara está formada por depósitos continentales fluviales, lacustres y pantanosos que desarrollaron mantos carbonosos. Dicha unidad ha sido asignada al Triásico Tardío-Jurásico Temprano con base en su contenido de fósiles marinos y de plantas (Alencáster De Cserna, 1961; Weber *et al.*, 1980).

Aflorando en gran parte de Sonora, pero destacándose particularmente los afloramientos de Arivechi (Almazán-Vázquez, 1989), se presenta una secuencia de sedimentos fluvio-deltaicos y marinos del Jurásico Tardío y Cretácico Temprano del Grupo Bisbee, asociados al relleno de cuencas de subsidencia (Taliaferro, 1933; Dickinson *et al.*, 1986; González-León, 1994).

En el noreste de Sonora para el Cretácico Tardío, en el desarrollo de cuencas sintectónicas con asociación a la orogenia Laramide, se depositó una secuencia de sedimentos fluviales y lacustres cubiertas por sedimentos clásticos gruesos (González-

León y Lawton, 1995). Estas secuencias se han incluido bajo el término de Grupo Cabullona, el cual contiene horizontes con restos de plantas, invertebrados y vertebrados, particularmente dinosaurios (Lucas *et al.*, 2005).



**Figura 4.** Mapa geológico de la región centro-este del estado de Sonora. Tomado de Ferrari *et al.* (2005).

En el norte de México un arco magmático nombrado “Laramide” del Cretácico Tardío-Paleoceno está formado por un gran volumen de rocas plutónicas y volcánicas (Unidades Ki y Kv de la figura 4). Las rocas intrusivas se han agrupado bajo el término de Batolito Laramide de Sonora (Damon *et al.*, 1983), mientras que las rocas volcánicas se han agrupado bajo el término de Complejo Volcánico Inferior (CVI) (McDowell y Keizer, 1977) o como formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1949). En el sector norte de la Sierra Madre Occidental (SMO) el Batolito está formado por grandes plutones graníticos que van desde diorita y cuarzdiorita a granito alcalino (e. g., Roldán-Quintana, 1991; Valencia-Moreno *et al.*, 2001). La Formación Tarahumara está formada por una secuencia predominantemente andesítica (Wilson y Rocha, 1949),

sobreyaciendo tobas y flujos de riolita y dacita intercaladas con horizontes sedimentarios (González-León *et al.*, 2000; 2011 b; McDowell *et al.*, 2001).

A 30 kilómetros al suroeste del área de estudio se encuentra el poblado de Santa Rosa, donde se ha descrito una secuencia de andesitas y rocas volcanoclásticas de grano fino que es intrusionada por la granodiorita San Nicolás (Cochemé and Demant, 1991; Gans 1997). Esta secuencia es interpretada como correlativa con el CVI dado que contiene flujos andesíticos con una edad mínima de emplazamiento de ~60 Ma (Gans, 1997).

En el Oligoceno temprano se produjo la extrusión de una enorme sucesión ignimbrítica de la SMO con espesores mayores a 1000 m, la cual cubre ampliamente el occidente de México (unidad Oig de la figura 4) y se conoce como Supergrupo Volcánico Superior (SVS) (McDowell y Clabaugh, 1979). Se compone principalmente por tobas de flujo piroclástico y de caída, así como de lavas de composición ácida a intermedia. Se emplaza discordantemente sobre el CVI (McDowell y Keizer, 1977). En el área de Yécora, las rocas volcánicas del SVS se depositaron en discordancia sobre una sección erosionada del CVI (Bockoven, 1980; Cochemé y Demant, 1991), mientras que en el área de Tecoripa McDowell *et al.* (2001) reportan ignimbritas riolíticas con un espesor promedio de 100 m.

Un volcanismo máfico transicional conocido como SCORBA por las siglas en inglés derivadas de *Southern Cordilleran Basaltic-Andesite* (Cameron *et al.*, 1989) fue emplazado de manera discontinua inmediatamente después del pulso ignimbrítico del SVS. Este volcanismo está en realidad formado por una intercalación de rocas máficas y félsicas lo cual ha inducido a que se le conozca también como volcanismo bimodal. Este volcanismo tiene afloramientos en Yécora y Sahuaripa (unidad Omm de la figura 4) según la carta geológica-minera de García-Cortez *et al.* (2000).

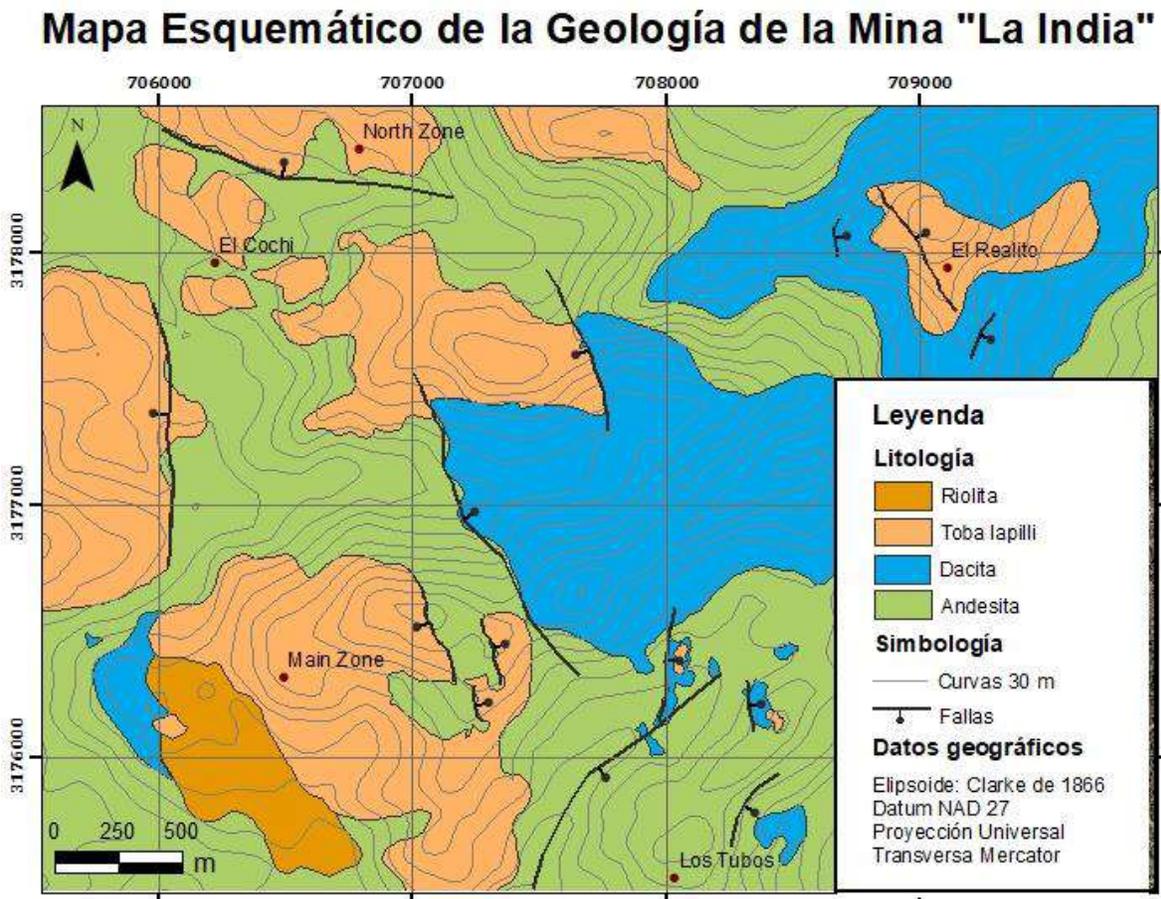
Un evento de extensión cenozoica conocida como Basin and Range, al parecer posterior al emplazamiento masivo de ignimbritas en la SMO, produjo familias y sistemas de fallas normales tipo horst y graben. El fallamiento normal asociado al evento extensional

generó cuencas de tipo graben o semigraben donde se depositaron secuencias clásticas con intercalaciones volcánicas que van de básicas a félsicas entre edades de 23 y 10 Ma (Bartolini *et al.*, 1992, 1994; Gastil y Krummenacher, 1977), haciéndolas contemporáneas con el magmatismo bimodal o de tipo SCORBA. Los sedimentos clásticos con rocas volcánicas intercaladas se distribuyen ampliamente en las distintas cuencas sobre todo en la región central y oriental de Sonora (McDowell y Roldán-Quintana, 1991; McDowell *et al.*, 1997), y se les ha llamado formación Báucarit (King, 1939). Las rocas arenoso-conglomeráticas de esta formación y las rocas volcánicas asociadas fueron afectadas por un evento metamórfico de grado muy bajo (Münch, 1993) produciendo el endurecimiento típico de las rocas que la constituyen.

Un volcanismo posterior al bimodal está representado por la Formación Lista Blanca, con una amplia distribución en la zona suroccidental de Sonora, como también registrado por el Servicio geológico mexicano (SGM, 2000) al oeste de Sahuaripa y al sur de Tecoripa (Unidades Nig y Alk de la figura 4). Presenta edades restringidas en un rango de ~14 y ~11 Ma (Gastil y Krummenacher, 1977; Bartolini *et al.*, 1994; McDowell *et al.*, 1997; Oskin *et al.*, 2003) y sus homónimos son la ignimbrita de Hermosillo (Vidal-Solano *et al.*, 2005) y la toba de San Felipe en Baja California (Stock *et al.*, 1999) que han sido interpretados como indicador del inicio del magmatismo postsubducción, destacando por la erupción de distintivas ignimbritas, derrames riolíticos y riodacíticos hiperalcalinos (Mora-Álvarez y McDowell, 2000; Mora-Klepeis y McDowell, 2004; Vidal-Solano *et al.*, 2005).

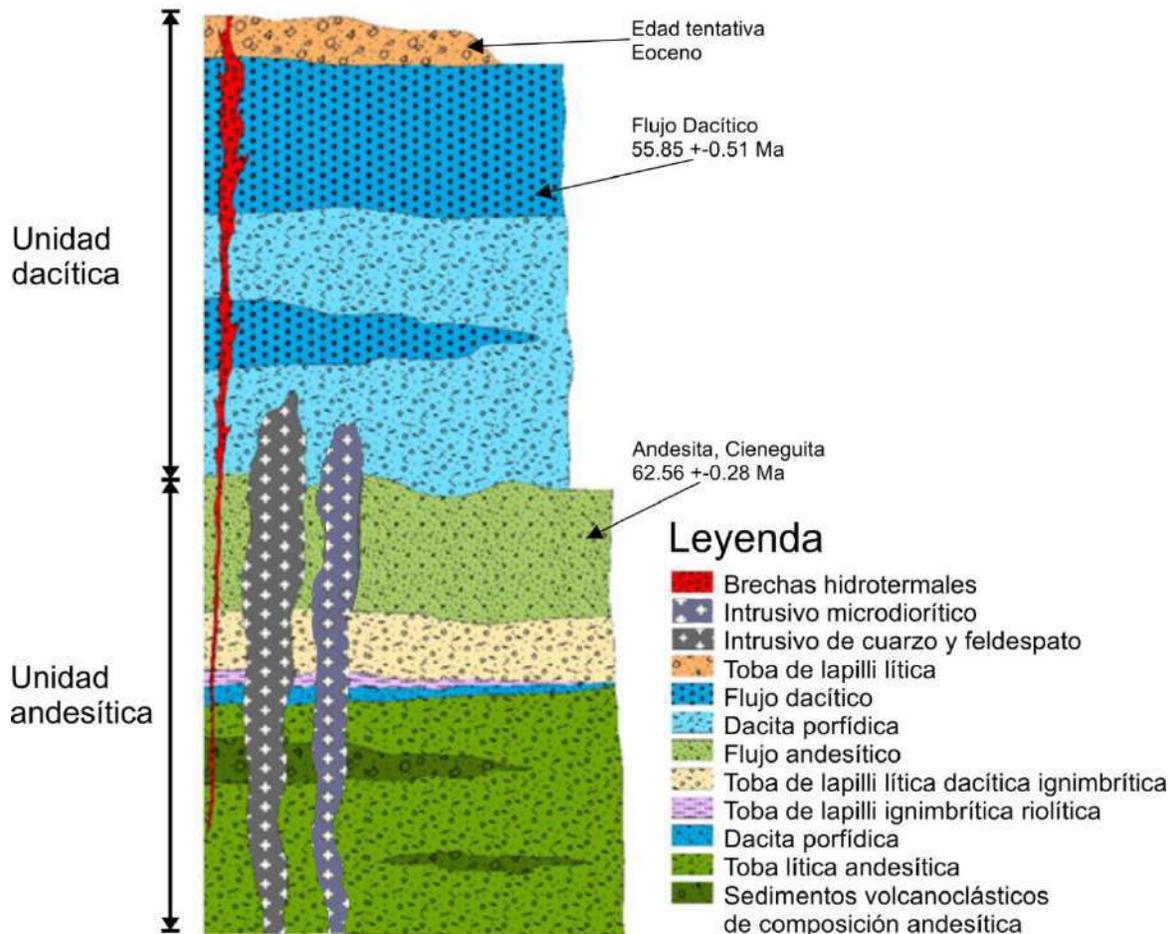
## VIII. GEOLOGÍA LOCAL

Las rocas volcánicas que afloran en el área de estudio según Cruz-Páez (2012) se correlacionan con la zona de transición del Complejo Volcánico Inferior (CVI) (McDowell y Keizer, 1977) y el supergrupo volcánico superior (SVS) (McDowell y Clabaugh, 1979). El mapa esquemático de la geología de la Mina "La India" (figura 5) muestra las unidades principales de la localidad, además, en la columna estratigráfica se muestra la litología general del proyecto El Realito (figura 6), donde el área de estudio presenta un ligero basculamiento hacia el Oeste, a diferencia de las regiones aledañas como la mina Mulatos, donde sus capas buzcan hacia el Este.



**Figura 5.** Mapa esquemático de la geología de la mina "La India". Modificado de Romero *et al.* (2017).

## Columna estratigráfica Proyecto El Realito

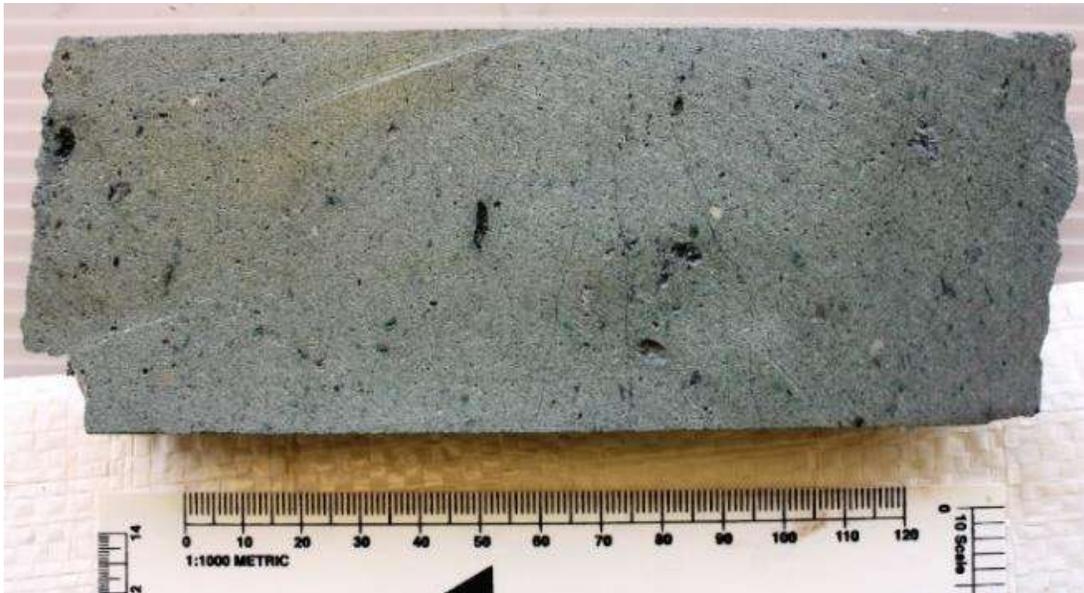


**Figura 6.** Columna estratigráfica del proyecto El Realito. Modificada de Romero *et al.* (2017).

### VIII.1. Unidad Andesítica

Esta unidad está formada principalmente por rocas volcánicas, volcanoclásticas y epiclásticas de composición andesítica. Entre sus rocas se incluye una toba de lapilli de composición andesítica de cuarzo, plagioclasa y biotita (figura 7), generalmente de color verde claro a oscuro, con 1-2% de cristales de cuarzo de 1 mm, 10-15% de cristales de plagioclasa de 1-2 mm, presenta menos de 3% de biotita menor a 2 mm y 2% de hornblenda. Incluye fragmentos de líticos angulares a subredondeados de 5 a 20 mm. La unidad también incluye lentes de sedimentos volcanoclásticos de composición

andesítica (figura 8) de color marrón claro a verde claro, presenta matriz fina y aproximadamente contiene 50% de líticos angulares de 2 mm – 15 mm de diámetro.



**Figura 7.** toba de lapilli de composición andesítica, encontrada a 200 m de barrenación.



**Figura 8.** Sedimentos volcanoclásticos de composición andesítica.

La roca anterior es sobreyacida por un estrato delgado de dacita (figura 9) de textura porfídica de color gris claro a blanco, contiene aproximadamente 5-10% de feldespato de 1-3 mm, 3-5% de ojos de cuarzo, < 1 mm, 1-2% de biotita < 1 mm.

Sobre esta se presenta una Toba de lapilli ignimbrítica de composición riolítica, porfídica de cuarzo, feldespato alcalino y biotita, una textura eutaxítica, una silicificación con alteración por caolinita, dickita, cuarzo, calcita y alunita (figura 10). Es de color gris claro a blanco, que contiene aproximadamente 5-8% de cuarzo angular a subangular de 1-5 mm, 1% de líticos angulares de 1- 10 mm, 3-5% de feldespato alcalino menor a 1 mm, suele presentar textura bandeada y/o con flamas. Además, fue descrita en la muestra LIN-8 (anexo 3).

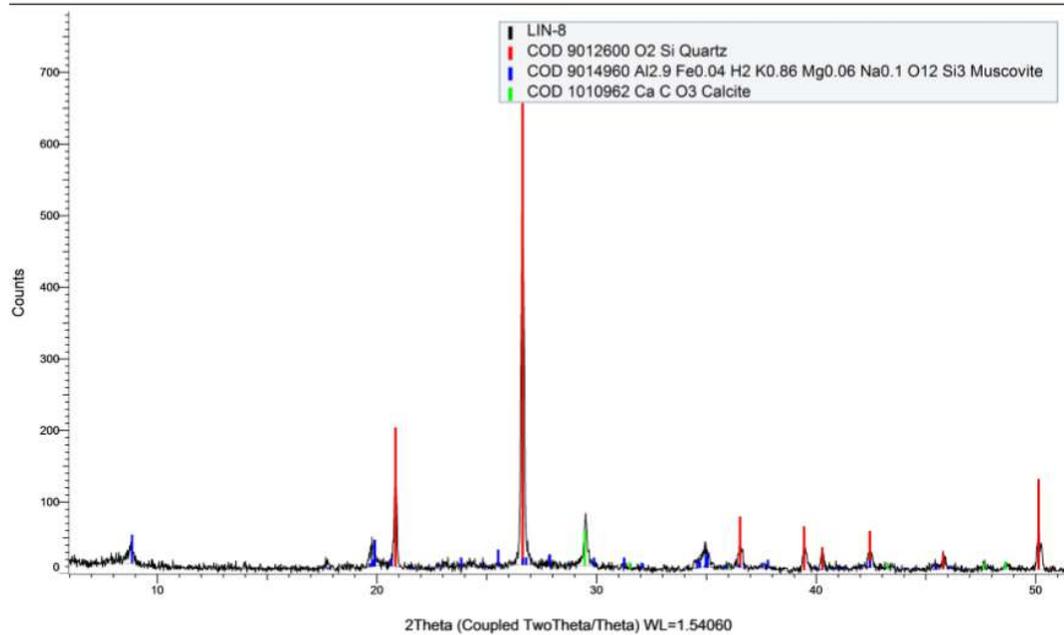


**Figura 9.** Dacita porfídica de gris clara a blanca.



A)

(Coupled TwoTheta/Theta)



B)

**Figura 10.** Toba de lapilli ignimbrítica de composición riolítica, porfídica de cuarzo, feldespato alcalino y biotita, eutaxítica, silicificada con alteración por caolinita, dickita, cuarzo, calcita, alunita. A) Fotografías de muestras recuperadas de barrenos donde se aprecia su textura eutaxítica. B) Difractograma de la riolita a partir de la muestra LIN-8 (anexo 3), mostrando la presencia de cuarzo, muscovita y calcita.

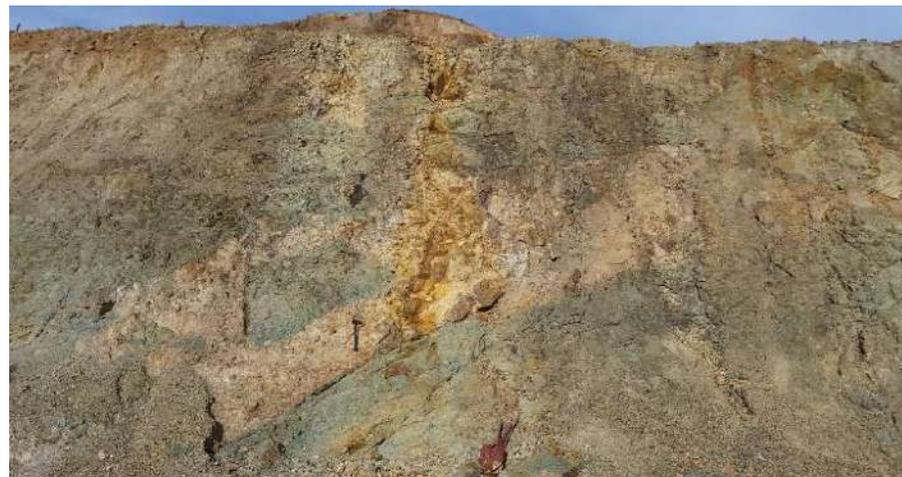
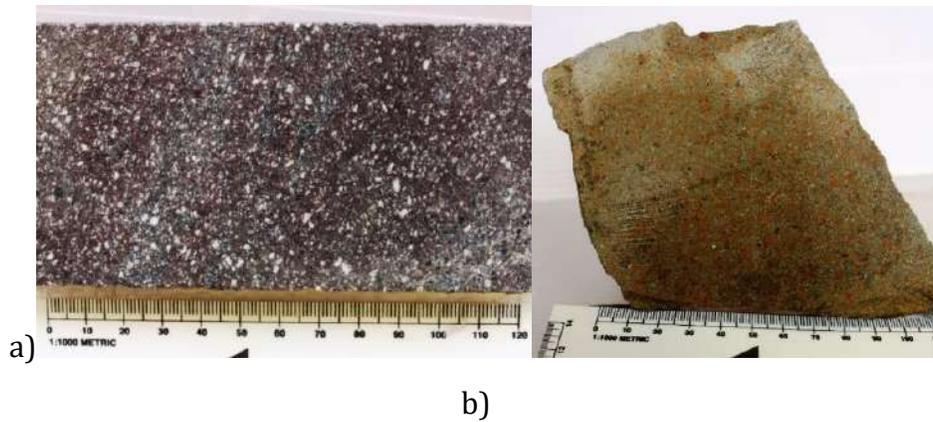
Sobre la riolita y con un espesor más importante, se encuentra una toba de lapilli lítica ignimbrítica de composición dacítica, porfídica de feldespato y cuarzo, de textura eutaxítica (figura 11). Sus fragmentos son elongados de color marrón claro a verde claro. Esta roca contiene aproximadamente 5-8% de fragmentos líticos con textura

afanítica, de forma angular a subangular, de color verde, con tamaños variables entre 5 mm - 40 mm, 10% de líticos angulares de 2 mm - 15 mm, 5% aproximadamente de fragmentos líticos blancos con textura afanítica de angulares a subangulares de 1-10 mm, 3-5% de feldespatos <1 mm y 3-5% de cuarzo <0.5 mm.

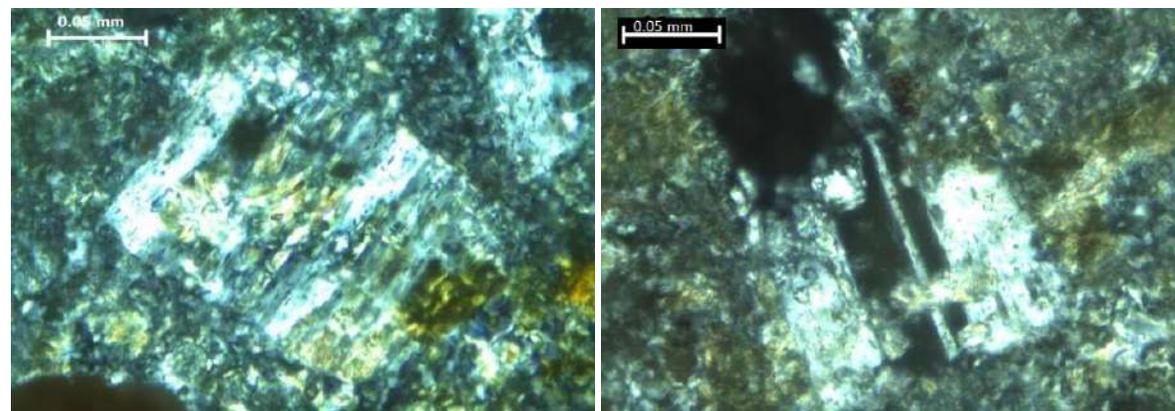


**Figura 11.** Toba de lapilli lítica ignimbrítica de composición dacítica, porfídica de feldespatos y cuarzo, de textura eutaxítica, encontrada a 116 m de profundidad mediante barrenación.

Posteriormente, sigue un potente flujo de composición andesítica (figura 12) correlacionable con la andesita del área de Cieneguita, datada por roca total con el método de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  por Cruz-Páez (2012) del Paleoceno temprano  $62.56 \pm 0.28$  Ma. Esta roca (*e.g.*, LI-9 y LI-19 de la tabla 1 capítulo XIV.3) tiene un color verde a marrón de claro a oscuro, textura porfídica fina, contiene 1-2% de cristales de cuarzo con <1 mm de diámetro, además, aproximadamente 10-15% de cristales de plagioclasa tipo andesina menores a 1 mm (figura 13); contiene poca plagioclasa de grano grueso >1 mm, presenta menos de 1% de cristales de biotita < 1 mm de diámetro. Es una roca ígnea con fenocristales alargados dentro de una matriz afanítica.



**Figura 12.** Flujo andesítico con coloración verdosa. a) Muestra fresca de núcleo (izquierda) y de mano con los cristales de feldespato intemperizados (derecha) donde se aprecia la textura porfírica fina. b) Vista al Norte en el tajo 'North Zone' (figura 2) en el punto 706772 E 3178558 N se observa esta andesita de textura porfídica fina con un color verde. Además, se observa un aglomerado de color claro entre este flujo andesítico, note el fragmento de andesita incluido en el aglomerado (sobre la pica).



**Figura 13.** Fotografía de andesita en sección delgada con el objetivo de 40x de la muestra LI-30, en la cual se determinaron sus plagioclasas tipo andesina.

## VIII.2. Unidad Dacítica

Esta unidad sobreyace a la unidad andesítica, la cual inicia con una litofacies no continua, denominada como un flujo dacítico autobrechado, el cual es de color de gris claro a oscuro, textura porfídica y fragmentos de líticos principalmente de dacita porfídica como se ven en la figura 14. Estas rocas contienen entre 3-5% de cristales de cuarzo de 1-3 mm de diámetro; un 10-15% de cristales de Feldespato de 1-3 mm, 5-10% de fragmentos de roca subangulares a subredondeados de 5 a 30 mm; presenta menos del 3% de cristales de biotita menores a 2 mm, además contiene menos de 2% de cristales de hornblenda menores a 1 mm.



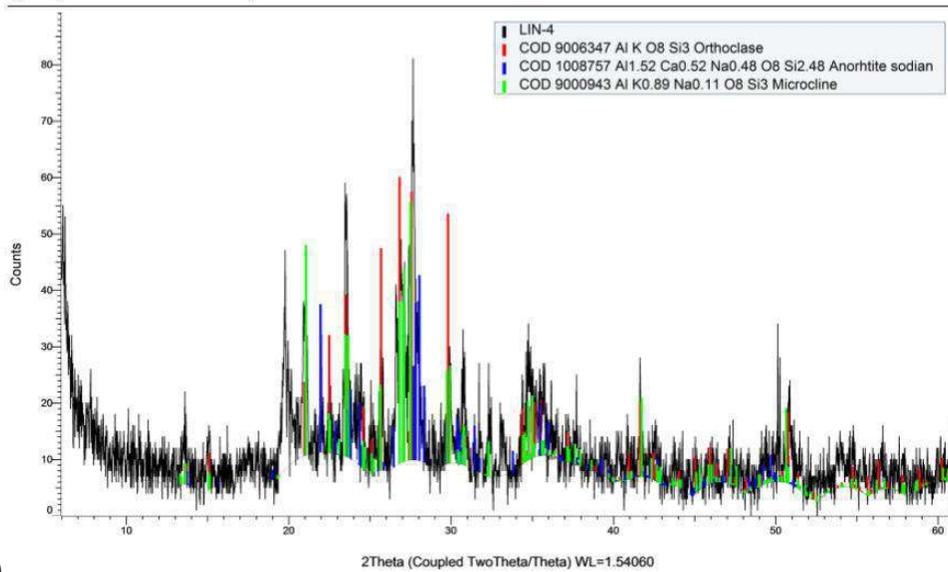
**Figura 14.** Litofacies de un flujo dacítico autobrechado. a) Muestra en la zona de sulfuros. b) Muestra en la zona de oxidación.

Sobreyaciendo al flujo andesítico o a la litofacies de flujo dacítico autobrechado, se encuentra una dacita porfídica (figura 15), siendo la principal roca huésped de la mineralización aurífera del sistema hidrotermal. Esta roca usualmente es de color rojizo claro al estar comúnmente teñida por óxidos, pero es de color gris claro a oscuro cuando está en la zona de sulfuros. La roca presenta una textura porfídica, contiene 3-5% de cristales de cuarzo de 1-3 mm de diámetro, aproximadamente 10-15% de cristales de plagioclasa de 1 – 3 mm, ocasionalmente llegan a medir 4 mm. presenta menos del 3% de cristales de biotita < 2 mm y menos de 2% de cristales de hornblenda < 1 mm. Estos fenocristales se aprecian en las fotografías de la figura 16, que muestra un difractograma, indicando la presencia de ortoclasa y microclina. Esta roca suele encontrarse con una alteración argílica avanzada (ver capítulo IX.2) formándose una roca de metamorfismo hidrotermal denominada “argilisita” (ver capítulo XIV.11.2.). Cristales de plagioclasa en esta roca fueron fechados mediante el método de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  arrojando una edad de  $55.8 \pm 0.5$  Ma (Cruz-Páez, 2012), lo que la ubica en la zona de transición del Paleoceno-Eoceno.

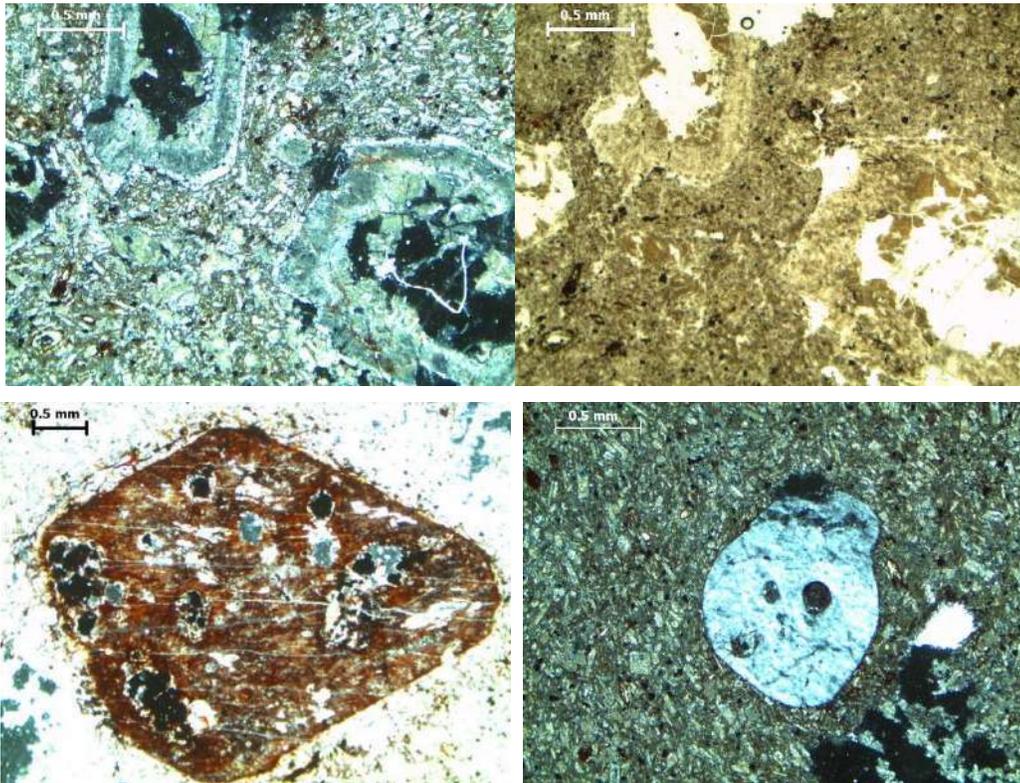


**Figura 15.** Dacita porfídica. a) Muestras de núcleos de la zona de oxidación, con una alteración argílica (derecha), con alteración argílica avanzada (inferior izquierda) y con alteración hidrotermal alta, se presenta con una textura porosa o “*vuggy*” (superior izquierda). b) En el punto 708736 E 3178150 N se encuentran trabajos antiguos en el área El Realito el cual tiene un tiro horizontal con dirección 105°. Se observan fallas con actitudes 305°/43° y 025°/45° con depósito de hematita/jarosita. La roca encajonante es la dacita porfídica con óxidos en la matriz y un 20% de cristales de plagioclasa menores a 2 mm.

(Coupled TwoTheta/Theta)



A)



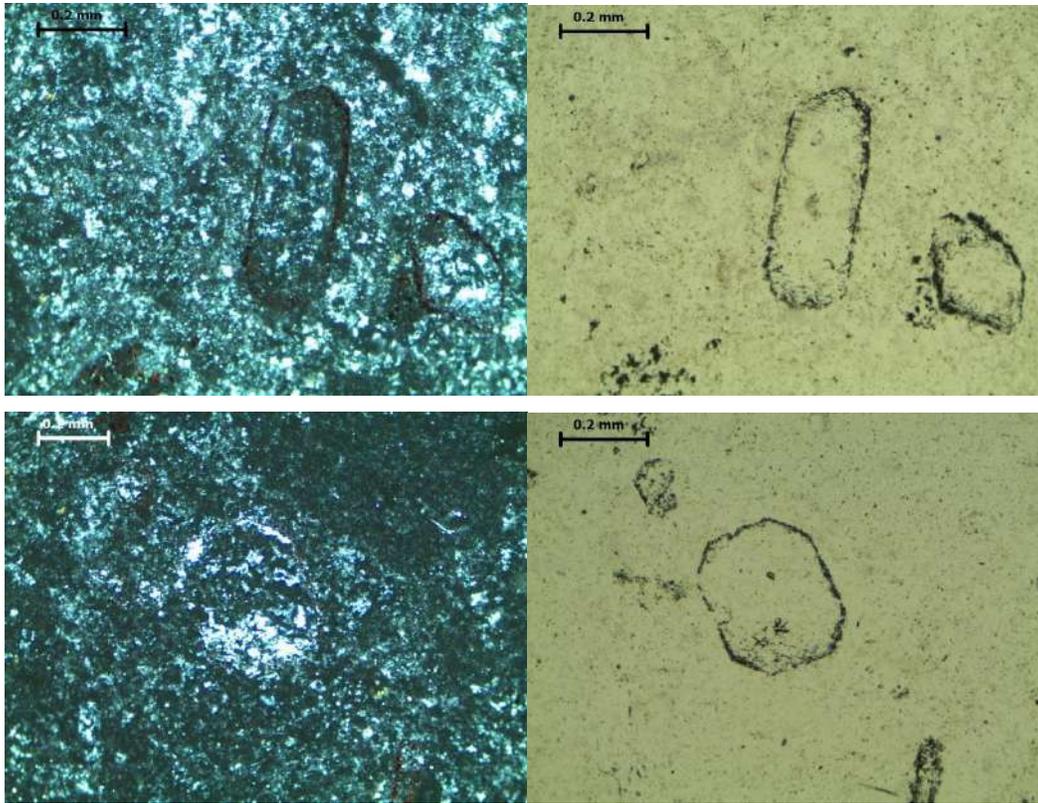
B)

**Figura 16.** Métodos para la descripción de las dacitas porfídicas. A) Difractograma de una dacita porfídica con alteración argílica, muestra presencia de ortoclasa y microclina. B) Fotografías en lámina delgada de la muestra LIN-4 (tabla 2, capítulo XIV.3), del tajo 'Main Zone', en la parte superior se aprecia la textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa zonada muy alterados y una matriz de plagioclasa microcristalina; mientras que en las fotografías inferiores se observan un fenocristal de hornblenda reemplazado por hematita y de cuarzo con golfos de corrosión.

Hasta este nivel, de las dacitas porfídicas se encontró un intrusivo altamente alterado y ligeramente deleznable (figura 17) de textura porfídica, denominado como intrusivo de cuarzo y feldespato alcalino (figura 6) conteniendo más plagioclasa que feldespato alcalino. Contiene menos del 20% de cristales de cuarzo y 65-95% de plagioclasa. Otro intrusivo aflora en el tajo 'North Zone' el cual corresponde a una microdiorita (muestra LI-9, tabla 1, capítulo XIV.3), que se interpreta como una intrusión hipabisal debido a su matriz microcristalina, en la cual están incluidos fenocristales de plagioclasa de 1 mm, piroxenos de hasta 0.4 mm y anfíboles de hasta 1 mm (figura 18).



**Figura 17.** Intrusivo de cuarzo y feldespato.

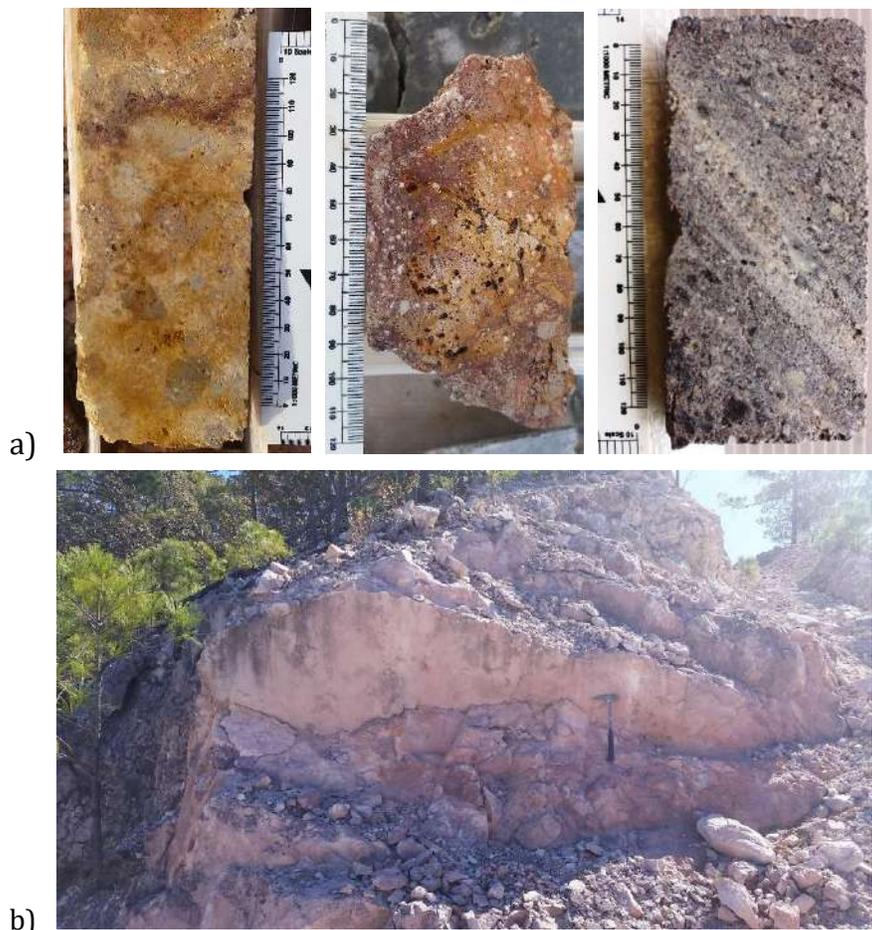


**Figura 18.** Intrusivo hipabisal de una microdiorita, donde se observan cristales fantasmas de plagioclasas, anfíboles (fotografía superior en LP y LN) y piroxenos (fotografía inferior en LP y LN). Descrita por lámina delgada a partir de la muestra LI-9 ubicada en el tajo ‘North Zone’.

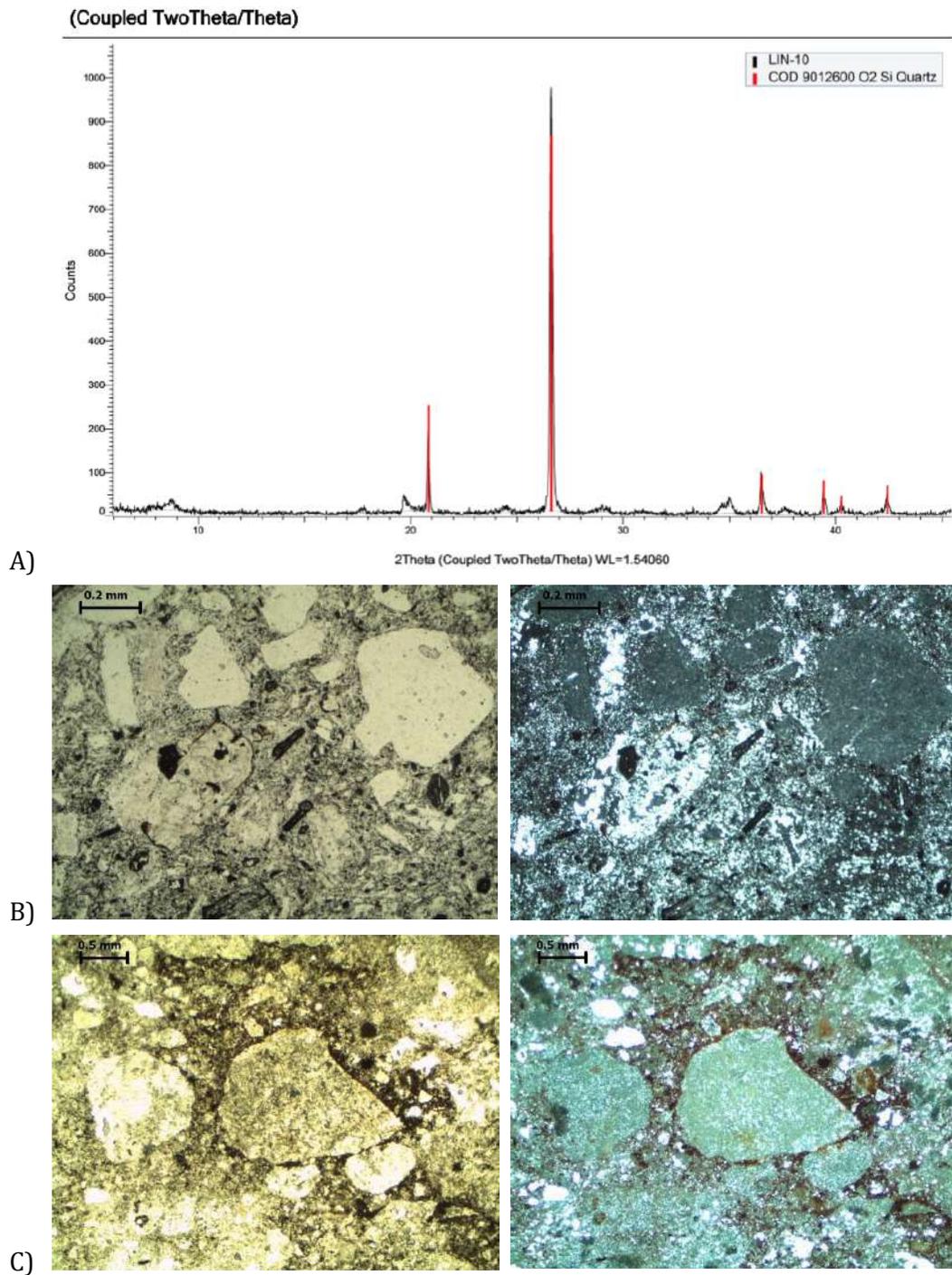
Como unidad superior en el área se encuentra una potente toba de lapilli lítica ignimbrítica de composición dacítica de feldespato y cuarzo, una textura soldada con alteraciones por cuarzo, caolinita, dickita y hematita (figura 19). Se describe como una roca de color marrón claro a rojizo claro, contiene aproximadamente 20-25% de fragmentos líticos angulares a subangulares de 5-40 mm (figura 20b, 20c), 3-5% de feldespatos de 1-3 mm (figura 29b), 2-5% de cuarzo < 1-2 mm, 1-2% cristales de óxidos de hierro menores a 1 mm. Generalmente su matriz está reemplazada por limonita y/o hematita. Igualmente, como en la dacita porfídica (figura 16), esta roca suele encontrarse como una “argilisita”.

Además, se hizo un análisis por DRX (figura 20a) en una muestra con alteración argílica donde no se alcanzaron a percibir las arcillas, solamente su contenido primario en sílice

ya que la muestra analizada no se le observó silicificación secundaria. Esta roca funcionó como receptora de los fluidos mineralizantes, formando mineralización exclusiva de los controles estructurales. Cubre gran parte de la cima del cerro El Realito y lomas al sur del proyecto Los Tubos. Así también, se le atribuye una edad tentativa del Eoceno, ya que sobreyace a la dacita porfídica de  $55.8 \pm 0.5$  Ma (Cruz-Páez, 2012) y presenta mineralización aurífera, cuya edad mínima se estima en  $33.90 \pm 0.16$  Ma (Cruz-Páez, 2012) con base en la edad de un vitrófido riolítico no mineralizado. Al SW de la mina, sobre esta unidad se encuentra cartografiada una roca de composición riolítica, la cual se interpreta como parte del SVS (Romero *et al.* 2017).



**Figura 19.** Toba de lapilli lítica en el proyecto El Realito. a) Muestras de núcleos de la toba con alteración argílica avanzada, donde se observan los fragmentos líticos y los cristales de plagioclasa. b) Fotografía con vista hacia el SE donde se observa la toba de lapilli en color crema con un plano de falla de actitud  $47^{\circ}/65^{\circ}$  en su bloque de techo que sufrió un deslizamiento de tipo normal.



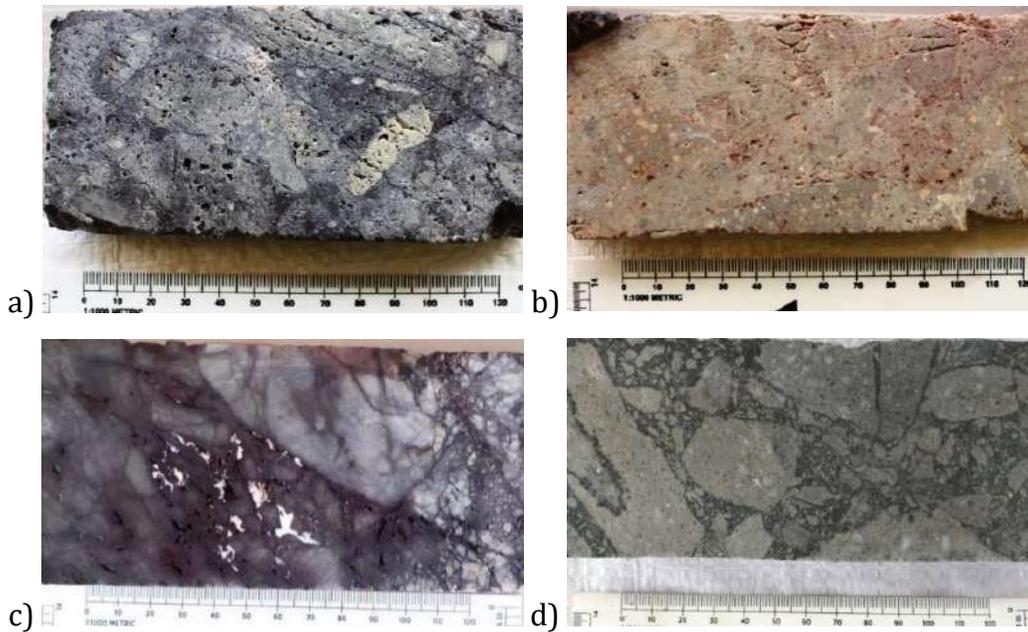
**Figura 20.** Métodos para la descripción de la toba de lapilli lítica ignimbrítica de composición dacítica de feldespato y cuarzo, en el proyecto El Realito. A) Difractograma de la toba de lapilli lítica ignimbrítica del barreno INER-16-006. B) Lámina delgada de la muestra LI-34, se observa la textura porfídica de cristales de plagioclasa reemplazados por caolinita/dickita, pequeños anfíboles y escasos fragmentos de roca. C) Muestra LI-47, con alta cantidad de fragmentos de roca de hasta 5 mm (en la fotografía hasta 1.5 mm) y menores, cristales alterados de plagioclasa reemplazados por caolinita/dickita.

## **IX. MINERALIZACIÓN SECUNDARIA DEL ÁREA**

En las áreas de estudio de El Realito y Los Tubos el Oro epitermal ocurre en las pequeñas minas abandonadas o en barrenos antiguos y en los que están desarrollándose en la actualidad por el departamento de exploración-operación de Agnico Eagle La India. Las rocas huésped son principalmente dacitas porfídicas y tobas de lapilli líticas. Las fallas son principalmente de alto ángulo mientras que las capas tienen buzamientos bajos. Según los análisis de arcillas hechos por Cruz-Páez (2008) las zonas de mineralización formadas por el brechamiento hidrotermal se caracterizan por alteración de alunita, dickita, caolinita, esmectita, illita, sílice y clorita, con grados variables de piritización y/o hematización. La pirita se presenta tanto en forma disseminada como en microvetillas. En la zona de oxidación, dicho mineral está transformado comúnmente a hematita-limonita-jarosita.

### **IX.1. Brechas de origen hidrotermal**

En las dacitas porfídicas, tobas de lapilli ignimbríticas de composición dacítica y en la litofacies de flujos dacíticos autobrechados, se han encontrado brechas hidrotermales (figura 21) tipo brecha 'crackle' (de crepitación) y con fragmentos subangulares. Éstas se producen generalmente en fallas que son las zonas de debilidad principal donde se infiltran los fluidos mineralizantes, soliendo rotar los fragmentos angulosos y cementándolos con sílice, sulfuros usualmente oxidados cerca de la superficie, con grosores aproximados de 1.5 metros, creándose así las brechas hidrotermales que son el núcleo del sistema de alteración.



**Figura 21.** Brechas hidrotermales. a) brecha 'crackle'; b) brecha polimíctica de origen piroclástico, contiene fragmentos subangulares con sílice masivo y/o sílice residual + sulfuros + hematita infiltrada en matriz; c) brecha con fragmentos subangulosos con sílice + dickita + hematita especular infiltrada en la matriz; d) brecha con fragmentos subangulares con pirita + arsenopirita + cuarzo infiltrado en la matriz.

## IX.2. Grupos de alteraciones

Los tipos de alteraciones generados por el sistema epitermal se manejan en asociaciones de minerales secundarios con el fin de facilitar el desarrollo de modelos de alteración que ayuden durante el proceso de exploración de los depósitos.

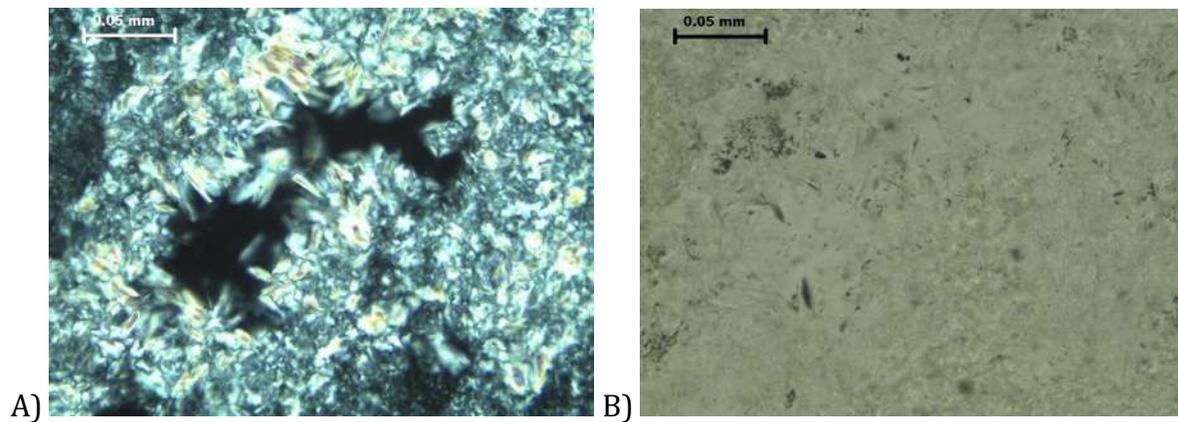
Se desglosarán los arreglos de alteración propuestos por White y Hedenquist (1995), caracterizados en la región por Cruz-Páez (2008).

### Sílice masiva y sílice porosa (*vuggy silica*):

Es la zona con mayor temperatura, dando un halo de alteración que prosigue a la argílica avanzada. Para ubicar esta alteración en superficie primeramente se buscan afloramientos que resalten ya que las brechas hidrotermales presentan mayor resistencia al intemperismo por su alto contenido en sílice.

La sílice masiva (SM) se distingue por ser una alteración intensa formada casi en su totalidad por sílice, borrando la textura original de la roca y que en ocasiones presenta

abundantes arcillas tipo alunita (figura 22) al rellenar fracturas y cavidades, se presenta tanto a lo largo de un control litológico como estructural. Mientras que la sílice porosa (“*vuggy silica*”) o sílice residual es el que presenta un fuerte reemplazamiento a sílice en la matriz y los cristales se lixivian dando un aspecto poroso, las cavidades son rellenadas por alunita, dickita y caolinita. Su ocurrencia es limitada a las brechas hidrotermales.



**Figura 22.** Fotografía de cristales de alunita dentro en una muestra con alteración argílica avanzada con el objetivo de 40x. A) Fotografía en luz polarizada (LP). B) En luz natural (LN).

#### Argílica avanzada:

Es la alteración que rodea la sílice masiva o porosa, está constituida predominantemente por arcillas blancas y/o rosas, como alunita, dickita y caolinita, además presenta diferentes tipos y grados de silicificación con tonos de gris claro a blanco, reemplazando a la roca original, cambiando su textura y composición original. Al disminuir la alteración suelen presentarse arcillas de más baja temperatura como illita e illita-esmectita. En el área, las arcillas comienzan a reemplazar los cristales de plagioclasa y usualmente son más deleznales que la matriz.

### Argílica:

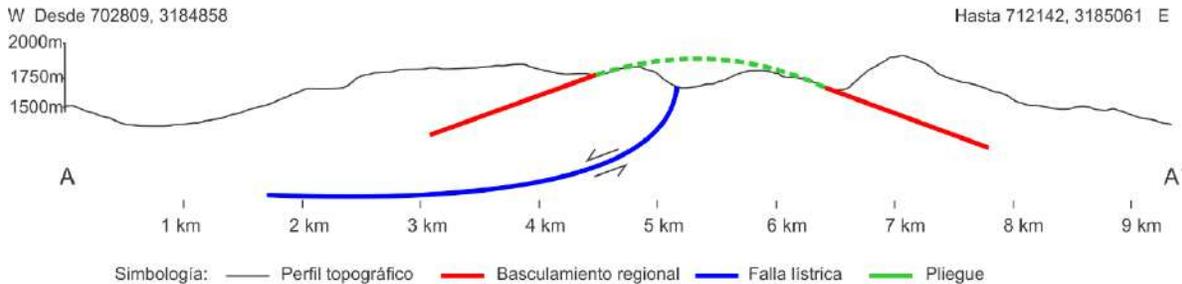
Se presenta bordeando a la alteración argílica avanzada y ésta a su vez suele englobar a la propilítica. Se distingue por no presentar silicificación y con un alto contenido de arcillas tipo caolinita, illita y esmectita como las características, mientras va decreciendo esta alteración suele terminar con una asociación de arcillas de illita-esmectita, además de un poco de clorita.

### Propilítica:

Esta alteración afecta la zona más distal de la zona silicificada, suele envolver a todas las demás alteraciones y se reconoce en el área por dar una coloración verdosa a las rocas que afecta, principalmente a las andesitas e intrusivos (*e.g.*, las muestras LI-9, LI-19 y LI-30 descritas en la Tabla 1 del capítulo XIV.3), las cuales suelen presentar clorita, epidota y carbonatos.

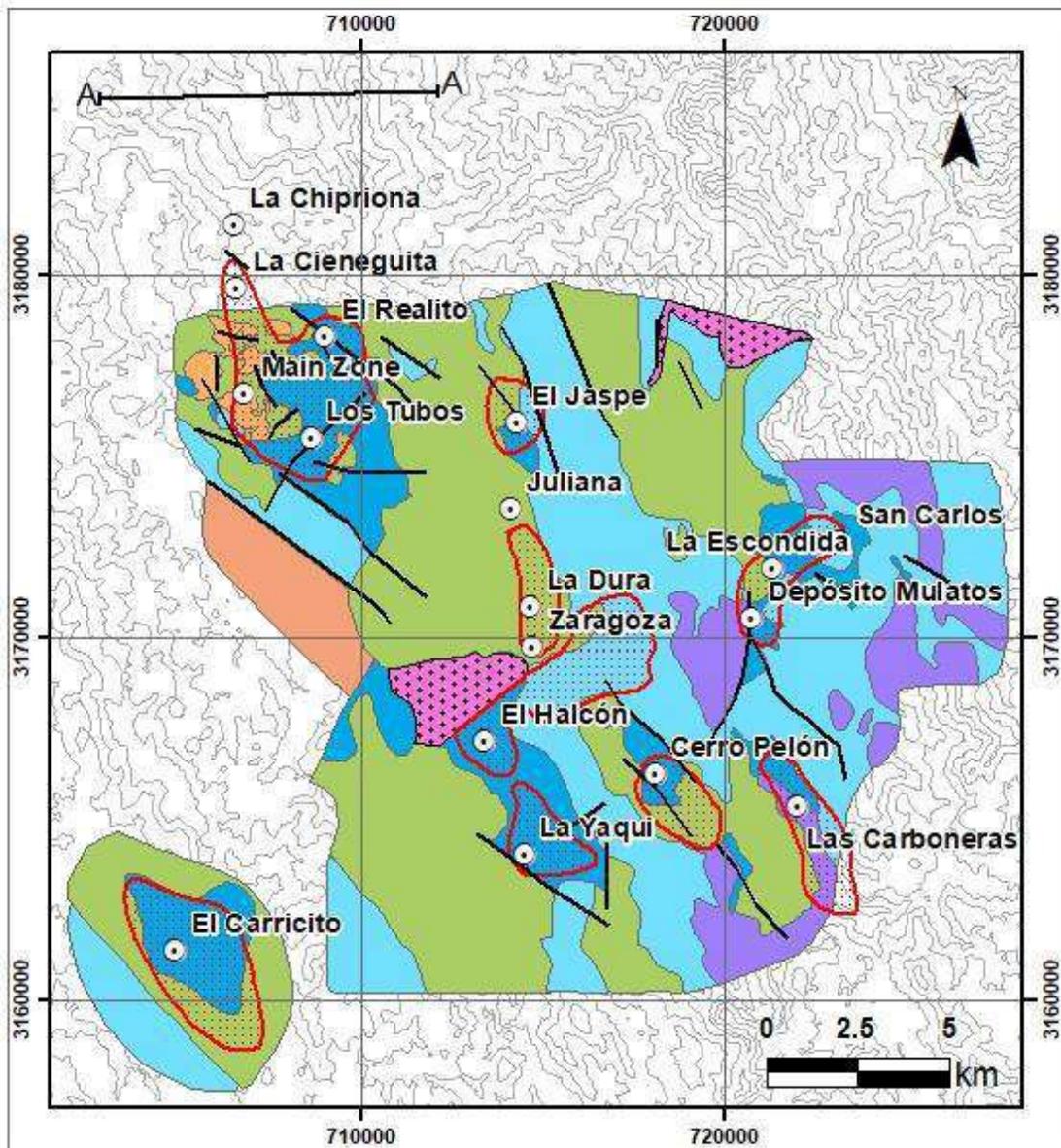
## X. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La actitud de las unidades volcánicas en el área de estudio es difícil de definir debido a que en muy pocos afloramientos pudo observarse. A partir de los pocos datos medidos se puede decir que dichas unidades de la mina muestran un basculamiento general de alrededor de  $20^\circ$  hacia el Oeste, con variaciones hacia el suroeste y noroeste. Basculamiento que se interpreta, es generado por un ligero plegamiento regional de clasificación gentil, en el que se estima un ángulo interflancos de  $140^\circ$  (visualizado en la sección de la figura 23), el cual se muestra a cinco km al NE del tajío North Zone, como se puede observar en el mapa de la geología del distrito Mulatos (figura 24).



**Figura 23.** Sección esquemática A-A', con orientación W-E, que muestra el plegamiento regional y la interpretación de la falla lístrica que generó la rotación hacia el Este en la región.

## Mapa Generalizado de la Geología del Distrito Mulatos



### Leyenda

#### Simbología

- ⊙ Minas y Proyectos
- Sección A-A'
- Fallas
- curvas 120 m
- ▨ Sistema Epitermal

#### Litología

- Basalto
- Conglomerado
- Riolita
- Granodiorita
- Toba lapilli
- Dacita

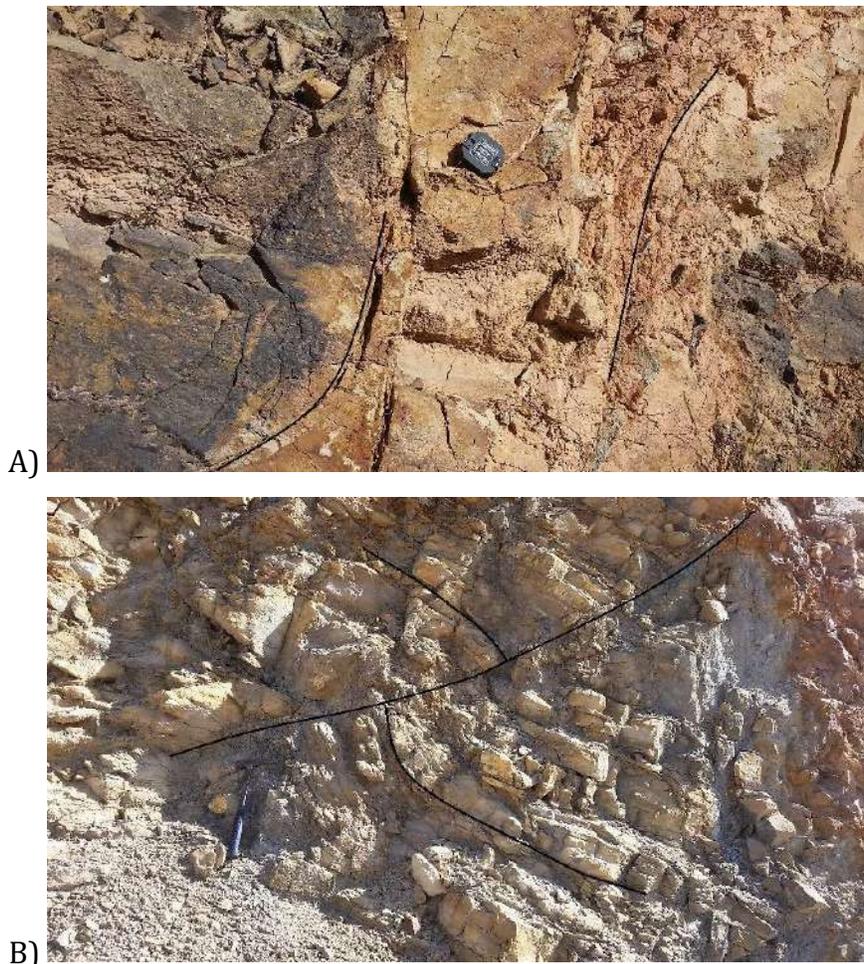
- Andesita

#### Datos geográficos

- Elipsoide: Clarke de 1866
- Datum NAD 27
- Proyección: Universal Transversa Mercator
- Escala 1:200,000

Figura 24. Mapa generalizado de la geología del Distrito Mulatos. Modificado de Balleweg (2016).

En el área se tiene un fallamiento premineral, donde las estructuras más antiguas son las NW, las cuales son levemente desplazadas por una serie de fallas paralelas NE, contemporáneas a un sistema de fallas N-S. Posteriormente se produjo una segunda etapa extensional de carácter post-mineral, generando un ligero desplazamiento, donde se forman o reactivan fallas NW, NE y E-W. Este fallamiento normal (figura 25a) presenta un deslizamiento al echado o ligeramente oblicuo. Además, se llegaron a observar en el área de La India Este (al norte del tajo 'Main Zone') estructuras de fallamiento inverso (figura 25b) con pliegues de arrastre, pero al ser muy escasas tienen poca influencia estadística.

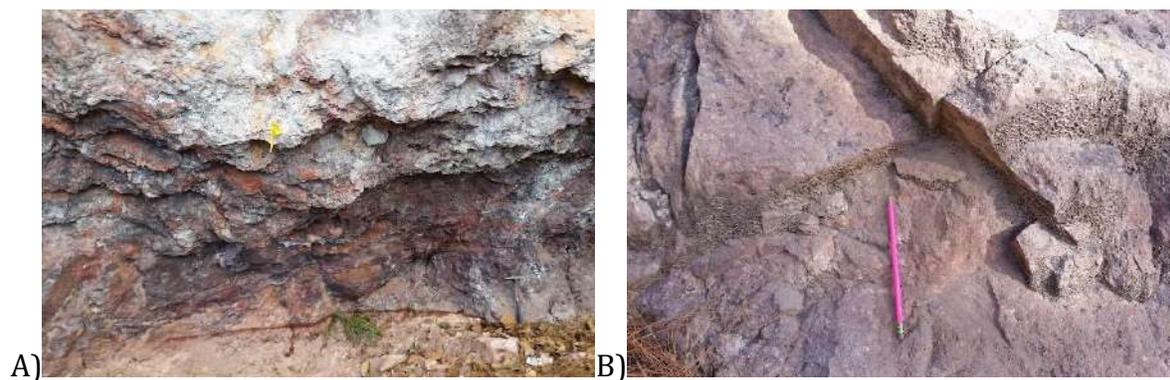


**Figura 25.** Fallas en la mina “La India” desarrolladas en la unidad andesítica en la zona La India Este A) Fallamiento normal con pliegues de arrastre desarrollados en fracturas, vista al NE. B) Falla inversa con pliegues de arrastre indicando el movimiento de los bloques. Los pliegues en este caso se forman en los planos de las capas, vista al NE.

## X.1. Análisis Estructural en el Proyecto el Realito

El proyecto El Realito, actualmente en exploración, está ubicado al este fuera del área actual de la mina (figura 1), presentando un fuerte fallamiento normal. En estas fallas en ocasiones se formaron brechas 'crackel' (figura 21) de 1.5 m o menores, generalmente dentro de las tobas de lapilli líticas y dacitas porfídicas, generando a su periferia una alteración argílica avanzada, alterándose sus cristales de plagioclasa con fuerte alteración a arcillas deleznable y ferromagnesianos a hematita-jarosita.

Es común encontrar grandes bloques de la toba de lapilli lítica con fallas basculando al SE, a las cuales se le han encontrado estrías al echado ligeramente oblicuas (*e.g.*, *rakes* de  $112^\circ$  y  $117^\circ$ ). En otras áreas estas rocas presentaron un fallamiento NW con estrías al echado, las cuales presentan vetilleos finos de óxidos de limonita que da una coloración lila oscuro (figura 26a), en ocasiones con lupa suelen tener oro visible. También se encuentran relaciones de corte entre los fallamientos NW, donde son cortados por los sistemas NE (figura 26b).



**Figura 26.** Estructuras en la toba de lapilli lítica. A) En un color lila oscuro generado por una alta oxidación a limonita, que sufre un fuerte fallamiento de rumbo NW en donde es posible con la lupa encontrar oro visible, con una vista al SSE. B) En un color lila más claro, dado menor cantidad de óxidos de limonita se observa una falla  $345^\circ/46^\circ$  que es cortada por una  $77^\circ/61^\circ$ , con vista hacia el SE  $65^\circ$ .

Se localizó un afloramiento de toba de lapilli lítica con escasos fragmentos de 2 cm, la cual presenta una zona de falla  $312^\circ/50^\circ$  de un espesor de 3-5 cm, ocurriendo con una alta cantidad de óxidos al igual que el bloque de techo, mientras el de piso a diferencia

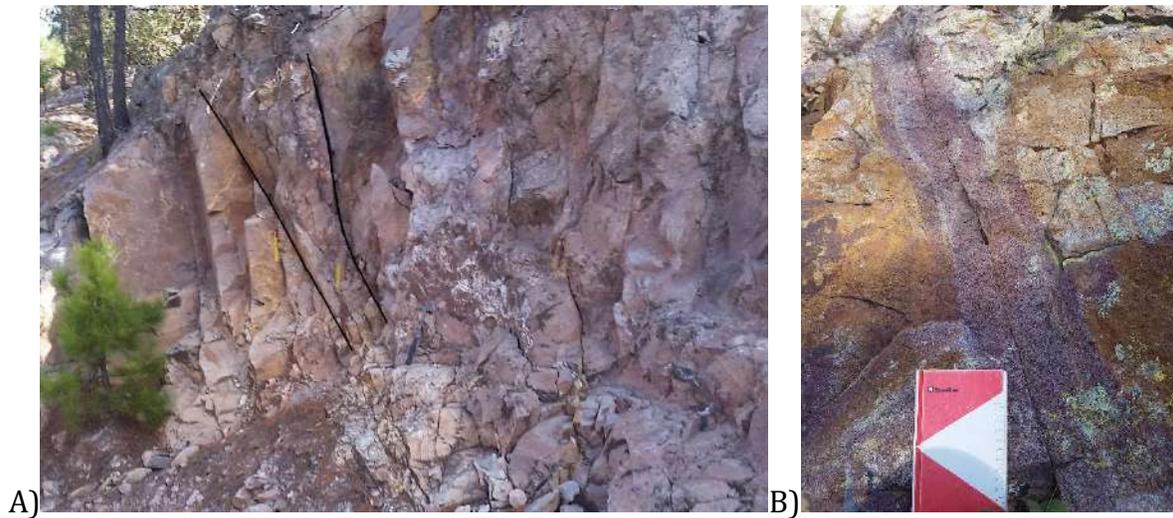
sufrió una alteración a arcillas blancas y pequeños parches con óxido. Además de un fracturamiento  $30^{\circ}/85^{\circ}$  sin muestras de desplazamiento (figura 27a, 27b).

Otros afloramientos de la toba de lapilli lítica con fragmentos de roca de hasta 7 cm y con una menor alteración argílica avanzada, presentan grandes planos de falla en rumbo NE (e.g.,  $72^{\circ}/87^{\circ}$  y  $54^{\circ}/81^{\circ}$ ) y en sus superficies tienen una película de hematita-jarosita (figura 27c, 27d).



**Figura 27.** Afloramientos de estructuras en la toba de lapilli lítica. A) Se observa una zona de falla  $312^{\circ}/50^{\circ}$  marcada con líneas negras, donde presenta una alta cantidad de óxidos al igual que el bloque de techo; marcado en rojo un fracturamiento  $30^{\circ}/85^{\circ}$  sin muestras de desplazamiento. En una vista hacia el NE. B) Un acercamiento destaca que el bloque de piso tiene una alteración a arcillas blancas con solo pequeños parches de óxido (marcados con naranja). C) D) Con una alteración baja de argílica avanzada se presentan grandes fallas NE cubiertas de hematita-jarosita.

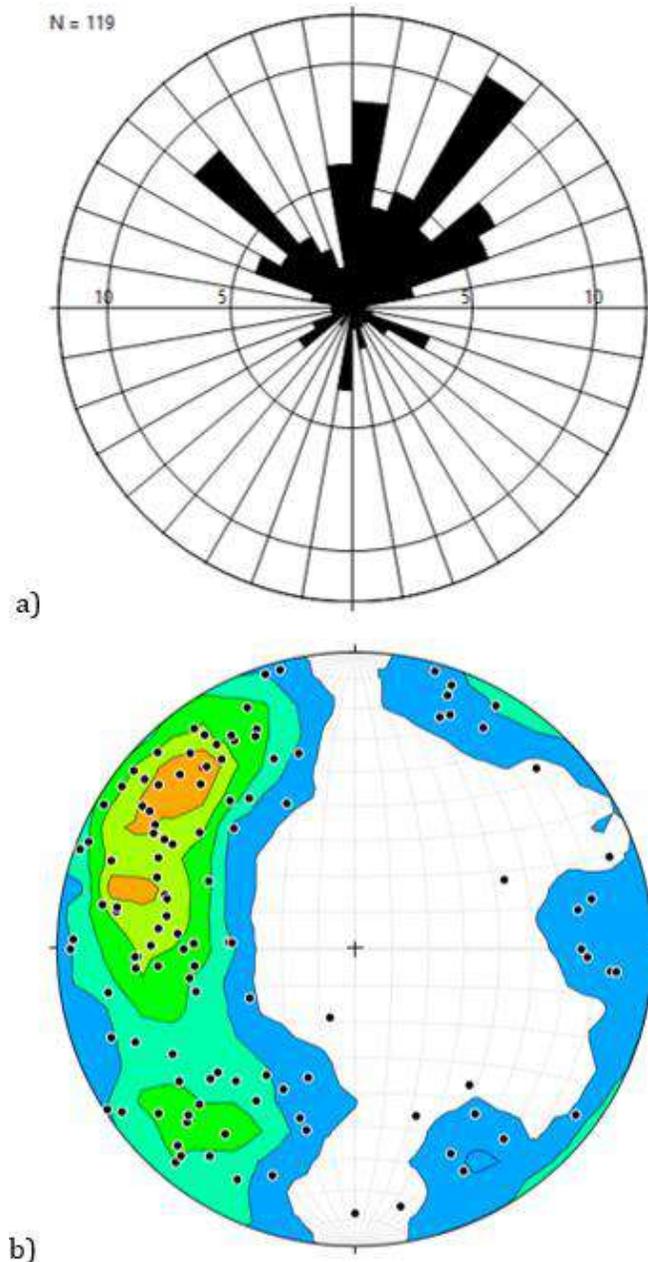
Un afloramiento en la toba de lapilli lítica presenta una zona de falla triturada con un espesor de 50 cm con una actitud  $30^{\circ}/67^{\circ}$  y se adelgaza hasta 30 cm con una actitud  $39^{\circ}/85^{\circ}$  (figura 28a). Mientras que en las dacitas porfídicas es muy frecuente encontrar en los fallamientos halos de alteración de óxido penetrativo generalmente de hasta 10 cm (figura 28b). En esta roca igualmente se observan grandes fallas NE y NW cubiertas de Hematita-Jarosita; además, en ocasiones sus vetilleos y planos de falla suelen ser óxidos de hematita-turgita.



**Figura 28.** Estructuras del proyecto El Realito. A) En una toba de lapilli lítica con vista NE, se presenta una zona de fracturamiento más intenso de unos 50 cm con una actitud  $30^{\circ}/67^{\circ}$ , se adelgaza hasta unos 30 cm con una actitud  $39^{\circ}/85^{\circ}$ . B) En una dacita porfídica con vista al Norte, se observa un halo de alteración de 10 cm a lo largo de una falla de actitud  $50^{\circ}/75^{\circ}$ .

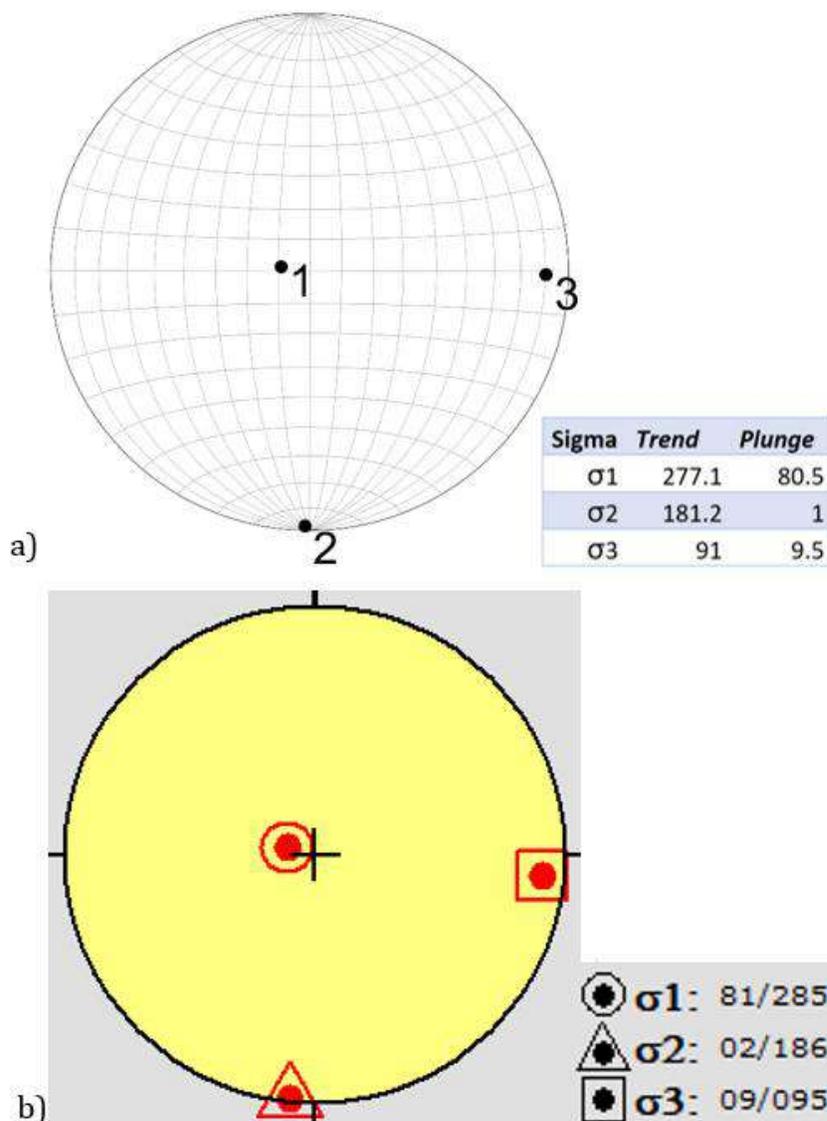
En la figura 29a se muestra un diagrama de rosetas donde pueden apreciarse los principales grupos de orientación de rumbos de las fallas. El grupo mayor tiene una orientación general  $N20^{\circ}-40^{\circ}E$  con grupos subordinados en  $N10^{\circ}W-N10^{\circ}E$ ,  $N40^{\circ}-50^{\circ}W$  y  $N50^{\circ}-70^{\circ}E$ . Como en este diagrama los rumbos se indican con la regla de la mano derecha, se puede apreciar que la mayoría de las fallas buzcan hacia el NE, E o SE. En la figura 29b se muestra la distribución de los polos de las fallas, así como su diagrama de contornos respectivo. En él, se aprecian tres agrupaciones principales, una en el NE que representa dos familias con rumbos entre  $N20^{\circ}-70^{\circ}E$  con echados principalmente al SE

pero algunos fallas conjugadas con echados al NW; la siguiente agrupación se ubica al WNW con un conjugado menor hacia el E, representa la familia con rumbos aproximadamente N-S con echados hacia el E y el W (familia conjugada); un tercer grupo se aprecia en los cuadrantes SW y NE indicando un fallamiento conjugado con rumbo N40°-50°W y S60°-70°E. Se puede apreciar que los echados varían principalmente desde unos 45° hasta casi 90°, siendo la mayoría relativamente abruptos.



**Figura 29.** Diagrama de rosas y contorno de polos del proyecto El Realito que muestran un fallamiento principal NE20-40° con grupos subordinados en NW10°-NE10, NW40°-50° y NE50°-70°. a) Diagrama de rosas; b) Polos de planos de falla y diagrama de contornos.

Los ejes cinemáticos del Proyecto El Realito (figura 30) fueron obtenidos tanto con el programas FaultKin (Marrett y Allmendinger, 1990; Allmendinger *et al.*, 2012) y Win Tensor (Delvaux, 2011; 2012) utilizando 45 fallas en las que se pudo obtener la actitud de las estrías además de la de los planos de falla. Los resultados obtenidos con ambos programas son bastantes consistentes e indican que el esfuerzo principal  $\sigma_1$  que generó las fallas del área tiene una inclinación aproximada de  $80^\circ$  hacia el WNW; el esfuerzo intermedio  $\sigma_2$  es casi horizontal y dirigido al Sur, mientras que el esfuerzo menor  $\sigma_3$  tiene unos  $10^\circ$  de inclinación en dirección S89°E. La inclinación de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  sugiere una rotación de todo el sistema de unos  $10^\circ$  hacia el Este.



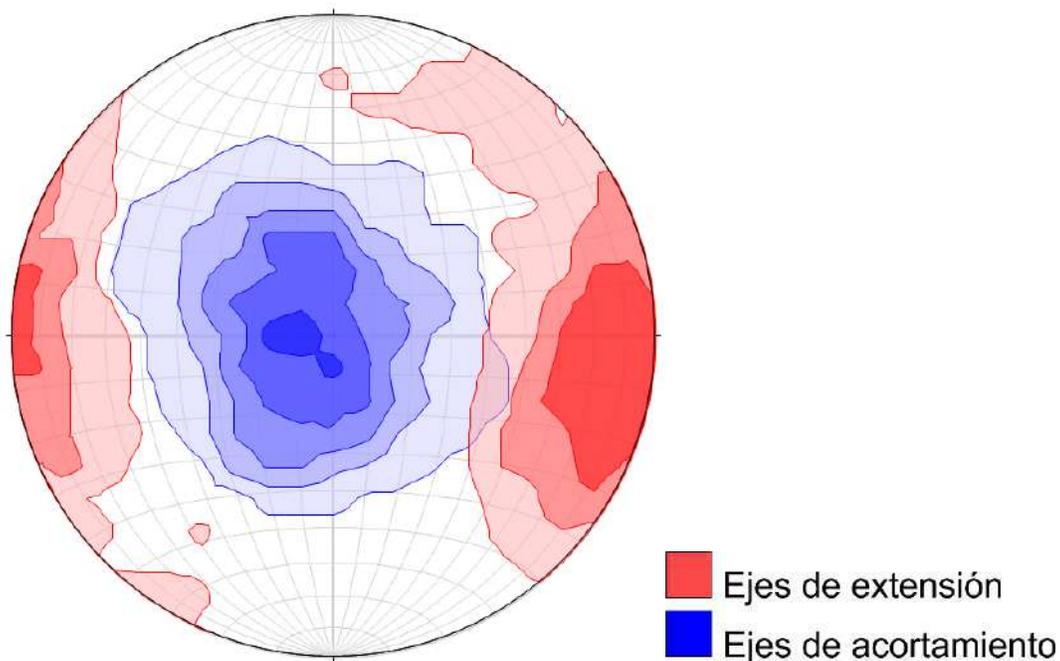
**Figura 30.**

Ejes cinemáticos en base a las 45 fallas con estrías tomadas del proyecto El Realito.

a) Ejes cinemáticos procesados a partir del programa FaultKin.

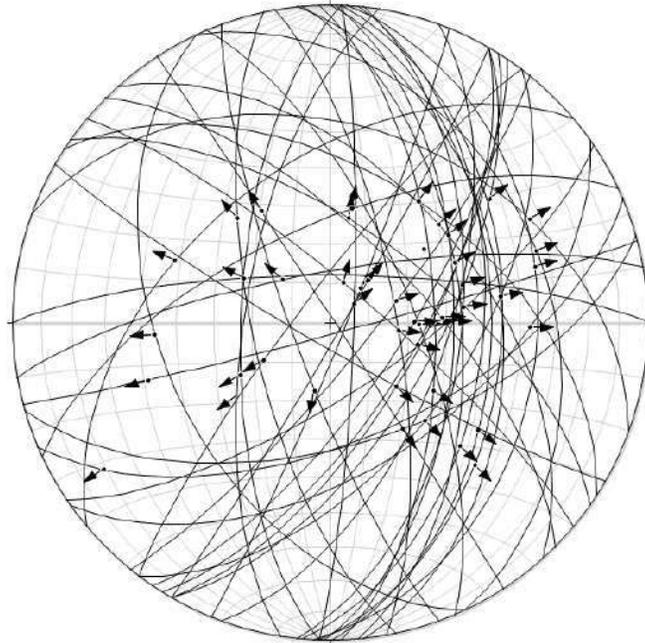
b) Ejes cinemáticos procesados a partir del programa WinTensor.

El estereograma de contornos de los ejes de extensión y acortamiento (figura 31) generado también con el programa FaultKin, arroja un solo conjunto de ejes de acortamiento indicado por los contornos azules, así como uno solo para los ejes de extensión delimitados por los contornos rojos. Este hecho indica que aunque las fallas del área presentan actitudes distintas, produciendo las 4 familias de la figura 29a, son cinemáticamente compatibles y pudieron ser generadas por un sólo evento de deformación. La fluctuación de los rumbos pudiera atribuirse a un campo de esfuerzos no-uniforme existente en un tiempo dado o a una variación temporal del fallamiento premineral, donde las fallas más antiguas son NW, con pequeños desplazamientos causados por las familias de fallas N-S y NE. Los resultados de diagramas de contornos obtenidos de los ejes de acortamiento y extensión (figura 31) son bastante similares con los  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  (figura 30) respectivamente, comprobando que la extensión en la región tiene una orientación general WNW-ESE.



**Figura 31.** Estereograma de contornos para los ejes de extensión y acortamiento a partir de las 45 fallas con estrías del proyecto El Realito.

A partir del estereograma de planos con dirección de movimiento de la región (figura 32) se muestra una preferencia de desplazamiento de bloques hacia el Este en un 73%. Por cuadrantes el porcentaje de direcciones de desplazamiento son 47% NE, 27% SE, 13% SW y 11% NW.



**Figura 32.** Estereograma de planos de movimiento que nos indica la dirección de desplazamiento de los bloques de techo de la región.

## X.2. Análisis Estructural En El Proyecto Los Tubos

El área del proyecto Los Tubos se ubica fuera de la mina hacia el Este, y al sur del proyecto El Realito (figura 3, 5), en el cual los espesores de roca favorable como dacita porfídica y toba de lapilli lítica ignimbrítica de composición dacítica todavía se estiman en un volumen poco admisible para la explotación. Es común encontrar brechas hidrotermales como la que se ve en la (figura 21c, 21d, 33a), destacadas en la topografía por su resistencia a la erosión dada su alta silicificación de estas. Tal es el caso también de afloramientos con alteración argílica avanzada como el observado en una pared rocosa de 25 metros (figura 33b) formada por una falla de actitud  $343^{\circ}/67^{\circ}$  con estrías al echado, con un fracturamiento sistemático  $187^{\circ}/45^{\circ}$ .

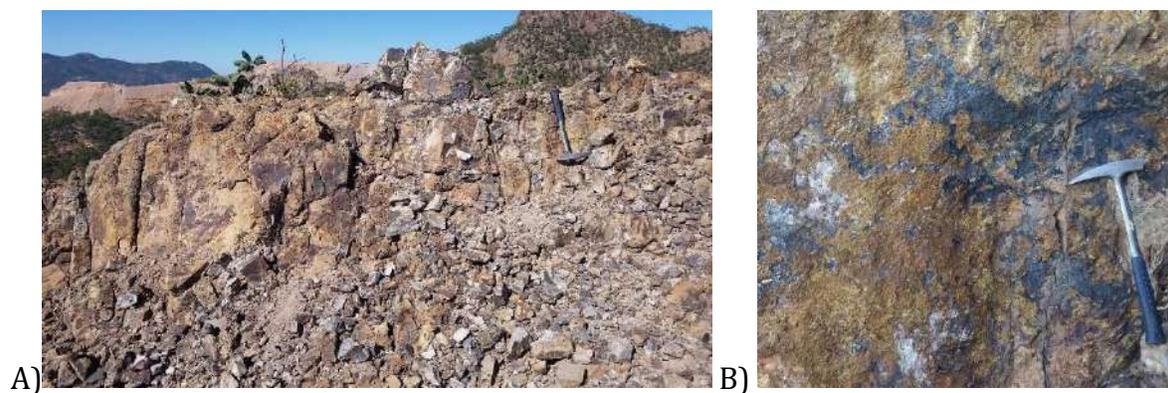


**Figura 33.** Estructuras silicificadas del proyecto Los Tubos en la toba de lapilli lítica. A) Brecha de falla con sílica masiva de actitud  $315^{\circ}/71^{\circ}$  con vetillosos finos de hematita, en una vista hacia el NW. B) pared rocosa de 25 metros de orientación NW-SE que sufrió una alteración argílica avanzada.

En los altos topográficos suelen encontrarse tobas de ceniza color blanco con alteración argílica avanzada con parches de arcillas blancas, uno de estos altos forma un cordón NE-SW (fácilmente observable por curvas de nivel al SE del mapa de la figura 5) en el cual se observó una falla  $30^{\circ}/78^{\circ}$  donde el bloque de piso sufrió un fuerte fracturamiento, relleno de óxidos de hematita, mientras que el bloque de techo muestra

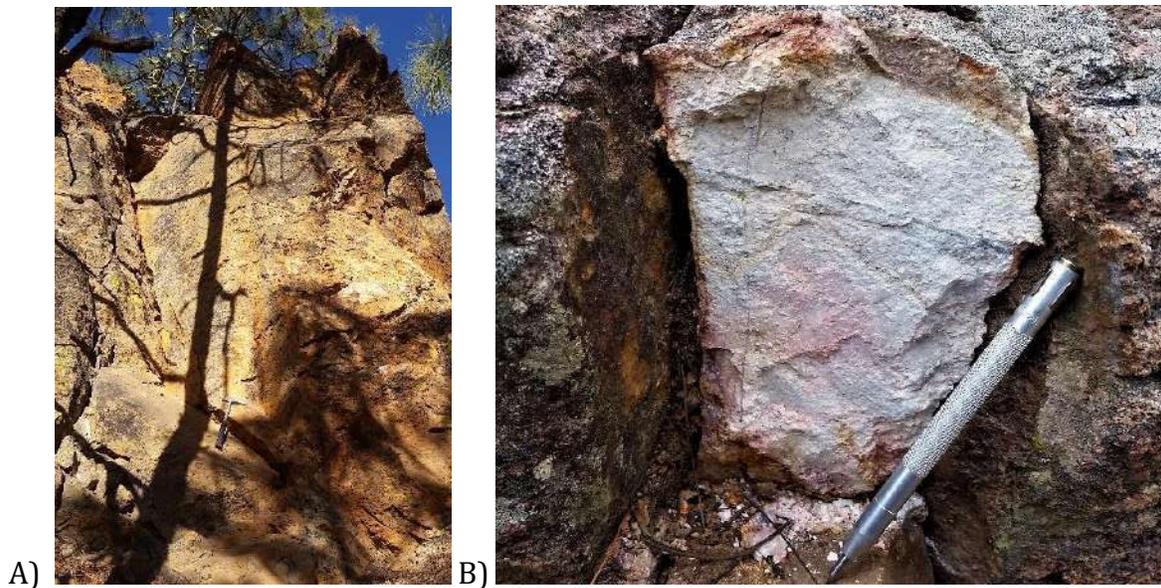
una menor oxidación. En el mismo cordón se encontró otra falla con actitud  $355^{\circ}/56^{\circ}$  con un vetilleo similar dentro de una zona de trituración de 30 cm.

Otras estructuras están presentes en el área, por ejemplo, un afloramiento de toba de lapilli lítica es cortada por una falla principal con actitud  $20^{\circ}/85^{\circ}$ , donde se observa gran cantidad de óxidos (figura 34a). Estos planos de falla es muy común encontrarlos con desarrollo de oxidación tipo hematita-jarosita (figura 34b).



**Figura 34.** Fallas en el proyecto Los Tubos. A) Fuerte fallamiento NE en la dacita porfídica con vista hacia el N55W°. A) Falla de actitud  $334^{\circ}/74^{\circ}$  en una toba de lapilli lítica, suelen estar cubiertas por óxidos de hematita-jarosita, con vista hacia el SW.

Por debajo de estas tobas aflora la dacita porfídica con alteración argílica avanzada, siendo muy común encontrarla con vetilleos finos de hematita y fallamiento NE, N-S y NW (figura 15b). Un afloramiento de la dacita porfídica se observa en gris claro con alteración argílica avanzada a lo largo de un plano de falla con actitud  $195^{\circ}/63^{\circ}$  (figura 35a). Cuando la textura original está fuertemente alterada suele presentar vetilleos muy finos de sílice (figura 35b)



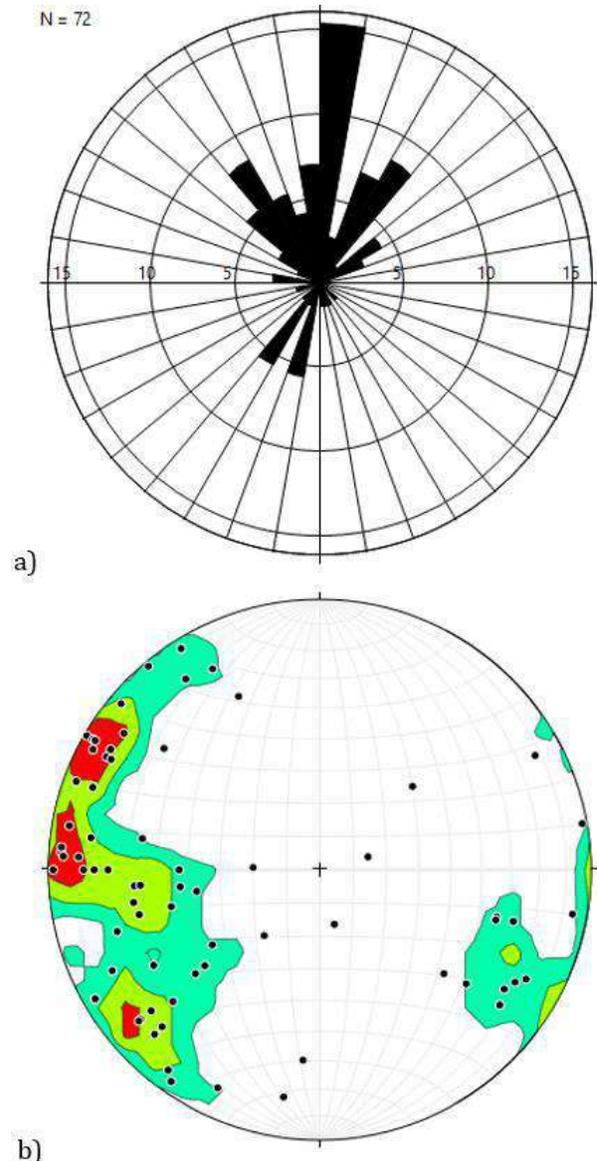
**Figura 35.** Estructuras en la dacita porfídica con alteración argílica avanzada en el proyecto Los Tubos. A) Plano de falla con actitud  $195^{\circ}/63^{\circ}$ . B) Vetilleos muy finos de sílice.

Se encuentran afloramientos que pudiesen ser pequeñas intrusiones, los cuales tienen un alto contenido de cristales de Plagioclasa de 2 a 3 mm, Hornblendas oxidadas de 2 mm y una matriz afanítica; la cuál presenta un fuerte fracturamiento no sistemático, pero con tendencia  $30^{\circ}/70^{\circ}$ . Se ubicó una zona de trituración de 10 cm de orientación  $275^{\circ}/60^{\circ}$  con una alta cantidad de óxidos (figura 36).



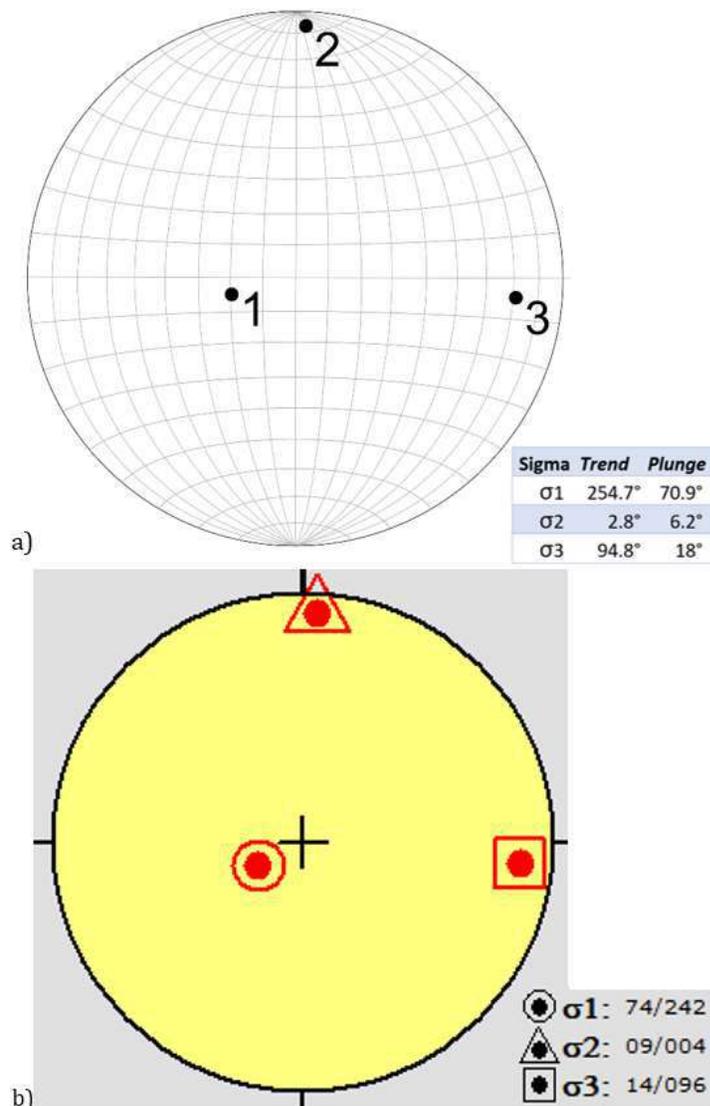
**Figura 36.** Posiblemente una pequeña intrusión con un fracturamiento no sistemático y con una alta cantidad de óxido, visto desde el SE.

En la zona de Los Tubos se midieron 72 fallas con y sin estrías (*e.g.*, figuras 33, 34, 35, 36), las cuales se analizaron a partir de la (figura 37), donde se muestra el diagrama de rosetas y los contornos de los polos de falla, los cuales permiten apreciar los principales grupos de rumbos de fallas. El grupo más representado tiene una orientación general N10°W-N10°E; con grupos subordinados en N30°-45°W, N20°-35°E; y con menor frecuencia las fallas orientadas S15°-40°W. En la figura están mostrados con la regla de la mano derecha, por lo que puede apreciarse que la mayoría del buzamiento de las fallas va hacia el E, NE y SE. Se aprecian echados variando de 45° hasta casi los 90°, siendo la mayoría de 60° a 85°.



**Figura 37.** Diagrama de rosas y contorno de polos de 72 fallas con y sin estrías del área del proyecto Los Tubos, mostrándonos las 3 familias principales N10°W-N10°E, N20°-35°E y N30°-45°W. a) Diagrama de rosas. b) Contorno de polos de planos de falla.

Los ejes cinemáticos del Proyecto Los Tubos (figura 38), obtenidos de los mismos softwares mencionados anteriormente, fueron obtenidos de la actitud de 26 fallas con estrías. Los resultados de los dos programas son bastante consistentes, solamente la dirección de  $\sigma_1$  resultante de FaultKin con  $S75^\circ W$  da como resultado 13 grados más hacia el Sur que el dado por Win Tensor con  $S62^\circ W$ , pero igualmente indican que el esfuerzo principal que generó las fallas del área en promedio tiene una inclinación (*plunge*) de  $72^\circ$  hacia el  $S68^\circ W$ ; el esfuerzo intermedio  $\sigma_2$  es casi horizontal e inclinado ligeramente al Norte, mientras que el esfuerzo menor tiene unos  $16^\circ$  de inclinación en dirección  $S85^\circ E$ . La inclinación de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  sugiere una rotación del sistema de unos  $18^\circ$  hacia el Este.



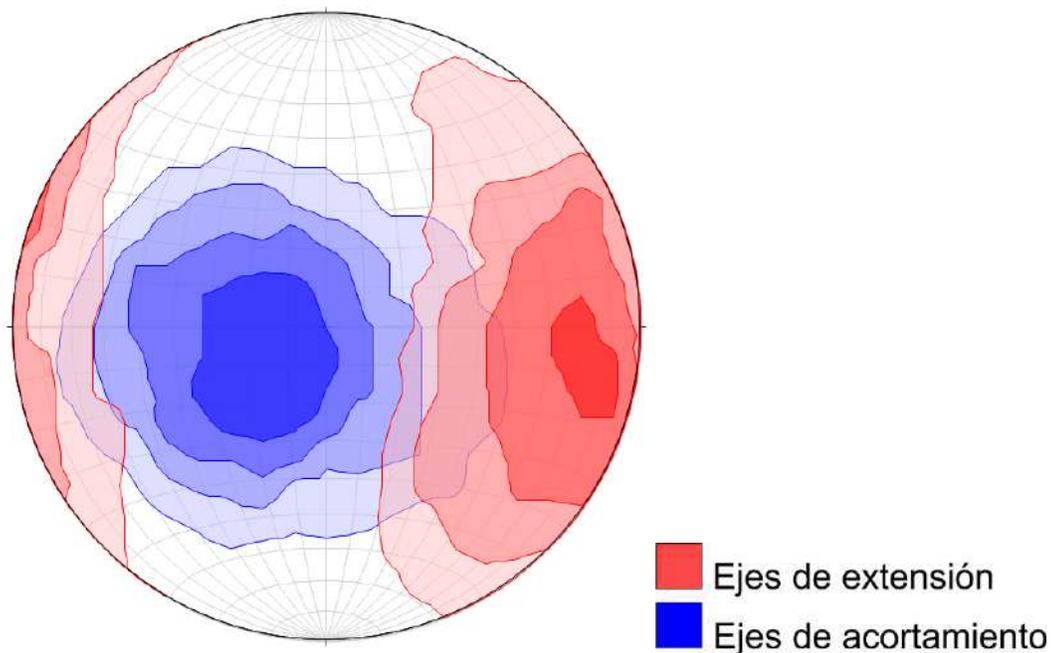
**Figura 38.** Estereograma de ejes cinemáticos del proyecto Los Tubos.

A) Diagrama generado a partir de FaultKin.

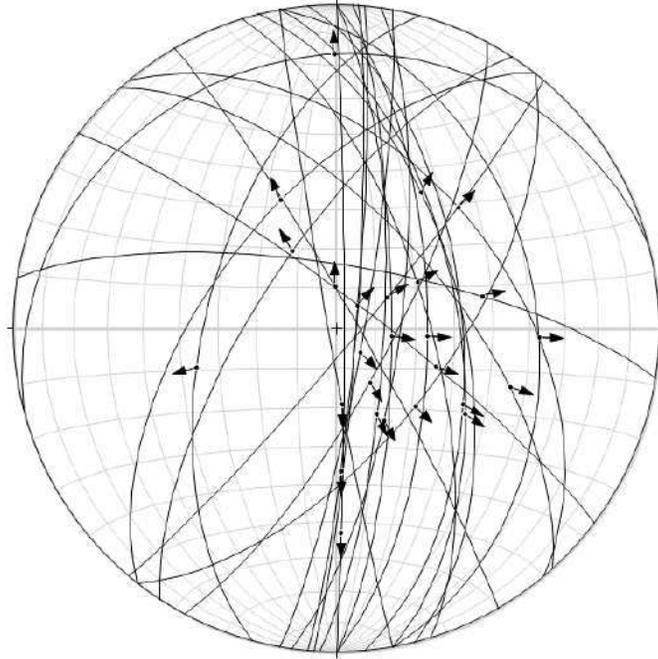
B) Diagrama generado a partir de WinTensor.

Se generó el estereograma de contornos de los ejes de extensión y acortamiento (figura 39) para la región de Los Tubos, siendo concordante con el obtenido en el proyecto El Realito. Se puede ver que el diagrama muestra un solo conjunto de ejes de acortamiento, además de uno solo para los ejes de extensión. Esto indica que las tres familias principales de fallas son cinemáticamente compatibles, y por lo tanto, que las fallas pudieran haber sido generadas durante el mismo evento de deformación. En esta región se observaron relaciones de corte pero al no haber una relación consistente, se extrapola del proyecto el Realito que la familia de fallas NW es anterior a las familias N-S y NE. La variación de las actitudes de falla que produce distintos agrupamientos (Figura 37) también puede atribuirse a un campo de esfuerzos no-uniforme actuando sobre la región de estudio.

En el proyecto Los Tubos, las flechas de movimiento (figura 40) muestran fallas con estrías de deslizamiento al echado o levemente oblicuo, con predominancia de deslizamiento de bloques al SE y NE en un 81%. Por cuadrantes, el porcentaje de direcciones de desplazamiento son 58% SE, 23% NE, 11% NW y 4% SW.



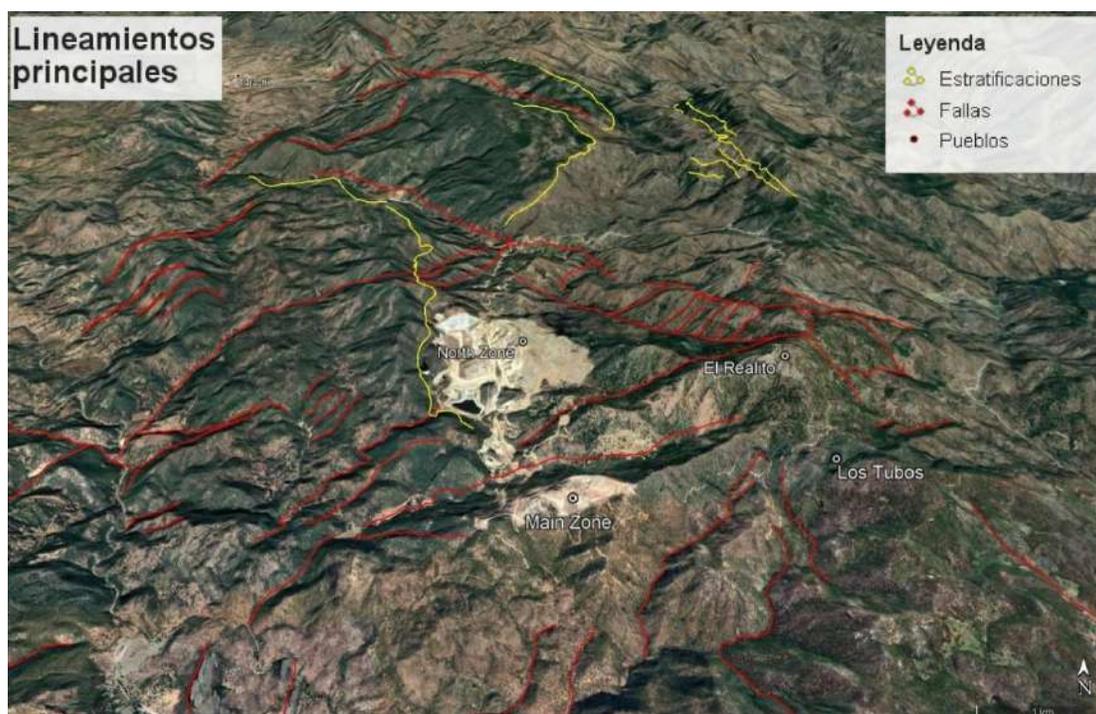
**Figura 39.** Estereograma de ejes de extensión y acortamiento generado a partir del software FaultKin, donde se aprecia una tendencia de extensión regional E-W.



**Figura 40.** Estereograma de planos de movimiento generado por el software FaultKin, en el que se muestra un deslizamiento de bloques preferencial al SE con un 58% y NE en un 23%.

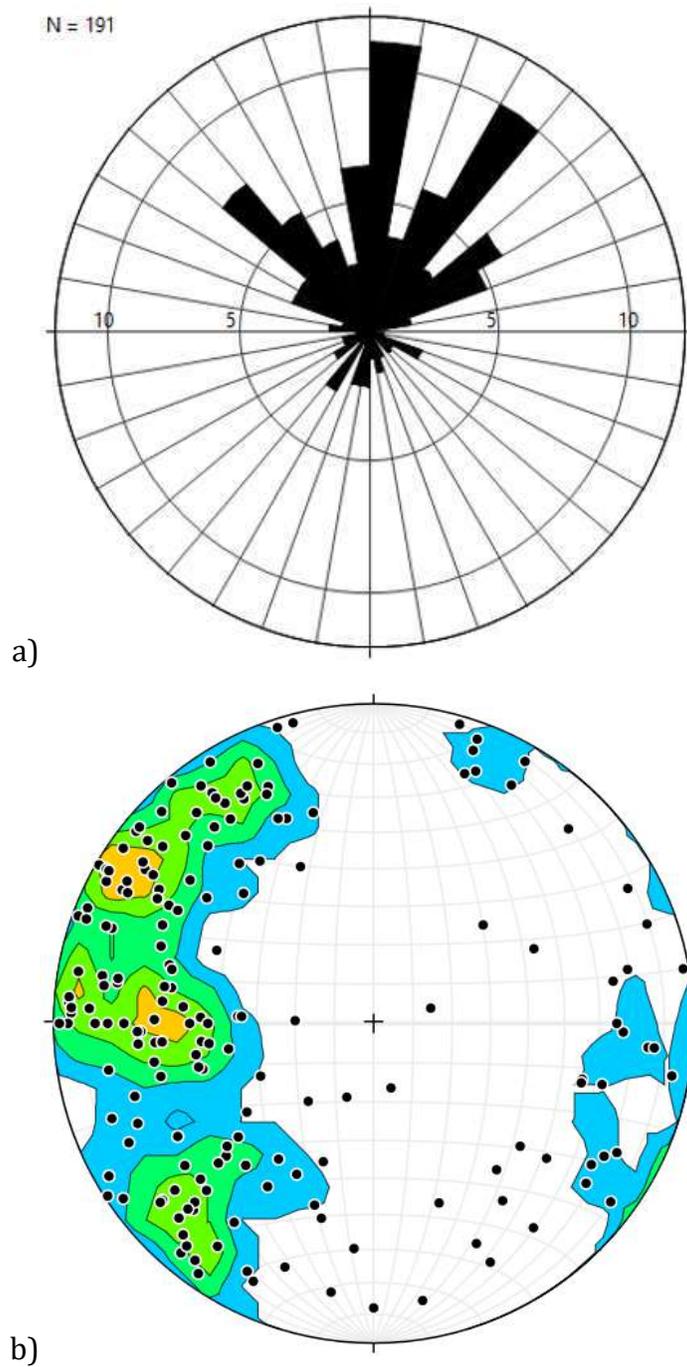
### X.3. Resumen Del Análisis Estructural De La Mina La India

Este análisis se basa en la recopilación de la base de datos de los dos proyectos para así generar resultados más precisos que puedan explicar el desarrollo estructural de la región. En el área de estudios se presenta un fallamiento en un ambiente extensional, afectando a todas las unidades del área que se observan fácilmente en vista aérea (figura 41) . Por estas estructuras se les facilita a los fluidos mineralizantes ascender y alimentar a las rocas receptoras de carácter más poroso, como la unidad dacítica que es la principal huésped de la mineralización en la región. Los fluidos pueden circular principalmente a lo largo de controles estructurales como se presenta en la unidad de toba de lapilli lítica ignimbrítica que las sobreyace; de aquí la importancia de caracterizar y estudiar todas las estructuras posibles. Para la captura de las fallas se buscaban preferentemente cortes de caminos o arroyos ya que se observan mejor; sin embargo, la mayor recopilación fue conforme los afloramientos encontrados en el trabajo de exploración de la mina.



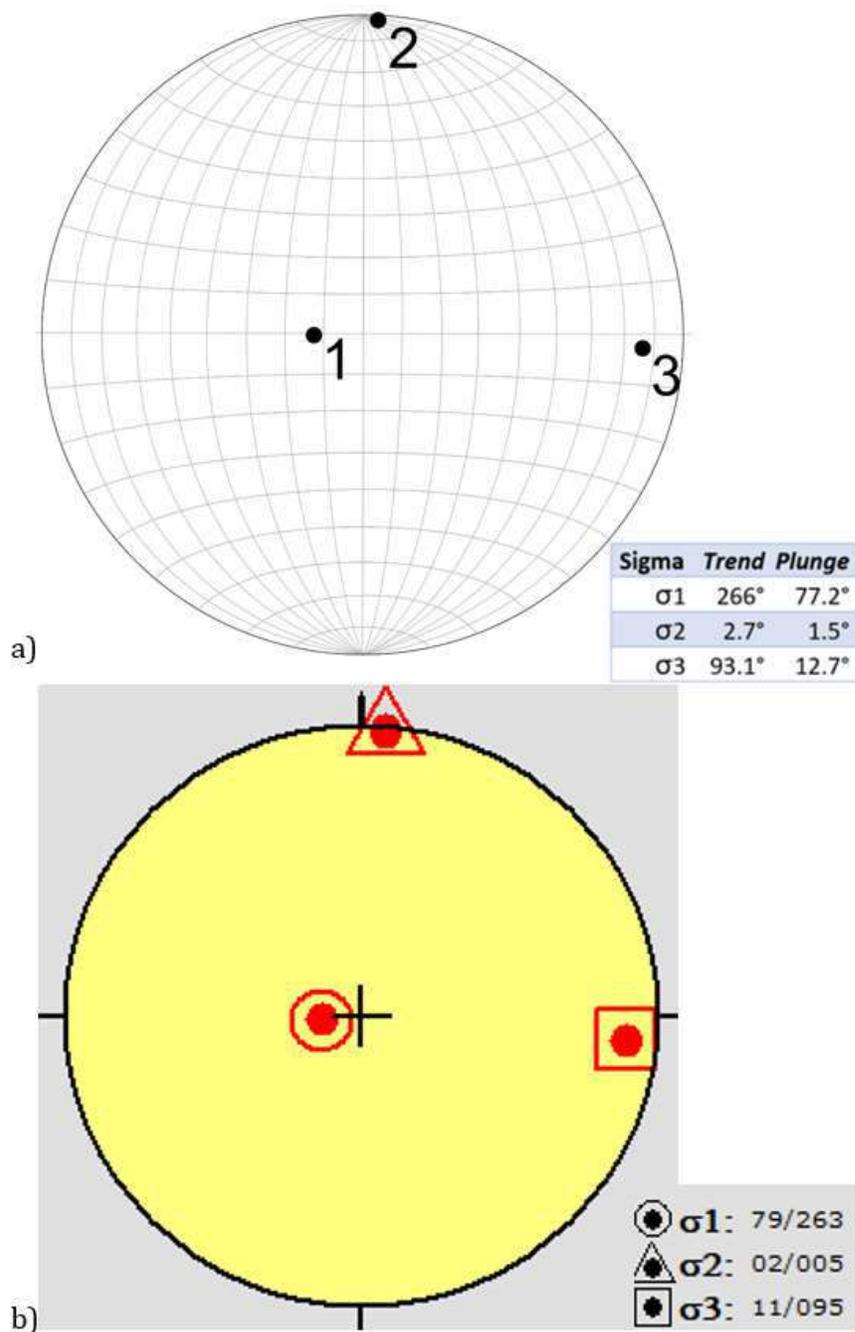
**Figura 41.** Lineamientos principales. En vista aérea hacia el Norte se muestra una imagen tomada de “Google Earth” donde se visualiza que la morfología local es controlada por el fallamiento normal principalmente de orientación NE y NW. En el fondo las capas en amarillo indican el plegamiento anticlinal de la región.

La medición de fallas con estrías se realizó para los proyectos El Realito y Los Tubos. Se registraron 191 medidas utilizando la regla de la mano derecha, de las cuales 71 presentaron estrías. Esta cantidad se considera una cifra estadística representativa para el análisis, además todos los estereogramas se graficaron con una proyección de *igual área* y con contorno tipo “*kamb*”. El diagrama de rosas (figura 42a) muestra de forma simple las tres familias de fallas predominantes, donde la de mayor densidad está en el grupo  $N10^{\circ}W-N10^{\circ}E$ , seguida de  $N20^{\circ}-40^{\circ}E$ , con un grupo subordinado  $N50^{\circ}-70^{\circ}E$  y como tercera familia  $N30^{\circ}-50^{\circ}W$ ; que indican buzamientos principales al SE, E y NE. El diagrama de distribución de los polos de falla y sus contornos respectivos (figura 42b), muestra que la actitud de los echados va de  $50^{\circ}$  hasta casi  $90^{\circ}$  y en el caso de la familia  $N10^{\circ}W-N10^{\circ}E$  es más amplio siendo de  $40^{\circ}$  hasta cerca de los  $90^{\circ}$ .



**Figura 42.** Estereogramas en base a 191 fallas recopiladas en campo. a) Diagrama de rosas. b) Polos de planos de falla y diagrama de contornos.

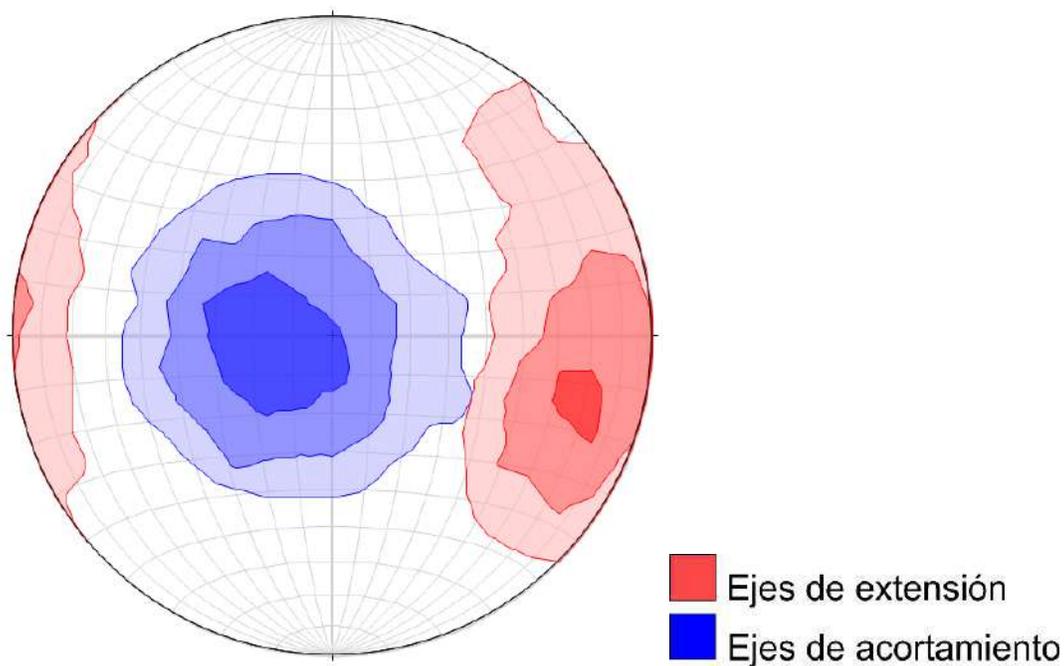
El diagrama de ejes cinemáticos de la mina La India (figura 43) muestra resultados bastante consistentes, indicando igualmente un esfuerzo principal  $\sigma_1$  que generó las fallas del área en una inclinación promedio de  $78^\circ$  hacia el WSW; el esfuerzo intermedio  $\sigma_2$  es casi de forma horizontal con  $2^\circ$  aproximadamente de inclinación al Norte, mientras  $\sigma_3$  como esfuerzo menor tiene  $12^\circ$  aproximadamente en dirección ESE.



**Figura 43.** Estereograma de ejes cinemáticos para la mina La India que indican esfuerzos de carácter normal y una extensión regional WNW-ESE.

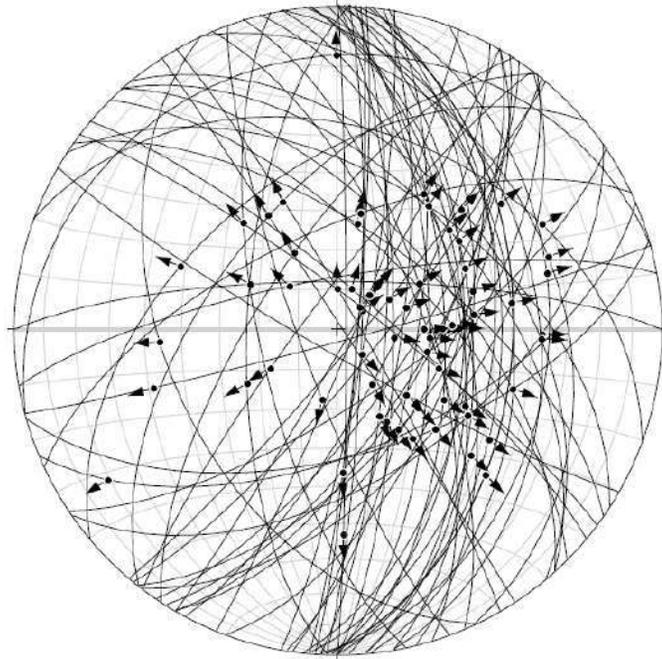
a) Diagrama generado por FaulKin. b) Diagrama generado por Win Tensor.

Con la información que brinda el estereograma de contornos de ejes de extensión y acortamiento mostrados en la figura 44, al presentarse un solo contorno de ejes de acortamiento bien definido, así como uno solo de extensión, según Rowland *et al.* (2007) se dice que el sistema es cinemáticamente compatible y por lo tanto pudo haber sufrido un solo evento de deformación. Sin embargo, al tener una mayor cantidad de datos procesados se precisó el contorno de ejes de acortamiento, mostrándose similar al  $\sigma_1$  visto en el diagrama de ejes cinemáticos (figura 43) de una inclinación aproximada de 78° ligeramente hacia el WSW.



**Figura 44.** Estereograma de los ejes de extensión y de acortamiento, que se pueden interpretar como cinemáticamente compatibles ya que presentan un solo contorno de ejes de acortamiento y uno solo de extensión.

En base al estereograma de planos de movimiento de las fallas de los proyectos (figura 45) y un análisis de datos a partir de la dirección de las estrías, estas se registran en la región con un 77% en deslizamiento del bloque de techo al Este, de los cuales el 59% lo abarca el rango N40°E a S40°E y su deslizamiento principalmente se presenta oblicuo y en menor medida paralelo al echado.



**Figura 45.** Estereograma de planos con dirección de movimiento conjunto de los proyectos El Realito y Los Tubos. Con estrías oblicuas y al echado predomina la dirección Este en un 77% y por cuadrante los desplazamientos con dirección NE se presentan en un 38%, SE 38%, NW 11% y SW 10%.

## XI. DISCUSIÓN

A partir de la observación de imágenes satelitales se identificaron estructuras que corresponden a un plegamiento regional con un ángulo interflancos de unos  $140^\circ$ , por lo que pueden clasificarse como pliegues “gentiles” (visualizado en la sección de la figura 23). La región donde se ubica la mina La India forma parte del flanco occidental de un pliegue anticlinal que, a la escala del área, provoca el buzamiento de las unidades volcánicas unos  $20^\circ$  hacia el Oeste. Esta estructura se puede ver claramente a unos 5 km al NE del tajo North Zone, donde se aprecian los dos flancos. Además, la mina Mulatos que se encuentra a 16 km al sureste del área de estudio, se ubica estructuralmente en la continuación hacia el sur del flanco oriental de este mismo pliegue (figura 24), esto se evidencia, dado que las unidades volcánicas presentan un buzamiento hacia el Este.

González-León *et al.* (2011 a, b) asocian la deformación de las rocas volcanosedimentarias del Cretácico Tardío en el cuadrángulo Aconchi-Banámichi con la orogenia Laramide. En dicha región, las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara son afectadas por un plegamiento homoclinal o de gran radio de curvatura, describiéndola como una fase compresiva de baja intensidad que generó localmente cabalgaduras de las rocas del Cretácico temprano encima de la Formación Tarahumara. En este trabajo se sugiere que el plegamiento de gran radio de curvatura presente en la región de La India puede correlacionarse, por el estilo y las rocas que son afectadas, con la manifestación de la Orogenia Laramide en la parte oriental de Sonora.

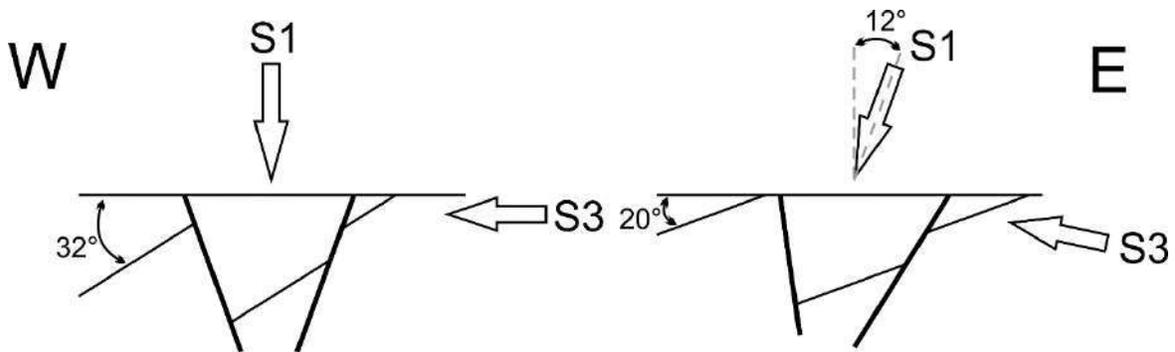
Calmus *et al.* (2011), proponen que la fase extensional “*Basin and Range*” o de Sierras y Valles, desde la perspectiva tectónica, se debe restringir al evento Oligoceno-Mioceno, que se caracteriza localmente por una alta tasa de extensión y por fallas de ángulo bajo con importante desplazamiento que se atribuyen a la exhumación de la placa inferior de los complejos de núcleo metamórfico. Contemporáneas con dichas estructuras se formaron fallas normales de ángulo alto y con direcciones NW-SE a N-S, con una tasa de extensión menor estimada entre un 10-15% (Gans, 1997) que dieron como resultado

la morfología de sierras y valles paralelos en la corteza superior. Además, Ferrari *et al.* (2005) explican que en la porción centro-oriente de Sonora, en las cuencas asociadas a este evento se acumularon gruesos espesores de conglomerados y areniscas bien consolidados, asignados como Formación Baúcarit (King, 1939), cuya parte inferior se compone de rocas clásticas intercaladas con flujos de lava basáltica y andesítica con edades entre 27 y 20 Ma (McDowell *et al.*, 1997; Paz-Moreno *et al.*, 2003), mientras que la parte superior está formada por secuencias clásticas con menor consolidación que se intercalan con aglomerados, tobas y derrames de riolita y riodacita del Mioceno medio.

Cruz-Páez (2008, 2012) consideró que la mineralización en la mina La India debió ser anterior a la edad de  $33.9 \pm 0.16$  Ma obtenida mediante el método de Ar-Ar en biotita de un vitrófido riolítico que no muestra alteración, el cual se encuentra ampliamente distribuido por el distrito y se le ha encontrado sobreyaciendo horizontes silicificados que pudieran formar parte del CVI. Por otro lado, en la mina Mulatos Staude (2001) indica que el evento mineralizante debió ocurrir entre 31.6 Ma, edad de tobas mineralizadas, y 25 Ma que es la edad de diques de andesita basáltica no alteradas. Los estudios de campo indican que los fluidos mineralizados fueron canalizados a lo largo de estructuras previas que corresponden a fallas normales. Por consecuencia, este fallamiento puede corresponder a las etapas iniciales del evento extensional *Basin and Range* el cual dio paso a la formación de valles donde se depositó la Formación Báucarit lo cual se considera que ocurrió entre 33 y 24 Ma de acuerdo a Bartolini *et al.* (1994). De acuerdo con Staude y Barton (2001) ciertas fallas normales predatan a las ignimbritas oligocénicas. El evento extensional afectó a las rocas preexistentes incluyendo al arco Laramide y al arco del Eoceno (Gans, 1997; Staude, 2001; Ferrari *et al.*, 2005).

Al culminar el análisis estructural se encontraron discrepancias entre los resultados esperados con los indicados por los ejes cinemáticos. Debido a que un 77% de las fallas están basculadas al Este, se visualizó la hipótesis de que  $\sigma_1$  podría haber sido basculado hacia el Este generando así que las dos subpoblaciones, originalmente con echados encontrados (al E y al W) rotaran lo suficiente para que ambas poblaciones buzaran

hacia la misma dirección (E) (ver figura A8, capítulo XIV.1.4.). No obstante, al procesar la información y graficar las direcciones de esfuerzos principales (figura 43) se encontró con  $\sigma_1$  subvertical desviado 13 grados hacia el Oeste, lo que sugiere que todas las estructuras previas, como las capas en las rocas volcánicas, rotaron hacia el Este. Por otra parte, las capas en el área tienen buzamientos dominantes de unos  $20^\circ$  hacia el W, que se interpretan como generados por un plegamiento de gran radio de curvatura similar al causado por la orogenia Laramide en el sureste de Arizona (Davis, 1979) y parte central de Sonora (González-León *et al.*, 2011 b). Entonces, de ser cierta la hipótesis (visualizada por las figuras 23, 24) de una rotación general del bloque hacia el Este, el echado original de las capas debió ser mayor, aproximadamente  $32^\circ$  hacia el Oeste, para que después de su rotación hacia el E, quedara un echado promedio de  $20^\circ$  hacia el W. Este modelo se muestra en la figura 46.



**Figura 46.** Modelo de evolución estructural de la región. Se estima que las fallas actuales se generaron en el flanco occidental de un pliegue anticlinal denominado como “gentil” con capas basculadas  $32^\circ$  al W que posteriormente sufrió un basculamiento regional de  $12^\circ$  hacia el E que dejó un buzamiento actual de  $20^\circ$  W.

## XII. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado dentro de la mina por Cruz-Páez (2008, 2012), se extendió hacia el E hasta los proyectos Los Tubos y El Realito, donde los resultados petrográficos y de DRX permitieron una descripción más detallada de su mineralogía y alteración. En el área de la mina La India se tienen dos unidades principales que son la (1) unidad andesítica y (2) unidad dacítica:

- (1) Se identifica principalmente por el flujo andesítico de textura microporfídica compuesto por plagioclasas de andesina, la cual sufre una fuerte alteración propilítica pervasiva constituida por clorita-epidota-hematita/jarosita. Este conjunto fue datado por Cruz-Páez (2012) arrojando una edad Paleoceno temprano de  $62.56 \pm 0.28$  Ma.
  
- (2) La unidad dacítica es la principal huésped de la mineralización aurífera la cual se alberga dentro de un brechamiento hidrotermal el cual está controlado estructuralmente. Las rocas de esta unidad presentan una alteración argiliza avanzada (White y Hedenquist, 1995) formada por cuarzo-alunita-caolinita-dickita-hematita/jarosita que varía hacia una alteración argílica, formada por caolinita-illita-esmectita-clorita-hematita/jarosita. La parte inferior de esta unidad corresponde a un flujo dacítico de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, el cuál ha sido fechado por Cruz-Páez (2012) como del Paleoceno-Eoceno con una edad de  $55.8 \pm 0.5$  Ma. Sobreyaciendo a esta, se tiene una toba de lapilli lítica ignimbrítica de composición dacítica formada por fragmentos de roca, cristales de plagioclasa y cuarzo. Esta roca presenta frecuentemente óxidos de forma de limonita. Esta roca se atribuye al Eoceno, ya que sobreyace a la dacita porfídica y presenta mineralización aurífera, la que se considera como de una edad mínima de  $33.90 \pm 0.16$  Ma (Cruz-Páez, 2012) con base en la edad de un vitrófido riolítico no mineralizado.

El estudio realizado en esta tesis se basa principalmente en el análisis estructural del fallamiento en el área de la mina La India. En el cual se obtuvo que la región presentó una extensión regional general WNW-ESE, un deslizamiento de bloques general del 77% hacia el E, donde el proyecto El Realito tiene una predominancia de desplazamiento de bloques al NE y Los Tubos hacia el SE. Las familias de fallas se agrupan en tres conjuntos principales, N10°W-N10°E, seguida de N20-40°E, con un grupo subordinado N50°-70°E y una tercera familia con rumbos N30°-50°W.

Se propone que el basculamiento hacia el W de las capas volcánicas en el área de estudio representa el flanco occidental de un pliegue anticlinal denominado como “gentil”, como los descritos en el sureste de Arizona por Davis (1979) y por González-León *et al.* (2011 b) en Sonora central. Dados los resultados desplegados por el análisis estructural realizado se sugiere que el fallamiento se generó mientras las unidades volcánicas presentaban un basculamiento de 32° hacia el W y que todo el sistema sufrió una rotación hacia el E de unos 12° dando como resultado un basculamiento actual de las capas de unos 20° W (figura 46). Para reforzar estas interpretaciones estructurales es necesaria más información de campo, como encontrar más estructuras que den sustento al plegamiento regional y obtener más datos de la actitud de las capas en donde es interpretada la falla lítrica de la sección esquemática de la figura 23.

### XIII. REFERENCIAS

- Agnico Eagle, 2018, Agnico Eagle Mines Limited. La India, Sonora, Mexico (en línea), <<http://www.agnicoeagle.com/English/operations-and-development-projects/operations/la-india/default.aspx>>, acceso libre, consulta: 20 de mayo de 2018.
- Alencáster de Cserna, G., 1961, Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del estado de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, 11, 1-18.
- Almazán-Vázquez, E., 1989, El Cámbrico-Ordovícico de Arivechi, en la región centro oriental del Estado de Sonora: Revista del Instituto de Geología, 8, 58-66.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., and Fisher, D., 2012, Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology: Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, p. 289 pp.
- Allmendinger R.W., Gephart J. W., Marrett R.A., 1989, Notes On Fault Slip Analysis: New York, , 59 pp.
- Anderson, E.M., 1942, The Dynamics of Faulting: Edinburgh, Oliver & Boyd, p. 191.
- Anderson, T. H., Silver, L. T., 1981, An overview of Precambrian rocks in Sonora, Mexico: Revista mexicana de ciencias geológicas, 5, 131-139.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 2005, The Mojave-Sonora megashear—field and analytical studies leading to the conception and evolution of the hypothesis: Geological Society of America Special Paper, 393, 1-50.

- Aydin, A., Reches, Z. 1982, 'Number and orientation of fault sets in the field and in experiments, *Geology*, 10, 107–112.
- Balleweg, K., 2016: Los Venados Field examination report, Wolverine Minerals Corporation, reporte técnico, 16 pp.
- Bartolini, C., Damon, P., Shafiqullah, M., Morales, M., 1994, Geochronologic contributions to the Tertiary sedimentary volcanic sequences (“Baucarit Formation”) in Sonora, Mexico, *Geofísica Internacional*, 33, p. 67–77.
- Bartolini, C., M. Morales, P. Damon y M. Shafiqullah, 1992, K-Ar ages of tilted Tertiary volcanic rocks associated with continental conglomerates, Sonora Basin and Range Province, Mexico, *The Geological Society Of America (GSA)*, 24, 6 pp.
- Bockoven, N. T., 1980, Reconnaissance geology of the Yécora-Ocampo area, Sonora and Chihuahua, Mexico: Austin, University of Texas, tesis doctoral.
- Calmus, T., Vega-Granillo, R., & Lugo-Zazueta, R. (2011). Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico: Universidad Nacional Autónoma de México, *Instituto de Geología*, 118, 227-266.
- Calmus, T., Poupeau, G., Defaux, J., & Labrin, E., 2000, Basin and Range and Gulf of California tectonics: contribution of an apatite fission-track study, en Cuarta Reunión sobre la Geología del Noroeste de México, Estación Regional de Noroeste, Sonora, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional de Noroeste, 13-14.
- Cameron, K. L., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S., Gunn, S., 1989, Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico; a link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America: *Journal of Geophysical Research*, 94, 7817-7840.

- Cardozo, N., Allmendinger, R. W., 2013, Spherical projections with OSXStereonet: Computers & Geosciences, 51, 193-205.
- Cochemé, J. J., Demant, A., 1991, Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico. Studies of Sonoran geology: Geological Society of America Special Paper, 254, 81-94.
- Corsetti F. A., Stewart J. H., Hagadorn J. W., 2007, Neoproterozoic-cap carbonate succession and  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy from eastern Sonora, Mexico, Chemical Geology, 237, 129–142.
- Cruz E. P., 2008, Espectrometría de reflectancia SWIR, aplicada para mapeo de alteración en la zona de Viruela – La Cruz, Proyecto La India. Distrito Minero Mulatos, Sahuaripa, Sonora México: Sonora, México, Universidad de Sonora, tesis de licenciatura, 196 pp.
- Cruz E. P., 2012, Geocronología y Caracterización del Sistema Epitermal de Alta Sulfuración (Au), La India: Sonora, México, Universidad de Sonora, tesis de maestría, 133 pp.
- Damon, P.E.; Shafiqullah, M.; Roldán-Quintana, J., y Cochémé, J.J., 1983, El batolito Laramide (90–40 Ma) de Sonora, en Convención nacional XV, Guadalajara, Jalisco, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, 63–95.
- Davis, G.H., 1979, Laramide folding and faulting in southeastern Arizona: American Journal of Science, 279, 543–569.
- Delvaux, D., 2011, Win-Tensor, an interactive computer program for fracture analysis and crustal stress reconstruction, ver. 5.0.1, Viena, EGU General

Assembly, Geophysical Research Abstracts,  
<<http://www.damiendelvaux.be/Tensor/WinTensor/win-tensor.html>>, acceso libre, consulta: 02 de octubre de 2018, EGU2011-4018.

Delvaux, D., 2012, Release of program Win-Tensor 4.0 for tectonic stress inversion: statistical expression of stress parameters. ver. 5.0.1, Viena, EGU General Assembly, Geophysical Research Abstracts,  
<<http://www.damiendelvaux.be/Tensor/WinTensor/win-tensor.html>>, acceso libre, consulta: 02 de octubre de 2018, Doi: 10.13140.

Dickinson, W.R., Klute, M.A., Swift, P.N., 1986, The Bisbee Basin and its bearing on Late Mesozoic paleogeographic and paleotectonic reconstructions between the Cordilleran and Caribbean regions: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 46, 51-62.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57, 343-378.

Flhor J.K., 1997, X-Ray Powder Diffraction handout (en línea): Reston Virginia, U.S. Geology Survey, actualización: 28 de enero de 2000, <<https://pubs.usgs.gov/info-handout/diffraction/html/>>, consulta: 20 de agosto de 2018.

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

García-Cortez J.A.; Guzmán-Espinoza J.B.; Mancillas-Gutiérrez A.A.; García-Duarte R.; Siqueiros-Lopez, C., 2000, Carta Geológico-Minera Tecoripa H12-12, escala 1:250 000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.

- Gastil, R. G., Krummenacher, D., 1977, Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía de Kino: Geological Society of America Bulletin, 88, 189-198.
- González-Becuar, E., Pérez-Segura, E., Vega-Granillo, R., Solari, L.A., González-León, C. M., Solé-Viñas, J., López-Martínez, M., 2017, Laramide to Miocene syn-extensional plutonism in the Puerta del Sol area, central Sonora, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 34, 45-61.
- González-León, C. M., 1994, Early Cretaceous tectono-sedimentary evolution on the southwestern margin of the Bisbee basin: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 11, 139-146.
- González-León, C., Lawton, T. F., 1995, Stratigraphy, depositional environments, and origin of the Cabullona Basin, northeastern, Sonora, Geological Society of America, Special Paper, 301, 121-142.
- González-León, C.M., Lawton, T.F., Weber, R., 2011, Estratigrafía del Triásico y el Jurásico Inferior de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geología, 118, 57-80.
- González-León, C. M., McIntosh, W. C., Lozano-Santacruz, R., Valencia- Moreno, M., Amaya-Martínez, R., Rodríguez-Castaneda, J. L., 2000, Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi Quadrangles), northwest Mexico: Geological Society of America Bulletin, 112, 600-610.
- INEGI, 1981, Carta fisiográfica de la República Mexicana, escala 1:1000,000: México, Secretaría de Programación y Presupuesto, 1 mapa.

- INEGI, 1992, Cartas estatales de tipos de climas de Köppen, modificado por García (1973), escala 1:1000,000: México, 1 mapa
- King, R.E., 1939, Geological reconnaissance in the northern Sierra Madre Occidental of Mexico: Geological Society of America Bulletin, 50, 1625–1722.
- Köppen W. G., München R. G., 1936, Das geographische System der Klimate, Handbuch der Klimatologie: Berlín, Gebrüder Borntraeger, 46.
- Longo, A.A., 2013, A Review of the Viruela Oeste Porphyry Au Target and the Juliana Project: Sahuaripa, Sonora, Agnico Eagle, reporte técnico, 21 pp.
- Longo, A.A., 2013b, Cordon de Viruela-La India Porphyry: Sahuaripa, Sonora, Agnico Eagle, reporte técnico, 12 pp.
- Longo, A. A., 2014, La India Exploration: Sahuaripa Sonora, Agnico Eagle, Reporte técnico, 16 pp.
- Lucas, S. G., Kues, B. S., y González-León, C. M., 2005, Paleontology of the Upper Cretaceous Cabullona Group, northeastern Sonora: Geological Society of America Special Paper, 301, 143-165.
- Marrett, R. A., y Allmendinger, R. W., 1990, Kinematic analysis of fault-slip data: Journal of Structural Geology, 12, 973-986.
- McDowell, F. W. y Clabaugh, S. E., 1979, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico: Geological Society of America Special Paper, 180, 113-124.

- McDowell, F.W., y Keizer, R.P., 1977, Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, México: Geological Society of America Bulletin, v. 88, p. 1479–1487.
- McDowell, F. W., y Roldán-Quintana, J., 1991. Timing of Late Tertiary extension in central Sonora, México: Geological Society of America, 23, 274.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R., 1997, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 109, 1349–1360.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J. N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 113, 521–531.
- Mora-Álvarez, G., McDowell, F. W., 2000, Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Ursula of Western Sonora, Mexico: Geological Society of America Special Paper, 334, 123-141.
- Mora-Klepeis, G., McDowell, F. W., 2004, Late Miocene calc-alkalic volcanism in northwestern Mexico: an expression of rift subduction-related magmatism? Journal of South American Earth Science, 17, 297-310.
- Münch, P., 1993, Pétrologie et géochimie des tufs et des roches volcano-détritiques des bassins miocènes dans la région du Sonora, Mexique—Contribution à l'étude du métamorphisme de très bas degré en contexte distensif: Francia, Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille III, tesis doctoral, 215 pp.
- Nourse, J.A., Anderson, T.H., Silver, L.T., 1994, Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico: TECTONICS, 13, 1161-1182.

- Ochoa-Granillo, J. A., Sosa-León, J. P., 1993, Geología y Estratigrafía de la Sierra Agua Verde con énfasis en el Paleozoico, Mátape, Sonora, México (Tesis de Licenciatura ed.). Hermosillo, Sonora, México: Universidad de Sonora.
- Oskin, M., Iriondo, A., Nourse, J., 2003, Geologic reconnaissance and geochronology of proto-Gulf of California extension, western Sonora, en Geological Society of America Cordilleran Section 99th annual Meeting, Jalisco, México: Geological Society of America.
- Palafox-Reyes, J., 2011, *Du craton au Rheique: Le nord et le centre de l'état du Sonora (Mexique) au Paleozoique superior (Devonien-Pennsylvanien), lithostratigraphie, biostratigraphie, approche geoquimique et implications géologiques*: Lille, Francia, Université de Lille, tesis doctoral.
- Palafox, J.J., Martínez, J.A., 1985, Estratigrafía del área de Arivechi, Sonora: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Boletín, 2, 30-59
- Palafox, J.J., Minjarez, J.I., Pubellier, M., and Rascon, B., 1984, Sobre la presencia de rocas del paleozoico superior en el área de Arivechi, Sonora, México: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Boletín, 1, 60-62.
- Paz-Moreno, F., Demant, A., Cochemé, J. J., Dostal, J., Montigny, R., 2003, The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, Mexico: Geological Society of America Special Paper, 374, 439-455.
- Roldán-Quintana, J., 1991, Geology and chemical composition of El Jaralito and Aconchi batholiths in east-central Sonora: Geological Society of America, Special Paper, 254, 19-36.

- Romero I., Estrada I. García S. R., Mendivil E., Chomina F. J., 2017, Realito proyect (Preliminary core log manual): Sahuaripa Sonora, Agnico Eagle, reporte técnico, 16 pp.
- Rowland S. M.; Duebendorfer E. M.; Schiefelbein I. M., 2007, Structural Analysis and Synthesis, EE. UU., Blackwell Publishing, 322 pp.
- Staude, J. M., Barton, M. D., 2001, Jurassic to Holocene tectonics, magmatism, and metallogeny of northwestern Mexico: Geological Society of America Bulletin, 113, 1357-1374.
- Stewart, J. H., Roldán-Quintana, J., 1991, Upper Triassic Barranca Group Nonmarine and shallow-marine rift-basin deposits of northwestern Mexico: Geological Society of America, Special Paper, 254, 19-36.
- Stewart, J.H., Amaya-Martínez, R., Palmer, A.R., 2002, Neoproterozoic and Cambrian strata of Sonora, Mexico Rodinian supercontinent to Laurentian Cordilleran margin: Geological Society of America Special Paper, 5-48.
- Stewart, J. H., Poole, F. G., Harris, A. G., Repetski, J. E., Wardlaw, B. R., Mamet, B. L., Morales-Ramirez, J. M., 1999, Neoproterozoic to Pennsylvanian inner-shelf, miogeoclinal strata in Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 16, 35-62.
- Stock, J. M., Lewis, C. J., Nagy, E. A. 1999, The Tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 93, 53-74.
- Taliaferro, N.L., 1933, An occurrence of Upper Cretaceous sediments in northern Sonora, Mexico: Journal of Geology, 41, 12-37.

- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M. D., Patchett, P. J., Zürcher, L., Hodkinson, D., Roldán-Quintana, J., 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 1409-1422.
- Valenzuela-Navarro, L.C., Valencia-Moreno, M., Iriondo, A., Premo, W., 2003, The El Crestón Granite: a new confirmed Paleoproterozoic locality in the Opodepe area, North-Central Sonora, Mexico, *en Geological Society of America, Cordilleran Section, 99th annual Meeting, Jalisco, Mexico: Geological Society of America*, p. 83.
- Vega-Granillo, R., Araux-Sánchez, E., 1985, Estudio geológico de la Sierra La Campaneria y sus yacimientos minerales: *Bol. Departamento de Geología, Universidad de Sonora*, 2, 74-84.
- Vidal-Solano, J.; Paz Moreno, F.A.; Demant, A.; López-Martínez, M., 2007, Ignimbritas hiperalcalinas del Mioceno medio en Sonora Central—Revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo terciario: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 47–67.
- Vidal-Solano, J. R., Paz-Moreno, F. A., Iriondo, A., Demant, A., Cochemé, J. J., 2005, Middle Miocene peralkaline ignimbrites in the Hermosillo region (Sonora, México): Geodynamic implications: *Comptes Rendus Geosciences*, 337, 1421-1430.
- Weber R., Zambrano-García A., Amozurrutia-Silva F., 1980, Nuevas contribuciones al conocimiento de la taoflora de la Formación Santa Clara (Triásico Tardío) de Sonora: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 4, 125-137.
- White, N. C., Hedenquist, J. W., 1995, Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration: *Society of Economic Geologists newsletter*, 23, 9-13.

Wilson, F. I., Rocha, S. V., 1949, Coal deposits of the Santa Clara district near Tónichy, Sonora, Mexico: Unites States Geological Survey Bulletin, 962A, 80 p.

Wong, M. S., Gans, P. B., 2003, Tectonic implications of early Miocene extensional unroofing of the Sierra Mazatán metamorphic core complex, Sonora, Mexico: *Geology*, 31, 953-956.

Zharikov, V., Perstev, N., Rusinov, V., Callegari, E., Fettes, D., 2007, Metasomatism and metasomatic rocks. En: *Metamorphic Rocks a Classification and Glossary of Terms*; Fettes, D., Desmons, J. (eds.). Cambridge University Press, pp. 58-68.

## XIV. ANEXOS

### XIV.1. Anexo 1: Conceptos Teóricos

#### XIV.1.1. Tipos de Falla

Según Rowland *et al.* (2007) una falla es una superficie de fractura a través de la cual ha ocurrido un movimiento paralelo a la superficie de fractura. En ocasiones es una falla simple o una zona de falla, pero mayormente el movimiento toma lugar en numerosas superficies paralelas resultando una zona de roca fracturada. La falla de San Andrés en California, por ejemplo, en muchos lugares es una falla individual, activa de hecho dentro de una zona de falla cizallada, que tiene decenas a centenas de metros de anchura. Algunas fallas son sólo de unos centímetros de longitud, mientras otras alcanzan cientos de kilómetros. En los mapas geológicos es usualmente poco factible mostrar cada falla. Sólo las fallas que afectan los patrones del afloramiento entre dos o más unidades son usualmente incluidas en el plano geológico. La escala del mapa influye de manera determinante en cuales fallas pueden mostrarse y cuáles no. En seguida se presentan algunas definiciones basadas en Rowland *et al.* (2007), utilizadas para describir los tipos de fallas.

Falla de desplazamiento a rumbo: es una falla en la cual el deslizamiento es paralelo al rumbo del plano de falla. También son llamadas fallas transcurrentes. Una falla con desplazamiento a rumbo lateral-derecho (dextral) es en la cual una capa o estructura se presenta movida hacia el lado derecho mientras se observa desde el otro bloque. Una falla de deslizamiento a rumbo lateral-izquierdo (sinistral) es en la que se muestra un sentido opuesto de desplazamiento

Falla con deslizamiento al echado: es una falla en la cual el movimiento es paralelo al echado del plano de falla.

Falla de deslizamiento oblicuo: es una falla en la cual el movimiento no es paralelo ni al echado ni al rumbo del plano de falla.

Bloque de techo: se encuentra sobre el plano de falla.

Bloque de piso: se encuentra debajo del plano de falla. Nota: en las fallas verticales no existen los bloques de techo o piso.

Falla normal: es una falla de deslizamiento al echado donde el bloque de techo baja.

Falla inversa: falla de deslizamiento al echado en el cual el bloque de techo sube.

Falla de cabalgadura: es una falla inversa de bajo ángulo, típicamente con un echado menor a 30°.

Falla de *decollement* o *detachment* (despegadura): falla de extensión regional, de bajo ángulo o subhorizontal, que típicamente separa una placa superior de una inferior, cada una con rocas de características estructurales o grado metamórfico distinto. Ambos términos implican desacoplamiento entre las placas superior e inferior. El término falla de *detachment* se usa comúnmente, pero no exclusivamente, para fallas normales de bajo ángulo.

Falla lítrica: falla en donde el echado es alto en la parte superior y cambia progresivamente a un ángulo más bajo a profundidad.

Falla traslacional: es la falla en la que no ocurre rotación de los bloques durante el movimiento, entonces un plano preexistente, permanece paralelo en los dos bloques de la falla una vez ocurrido el deslizamiento.

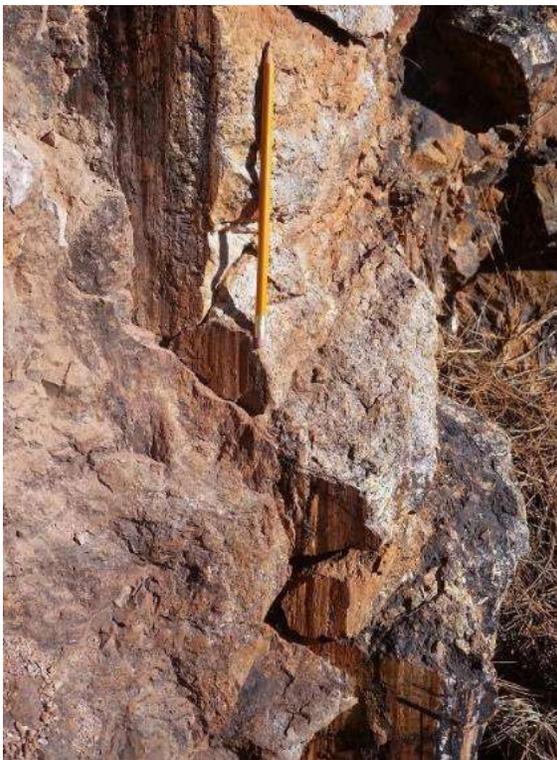
Falla rotacional: en la cual un bloque rota en relación al otro.

Falla de tijera: falla en la cual los bloques fallados rotan en diferente dirección con relación a un eje que es perpendicular a la superficie de falla. El desplazamiento es nulo en el eje y la distancia de desplazamiento se incrementa al alejarse de éste.

Traza de falla: plano de falla expuesto en la superficie de la tierra.

Espejo de falla: es una capa delgada de mineral pulido que se desarrolla por fricción en los planos de falla. En ella se suelen generar estructuras lineares llamadas estrías de falla.

Estrías de falla: estructuras lineares visibles en espejos de fallas causadas por la fricción de minerales resistentes (figura A1). Las estrías indican la dirección de movimiento. Suelen ser paralelas a la dirección del último movimiento que experimentaron los bloques y generalmente no es posible determinar sólo con ellas el sentido de movimiento.



**Figura A1.** Fotografía de una falla con actitud  $170^{\circ}/88^{\circ}$ , con estrías bien definidas con un rake de  $72^{\circ}$ , se encuentran en una brecha hidrotermal silicificada con vetilleos de óxido, hospedada en una toba de lapilli del proyecto Los Tubos.

Sentido de movimiento: es la dirección hacia donde se movieron los bloques, generalmente se define indicando el desplazamiento del bloque de techo. Ejemplo, bloque de techo al NE. Los indicadores de sentido más utilizados en fallas frágiles son: a) desplazamiento de horizontes marcadores; b) fracturas Riedel y c) tectoglífos.

### a) Desplazamientos de horizontes marcadores

Estos se dan cuando un fallamiento sobre un material presenta estratificación, diques, vetas u otras estructuras planas preexistentes, permitiendo definir el sentido de movimiento (figura A2). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que para definir el desplazamiento real o desplazamiento neto, se debe observar la dirección del movimiento definida por las estrías, de otro modo en las fallas pueden generarse “separaciones” que no necesariamente reflejan el deslizamiento neto.

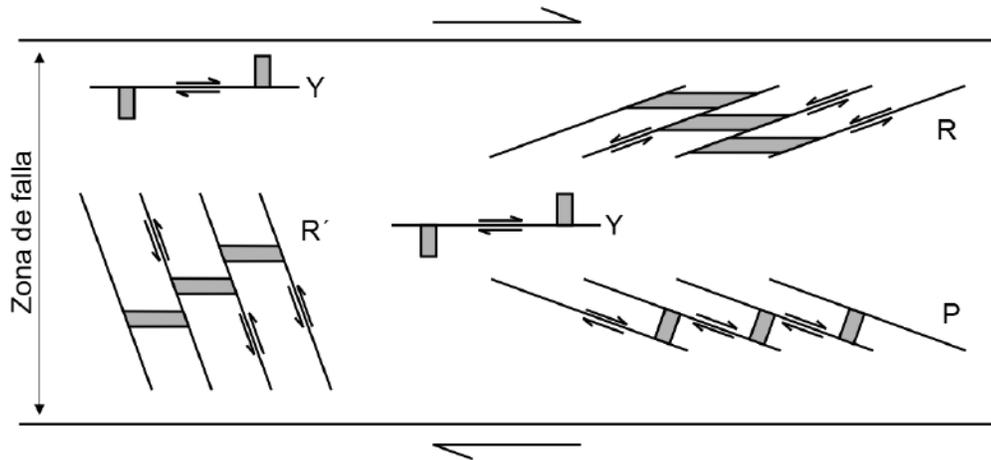


**Figura A2.** Horizontes marcadores en un corte carretero del municipio de Hermosillo, en donde se pueden ver, a la izquierda de la fotografía, diques aplíticos. Imaginando como estaban en su posición inicial, tomando en cuenta que el corte del afloramiento es perpendicular al rumbo de la falla y que las estrías son paralelas a la dirección del echado, se puede establecer que el bloque de techo (arriba-izquierda) baja sobre una falla lístrica.

### b) Fracturas Riedel.

Son fracturas que se forman dentro de las zonas de falla en la etapa temprana de la deformación, ya que al presentarse desplazamientos cortos mantienen esta serie de fracturas. En la figura A3 se aprecian las geometrías relacionadas con las variedades de estas fracturas. Esto con base en el ángulo que presentan a partir de la zona de falla y el

tipo de desplazamiento de sus horizontes marcadores. Por ejemplo, las de tipo 'Y' se identifican por ser paralelas a la zona de falla y con un desplazamiento de horizontes marcadores de carácter dextral para este ejemplo.



**Figura A3.** Diferentes tipos de fracturas Riedel: R (riedel), R' (anti-riedel), P y Y.

c) Tectoglífos.

Son escalones o semiconos que se forman debido a la presencia de irregularidades en el plano de falla (figura A4). Se interpreta que el movimiento ocurre de manera perpendicular a la cara expuesta de cada escalón.



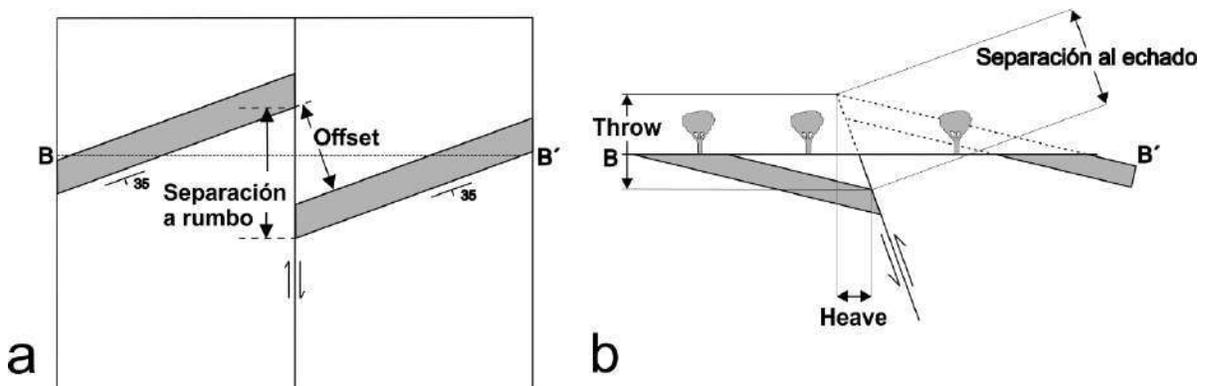
**Figura A4.** En la fotografía se observan tectoglifos escalonados acompañados de estrías, que son generadas por un deslizamiento oblicuo. Para una fácil identificación del sentido se debe pasar la mano por el plano, la dirección con la que se sienta menor oposición al deslizamiento indica la dirección de desplazamiento en este caso del bloque de techo. En el caso de la fotografía, el bloque observado es el de piso y el movimiento relativo fue normal (el bloque no presente bajó).

Separación estratigráfica: es la separación, medida en un plano horizontal, entre una capa desplazada y su correspondiente, medida de manera perpendicular al rumbo.

Separación a rumbo: distancia sobre un plano medida paralela al rumbo de la falla entre un horizonte estratigráfico en un lado de la falla y el mismo horizonte en el otro lado como se ve en la figura A5a. Se podría describir por su sentido de desplazamiento, como lateral derecha (dextral) o lateral izquierda (sinistral).

Separación al echado: es la distancia medida sobre el plano de falla entre un horizonte estratigráfico cortado por una falla y su equivalente desplazado, medida en una paralela al echado de dicha falla (ver figura A5b). Es la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuya componente horizontal se conoce como salto horizontal (*heave*) y su componente vertical llamado salto vertical (*throw*).

Nótese que el término separación se refiere a desplazamientos aparentes de algún horizonte de referencia, los términos lateral-derecho, lateral-izquierdo, normal e inverso son utilizados para describir separación, sea o no conocida la dirección real de movimiento. En los mapas geológicos la separación a rumbo se indica con flechas en sentidos opuestos. En muchos casos, el desplazamiento real conocido como desplazamiento neto no puede ser determinado o no existe una sola magnitud, por ejemplo, en todas las fallas rotacionales (Rowland *et al.*, 2007).



**Figura A5.-** a) Mapa geológico mostrando la diferencia entre offset y la separación a rumbo. B) Sección vertical mostrando los componentes de la separación al echado, el salto horizontal (*heave*), el salto vertical (*throw*) y la separación al echado

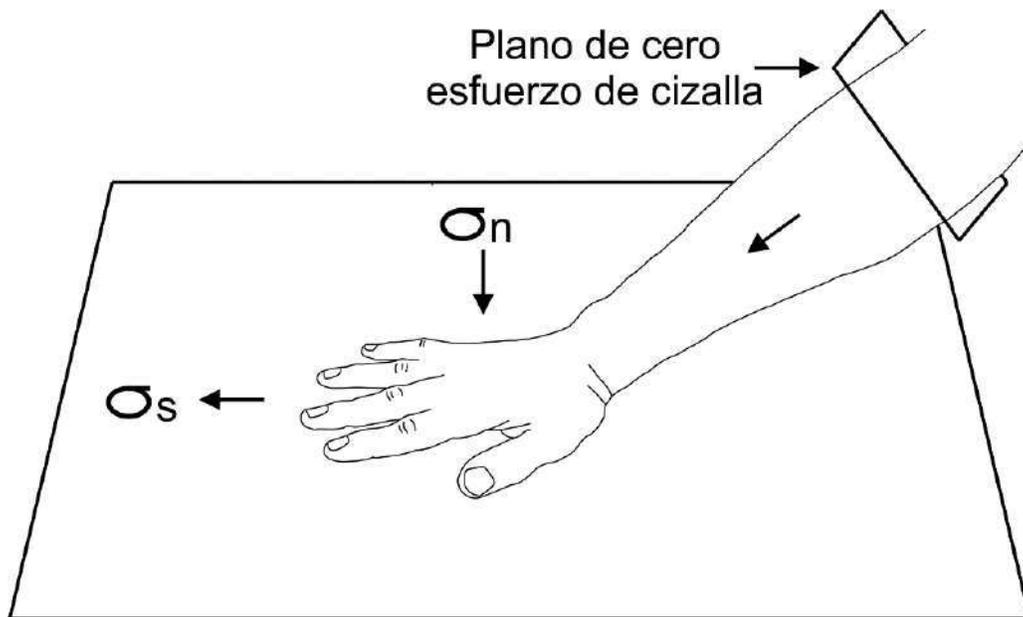
#### **XIV.1.2. Análisis estructural**

El geólogo estructural usa el análisis de fallas con el objetivo de buscar toda la información posible sobre la historia estructural de la región y para un mejor entendimiento de los procesos de deformación dentro de la corteza terrestre. Hay dos tipos de análisis de fallas, el análisis dinámico y el cinemático. El esfuerzo se mide en unidades de fuerza por unidad de área (Rowland *et al.*, 2007).

#### **XIV.1.3. Análisis dinámico**

Busca la reconstrucción de la orientación y magnitud del campo de esfuerzo que produjo una falla particular o un grupo de fallas. Se debe examinar la relación entre la orientación del esfuerzo y fallamiento. Para explicar los tres esfuerzos principales hay que imaginarse una mano empujando diagonalmente sobre la superficie de una tabla (figura A6). El esfuerzo que actúa sobre la superficie de la tabla puede ser dividido en dos componentes: El esfuerzo normal actuando perpendicularmente a la superficie y el esfuerzo de cizalla, actuando paralelamente. Se utiliza la letra griega  $\sigma$  (sigma) para simbolizar el esfuerzo. La letra griega  $t$  (tau) en ocasiones es usada para representar el esfuerzo de cizalla.

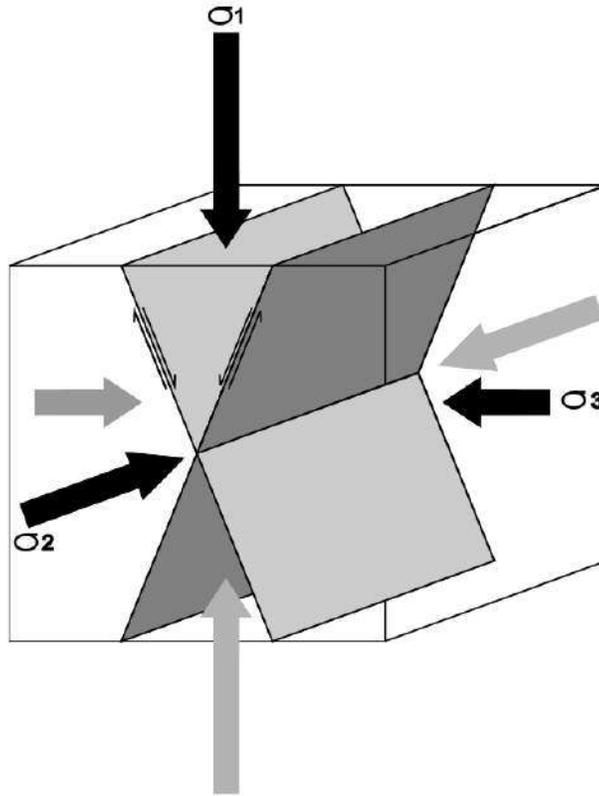
Además de los esfuerzos de normal y de cizalla actuando sobre la superficie de la tabla (figura A6), nos podemos imaginar fácilmente un plano perpendicular al brazo en el cual el esfuerzo de cizalla sería cero. Dentro de un cuerpo encontrado bajo un esfuerzo se encuentran siempre tres planos cuyo esfuerzo de cizalla es cero; estos tres esfuerzos normales son llamados esfuerzos principales (Rowland *et al.*, 2007).



**Figura A6.-** Para entender de una manera más visual los esfuerzos se utiliza una mano empujando diagonalmente sobre la superficie de una tabla, se divide el esfuerzo generado en esfuerzo normal perpendicular a la superficie y esfuerzo de cizalla paralelo a la superficie. El plano con esfuerzo de cizalla cero, experimenta solo un esfuerzo normal.

Por convención, los tres principales esfuerzos son nombrados  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  en orden de magnitud, donde  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Junto con estos se define el elipsoide de esfuerzos. El esfuerzo normal, que actúa en cualquier plano dentro de los esfuerzos de un cuerpo, no puede llegar a ser mayor a  $\sigma_1$ , ni menor que  $\sigma_3$ . Incluso en situaciones donde la corteza se extiende, tal como en los valles de rift, los tres esfuerzos principales son compresivos. Estudios de laboratorio en fracturación de rocas muestran que cuando un cuerpo isotrópico se fractura bajo aplicación de un esfuerzo, la superficie de fractura presenta una orientación previsible con respecto al elipsoide de esfuerzo (Rowland *et al.*, 2007).

Como se muestra en la figura A7, hay dos superficies de fractura predichas, o superficies de cizalla conjugadas, las cuales son perpendiculares al plano formado por  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ . Estas fracturas de cizalla forman un ángulo agudo en la dirección de  $\sigma_1$  y un ángulo obtuso en dirección de  $\sigma_3$ . El ángulo entre  $\sigma_1$  y cada una de las fracturas de cizalla es variable, y depende de la diferencia en magnitudes entre  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , y también en las propiedades materiales de la roca, pero siempre es menor de  $45^\circ$ .



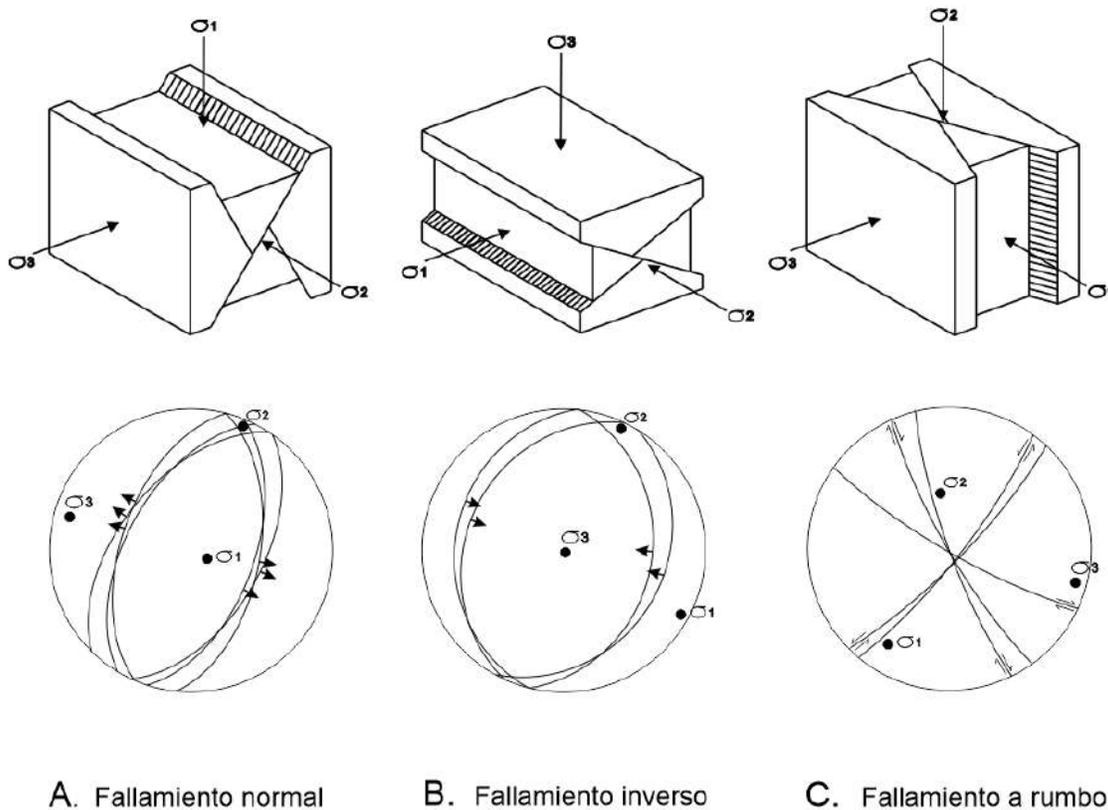
**Figura A7.** Relación entre los tres esfuerzos principales y las superficies conjugadas de cizalla

#### **XIV.1.4. Actitudes de falla y orientación del elipsoide de esfuerzo.**

Las ideas modernas sobre la relación entre fallas y el elipsoide de esfuerzo comenzaron con el trabajo del geólogo británico E.M. Anderson (1942). Él razonaba que ya que la superficie de la tierra es una interfase entre el aire y la roca debía de ser una superficie donde el esfuerzo de cizalla es cero y, por ende, un plano principal de esfuerzo. Por lo tanto, interpretó que en la corteza superficial un esfuerzo principal puede ser considerado vertical y los otros horizontales. Como primera aproximación, esta suposición ha probado ser válida para muchas fallas. Algunas excepciones son discutidas posteriormente. La suposición de Anderson de que un esfuerzo principal es siempre vertical, explica la existencia de tres clases de fallas: fallas normales ( $\sigma_1$  vertical), de deslizamiento a rumbo ( $\sigma_2$  vertical), y fallas inversas ( $\sigma_3$  vertical) (véase la figura A8). Esta suposición también permite reconstruir la orientación del elipsoide de esfuerzo responsable de generar una población de fallas. Esta figura también nos muestra estereogramas de poblaciones típicas de cada tipo de fallas.

Estos estereogramas están basados en observaciones y mediciones de campo. Los puntos sobre un plano de falla en el gran círculo indican el *rake* de las estrías. Para fallas normales y de cabalgadura, las flechas sobre el gran círculo apuntan en dirección del bloque de piso (Figura A8 a y b). Nótese, que en las fallas normales el *rake* de las estrías es cercano a  $90^\circ$  y las flechas apuntan hacia el perímetro de la red indicando que el bloque de techo baja (figura A8a)

Las fallas inversas también muestran el *rake* de las estrías cercano a  $90^\circ$ , pero las flechas apuntan hacia el centro de la red (figura A8b). Para las fallas con deslizamiento a rumbo, las estrías tienen un *rake* de ángulo muy bajo o muy alto (cercano a  $0^\circ$  o a  $180^\circ$ ), y una pareja de flechas que son usadas para el sentido de desplazamiento de cada falla (figura A8c), o sólo una flecha que indica el movimiento del bloque de techo.



**Figura A8.** Diagrama de bloques de los diferentes fallamientos mostrando la orientación de sus tres esfuerzos principales, complementado con estereogramas que muestran el fallamiento típico y su orientación de deslizamiento con respecto al sistema de fallas.

La población de fallas normales (figura A8a) ocurre en dos subpoblaciones; cada subpoblación presenta un echado abrupto en dirección contraria a la de la otra subpoblación. La población de las fallas de cabalgadura muestra rumbos paralelos y el echado es suave en direcciones opuestas (figura A8b). Por último, las fallas de deslizamiento a rumbo consisten en dos subpoblaciones de fallas subverticales con rumbos diferentes (figura A8c). Note que en cada caso  $\sigma_1$  bisecta el ángulo agudo entre las fallas.

Las dos subpoblaciones en cada caso representan un sistema conjugado de superficies de cizalla, análogas a las obtenidas en los estudios experimentales (ver figura A7). Para que dos subpoblaciones de fallas separadas y distintas se desarrollen en rocas isotrópicas (como se muestra en la figura A8) debe haber una diferencia cuantitativa entre  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  (Rowland *et al.*, 2007). Si dos de los esfuerzos principales tienen valores similares, las fallas resultantes podrían ocurrir en dos subpoblaciones no definidas. Por ejemplo, si  $\sigma_1$  es vertical, y tanto  $\sigma_2$  como  $\sigma_3$  son de aproximadamente misma magnitud, la población de fallas resultante podría consistir en fallas normales sin un rumbo preferencial.

Para reconstruir la orientación del elipsoide de esfuerzo de una población de fallas, se modela un plano de falla sobre la red estereográfica, con algún dato disponible del sentido de deslizamiento y la orientación de las estrías (como en la figura A8). Un esfuerzo principal es asumido como vertical y los otros horizontales. La línea de intersección entre las dos subpoblaciones de fallas indica la orientación de  $\sigma_2$ . La bisectriz del ángulo agudo entre los grupos es  $\sigma_1$ , y la del ángulo obtuso es  $\sigma_3$ .

#### **XIV.1.5. Complicaciones debido a planos preexistentes de debilidad**

Toda la discusión previa asume que las rocas que se deformaron no tienen planos de debilidad preexistentes. En la realidad esta suposición muchas veces es incorrecta. Los planos de debilidad, tales como estratificación o planos de clivaje, fracturas, o fallas preexistentes, funcionarán como superficies de cizalla preferente y provocarán que las fallas tengan diferentes actitudes a las esperadas por el modelo. Las fallas anteriores a

un esfuerzo o un sistema de esfuerzos son, en su mayoría, reactivadas durante nuevos campos de esfuerzos. Los movimientos en los planos de debilidad preexistentes son típicamente de deslizamiento oblicuo. Es posible que la orientación del elipsoide de esfuerzos no pueda determinarse en esos casos, a no ser que haya poblaciones con varias orientaciones de falla con estrías.

#### **XIV.1.6. Campos de esfuerzos no-uniformes**

Aunque las suposiciones de Anderson sobre el fallamiento y el elipsoide de esfuerzo han probado ser de gran utilidad, ahora se sabe que no siempre son válidas. Por ejemplo, en vez de dos grupos de fallas conjugadas predichas por Anderson, en una roca isotrópica puede formarse una red rombohédrica con cuatro grupos de fallas (Aydin & Reches, 1982). En el caso de fallas de cabalgadura y de rumbo, usualmente se desarrolla sólo uno de los dos grupos predichos por el modelo. Además, las teorías de Anderson no explican la formación de fallas normales de bajo ángulo o fallas inversas de alto ángulo ni la variación de los esfuerzos que puede presentarse a profundidad. A pesar de estas limitaciones, sus teorías de fallamiento permanecen como las bases de todo análisis dinámico.

#### **XIV.1.7. Análisis cinemático**

El análisis cinemático es una técnica gráfica para analizar información de fallas (Marrett y Allmendinger, 1990). Esto permite al geólogo estructural caracterizar cuantitativamente la deformación general o el patrón de movimiento resultante de movimientos acumulados de las fallas de una región y las direcciones generales de acortamiento o extensión. A diferencia del análisis dinámico, el cinemático no busca determinar la orientación y la magnitud de los esfuerzos responsables de la deformación. Al igual que con el análisis dinámico, los datos básicos necesarios para el análisis cinemático son: la actitud del plano falla, el *rake* de la estría y su sentido de movimiento. El análisis cinemático es útil no solo para caracterizar los patrones de deformación de un área, sino también para probar la compatibilidad cinemática de un grupo de fallas, es decir, la posibilidad de que se hayan producido al mismo tiempo por variaciones locales del campo de esfuerzos. En algunas regiones las fallas con diferente

orientación y sentido de movimiento, tales como de deslizamiento normal y a rumbo, pudieron formarse simultáneamente debido al proceso de extensión regional. Estas fallas se dice que son cinemáticamente compatibles. El análisis cinemático de tales grupos de fallas debería dar un único eje de extensión o acortamiento. Si en dos grupos de fallas ambos tipos de ejes son diferentes, éstos no serían cinemáticamente compatibles pudiendo representar diferentes eventos de deformación.

#### **XIV.1.8. Manejo estadístico de datos**

Según Allmendinger *et al.* (1989) para el procesamiento de datos a partir de poblaciones de fallas se tienen las mismas suposiciones básicas: 1) Los vectores de deslizamiento son paralelos al esfuerzo de cizalla determinado en las fallas (implicando que las heterogeneidades locales que pudieran inhibir el deslizamiento libre de un plano de falla, incluidas interacciones con otros planos de falla, son relativamente insignificantes); 2) los datos reflejan un campo de esfuerzo uniforme (tanto espacial como temporalmente), lo cual requiere que la región no haya experimentado una deformación posterior al deslizamiento que pudiera haber alterado la orientación de las fallas.

#### **XIV.1.9. Interpretación de estereogramas**

Estereograma de contorno de polos de fallas:

El diagrama de contornos es un tipo de análisis de los datos estructurales que se basa en darle mayor peso a los datos que están próximos a otros. Sirve para visualizar agrupaciones de datos, su importancia relativa, su dispersión y la posición de un valor promedio para un grupo determinado de datos. A diferencia del diagrama de rosas se puede obtener un valor medio tanto del rumbo como del echado de los datos graficados.

Diagrama de rosas:

También llamado de roseta, presenta como ventaja permitir visualizar de manera fácil las estructuras según sus grupos de rumbos. Cuando se usa un diagrama asimétrico nos da indicación del cuadrante al que buzan las estructuras, pero no del valor de los echados. Esta deficiencia es uno de los principales aspectos en contra del uso de este

diagrama. Además, el diagrama de rosetas es repetitivo, porque esta información ya se puede deducir de los diagramas de polos. Sin embargo, está diseñado para mostrar con facilidad grupos de rumbos ya que muestra la cantidad de mediciones que caen en ciertos rangos que se pueden establecer, aunque generalmente se usan subdivisiones cada  $10^\circ$ . Aquí se utilizó el tipo asimétrico ya que nos indica las direcciones de los echados los cuales ocurren  $90^\circ$  hacia la derecha de los rumbos (regla de la mano derecha).

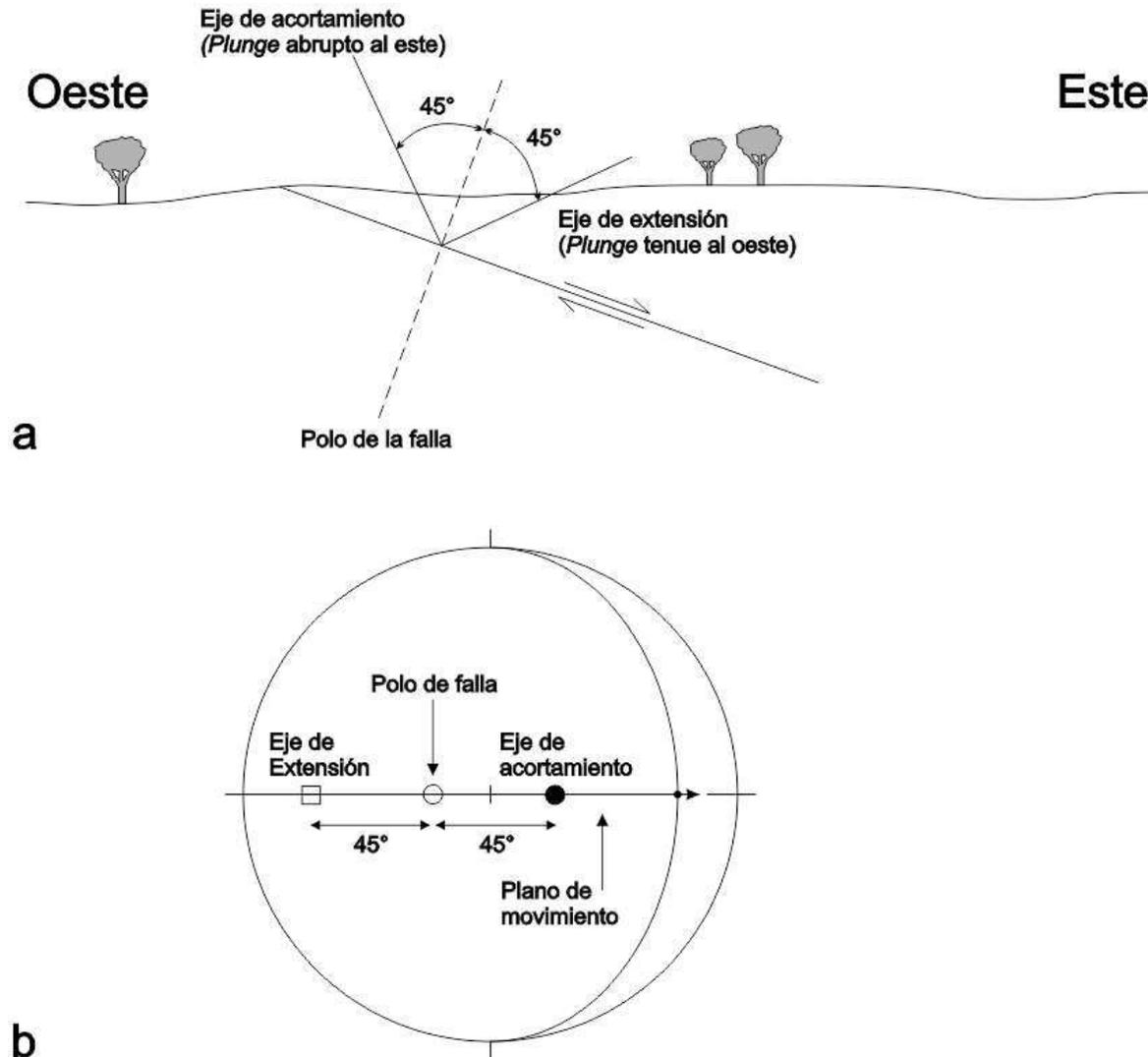
#### Estereograma de planos con dirección de deslizamiento:

Para representar la dirección de desplazamiento de los bloques de la información de campo de fallas con estrías se generó un estereograma de planos de falla con flechas indicativas de la dirección de deslizamiento del bloque de techo. Estas flechas se grafican sobre el plano de falla a partir de la línea que representa la estría y su punta indica la dirección del movimiento. Las estrías que se grafican muy cercanas al gran círculo representan fallas de desplazamiento lateral. Cuando están cercanas a  $90^\circ$  del rumbo son fallas con deslizamiento al echado y el resto representan fallas oblicuas. Cuando las flechas apuntan hacia el gran círculo indican un ambiente extensional y al apuntar al centro uno compresivo.

#### Estereograma de ejes de extensión y acortamiento:

Es importante para el análisis cinemático de un grupo de fallas. Por ejemplo, si se quiere verificar si dos grupos de fallas son cinemáticamente compatibles, es decir, que pueden ser producto de un mismo episodio de deformación o, en el caso de ser incompatibles, que son el resultado de distintos episodios. Este método también permite determinar la dirección de los ejes de extensión y acortamiento que dieron lugar a un grupo de fallas o a varios conjuntos. Para graficar los ejes cinemáticos, una vez graficado el plano de falla y su estría, se traza un plano que pasa por el punto de la estría y el polo de la falla, el cual es denominado plano de movimiento. Sobre ese plano y a  $45^\circ$  del punto del polo se grafican los dos ejes (Figura A9). La flecha de movimiento siempre apunta hacia el eje de extensión y en sentido contrario al eje de acortamiento (Figura A9). Para determinar que dos poblaciones de fallas son cinemáticamente compatibles sólo es

necesario que coincida uno de sus grupos de ejes ya sea los de extensión o los de acortamiento. Para comprobar la simultaneidad de dos poblaciones también es muy importante observar en el campo si no existe una relación de corte sistemática entre las dos poblaciones de fallas, lo que invalidaría la posibilidad de que se formaran simultáneamente.

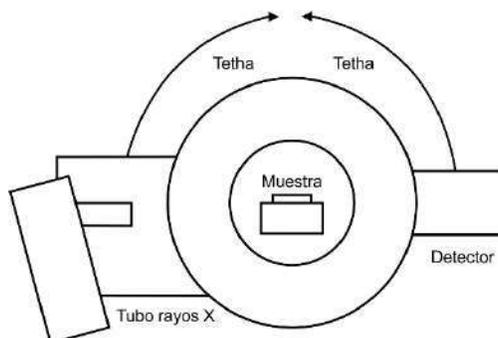


**Figura A9.** a) sección transversal mostrando los ejes de extensión y acortamiento, los cuales son perpendiculares el uno al otro y estos a 45° del polo de la falla. b) Estereograma que muestra el plano de movimiento y la proyección de los ejes de extensión y acortamiento.

#### XIV.1.10. Difracción De Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica no destructiva usada para identificación de minerales y materiales cristalinos, basándose en que los cristales se definen mediante planos regulares y repetitivos que forman una red cristalina.

Los equipos de DRX (figura A10) consisten en un tubo sellado al vacío en donde una corriente de alto voltaje corre por un filamento de cobre dentro del tubo, este voltaje acelera los electrones que al incidir en el objetivo producen los rayos x. Cuando un haz enfocado de rayos X interactúa con los planos regulares y repetitivos de la red cristalina los rayos se difractan de manera diferente en cada mineral, dependiendo de cómo los átomos están ordenados. El conjunto característico de distancias entre planos de átomos generado en un escaneo de rayos x proporciona un patrón de difracción único para cada mineral que se utiliza para la identificación (Flhor, 1997).



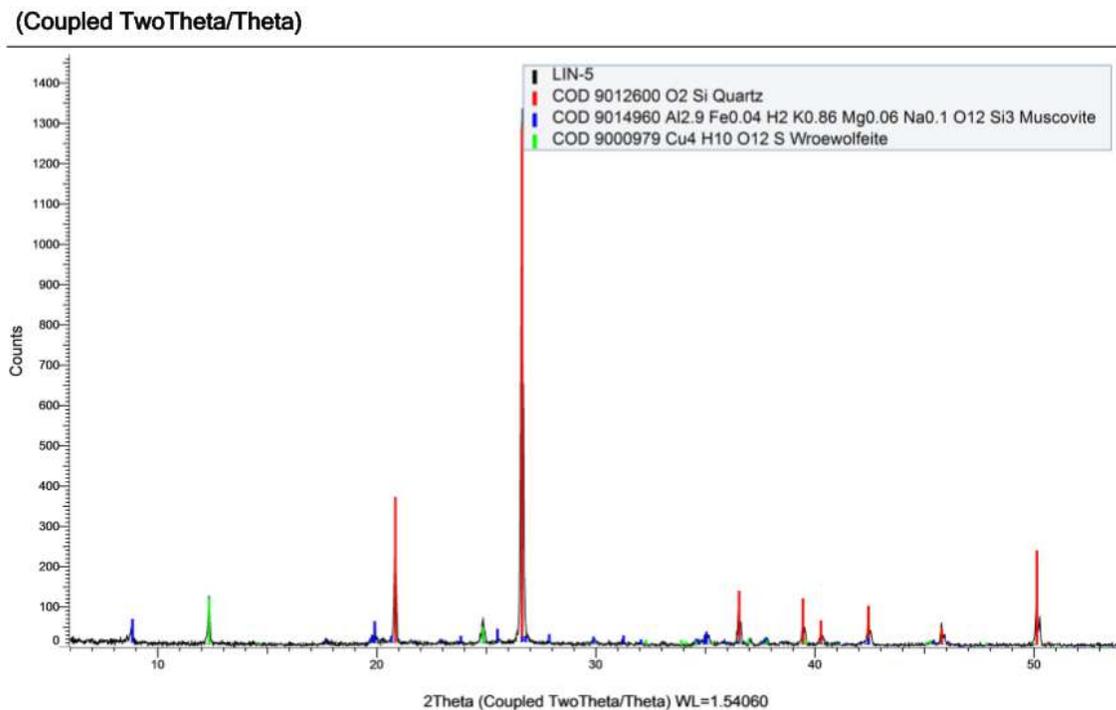
**Figura A10.** Ejemplo simplificado de una configuración posible del tubo de rayos X, del detector y la muestra durante un escaneo. En esta configuración, el tubo y detector se mueven conjuntamente en un ángulo theta ( $\theta$ ) y la muestra se mantiene estacionaria.

Los fundamentos para este análisis se basan en la ecuación:

$$\text{Ley de Bragg: } 2d_{hkl}\sin\theta = \lambda.$$

Siendo  $d_{hkl}$  la distancia entre planos (hkl) de la red cristalina,  $\theta$  es el ángulo de Bragg y  $\lambda$  la longitud de onda de los rayos X. Se refiere a que un material policristalino o en

forma de polvo, al ser irradiado con rayos X, el ángulo formado entre el haz difractado y el haz incidente es  $2\theta$ . Su difractograma (ejemplo en figura A11) consiste en una serie de picos donde cada uno corresponde a los rayos difractados por una familia específica de planos (hkl) en una muestra. En el difractómetro, el detector de rayos X registra los ángulos  $2\theta$  a los cuales el haz es difractado, generando un patrón de difracción particular.



**Figura A11.** Ejemplo de un difractograma de rayos x a partir del polvo de una argilista (ver capítulo XIV.1.11.2) que muestra presencia de cuarzo, muscovita y wroewolfeita. La gráfica muestra el número de veces que se contaron posiciones donde un haz de rayos X ha sido difractado por una red cristalina en un ángulo  $2\theta$ , este patrón puede ser variado dependiendo de la complejidad de fases cristalinas o minerales presentes en cada muestra. El eje de abscisas (x) es el valor de  $2\theta$ , mientras que las ordenadas (y) son conteos por segundo.

#### **XIV.1.11. Alteración Hidrotermal De La Región:**

##### **XIV.1.11.1. Arcillas de alteración**

Descripción de las arcillas de alteración de la región según (Cruz-Páez, 2008):

Alunita: suele ocurrir en vetillas de color blanco (1 mm – 5 cm) en forma masiva, o cristales de coloración ligeramente rosada a café claro relleno de fracturas y cavidades en zonas con fuerte silicificación (Figura 3).

Dickita: se presenta en forma microcristalina de color blanco a ligeramente rosado o café claro. Asociada a alunita y/o caolinita. Difícil de identificar en campo; usualmente encontrada en rocas con moderada silicificación.

Caolinita: en muestra de mano se presenta como textura arcillosa comúnmente en forma masiva de color blanco, asociada a dickita, alunita, illita y esmectita.

Illita, illita-esmectita: de hábito masivo muy fino, en ocasiones forma hojuelas finas color blanco a café claro, ligeramente ceroso. Común en rocas sin silicificación.

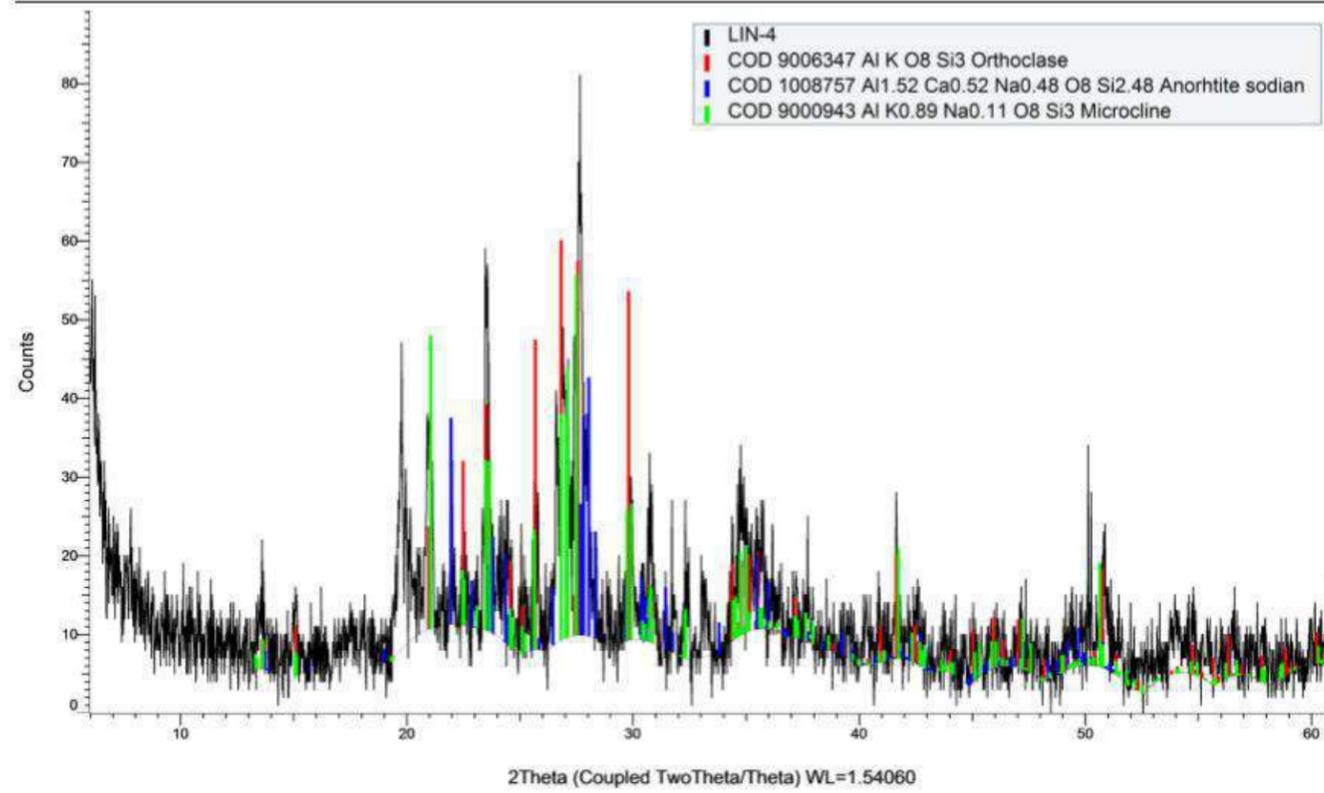
##### **XIV.1.11.2. Argilisita**

En ocasiones la textura y mineralogía original de las rocas de composición dacítica de la región, sufren un proceso hidrotermal de baja temperatura, que forma una roca denominada “argilisita” (Zharikov *et al.*, 2007). Esta es una roca metasomática, resultante del remplazamiento de la roca original por minerales arcillosos (esmectita, illita-esmectita, clorita-esmectita, grupo de la caolinita, alunita e hidrómicas), también puede presentar minerales silíceos, carbonatados, sulfuros de hierro y jarosita.

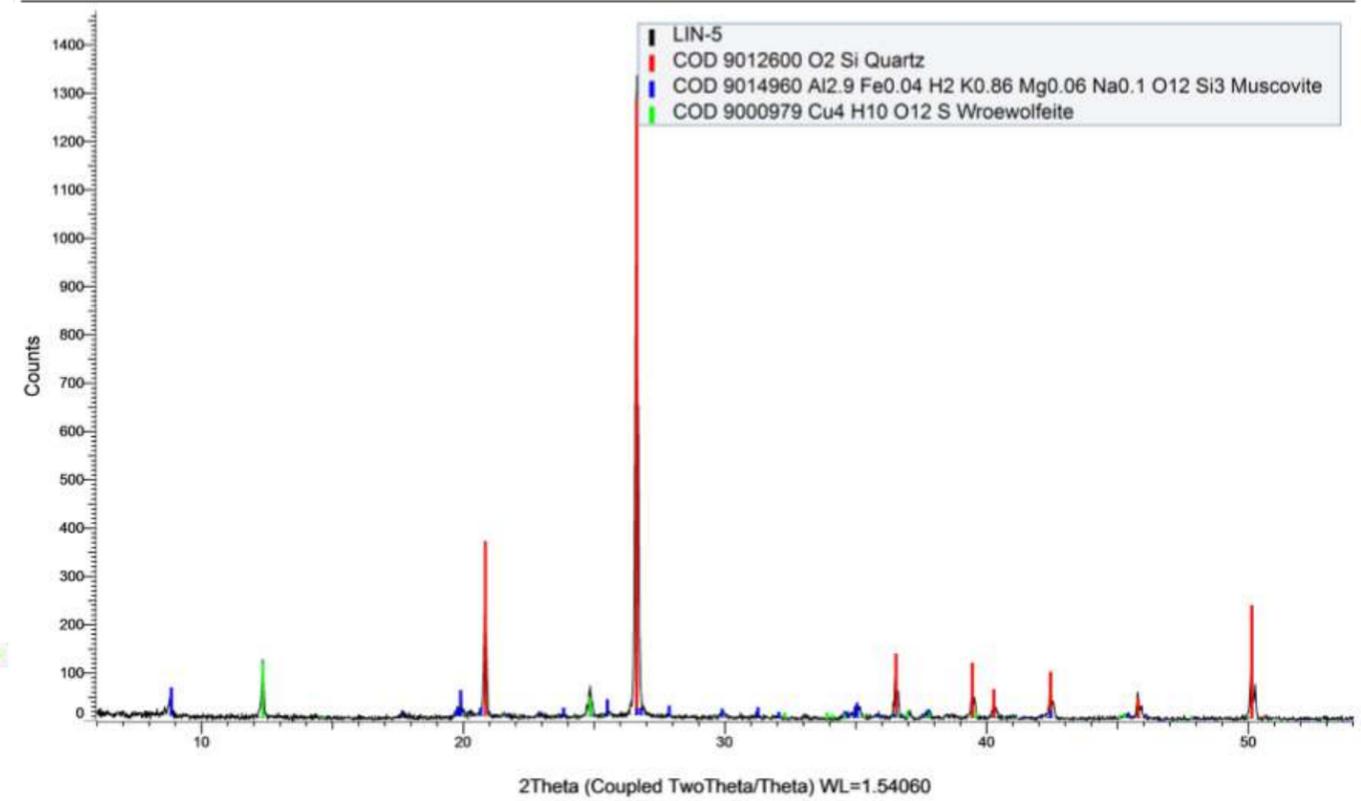
A las rocas del proyecto con este conjunto de alteraciones, se les sugiere optar por este término metamórfico, dado que coinciden en formación y productos.

## XIV.2. Anexo 2: Difractogramas

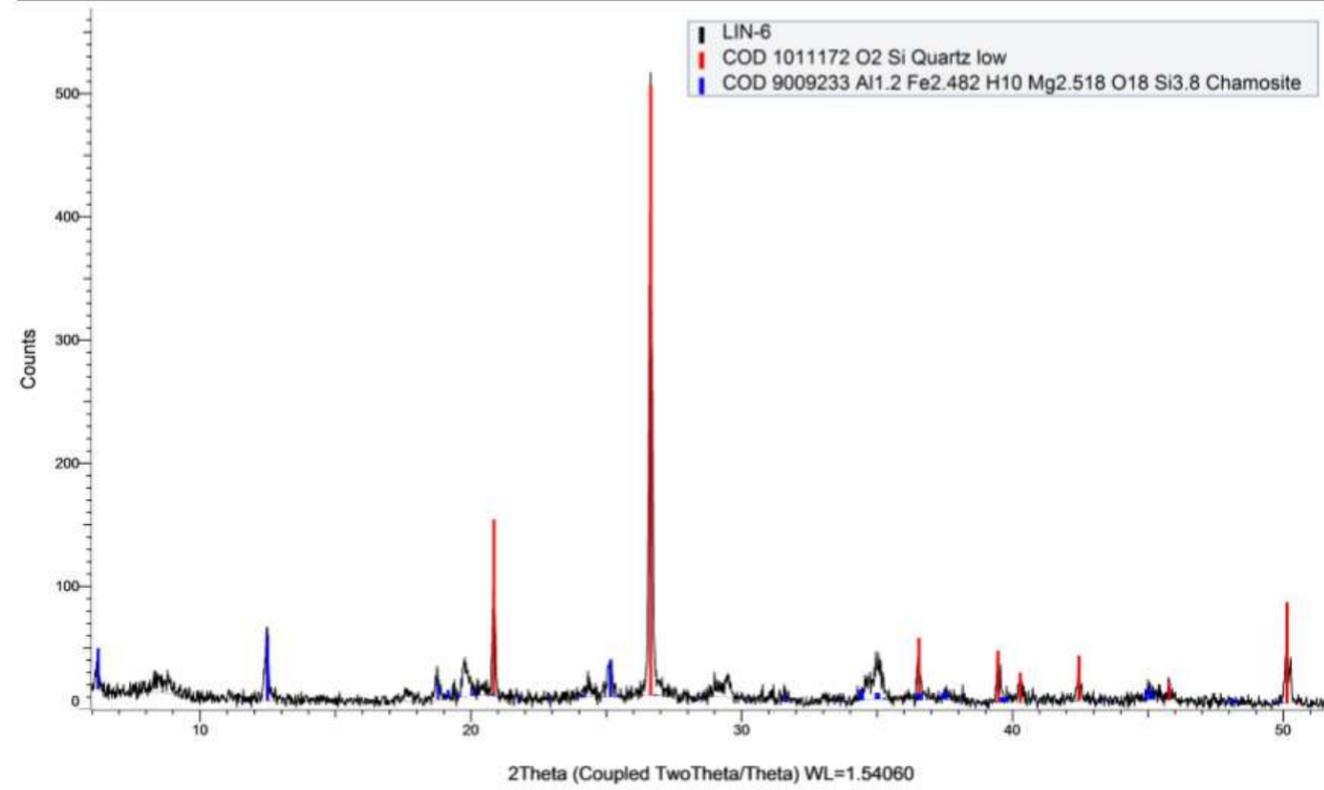
(Coupled TwoTheta/Theta)



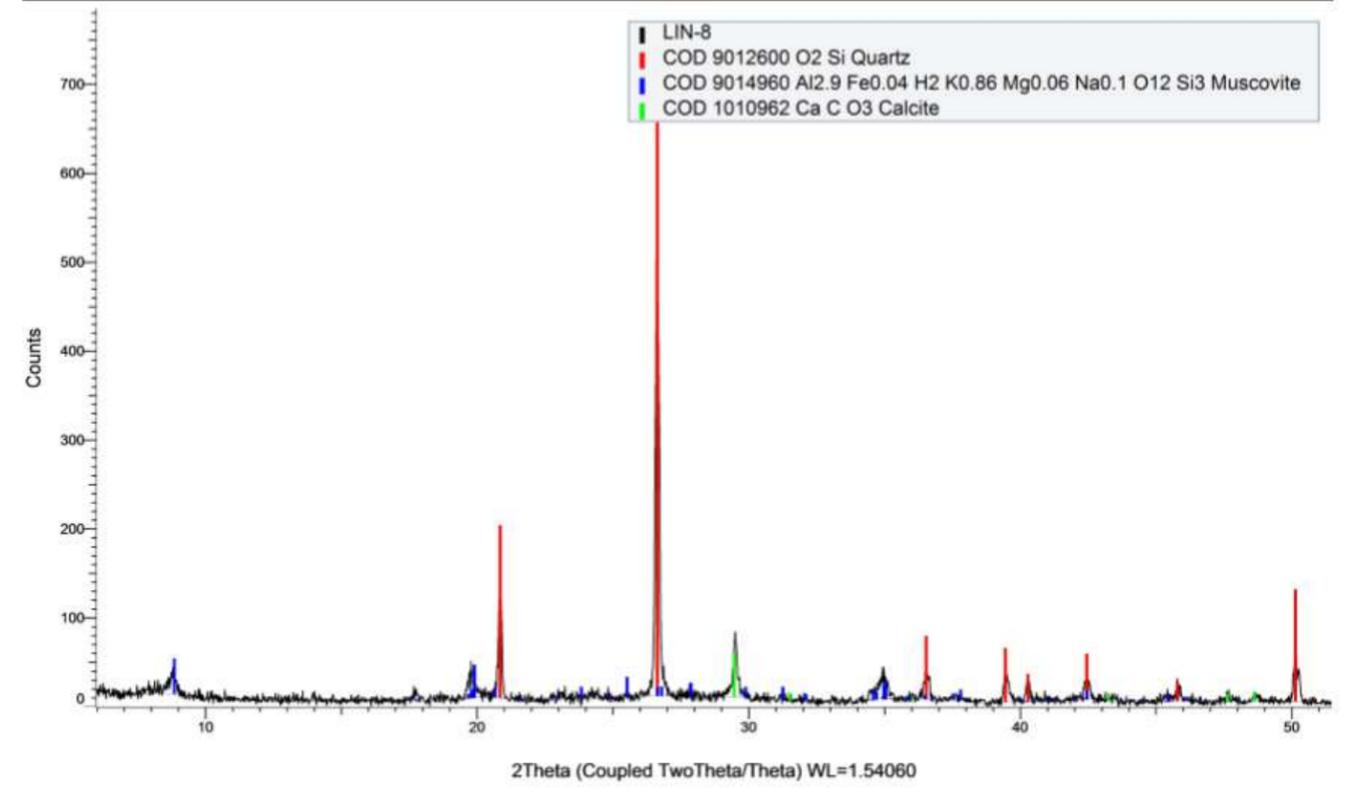
(Coupled TwoTheta/Theta)



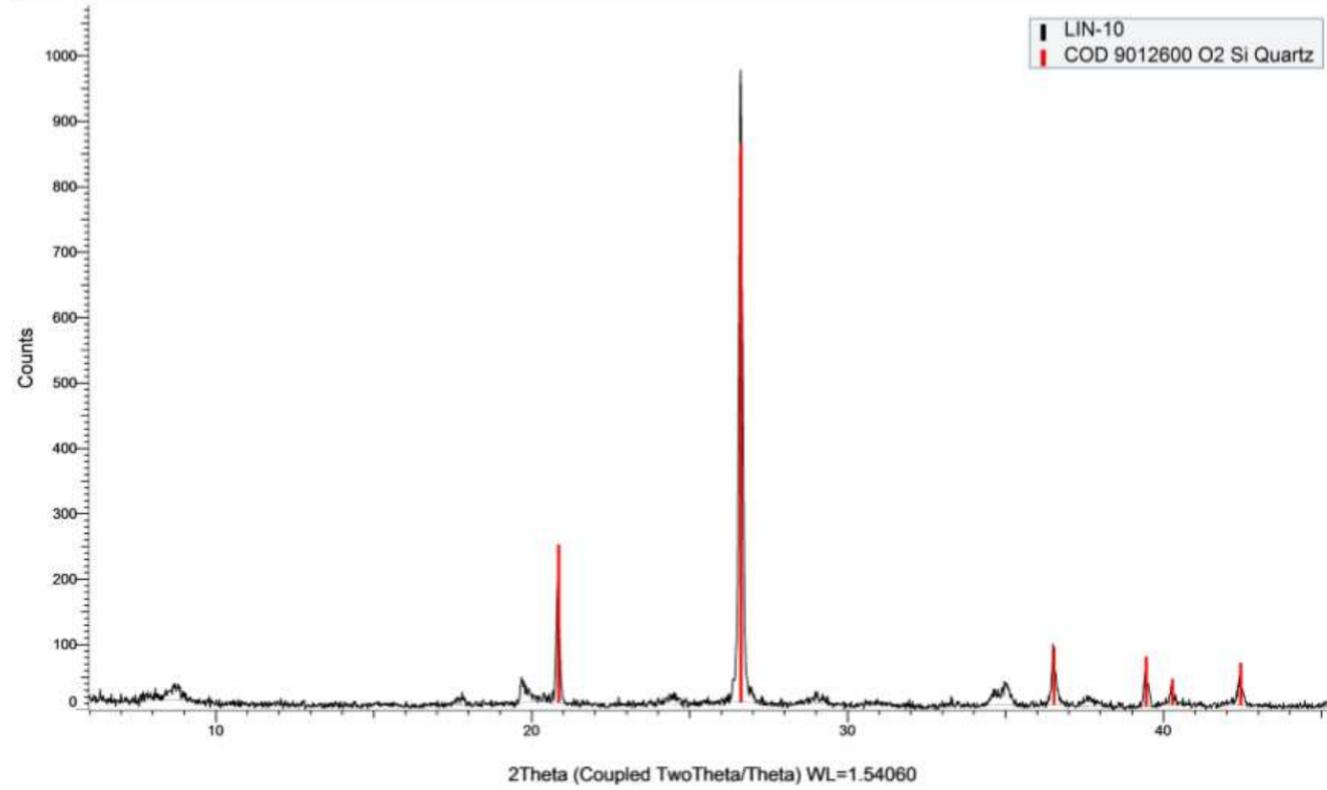
(Coupled TwoTheta/Theta)



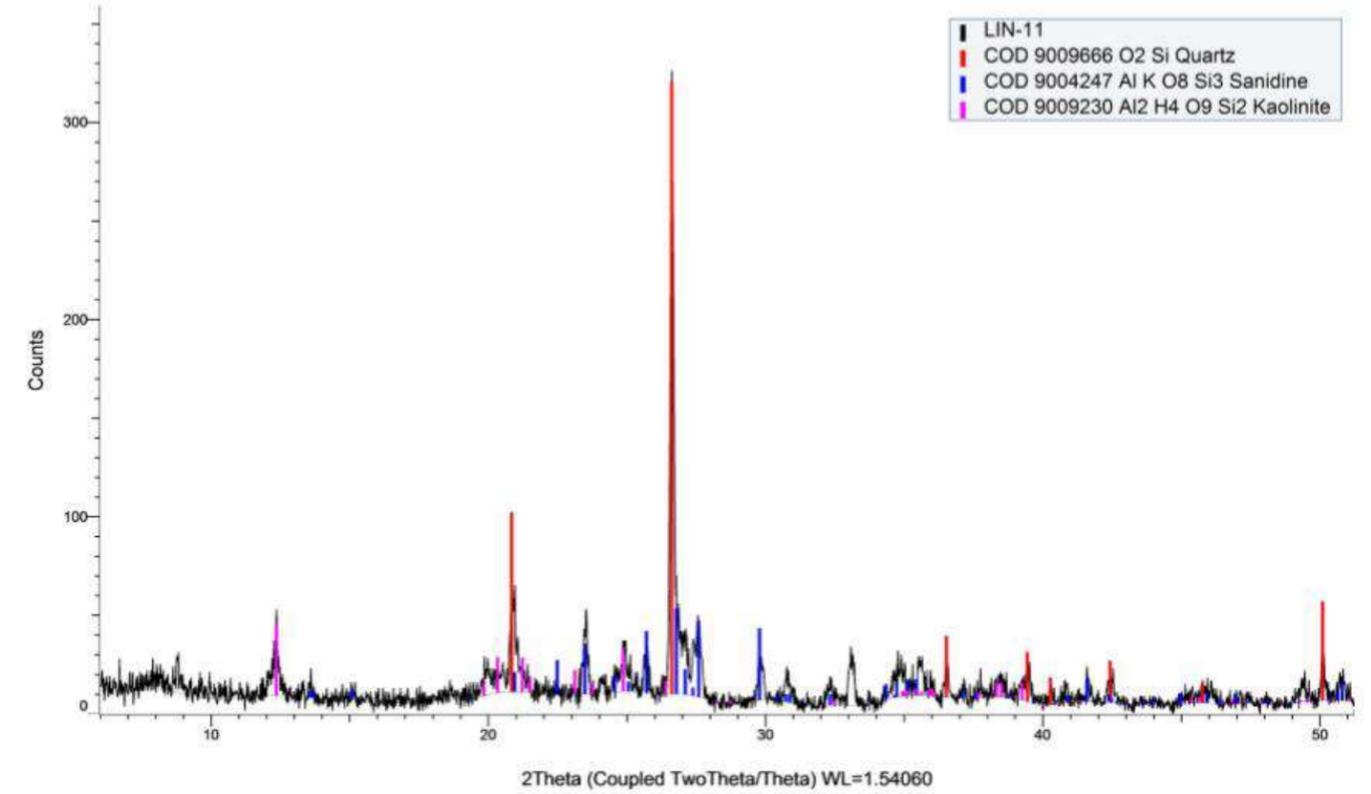
(Coupled TwoTheta/Theta)



(Coupled TwoTheta/Theta)



(Coupled TwoTheta/Theta)



**XIV.3. Anexo 3: Tablas petrográficas de la mina la India**

Clave	Coordenada X	Coordenada Y	Roca	Textura	Fenocristales						Minerales de alteración	Tipo de alteración	Observaciones
					Pl	FA	Qz	Px	Anf	Mic			
LI-3	707212	3177332	Toba de lapilli	De cristales			x		x		caolinita/dickita>illita/esmectita>qz>hematita/jarosita	Argílica avanzada	Vetillas de cuarzo
LI-4	707447	3177296	Dacita	Porfídica			x				Alunita>clorita>qz>hematita	Argílica avanzada	
LI-5	706771	3177459	Toba de lapilli	De cristales	x	x					Qz>illita>muscovita>hematita	Argílica	Contiene fragmentos de granito
LI-6	706453	3177238	Toba de cenizas gruesa	Porfídica							Esmectita>calcita>clorita>pirita	Argílica	
LI-7	706983	3178748	Microdiorita Intrusivo	Microporfídica	x		x			x	Caolinita/dickita>>hematita	Argílica	
LI-8	706825	3178932	Toba de lapilli	De cristales			x				Caolinita/dickita>cuarzo>hematita	Argílica avanzada	
LI-9	706784	3178685	Microdiorita Intrusivo	Microporfídica	x			x	x	x	Caolinita/dickita>clorita	Propilítica	Plagioclasas tipo andesina
LI-10	706749	3178973	Argilisita	Porfídica	x		x				Caolinita/dickita>qz>hematita	Argílica	
LI-11	706861	3178812	Argilisita	Porfídica	x						Caolinita/dickita>illita/esmectita>pirita>hematita	Argílica	Alteración total de textura original
LI-12	709423	3178113	Dacita	Porfídica	x						Caolinita/dickita>cuarzo>hematita/jarosita	Argílica avanzada	
LI-13	709571	3178125	Dacita	Porfídica	x						Caolinita/dickita>hematita>cuarzo	Argílica avanzada	
LI-19	709014	3178170	Andesita	Microporfídica	x		x				Caolinita/dickita>clorita>cuarzo>pirita>hematita	Propilítica	
LI-30	709662	3178221	Andesita	Microporfídica	x						Clorita>epidota>hematita/jarosita	Propilítica	Plagioclasas tipo andesina
LI-34	708995	3178179	Toba de lapilli	De cristales	x				x		Caolinita/dickita>hematita>cuarzo>pirita	Argílica avanzada	
LI-47	709044	3177787	Toba de lapilli	De cristales			x				Hematita>caolinita/dickita	Argílica	Fragmentos de granito

**Tabla 1.** Tabla petrográfica de la mina la India. El prefijo LI es por muestras recolectadas en campo en La India Este, *North Zone*, El Realito y Los Tubos.

Clave	Clave de barrenación	Profundidad de Barrenación	Roca	Textura	Fenocristales						Minerales de alteración	Tipo de alteración	Observaciones	
					Pl	FA	Qz	Px	Anf	Mic				
LIN-1	INEC-17-025	28 m	Toba de cenizas gruesa	De cristales	x						x	Illita-esmectita>illita>pirita>qz>caolinita/dickita>jarosita	Argílica	Vetilleos de sílice y hematita
LIN-2	INM-15-916	192.80 m	Argilisita	Porfídica	x		x					Caolinita/dickita>clorita>illita>pirita	Argílica	Alteración total de textura original
LIN-3	INEC-17-025	65.80 m	Argilisita	Porfídica								Caolinita/dickita>cuarzo>pirita	Argílica avanzada	Alteración total de textura original
LIN-4	INM-15-911	74 m	Dacita	Porfídica	x		x		x			Illita-esmectita>hematita>pirita	Argílica	Matriz de Pl microcristalinas
LIN-5	INM-17-1267	98.80 m	Argilisita	Porfídica								Cuarzo>caolinita/dickita>alunita>pirita>illita	Argílica avanzada	Weewolfeita en DRX
LIN-6	INEC-17-025	62 m	Argilisita	Porfídica	x		x				x	Clunita>caolinita/dickita>cuarzo>clorita>pirita>calcita	Argílica avanzada	Chamosita en DRX
LIN-7	INM-17-1266	122 m	Argilisita	Porfídica	x							Caolinita/dickita>cuarzo>pirita	Argílica avanzada	Alteración total de textura original
LIN-8	INER-16-005	137 m	Riolita	Eutaxítica	x		x				x	Caolinita/dickita>qz>calcita>alunita>ortoclasa	Argílica avanzada	Con Biotita, Muscovita y flogopita
LIN-9	INEC-17-62	63.30 m	Argilisita	Porfídica								Caolinita/dickita>qz>calcita>alunitaa>pirita	Argílica avanzada	Alteración total de textura original
LIN-10	INER-16-006	112.90 m	Toba de lapilli	De cristales	x		x				x	Caolinita/dickita>illita/esmectita>illita>pirita	Argílica	
LIN-11	INER-17-121	31.70 m	Dacita	Porfídica	x		x		x		x	Caolinita/dickita>clorita>sanidina>pirita	Argílica	En DRX presenta Sanidina y Caolinita

**Tabla 2.** Tabla petrográfica de la mina la India. Los prefijos LIN son muestras de barrenos del proyecto El Realito y de los tajos *Main Zone* y El Cochi.