

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
UNAN-MANAGUA  
RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA  
INGENIERÍA GEOLÓGICA



TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
**INGENIERAS GEÓLOGAS**

TEMA:

**“CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA-ESTRUCTURAL CON FINES DE EXPLORACIÓN  
GEOTÉRMICA EN LA ZONA OESTE DE LA CONCESIÓN SAN JACINTO-TIZATE”**

PRESENTADO POR:

**Br. Sachel Marcela Martínez López**  
**Br. Scarleth Auxiliadora Murillo Guzmán**

TUTOR:

**MSc. Guillermo Chávez**

ASESORA:

**MSc. Magdalena Pérez**

Managua, Septiembre 2015

---

### Dedicatoria

A mis padres, Sara Lucía López Salgado y Miguel Ángel Martínez Buitrago, que con su incansable cariño y voluntad me apoyaron incondicionalmente en todo momento, por ser el pilar más importante y ser el impulso para culminar con éxito esta etapa de mi vida, por su esfuerzo para darme un futuro mejor.

A mi enorme y bella familia que han velado por mí durante este arduo camino para convertirme en una mujer profesional, por su paciencia, hospitalidad y voluntad de ayudarme en todos los sentidos y aspectos.

A mi abuelita Mer, por siempre encomendar a Dios este trabajo y estar todo el tiempo pendiente de mí. Gracias infinitas por todo.

Sachel Marcela Martínez López.

## **DEDICATORIA**

*A mi Bendición más grande **María Auxiliadora Guzmán López**, ejemplo de amor, dedicación y fuerza, mi lugar seguro, el pilar de mi vida. Gracias MA, gracias infinitas por estar conmigo siempre y gracias a Dios por haberla puesto en mi destino.*

*A mi abuelita **Dionisia López Blass** (Q.E.P.D) por haber creado una familia tan unida y tan querida, porque es inolvidable, gracias por tanto amor.*

*A mi familia por su apoyo incondicional durante toda mi vida, mi abuelo Pablo Guzmán Mercado, mis tías: Rosa, Valeria, Maritza, mi tío Elvin, todos Guzmán López y a mis queridos primos y primas con quienes he tenido la dicha de compartir tanto.*

*Esto es para ustedes, cariñosamente*

***Scarleth Auxiliadora Murillo Guzmán***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por protegernos durante todo el camino, por darnos fuerzas para continuar y superar los obstáculos, retos y dificultades a lo largo de nuestras vidas.

A nuestras familias que nos han apoyado y siempre estuvieron pendientes de nosotras, acompañando todo el proceso para culminar una etapa importante de nuestras vidas.

A la empresa Polaris Energy Nicaragua S.A, por la confianza en nosotras al darnos la oportunidad de realizar este trabajo en conjunto con ellos, por el apoyo total en el desarrollo y presentación de nuestro trabajo. A todos y cada uno de sus colaboradores que siempre estuvieron disponibles para resolver cualquier duda y nos hicieron parte de su equipo de trabajo.

A nuestro tutor MSc. Guillermo Chávez Ardanza por la experiencia compartida, por sus comentarios, observaciones, tiempo y paciencia durante este proceso.

A nuestra asesora MSc. Magdalena Pérez López por su confianza hacia nosotras sin conocernos, por todos sus conocimientos compartidos, por cada página revisada de nuestro trabajo, por abrir las puertas de su casa y atendernos todas las veces que lo necesitamos, por sus valiosos consejos y cordialidad hacia nosotras.

Al señor Francisco Hernández, colaborador de PENSA, por su valioso aporte y paciencia durante nuestra etapa de campo, sin el cual la realización de esta, no habría sido posible.

A los miembros del jurado, quienes han estado a cargo de la revisión de nuestro trabajo, gracias por su tiempo, disponibilidad, comentarios y observaciones.

Una mención especial al profesor Mario Chávez, maestro de generaciones, gracias por permitirnos ocupar parte de su tiempo para realizar todas las consultas que surgieron, gracias por sus aportes, sugerencias y recomendaciones.

A la coordinación de la carrera por la disponibilidad de equipos cada vez que fue necesario.

Queremos agradecer especialmente al profesor Francisco Espinoza por su paciencia, tiempo y dedicación, gracias por su guía y valiosos consejos, por compartir conocimientos con nosotras y ayudarnos a mejorar nuestro trabajo, gracias porque sabemos que hemos sido un poco insistentes para realizar consultas y a pesar de estar ocupado, siempre tuvo la sutileza de atendernos.

A nuestros colegas y amigos con quienes hemos compartido los últimos años, superando barreras y obstáculos en distintos ámbitos; a ustedes: Karina Benicia Romero Mendoza y Dimas de Jesús Ruiz, gracias por todas las experiencias compartidas y porque a pesar de la distancia estamos más unidos que nunca.

A Víctor González Vílchez por su compañerismo y generosidad desinteresada al compartir oportunidades con nosotras.

A todas y cada una de las personas que consciente o inconscientemente contribuyeron a la realización de este trabajo.

¡¡¡Gracias, muchísimas gracias a TODOS....!!!

## **RESUMEN**

El área de estudio se localiza dentro de la Cordillera Volcánica de Los Maribios, en el Complejo Volcánico Telica. La evolución de este Complejo está definida por sucesivas fases de actividad vulcano-tectónica que han sido acompañadas por un progresivo desplazamiento del centro de emisión hacia el oeste, siendo su actual centro eruptivo el Volcán Telica.

Geológicamente, en el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate, se definieron seis unidades litológicas principales: Unidad I - Andesita, Unidad II - Andesita Basáltica, Unidad III - Depósitos Piroclásticos, Unidad IV - Basalto, Unidad V - Andesita-Basáltica del Volcán Santa Clara y Unidad VI - Depósitos Coluviales.

Estructuralmente se establecieron cuatro fases de deformación representadas por fallas y fracturas con orientaciones Noroeste-Sureste, Norte-Sur, Noreste-Suroeste y Este-Oeste. El análisis de la geometría de estas estructuras geológicas permitió conocer que las fases de deformación localizadas en el área de estudio, actúan en sentido horario.

Geotermalmente se delimitaron tres zonas de alteración hidrotermal: El Carol-Agua Fría, El Ñajo y El Ojochal, las cuales se caracterizan por la presencia de manifestaciones superficiales que incluyen manantiales termales, fumarolas, suelos calientes, lodos hirvientes y alteración hidrotermal del suelo y rocas. Estas manifestaciones presentan temperaturas superficiales que oscilan entre 65.5°C y 100°C.

Las características geológicas y estructurales del sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate, así como las manifestaciones termales superficiales identificadas y caracterizadas, permitieron la realización del Mapa Geológico-Estructural y el Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial, ambos a escala 1: 20 000.

## ÍNDICE

### RESUMEN

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 LOCALIZACIÓN</b> .....	2
<b>1.2 JUSTIFICACIÓN</b> .....	4
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>1.4 METODOLOGÍA</b> .....	6
1.4.1 ETAPA DE GABINETE.....	6
1.4.2 ETAPA DE CAMPO.....	7
1.4.3 ETAPA DE INTERPRETACIÓN DE DATOS .....	8
1.4.4 ETAPA FINAL .....	9
<b>CAPÍTULO II: MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO DE NICARAGUA</b> .....	10
<b>2.1 TECTÓNICA DE NICARAGUA Y AMÉRICA CENTRAL</b> .....	10
<b>2.2 ARCO VOLCÁNICO DE NICARAGUA</b> .....	11
<b>2.3 GEOLOGÍA REGIONAL DE NICARAGUA</b> .....	12
<b>CAPÍTULO III: GEOLOGÍA DEL ÁREA</b> .....	18
<b>3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS</b> .....	20
3.1.1 Unidad I - Andesita .....	20

3.1.2 Unidad II - Andesita-Basáltica .....	31
3.1.3 Unidad III - Depósitos Piroclásticos.....	32
3.1.4 Unidad IV - Basalto.....	37
3.1.5 Unidad V - Andesita-Basáltica del Volcán Santa Clara .....	37
3.1.6 Unidad VI - Depósitos Coluviales.....	40
<b>CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2 CRITERIOS DE CIZALLA .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3 INDICADORES CINEMÁTICOS.....</b>	<b>49</b>
<b>4.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....</b>	<b>51</b>
<b>4.5 FASES DE DEFORMACIÓN .....</b>	<b>52</b>
4.5.1 <i>NOROESTE – SURESTE (NW-SE)</i> .....	52
4.5.2 <i>NORTE – SUR (N-S)</i> .....	59
4.5.3 <i>NORESTE – SUROESTE (NE-SW)</i> .....	65
4.5.4 <i>ESTE – OESTE (E-W)</i> .....	75
<b>4.6 ANÁLISIS DE PERFILES GEOESTRUCTURALES .....</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO V: ALTERACIÓN HIDROTERMAL.....</b>	<b>81</b>
<b>5.1 FACTORES QUE CONTROLAN LA ALTERACIÓN HIDROTERMAL DE LAS ROCAS .....</b>	<b>82</b>
<b>5.2 TIPOS DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL .....</b>	<b>82</b>

<b>5.3 ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTÉRMAL</b> .....	84
<i>5.3.1 El Carol-Agua Fría</i> .....	85
<i>5.3.2 El Ñajo</i> .....	97
<i>5.3.3 El Ojochal</i> .....	107
<b>CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN</b> .....	109
<b>CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES</b> .....	115
<b>CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES</b> .....	120
<b>CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA</b> .....	122
<b>CAPÍTULO X: ANEXOS</b> .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio ubicada en el sector oeste de la Concesión del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate, localizada en el Departamento de León .....	3
Figura 2. Entorno tectónico de la Placa Caribe (Acton <i>et al</i> , 2000).....	10
Figura 3. Volcanismo activo en Nicaragua enfocándose en la Depresión Nicaragüense. Segmentación de la Cadena Volcánica de Nicaragua. (Tomado de Avellán <i>et al.</i> , 2012)...	12
Figura 4. Provincias Geológicas de Nicaragua (tomado de Hodgson, G. 1998).....	13
Figura 5. A) Flujos de lava andesítica laminar en la zona sureste de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 522897 Y 1392431. B) Flujos de lava masiva en contacto con flujos de lava laminar característicos de esta zona. Coordenadas: X 522524 Y 1392473 .....	20
Figura 6. A) Flujo de lava andesítica localizado al norte de la estructura caldérica Los Tablones. B) Muestra de mano correspondiente al flujo de lava de la figura A. Coordenadas: X 522701 Y 1395997 .....	21
Figura 7. Muestra de mano M5-2406. Andesita de textura porfirítica correspondiente a la zona suroeste de la estructura caldérica La Joya. Coordenadas: X 519225 Y 1392923 .....	21
Figura 8. A) Nicoles paralelos, aumento 10x. Andesita con cristales subhedrales a anhedrales de plagioclasas y piroxenos inmersos en una matriz de vidrio volcánico y microlitos de plagioclasas orientados en dirección del flujo, minerales opacos de forma aislada. B) Nicoles cruzados aumento 10x. Coordenadas: X 519225 Y 1392923 .....	22
Figura 9. Muestra de mano M4-1305. Andesita de color blanquecina, presencia de minerales arcillosos en la matriz. La muestras corresponde a un flujo de lava localizado al sureste de la estructura caldérica La Joya. Coordenadas: X 520248 Y 1392846. ....	22
Figura 10. A) Nicoles paralelos, aumento 10x. Andesita con abundantes fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos inmersos en una matriz microlítica de plagioclasas y vidrio volcánico, los minerales máficos presentan poca alteración, abundantes minerales opacos diseminados en la muestra. B) Nicoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 520248 Y 1392846 .....	23
Figura 11. Muestras de mano de lava andesítica, se observan de color gris y con abundantes plagioclasas. Coordenadas: A) X 521051 Y 1397884 B) X 518248 Y 1397080, localizadas al centro y noroeste del área de estudio, respectivamente. ....	24

- Figura 12. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Andesita con fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos inmersos en una matriz fina con abundantes microlitos de plagioclasas y vidrio volcánico; contiene numerosos minerales opacos. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 518350 Y 1396179 ..... 24
- Figura 13. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Andesita de textura glomeroporfídica, compuesta por plagioclasas y piroxenos granulares, abundantes minerales opacos. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 518350 Y 1396179 ..... 25
- Figura 14. Contacto entre andesita y escoria en la zona oeste de la estructura volcánica semicircular El Ojochal, el espesor del horizonte de andesita es de 2 m y del horizonte de escoria es de 3.5 m aproximadamente. Coordenadas X 520372 Y 1395130 ..... 25
- Figura 15. Afloramiento de aproximadamente 5.6 m de altura, se observan tres horizontes de diferente composición, de la base al techo con su espesor correspondiente tenemos: toba pumítica (1.46 m), escoria (1.20 m) y andesita (3 m). Coordenadas: X 520599 Y 1395562 ..... 26
- Figura 16. Afloramiento de andesita en contacto con escoria basal y toba pumítica, 8.8 m de altura aproximadamente, localizado en la zona noroeste de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 521457 Y 1396029..... 27
- Figura 17. Toba pumítica correspondiente a la zona noroeste de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 521455 Y 1396024 ..... 27
- Figura 18. Intercalaciones entre horizontes de toba pumítica y escoria localizado en la zona este de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 523130 Y 1394209..... 28
- Figura 19. A) Depósito de ignimbrita no consolidada localizada al noroeste del área de estudio. La parte superior se observa erosionada e intemperizada. Coordenadas: X 518708 Y 1396018. B) Líticos de composición andesítica y pómez en el depósito de ignimbrita no consolidada. Coordenadas: X 518708 Y 1396013 ..... 29
- Figura 20. A) y B) Depósito de caída en el borde suroeste de la estructura caldérica La Joya. C) Muestra de toba-lapilli observada bajo lupa binocular, fragmentos de lava gruesos de composición andesítica con tamaños entre 4 mm y 6 mm. Coordenadas para todas las figuras: X 519223 Y 1393044 ..... 30
- Figura 21. A) Flujo andesítico basáltico vesicular, de color gris. Aflora en la zona este de la comunidad El Carol. B) Muestra de mano del flujo de lava de la figura A, se observan abundantes vesículas y amígdalas. Coordenadas: X 519782 Y 1395633 ..... 31

Figura 22. Figuras A y B Andesita basáltica con zeolitas en amígdalas, localizada al norte de la comunidad Las Polvaleras. Coordenadas: X 519639 Y 1397709. C) Ópalo hialita desarrollado en amígdalas de andesita basáltica. Coordenadas: X 518931 Y 1395902..... 31

Figura 23. A) Nicoles paralelos, aumento 20x. Andesita basáltica de textura porfirítica fluidal, fenocristales euhedrales a subhedrales de plagioclasas y clinopiroxenos subhedrales inmersos en una matriz compuesta por vidrio volcánico, microlitos de plagioclasas y piroxenos, abundantes minerales opacos. B) Nicoles cruzados, aumento 20x. Coordenadas: X 519782 Y 1395633 ..... 32

Figura 24. A) Toba cinerolítica sobreyaciendo en las cercanías de la estructura caldérica La Joya. Coordenadas: X 519813 Y 1393785. B) Toba cinerolítica en el límite norte del sector A de la Unidad de Depósitos Piroclásticos. Coordenadas: X 519891 Y 1394801 ..... 34

Figura 25. A) Depósito de rocas epiclásticas localizado al sureste del área de estudio, en el sector B de la Unidad de Depósitos Piroclásticos. Coordenadas: X 523362 Y 1391798. B) Muestra de mano correspondiente al depósito de la figura A ..... 35

Figura 26. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Toba litocristalina, se observan cristales subhedrales de plagioclasas, piroxenos y abundantes minerales opacos. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 523362 Y 1391798 ..... 35

Figura 27. A) Depósito de toba litocristalina de color amarillento, ubicado al sureste del área de estudio. B) Muestra de mano de toba litocristalina con gradación inversa, sus componentes miden de la base al techo < 1 mm a 4 mm. Coordenadas: X 523367 Y 1392141. .... 36

Figura 28. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Toba litocristalina. Se observa matriz fina alterada a arcilla. Contiene líticos de andesita, cristales subhedrales y anhedrales de plagioclasas y piroxenos. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 523367 Y 1392141 ..... 36

Figura 29. A) Flujo de lava de composición andesita basáltica proveniente del Volcán Santa Clara. B) Fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos identificados en la superficie del flujo. Coordenadas: X 520472 Y 1391845 ..... 38

Figura 30. A) Muestra de mano de andesita basáltica correspondiente a un flujo de lava del Volcán Santa Clara. B) Fotografía desde lupa binocular en la cual se observan cristales de olivino, plagioclasas y abundantes vesículas. Coordenadas: X 522888 Y 1391653..... 38

Figura 31. A) Nicoles paralelos, aumento 10x. Andesita basáltica, presenta abundantes fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos, algunos minerales opacos; inmersos en una matriz microcristalina con abundantes cristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos. En el centro de la figura se observa un cristal anhedral de olivino con iddingsita formada alrededor de este. B) Nicoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 522888 Y 1391653 ..... 39

Figura 32. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Andesita basáltica, en la parte superior de la figura se observan cristales anhedrales y subhedrales de piroxenos y olivino alterados, presentan coloración café-rojiza, textura porfirítica seriada. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 522888 Y 1391653. .... 39

Figura 33. A) Afloramiento localizado entre la zona sureste de la estructura caldérica La Joya y lavas andesíticas-basálticas del Volcán Santa Clara, correspondiente a la Unidad de Depósitos Coluviales. B) Fragmentos de lava andesítica que varían en tamaño desde 1 cm a 16 cm. Coordenadas: X 520685 Y 1391922..... 40

Figura 34. Complejo Volcánico Telica y las estructuras volcánicas que lo conforman, el cuadro señala el área cartografiada en este estudio. Se observa la secuencia Este-Oeste de las estructuras volcánicas debido a la migración de la cámara magmática ..... 42

Figura 35. Escarpe de estructura semicircular El Ojochal vista desde la estructura volcánica Los Tablones. Coordenadas: X 522673 Y 1395967..... 44

Figura 36. Estructura volcánica semicircular La Ceiba, vista desde el Volcán Telica. Coordenadas: X 518076 Y 1393147 ..... 46

Figura 37. En primer plano se observa la estructura caldérica Pre-Telica, al fondo se observa el Volcán Telica, vistos desde la estructura volcánica La Ceiba. Coordenadas: X 518911 Y 1393684 ..... 47

Figura 38. Fumarolas dentro de la estructura volcánica Pre-Telica, presentan minerales blancos (carbonato de calcio) y coloración verde correspondientes a algas termofílicas que se desarrollan en altas temperaturas. Coordenadas: X 517923 Y 1393612..... 47

Figura 39. Afloramiento localizado en la zona este de la comunidad El Ojochal. Se observan estrías que indican la dirección del movimiento de los bloques, escalón perpendicular a las estrías. Coordenadas: X 522006 Y 1393592 ..... 49

Figura 40. Traza de Falla Los Prados Sur, sigmoide indica el movimiento de la falla principal, flechas señalan el bloque que cae, falla inversa. Coordenadas: X 522681 Y 1392442 ..... 50

Figura 41. Traza de Falla Santa Clara, clastos rotados, falla derecha con componente vertical, flechas indican el sentido del movimiento de los bloques. Coordenadas: X 520250 Y 1394844 ..... 50

Figura 42. A) Traza de Falla Las Polvaleras en lavas andesíticas, numerosas fracturas secundarias. Coordenadas: X 519829 Y 1395882. B) Falla transcurrente con componente lateral derecha. Sigmoides en dirección del movimiento principal. Coordenadas: X 519900 Y 1395996. C) Roseta de fracturas Falla Las Polvaleras, dirección principal de esfuerzos hacia el N 65°W..... 53

Figura 43. A) Brecha de falla originada por fallamiento normal. Coordenadas: X 518789 Y 1395592. B) Falla inversa con componente lateral derecho. Flechas señalan el movimiento de los bloques. Coordenadas: X 518787 Y 1395601. C) Roseta de fracturas Falla La Joya Noroeste, dirección principal de esfuerzos hacia el N 50°W..... 54

Figura 44. A) Fracturas paralelas. B) Traza de Falla Santa Elena en flujo de lava andesita basáltica, sigmoide vertical que indica movimiento normal de la falla. Coordenadas: X 519722 Y 1397717 ..... 55

Figura 45. Figuras A y B representan alteración hidrotermal en afloramientos de lavas alteradas en zona de intersección entre las fallas El Ojochal Noroeste, Los Tablones A y la estructura semicircular El Ojochal, las lavas son de dureza baja y se observan de tonalidades marrón, amarillenta, gris y verde. Coordenadas: X 521100 Y 1395655..... 56

Figura 46. A) Traza de Falla El Ojochal Noroeste. B) Separación de 15 cm de ancho entre los bloques, componente lateral izquierda, escalón formado por el deslizamiento de los bloques. Coordenadas: X 521062 Y 1395328..... 57

Figura 47. A) Traza de Falla El Ojochal Noroeste, movimiento normal, flechas indican el sentido de deslizamiento de los bloques, línea discontinua muestra el desplazamiento de ambos. Coordenadas: X 521082 Y 1395623. B) Sigmoides verticales que indican la dirección principal del movimiento. C) Roseta de fracturas Falla El Ojochal Noroeste, dirección principal de esfuerzos hacia el N 35°W ..... 57

Figura 48. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Noroeste-Sureste. Eje de deformación N 45°W indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión. .... 59

Figura 49. Figuras A y B Sistema de fracturas complejas en rocas andesíticas en zona de falla El Caracol. Coordenadas: X 518589 Y 1397276 ..... 60

Figura 50. Pendiente pronunciada, árboles inclinados. Línea roja señala zona de falla inferida, localidad Agua Fría. Coordenadas: X 518557 Y 1396189 ..... 61

- Figura 51. Figuras A y B Traza de falla Agua Fría, las flechas indican un movimiento lateral izquierdo. Coordenadas: 518800 Y 1396180. C) Roseta de fracturas Falla Agua Fría. Dirección principal de esfuerzos hacia el N 5°E ..... 61
- Figura 52. A) Traza de Falla La Ceiba - La Joya, arreglo anastomasado en dirección del movimiento principal. Coordenadas: X 519174 Y 1392385. B) Sistema de fracturas paralelas en la zona sureste de la Falla La Ceiba-La Joya. Coordenadas: X 519203 Y 1392642 ..... 62
- Figura 53. A) Arreglo conjugado en traza de Falla La Ceiba-La Joya. El ángulo agudo formado entre las fracturas muestra la dirección de esfuerzo principal  $\alpha_1$ , lo cual indica un fallamiento normal. Coordenadas: X 519204 Y 1392506. B) Traza de Falla La Ceiba-La Joya. Arreglo conjugado, desplazamiento de bloques, flechas indican el sentido de movimiento de la falla principal, fallamiento normal. Coordenadas: X 519223 Y 1393044 C) Roseta de fracturas Falla La Ceiba-La Joya, dirección principal de esfuerzos N-S..... 63
- Figura 54. Zona de alteración hidrotermal El Ñajo asociada con el lineamiento de igual nombre y orientación N-S (Falla El Ñajo) Coordenadas: X 520681 Y 1396691..... 64
- Figura 55. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Norte-Sur. Eje de deformación N 3°E indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión..... 65
- Figura 56. Manantial de aguas termales cuya expresión en superficie se debe al alto grado de fracturamiento en la zona, localidad El Carol-Agua Fría, medición de temperatura 82.6 °C. Coordenadas: X 518706 Y 1396042 ..... 66
- Figura 57. A) Zona de derrumbe asociada a fallamiento, localidad El Carol. Coordenadas: X 518698 Y 1395959. B) Roseta de fracturas Falla El Carol, indica que la dirección principal de esfuerzos es N 65°E..... 67
- Figura 58. Fractura de rumbo N 50°E en traza de Falla Las Polvaleras Noreste. Coordenadas: X 519835 Y 1395922 ..... 68
- Figura 59. A) Fracturas paralelas asociadas perpendicularmente a traza de falla principal. B) Arreglo conjugado en flujo de lava andesítica. C) Intercrecimiento de minerales en plano de falla. Las tres figuras pertenecen a la zona de Falla Santa Clara. Coordenadas: A) X 520395 Y 1395369 B) X 520430 Y 1395382 C) X 520361 Y 1395011..... 69
- Figura 60. Escarpe de Falla El Ñajo Este. Coordenadas: X 521360 Y 1397270 ..... 70

Figura 61. A) Traza de Falla Los Tablones A, movimiento normal con componente lateral izquierdo. Flechas indican el desplazamiento de los bloques. Coordenadas: X 521599 Y 1396202. B) Roseta de fracturas Falla Los Tablones A, dirección principal de esfuerzos hacia el N 55°E. .... 72

Figura 62. A) Traza de Falla Los Tablones C, movimiento normal, flechas indican el desplazamiento de los bloques. Coordenadas: X 523446 Y 1394251. B) Fracturas perpendiculares al plano principal. Coordenadas: X 523388 Y 1394240. C) Roseta de fracturas Falla Los Tablones C, dirección de máximo esfuerzo hacia el N 25° E ..... 73

Figura 63. A) Falla inversa, flechas indican el desplazamiento de los bloques. B) Estrías y escalones perpendiculares entre sí. Coordenadas: X 523860 Y 1393551 ..... 74

Figura 64. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Noreste-Suroeste. Eje de deformación N 50°E indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión ..... 74

Figura 65. A) Sistema de fracturas paralelas en traza de Falla El Ojochal Sur. B) Abertura de 7cm de ancho entre los bloques, lo cual indica los esfuerzos que actúan en esta zona. Coordenadas: X 521064 Y 1394015 ..... 76

Figura 66. A) Pendiente pronunciada, falla inferida. Coordenadas: X 519470 Y 1394227. B) Flechas paralelas a las estrías producto del desplazamiento de los bloques en traza de Falla El Ojochal Sur, se observa crecimiento de minerales. Coordenadas: X 520853 Y 1394058 ..... 76

Figura 67. Traza de Falla El Ojochal Este-Oeste, sistema de fracturas paralelas en flujo de lava andesítica. Coordenadas: X 521578 Y 1393658..... 77

Figura 68. A) Lavas dispuestas verticalmente en contacto con horizonte de escoria, separación entre bloques de lava de 2 m aproximadamente. Coordenadas: X 522125 Y 1393613. B) Contacto sub-vertical entre lavas laminares y escoria. Coordenadas: X 522091 Y 1393597. Ambas figuras corresponden al área afectada por la Falla El Ojochal Este-Oeste..... 77

Figura 69. A) Deformación en flujos de lava andesítica dispuestos en forma laminar en la parte inferior. Coordenadas: X 522524 Y 1392473. B) Arreglo conjugado,  $\alpha_1$  sub-vertical. C) Traza de Falla Los Prados Sur, sigmoide indica el movimiento de la falla principal, flechas señalan el bloque que cae, falla inversa. Coordenadas: X 522681 Y 1392442..... 78

Figura 70. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Este-Oeste. Eje de deformación N 75°E indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión..... 79

- Figura 71. Medición de temperatura en fumarola, se observa la deposición de azufre nativo alrededor de esta. B) Muestra de mano deposición de azufre nativo en lava alterada, localidad El Carol. Coordenadas: X 518764 Y 1395742 ..... 85
- Figura 72. A) Planos de fracturas en lavas alteradas. Coordenadas: X 518801 Y 1395601. B) Medición de temperatura suelos calientes, localidad Agua Fría. Coordenadas: X 518809 Y 1395708 ..... 86
- Figura 73. A) Afloramiento de lava alterada de la cual se tomó la muestra M1-0207 (Figura B) para la elaboración de sección delgada. Se observan pequeñas concentraciones de carbonato de calcio y pirita diseminada en la roca, localidad Agua Fría. Coordenadas: X 518698 Y 1395949 ..... 87
- Figura 74. A) Nicoles paralelos, aumento 10x. Andesita alterada, se observa calcita con alteración a arcilla, minerales opacos a la izquierda de la figura. B) Nicoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 518698 Y 1395949..... 87
- Figura 75. A) Nicoles paralelos, aumento 10x, Andesita alterada, se observan feldespatos subhedrales alterados a minerales arcillosos, pequeñas venillas rellenas de sílice. B) Nicoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 518698 Y 1395949 ..... 88
- Figura 76. Formación de azufre nativo acicular típico de zonas de vapor calentado, zona El Carol-Agua Fría. Coordenadas: X 518804 Y 1395590..... 90
- Figura 77. Muestras a las cuales se realizó análisis mineralógico por el método de Difracción de Rayos X correspondientes a la zona de alteración El Carol-Agua Fría..... 90
- Figura 78. Manantial termal zona de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría, minerales arcillosos, alto contenido de hierro. Coordenadas: X 518706 Y 1396042 ..... 91
- Figura 79. A) Muestra de mano M3A-1206. B) Minerales de zeolitas de hábito acicular vistas con lupa binocular, correspondientes a la muestra M3A-1206. Coordenadas: X 518708 Y 1396018 ..... 92
- Figura 80. A) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 10x. Andesita alterada hidrotermalmente, se observan minerales de zeolitas esferulíticas formadas alrededor de relictos de fenocristales alterados. B) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 10x. Andesita alterada hidrotermalmente, minerales de zeolitas esferulíticas formadas en los bordes de la muestra. Coordenadas: X 518708 Y 1396018 ..... 93
- Figura 81. Figuras A y B muestran el afloramiento en campo y muestra de mano, correspondientes a la Muestra M3B-1206; abundante pirita diseminada en la roca. C) Cristales de pirita vistos bajo lupa binocular. Coordenadas: X 518708 Y 1396018..... 94

- Figura 82. A) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 4x. Andesita alterada, se observan minerales opacos diseminados en la roca. B) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 4x. Andesita alterada se observan plagioclasas alteradas a minerales arcillosos. Coordenadas: X 518708 Y 1396018 ..... 94
- Figura 83. Muestra de mano CT050-14, se observan minerales arcillosos, su coloración rojiza es debido al alto contenido de Fe. Coordenadas: X 518706 Y 1396042..... 95
- Figura 84. Minerales arcillosos de tonalidades amarillenta y rojiza, zona de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría. Coordenadas de figuras A y B: X 518663 Y 1395517. Coordenadas figura C: X 518674 Y 1395385 ..... 96
- Figura 85. Área de fumarolas (A) y lodos hirvientes (B), zona de alteración hidrotermal El Ñajo. Coordenadas figura A: X 520681 Y 1396691. Coordenadas figura B: X 520678 Y 1396463 ..... 98
- Figura 86. Zona de alteración hidrotermal El Ñajo. A) Área de fumarolas en el sector noroeste de El Ñajo. Coordenadas: X 520681 Y 1396691. B) Deposición de minerales en el sector sureste de El Ñajo. Coordenadas: X 521095 Y 1395675..... 98
- Figura 87. A) Muestra de mano M6-2905, lava argilizada con abundante piritita diseminada. B) Cristales de piritita vistos bajo lupa binocular. Coordenadas: X 521083 Y 1395630..... 99
- Figura 88. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Lava completamente alterada a minerales arcillosos por lo cual no se pueden definir sus componentes, se observan minerales opacos diseminados en la roca. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 521083 Y 1395630 ..... 100
- Figura 89. Brecha hidrotermal constituida por fragmentos líticos de lava andesítica con tamaños entre 3 mm y 10 cm, zona de alteración hidrotermal El Ñajo. Coordenadas: X 521087 Y 1395645 ..... 100
- Figura 90. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Brecha andesítica calcárea, se observan fragmentos de lava andesítica angulosos y subangulosos, de distintos tamaños inmersos en una matriz calcárea. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 521087 Y 1395645 ..... 101
- Figura 91. A) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 4x. Brecha andesítica calcárea, se observa asociación de calcita con minerales de zeolitas, pequeños fragmentos de lava andesítica. B) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 4x. Se observan minerales de zeolitas fibrosas y sílice microcristalina secundaria rellenando una fisura. Coordenadas: X 521087 Y 1395645 ..... 101

Figura 92. Muestra de mano M9-2905. Toba lítica alterada. Coordenadas: X 521118 Y 1395710 ..... 102

Figura 93. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Toba lítica alterada, se observa textura glomeroporfídica entre los cristales subhedrales de plagioclasas, los cuales están alterándose a minerales de arcillas, algunos minerales opacos. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 521118 Y 1395710..... 102

Figura 94. Muestras a las cuales se realizó análisis mineralógico por el método de Difracción de Rayos X, correspondientes a la zona de alteración hidrotermal El Ñajo..... 106

Figura 95. Zona de alteración hidrotermal El Ojochal, suelos alterados, minerales arcillosos de distintas tonalidades. Coordenadas: A) X 520548 Y 1395196; B) X 520559 Y 1395073; C) X 520560 Y 1395074 ..... 107

Figura 96. A) Horizonte de escoria alterado parcialmente a minerales arcillosos. Coordenadas: X 520372 Y 1395130. B) Depósito de fragmentos tamaño lapilli con alteración de color blanca en superficie. Coordenadas: X 520359 Y 1395014..... 108

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas entre las cuales se localiza el área de estudio ..... 2

Tabla 2. Composición mineralógica de muestras analizadas por Difracción de Rayos X, zona de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría..... 88

Tabla 3. Composición mineralógica muestra CT050-14 a partir de análisis de Difractometría de Rayos X, localidad Agua Fría ..... 95

Tabla 4. Identificación de muestras a las cuales se elaboraron secciones delgadas, correspondientes a la zona de alteración hidrotermal El Ñajo ..... 99

Tabla 5. Composición mineralógica de muestras analizadas por Difractometría de Rayos X en la zona de alteración hidrotermal El Ñajo ..... 103

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Mapa de Sitios Visitados en el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate .....	125
ANEXO B. Identificación de muestras de las cuales se elaboraron Secciones Delgadas..	126
ANEXO C. Identificación, localización y descripción de muestras analizadas por Difractometría de Rayos X (LaGeo, 2014) .....	127
ANEXO D. Clasificación Granulométrica de Piroclastos y Depósitos Piroclásticos (tomado de Schmid, 1980) .....	134
ANEXO E. Descripción Petrográfica de muestras de Basalto analizadas por Jessica Lynn Olney (2006) .....	135
ANEXO E.1. Datos Geoquímicos de Elementos Mayores y Traza, correspondientes a muestras de Basalto (tomado de Olney, 2006).....	138
ANEXO F. Resultados de Geotermometría, Polaris Energy Nicaragua S.A, 2014 .....	139

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

El desarrollo del recurso geotérmico puede darse en Nicaragua, debido a las condiciones geológicas regionales relacionadas a la zona de subducción formada por la Placa Cocos y la Placa Caribe, lo cual ha dado origen al Graben Nicaragüense y a la Cordillera Volcánica de Los Maribios, que se extiende paralela a la Costa del Pacífico y está compuesta por volcanes activos, estructuras volcánicas residuales, lagunas cratéricas y calderas volcánicas que presentan áreas de actividad hidrotermal que denotan una fuerte presencia de cuerpos magmáticos a profundidad.

Esta monografía presenta los resultados del análisis de artículos e información previa de la zona de interés, así como de la interpretación de mapas, fotografías aéreas, imágenes satelitales, datos obtenidos del trabajo de campo realizado y la evaluación de las etapas ejecutadas, dando como resultado la Cartografía Geológica-Estructural con fines de Exploración Geotérmica de la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate, la cual cubrió un área de 36 km<sup>2</sup> aproximadamente.

Se evaluaron las características geológicas y estructurales del área, así como las manifestaciones termales identificadas con el fin de realizar una interpretación que generara resultados aplicables a la geotermia a través de la elaboración del Mapa Geológico-Estructural y el Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial, ambos a escala 1: 20 000.

Pretendemos que los resultados de esta monografía puedan ser utilizados como guía para la evaluación de sitios en los cuales sea recomendada la realización de estudios geofísicos y geoquímicos para la futura localización de puntos de perforación.

## 1.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio está localizada en el Departamento de León, en el occidente de Nicaragua. El sitio seleccionado para realizar este trabajo fue la Concesión del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate (Figura 1) otorgada a la Empresa Polaris Energy Nicaragua, S.A, esta concesión se encuentra a una distancia de 114 km al noroeste de Managua y a 10 km al noreste del municipio de Telica. Geográficamente se ubica en la zona noroeste de la Cadena Volcánica Los Maribios, Hoja Topográfica de Telica, número 2853 IV, publicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2006), a escala 1: 50 000.

La Concesión del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate cubre un área de 40 km<sup>2</sup>, sin embargo, el área cubierta durante la realización de este trabajo fue de 36 km<sup>2</sup> aproximadamente, abarcando principalmente la zona oeste de la Concesión (zona no cartografiada a detalle) y sitios adyacentes al límite de la misma (hacia el norte y oeste) con el fin de realizar una Cartografía Geológica-Estructural del área de estudio comprendida entre las siguientes coordenadas:

X	518000	524000	524000	518000
Y	1398000	1398000	1391670	1391670

Tabla 1. Coordenadas entre las cuales se localiza el área de estudio.

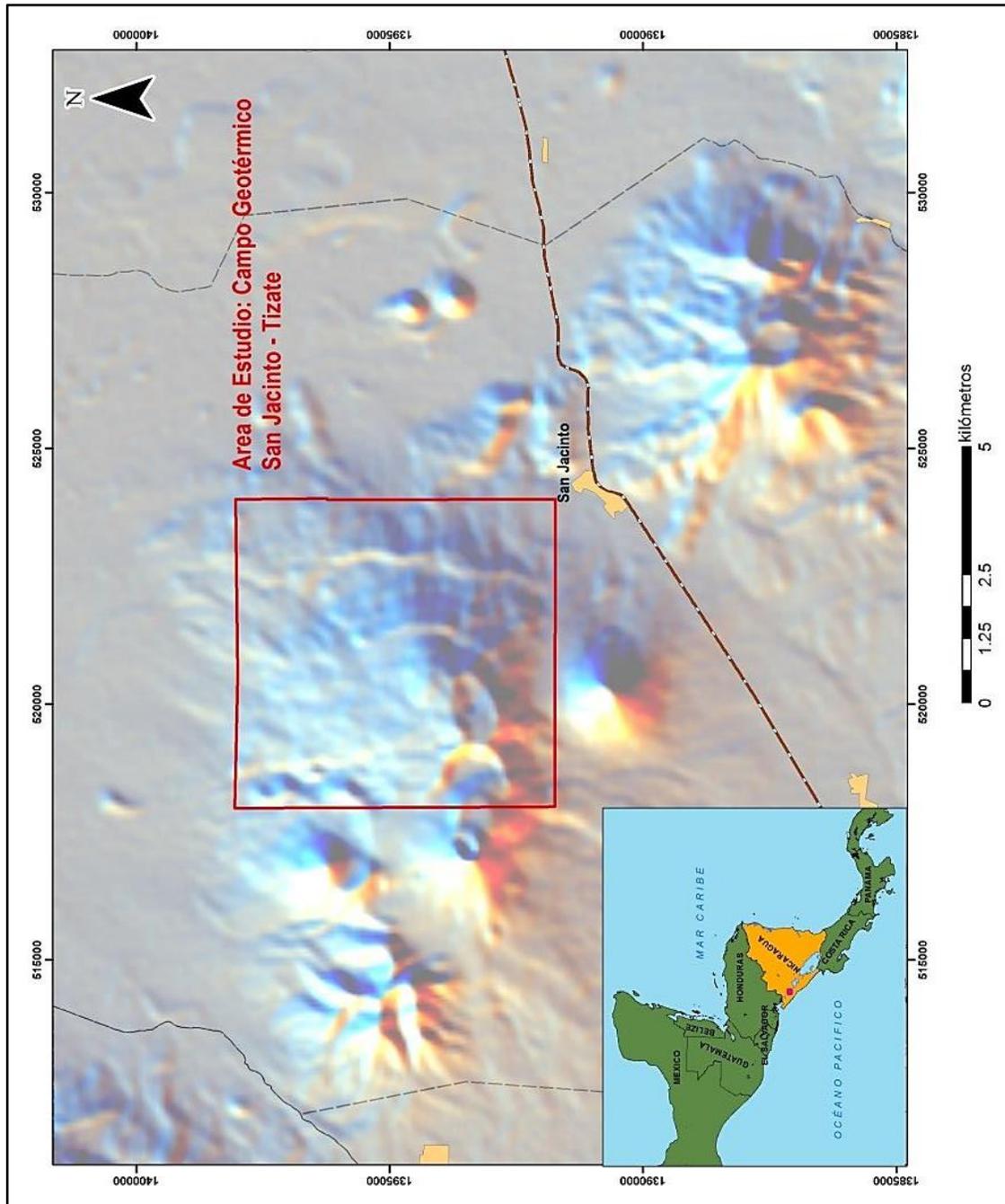


Figura 1. Área de estudio ubicada en el sector oeste de la Concesión del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate, localizada en el Departamento de León.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La Energía Renovable es la esfera más importante del sector energético, debido a su capacidad para reducir costos, emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), contaminación ambiental y para aprovechar fuentes de energía, locales y descentralizadas, como los recursos eólicos, solares, geotérmicos, hidroeléctricos y de biomasa. Estas fuentes renovables son inmunes a la volatilidad de los mercados de combustibles fósiles y adicionalmente conllevan el beneficio de estimular el empleo, el desarrollo tecnológico y el crecimiento económico.

La geotermia en Nicaragua es un campo en vías de desarrollo por tanto con la realización de una Cartografía Geológica-Estructural con fines de Exploración Geotérmica se aportará al conocimiento de las características geológicas y estructurales presentes en la zona de estudio.

La cartografía es necesaria ya que constituye un método eficaz y real para evaluar y medir las condiciones naturales del terreno. Una parte importante de los estudios de campo fue la geología estructural, mediante la cual se determinaron las estructuras geológicas y la forma en que se encontraban dispuestas las fracturas y fallas, así como las características que estas presentaban (rumbo, buzamiento, dirección de buzamiento e indicadores cinemáticos).

Se pretende que este trabajo contribuya a la Geología de Nicaragua, específicamente en la zona de San Jacinto-Tizate y sectores aledaños, a través de la exploración geotérmica superficial partiendo tanto de la caracterización de las manifestaciones termales superficiales como del análisis de las características geológicas y estructurales del área. Un estudio estructural es importante en geotermia porque a través de la identificación de las fallas y fracturas se conocen las zonas de circulación de fluidos lo cual permite una adecuada definición de los sitios de perforación.

Se aspira que la realización final de este trabajo genere un aporte para futuras investigaciones, mediante las cuales se impulse y promueva el conocimiento geológico estructural del país a nivel de detalle.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL:**

Realizar una Cartografía Geológica-Estructural en la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate a través de la identificación de contactos litológicos y estructuras geológicas principales presentes en la zona de estudio, incluyendo la descripción y caracterización de cada unidad y estructura identificada.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Elaborar un Mapa Geológico-Estructural en el cual se plasmen los contactos litológicos y estructuras geológicas localizadas dentro del área de estudio.
- Realizar análisis de la cinemática y dinámica de las estructuras geológicas de la zona de interés.
- Identificar y describir las manifestaciones termales superficiales localizadas en el sitio de estudio.
- Medir temperatura en las zonas de alteración hidrotermal.
- Generar un Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial del área representando las variaciones de temperatura existentes.
- Efectuar análisis petrográfico a través de la elaboración de secciones delgadas de muestras de rocas obtenidas en campo.

## 1.4 METODOLOGÍA

Los estudios geológicos se realizaron mediante la revisión de información de la zona, fotointerpretación y campañas de campo con muestreo de rocas, mediciones con brújula para realizar el levantamiento estructural del área, elaboración de columnas estratigráficas, perfiles geológicos-estructurales y análisis mineralógicos y petrográficos para describir la composición mineralógica y clasificación de las rocas.

El resultado de todos estos análisis facilitó la elaboración de:

- Mapa Geológico-Estructural a escala 1: 20 000
- Mapa Estructural<sup>1</sup> a escala 1: 20 000
- Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial a escala 1: 20 000

Estos mapas se elaboraron teniendo como base el mapa topográfico a escala 1: 50 000.

La metodología propuesta comprendió diversas etapas de estudio, divididas de la siguiente manera:

### *1.4.1 Etapa de Gabinete:*

Comprendió el almacenamiento de información bibliográfica, documentos de geología, vulcanología e informes existentes a nivel local y regional, así como también la búsqueda de mapas, fotografías aéreas, imágenes de Radar PALSAR e imágenes multiespectral ASTER, para su posterior interpretación utilizando el software ArcGis versión 10.1.

Las hojas topográficas y geológicas analizadas fueron: Telica 2853-IV de INETER, (mismo número para ambas hojas) a escala 1: 50 000. Se realizó la interpretación a detalle de las fotografías aéreas del sitio de estudio, correspondientes a los años 1968 y 1996, a escala 1: 30 000 y 1: 40 000 respectivamente. Con la fotointerpretación se reconocieron y trazaron rasgos del terreno, como fallas, fracturas, lineamientos y contactos litológicos.

---

<sup>1</sup> El Mapa Estructural es con fines representativos para apreciar con claridad las estructuras geológicas y su geometría.

Las informaciones geológicas obtenidas de las fotografías aéreas fueron proyectadas en la hoja topográfica, en correspondencia con la escala de las fotos, luego se proyectaron a escala 1: 20 000 que fue la escala utilizada para la realización del trabajo monográfico.

Las imágenes satelitales fueron utilizadas para diferir rasgos estructurales como fallas, lineamientos y zonas de alteración.

Con el resultado obtenido de la fotointerpretación y del análisis de las imágenes satelitales se elaboró un mapa base a escala 1: 20 000 el cual permitió tener una caracterización previa del área, a nivel geológico y estructural, antes de realizar el trabajo de campo.

#### *1.4.2 Etapa de Campo:*

Consistió en el desarrollo y cumplimiento de los objetivos propuestos, principalmente con la realización de giras de campo al área de estudio<sup>2</sup>, caracterización y descripción de la geología del terreno, así como la comprobación de la fotointerpretación efectuada.

Se realizó la identificación y caracterización de las estructuras geológicas presentes, la forma en que se encontraban las fallas y fracturas, y la roca que afectan este tipo de estructuras para determinar si existía relación con las zonas de alteración hidrotermal.

Las mediciones que se ejecutaron en estas estructuras (sistemas de fallas y fracturas) fueron: rumbo, dirección de buzamiento, buzamiento y desplazamiento de bloques.

Se identificaron indicadores cinemáticos: estrías, sigmoides, sistemas conjugados, criterio escalonado y criterio de clastos rotados, con el objetivo de determinar el arreglo y cinemática de las estructuras geológicas.

Se llevó a cabo el levantamiento de secciones estratigráficas en cortes geológicos característicos, para su cartografía y toma de muestras para su posterior análisis macroscópico y microscópico en laboratorio.

---

<sup>2</sup> El total de puntos visitados fue de 368. Ver Anexo A.

Se realizaron mediciones de temperatura en las distintas manifestaciones termales superficiales, utilizando los termómetros digitales de contacto marca Big Red Digital Thermometer y Fluke 52 II, estas manifestaciones son indicadoras de la posible presencia de un sistema geotérmico activo.

Se tomaron fotografías ilustrativas de cada afloramiento con el fin de evidenciar el trabajo de campo realizado, los contactos y estructuras encontradas en los puntos visitados, así mismo se ubicó cada punto de interés a través del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés, marca Garmin GPSmap 60Cx) utilizando la Proyección UTM – WGS 1984, posteriormente estos puntos se proyectaron en los mapas para correlacionar la información obtenida durante el trabajo de campo con la adquirida en la etapa de gabinete.

#### *1.4.3 Etapa de Interpretación de Datos:*

En esta etapa se procesó toda la información obtenida.

Se analizaron todos los parámetros geológicos y estructurales de los afloramientos estudiados en el campo, con el fin de elaborar los siguientes mapas:

- Mapa Geológico-Estructural a escala 1: 20 000
- Mapa Estructural a escala 1: 20 000
- Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial a escala 1: 20 000

Con la realización de dichos mapas se determinó la geología característica de la zona, la posible existencia de dominios estructurales y se representaron las variaciones de temperatura de las manifestaciones termales superficiales por medio de isotermas a partir de la interpolación de las temperaturas medidas.

Estos mapas se elaboraron teniendo como base el mapa topográfico a escala 1: 50 000.

Se efectuó un análisis estadístico con los datos estructurales a través de la realización de rosetas de fracturas elaboradas a mano y utilizando el software Tectonic FP versión 1.7.7.

Dicha información sirvió para conocer la dirección principal de esfuerzos a la cual se encuentran sometidos los distintos materiales en cada fase de deformación definida en este trabajo.

Macroscópicamente se describieron las muestras obtenidas utilizando un Estereomicroscopio (lupa binocular) marca Motic SMZ-168 para efectuar el análisis de la composición mineral y textural de las rocas.

Se elaboraron 19 secciones delgadas de las muestras recolectadas<sup>3</sup> para su análisis petrográfico utilizando el Microscopio Petrográfico marca Motic BA300Pol, con el fin de conocer las variaciones texturales de las rocas, los minerales primarios, secundarios y deposición de minerales producto de la alteración hidrotermal y así determinar el tipo de roca que caracteriza la zona y aportar información para la definición de la geología prevaleciente del sitio de estudio.

#### *1.4.4 Etapa Final:*

Se elaboraron los mapas propuestos utilizando el software ArcGis versión 10.1.

Finalmente se sintetizaron las actividades realizadas durante las etapas descritas anteriormente, a través de la redacción del trabajo final, incluyendo principalmente el reconocimiento de investigaciones anteriores, el cumplimiento de los objetivos propuestos y la exposición de los resultados obtenidos.

---

<sup>3</sup> Se obtuvieron 102 muestras de las cuales se elaboraron 19 Secciones Delgadas. Estas fueron elaboradas por el personal del Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO/UNAN-Managua).

La identificación y localización de las muestras de las cuales se elaboró sección delgada se presentan en el Anexo B.

## CAPÍTULO II: MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO DE NICARAGUA

### 2.1 TECTÓNICA DE NICARAGUA Y AMÉRICA CENTRAL

Centroamérica está localizada en la Placa Caribe, en el frente de un borde convergente destructivo, formado por la subducción de la Placa Cocos bajo dicha placa. En su extremo norte se ubica la Placa Norteamericana, separada de la Placa Caribe por el sistema de fallamiento transcurrente denominado Polochic-Motagua, limitada al sur y al este por la Placa Sudamericana y al oeste por la Placa Cocos. La Placa Caribe en su costa oeste está delimitada por la Fosa Mesoamericana, la cual se encuentra a 100 km del Continente en el Océano Pacífico, es paralela a la Depresión Nicaragüense, tiene una profundidad de 6 km en su terminal en Guatemala, atraviesa toda Centroamérica y desaparece al sur del istmo, en Panamá (Figura 2).

En el istmo centroamericano la Placa Caribe está dividida en dos elementos estructurales: el Bloque Chortis que conforma América Central del Norte y el Bloque Chorotega de América Central Sur. Es importante señalar que Nicaragua se ubica en la zona Oeste de la Placa Caribe, siendo afectada por el límite de placas que se desarrolla entre las placas Cocos y Caribe (zona de subducción).

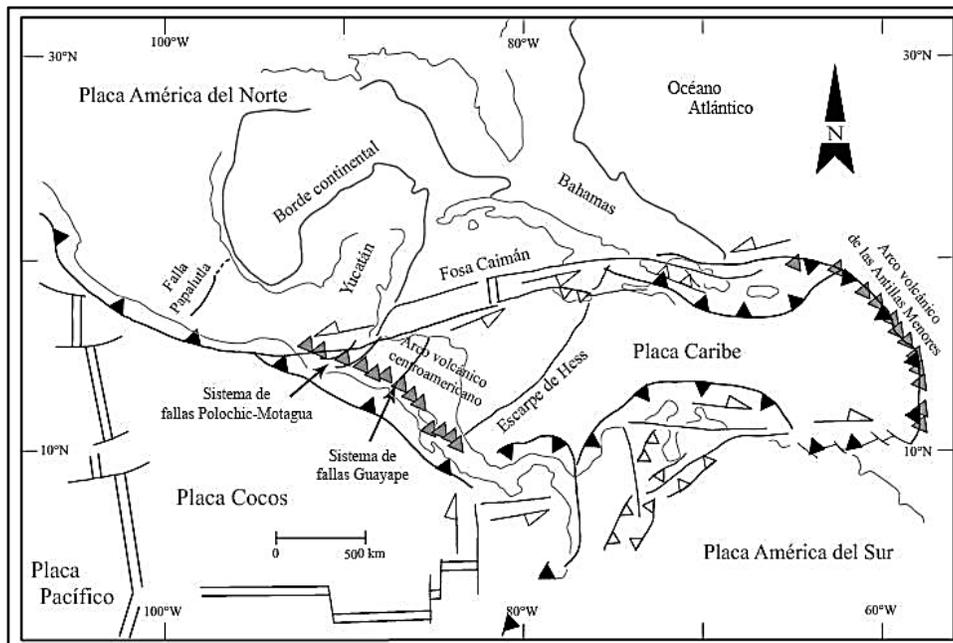


Figura 2. Entorno tectónico de la Placa Caribe (Acton *et al*, 2000).

## 2.2 ARCO VOLCÁNICO DE NICARAGUA

Los volcanes de Centroamérica históricamente activos se han originado sobre el límite convergente de las placas Cocos y Caribe, dando lugar al Frente Volcánico Centroamericano activo, también llamado Arco Volcánico Centroamericano, excluyendo a los volcanes en Panamá que se originan de una convergencia diferente entre las placas Nazca y Caribe (*Carr et al.*, 2007).

El Arco Volcánico Centroamericano tiene una longitud de 1300 km, se extiende desde la frontera entre México y Guatemala hasta el occidente de Costa Rica.

En Nicaragua, el Arco Volcánico Centroamericano tiene una longitud de 380 km, localmente se refiere a este como la Cadena Volcánica Nicaragüense, la cual coincide con el eje de la Depresión de Nicaragua.

A lo largo de la zona de convergencia entre las placas Cocos y Caribe el ángulo de subducción varía, a esto se atribuye la deformación del Arco Volcánico Centroamericano y la segmentación de la Cadena Volcánica Nicaragüense (*DeMets*, 2001).

La segmentación de la Cadena Volcánica Nicaragüense es evidente en el área de Managua donde el eje volcánico se fracciona en dos segmentos separados por 25 km, creándose una zona de relevo (*Espinoza*, 2007).

El segmento noroeste de dicha cadena comprende las estructuras volcánicas entre los volcanes Cosigüina y Apoyeque, mientras que el segmento sureste comprende aquellas estructuras entre el Volcán Masaya y el Volcán Maderas (Figura 3).

La subducción oblicua por debajo de Nicaragua es la responsable de un fallamiento con geometría en echelón y de la rotación en sentido de las manecillas del reloj de los bloques individuales a lo largo de la Cadena Volcánica de Nicaragua (*La Femina et al.*, 2002)

El área de estudio se ubica en el segmento noroeste del Arco Volcánico de Nicaragua, dentro del Complejo Volcánico Telica cuyo cráter activo es el volcán del mismo nombre.

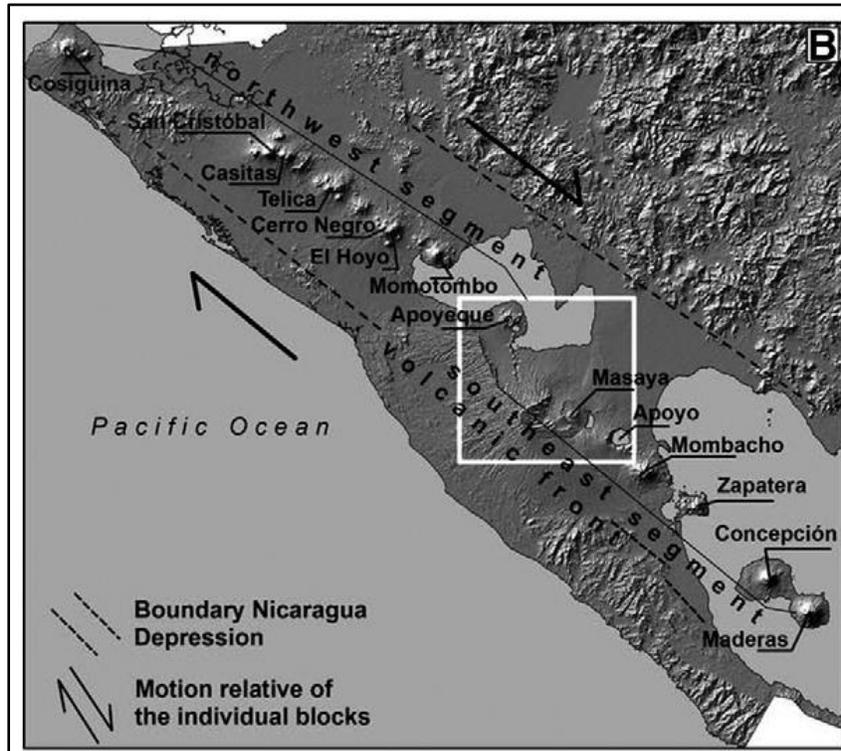


Figura 3. Volcanismo activo en Nicaragua enfocándose en la Depresión Nicaragüense. Segmentación de la Cadena Volcánica de Nicaragua. (Tomado de Avellán *et al.*, 2012).

### 2.3 GEOLOGÍA REGIONAL DE NICARAGUA

La geología histórica de Nicaragua comenzó durante la era del Paleozoico y culminó con la intensa actividad volcánica del Cuaternario. Durante el Paleozoico Medio Inferior y el Mesozoico, América Central estaba conformada por dos grandes provincias geológicas bien definidas: la Septentrional en el Norte y la Meridional en el Sur, culminando ambas en el Norte y Sur de Nicaragua respectivamente (tomado de Rivera, 2004).

Geológicamente, la Provincia Septentrional (que llega hasta la parte Norte de Nicaragua cubriendo las áreas de los departamentos de Nueva Segovia, parte de Jinotega, parte de la Región Autónoma del Atlántico Norte, etc.), representa una corteza continental asentada en rocas metamórficas paleozoicas sobre las cuales yacen rocas sedimentarias del Paleozoico, Mesozoico y rocas plutónicas.

La Provincia Meridional (que comprende la parte Sur de Nicaragua cubriendo áreas de departamentos como Río San Juan), está constituida por una corteza oceánica cretácica con basamento de rocas ígneas básicas superpuestas por sedimentos marinos y volcánicos del Terciario.

Los diversos eventos geológicos proporcionan las características empleadas en la subdivisión del país en las diferentes Provincias Geológicas (Figura 4). Se diferencian cinco Elementos Estructurales y/o Provincias Geológicas principales de Nicaragua:

- ❖ Cuenca de Sedimentación de la Costa Atlántica (Provincia Geológica de los Llanos de la Costa Atlántica).
- ❖ Plataforma Paleozoica y Mesozoica (Provincia Geológica del Norte).
- ❖ Provincia Volcánica Terciaria (Provincia Geológica Central).
- ❖ La Cuenca de Sedimentación de la Costa del Pacífico (Provincia Geológica de la Costa del Pacífico).
- ❖ La Depresión o Graben de Nicaragua.

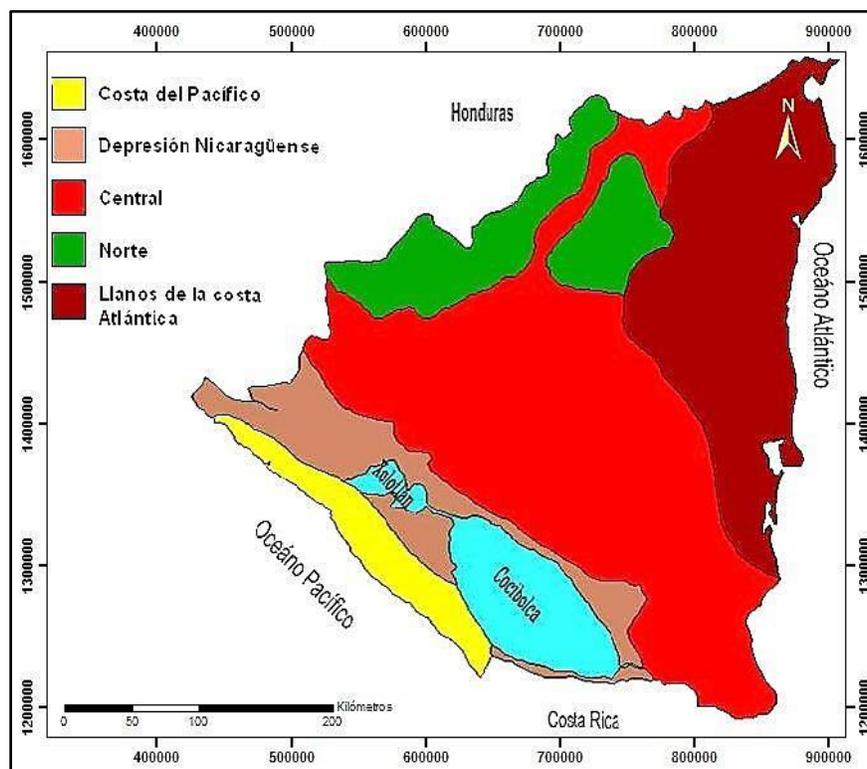


Figura 4. Provincias Geológicas de Nicaragua (tomado de Hodgson G, 1998).

### **2.3.1 Cuenca de Sedimentación de la Costa Atlántica (Provincia Geológica de los Llanos de la Costa Atlántica)**

La provincia de la Costa Atlántica se encuentra limitada al Sur y Noroeste por la Provincia Volcánica Terciaria, al Oeste parcialmente por la plataforma paleozoica y mesozoica y al Este por el mar Caribe (tomado de Rivera, 2004).

En la cuenca de La Mosquitia, la cual se localiza en esta Provincia, fueron depositados más de 5000 m de sedimentos de edad terciaria, provenientes de la plataforma y de áreas volcánicas antiguas. Es una de las más grandes cuencas de América Central.

Las estructuras de fallas siguen rumbo Noreste-Suroeste y son aproximadamente paralelas al eje del anticlinal del río Coco.

La Costa Atlántica está cubierta por una franja de sedimentos jóvenes del Mioceno Pleistoceno que recubre parcialmente las formaciones volcánicas terciarias y sedimentarias del Cretácico y Terciario inferior, constituidas por areniscas, lutitas y calizas que afloran en la región central. Se supone que el espesor de los sedimentos alcance algunas centenas de metros. Las capas superficiales del litoral están constituidas principalmente por arcillas y arena fina.

### **2.3.2 Plataforma Paleozoica y Mesozoica (Provincia Geológica del Norte)**

La plataforma paleozoica y mesozoica corresponde geológicamente a América Central Nuclear y la cuenca de Bocay. Geográficamente cubre el departamento de Nueva Segovia así como parte de Jinotega y de la Región Autónoma del Atlántico Norte. Al Este está cubierto por rocas volcánicas del Grupo Matagalpa y sedimentos de la cuenca de La Mosquitia. El margen Oeste está limitado aproximadamente por el Sistema de Fallas de Matiguás siguiendo el lineamiento Noroeste-Sureste de la Cordillera Amerrisque (interpretación de imágenes de radar, 1972). La estructura comprende rocas metamórficas, rocas sedimentarias plegadas y deformadas, interceptada por rocas plutónicas de la orogénesis laramídica (tomado de Rivera, 2004).

La plataforma paleo-mesozoica está atravesada por la continuación hacia el Norte de la falla de Matiguás y la zona de fractura Isabelia por la zona de fractura Murra.

El núcleo metamórfico de la Provincia del Norte ocupa los sectores al occidente de la Provincia Central y está constituido por rocas metamórficas paleozoicas (esquistos, filitas, cuarzitas, pizarras y rocas metavolcánicas) e intrusivos cretácicos-terciarios (granitos, granodioritas, dioritas, monzonita, cuarzo).

Las mesetas volcánicas y las serranías que circundan al núcleo metamórfico están constituidas por rocas sedimentarias cenozoica/mesozoicas (areniscas, conglomerados, lutitas, grauvacas, calizas) y rocas volcánicas terciarias (basaltos, andesitas, ignimbritas, tobas y aglomerados) de los Grupos Coyol y Matagalpa, de edad Mioceno y Oligoceno respectivamente.

### **2.3.3 Provincia Volcánica Terciaria (Provincia Geológica Central)**

La Provincia Geológica Central comprende básicamente las siguientes regiones geológicas:

- La Provincia Volcánica del Coyol, incluyendo las mesas ignimbríticas que se extienden en dirección Noroeste-Sureste desde la frontera con Honduras hasta el Departamento del Río San Juan.
- La Provincia Volcánica de Matagalpa.
- La Provincia de Pre-Matagalpa.
- Los sectores, Central y Sur de la Provincia Central están cubiertos principalmente por depósitos volcánicos terciarios (tobas, basaltos, andesitas e ignimbritas) que pertenecen a los grupos Matagalpa y Coyol y descansan generalmente sobre las formaciones sedimentarias terciarias.

Los valles ubicados en el Centro y al Norte de la Provincia Geológica Central están rellenos con depósitos aluviales de arena, grava, limo y arcillas (tomado de Rivera, 2004).

### **2.3.4 Cuenca de Sedimentación de la Costa del Pacífico (Provincia Geológica de la Costa del Pacífico)**

Está situada en la Depresión de la Fosa Mesoamericana, llegando en el Sureste hasta la cuenca de Limón, en Costa Rica (tomado de Rivera, 2004).

La secuencia estratigráfica está representada por conglomerados, arenisca, limonita, grauvacas, lutita y caliza, alternado con series volcánicas de cenizas piroclásticas y lava. La edad se extiende desde el Cenomaniano hasta el Plioceno. Las rocas más antiguas de la Formación Rivas (Cretácico superior) afloran en el sur, mientras las formaciones más jóvenes tales como El Fraile y Tamarindo del Mioceno, afloran en el norte.

Durante el Mioceno, los depósitos de las cuencas de sedimentación del Pacífico fueron plegados, formando un gran anticlinal de rumbo Noroeste-Sureste. La formación de esta estructura tectónica fue acompañada por el surgimiento de sistemas de fallas paralelas y perpendiculares a la dirección principal del anticlinal.

A finales del Plioceno la cuenca del Pacífico sufrió un levantamiento, exponiendo las rocas de las formaciones a la superficie. La Formación El Salto con elevaciones mayores de 100 m.s.n.m asevera este movimiento tectónico.

### **2.3.5 Depresión Nicaragüense**

En esta Provincia se localiza el área de estudio, correspondiente al sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate y sus alrededores. La caracterización de esta Provincia es la siguiente:

La Depresión o Graben Nicaragüense constituye una estructura tectónica joven, cruzando todo el Pacífico de Nicaragua desde el Golfo de Fonseca en el Noroeste, hasta la frontera con Costa Rica en el Sureste, alojada entre las dos estructuras más elevadas: el anticlinal de Rivas al Oeste y las Tierras Altas del Interior al Este (tomado de Rivera, 2004).

El Graben Nicaragüense se encuentra limitado por dos sistemas de fallas de rumbo Noroeste-Sureste y su origen está relacionado al movimiento de las placas Cocos y Caribe, a la Fosa Mesoamericana y a la actividad volcánica reciente. Las fallas pertenecen al sistema centroamericano, que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica.

La Depresión se encuentra rellena con depósitos piroclásticos y aluvionales, que provienen de la erosión de las estructuras marginales y de los depósitos de origen volcánico como lapillis, cenizas y lavas. La cadena volcánica reciente, parcialmente activa, atraviesa la Depresión desde el Noroeste hasta el Sureste.

El Graben se formó en consecuencia de la falla que provocó un hundimiento de las regiones comprendidas entre las fracturas y fue acompañado por actividades volcánicas a lo largo de las fallas principales.

Los principales fallamientos del Graben Nicaragüense ocurren paralelamente a la Costa del Pacífico, sin embargo, hay algunas estructuras importantes, como las fallas de Nejapa y Tipitapa, que tienen una orientación Norte-Sur y forman el llamado Graben de Managua.

### **CAPÍTULO III: GEOLOGÍA DEL ÁREA**

El área de estudio forma parte de la Provincia Geológica de la Depresión y se ubica dentro del Complejo Volcánico Telica, el cual comprende 6 volcanes: Cerro Los Portillos, La Ceiba, La Joya, Cerro de Agüero, Santa Clara y Telica. Cuyos rangos de edad varían desde el Pleistoceno a la era reciente (Lefebure, 1986).

La evolución de este Complejo está definida por sucesivas fases de actividad que han sido acompañadas por un progresivo desplazamiento del centro de emisión hacia el oeste, siendo su actual centro eruptivo el Volcán Telica.

El desarrollo del edificio volcánico también se caracteriza por fenómenos de colapso vulcano-tectónico, indicado por los relictos de dos marcadas estructuras caldéricas concéntricas: El Ojochal y Los Tablones, localizadas al este del Volcán Telica.

Las características geológicas y estructurales del sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate fueron definidas en base a la interpretación de fotografías aéreas, análisis del mapa topográfico, mapa de pendientes, mapa de modelo sombreado e imágenes satelitales, lo que permitió la creación de un Mapa Geológico-Estructural inicial a escala 1: 20 000, cuya litología y estructuras geológicas fueron definidas, corroboradas y detalladas a través de exploración de campo y muestreo de rocas, elaboración y análisis de secciones delgadas y análisis de Difractometría de Rayos X<sup>4</sup>. Todas estas etapas en conjunto permitieron crear el Mapa Geológico-Estructural del área de estudio de 36 km<sup>2</sup>.

La zona cartografiada se definió como una zona compuesta por rocas extrusivas correspondientes a flujos de lava de composición Andesítica, Basáltica, Andesita-Basáltica, y Depósitos Piroclásticos provenientes de los focos volcánicos del Telica, Pre-Telica, La Ceiba, La Joya y Santa Clara.

---

<sup>4</sup> Análisis por Difracción de Rayos X realizado por personal del laboratorio de LaGeo, empresa dedicada a la investigación geotérmica en El Salvador. La identificación, localización y descripción de las muestras analizadas por Difractometría de Rayos X se presentan en el Anexo C.

Considerando que las rocas extrusivas mencionadas en el párrafo anterior forman la mayor parte del área de estudio, se identificaron y definieron estas zonas como unidades litológicas principales.

Las unidades litológicas definidas y ordenadas cronológicamente según su antigüedad, de la más antigua a la más reciente, son las siguientes:

- Unidad I -Andesita
- Unidad II -Andesita-Basáltica
- Unidad III -Depósitos Piroclásticos
- Unidad IV -Basalto
- Unidad V -Andesita-Basáltica del Volcán Santa Clara
- Unidad VI -Depósitos Coluviales

La antigüedad de dichas unidades está basada en estudios de campo y no en dataciones radiométricas por lo cual la secuencia de las mismas no se encuentra exenta de errores.

En las Unidades Litológicas I y II se localizan zonas de alteración hidrotermal, las cuales consisten en suelos calientes, fumarolas activas, manantiales termales y lodos hirvientes (La alteración hidrotermal se retomará con mayor énfasis en el Capítulo V).

### 3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

#### 3.1.1 Unidad I - Andesita

La Unidad I es la más extensa de las unidades litológicas, cubriendo un área aproximada de 26 km<sup>2</sup>. Se presenta principalmente al este del área de estudio, al norte y sur de la estructura volcánica antigua La Ceiba y al sur de la caldera La Joya.

Esta Unidad se caracteriza por numerosos flujos de lava los cuales presentan variaciones en textura, color y minerales de alteración. La alteración hidrotermal e intemperismo local son las causas esenciales de los cambios que ocurren en esta Unidad.

La Unidad Andesita corresponde a coladas de lavas intermedias, originadas como resultado de la intensa actividad volcánica procedente de las estructuras volcánicas antiguas de La Joya y La Ceiba.

Las andesitas se presentan de manera masiva en grandes bloques y flujos laminares con tonalidades desde gris claro a gris rojizo. Las lavas masivas presentan textura porfirítica a fanerítica, en cambio los flujos de lavas laminares son de textura afanítica principalmente.

En el sureste, próximo a la estructura caldérica Los Tablones se presentan flujos de lava andesítica laminar y más hacia el este, estos flujos son sobreyacidos por flujos de lava andesítica masiva (Figura 5).

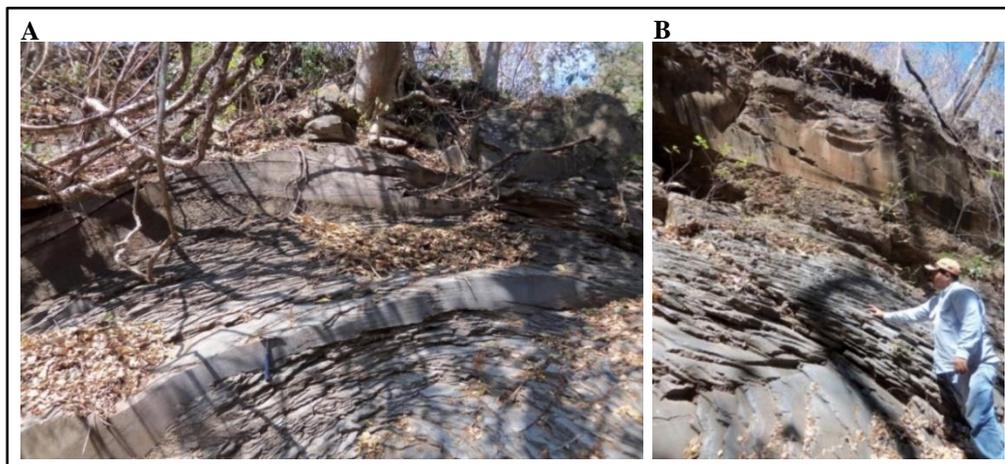


Figura 5. A) Flujos de lava andesítica laminar en la zona sureste de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 522897 Y 1392431. B) Flujos de lava masiva en contacto con flujos de lava laminar característicos de esta zona. Coordenadas: X 522524 Y 1392473.

Así mismo, la Unidad Andesita se observa al norte de la estructura caldérica Los Tablones, donde se localiza un flujo de lava andesítico de carácter masivo y de color gris oscuro. Macroscópicamente la roca presenta dureza alta, textura porfirítica, matriz fina, con abundantes piroxenos y plagioclasas subhedrales (Figura 6).

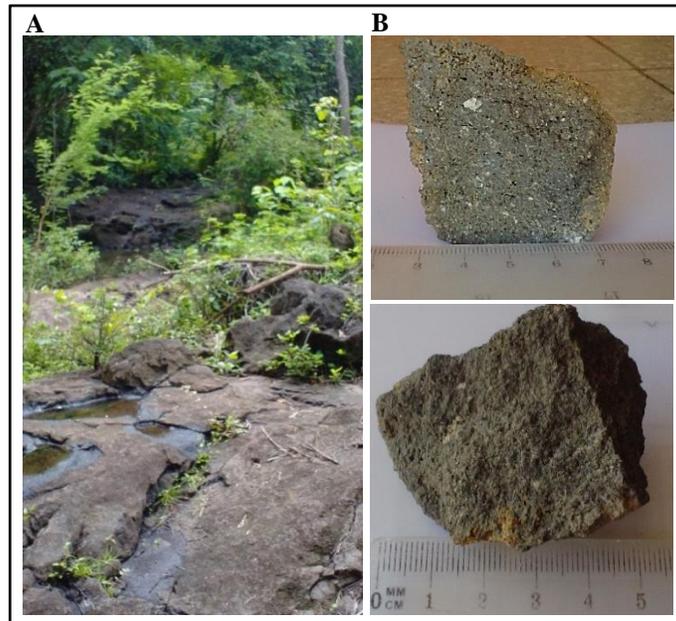


Figura 6. A) Flujo de lava andesítica localizado al norte de la estructura caldérica Los Tablones. B) Muestras de mano correspondientes al flujo de lava de la figura A. Coordenadas: X 522701 Y 1395997.

Al suroeste de la estructura caldérica La Joya aflora un flujo de lava andesítico. Macroscópicamente, la muestra identificada como M5-2406, es de color gris rojizo, dureza media, de textura porfirítica y posee abundantes plagioclasas subhedrales; algunas de estas se encuentran alteradas y se observan de color rojizo (Figura 7).



Figura 7. Muestra de mano M5-2406. Andesita de textura porfirítica correspondiente a la zona suroeste de la estructura caldérica La Joya. Coordenadas: X 519225 Y 1392923.

Microscópicamente la muestra presenta textura porfirítica semifluidal, compuesta por cristales subhedrales de plagioclasas, tipo Labradorita, y cristales subhedrales de piroxenos; inmersos en una matriz microlítica fina, formada por vidrio volcánico sano con abundantes microlitos de plagioclasas orientados en dirección del flujo y en menor grado por microcristales de piroxenos (Figura 8).

También se observa la presencia aislada de minerales opacos, algunos de ellos presentan forma cúbica que podrían asociarse a Pirita.

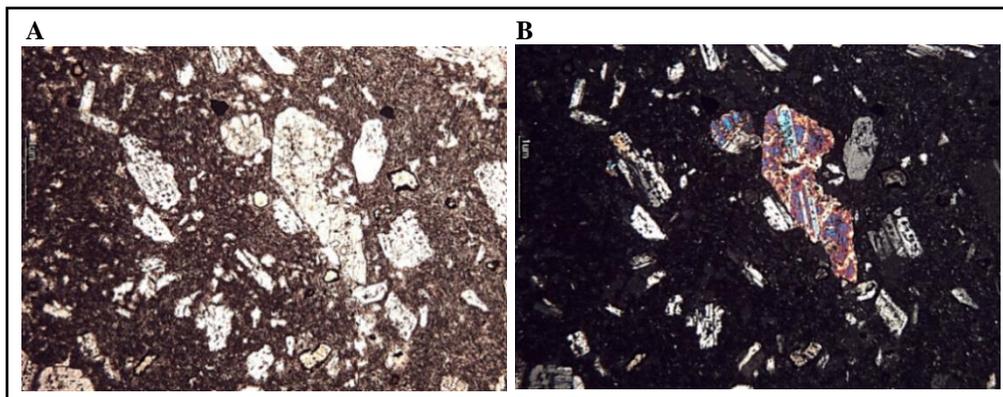


Figura 8. A) Nícoles paralelos, aumento 10x. Andesita con cristales subhedrales a anhedrales de plagioclasas y piroxenos inmersos en una matriz de vidrio volcánico y microlitos de plagioclasas orientados en dirección del flujo, minerales opacos de forma aislada. B) Nícoles cruzados aumento 10x. Coordenadas: X 519225 Y 1392923.

Otro flujo de lava andesítica se localiza al sureste de la estructura caldérica La Joya. Macroscópicamente, la lava identificada como M4-1305, es de color blanquecino, lo cual la diferencia del flujo anterior, presentando dureza media con cristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos. Su matriz presenta alteración parcial a minerales arcillosos (Figura 9).

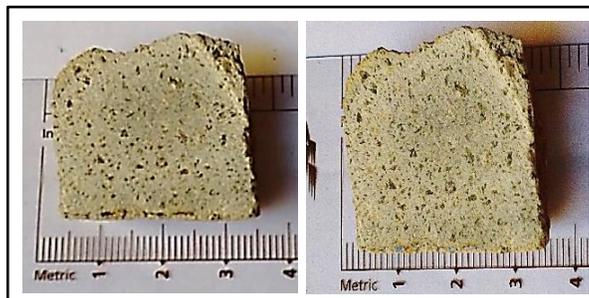


Figura 9. Muestra de mano M4-1305. Andesita de color blanquecina, presencia de minerales arcillosos en la matriz. La muestra corresponde a un flujo de lava localizado al sureste de la estructura caldérica La Joya. Coordenadas: X 520248 Y 1392846.

Microscópicamente esta muestra presenta una textura porfírica fluidal, con fenocristales subhedrales de plagioclasas de tipo Andesina y Labradorita, los cuales se encuentran parcialmente alterados a minerales arcillosos. Los fenocristales de piroxenos son subhedrales y abundantes, a diferencia de las plagioclasas no se encuentran alterados. En menor proporción se observaron minerales opacos diseminados en la muestra (Figura 10).

Los fenocristales se encuentran inmersos en una matriz compuesta por vidrio volcánico y microlitos de plagioclasas que forman textura intersertal entre sí.

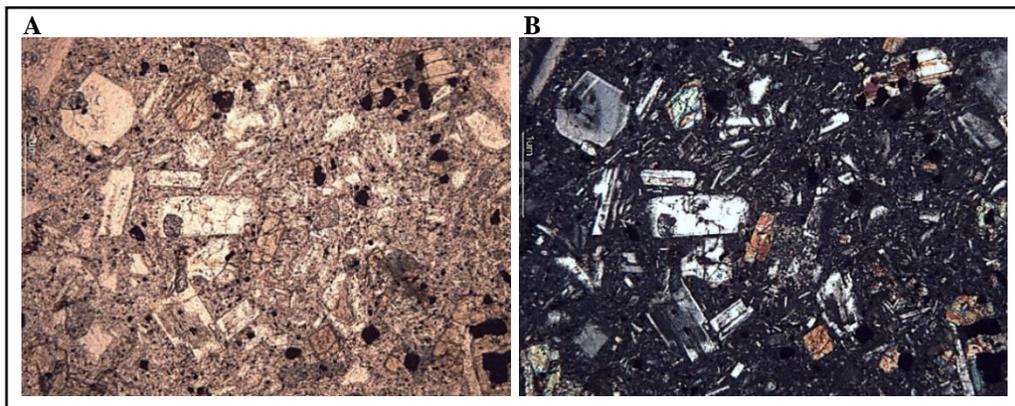


Figura 10. A) Nícoles paralelos, aumento 10x. Andesita con abundantes fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos inmersos en una matriz microlítica de plagioclasas y vidrio volcánico, los minerales máficos presentan poca alteración, abundantes minerales opacos diseminados en la muestra. B) Nícoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 520248 Y 1392846.

Rocas andesíticas afloran al noroeste del área de estudio, en sitios próximos a las comunidades de El Carol, El Caracol y El Ñajo. Estas rocas se disponen en forma de grandes bloques, presentando características similares, tanto macroscópica como microscópicamente.

Se caracterizan por su textura de porfírica a fanerítica, dureza moderada a alta, abundantes fenocristales subhedrales de plagioclasas de tamaños variables entre 2 mm y 7 mm y en menor proporción por cristales subhedrales de piroxenos (Figura 11).

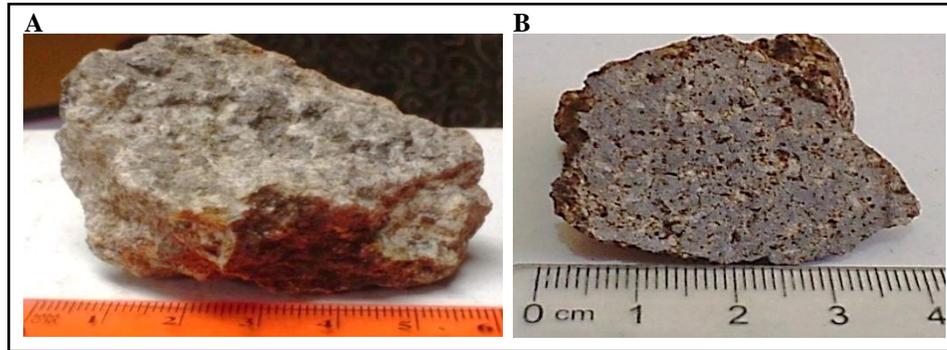


Figura 11. Muestras de mano de lava andesítica, se observan de color gris y con abundantes plagioclasas. Coordenadas: A) X 521051 Y 1397884 B) X 518248 Y 1397080, localizadas al centro y noroeste del área de estudio, respectivamente.

Microscópicamente las muestras presentan textura glomeroporfídica fluidal, abundantes fenocristales de plagioclasas euhedrales a subhedrales de tipo Andesina y Labradorita y clinopiroxenos subhedrales, inmersos en una matriz fina, tipo afanítica formada por abundantes microlitos de plagioclasas y vidrio volcánico; se observaron numerosos minerales opacos (Figuras 12 y 13).

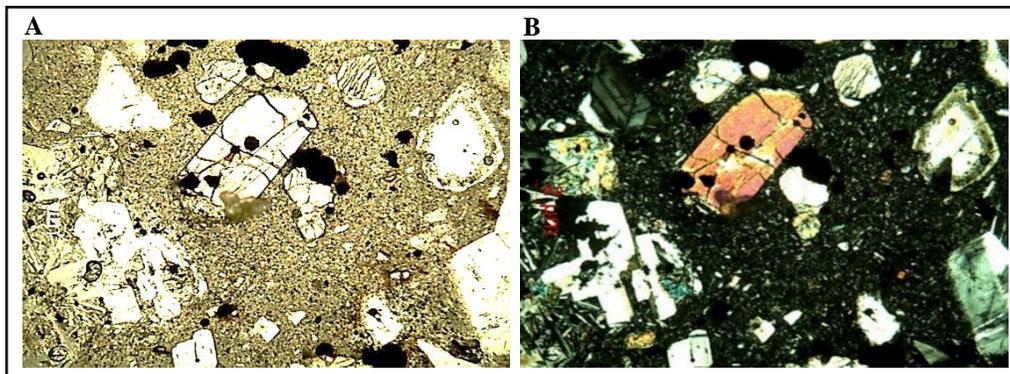


Figura 12. A) Nícoles paralelos, aumento 4x. Andesita con fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos inmersos en una matriz fina con abundantes microlitos de plagioclasas y vidrio volcánico; contiene numerosos minerales opacos. B) Nícoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 518350 Y 1396179.

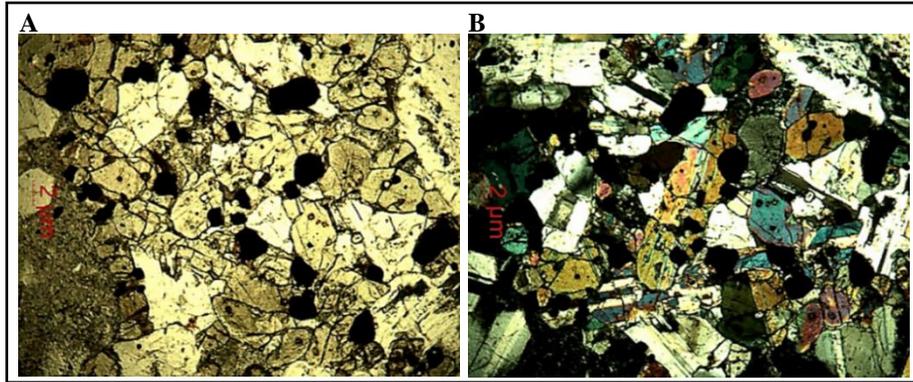


Figura 13. A) Nicoles paralelos, aumento 4x. Andesita de textura glomeroporfídica, compuesta por plagioclasas y piroxenos granulares, abundantes minerales opacos. B) Nicoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 518350 Y 1396179.

Dentro de la Unidad I la litología prevaleciente es andesita. Sin embargo, identificamos afloramientos en los cuales se observan depósitos de materiales de distinta composición, algunos sobreyacidos por flujos de lava andesítica. Entre estos tenemos:

a) Afloramientos localizados al este de la estructura caldérica Los Tablones y al oeste de la estructura volcánica semicircular El Ojochal, ambos caracterizados por contacto entre lava andesítica y escoria de arrastre. La andesita se observa de color gris oscuro, masiva y fracturada; el horizonte de escoria es de color rojizo y se encuentra clastosoportada (Figura 14).



Figura 14. Contacto entre andesita y escoria en la zona oeste de la estructura volcánica semicircular El Ojochal, el espesor del horizonte de andesita es de 2 m y del horizonte de escoria es de 3.5 m aproximadamente. Coordenadas: X 520372 Y 1395130.

b) Otra secuencia de diferentes litologías se observó al noroeste de la estructura volcánica semicircular El Ojochal. Este afloramiento presenta tres tipos de materiales distintos, en la parte superior observamos un flujo de lava andesítica fracturada, de color gris, con espesor de 3 m, la base del flujo se observa de forma laminar; el segundo horizonte corresponde a escoria de coloración blanquecina y rojiza de 1.20 m de espesor; el último horizonte del afloramiento está compuesto por toba pumítica gris rosácea de 1.46 m de espesor aproximadamente (Figura 15).

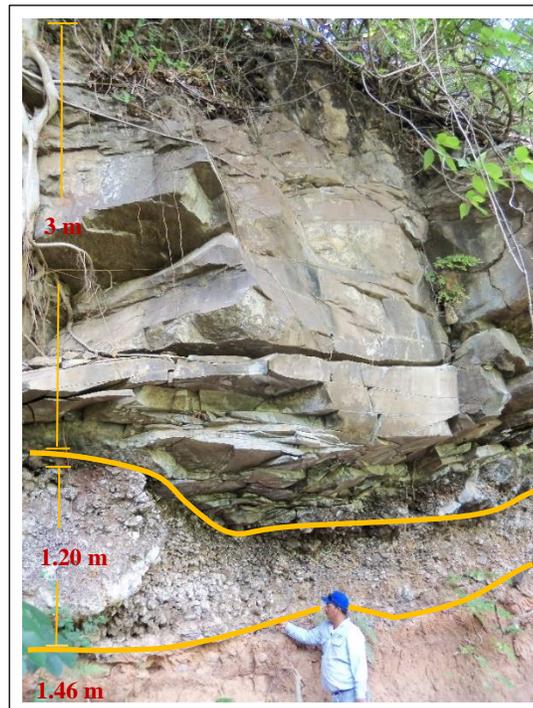


Figura 15. Afloramiento de aproximadamente 5.6 m de altura, se observan tres horizontes de diferente composición, de la base al techo con su espesor correspondiente tenemos: toba pumítica (1.46 m), escoria (1.20 m) y andesita (3 m). Coordenadas: X 520599 Y 1395562.

c) Por otra parte en la zona noroeste de Los Tablones existe un afloramiento de aproximadamente 8.8 m compuesto por tres horizontes. En el estrato superior se observó andesita muy fracturada de 8 m de espesor, seguida por escoria basal presentando alteración blanquecina en superficie, tiene 50 cm de espesor, y en la parte inferior toba pumítica rojiza con espesor aproximado de 30 cm (Figura 16).

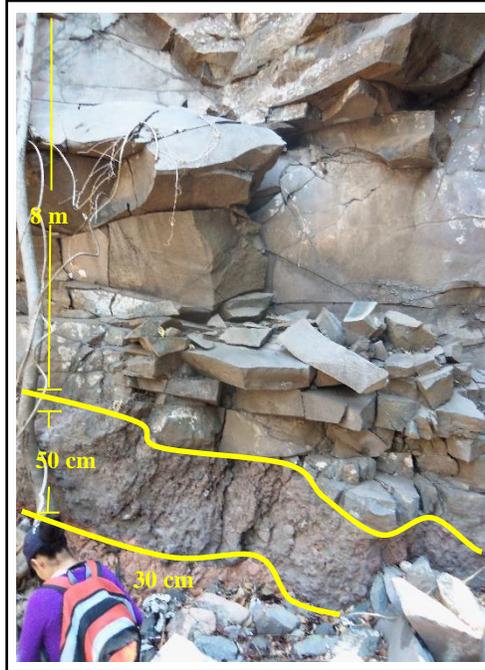


Figura 16. Afloramiento de andesita en contacto con escoria basal y toba pumítica, 8.8 m de altura aproximadamente, localizado en la zona noroeste de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 521457 Y 1396029.

La muestra de toba pumítica presenta dureza baja, está compuesta por 10% de líticos de pómez, 5% de cristales de plagioclasas subangulares y 8% de vidrio volcánico (obsidiana). Los fragmentos varían de forma angular a subangular, de tamaño medio a fino y clasificación media. Su matriz es arcillosa y representa el 77 % del volumen total de la muestra (Figura 17).

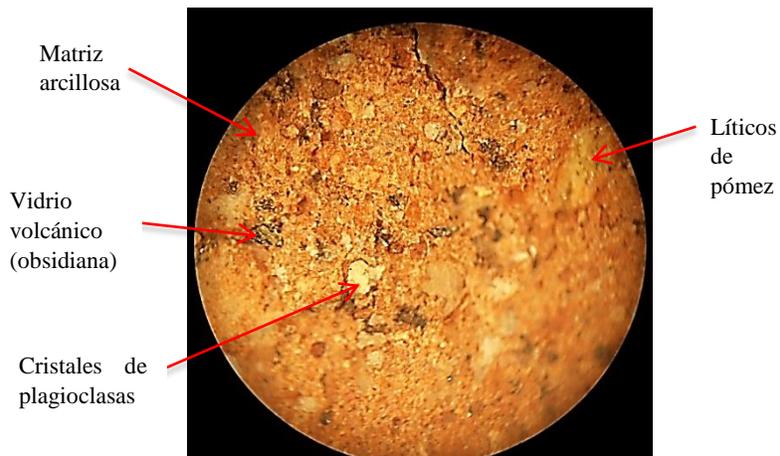


Figura 17. Toba pumítica correspondiente a la zona noroeste de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 521455 Y 1396024.

d) Así mismo, dentro de la Unidad I - Andesita, al este de la estructura caldérica Los Tablones se observa un afloramiento formado por intercalaciones entre horizontes de toba pumítica y horizontes de escoria. Este afloramiento tiene una altura aproximada de 5.40 m (Figura 18).

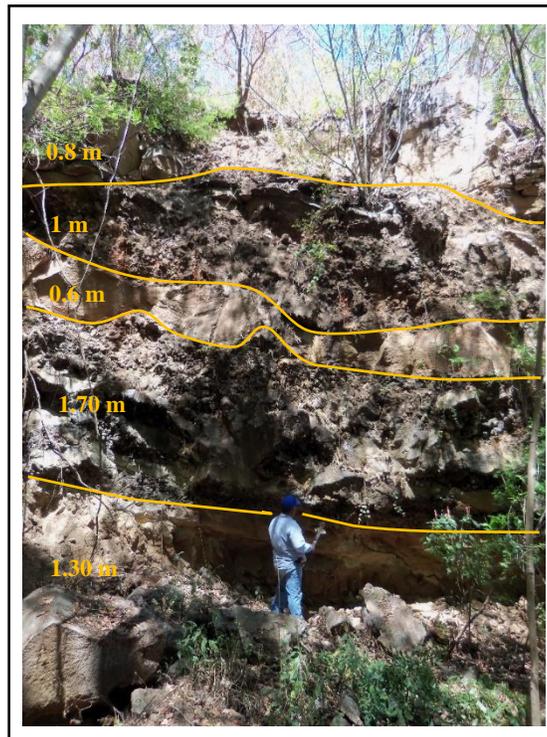


Figura 18. Intercalaciones entre horizontes de toba pumítica y escoria localizado en la zona este de la estructura caldérica Los Tablones. Coordenadas: X 523130 Y 1394209.

e) En la zona noroeste del área de estudio, al norte de la comunidad El Carol se observó un material definido como ignimbrita no consolidada. La parte superior es de aproximadamente 2 m, el material es fino y presenta una coloración amarillenta debido a la meteorización, continuando con material más compacto, de color gris claro y con abundantes fragmentos líticos de lava andesítica y pómez, de distintos tamaños entre 2 cm y 3 m (Figura 19).

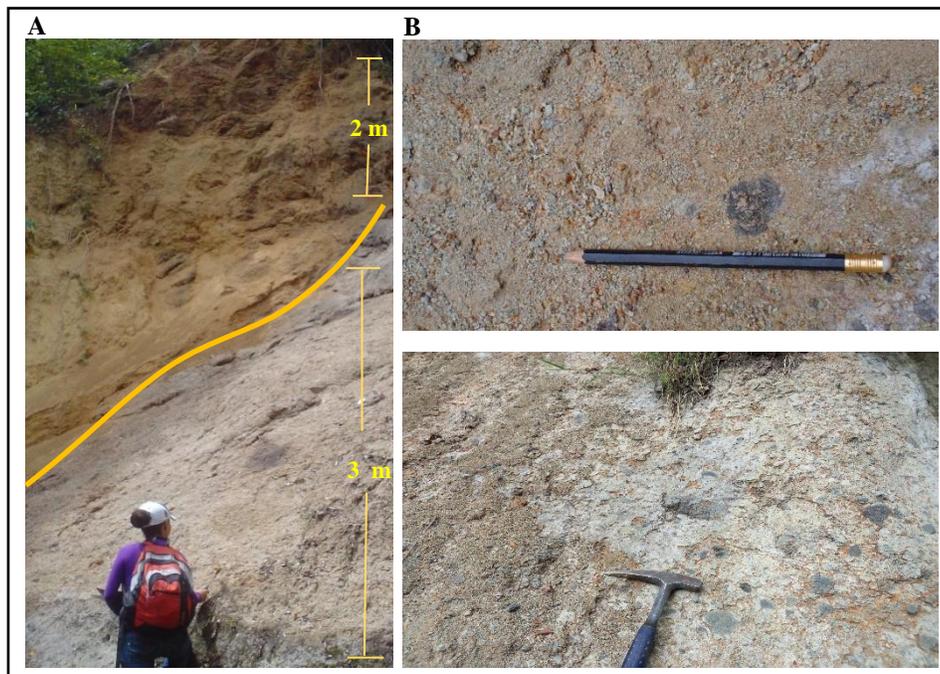


Figura 19. A) Depósito de ignimbrita no consolidada localizada al noroeste del área de estudio. La parte superior se observa erosionada e intemperizada. Coordenadas: X 518708 Y 1396018. B) Líticos de composición andesítica y pómez en el depósito de ignimbrita no consolidada. Coordenadas: X 518708 Y 1396013.

f) En las cercanías del borde suroeste de la estructura caldérica La Joya, se observó un depósito de caída, color gris claro, presenta buena clasificación, es homogéneo en cuanto a tamaño de fragmentos (lapilli 2 mm – 64 mm)<sup>5</sup>, composición y color (Figura 20).

Bajo lupa binocular, la muestra de este depósito presenta un color gris rojizo, es deleznable, tiene fragmentos de lava gris oscuro de composición andesítica, cristales angulares de plagioclasas, clasificación moderada con tamaños de fragmentos entre 4 mm y 6 mm, fue definida como toba-lapilli.

Así mismo, dentro de este depósito se encuentra un horizonte pequeño de aproximadamente 3 cm de espesor, clasificado como toba fina.

<sup>5</sup> La clasificación granulométrica de piroclastos y Depósitos Piroclásticos utilizada, está basada en el artículo “Nomenclatura y Clasificación Descriptiva de Depósitos Piroclásticos y Fragmentos: Recomendaciones de la Subcomisión de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS por sus siglas en inglés) sobre la Sistemática de las Rocas Ígneas” publicada por R. Schmid en 1980. Se presenta con detalle en el Anexo D.

Esta última presenta color rojizo claro, dureza media, los fragmentos líticos de lava de composición andesítica, son de color oscuro, en estos se observaron cristales subangulares de plagioclasas y piroxenos de tamaño fino a medio y una clasificación moderada. Se observa que los máficos están alterándose a minerales de arcillas.

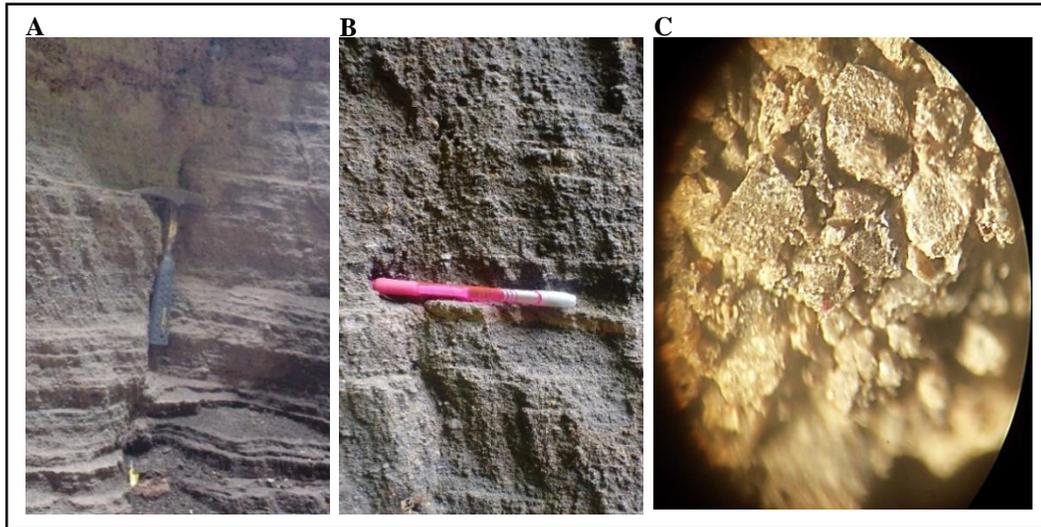


Figura 20. A) y B) Depósito de caída en el borde suroeste de la estructura caldérica La Joya. C) Muestra de toba-lapilli observada bajo lupa binocular, fragmentos de lava de composición andesítica con tamaños entre 4 mm y 6 mm. Coordenadas para todas las figuras: X 519223 Y 1393044.

La Unidad Andesita se encuentra afectada por la influencia de los fluidos hidrotermales en la zona norte, centro y noroeste del área cartografiada, en las comunidades El Ñajo, El Ojochal, El Carol y Agua Fría, respectivamente. La descripción y caracterización de cada una de estas zonas se presenta en el Capítulo V correspondiente a Alteración Hidrotermal.

### 3.1.2 Unidad II - Andesita-Basáltica

Esta Unidad se presenta al norte de la estructura caldérica La Joya, cubriendo un área aproximada de 7 km<sup>2</sup>. Se extiende en la comunidad Las Polvaleras y en sitios adyacentes a las comunidades El Carol y Piedras Quemadas.

La Unidad II - Andesita-Basáltica se encuentra estratigráficamente por encima de la Unidad I - Andesita. Se presenta en flujos masivos, vesiculares, en dirección sur a norte (Figura 21).

Macroscópicamente las muestras de esta Unidad son de color gris oscuro, de dureza alta, textura porfirítica, con fenocristales subhedrales de plagioclasas, piroxenos y olivino. Se observan abundantes vesículas y amígdalas circulares y ovaladas. Las amígdalas presentan relleno parcial de minerales de zeolitas y ópalo hialita (Figura 22).

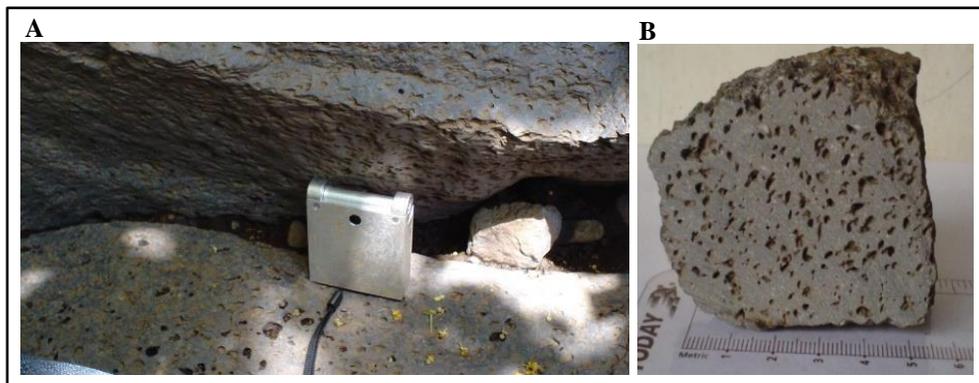


Figura 21. A) Flujo andesítico basáltico vesicular, de color gris. Aflora en la zona este de la comunidad El Carol. B) Muestra de mano del flujo de lava de la figura A, se observan abundantes vesículas y amígdalas. Coordenadas: X 519782 Y 1395633.



Figura 22. Figuras A y B Andesita basáltica con minerales de zeolitas en amígdalas, localizada al norte de la comunidad Las Polvaleras. Coordenadas: X 519639 Y 1397709. C) Ópalo hialita desarrollado en amígdalas de andesita basáltica. Coordenadas: X 518931 Y 1395902.

Microscópicamente esta muestra tiene textura porfirítica fluidal y vesicular, está compuesta por fenocristales euhedrales a subhedrales de plagioclasas de tipo Andesina y Labradorita, clinopiroxenos subhedrales y cristales anhedrales de olivino; inmersos en una matriz compuesta por vidrio volcánico, microlitos de plagioclasas y piroxenos granulares (Figura 23).

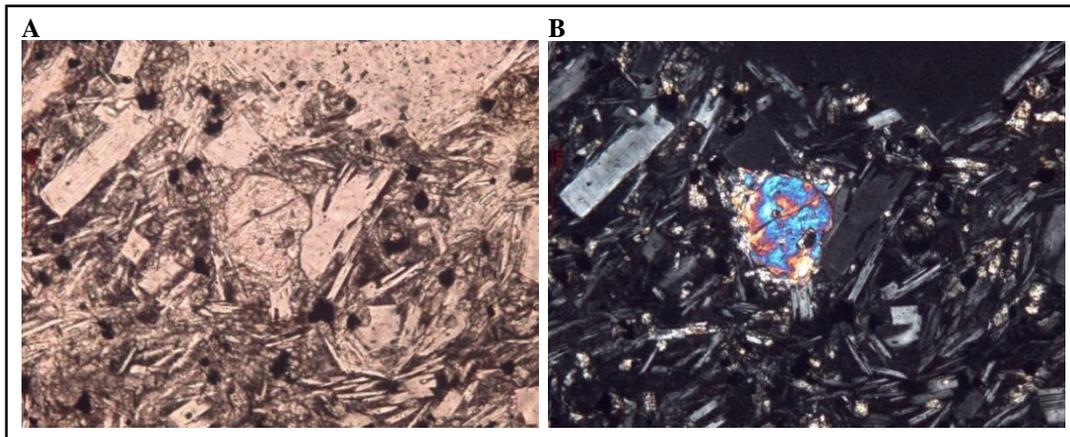


Figura 23. A) Nícoles paralelos, aumento 20x. Andesita basáltica de textura porfirítica fluidal, fenocristales euhedrales a subhedrales de plagioclasas y clinopiroxenos subhedrales inmersos en una matriz compuesta por vidrio volcánico, microlitos de plagioclasas y piroxenos, abundantes minerales opacos. B) Nícoles cruzados, aumento 20x. Coordenadas: X 519782 Y 1395633.

### 3.1.3 Unidad III - Depósitos Piroclásticos

En la zona cartografiada se identificaron depósitos piroclásticos de caída que fueron formados posiblemente, después que el material ígneo fue expulsado de forma explosiva en una columna eruptiva ascendente y se depositó en zonas próximas a su centro de emisión, Dichos depósitos cubren un área aproximada de 1.3 km<sup>2</sup>.

Los depósitos de esta Unidad se han identificado en dos sectores del área de estudio:

- A) El primero se localiza inmediatamente al norte del borde caldérico de La Joya, por lo que se considera que dicho material sea producto de esta estructura, depositándose por encima de la Unidad II - Andesita-Basáltica y la Unidad I - Andesita, lo cual indica que este depósito es más joven que las unidades mencionadas.

B) El segundo sector donde aflora la Unidad de Depósitos Piroclásticos se ubica al sureste del área de estudio, próximo al poblado San Jacinto y de igual manera se ubica por encima de la Unidad I - Andesita. El origen de este depósito no se pudo correlacionar con una fuente volcánica-estructural.

Los depósitos correspondientes al sector A se caracterizan por ser un material compacto, sobreyaciendo en el suelo, el cual fue arrojado por las posibles erupciones volcánicas violentas o explosivas que dieron como resultado su deposición. Cubren un área aproximada de 0.65 km<sup>2</sup>.

Este material es de color gris-café claro, de baja dureza, contiene líticos de lava andesítica gruesos y redondeados, cristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos, fragmentos de pómez; el tamaño de sus componentes varía en el rango de ceniza fina (menores de 0.062 mm) y bloques volcánicos (mayor a 64 mm), la matriz es fina y de composición arcillosa, la muestra presenta buena clasificación y fue definida como toba cinerolítica (Figura 24).

Las variaciones entre los afloramientos del sector A de esta Unidad se basan principalmente en el grado de compacidad de los depósitos y el contenido de líticos en ellos. Los depósitos más alejados de la estructura caldérica La Joya son menos compactos y presentan mayor porcentaje de líticos que los depósitos cercanos al posible centro de emisión.



Figura 24. A) Toba cinerolítica sobreyaciendo en las cercanías de la estructura caldérica La Joya. Coordenadas: X 519813 Y 1393785. B) Toba cinerolítica en el límite norte del sector A de la Unidad de Depósitos Piroclásticos. Coordenadas: X 519891 Y 1394801.

Por otra parte, los depósitos correspondientes al sector B corresponden a rocas volcanoclásticas o epiclásticas, producto de la deposición de materiales producidos por el retrabajo de materiales piroclásticos primarios, que generalmente han sido transportados por flujos gravitacionales de sedimentos, por acción del viento y agua (modificado de Spalletti, D' Elia, 2010).

La muestra obtenida presenta color anaranjado mate, dureza media, cristales pequeños de piroxenos subangulares, plagioclasas fragmentadas y alteradas, fragmentos de pómez y líticos subangulares, las variaciones de tamaño de sus componentes oscila entre ceniza fina (menores de 0.062 mm) y lapilli (4 mm - 64 mm), tiene mala clasificación (Figura 25).

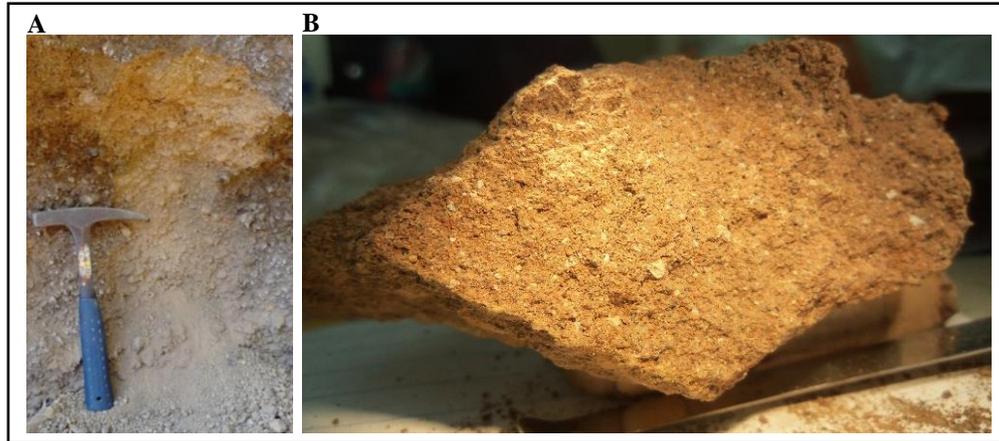


Figura 25. A) Depósito de rocas epiclásticas localizado al sureste del área de estudio, en el sector B de la Unidad de Depósitos Piroclásticos. Coordenadas: X 523362 Y 1391798. B) Muestra de mano correspondiente al depósito de la figura A.

Microscópicamente, el depósito fue clasificado como una toba litocristalina. Presenta abundantes líticos de lava andesítica, aproximadamente 60% y en menor proporción, menos del 40%, formado por cristales de plagioclasas subhedrales a euhedrales tipo Labradorita y Andesina, cristales subhedrales a anhedrales de piroxenos y minerales opacos. La matriz es muy fina, los cristales y líticos se encuentran agrupados unos con otros, la muestra se encuentra alterada a minerales arcillosos (Figura 26).

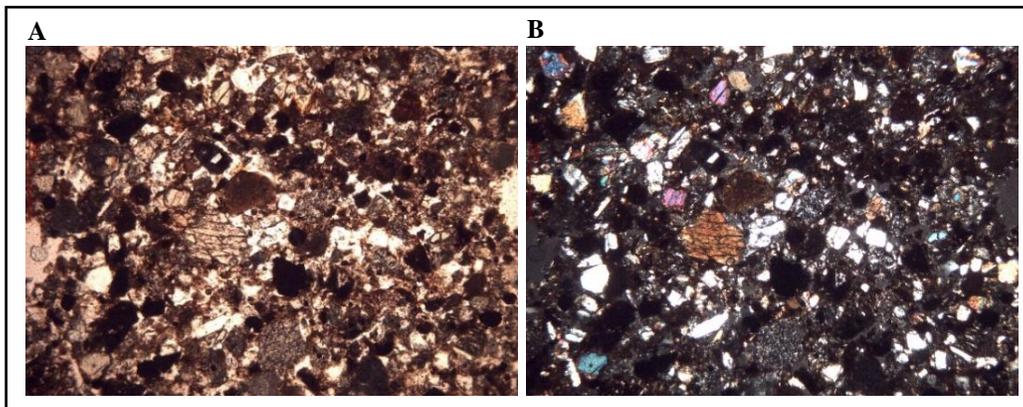


Figura 26. A) Nícoles paralelos, aumento 4x. Toba litocristalina, se observan cristales subhedrales de plagioclasas, piroxenos y abundantes minerales opacos. B) Nícoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 523362 Y 1391798.

Otro ejemplar en esta zona (sureste del área de estudio), identificado como M1-1803, se definió como toba litocristalina con gradación inversa, presenta color amarillento, está bien clasificada, es ligera, contiene pómez subordinada y subredondeada, fragmentos de lava oscuros y escoriáceos y abundantes feldespatos aglutinados en una matriz fina (Figura 27).

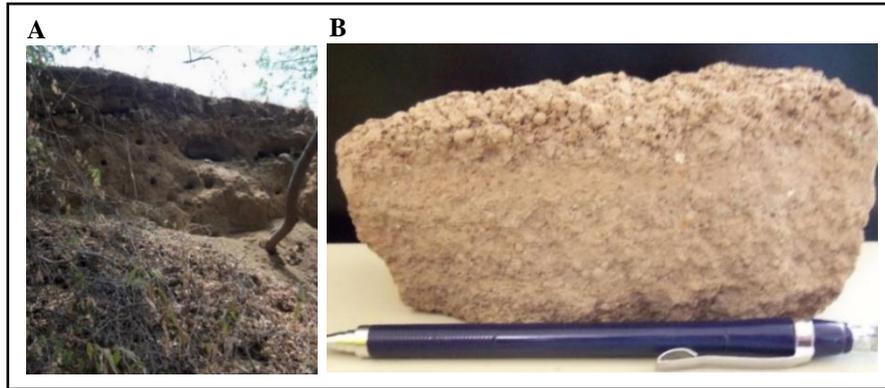


Figura 27. A) Depósito de toba litocristalina de color amarillento, ubicado al sureste del área de estudio. B) Muestra de mano de toba litocristalina con gradación inversa, sus componentes miden de la base al techo < 1 mm a 4 mm. Coordenadas: X 523367 Y 1392141.

Microscópicamente presenta abundantes fragmentos de lava de composición intermedia de diferentes tamaños, subangulosos; en menor grado se observan cristales de plagioclasas subhedrales, algunos minerales opacos y fragmentos de pómez. Los líticos son más grandes que los cristales de plagioclasas.

La textura de la muestra es piroclástica y su matriz es fina de composición arcillosa, representa el 50% del volumen total. La muestra contiene aproximadamente 25% de líticos, 20% de cristales y 5% de minerales opacos (Figura 28).

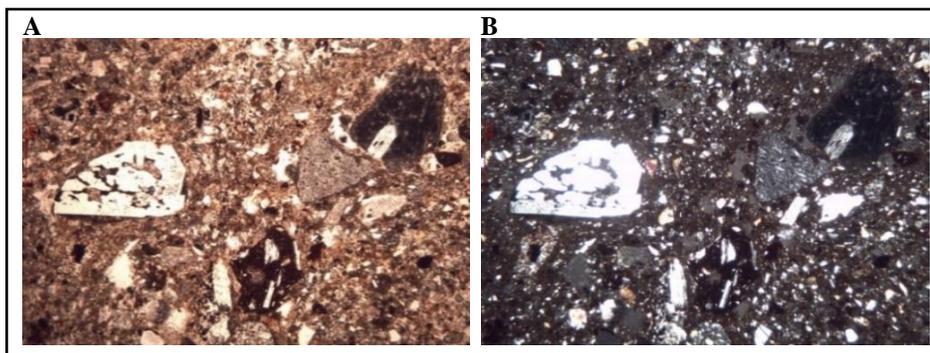


Figura 28. A) Nícoles paralelos, aumento 4x. Toba litocristalina. Se observa matriz fina alterada a arcilla. Contiene líticos de andesita, cristales subhedrales y anhedrales de plagioclasas y piroxenos. B) Nícoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 523367 Y 1392141.

### 3.1.4 Unidad IV - Basalto

Basándonos en la fotointerpretación realizada y en los resultados petrográficos y geoquímicos del estudio “The Age and Geochemical History of The Telica Volcanic Complex, Central Nicaraguan Volcanic Front” efectuado por Jessica Lynn Olney en el año 2006, se definió la Unidad IV – Basalto, la cual cubre un área aproximada de 1.13 km<sup>2</sup> y se ubica desde el límite sur hacia el norte de la estructura volcánica Pre-Telica localizada en la zona oeste del área de estudio e incluye sitios próximos a la comunidad Agua Fría.

De acuerdo a Olney se localizan rocas basálticas al norte y noreste del Volcán Telica definiendo que estas rocas son producto de dicho volcán. Algunas de las muestras estudiadas presentan las siguientes características petrográficas<sup>6</sup>:

- Muestra localizada al oeste de la estructura volcánica Pre-Telica: contiene fenocristales de plagioclasas (< 2.65 mm) euhedrales a subhedrales, con zonación débil, piroxenos tipo augita (< 1.40 mm) y olivino (< 0.62 mm) inmersos en una matriz vesicular, microcristalina de vidrio volcánico alterado, feldespatos y minerales opacos. El olivino está muy alterado a iddingsita a través de fracturas.
- Muestra localizada al oeste de la estructura volcánica La Ceiba: presenta fenocristales de plagioclasas (< 1 mm) euhedrales a subhedrales, con zonación débil, piroxenos tipo augita (< 0.70 mm) y olivino (0.20 mm) inmersos en una matriz criptocristalina, vesicular y altamente oxidada. El olivino se presenta solo o asociado con minerales opacos.

### 3.1.5 Unidad V - Andesita-Basáltica del Volcán Santa Clara

Esta Unidad cubre una superficie aproximada de 0.5 km<sup>2</sup> y se sitúa al sur del área de estudio. Su nombre deriva de la composición de sus flujos y del centro de emisión del cual proceden, que se atribuye al Volcán Santa Clara. El Volcán Santa Clara es un volcán compuesto con su cono bien conservado. Tiene una altura de 834 m.s.n.m y se localiza al sur de la estructura caldérica La Joya.

---

<sup>6</sup> Los resultados petrográficos y geoquímicos de las muestras correspondientes a basaltos analizadas en el estudio de Olney y localizadas en el área de estudio se presentan en los Anexos E y E.1, respectivamente.

Los flujos de lava de este volcán se extienden hacia el oeste del poblado San Jacinto y presentan características particulares, como el tamaño de sus fenocristales los cuales son fácilmente observables en la superficie de los flujos y permiten su diferenciación de otros flujos lávicos dentro del área de estudio (Figura 29).

Macroscópicamente presentan color gris oscuro y dureza alta, son de textura fanerítica y vesicular. Contienen fenocristales subhedrales de plagioclasas de tamaño entre 0.8 cm a 3 cm, piroxenos que miden entre 0.4 cm y 0.6 cm aproximadamente, y pequeños cristales de olivino, menores de 0.4 cm, observados en la superficie de los flujos (Figura 30). La matriz es fina con escasa oxidación la cual se observa de coloración rojiza.

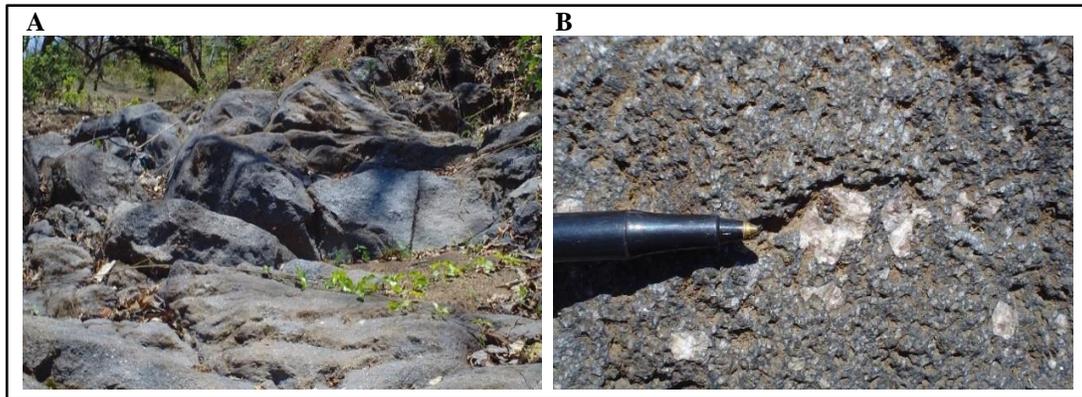


Figura 29. A) Flujo de lava de composición andesita basáltica proveniente del Volcán Santa Clara. B) Fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos identificados en la superficie del flujo. Coordenadas: X 520472 Y 1391845.

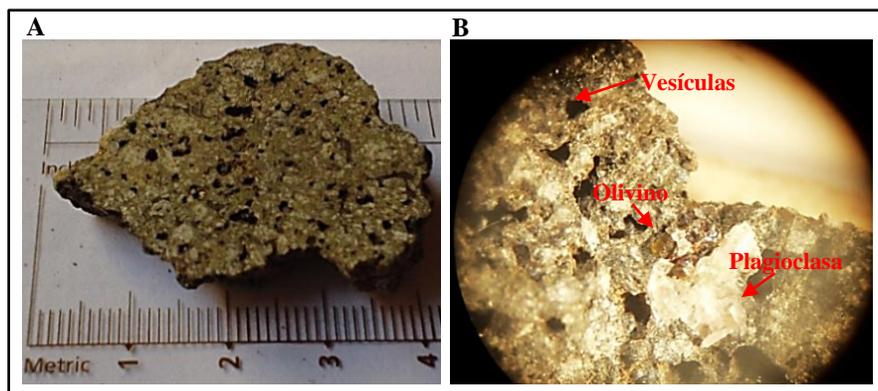


Figura 30. A) Muestra de mano de andesita basáltica correspondiente a un flujo de lava del Volcán Santa Clara. B) Fotografía desde lupa binocular en la cual se observan cristales de olivino, plagioclasas y abundantes vesículas. Coordenadas: X 522888 Y 1391653.

Microscópicamente las rocas presentan textura porfirítica vesicular seriada, tienen cristales anhedrales de olivino rodeados de iddingsita, la cual aparece frecuentemente por la alteración del olivino (Figura 31), plagioclasas subhedrales, zonadas y abundantes clinopiroxenos subhedrales, inmersos en una matriz microcristalina, fina, formada por vidrio volcánico, plagioclasas y piroxenos subhedrales y minerales opacos; se observa la oxidación de algunos minerales (Figura 32).

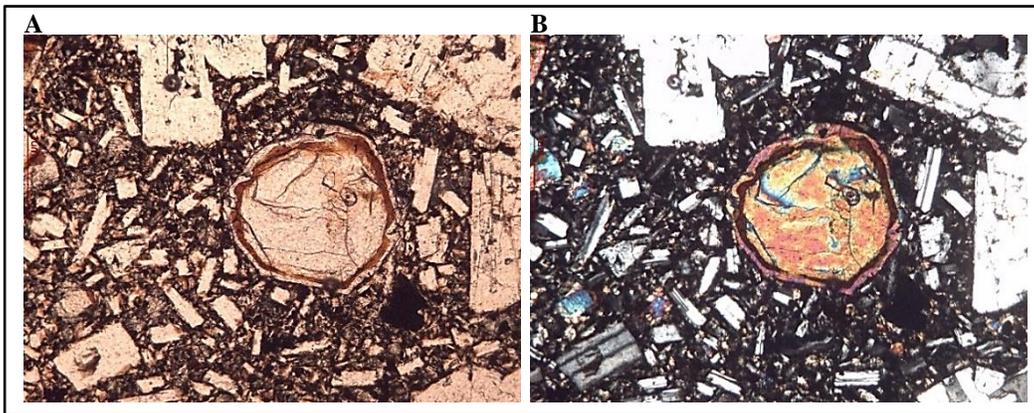


Figura 31. A) Nícoles paralelos, aumento 10x. Andesita basáltica, presenta abundantes fenocristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos, algunos minerales opacos; inmersos en una matriz microcristalina con abundantes cristales subhedrales de plagioclasas y piroxenos. En el centro de la figura se observa un cristal anhedral de olivino con iddingsita formada alrededor de este. B) Nícoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 522888 Y 1391653.

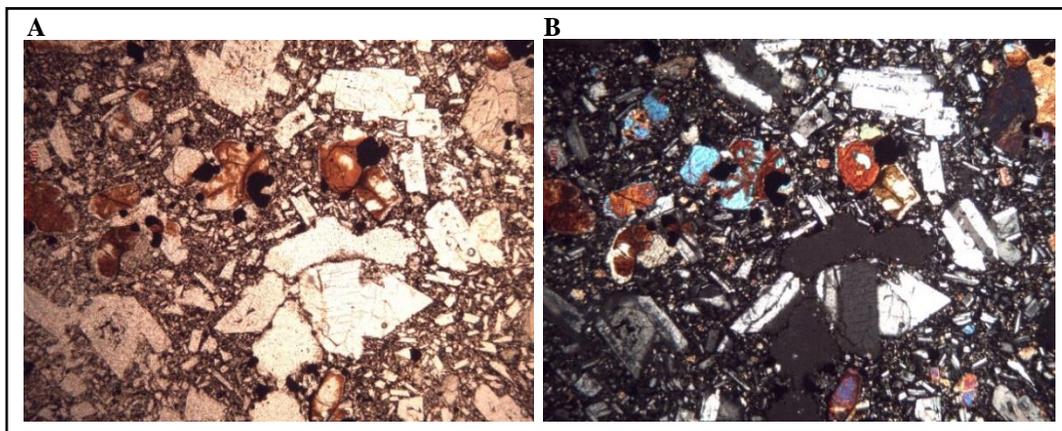


Figura 32. A) Nícoles paralelos, aumento 4x. Andesita basáltica, en la parte superior de la figura se observan cristales anhedrales y subhedrales de piroxenos y olivino alterados, presentan coloración café-rojiza, textura porfirítica seriada B) Nícoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 522888 Y 1391653.

### 3.1.6 Unidad VI - Depósitos Coluviales

Se localiza al sur de la estructura caldérica La Joya, cubre un área de 0.75 km<sup>2</sup>. Los depósitos que conforman esta Unidad yacen en la planicie formada entre las estructuras volcánicas La Joya y Santa Clara, cuyos productos probablemente se encuentren cubiertos por los depósitos correspondientes a esta Unidad.

Los afloramientos muestran material arrastrado tanto por las corrientes de aguas superficiales como por el viento que transporta el material más fino desde las zonas altas hasta depositarlas en zonas bajas. Estos materiales poseen tamaños que varían desde bloques y gravas (> 64 mm) hasta materiales fino tamaño arcilla (0.004 mm), el cual sirve como cemento entre los fragmentos de roca.

Dentro de esta Unidad, al noreste del Volcán Santa Clara se identificó un depósito de aproximadamente 3 m de altura, integrado por fragmentos de distinta composición como lavas andesíticas cuyos tamaños varían de 1 cm a 16 cm, de forma subredondeada a subangulosa, en mayor proporción los fragmentos se encuentran consolidados (Figura 33).

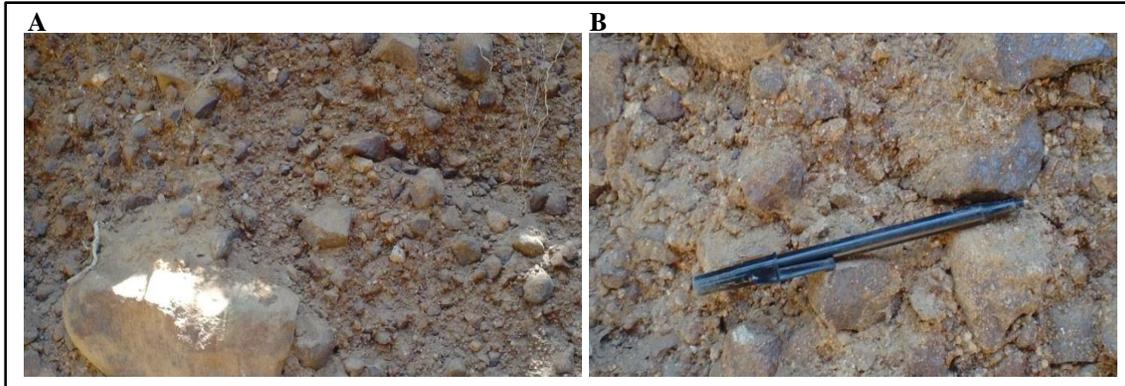


Figura 33. A) Afloramiento localizado entre la zona sureste de la estructura caldérica La Joya y lavas andesíticas-basálticas del volcán Santa Clara, correspondiente a la Unidad de Depósitos Coluviales. B) Fragmentos de lava andesítica que varían en tamaño desde 1 cm a 16 cm. Coordenadas: X 520685 Y 1391922.

## **CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

En la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate observamos que el número de fallas y fracturas es amplio, sin embargo, las estructuras geológicas (estructuras volcánicas, fallas y lineamientos) presentes en el Mapa Geológico-Estructural (Figura A) y en el Mapa Estructural (Figura B), son las más representativas del área y permiten apreciar tanto la geometría como las distintas fases de deformación a las cuales pertenecen estas estructuras.

### **4.1 ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS**

Durante el trabajo de gabinete y el trabajo de campo realizado se identificaron las estructuras volcánicas presentes en el Complejo Volcánico Telica. Algunas de estas son relictos de estructuras volcánicas, presentándose de forma semicircular, mientras que otras se conservan completas.

La alineación de las estructuras volcánicas semicirculares, calderas antiguas y el actual volcán activo, localizados principalmente en el segmento sur del área de estudio, indica una migración de la cámara magmática de este a oeste.

Estas estructuras volcánicas antiguas son del tipo de calderas de colapso, en las cuales tras ser eruptado el magma a la superficie en forma de flujos lávicos y depósitos piroclásticos, la cámara magmática queda totalmente vacía, generándose de esta manera el hundimiento de la estructura volcánica por gravedad. Este evento se relaciona con una cámara magmática poco profunda (Francis Peter, 1983).

La actividad volcánica fue continua después de la formación de calderas de colapso debido a la migración de la cámara magmática de este a oeste, creándose nuevos centros eruptivos hacia el oeste de la antigua estructura, sugiriendo de esta manera que ha existido una fuerte actividad volcánica histórica.

El nombre de cada estructura volcánica fue asignado en base a los nombres del mapa topográfico existente (Hoja Topográfica de Telica, número 2853 IV, publicada por INETER a escala 1: 50 000, año 2006).

Como se ha explicado en las primeras etapas de este trabajo, el área de estudio se localiza dentro del Complejo Volcánico Telica, sin embargo, su centro de emisión actual y más reciente (Volcán Telica) no se encuentra en la zona estudiada, por tanto no se describe entre las estructuras volcánicas de la zona de interés (Figura 34).

Las estructuras volcánicas serán descritas en orden cronológico de la más antigua a la más reciente, de este hacia el oeste, siendo estas:

- a) Estructura Volcánica Los Tablones
- b) Estructura Volcánica El Ojochal
- c) Estructura Volcánica La Joya
- d) Estructura Volcánica La Ceiba
- e) Estructura Volcánica Pre-Telica

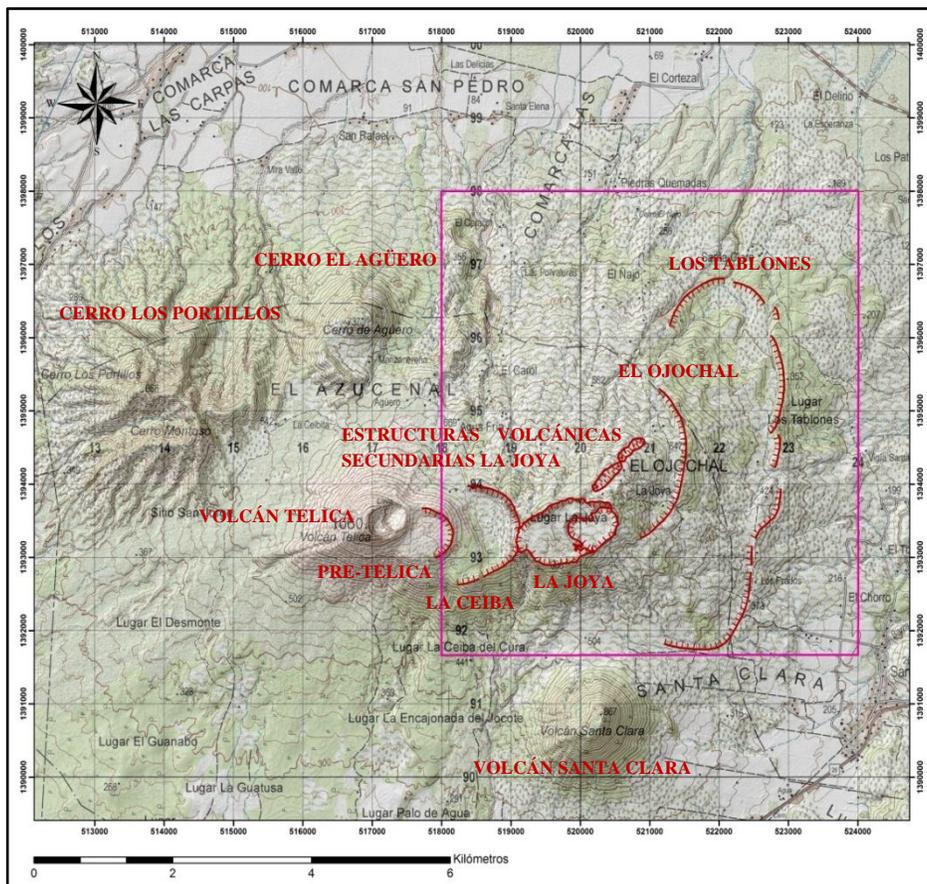


Figura 34. Complejo Volcánico Telica y las estructuras volcánicas que lo conforman, el cuadro señala el área cartografiada en este estudio. Se observa la secuencia de Este a Oeste de las estructuras volcánicas debido a la migración de la cámara magmática.

a) Estructura Volcánica Los Tablones

Es un relicto de caldera antigua localizada al este del área de estudio, con extensión aproximada de 7.8 km y forma semicircular abierta hacia el oeste.

Su estructura no es completa y sólo son observables las paredes del sector este, las cuales fueron definidas mediante el análisis e interpretación de fotografías aéreas, mapa topográfico, mapa de pendientes y mapa de relieve sombreado.

Esta estructura geológica se encuentra dividida en ocho segmentos cuyas extensiones varían entre 191 m y 1.9 km. Los segmentos se encuentran divididos por fallas y lineamientos, clasificados como:

- Falla Los Tablones A
- Falla Los Tablones C
- Falla Los Tablones D
- Lineamiento Los Prados
- Lineamiento La Esperanza
- Lineamiento Los Tablones B
- Lineamiento Los Tablones Este-Oeste

b) Estructura Volcánica El Ojochal

Es una estructura volcánica semicircular de 2.4 km de longitud localizada en la comunidad del mismo nombre; observándose en campo el escarpe de esta estructura (Figura 35).

El extremo norte de esta estructura se encuentra afectada por las fallas El Ojochal Noroeste y Los Tablones A, de rumbo Noroeste-Sureste y Noreste-Suroeste, respectivamente.



Figura 35. Escarpe de estructura semicircular El Ojochal vista desde la estructura volcánica Los Tablones. Coordenadas: X 522673 Y 1395967.

c) *Estructura Volcánica La Joya*

Es considerada una caldera de colapso, es un estratovolcán extinto con una altura de 900 m.s.n.m, que junto con el Volcán Telica están controlados por una fractura Este-Oeste que define la ubicación de sus conductos (Navarro, 1994).

El borde caldérico de La Joya se observa completo y definido. Contiene dos cráteres con orientación Este-Oeste: el cráter mayor mide aproximadamente 1.5 km de diámetro en dirección Este-Oeste y su eje menor, en dirección Norte-Sur, mide 817 m; el cráter de menor tamaño presenta eje mayor de 724 m y eje menor de 521 m.

La estructura volcánica La Joya está formada por depósitos piroclásticos de caída y flujos lávicos de composición andesítica a andesita-basáltica.

Esta estructura es cortada por las fallas La Joya Noroeste y La Ceiba-La Joya, con rumbo Noroeste-Sureste y Norte-Sur, respectivamente.

*c.1 Estructuras Volcánicas Secundarias La Joya*

Son dos estructuras secundarias a la caldera La Joya, de forma elongadas, continuas entre sí, con orientación Noreste-Suroeste. La primera tiene un eje mayor en dirección Noreste-Suroeste y mide 537 m, su eje menor en dirección Noroeste-Sureste mide 161 m; el eje mayor de la segunda estructura (con igual orientación que la primera) mide 446 m y el eje menor 85 m aproximadamente.

Ambas estructuras fueron originadas probablemente producto del fallamiento en dirección Noreste-Suroeste. El eje mayor de dichas estructuras es paralelo al lineamiento El Ojochal Oeste el cual pertenece a la tercera fase de deformación (Noreste-Suroeste).

*d) Estructura Volcánica La Ceiba*

Es una estructura volcánica semicircular de morfología perfecta y fácilmente reconocible en el análisis de fotografías aéreas, mapa topográfico, mapa de pendientes, mapa de relieve sombreado y en campo. Se localiza al suroeste de la zona de interés.

El borde caldérico tiene una longitud lineal aproximada de 2.4 km (Figura 36), tiene paredes interiores inclinadas de 200 m de altura aproximadamente. El eje mayor de orientación Norte-Sur mide alrededor de 1.3 km y el eje menor con dirección Este-Oeste mide 707 m.

Los productos volcánicos del Pre-Telica (localizado un poco más al oeste) pueden estar cubriendo el segmento oeste de la estructura semicircular, asumiendo que una vez fue una estructura circular (Lefebure, 1986).

Según reportes de pobladores locales, dentro del área que cubre esta estructura existieron fuentes termales, pero actualmente están inactivas y cubiertas por una densa vegetación, por lo que no fue posible identificarlas y ubicarlas.

La Ceiba se encuentra segmentada en su lado suroeste por el lineamiento del mismo nombre de rumbo Noroeste-Sureste.



Figura 36. Estructura volcánica semicircular La Ceiba, vista desde el Volcán Telica. Coordenadas: X 518076 Y 1393147.

e) *Estructura Volcánica Pre-Telica*

Esta estructura volcánica es también conocida como Telica Este, es anterior a la formación del actual Volcán Telica y está cubierta por flujos de lava provenientes de dicho volcán. El borde caldérico presenta una altura de 840 m.s.n.m (Figura 37).

En el interior y al norte de esta estructura se encontraron fumarolas activas, las cuales presentan temperaturas en un rango entre 62 °C y 69.8 °C. Estas son relativamente bajas en relación a otras fumarolas localizadas dentro del área de estudio (Figura 38).

Las rocas expuestas corresponden a lavas alteradas con presencia de carbonato de calcio, lo cual se determinó a través de la prueba de ácido clorhídrico.

El área de estudio, abarcó de manera parcial la zona este de la estructura volcánica Pre-Telica, en la cual no se identificaron fallas durante las etapas de gabinete y de campo realizadas.



Figura 37. En primer plano se observa la estructura volcánica Pre-Telica, al fondo se observa el volcán Telica, vistos desde la estructura volcánica La Ceiba. Coordenadas: X 518911 Y 1393684.



Figura 38. Fumarolas dentro de la estructura volcánica Pre-Telica, presentan minerales blancos (carbonato de calcio) y coloración verde correspondientes a algas termofílicas que se desarrollan en altas temperaturas. Coordenadas: X 517923 Y 1393612.

## 4.2 CRITERIOS DE CIZALLA

Para una mejor comprensión de la génesis de las fallas y fracturas en las rocas es necesario atender a la relación entre los conceptos de esfuerzo y deformación. Se define al esfuerzo como la relación de la fuerza aplicada sobre el área de un plano. El concepto de deformación de un cuerpo involucra dos aspectos principales: la traslación o desplazamiento de la masa en su conjunto y el cambio en la posición relativa de sus partículas conocida como deformación interna (Ramsay, 1977, 1989).

La aplicación de fuerzas sobre las rocas genera esfuerzos que producen su deformación y rompimiento dando lugar a la formación de fallas y fracturas. A este tipo de deformación, en el cual se forman estas estructuras, se le conoce como deformación frágil y es la que caracteriza el área de estudio.

Para realizar las mediciones de las estructuras geológicas se utilizaron criterios de este tipo de deformación debido a tres factores determinantes:

- La geología de San Jacinto-Tizate es de origen volcánico que se caracteriza por el tipo de deformación frágil principalmente.
- A nivel de la superficie el mecanismo de deformación tiende a ser frágil, mientras que de 10 a 15 km de profundidad tenemos la transición frágil-dúctil (Sibson, 1990). El área de estudio se encuentra en un nivel superior de la corteza terrestre, en la cual las rocas son deformadas frágilmente.
- En el área se han definido distintas direcciones de fallamiento que nos indican que se han producido zonas de cizalla en las rocas.

### 4.3 INDICADORES CINEMÁTICOS

Los criterios de cizalla están fundamentados en los principios básicos del fracturamiento. Estos se conocen como indicadores cinemáticos, los cuales se utilizan como herramientas para definir el sentido de movimiento relativo de los bloques que se desplazan en zonas de cizalla.

Existen numerosos indicadores cinemáticos los cuales se desarrollan en dependencia del tipo de roca que afectan, la profundidad a la cual estas se encuentran y el tipo de deformación al que están expuestas. Los principales indicadores cinemáticos identificados en el área de estudio fueron los siguientes:

Estrías: Se observaron principalmente en los afloramientos y segmentos de falla que se ubican al este y al oeste de la comunidad El Ojochal, en la zona sureste de la estructura caldérica Los Tablones, al noreste del Volcán Santa Clara, al sur de la comunidad El Carol y al sur de la estructura caldérica La Joya. Las estrías son la evidencia más notable de desplazamiento entre los bloques, señalan la dirección del movimiento relativo entre ellos, constituyendo el primer indicador cinemático (Figura 39).

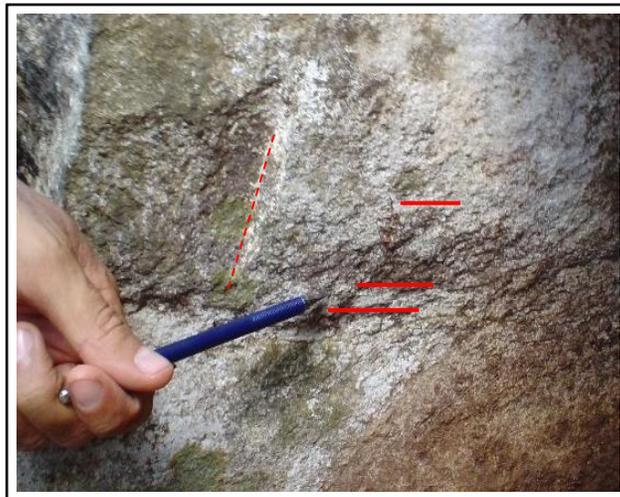


Figura 39. Afloramiento localizado en la zona este de la comunidad El Ojochal. Se observan estrías que indican la dirección del movimiento de los bloques, escalón perpendicular a las estrías. Coordenadas: X 522006 Y 1393592.

Sigmoides: Se identificaron al norte y noreste de la comunidad El Carol, en los alrededores de la estructura volcánica semicircular El Ojochal, al norte y sur de la caldera La Joya y al sureste de la estructura caldérica Los Tablones. Los sigmoides indican la dirección del movimiento de la falla principal (Figura 40); un conjunto de sigmoides da lugar a sistemas anastomados.

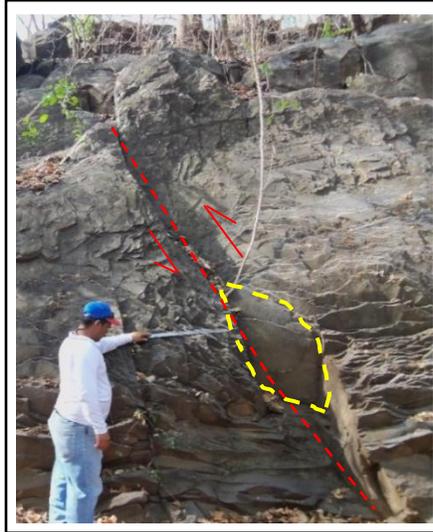


Figura 40. Traza de Falla Los Prados Sur, sigmoide indica el movimiento de la falla principal, flechas señalan el bloque que cae, falla inversa. Coordenadas: X 522681 Y 1392442.

Clastos rotados: Se observaron clastos rotados en rocas andesíticas afectadas por las fallas Las Polvaleras, Santa Clara y Los Tablones A; se observa que el eje mayor del clasto se alinea con respecto a la zona de cizalla (Figura 41).

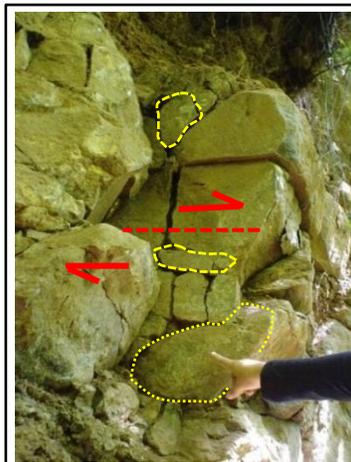


Figura 41. Traza de Falla Santa Clara, clastos rotados, falla derecha con componente vertical, flechas indican el sentido del movimiento de los bloques. Coordenadas: X 520250 Y 1394844.

#### **4.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

A través del análisis de la geometría de fallas y fracturas se determinaron cuatro fases de deformación que han afectado la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate. Estas fases actúan en sentido horario.

Para comprender los resultados del análisis estructural es necesario introducir el concepto de fase de deformación, el cual se refiere al conjunto de estructuras geológicas o deformaciones originadas bajo un estado de esfuerzos o campo de deformación, que no necesariamente fueron continuos pero que se mantuvieron vigentes en un periodo de tiempo, lo cual dio lugar a estados o etapas de deformación que se sucedieron uno tras otro hasta alcanzar el estado deformado actual que se observa en el área de estudio, en un proceso que se conoce como una deformación progresiva (modificado de Páez, 2010).

La zona cartografiada se caracteriza por deformaciones de tipo frágil representado por la ocurrencia de fallas y fracturas.

A través del análisis estructural se realizó la diferenciación de los tipos de fallas que componen cada fase de deformación con base en: la determinación del sentido de movimiento de los bloques, el desplazamiento de unidades litológicas y la identificación de criterios cinemáticos entre los cuales se destacan estructuras secundarias sobre el plano de falla como estrías, escalones y estructuras sigmoidales.

Cada fase de deformación será descrita de forma individual, en orden cronológico, iniciando de la fase de deformación más antigua a la más reciente.

En este trabajo monográfico, las fallas representativas de cada una de estas fases deben su nombre a la comunidad más cercana o a las estructuras volcánicas que atraviesan.

## 4.5 FASES DE DEFORMACIÓN

### 4.5.1 NOROESTE-SURESTE (NW-SE)

Corresponde a la primera fase de deformación que afectó la zona, las principales fallas se localizan al oeste del área de estudio.

Las fallas pertenecientes a este grupo son las más antiguas, por consiguiente, se encuentran interceptadas por otros sistemas, especialmente fallas de rumbo noreste-suroeste.

Las fallas más representativas de esta fase son: Falla Las Polvaleras, Falla La Joya Noroeste y Falla El Ojochal Noroeste.

#### a) Falla Las Polvaleras

Se ubica al noroeste del área de estudio, próxima a la comunidad del mismo nombre. El rumbo de la falla es N 18°W, mide 2.7 km y se encuentra dividida en 2 segmentos principales cuyas longitudes son 1.2 km y 1.3 km aproximadamente, presentan arreglo en echelón derecho y la extensión de la zona de relevo es de 231 m.

La Falla Las Polvaleras afecta flujos de lava de composición andesita basáltica y andesítica, las cuales presentan un alto grado de fracturamiento.

La cinemática de la falla fue establecida a partir de la observación, descripción e identificación de indicadores cinemáticos en los puntos visitados en campo, entre los principales indicadores tenemos: clastos rotados, sigmoides y desplazamiento de bloques.

A partir del análisis de las características de esta estructura, en conjunto con la roseta de fracturas realizada, se indica que la dirección principal de esfuerzos es hacia el N 65°W. Se estableció que la Falla Las Polvaleras corresponde con zonas de falla derecha con componente vertical y fallas transcurrentes (Figura 42).

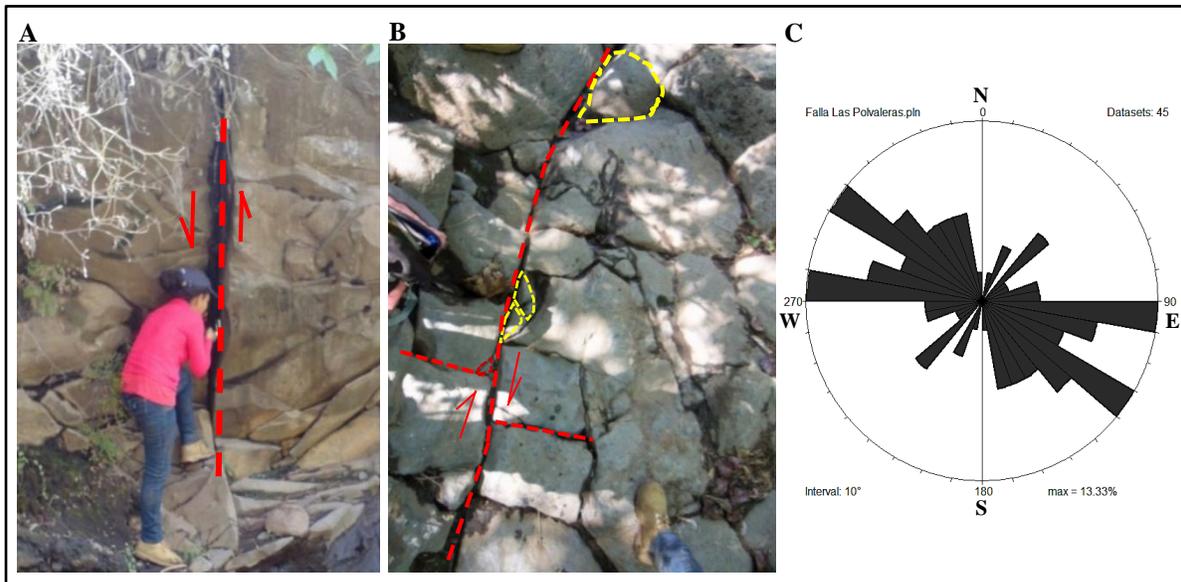


Figura 42. A) Traza de Falla Las Polvaleras en lavas andesíticas, numerosas fracturas secundarias. Coordenadas: X 519829 Y 1395882. B) Falla transcurrente con componente lateral derecha. Sigmoides en dirección del movimiento principal. Coordenadas: X 519900 Y 1395996. C) Roseta de fracturas Falla Las Polvaleras, dirección principal de esfuerzos hacia el N 65°W.

b) Falla La Joya Noroeste

Se localiza al suroeste del área de estudio, atraviesa la estructura volcánica La Joya, se extiende hacia el noroeste abarcando las comunidades El Carol y el sector este de Agua Fría.

Esta falla tiene una extensión aproximada de 3.6 km, está dividida en 4 segmentos, los cuales forman arreglo en echelón derecho, con zonas de relevo que miden entre 69 m y 540 m.

La longitud de los segmentos que conforman esta falla oscila entre 320 m y 1.2 km con rumbos que varían de N 16°W a N 25°W.

Los sitios afectados por esta estructura se encuentran alterados hidrotermalmente, lo cual puede asociarse a la confluencia entre el segmento norte de esta falla con las fallas El Carol y Agua Fría pertenecientes a los sistemas de deformación Noreste-Suroeste y Norte-Sur respectivamente.

Los principales indicadores cinemáticos que se encontraron en la zona y que evidencian la existencia de la falla corresponden a estrías y escalones, también se observó desplazamiento de bloques (Figura 43).

Las mediciones realizadas en la Falla La Joya Noroeste fueron graficadas en la roseta de fracturas indicando una dirección preferencial hacia el N 50°W correspondiendo con la zona de máximo esfuerzo.

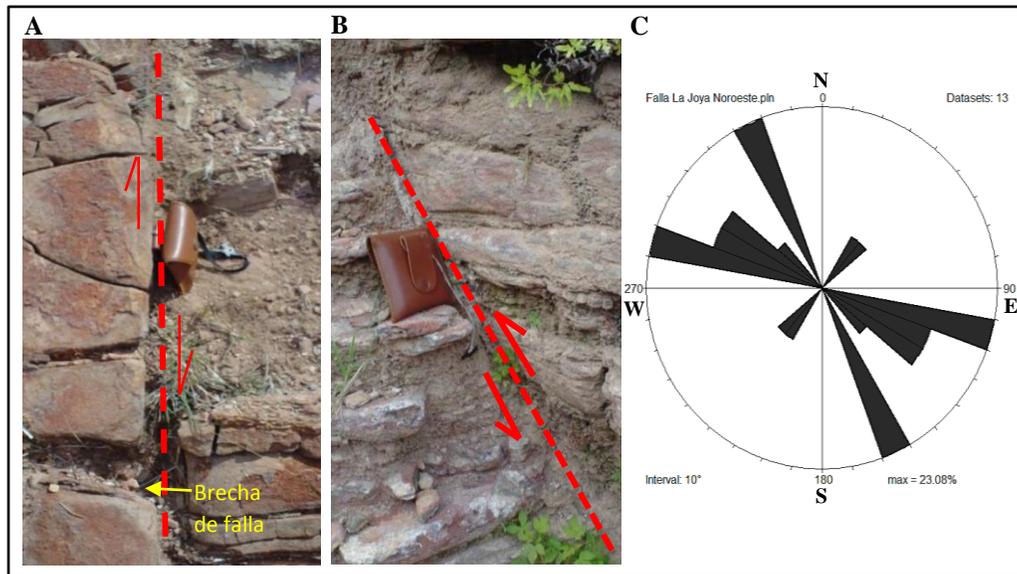


Figura 43. A) Brecha de falla originada por fallamiento normal. Coordenadas: X 518789 Y 1395592. B) Falla inversa con componente lateral derecho. Flechas señalan el movimiento de los bloques. Coordenadas: X 518787 Y 1395601. C) Roseta de fracturas Falla La Joya Noroeste, dirección principal de esfuerzos hacia el N 50°W.

### c) Falla Santa Elena

Se localiza en el extremo noroeste del área de estudio, extendiéndose por los poblados de Santa Elena y Piedras Quemadas, y posee una longitud de 2.2 km aproximadamente.

Se encuentra dividida en tres segmentos con arreglo en echelón derecho con zonas de relevo que miden aproximadamente 186 m y 228 m.

Los rumbos de los segmentos que conforman esta falla miden N 75°W (dos segmentos) y N 66°W (tercer segmento) y sus longitudes 1.04 km, 290 m y 480 m respectivamente.

La Falla Santa Elena está cortada y desplazada por el lineamiento Piedras Quemadas perteneciente al sistema Noreste-Suroeste.

La zona afectada presenta indicios de esfuerzos causados por la cinemática misma de la falla, presentándose sigmoides verticales y fracturas paralelas (Figura 44).

Litológicamente afecta flujos lávicos de composición andesita basáltica con numerosas fracturas. Basándonos principalmente en los indicadores cinemáticos identificados se caracteriza esta estructura como una falla normal.

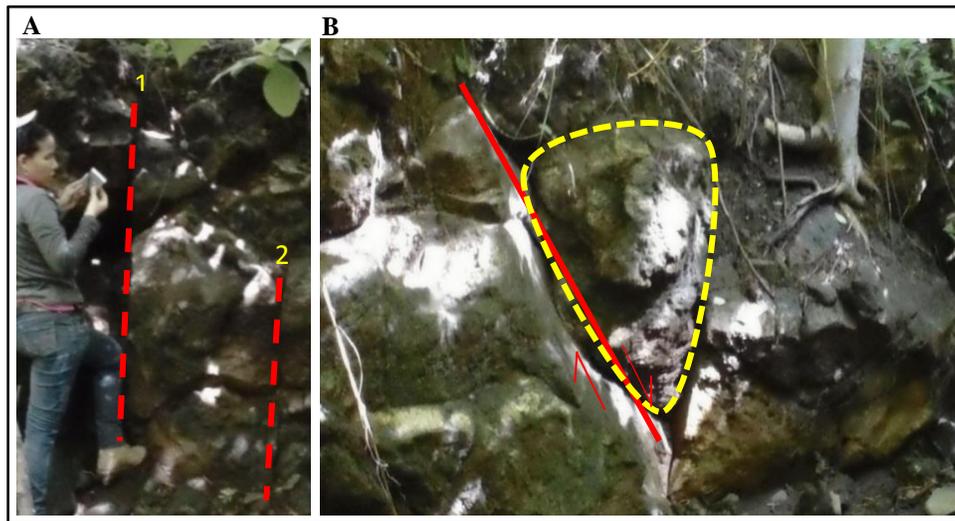


Figura 44. A) Fracturas paralelas. B) Traza de Falla Santa Elena en flujo de lava andesita basáltica, sigmoide vertical que indica movimiento normal de la falla. Coordenadas: X 519722 Y 1397717.

#### d) Falla El Ojochal Noroeste

Esta falla se localiza al noroeste de la estructura volcánica semicircular del mismo nombre, tiene una orientación N 12°W y su extensión en el área de estudio es de 1.25 km aproximadamente.

El sector norte de la Falla El Ojochal Noroeste intercepta el extremo norte de la estructura semicircular El Ojochal y el lado sur de la Falla Los Tablones A perteneciente a la fase de deformación Noreste-Suroeste. La intersección de estas estructuras geológicas está afectada por una fuerte alteración hidrotermal (Figura 45).

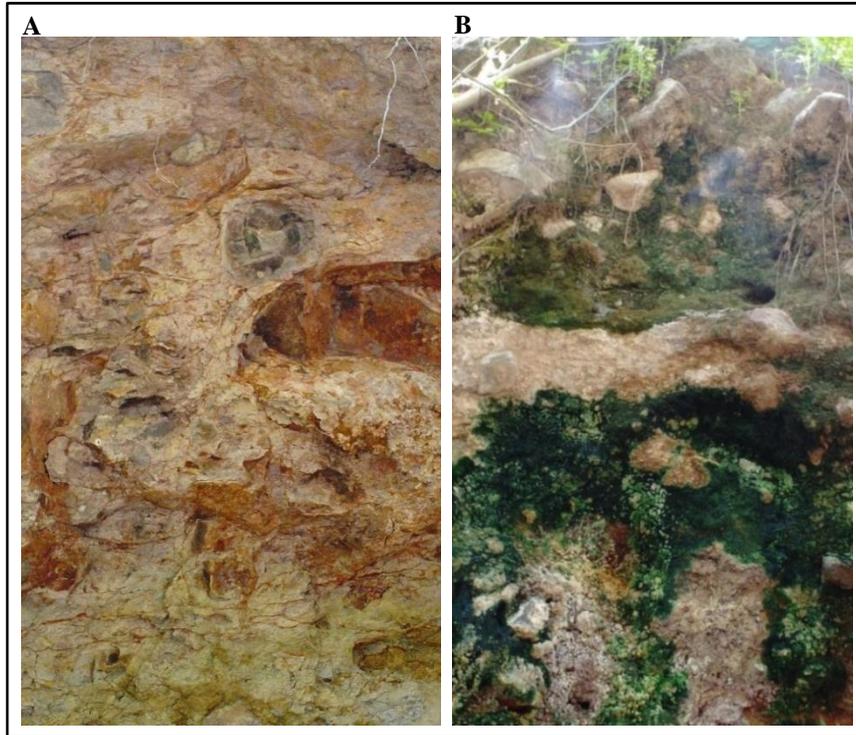


Figura 45. Figuras A y B representan alteración hidrotermal en afloramientos de lavas alteradas en zona de intersección entre las fallas El Ojochal Noroeste, Los Tablones A y la estructura semicircular El Ojochal, las lavas son de dureza baja y se observan de tonalidades marrón, amarillenta, gris y verde. Coordenadas: X 521100 Y 1395655.

Litológicamente afecta rocas andesíticas, las cuales podrían ser agrupadas en 2 conjuntos:

- I. Zona de alteración hidrotermal intensa, en la cual los materiales se observan con distintos colores entre, rojo, verde, blanco, gris oscuro.
- II. Flujos de lava andesítica altamente fracturados (Figura 46).

El primer tipo de rocas se localiza al norte de la Falla El Ojochal Noroeste en el área de intersección con el sistema Noreste-Suroeste, mientras que el segundo tipo se encuentra un poco más al sur.

Los principales indicadores cinemáticos identificados corresponden a sigmoides, escalones y desplazamiento de bloques (Figura 47).

La roseta de fracturas presenta orientación preferencial noroeste, indicando que la dirección principal de los esfuerzos que actúan en este sitio es hacia el N 35°W. La cinemática de esta estructura muestra una zona de fallamiento normal.

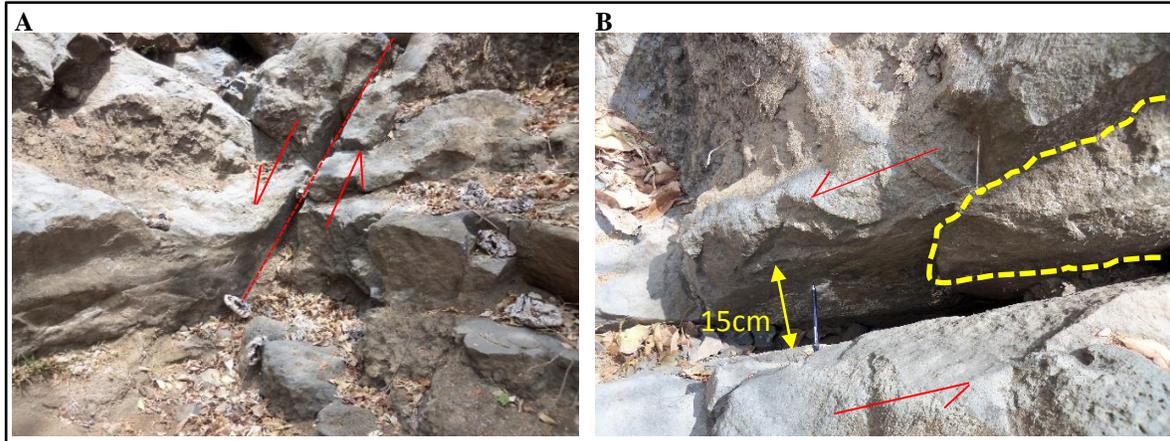


Figura 46. A) Traza de Falla El Ojochal Noroeste. B) Separación de 15cm de ancho entre los bloques, componente lateral izquierda, escalón formado por el deslizamiento de los bloques. Coordenadas: X 521062 Y1395328.

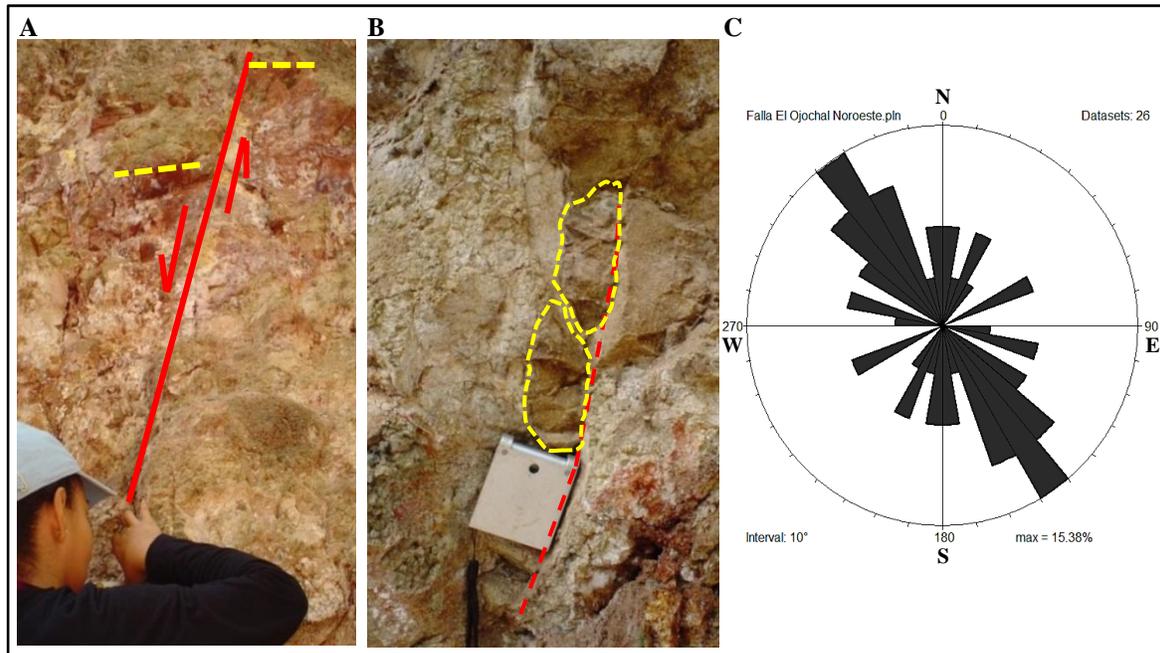


Figura 47. A) Traza de Falla El Ojochal Noroeste, movimiento normal, flechas indican el sentido de deslizamiento de los bloques, línea discontinua muestra el desplazamiento de ambos. Coordenadas: X 521082 Y 1395623. B) Sigmoides verticales que indican la dirección principal del movimiento. C) Roseta de fracturas Falla El Ojochal Noroeste, dirección principal de esfuerzos hacia el N 35°W.

En la fase de deformación Noroeste-Sureste existen estructuras geológicas que no fueron comprobadas durante el trabajo de campo realizado. Sin embargo, fueron representadas en el Mapa Estructural elaborado (Figura B), basándonos en la fotointerpretación efectuada en conjunto con el análisis de los mapas de pendientes y modelo sombreado.

Las estructuras geológicas no comprobadas durante el trabajo de campo y definidas como lineamientos son las siguientes:

➤ Lineamiento La Ceiba

Se localiza a lo interno de la estructura volcánica semicircular La Ceiba.

Su rumbo es N 11°W, tiene una longitud de 1.1 km y corta la estructura volcánica semicircular La Ceiba en su extremo suroeste; litológicamente afecta rocas andesíticas.

➤ Lineamiento La Joya Sureste

Tiene orientación N 10°W y longitud de 481 m, se localiza en el extremo sureste de la estructura volcánica La Joya; litológicamente afecta rocas andesíticas.

➤ Lineamiento Los Tablones Noroeste

Se localiza al oeste de la estructura volcánica antigua Los Tablones, tiene rumbo N 20°W y longitud aproximada de 1.26 km; litológicamente afecta rocas andesíticas.

➤ Lineamiento Los Tablones Noreste

Son 2 lineamientos paralelos con longitud aproximada de 923 m y 1.08 km y presentan rumbo N 78°W y N 72°W, respectivamente. Se localizan al noreste de la estructura volcánica antigua Los Tablones; litológicamente afecta rocas andesíticas.

Las mediciones realizadas en las estructuras geológicas pertenecientes a la fase de deformación Noroeste-Sureste fueron graficadas en la roseta de fracturas, la cual indica que el eje de deformación correspondiente a esta fase es N 45°W (Figura 48).

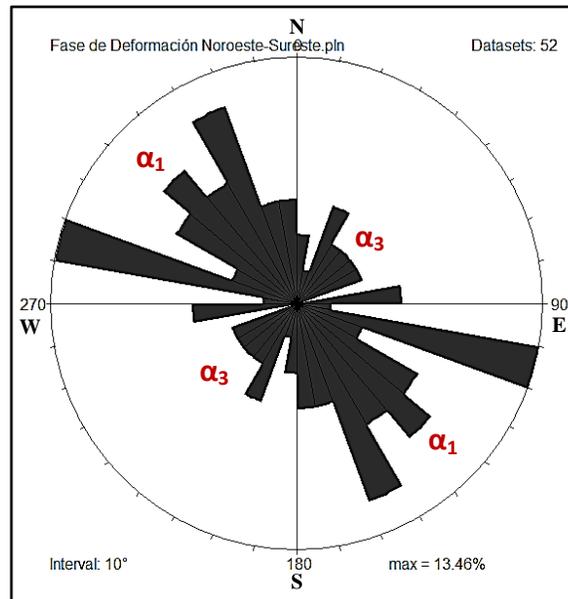


Figura 48. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Noroeste-Sureste. Eje de deformación N 45°W indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión.

#### 4.5.2 NORTE-SUR (N-S)

Es la segunda fase de deformación. Los sistemas de fallas que la representan se encuentran localizados en el extremo oeste, centro y este de la zona de estudio, en las localidades de El Caracol, El Ñajo, La Esperanza y entre las estructuras volcánicas La Ceiba y La Joya.

##### a) Falla El Caracol

Se localiza al noroeste del área en la comunidad El Caracol, su extensión es de 3.6 km aproximadamente y se encuentra representada por 2 segmentos de falla, ambos con rumbo N 2°E, con longitudes aproximadas de 1.86 km y 1.3 km respectivamente. La separación de esta estructura se debe al corte efectuado por la Falla El Carol de rumbo Noreste-Suroeste.

Esta falla afecta principalmente rocas de composición andesítica las cuales se encuentran fracturadas. Los indicadores cinemáticos encontrados en los puntos visitados en campo corresponden a escalones y fracturas secundarias en flujos de lava andesítica (Figura 49). Sin embargo, también se observaron pendientes pronunciadas, árboles inclinados y zonas de deslizamiento que probablemente se encuentren asociadas a la zona de falla.



Figura 49. Figuras A y B Sistema de fracturas complejas en rocas andesíticas en zona de falla El Caracol. Coordenadas: X 518589 Y 1397276.

b) Falla Agua Fría

Se ubica al noroeste del área, paralela a la Falla El Caracol y al igual que esta última se encuentra dividida por la Falla El Carol de rumbo Noreste-Suroeste.

Su extensión total es de 2.4 km, sin embargo, cada segmento tiene una longitud aproximada de 677 m y 1.5 km respectivamente, ambos con rumbo N 3°E.

Durante el trabajo de campo se localizaron numerosas fracturas secundarias que a su vez forman arreglos complejos, así mismo, se observaron pendientes pronunciadas, árboles inclinados y zonas de deslizamiento que pueden estar asociados a la falla principal (Figura 50).

La Falla Agua Fría afecta principalmente rocas de composición andesítica, la cual en algunos sitios se presenta sumamente fracturada y dispuesta de forma laminar (Figura 51).

Las mediciones realizadas en la Falla Agua Fría fueron graficadas en la roseta de fracturas indicando una dirección preferencial N 5°E correspondiendo con la zona de máximo esfuerzo.



Figura 50. Pendiente pronunciada, árboles inclinados. Línea roja señala zona de falla inferida, localidad Agua Fría. Coordenadas: X 518557 Y 1396189.

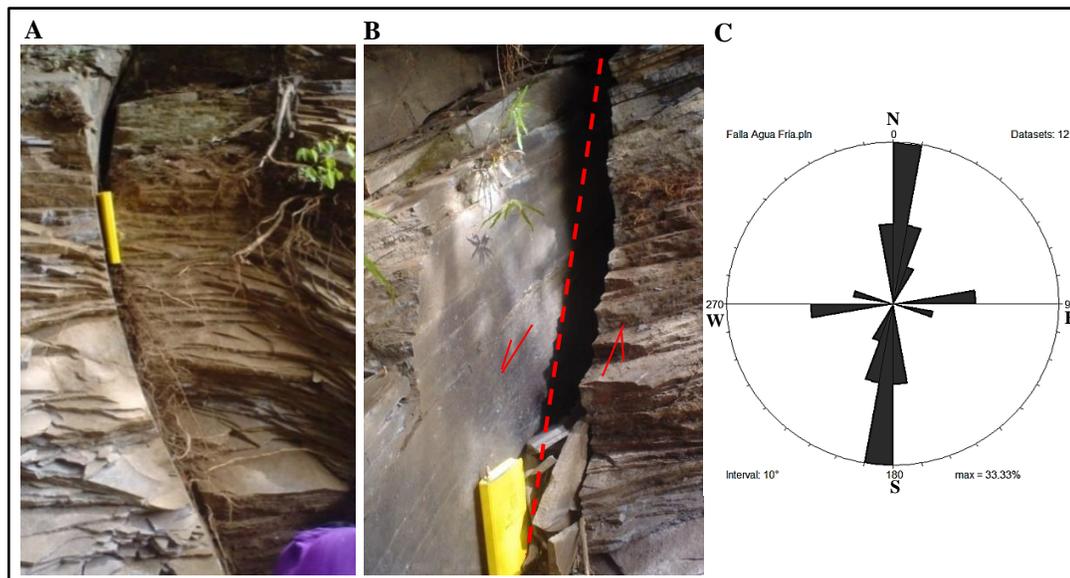


Figura 51. Figuras A y B Traza de Falla Agua Fría, las flechas indican un movimiento lateral izquierdo. Coordenadas: X 518800 Y 1396180. C) Roseta de fracturas Falla Agua Fría. Dirección principal de esfuerzos hacia el N 5°E.

c) Falla La Ceiba - La Joya

Durante la fotointerpretación realizada se observó que esta falla se sitúa entre el límite de las estructuras volcánicas La Ceiba y La Joya, mide 1.7 km de longitud y se encuentra dividida en dos segmentos: uno se localiza al norte del límite de estas estructuras y el otro en el sector sur, con longitudes de 642 m y 516 m respectivamente y rumbos N 6°W y N 4°E. Litológicamente afecta depósitos piroclásticos y lavas andesíticas.

Dentro del área que afecta esta estructura, se localizaron numerosos indicadores cinemáticos que confirman su existencia, entre estos tenemos: estrías, sigmoides, clastos rotados, arreglos conjugados y desplazamiento entre bloques (Figuras 52 y 53).

A partir de las mediciones realizadas se elaboró la roseta de fractura correspondiente a esta estructura, la cual muestra una orientación preferencial N-S (Figura 53).

Basándonos en las características analizadas la Falla La Ceiba-La Joya corresponde a una falla normal con componente lateral derecha.

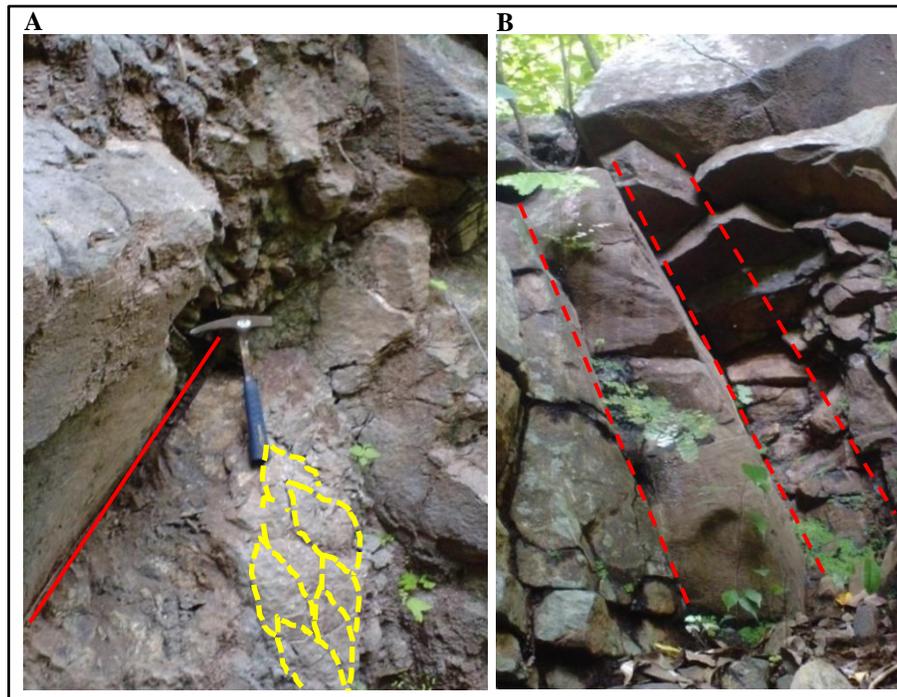


Figura 52. A) Traza de Falla La Ceiba-La Joya, arreglo anastomasado en dirección del movimiento principal. Coordenadas: X 519174 Y 1392385 B) Sistema de fracturas paralelas en la zona sureste de la Falla La Ceiba-La Joya. Coordenadas: X 519203 Y 1392642.

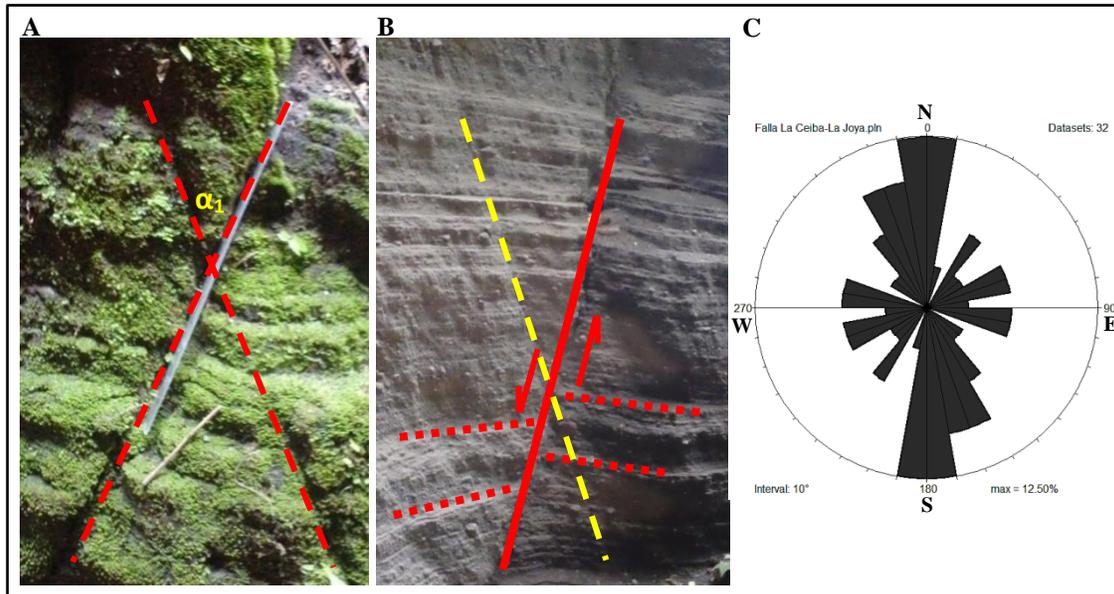


Figura 53. A) Arreglo conjugado en traza de Falla La Ceiba-La Joya. El ángulo agudo formado entre las fracturas muestra la dirección de esfuerzo principal  $\alpha_1$ , lo cual indica fallamiento normal. Coordenadas: X 519204 Y 1392506. B) Traza de Falla La Ceiba-La Joya. Arreglo conjugado, desplazamiento de bloques, flechas indican el sentido de movimiento de la falla principal, fallamiento normal. Coordenadas: X 519223 Y 1393044. C) Roseta de fracturas Falla La Ceiba-La Joya, dirección principal de esfuerzos N-S.

#### d) Lineamiento El Ñajo

Se localiza en el centro del área de estudio con orientación Norte-Sur y mide 2.4 km de longitud aproximadamente.

Los puntos cartografiados de este lineamiento corresponden a sitios con intensa alteración hidrotermal.

Las zonas de alteración en sí podrían relacionarse a la estructura principal, especialmente porque las manifestaciones termales ocurren en zonas de debilidad tectónica, en las cuales es mucho más fácil su expresión en superficie (Figura 54).

A pesar de no encontrar en campo indicadores cinemáticos definidos, la fotointerpretación realizada en conjunto con la elaboración y análisis de los mapas de pendientes y de modelo sombreado, respaldan la definición de esta estructura geológica en el Mapa Estructural elaborado (Figura B).



Figura 54. Zona de alteración hidrotermal El Ñajo asociada con el lineamiento de igual nombre y orientación N-S. Coordenadas: X 520681 Y 1396691.

e) Lineamiento La Esperanza

Se localiza al este del área de estudio, tiene una extensión de 2.4 km aproximadamente y está segmentado debido al corte efectuado por la Falla Los Tablones A de rumbo Noreste-Suroeste, cada uno de sus segmentos mide 1.1 km de longitud, forman arreglo en echelón izquierdo, la zona de relevo formada entre ambos segmentos mide 266 m. Litológicamente afecta rocas de composición andesítica.

De igual forma que el lineamiento El Ñajo, esta estructura no fue comprobada durante el trabajo de campo realizado, sin embargo, fue representado en el Mapa Estructural elaborado (Figura B) en base a la fotointerpretación realizada en conjunto con el análisis de los mapas de pendientes y de relieve sombreado.

Las mediciones realizadas en las estructuras geológicas pertenecientes a la fase de deformación Norte-Sur fueron graficadas en la roseta de fracturas, la cual indica que el eje de deformación correspondiente a esta fase es N 3°E (Figura 55).

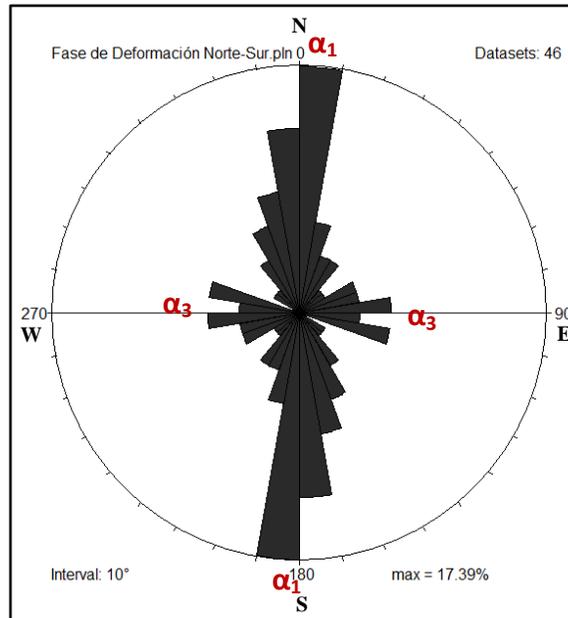


Figura 55. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Norte-Sur. Eje de deformación N 3°E indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión.

#### 4.5.3 NORESTE-SUROESTE (NE-SW)

Corresponde a la tercera fase de deformación presente en el área de estudio. Los sistemas de falla pertenecientes a esta etapa se encuentran ampliamente distribuidos en toda la zona, los de mayor extensión se localizan al norte.

Las estructuras geológicas más representativas de esta fase de deformación son: Falla El Carol, Falla El Ñajo Este, Falla Santa Clara, Falla Los Tablones.

a) *Falla El Carol*

Se ubica al oeste del área, tiene rumbo N 45°E y mide 797 m aproximadamente. Su longitud es pequeña en relación con otras fallas pertenecientes a esta fase. Sin embargo, es de gran importancia por las intersecciones que realiza con fallas que pertenecen a etapas de deformación más antiguas.

La Falla El Carol corta las fallas El Caracol y Agua Fría, pertenecientes a la fase de deformación Norte-Sur, y limita el sector norte de la Falla La Joya Noroeste, la cual pertenece a la fase de deformación Noroeste-Sureste. Litológicamente, afecta rocas de composición andesítica. Sin embargo, entre las comunidades El Carol y Agua Fría intercepta un afloramiento de ignimbrita no consolidada y un manantial de aguas termales (Figura 56).

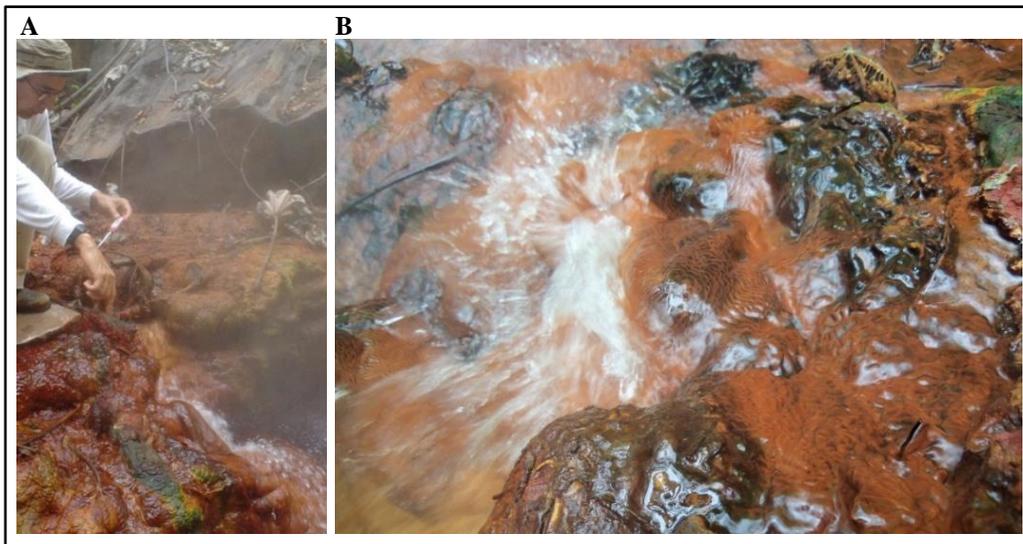


Figura 56. Manantial de aguas termales cuya expresión en superficie se debe al alto grado de fracturamiento en la zona, localidad El Carol-Agua Fría, medición de temperatura 82.6 °C. Coordenadas: X 518706 Y 1396042.

El principal indicador cinemático identificado en campo fueron fracturas formando arreglos conjugados, así mismo se localizaron zonas de derrumbe que podrían relacionarse a la falla principal. Se elaboró la roseta de fracturas, la cual indica que la dirección principal de esfuerzos es N 65°E (Figura 57).

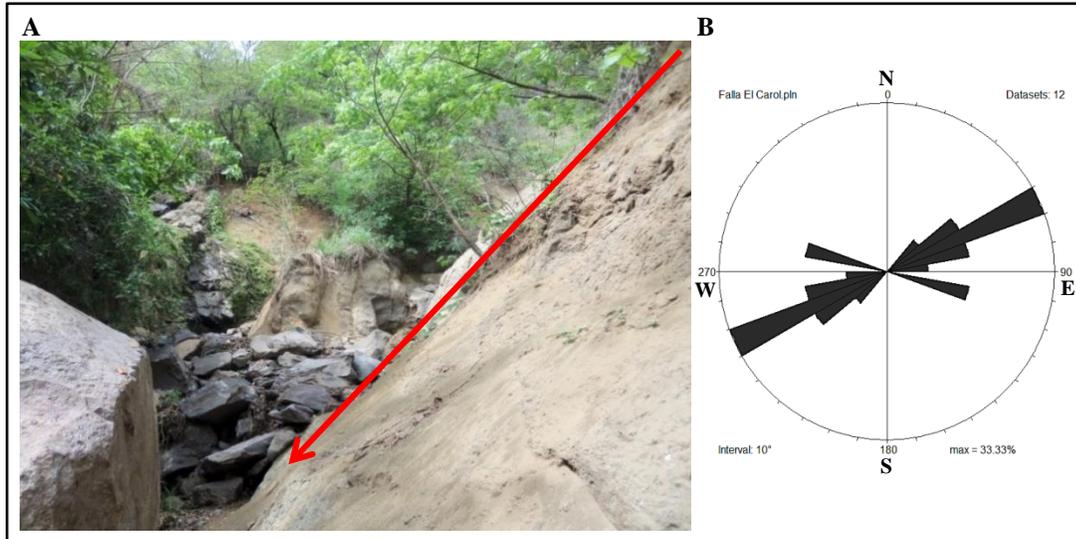


Figura 57. A) Zona de derrumbe asociada a fallamiento, localidad El Carol. Coordenadas: X 518698 Y 1395959  
 B) Roseta de fracturas Falla El Carol, indica que la dirección principal de esfuerzos es N 65°E.

b) Falla Las Polvaleras Noreste

Se localiza al oeste del área. La Falla Las Polvaleras Noreste tiene una extensión aproximada de 1.5 km y está compuesta por dos segmentos subparalelos que miden 730 m y 1.1 km de longitud, con orientación N 35°E y N 31°E, respectivamente.

Litológicamente se encuentra en la Unidad II - Andesita Basáltica, sin embargo, también afecta rocas de la Unidad I - Andesita dispuestas en flujo y en forma laminar.

Los principales indicadores cinemáticos de esta estructura corresponden a sigmoides verticales y escalones en los planos de fractura, de igual manera, es notoria la presencia de numerosas fracturas en los flujos de lava (Figura 58).

Las características de esta estructura corresponden con una zona de fallamiento normal.



Figura 58. Fractura de rumbo N 50°E en traza de Falla Las Polvaleras Noreste. Coordenadas: X 519835 Y 1395922.

c) Falla Santa Clara

Es una estructura lineal localizada al noreste de la estructura volcánica La Joya. Tiene una extensión aproximada de 4.7 km y se encuentra dividida en segmentos escalonados que a su vez forman geometría en echelón izquierdo con zonas de relevo que varían entre 500 m y 543 m.

Los elementos estructurales que la conforman presentan longitudes entre 535 m y 1.7 km aproximadamente.

Afecta principalmente rocas andesíticas, con distintos grados de deformación, sin embargo también afecta pequeños depósitos piroclásticos.

Es una zona de deformación extensa. Entre los indicadores cinemáticos localizados se encuentran: clastos rotados, intercrecimiento de minerales, arreglos paralelos y arreglos conjugados (Figura 59).

A partir del análisis de las características de esta estructura se estableció que la Falla Santa Clara corresponde con zonas de fallamiento normal y fallamiento lateral derecho.

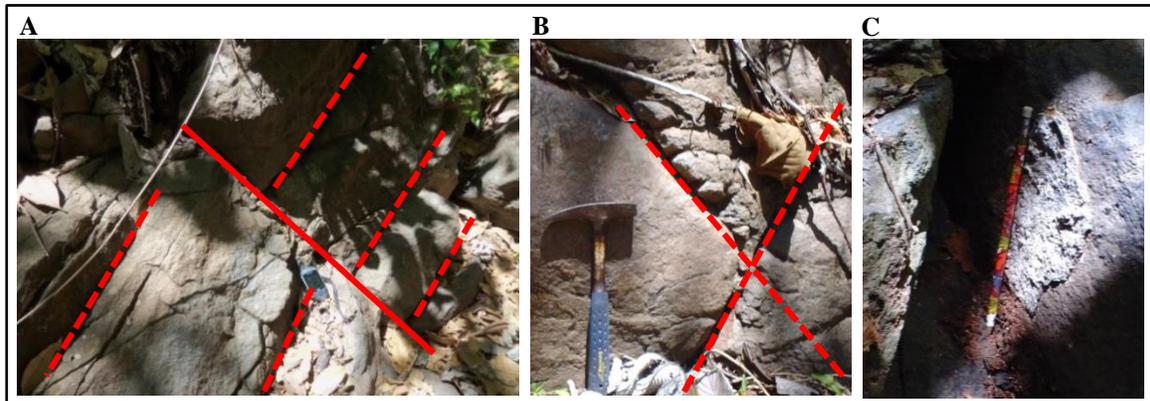


Figura 59. A) Fracturas paralelas asociadas perpendicularmente a traza de falla principal. B) Arreglo conjugado en flujo de lava andesítica. C) Intercrecimiento de minerales en plano de falla. Las tres figuras pertenecen a la zona de Falla Santa Clara. Coordenadas: A) X 520395 Y 1395369; B) X 520430 Y 1395382; C) X 520361 Y 1395011.

#### d) Falla El Ñajo Este

Son dos fallas paralelas localizadas al este del lineamiento El Ñajo, que pertenece a la fase de deformación Norte-Sur, sus longitudes son: 1.04 km y 2.9 km aproximadamente. La orientación de ambas estructuras es N 40°E.

Al igual que el lineamiento El Ñajo (Norte-Sur) los puntos cartografiados de esta estructura afectan rocas andesíticas alteradas hidrotermalmente debido a las características propias de la zona.

En el trabajo de campo realizado no se identificaron indicadores cinemáticos, sin embargo, se definió la morfología de esta estructura (Figura 60).



Figura 60. Escarpe de Falla El Ñajo Este. Coordenadas: X 521360 Y 1397270.

En la fase de deformación Noreste-Suroeste, existen estructuras geológicas que no fueron comprobadas durante el trabajo de campo realizado. Sin embargo, fueron representadas en el Mapa Estructural elaborado (Figura B) basándonos en la fotointerpretación efectuada en conjunto con el análisis de los mapas de pendiente y modelo sombreado.

Las estructuras geológicas no comprobadas durante el trabajo de campo y definidas en la presente monografía son las siguientes:

➤ Lineamiento Piedras Quemadas

Son tres lineamientos sub-paralelos que se sitúan al norte de la zona de estudio, en la localidad del mismo nombre. Presentan rumbo N 10° E, N 35°E y N 32°E, sus longitudes son de 957 m, 1.9 km y 1.53 km respectivamente. El lineamiento de mayor extensión está dividido en dos segmentos debido al corte efectuado por la Falla Santa Elena, la cual pertenece a la primera fase de deformación Noroeste-Sureste.

El lineamiento Piedras Quemadas afecta principalmente rocas de composición andesita-basáltica.

➤ Lineamiento El Ojochal Oeste

Son dos lineamientos paralelos de rumbo N 45°E y se localizan al oeste de la estructura volcánica semicircular El Ojochal. La longitud de cada uno de ellos es de 791 m y 1.1 km respectivamente.

De ambos lineamientos, el de mayor extensión se localiza en el borde noroeste de las estructuras volcánicas secundarias de La Joya.

Litológicamente, el Lineamiento El Ojochal Oeste afecta rocas de la Unidad I - Andesita, sin embargo, también intercepta la Unidad III - Depósitos Piroclásticos.

Por otra parte, la estructura caldérica Los Tablones se encuentra segmentada por fallas que pertenecen a este sistema de deformación (NE-SW) por lo cual estas fallas conservan el nombre de la estructura que atraviesan. Sin embargo, se clasificaron con letras con la finalidad de individualizarlas y evitar confusiones.

De norte a sur, las fallas se describen a continuación:

e) Falla Los Tablones A

Se localiza al noreste del área, segmenta tanto la zona norte de la estructura caldérica Los Tablones como el lineamiento La Esperanza de orientación Norte-Sur. Posee una extensión superficial de 2.8 km aproximadamente y su rumbo es N 44°E.

Afecta principalmente flujos de lava andesítica, los cuales se encuentran deformados.

Entre los principales indicadores cinemáticos identificados se encuentran sigmoides, clastos rotados y desplazamiento de bloques.

El sector sur de la Falla Los Tablones A intercepta el extremo norte de la estructura semicircular El Ojochal, así como el lado norte de la Falla El Ojochal Noroeste perteneciente a la fase de deformación Noroeste-Sureste. Las rocas que yacen en esta zona de intersección presentan evidencia de alteración hidrotermal.

A partir de las mediciones realizadas se elaboró la roseta de fracturas correspondiente a esta estructura, la cual muestra una dirección principal de esfuerzos hacia el N 55°E (Figura 61).

Las características cinemáticas de esta falla muestran que es una zona de fallamiento normal, generalmente con componente lateral izquierda.

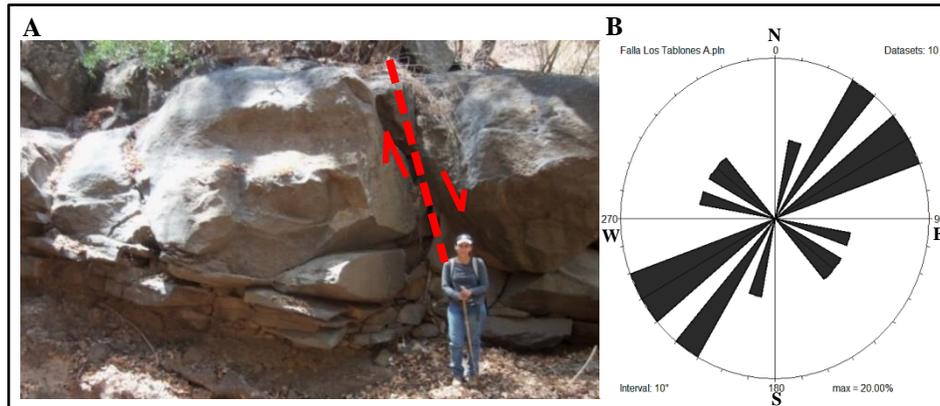


Figura 61. A) Traza de Falla Los Tablones A, movimiento normal con componente lateral izquierdo. Flechas indican el desplazamiento de los bloques. Coordenadas: X 521599 Y 1396202. B) Roseta de fracturas Falla Los Tablones A, dirección principal de esfuerzos hacia el N 55°E.

f) Lineamiento Los Tablones B

Segmenta la estructura caldérica Los Tablones y tiene orientación N 53°E, mide aproximadamente 2.8 km de longitud.

Durante el trabajo de campo efectuado no se encontraron indicadores cinemáticos que comprueben la existencia de esta estructura, sin embargo, fue representada en el Mapa Estructural basándonos en la fotointerpretación realizada en conjunto con el análisis de los mapas de pendientes y de modelo sombreado que fueron elaborados.

g) Falla Los Tablones C

Se encuentra al este del área y divide la parte central de la estructura caldérica Los Tablones. Mide 1.03 km de longitud aproximadamente y tiene rumbo hacia el N 82°E.

Litológicamente afecta flujos de lava andesítica y depósitos piroclásticos.

Se identificaron numerosos indicadores cinemáticos que evidencian la existencia de esta falla, siendo los principales: sigmoides, escalones, clastos rotados, arreglos conjugados y desplazamiento de bloques (Figura 62).

A partir de las mediciones realizadas durante el trabajo de campo se elaboró la roseta de fracturas correspondiente a la falla Los Tablones C, la cual muestra dirección principal de esfuerzos hacia el N 25°E.

Las características cinemáticas de esta falla muestran que es una zona de fallamiento normal.

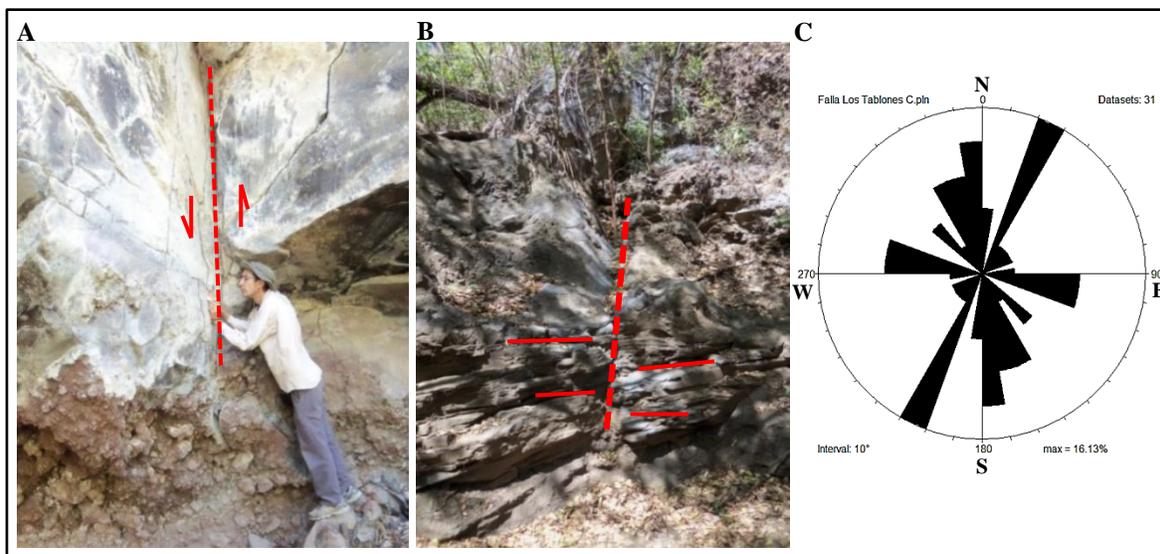


Figura 62. A) Traza de Falla Los Tablones C, movimiento normal, flechas indican el desplazamiento de los bloques. Coordenadas: X 523446 Y 1394251. B) Fracturas perpendiculares al plano principal. Coordenadas: X 523388 Y 1394240. C) Roseta de fracturas Falla Los Tablones C, dirección de máximo esfuerzo hacia el N 25° E.

#### *h) Falla Los Tablones D*

Se encuentra al sureste de la estructura caldérica Los Tablones, mide 1.1 km de longitud aproximadamente y su rumbo es N 68°E.

Esta estructura afecta principalmente rocas andesíticas, durante el trabajo de campo realizado se identificaron indicadores cinemáticos como sigmoides, estrías y escalones. El área afectada se caracteriza por fallamiento inverso (Figura 63).

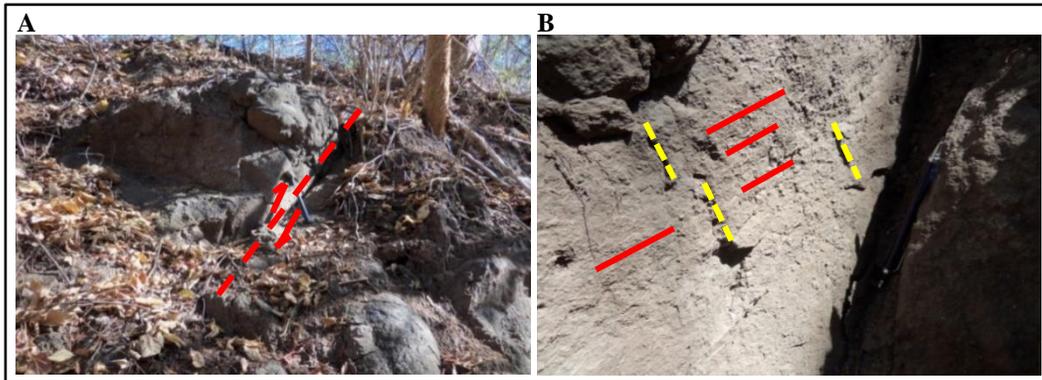


Figura 63. A) Falla inversa, flechas indican el desplazamiento de los bloques. B) Estrías y escalones perpendiculares entre sí. Coordenadas: X 523860 Y 1393551.

Las mediciones realizadas en las estructuras geológicas pertenecientes a la fase de deformación Noreste-Suroeste fueron graficadas en la roseta de fracturas, la cual indica que el eje de deformación correspondiente a esta fase es N 50°E (Figura 64).

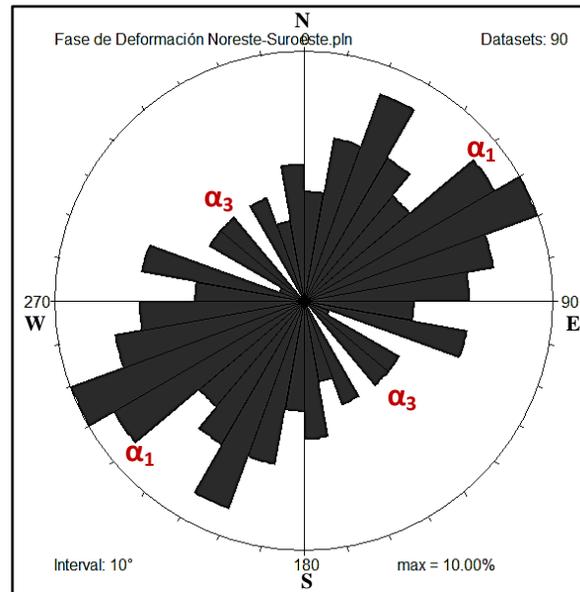


Figura 64. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Noreste-Suroeste. Eje de deformación N 50°E indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión.

#### 4.5.4 ESTE-OESTE (E-W)

El sistema Este-Oeste corresponde a la última fase de deformación, por tanto, las fallas que pertenecen a esta etapa son las más jóvenes. Se localizan principalmente al sureste del área de estudio, cortan y desplazan sistemas de fallas más antiguos y estructuras volcánicas como por ejemplo la estructura caldérica Los Tablones.

Las fallas más significativas en esta fase son: Falla El Ojochal Sur, Falla El Ojochal Este-Oeste y Falla Los Prados Sur.

##### a) Falla El Ojochal Sur

Esta falla presenta orientación Este-Oeste, su extensión es de aproximadamente 3.6 km, se encuentra dividida en cuatro segmentos con arreglo geométrico en echelón derecho y las zonas de relevo tienen una extensión que oscila entre 128 m y 504 m.

La longitud de los segmentos que conforman la Falla El Ojochal Sur varía desde 307 m a 953 m y tienen rumbo preferencial hacia el N 73°W y N 78°W, los cuales se extienden desde el suroeste del área de estudio, comprendiendo sitios de las comunidades Agua Fría y El Ojochal.

Esta estructura geológica segmenta la Falla La Joya Noroeste, que pertenece al sistema de deformación Noroeste-Sureste.

La Falla El Ojochal Sur afecta rocas de tres Unidades Litológicas distintas: Unidad I - Andesita, Unidad II - Andesita Basáltica y Unidad III - Depósitos Piroclásticos.

Los principales indicadores cinemáticos identificados durante el trabajo de campo corresponden a estrías, intercrecimiento de minerales en planos de fallas y desplazamiento de bloques, también se observaron numerosas fracturas secundarias en los afloramientos localizados (Figura 65).

De igual manera se describieron zonas de falla inferida tomando en cuenta la topografía abrupta del lugar (Figura 66).

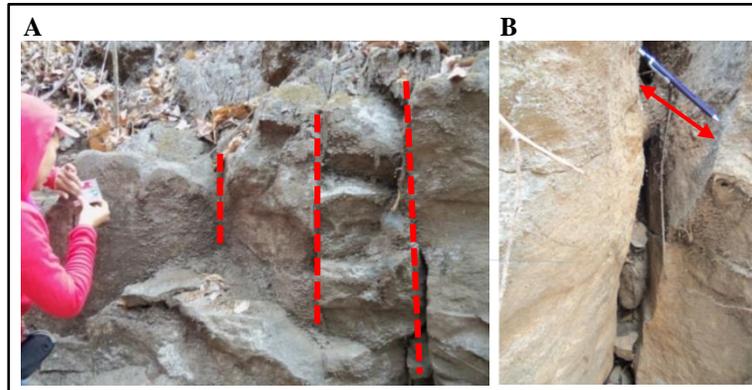


Figura 65. A) Sistema de fracturas paralelas en traza de Falla El Ojochal Sur. B) Abertura de 7cm de ancho entre los bloques, lo cual indica los esfuerzos que actúan en esta zona. Coordenadas: X 521064 Y 1394015.

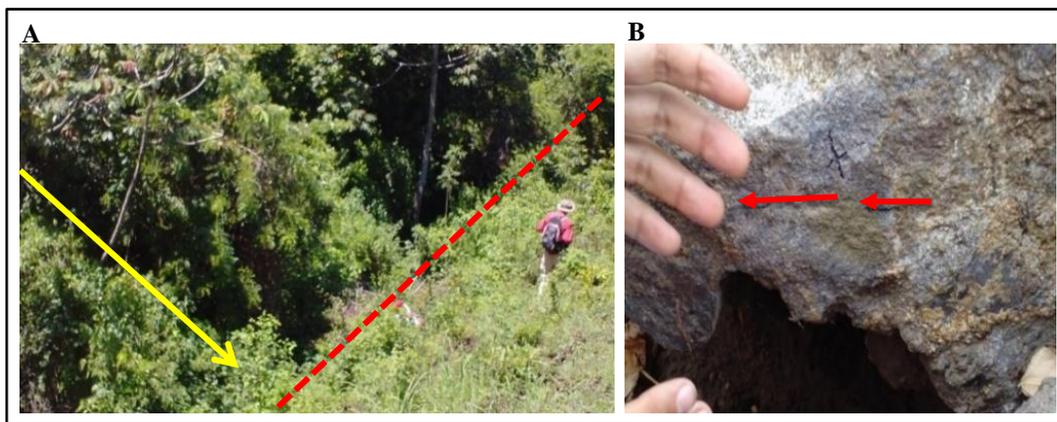


Figura 66. A) Pendiente pronunciada, falla inferida. Coordenadas: X 519470 Y 1394227. B) Flechas paralelas a las estrías producto del desplazamiento de los bloques en traza de Falla El Ojochal Sur, se observa crecimiento de minerales. Coordenadas: X 520853 Y 1394058.

#### b) Falla El Ojochal Este-Oeste

Se ubica al sureste de la estructura volcánica semicircular de El Ojochal, tiene orientación E-W y mide 987 m de longitud aproximadamente.

Corta principalmente flujos de lava andesítica, sin embargo, en sitios puntuales existen afloramientos de material piroclástico tales como pómez y escoria.

A lo largo de la zona de falla se identificaron indicadores cinemáticos, planos de falla y fracturas relacionados con los esfuerzos que han afectado el área (Figura 67).



Figura 67. Traza de Falla El Ojochal Este-Oeste, sistema de fracturas paralelas en flujo de lava andesítica. Coordenadas: X 521578 Y 1393658.

Durante el trabajo de campo realizado se identificaron numerosos afloramientos con lavas dispuestas de forma laminar y vertical (Figura 68).

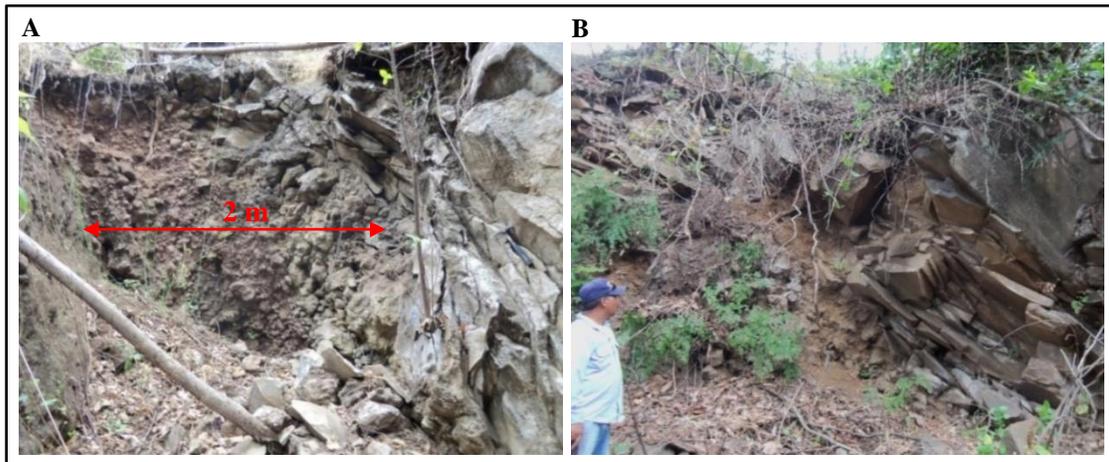


Figura 68. A) Lavas dispuestas verticalmente en contacto con horizonte de escoria, separación entre bloques de lava de 2 m aproximadamente. Coordenadas: X 522125 Y 1393613. B) Contacto sub-vertical entre lavas laminares y escoria. Coordenadas: X 522091 Y 1393597. Ambas figuras corresponden al área afectada por la Falla El Ojochal Este-Oeste.

c) Falla Los Prados Sur

Esta estructura es paralela al lineamiento Los Prados, se localiza al sur del mismo y mide 340 m de longitud aproximadamente.

El área afectada por la Falla Los Prados Sur es una zona de intensa deformación, se identificaron numerosos indicadores cinemáticos como estrías, escalones, arreglos conjugados. Estos indicadores demuestran los esfuerzos a los cuales han sido expuestos los flujos de lava andesítica que predominan en la zona (Figura 69).

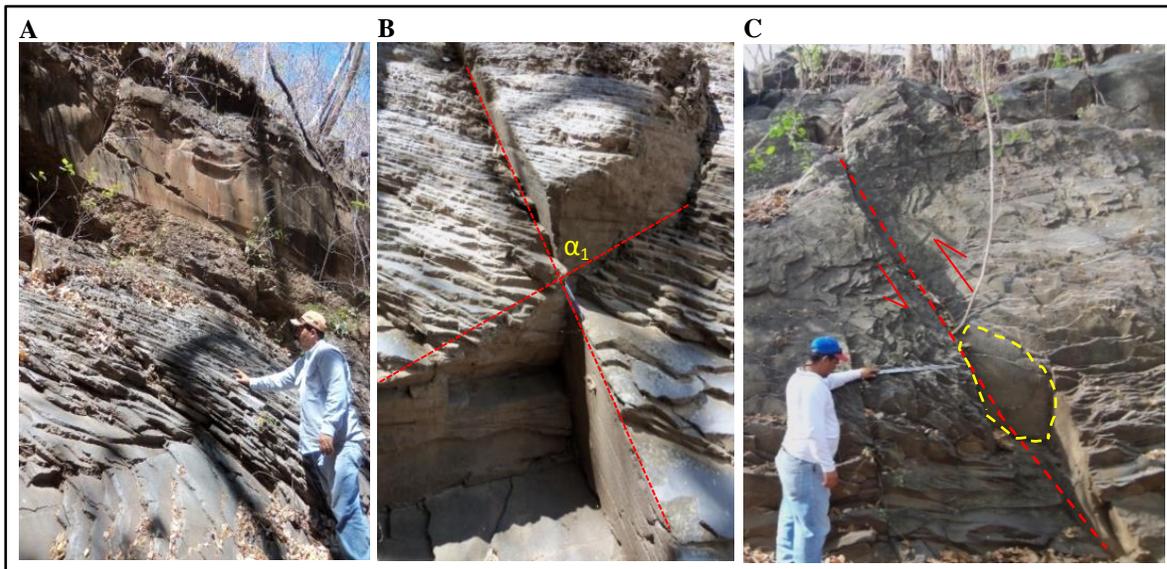


Figura 69. A) Deformación en flujos de lava andesítica dispuestos en forma laminar en la parte inferior. Coordenadas: X 522524 Y 1392473. B) Arreglo conjugado,  $\alpha_1$  sub-vertical. C) Traza de Falla Los Prados Sur, sigmoide indica el movimiento de la falla principal, flechas señalan el bloque que cae, falla inversa. Coordenadas X 522681 Y 1392442.

En la fase de deformación Este-Oeste existen dos estructuras geológicas que no fueron comprobadas durante el trabajo de campo realizado. Sin embargo, fueron representadas en el Mapa Estructural elaborado (Figura B) basándonos en la fotointerpretación efectuada en conjunto con el análisis de los mapas de pendiente y modelo sombreado.

Las estructuras geológicas no comprobadas durante el trabajo de campo son las siguientes:

➤ Lineamiento Los Prados

Este lineamiento se localiza en la comunidad Los Prados, en el extremo sur de la estructura volcánica antigua Los Tablones. Su extensión es de 3.3 km aproximadamente. Se divide en dos secciones, ambas con orientación E-W y longitudes de 1.9 km y 1.3 km respectivamente.

Los segmentos que conforman esta estructura presentan geometría en echelón izquierdo y su zona de relevo mide 121.7 m aproximadamente. Litológicamente afecta rocas andesíticas.

➤ Lineamiento Los Tablones Este-Oeste

Son cuatro lineamientos paralelos localizados al este de la estructura caldérica Los Tablones, sus longitudes oscilan entre 234 m y 1 km, su orientación es E-W y afectan rocas de composición andesítica.

Las mediciones realizadas en las estructuras geológicas pertenecientes a la fase de deformación Este-Oeste fueron graficadas en la roseta de fracturas, la cual indica que el eje de deformación correspondiente a esta fase es N 75°E (Figura 70).

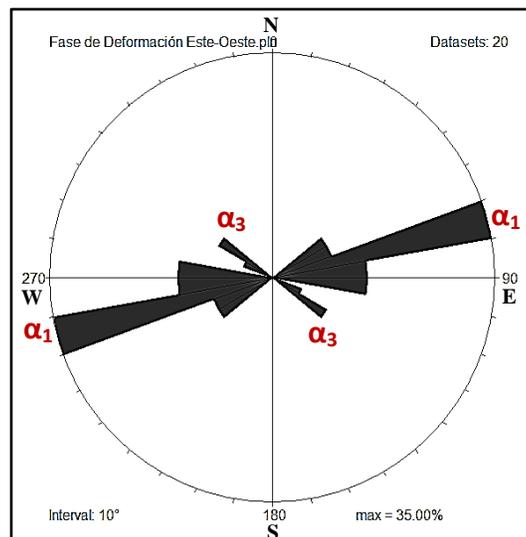


Figura 70. Roseta de fracturas correspondiente a la fase de deformación Este-Oeste. Eje de deformación N 75°E indicado por  $\alpha_1$  (dirección de compresión),  $\alpha_3$  indica dirección de extensión.

#### **4.6 ANÁLISIS DE PERFILES GEOESTRUCTURALES**

En el Mapa Geológico-Estructural de la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate se realizaron dos perfiles geológicos-estructurales, estos fueron identificados como L - L' y M - M'.

El perfil L (Figura A) de dirección Suroeste-Noreste, tiene una longitud de 6.8 km aproximadamente.

El perfil M (Figura A) de dirección Noroeste-Sureste, tiene una longitud de 6.6 km aproximadamente.

Ambos perfiles atraviesan las Unidades Litológicas I, II, III y IV correspondientes a Andesita, Andesita-Basáltica, Depósitos Piroclásticos y Basalto, respectivamente.

Las fallas geológicas que interceptan, pertenecen a las cuatro fases de deformación definidas en este trabajo.

En ellos se observan la forma en la cual posiblemente se encuentren dispuestas en profundidad las Unidades Litológicas especificadas, así como el modo en el cual las fallas geológicas han afectado dichas unidades.

## **CAPÍTULO V: ALTERACIÓN HIDROTHERMAL**

La existencia de sistemas geotermales es a menudo, pero no siempre, caracterizada por ciertas manifestaciones superficiales que incluyen manantiales termales, fumarolas, y alteración hidrotermal del suelo y rocas (Arnórsson, 2000). En la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate existen estos tipos de manifestaciones localizados principalmente en las comunidades El Carol-Agua Fría y El Ñajo.

La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución y/o precipitación de estos, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma.

Durante largos períodos la actividad geotermal cambia en intensidad y localización, aunque muchos cambios sucederán con eventos no relacionados directamente con la actividad termal, como la erosión, movimientos de tierra o actividad volcánica (Browne, 1978).

La característica esencial de la alteración hidrotermal es la conversión de un conjunto mineral inicial en una nueva asociación de minerales más estable bajo las condiciones hidrotermales de temperatura, presión y sobretodo de composición de fluidos. La textura original de la roca puede ser modificada ligeramente o completamente transformada por la alteración hidrotermal (Maksaev, 2001).

El reconocimiento de las alteraciones hidrotermales relacionadas a actividad hidrotermal-magmática reciente o en proceso es parte fundamental de toda exploración geotérmica. En Nueva Zelanda, Italia y Filipinas este tipo de estudios ha sido fundamental para la identificación de prospectos que han sido posteriormente explotados.

## **5.1 FACTORES QUE CONTROLAN LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL DE LAS ROCAS**

- a) *Temperatura*
- b) *Composición del fluido*
- c) *Permeabilidad de la roca*
- d) *Duración de la interacción agua/roca*
- e) *Composición de la roca*
- f) *Presión*

Los dos factores iniciales temperatura y composición del fluido hidrotermal son los más importantes para la mineralogía hidrotermal resultante de un proceso de alteración. Esto es relevante porque las asociaciones de minerales hidrotermales nos dan indicios de las condiciones en que se formaron depósitos minerales de origen hidrotermal (Maksaev, 2001).

## **5.2 TIPOS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL**

La alteración hidrotermal produce un amplio rango de mineralogía, abundancia mineral y texturas en distintas rocas, por lo cual se dificulta realizar una clasificación uniforme de tipos de alteración.

Debido a que los minerales de alteración no se presentan individualmente sino que forman ciertos grupos o asociaciones de minerales, en este trabajo se utilizó la siguiente clasificación de tipos de alteración hidrotermal (Tomada de Pérez, 1998):

**Argílica:** Se caracteriza por la presencia de minerales arcillosos (esmectita, montmorillonita, sericita, illita) sílice amorfa, alunita y zeolitas.

Esta asociación mineral se forma en rocas silicatadas y altera la parte vítrea más inestable y consiguientemente más alterable.

Se desarrollan en la zona de baja temperatura, en un rango entre 70 °C y 150 °C, donde domina el aporte de calor por conducción.

**Filítica:** Disminuyen los minerales illita-montmorillonita y aumentan los de la fase de los filosilicatos, esencialmente de clorita, illita y sericita.

El rango de temperaturas de formación es entre 150 °C y 240 °C.

**Propilítica:** Los minerales son epidota, albita, wairakita, adularia, clorita, cuarzo, pirita, calcita con sericita-illita y óxidos de hierro subordinados. La epidota es el mineral índice de mayor abundancia en esta zona.

Disminuyen la presencia de zeolitas y minerales arcillosos, la presencia de la asociación mineral anterior indica una interacción muy activa y muy intensa entre el fluido geotérmico y la roca.

El rango de temperaturas de formación es entre 240 °C y 260 °C.

**Metamorfismo Hidrotermal:** Se localiza en la parte más profunda de un área geotérmica, se caracteriza por la presencia de rocas con textura reorganizada, con minerales de alta temperatura como actinolita, pirrotita, diópsido, granate, escapolita, entre otros. La cercanía de la fuente de calor provoca una anomalía térmica.

El rango de temperaturas de formación es mayor a 260 °C.

### 5.3 ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

Durante el trabajo de campo realizado se identificaron y describieron las zonas alteradas hidrotermalmente en el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate, las cuales se encuentran distribuidas principalmente al noroeste y centro del área de estudio (Figura C).

Los nombres designados a las zonas de alteración hidrotermal corresponden con el nombre de las localidades en las cuales se manifiestan, siendo estas las siguientes:

- El Carol-Agua Fría
- El Ñajo
- El Ojochal

En estos sitios de alteración se realizó muestreo de rocas, alteradas y no alteradas; se elaboraron seis secciones delgadas para su análisis petrográfico, se analizaron nueve muestras por el método de Difracción de Rayos X para identificar minerales, y se efectuó muestreo de gases<sup>7</sup> en cinco fumarolas para determinar la concentración de gases, aplicar geotermometría<sup>8</sup> y así estimar la temperatura del posible reservorio geotérmico.

Cada área de alteración es descrita de forma individual, presentando sus características superficiales, descripción macroscópica y petrográfica de las muestras obtenidas durante el trabajo de campo realizado.

---

<sup>7</sup> Muestreo de gases ejecutado por personal del laboratorio de Geoquímica del Ministerio de Energía y Minas, Nicaragua.

<sup>8</sup> Geotermometría aplicada por el equipo de Geoquímica de la empresa Polaris Energy Nicaragua S.A. Los resultados de Geotermometría se presentan en el Anexo F.

### 5.3.1 El Carol - Agua Fría

Se ubica al oeste del área de estudio, cubre una superficie aproximada de 0.88 km<sup>2</sup>, con altitud variable entre 380 m.s.n.m y 560 m.s.n.m.

El Carol - Agua Fría es una zona de intensa alteración hidrotermal caracterizada por la presencia de fumarolas, suelos calientes y manantiales termales. Todas estas manifestaciones termales pueden considerarse como parte de un sistema geotérmico activo que se encuentra reflejado en superficie debido al grado de fracturamiento y fallamiento local.

La tendencia de las alteraciones hidrotermales es variable. El sector de fumarolas tiene orientación predominante NW-SE, asociado al control estructural definido por la Falla La Joya Noroeste. Las emanaciones gaseosas presentan mezcla de vapor de agua y gases como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, predominando los compuestos sulfurados, lo cual se observó en la marcada deposición de azufre nativo en los alrededores de estas emanaciones (Figura 71). Este proceso es conocido como sublimación inversa, que es el paso directo del estado gaseoso al estado sólido.

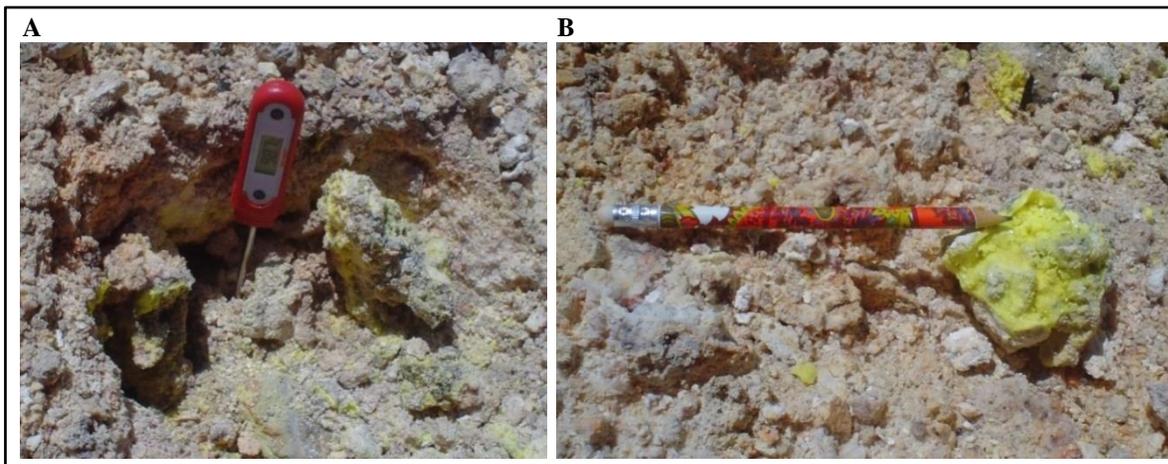


Figura 71. Medición de temperatura en fumarola, se observa la deposición de azufre nativo alrededor de esta. B) Muestra de mano deposición de azufre nativo en lava alterada, localidad El Carol. Coordenadas: X 518764 Y 1395742.

El área de fumarolas muestra una zona de lavas y suelos alterados, presentando una temperatura que oscila entre 68.1°C y 99°C; las lavas se observan fracturadas y con distintas tonalidades entre blanco, rojo, amarillo, verde, café, entre otros; el suelo presenta alteración de color rojiza debido probablemente a la presencia de minerales de hierro (Figura 72).

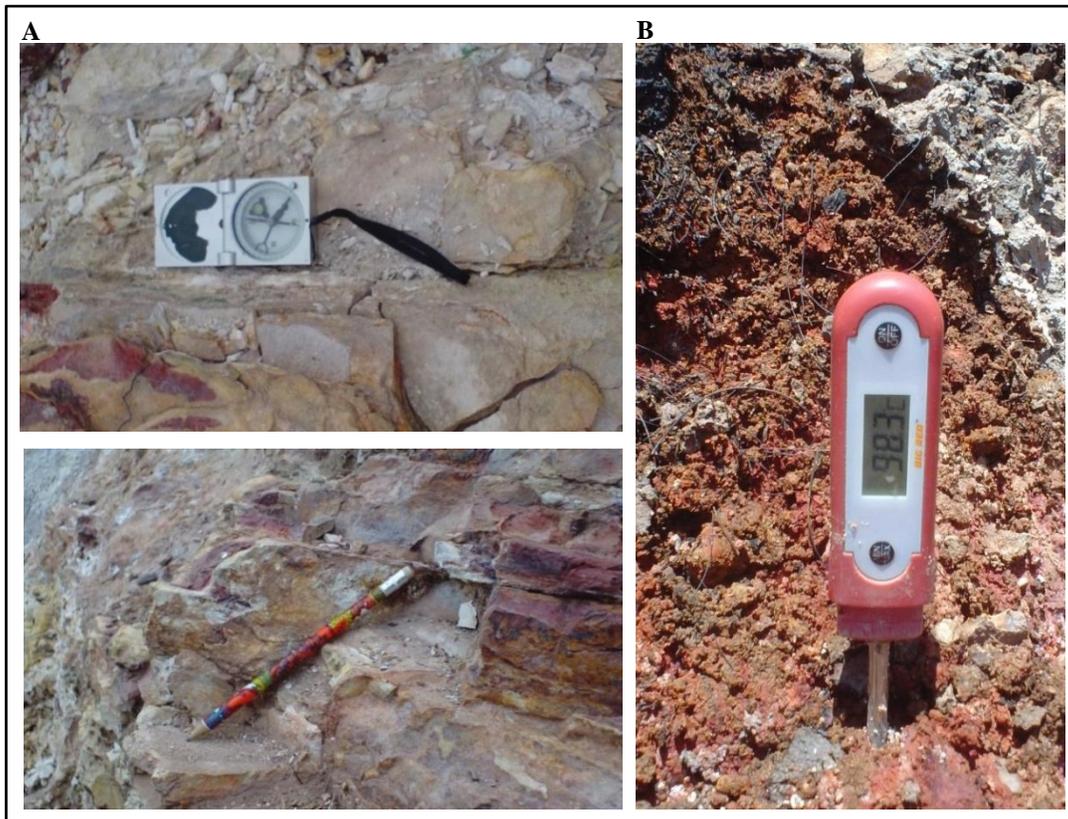


Figura 72. A) Planos de fracturas en lavas alteradas. Coordenadas: X 518801 Y 1395601. B) Medición de temperatura suelos calientes, localidad Agua Fría. Coordenadas: X 518809 Y 1395708.

En las muestras de mano analizadas se observó la intensa alteración que presentan las rocas de este sitio, por lo que se realizó análisis de Difractometría de Rayos X a cuatro muestras y se elaboró una sección delgada.

El ejemplar de la sección delgada (M1-0207), macroscópicamente es de dureza media, se encuentra alterado a minerales arcillosos y reacciona con ácido clorhídrico, lo cual indica la presencia de carbonato de calcio. En superficie exhibe abundante pirita con su hábito cúbico característico (Figura 73).

Microscópicamente se evidenció la presencia de minerales opacos, calcita y minerales de arcilla. En su matriz presenta venillas rellenas de material silíceo (Figuras 74 y 75).

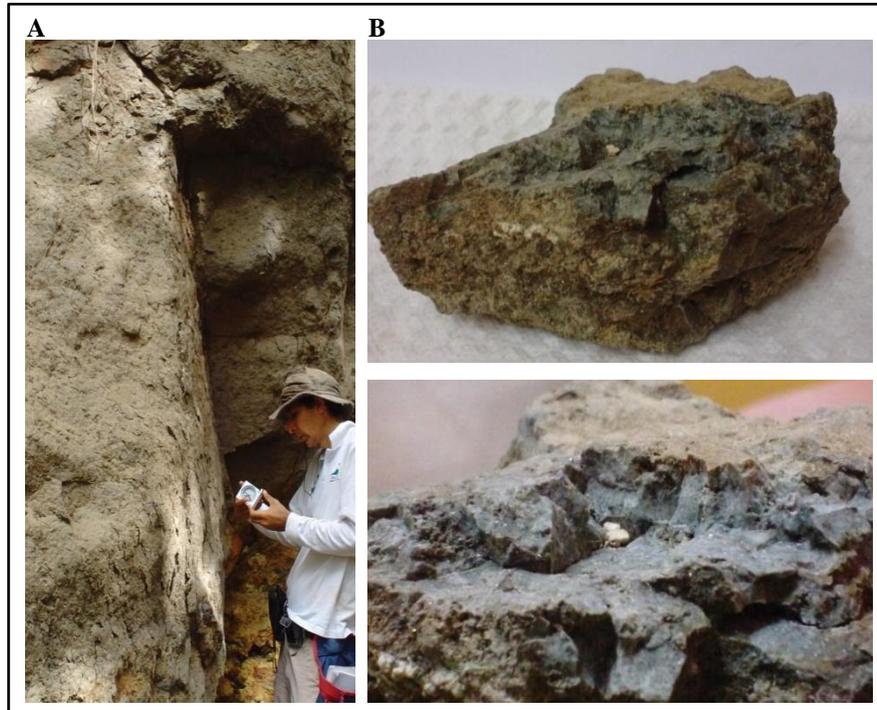


Figura 73. A) Afloramiento de andesita alterada de la cual se tomó la muestra M1-0207 (Figura B) para la elaboración de sección delgada. Se observan pequeñas concentraciones de carbonato de calcio y pirita diseminada en la roca, localidad Agua Fría. Coordenadas: X 518698 Y 1395949.

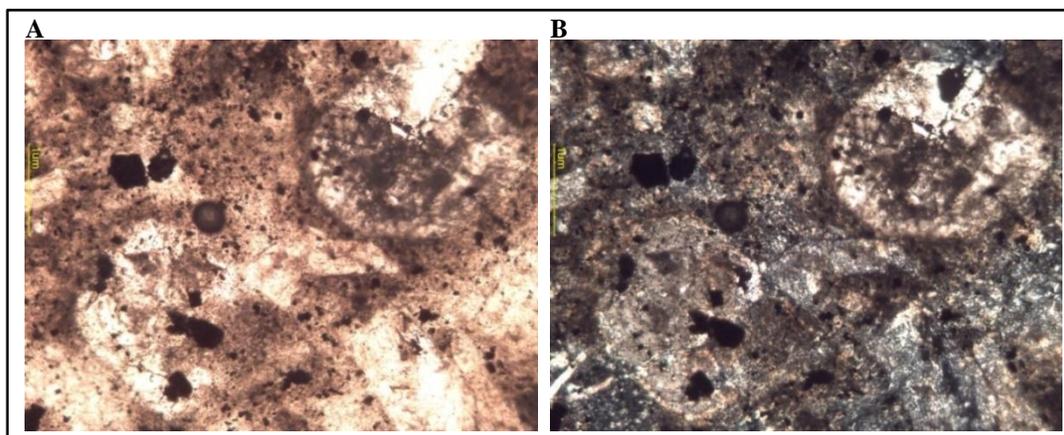


Figura 74. A) Nícoles paralelos, aumento 10x. Andesita alterada, se observa calcita con alteración a arcilla, minerales opacos a la izquierda de la figura. B) Nícoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 518698 Y 1395949.

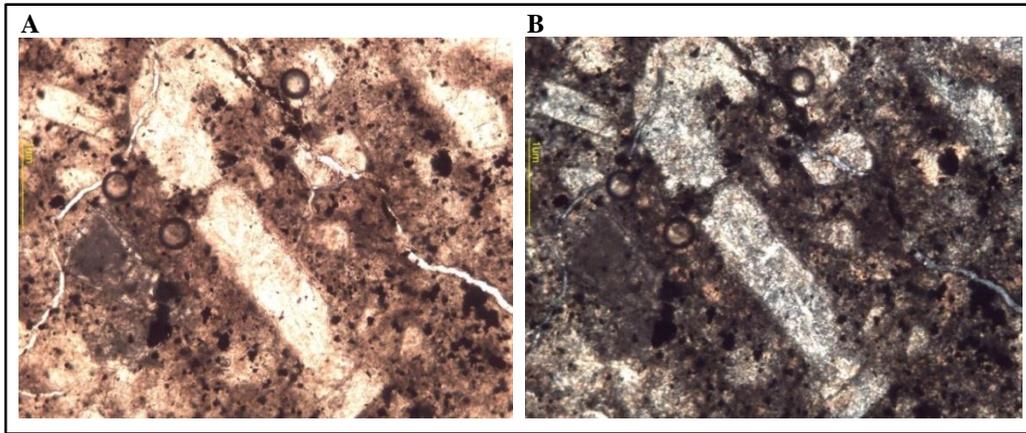


Figura 75. A) Nícoles paralelos, aumento 10x. Andesita alterada, se observan feldspatos subhedrales alterados a minerales arcillosos, pequeñas venillas rellenas de sílice. B) Nícoles cruzados, aumento 10x. Coordenadas: X 518698 Y 1395949.

Los resultados de la composición mineralógica de las muestras analizadas por Difractometría de Rayos X se muestran en la siguiente tabla:

Muestra	Coordenadas		Composición Mineralógica		Proporción (%)
	X	Y			
CT048-14	518764	1395742	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	49
			Azufre	S	22
			Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	21
			Caolinita	Al <sub>4</sub> (OH) <sub>8</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )	8
CT049-14	518806	1395604	Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	53
			Alunita	K,Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	23
			Caolinita	Al <sub>4</sub> (OH) <sub>8</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )	24
CT051-14	518806	1395604	Natroalunita	Na <sub>0.58</sub> K <sub>0.42</sub> Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	39
			Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	31
			Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	16
			Tridimita	SiO <sub>2</sub>	14
CT047-14	518806	1395604	Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	58
			Saponita	(Mg, Al, Fe) <sub>3</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	42

Tabla 2. Composición mineralógica de muestras analizadas por Difracción de Rayos X, zona de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría.

Los resultados muestran las asociaciones minerales creadas bajo las nuevas condiciones de equilibrio químico existente en esta zona de alteración, en la cual se observó que:

- ❖ Los minerales del grupo de la Sílice se identificaron en todas las muestras y se extienden en toda el área de fumarolas. Los minerales de este grupo son los únicos minerales estables en forma significativa en fluidos de pH bajo (Stoffregen, 1987), la cristobalita y tridimita ocurren en ambiente superficial de un sistema hidrotermal. Típicamente a temperaturas < 100 °C.
- ❖ La Alunita calentada por vapor (“steam-heated”) se desarrolla en ambientes superficiales, por la oxidación de fluidos con gas H<sub>2</sub>S, el cual deriva de un sistema hidrotermal en ebullición en profundidad (Hedenquist y Richards 1998). Los resultados muestran alunita rica en K y alunita rica en Na (natroalunita).
- ❖ La Caolinita deriva de la acción de fluidos de pH moderadamente bajo (aproximadamente pH 4), se forma a profundidades someras en condiciones de baja temperaturas (< 150 - 200 °C) y coexiste con Alunita en un rango de pH transicional (pH 3-4).

La mayoría de los minerales identificados (caolinita, alunita y el grupo de la sílice) pertenecen a la alteración ácida, donde el sistema hidrotermal está caracterizado por un sistema activo de vapor calentado (Resultados de Análisis por Difractometría de Rayos X, LaGeo, El Salvador, 2014). La figura 76 muestra la formación de azufre nativo acicular característico de zonas de este tipo.

Las asociaciones de minerales obtenidas, definen un tipo de alteración Argilítica avanzada calentada por el vapor, la cual incluye caolinita, alunita, natroalunita, azufre, cristobalita, cuarzo y tridimita.

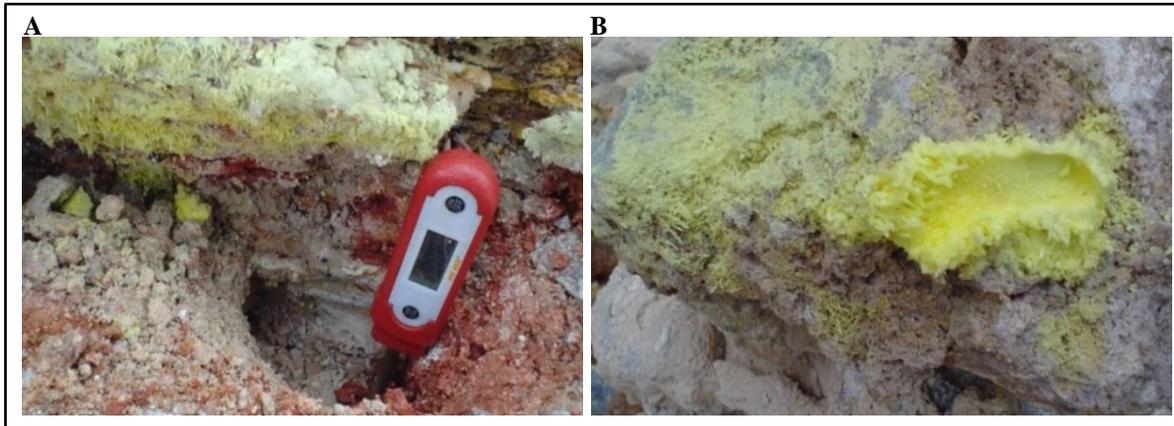


Figura 76. Formación de azufre nativo acicular típico de zonas de vapor calentado, zona El Carol-Agua Fría. Coordenadas: X 518804 Y 1395590.

La figura 77 presenta las muestras que fueron analizadas por Difracción de Rayos X.

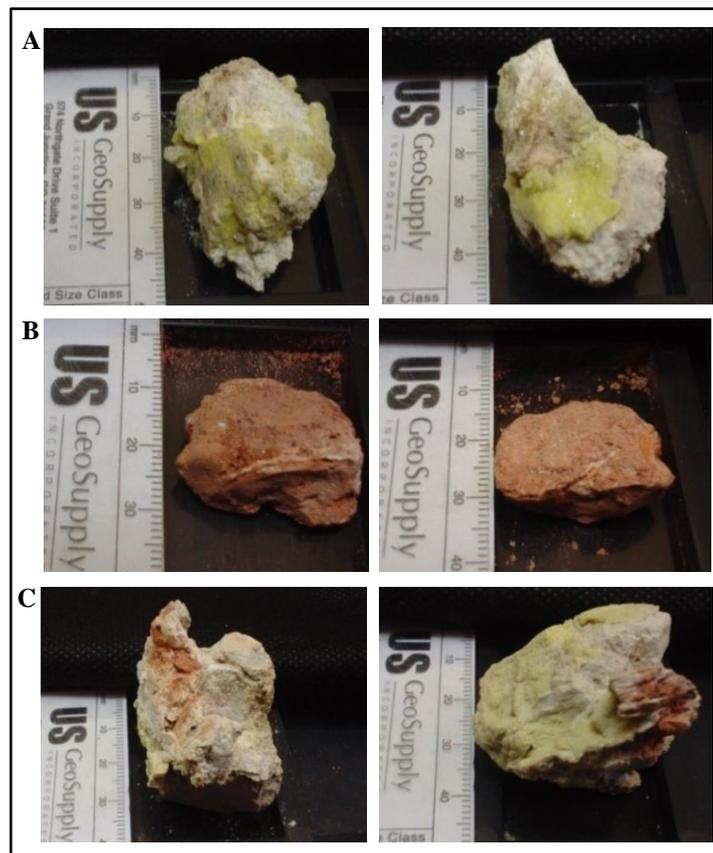


Figura 77. Muestras a las cuales se realizó análisis mineralógico por el método de Difracción de Rayos X correspondientes a la zona de alteración El Carol-Agua Fría. Ver tabla 2.

Como se explicó anteriormente, la zona de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría presenta fumarolas, suelos calientes y manantiales termales.

Los dos manantiales termales identificados se encuentran alineados en dirección N-S, estructuralmente se localizan en un área de intersección entre las fallas Agua Fría y El Carol, con orientaciones N-S y NE-SW, respectivamente.

El origen de estas manifestaciones se debe probablemente al calentamiento de agua subterránea por vapor con cierto contenido de gases, que asciende a la superficie a través de fallas y fracturas locales (Figura 78). El vapor geotérmico se puede condensar en las aguas frías, adquiriendo un pH ligeramente ácido. La temperatura medida en los manantiales fue de 82.6 °C y 80 °C.



Figura 78. Manantial termal zona de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría, minerales arcillosos, alto contenido de hierro. Coordenadas: X 518706 Y 1396042.

El área por donde circula el agua termal se observa principalmente de color rojizo debido a la alta concentración de minerales de hierro en el fluido. De igual manera, es notoria la coloración verde en los alrededores del manantial, este color es producto de organismos que viven en temperaturas mayores de 70 °C y que se denominan cianobacterias termofílicas (Brock et al., 1994).

De las muestras obtenidas durante el trabajo de campo, se elaboraron dos secciones delgadas (M3A-1206 y M3B-1206) y se analizó una muestra por el método de Difracción de Rayos X (CT050-14 M4).

Macroscópicamente la muestra M3A-1206 exhibe colores entre café, rojizo y blanco, es de dureza media, con fenocristales de plagioclasas euhedrales a subhedrales y textura afanítica. Superficialmente la muestra tiene zeolitas de hábito acicular (Figura 79).

En el análisis petrográfico se observó que es una andesita alterada hidrotermalmente, el tipo de alteración de la roca es silicificación, contiene fenocristales subhedrales de plagioclasas inmersos en una matriz de textura afanítica, fina y fluidal, se encuentra totalmente alterada y sus bordes están rodeados por zeolitas esferulíticas (Figura 80).

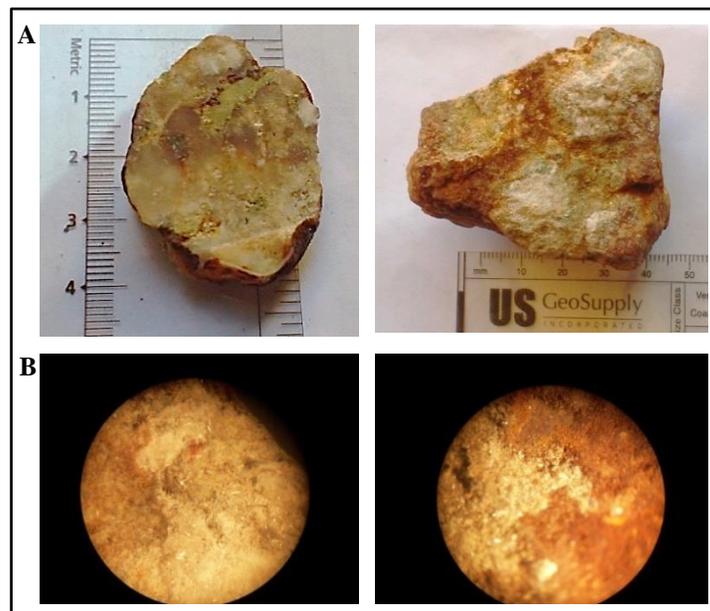


Figura 79. A) Muestra de mano M3A-1206. B) Minerales de zeolitas de hábito acicular vistas con lupa binocular, correspondientes a la muestra M3A-1206. Coordenadas: X 518708 Y 1396018.

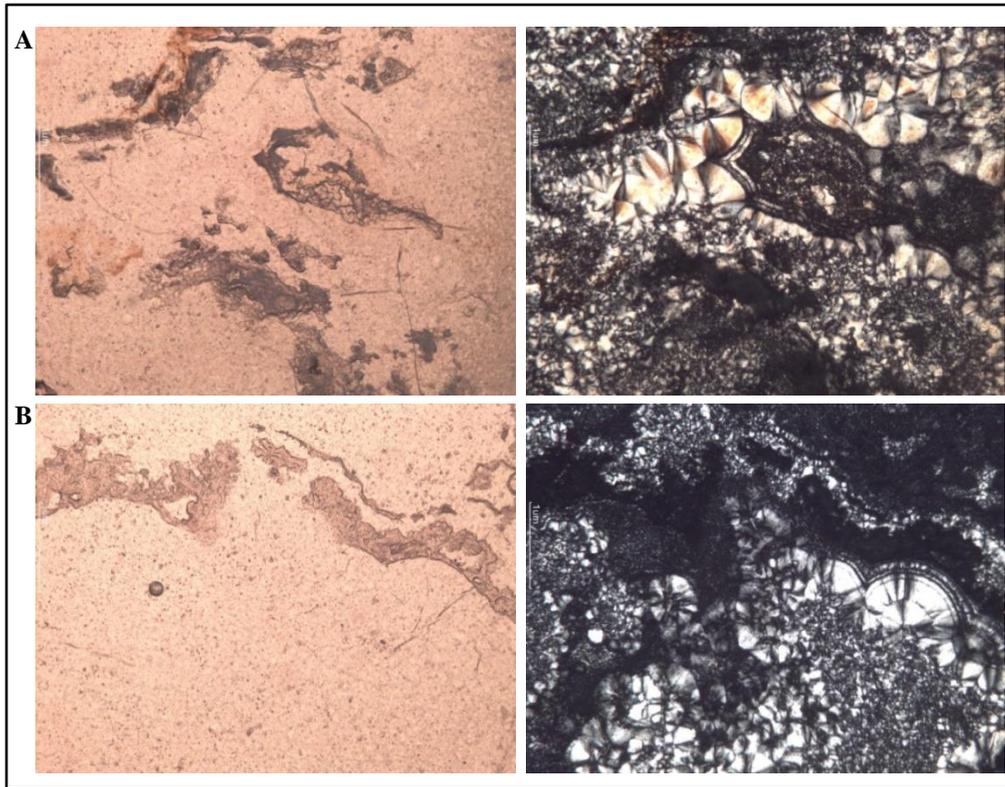


Figura 80. A) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 10x. Andesita alterada hidrotermalmente, se observan minerales de zeolitas esferulíticas formadas alrededor de relictos de fenocristales alterados. B) Nicoles paralelos y nicoles cruzados, aumento 10x. Andesita alterada hidrotermalmente, minerales de zeolitas esferulíticas formadas en los bordes de la muestra. Coordenadas: X 518708 Y 1396018.

La muestra M3B-1206 se encuentra alterada a minerales arcillosos y exhibe cristales de pirita en superficie (Figura 81). Microscópicamente presenta una matriz con abundantes fenocristales subhedrales a euhedrales de plagioclasas, todos alterados a minerales de arcillas y abundante pirita depositada en fracturas y diseminada por toda la roca. Se definió como una Andesita alterada con pirita diseminada (Figura 82).

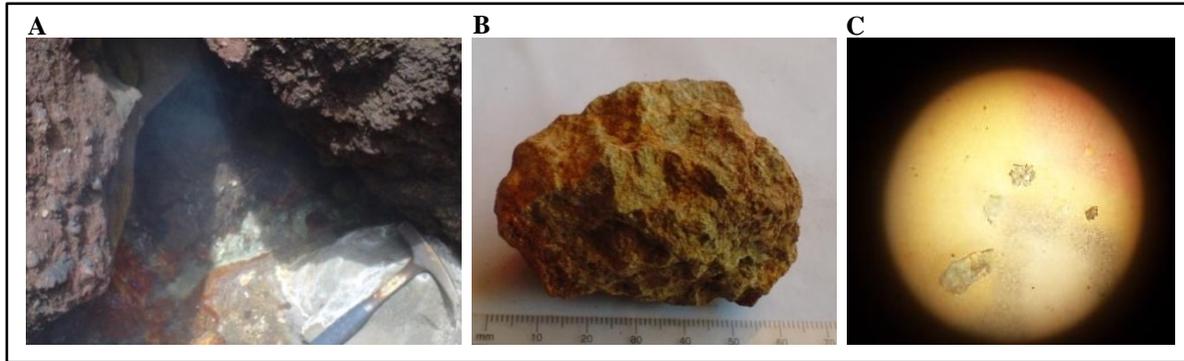


Figura 81. Figuras A y B muestran el afloramiento en campo y muestra de mano, correspondientes a la Muestra M3B-1206; abundante pirita disseminada en la roca. C) Cristales de pirita vistos bajo lupa binocular. Coordenadas: X 518708 Y 1396018.

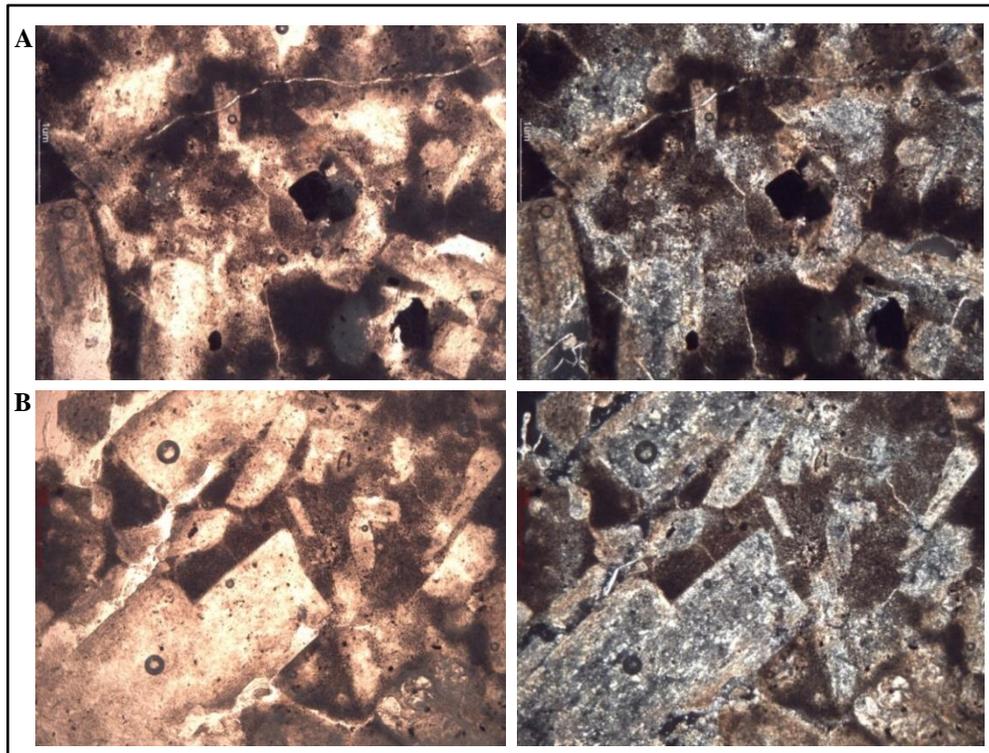


Figura 82. A) Nícoles paralelos y nícoles cruzados, aumento 4x. Andesita alterada, se observan minerales opacos disseminados en la roca. B) Nícoles paralelos y nícoles cruzados, aumento 4x. Andesita alterada, se observan plagioclasas subhedralas alteradas a minerales arcillosos. Coordenadas: X 518708 Y 1396018.

La tabla 3 muestra el resultado del análisis realizado mediante Difractometría de Rayos X a una muestra del área de los manantiales termales identificada como CT050-14 (Figura 83).

Muestra	Coordenadas		Composición Mineralógica		Proporción (%)
	X	Y			
CT050-14	518706	1396042	Goethita	FeO(OH)	58
			Montmorillonita-Clorita	(Na-Ca-Al-Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> -O)	42

Tabla 3. Composición mineralógica muestra CT050-14 a partir de análisis de Difractometría de Rayos X, localidad Agua Fría.

- ❖ La goethita es un mineral secundario de hierro que se forma por alteración superficial de minerales primarios como la pirita, calcopirita, magnetita entre otros.
- ❖ La montmorillonita es una arcilla que pertenece al grupo de las esmectitas, se expande al contacto con agua y se presenta a baja temperatura (< 100-150 °C).
- ❖ Minerales del grupo de la clorita tienen lugar en condiciones levemente ácidas a neutras de pH y coexisten con minerales del grupo de las arcillas en ambientes cuyo pH oscila entre 5-6.

La asociación mineral existente indica que las aguas someras calentadas por vapor han generado una zona con alteración argilítica intermedia con proporciones significativas de montmorillonita, la relación clorita-montmorillonita indica una alteración más neutra en relación a la alteración del área de fumarolas (Resultados de Análisis por Difractometría de Rayos X, LaGeo, 2014).

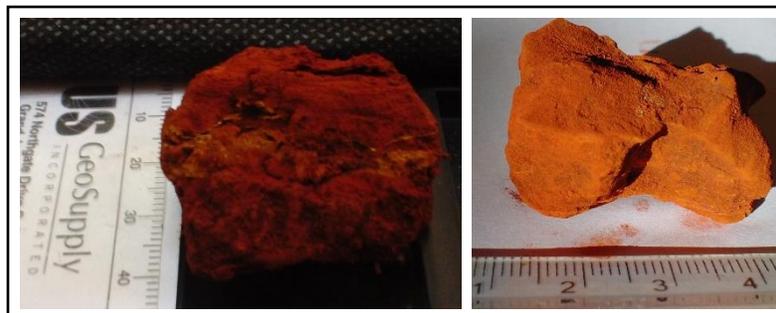


Figura 83. Muestra de mano CT050-14, se observan minerales arcillosos, su coloración rojiza es debido al alto contenido de Fe. Coordenadas: X 518706 Y 1396042.

En los puntos de alteración descritos anteriormente se realizó medición de temperatura; sin embargo, en la zona El Carol-Agua Fría también existen puntos de alteración fríos, los cuales no registran temperaturas por encima del valor promedio local ( $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Figura 84).

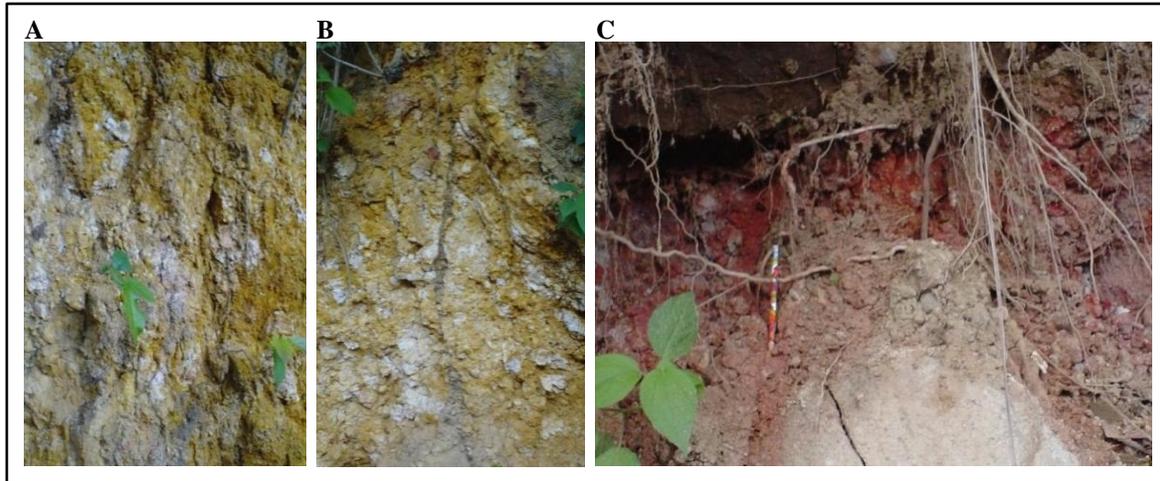


Figura 84. Minerales arcillosos de tonalidades amarillenta y rojiza, zona de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría. Coordenadas de figuras A y B: X 518663 Y 1395517. Coordenadas figura C: X 518674 Y 1395385.

En El Carol-Agua Fría se efectuó muestreo de gases de tres fumarolas para determinar la concentración de gases y se aplicaron los geotermómetros de gas  $\text{CO}_2/\text{H}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ , (Arnórsson and Gunnlaugsson, 1985).

Los geotermómetros son ecuaciones empíricas o termodinámicas desarrolladas por diferentes geocientistas y calibradas en diferentes campos geotérmicos del mundo, las cuales se basan en la solubilidad de los diferentes minerales en los fluidos geotérmicos o bien en la relación que exista entre la razón de varios iones presentes en estos fluidos (Tomado de Cisne, 2009).

Los resultados de geotermometría aplicada en esta zona indican una temperatura estimada de  $\approx 232\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Resultados completos en Anexo F).

### 5.3.2 El Ñajo

Se localiza en el centro del área de estudio, cubre una superficie aproximada de 2.8 km<sup>2</sup>, con altitud variable entre 300 m.s.n.m y 500 m.s.n.m.

El Ñajo es una zona de intensa alteración hidrotermal caracterizada por la presencia de fumarolas, suelos calientes y lodos hirvientes (Figura 85). Al igual que en la zona El Carol-Agua Fría, todas estas manifestaciones termales pueden considerarse como parte de un sistema geotérmico activo que se encuentra reflejado en superficie debido al grado de fracturamiento y fallamiento local.

La tendencia de las alteraciones hidrotermales es variable, por lo que el área puede dividirse en dos sectores controlados estructuralmente por fallas de distinto rumbo:

- a) El primer sector se localiza en la zona noroeste de El Ñajo, en el cual se manifiestan los lodos hirvientes, algunas fumarolas y puntos fríos de alteración, todos con orientación Norte-Sur. Este sector se encuentra asociado al control estructural definido por el lineamiento El Ñajo.
  
- b) El segundo sector se ubica al sureste de El Ñajo, se caracteriza por la presencia de fumarolas con alto grado de deposición de minerales y algunos puntos de alteración fríos. Estructuralmente este sector está definido por la intersección de tres estructuras geológicas: Falla El Ojochal Noroeste (de rumbo Noroeste-Sureste), Falla Los Tablones A (de rumbo Noreste-Suroeste) y la estructura semicircular El Ojochal, debido a esto las alteraciones no presentan orientación predominante en una sola dirección.

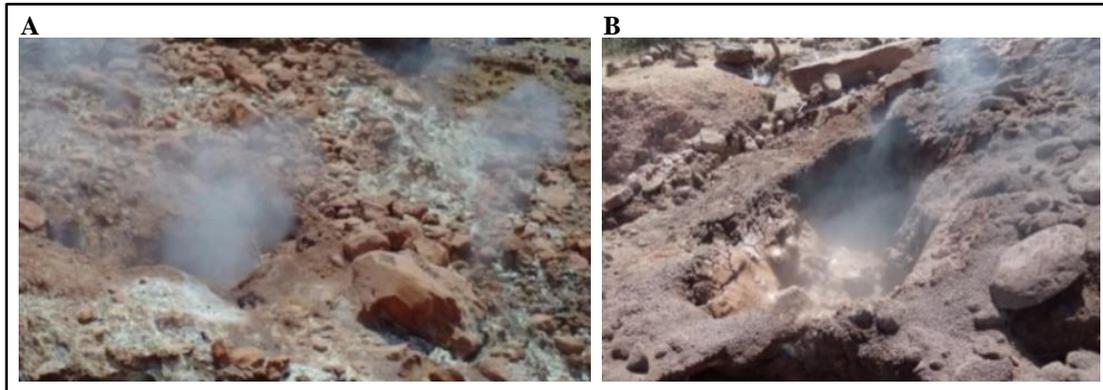


Figura 85. Área de fumarolas (A) y lodos hirvientes (B), zona de alteración hidrotermal El Ñajo. Coordenadas figura A: X 520681 Y 1396691. Coordenadas figura B: X 520678 Y 1396463.

La temperatura medida oscila entre 65.5 °C y 100 °C. La temperatura más baja corresponde con suelos calientes en los cuales no hay vegetación pero tampoco emanación de gases; en cambio la temperatura más alta pertenece a la zona de lodos hirvientes y fumarolas en el sector noroeste de El Ñajo.

Litológicamente se observaron lavas muy alteradas principalmente de color naranja y en los alrededores del área de cada fumarola es notoria la deposición de minerales de distintas tonalidades entre blanco, amarillo, rojo y verde (Figura 86).

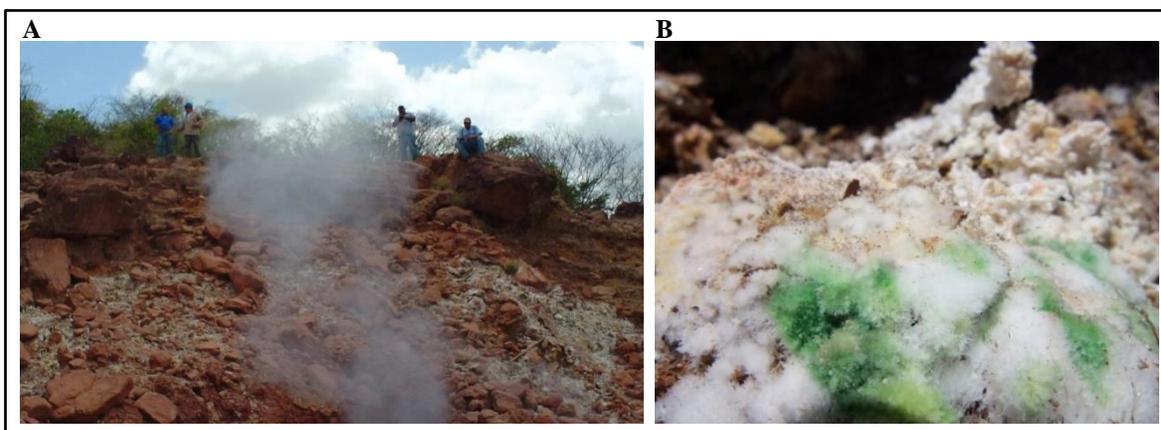


Figura 86. Zona de alteración hidrotermal El Ñajo. A) Área de fumarolas en el sector noroeste de El Ñajo. Coordenadas: X 520681 Y 1396691. B) Deposition de minerales en el sector sureste de El Ñajo. Coordenadas: X 521095 Y 1395675.

En las muestras de mano analizadas se observó la intensa alteración que presentan las rocas de este sitio, por lo que se realizó análisis de Difractometría de Rayos X a cuatro muestras y se elaboraron tres secciones delgadas para su análisis petrográfico.

La identificación de las secciones delgadas es la siguiente:

Muestra	Coordenadas	
	X	Y
M6-2905	521083	1395630
M8-2905	521087	1395645
M9-2905	521118	1395710

Tabla 4. Identificación de muestras de las cuales se elaboraron secciones delgadas, correspondientes a la zona de alteración hidrotermal El Ñajo.

La muestra M6-2905 es de color gris claro, macroscópicamente es de dureza baja, con cristales de plagioclasas finos, euhedrales, presenta textura afanítica, su matriz es muy fina y se encuentra alterada a minerales arcillosos por hidrotermalismo, en superficie exhibe coloración rojiza debido a la oxidación de minerales de hierro, y abundante pirita con su hábito cúbico característico (Figura 87).

Microscópicamente se definió como una lava completamente argilizada en la cual no es posible distinguir los cristales que la componen, sólo se observan pequeños fragmentos de minerales opacos (Figura 88).

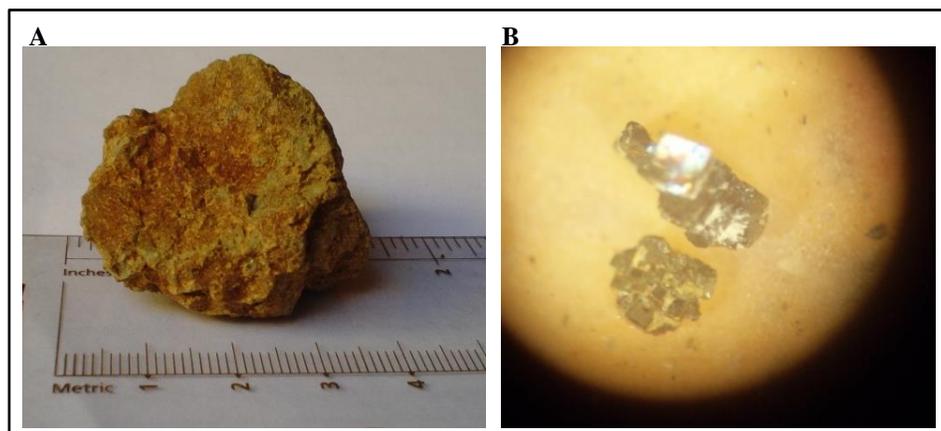


Figura 87. A) Muestra de mano M6-2905, lava alterada con abundante pirita diseminada. B) Cristales de pirita vistos bajo lupa binocular. Coordenadas: X 521083 Y 1395630.

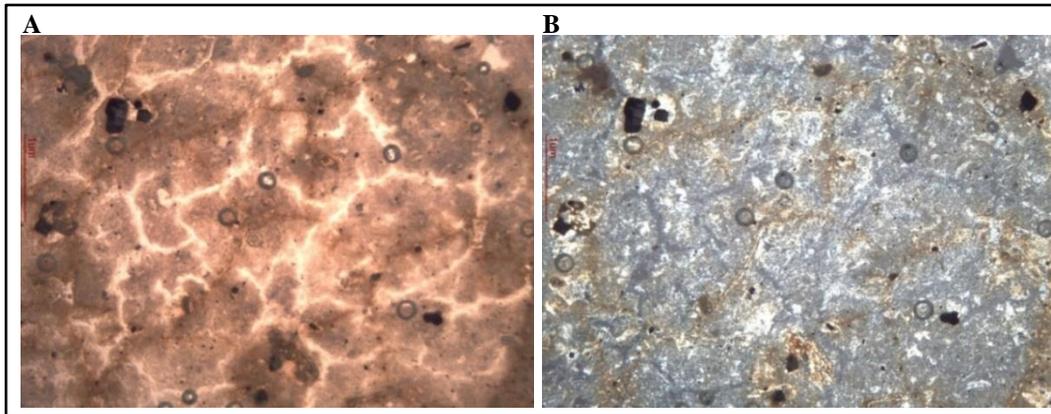


Figura 88. A) Nícoles paralelos, aumento 4x. Lava completamente alterada a minerales arcillosos por lo cual no se pueden definir sus componentes, se observan minerales opacos diseminados en la roca. B) Nícoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 521083 Y 1395630.

La muestra M8-2905 es una brecha hidrotermal constituida por fragmentos líticos de andesita con tamaños entre 3 mm y 10 cm, de forma angulosa a sub-angulosa (Figura 89). Las cavidades de una brecha hidrotermal son rellenadas principalmente por minerales hidrotermales post-brechamiento, en este caso, el cemento es carbonato de calcio, lo cual se determinó mediante la prueba de ácido clorhídrico.

Microscópicamente contiene numerosos fragmentos angulosos y sub-angulosos de andesita de textura afanítica con abundantes microlitos de plagioclasas orientados; la roca tiene matriz calcárea (Figura 90). La calcita se encuentra asociada con zeolitas fibrosas y sílice microcristalina secundaria rellenando fisuras principalmente (Figura 91). Esta muestra se definió como una brecha andesítica cementada por carbonato de calcio.

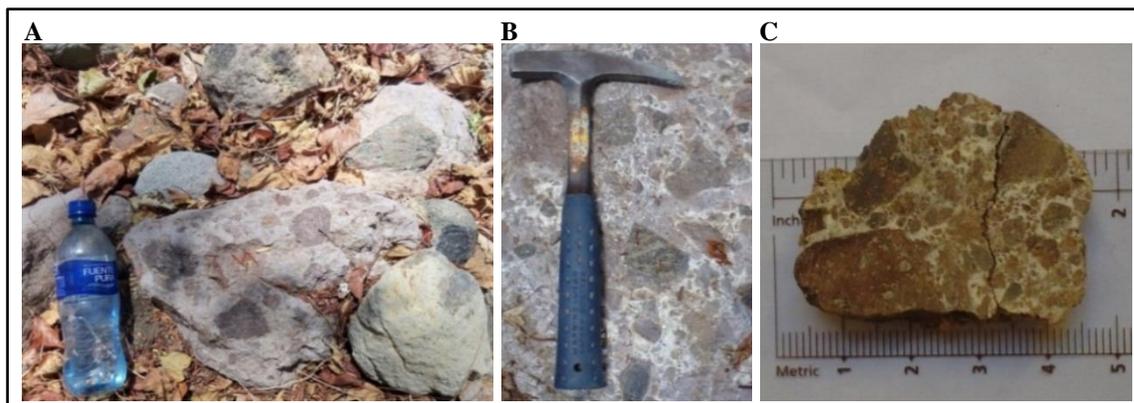


Figura 89. Brecha hidrotermal constituida por fragmentos líticos de lava andesítica con tamaños entre 3 mm y 10 cm, zona de alteración hidrotermal El Ñajo. Coordenadas: X 521087 Y 1395645.

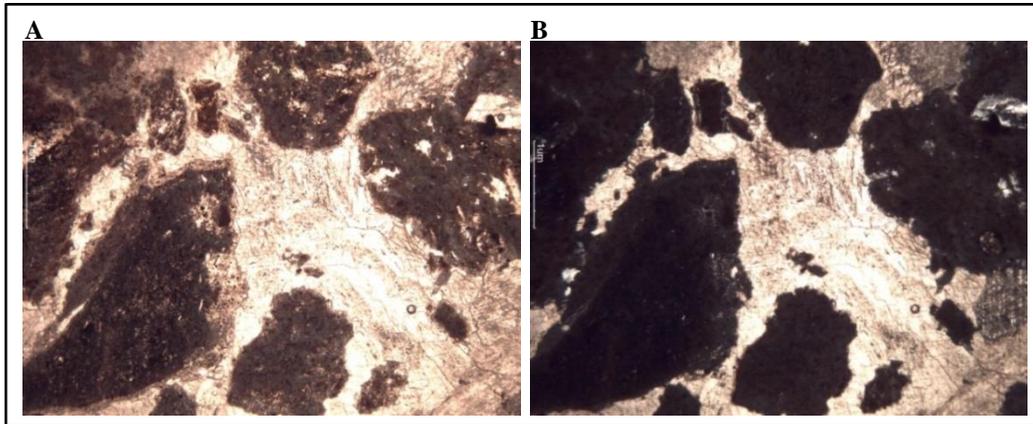


Figura 90. A) Nicos paralelos, aumento 4x. Brecha andesítica calcárea, se observan fragmentos de lava andesítica angulosos y sub-angulosos, de distintos tamaños inmersos en una matriz calcárea. B) Nicos cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 521087 Y 1395645.

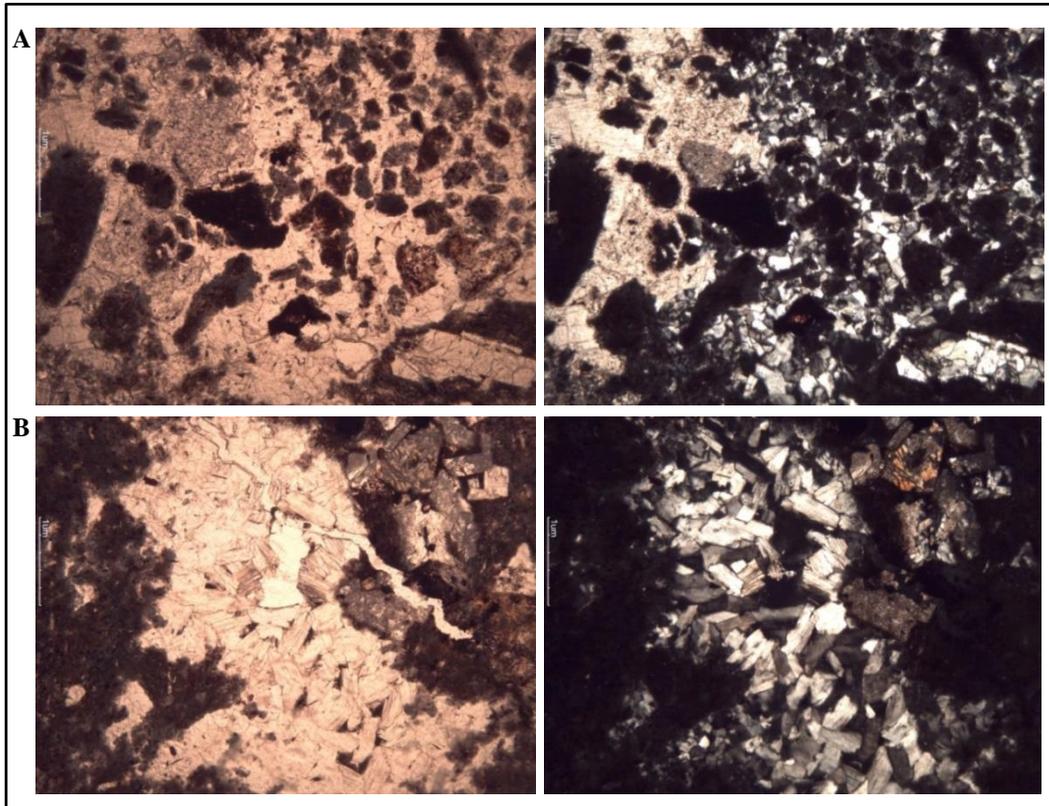


Figura 91. A) Nicos paralelos y nicos cruzados, aumento 4x. Brecha andesítica calcárea, se observa asociación de calcita con minerales de zeolitas, pequeños fragmentos de lava andesítica. B) Nicos paralelos y nicos cruzados, aumento 4x. Se observan minerales de zeolitas fibrosas y sílice microcristalina secundaria relleno una fisura. Coordenadas: X 521087 Y 1395645.

La muestra M9-2905, macroscópicamente se observa de color gris-café claro, de dureza media, con abundantes plagioclasas subhedrales, alteradas y no alteradas, cristales de piroxenos subhedrales y algunos líticos de lava redondeados (Figura 92). También se observan superficies rojizas producto de la oxidación de minerales de hierro, superficialmente reaccionó con ácido clorhídrico lo cual indica la presencia de carbonato de calcio en la muestra.

Microscópicamente se observan plagioclasas subhedrales a euhedrales, frescas y alteradas formando textura glomeroporfídica entre sí, algunos cristales de piroxenos subhedrales, minerales opacos y líticos completamente alterados; la matriz de la roca está completamente alterada a minerales de arcillas (Figura 93). Esta muestra se definió como Toba lítica alterada.



Figura 92. Muestra de mano M9-2905. Toba lítica alterada. Coordenadas: X 521118 Y 1395710.

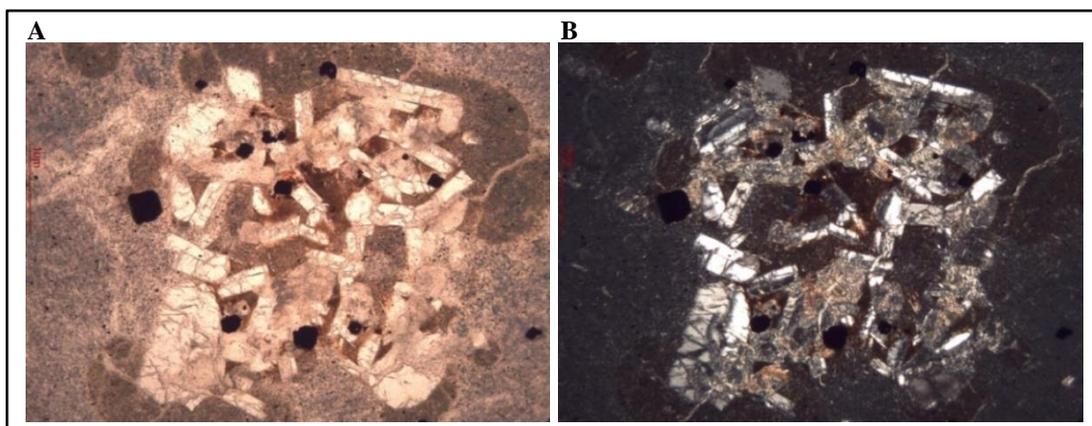


Figura 93. A) Nícoles paralelos, aumento 4x. Toba lítica alterada, se observa textura glomeroporfídica entre los cristales subhedrales de plagioclasas, los cuales están alterándose a minerales de arcillas, algunos minerales opacos. B) Nícoles cruzados, aumento 4x. Coordenadas: X 521118 Y 1395710.

Los resultados de la composición mineralógica de las muestras analizadas por el método de Difracción de Rayos X se muestran en la siguiente tabla:

Muestra	Coordenadas		Composición Mineralógica	Proporción (%)	
	X	Y			
CT-027-14	521082	1395570	Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	51
			Saponita férrica	$(\text{Ca}_{0.5}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$	23
			Nontronita	$(\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O})$	16
			Heulandita	$\text{Ca}_{3.6}\text{K}_{0.8}\text{Al}_{8.8}\text{Si}_{27.4}\text{O}_{72} \cdot 26.1\text{H}_2\text{O}$	10
CT-028-14	520678	1396704	Montmorillonita	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	34
			Magnesiocopiapita	$(\text{MgFe}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{20})$	24
			Saponita	$\text{Ca}_{0.2}\text{Mg}_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	21
			Halotriquita	$(\text{Fe}^{+2}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O})$	19
CT-029-14	521606	1396018	Calcita	$\text{CaCO}_3$	74
			Saponita	$\text{Ca}_{0.2}\text{Mg}_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	12
			Estilbita	$(\text{Ca}, \text{Na})_{1.3}(\text{Si}, \text{Al})_9\text{O}_{18} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	7
			Cloromagnesita	$\text{MgCl}_2$	7
CT-030-14	521095	1395675	Epsomita	$(\text{MgSO}_4)(\text{H}_2\text{O})_7$	53
			Bassanita	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	31
			Bilinita	$(\text{Fe}^{+2}\text{Fe}_2^{+3}(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O})$	16

Tabla 5. Composición mineralógica de muestras analizadas por Difractometría de Rayos X en la zona de alteración hidrotermal El Ñajo.

Los resultados muestran que los minerales identificados pertenecen a minerales de alteración, prevaleciendo los minerales arcillosos (39.25 %) y los minerales de sulfatos (35.75 %), lo cual indica que esta zona se encuentra definida por una alteración argilítica en la cual la mayoría de los minerales han sido afectados por fluidos ácidos (debido a la presencia de minerales de sulfatos).

Se agruparon los minerales de alteración en base a la clasificación propuesta por Corbett y Leach (1998). Grupos:

A. Minerales de arcilla

- Montmorillonita – hidroxisilicato de Mg y Al
- Nontronita – silicato hidratado de Fe
- Saponita – hidrosilicato de Mg y Al

B. Minerales de sulfato

- Bassanita – sulfato hidratado de Ca
- Magnesiocopiapita – sulfato de Mg y Fe
- Halotriquita – sulfato de Fe-Al
- Epsomita – sulfato de Mg
- Bilinita – sulfato de Fe

C. Zeolitas

- Heulandita – aluminosilicato de Ca con K
- Estilbita – aluminosilicato de Ca con Na

D. Cloruros

- Cloromagnesita – cloruro de Mg

E. Carbonatos

- Calcita – carbonato de Ca

En las partes superiores de los sistemas geotérmicos, donde las temperaturas son inferiores a 150 °C, predominan los minerales arcillosos de los grupos de la caolinita y esmectita, estos constituyen una parte importante de los productos solubles de minerales primarios (González-Partida, 2000). Los minerales de este grupo identificados en el área se forman generalmente en temperaturas < 100 °C – 150 °C.

Los sulfatos se encuentran en amplios rangos de temperatura y pH en sistemas hidrotermales, en la zona de alteración El Ñajo el  $H_2S$  se oxida a su ascenso a la superficie y se forman los sulfatos.

La Bassanita tiene yacencia en fumarolas y se encuentra asociada principalmente a yeso y arcillas, la Epsomita se asocia con Halotriquita, esta última también tiene ocurrencia en zonas de fumarolas, la Bilinita se desarrolla en ambientes ácidos someros y la Magnesiocopiapita es producto de oxidación de piritita (Brodtkorb, 2006).

Las zeolitas hidratadas, como la Heulandita y la Estilbita, predominan en condiciones “frías” (temperaturas  $150\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Estos minerales se forman en condiciones de pH neutro a levemente alcalino (Corbett y Leach, 1998).

La Cloromagnesita es producto de evaporación del fluido hidrotermal.

Los carbonatos se encuentran en un amplio rango de pH y de temperatura y se asocian con caolinita, illita, clorita, y fases calco-silicatadas. Se presentan típicamente en todos los niveles de sistemas hidrotermales, desde la superficie hasta ambientes de tipo pórfido (Maksaev, 2001). La asociación calcita-zeolita-cloruro se encuentra en la muestra CT029-14.

Los sulfatos prevalecen dentro de los minerales de alteración definidos, lo cual sugiere la oxidación de  $H_2S$  del posible reservorio con agua meteórica y baja condición de pH.

La figura 94 presenta las muestras que fueron analizadas por Difractometría de Rayos X.

En El Ñajo se efectuó muestreo de gases de dos fumarolas para determinar la concentración de gases y se aplicaron los geotermómetros de gas  $CO_2$ ,  $CO_2/H_2$  y  $H_2S/H_2$ , dado por Arnórsson y Gunnlaugsson (1985) y el geotermómetro dado por D'Amore y Panichi (1980).

Los resultados de geotermometría aplicados en esta zona indican una temperatura estimada de  $\approx 245\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Resultados completos en Anexo F).

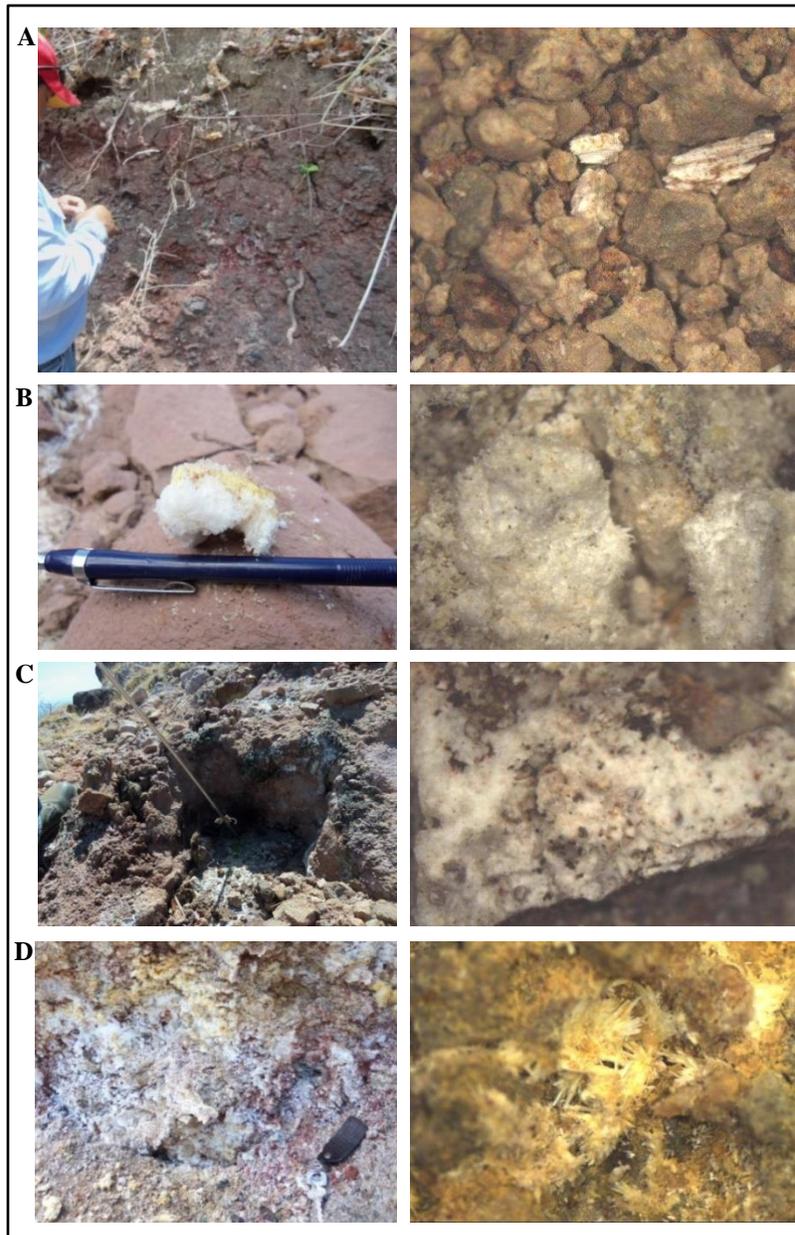


Figura 94. Muestras a las cuales se realizó análisis mineralógico por el método de Difracción de Rayos X, correspondientes a la zona de alteración hidrotermal El Ñajo. Ver tabla 5.

### 5.3.3 El Ojochal

Se localiza al oeste de la estructura volcánica semicircular del mismo nombre, cubre una superficie aproximada de 0.84 km<sup>2</sup>, con altitud variable entre 560 m.s.n.m y 700 m.s.n.m.

El Ojochal es una zona de alteración fría, es decir, no existen temperaturas mayores a la temperatura promedio del sitio (< 35 °C), no se identificaron fumarolas ni manantiales termales.

La alteración de esta zona se enfoca principalmente en suelos alterados con abundancia de hierro (suelos rojizos) y diversos horizontes de minerales arcillosos con tonos amarillos, rojos, morados, grises, entre otros (Figura 95).

La tendencia predominante de los puntos de alteración es hacia el NE-SW, controlada por la Falla Santa Clara de igual orientación, sin embargo, en el Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial (Figura C) se observan pequeñas alineaciones N-S entre los puntos citados.

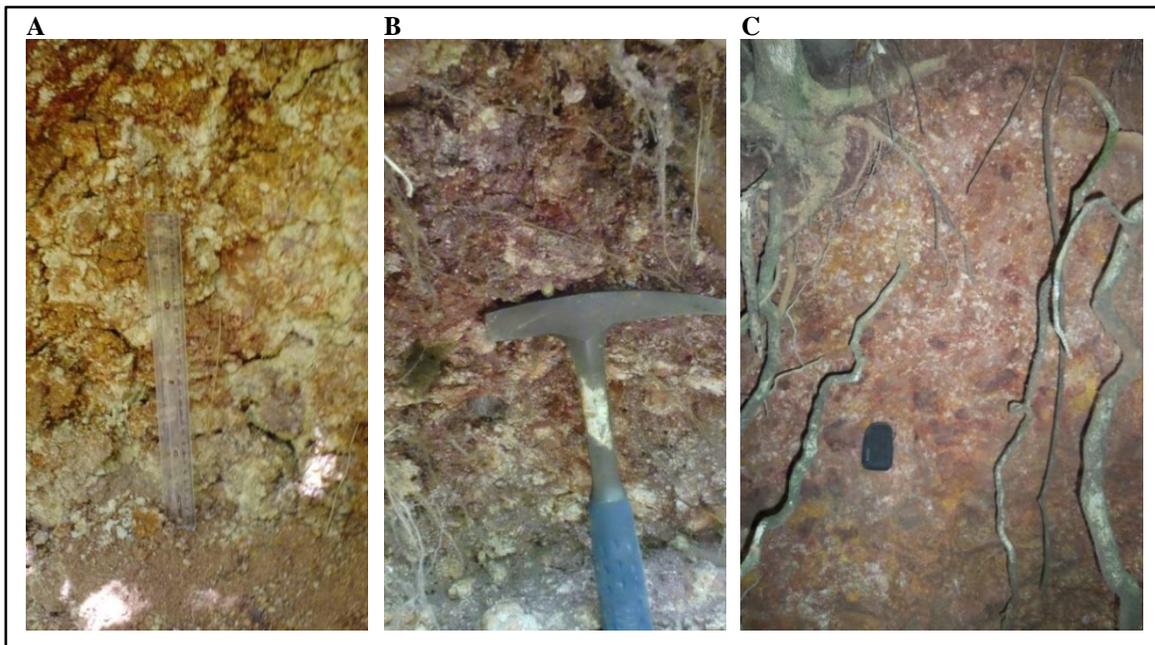


Figura 95. Zona de alteración hidrotermal El Ojochal, suelos alterados, minerales arcillosos de distintas tonalidades. Coordenadas: A) X 520548 Y 1395196; B) X 520559 Y 1395073; C) X 520560 Y 1395074.

De igual forma, se observó que la alteración está presente tanto en horizontes de escoria formado en la base de flujos de lavas que se encuentran en el área, como en depósitos de fragmentos tamaño lapilli (Figura 96).

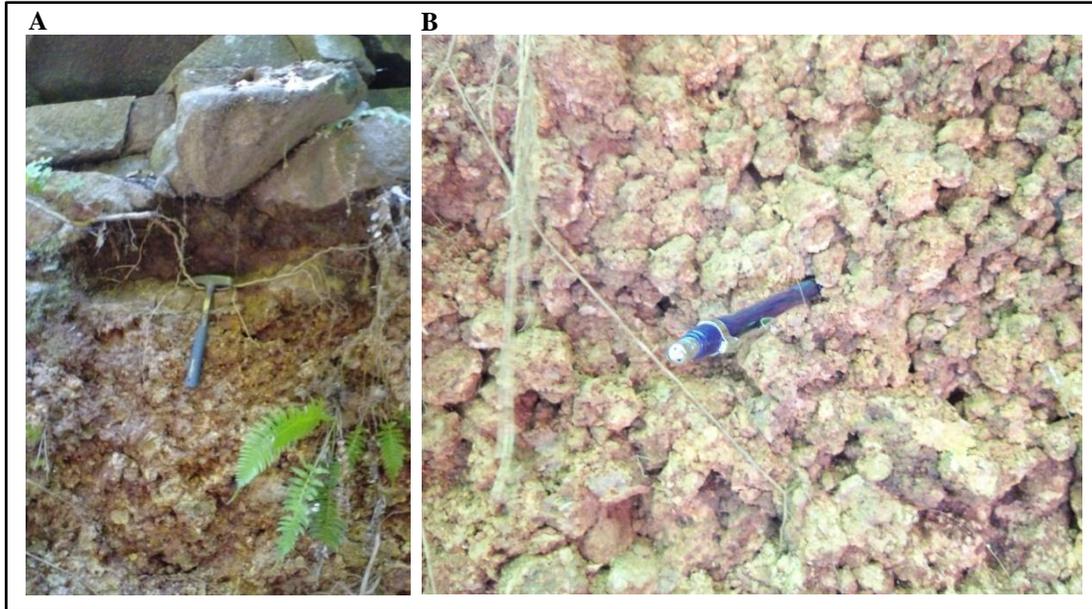


Figura 96. A) Horizonte de escoria alterado parcialmente a minerales arcillosos. Coordenadas: X 520372 Y 1395130. B) Depósito de fragmentos tamaño lapilli con alteración de color blanca en superficie. Coordenadas: X 520359 Y 1395014.

Como se observa en el Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial (Figura C) las isotermas delimitan las zonas de igual temperatura y delimitan el área que posiblemente esté siendo afectada por el sistema hidrotermal activo, el cual presenta evidencia en superficie, a través de las manifestaciones termales descritas, debido al grado de fracturamiento y fallamiento de este sitio.

## CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

La Cartografía Geológica-Estructural realizada a escala 1: 20 000 en el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate aportó nuevos datos a detalle acerca de la geología superficial, las estructuras geológicas y las zonas de alteración hidrotermal localizadas en el área de estudio.

Por tanto, se definieron las siguientes características geológicas:

### A) Unidades Litológicas

En el Mapa Geológico-Estructural (Figura A) se observan las seis unidades litológicas definidas, las que aparentemente provienen de distintos centros volcánicos coalescentes tales como La Joya, La Ceiba, Pre-Telica y Telica con una amplia historia eruptiva.

◆ La Unidad I – Andesita, es la unidad más extensa y más antigua del área, cubre aproximadamente 26 km<sup>2</sup>. Se caracteriza por su color gris claro y sus variaciones texturales de afanítica a porfirítica. Se encuentra afectada por fallas geológicas pertenecientes a las cuatro fases de deformación definidas en este trabajo.

Dentro de esta Unidad encontramos las estructuras caldéricas Los Tablones, El Ojochal y una de las estructuras volcánicas secundarias de la caldera La Joya.

◆ La Unidad II - Andesita-Basáltica, se encuentra estratigráficamente por encima de la Unidad I - Andesita. Cubre un área aproximada de 7 km<sup>2</sup> y se presenta en flujos masivos de color gris oscuro, con abundantes vesículas.

Estructuralmente esta Unidad se encuentra afectada por fallas geológicas de rumbo Noroeste-Sureste y Noreste-Suroeste.

◆ La Unidad III - Depósitos Piroclásticos, fue identificada en dos sectores de la zona cartografiada cubriendo áreas de 0.65 km<sup>2</sup> y 0.67 km<sup>2</sup>, respectivamente. El primer sector, está caracterizado por depósitos de toba cinerolítica y en el segundo sector los depósitos corresponden a toba litocristalina.

En la Unidad III se localiza una de las estructuras volcánicas secundarias de la estructura caldérica La Joya, la cual presenta orientación Noreste-Suroeste.

Estructuralmente esta Unidad se encuentra afectada por fallas de rumbo Noroeste-Sureste, Noreste-Suroeste y Este-Oeste.

◆ La Unidad IV - Basalto, cubre un área de 1.13 km<sup>2</sup> y fue definida en base a la fotointerpretación realizada en conjunto con análisis químicos y petrográficos de muestras localizadas en la zona de interés y detalladas en el estudio “The Age and Geochemical History of the Telica Volcanic Complex, Central Nicaraguan Volcanic Front” realizado por Jessica Lynn Olney en el año 2006.

De acuerdo a Olney se localizan rocas basálticas al norte y noreste del Volcán Telica definiendo que estas rocas son producto de dicho volcán.

Estructuralmente la Unidad IV ha sido afectada por fallas geológicas de rumbo Norte-Sur y Noreste-Suroeste. La estructura volcánica Pre-Telica se localiza dentro de esta Unidad.

◆ La Unidad V - Andesita-Basáltica del Volcán Santa Clara es la unidad de menor extensión en la zona cartografiada, cubre un área aproximada de 0.5 km<sup>2</sup>.

Los flujos correspondientes a esta Unidad se localizan al sur de la zona de interés y se extienden hacia el oeste del poblado San Jacinto. Presentan fenocristales subhedrales de plagioclasas que miden entre 0.8 cm y 3cm, piroxenos entre 0.4 cm y 0.6 cm, y pequeños cristales de olivino menores de 0.4 cm, los cuales se observan en la superficie de los flujos.

El límite sur de la estructura volcánica antigua Los Tablones se localiza en esta Unidad.

◆ La Unidad VI - Depósitos Coluviales cubre un área de 0.75 km<sup>2</sup>, se caracteriza por presentar afloramientos que contienen fragmentos de distinta composición entre lavas andesíticas y lavas basálticas, de forma subredondeada a subangulosa y cuyos tamaños varían entre 1 cm y 16 cm.

## B) Fases de Deformación

A través del análisis de la geometría de fallas y fracturas se determinaron cuatro fases de deformación, que han afectado la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate.

En cada fase de deformación se realizó la diferenciación de los tipos de fallas que componen cada una de estas fases, en base a la determinación del sentido de movimiento de los bloques, el desplazamiento de unidades litológicas y la identificación de indicadores cinemáticos.

◆ La fase de deformación Noroeste-Sureste es la más antigua y está representada por fallas normales generalmente con componente lateral derecho. Ejemplo de estas estructuras geológicas son: Falla Santa Elena, Falla La Joya Noroeste y Falla El Ojochal Noroeste.

La Falla La Joya Noroeste atraviesa la estructura caldérica La Joya.

En el Mapa Geológico-Estructural se observa que estas estructuras se encuentran segmentadas y forman arreglo en echelón derecho (Figura A).

◆ La fase de deformación Norte-Sur es la segunda etapa y está representada por cinco fallas principales, las cuales se encuentran en el Mapa Geológico-Estructural (Figura A).

La zona de fallamiento generada por estas estructuras geológicas corresponde con fallas normales, como la Falla La Ceiba-La Joya, la cual se localiza entre las estructuras caldéricas La Ceiba y La Joya.

Algunas de las fallas que pertenecen a esta fase de deformación presentan movimiento lateral derecho y otras como la Falla Agua Fría muestran componente lateral izquierdo.

◆ La tercera fase de deformación, Noreste-Suroeste, es la que presenta mayor número de fallas geológicas (diez) y por lo tanto se encuentra ampliamente distribuida en el área de estudio.

Las estructuras geológicas más representativas de esta fase de deformación son: Falla El Carol, Falla Las Polvaleras Noreste, Falla Santa Clara y Falla Los Tablones A. Estas estructuras corresponden con zonas de fallamiento normal, algunas de estas fallas presentan componente lateral izquierdo, como la Falla Los Tablones A.

El Mapa Geológico-Estructural muestra las fallas pertenecientes a esta fase y en él se observa que la estructura caldérica Los Tablones está segmentada principalmente por fallas de rumbo Noreste-Suroeste (Figura A).

◆ La fase de deformación Este-Oeste es la cuarta y última fase. Está representada por tres fallas principales y dos lineamientos: Falla El Ojochal Sur, Falla El Ojochal Este-Oeste, Falla Los Prados Sur y los lineamientos Los Prados y Los Tablones Este-Oeste, localizados principalmente al sureste del área de estudio.

Estas estructuras están representadas principalmente por fallamiento inverso.

Las fallas que pertenecen a esta etapa son las más jóvenes, debido a esto cortan y desplazan sistemas de fallas más antiguos y estructuras volcánicas como la estructura caldérica Los Tablones.

### C) Zonas de Alteración Hidrotermal

En la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate se definieron tres zonas de alteración hidrotermal: El Carol-Agua Fría, El Ñajo y El Ojochal, en las cuales existen manifestaciones superficiales que incluyen manantiales termales, lodos hirvientes, fumarolas y alteración hidrotermal del suelo y rocas. Estas manifestaciones se encuentran distribuidas principalmente al noroeste y centro del área de estudio.

◆ La zona de alteración El Carol-Agua Fría se localiza al noroeste del área de interés entre altitudes de 380 m.s.n.m y 560 m.s.n.m. Cubre una superficie aproximada de 0.88 km<sup>2</sup> y se caracteriza por la presencia de fumarolas, suelos calientes y manantiales termales. Estas manifestaciones presentan una temperatura que oscila entre 68.1 °C y 99 °C.

De igual forma, existen puntos de alteración fríos, los cuales no presentan temperaturas mayores al valor promedio del área (< 35 °C).

Estructuralmente esta zona de alteración está controlada por la intersección de tres fases de deformación: Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste. Dichas fases se encuentran representadas por las fallas La Joya Noroeste, El Caracol, Agua Fría y El Carol.

El sector de fumarolas está controlado estructuralmente por la Falla La Joya Noroeste, de rumbo Noroeste-Sureste, presenta lavas y suelos alterados y una marcada deposición de azufre nativo.

Los resultados de los análisis de Difractometría de Rayos X realizados, muestran minerales pertenecientes a una alteración ácida (caolinita, alunita, minerales del grupo de la sílice), donde el sistema hidrotermal está caracterizado por un sistema activo de vapor calentado. En estos resultados se definió el sector de fumarolas como una zona de alteración argilítica avanzada.

Los dos manantiales termales identificados se localizan en la zona de intersección entre las fallas Agua Fría y El Carol de rumbo Norte-Sur y Noreste-Suroeste, respectivamente.

Estos manantiales muestran una alta concentración de minerales de hierro y presentan temperaturas de 82.6 °C y 80 °C. Se encuentran alineados entre sí, en dirección Norte-Sur.

La asociación mineral existente: Montmorillonita-clorita con Goethita, definida por medio de análisis de Difractometría de Rayos X, indica que las aguas someras calentadas por vapor y gases han generado una zona con alteración argilítica intermedia.

Los resultados de geotermometría a partir de las muestras de gases analizadas de esta zona, indican una temperatura aproximada de 232 °C.

◆ La zona de alteración El Ñajo se localiza en el centro del área de interés entre altitudes de 300 m.s.n.m y 500 m.s.n.m. Cubre una superficie aproximada de 2.8 km<sup>2</sup> y se caracteriza por la presencia de fumarolas, suelos calientes y lodos hirvientes. Estas manifestaciones presentan una temperatura que oscila entre 65.5 °C y 100 °C.

Esta zona de alteración presenta lavas muy alteradas, argilizadas y amplia deposición de minerales. Se encuentra dividida en dos sectores controlados estructuralmente por fallas de distinto rumbo:

a) El primer sector, localizado al noroeste de la localidad El Ñajo, se caracteriza por la presencia de lodos hirvientes, fumarolas y puntos de alteración fríos (temperatura  $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), todos con orientación Norte-Sur. Este sector se encuentra asociado al control estructural definido por el lineamiento El Ñajo.

b) El segundo sector se ubica al sureste de la localidad El Ñajo y presenta fumarolas y puntos de alteración fríos (temperatura  $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Estructuralmente este sector está definido por la intersección de tres estructuras geológicas: Falla El Ojochal Noroeste (de rumbo Noroeste-Sureste), Falla Los Tablones A (de rumbo Noreste-Suroeste) y la estructura semicircular El Ojochal.

Los resultados de los análisis de Difractometría de Rayos X realizados muestran que los minerales arcillosos (39.25 %) y los minerales de sulfatos (35.75 %) prevalecen dentro de los minerales de alteración identificados, lo cual sugiere que esta zona se encuentra definida por una alteración argilítica en la cual la mayoría de los minerales han sido afectados por fluidos ácidos.

Los resultados de geotermometría a partir de las muestras de gases analizadas de esta zona, indican una temperatura aproximada de  $245\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

♦ La zona de alteración El Ojochal se localiza al oeste de la estructura volcánica semicircular del mismo nombre, entre altitudes de 560 m.s.n.m y 700 m.s.n.m y cubre una superficie aproximada de  $0.84\text{ km}^2$ .

Es una zona de alteración fría, caracterizada principalmente por suelos alterados y diversos horizontes de minerales arcillosos, en los cuales no existen temperaturas mayores a la temperatura promedio del área ( $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

La tendencia predominante de los puntos de alteración es hacia el Noreste-Suroeste, controlados estructuralmente por la Falla Santa Clara de igual orientación, sin embargo, en el Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial elaborado se observan pequeñas alineaciones Norte-Sur entre los puntos citados.

## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES**

El área de estudio se localiza dentro del Complejo Volcánico Telica, la actividad volcánica histórica de este Complejo y los indicios de erupciones relativamente recientes en su centro de emisión actual y otros de sus centros eruptivos, indican que la cámara magmática asociada con el Complejo Volcánico permanece activa (modificado del Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, Volumen IV, Octubre 2001). Cuando el sistema hidrotermal está aún activo, frecuentemente se manifiesta de distintas formas en la superficie, tales como: manantiales termales, fumarolas, suelos calientes, lodos hirvientes, entre otros.

La realización de la cartografía geológica, el análisis estructural de las zonas de fallas y la identificación y descripción de las manifestaciones termales superficiales, localizadas en el área de estudio, permitieron la caracterización de los diferentes tipos de rocas, las distintas fases de deformación y las estructuras geológicas que las componen, y conocer que la zona está afectada por la presencia de fluidos hidrotermales de alta temperatura en la zona norte, lo cual permitió definir la posible existencia de un sistema hidrotermal profundo.

En base a los resultados obtenidos en cada una de las etapas de este trabajo se concluyó que:

- El área cartografiada es una zona compuesta por rocas extrusivas correspondientes a flujos de lava de composición Andesítica, Basáltica, Andesita-Basáltica y Depósitos Piroclásticos provenientes de los focos volcánicos del Telica, Pre-Telica, La Joya y Santa Clara.
- Las unidades litológicas definidas en el área de estudio y ordenadas cronológicamente según su antigüedad, de la más antigua a la más reciente, son las siguientes:

1. Unidad I -Andesita
  2. Unidad II -Andesita-Basáltica
  3. Unidad III -Depósitos Piroclásticos
  4. Unidad IV -Basalto
  5. Unidad V -Andesita-Basáltica del Volcán Santa Clara
  6. Unidad VI -Depósitos Coluviales
- Las estructuras volcánicas presentes en la zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate corresponden a: 1) Relictos de estructuras caldéricas y 2) Estructuras caldéricas completas.  
De este hacia el oeste, las estructuras volcánicas localizadas en el área de estudio son:
    - a. Estructura Volcánica Los Tablones
    - b. Estructura Volcánica El Ojochal
    - c. Estructura Volcánica La Joya
    - d. Estructura Volcánica La Ceiba
    - e. Estructura Volcánica Pre-Telica
  - La alineación de las estructuras volcánicas semicirculares, calderas antiguas y el actual volcán activo (Volcán Telica), el cual no se encuentra dentro del área de estudio, indica una migración de la cámara magmática de este a oeste.
  - La zona cartografiada se caracteriza por deformaciones de tipo frágil representado por la ocurrencia de fallas y fracturas.

- El análisis de la geometría de fallas y fracturas permitió definir cuatro fases de deformación que han afectado el área de interés, las cuales actúan en sentido horario y son producto de la actividad de subducción en el límite convergente entre las placas Cocos y Caribe. Ordenadas cronológicamente según su antigüedad, de la más antigua a la más reciente, estas fases son:
  1. Noroeste-Sureste: representada por fallas normales, generalmente con componente lateral derecho. Presenta una dirección principal de esfuerzos hacia el N 45°W.
  2. Norte-Sur: representada por fallas normales, algunas de estas, como la Falla La Ceiba-La Joya presentan componente lateral derecho y otras como la Falla Agua Fría muestran componente lateral izquierdo. La dirección principal de esfuerzos es N 3°E.
  3. Noreste-Suroeste: representada por fallas normales, algunas de estas, como la Falla Santa Clara presentan componente lateral derecho y otras como la Falla Los Tablones A muestran componente lateral izquierdo. La dirección principal de esfuerzos es N 50°E.
  4. Este-Oeste: representada por fallas inversas, presentando una dirección principal de esfuerzos de N 75°E.
  
- En el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate las zonas que revelan un buen potencial para el flujo de calor y que presentan reconocibles manifestaciones termales superficiales son aquellas producto de la intersección de sistemas estructurales pertenecientes a diferentes fases de deformación, principalmente de rumbo Noreste-Suroeste, Noroeste-Sureste y Norte-Sur. Las fallas revisten gran importancia para la geotermia, estas producen la mejor permeabilidad y pueden servir como vía de recarga de aguas meteóricas y descarga de aguas termales del sistema hidrotermal.

- Existen tres zonas de alteración hidrotermal distribuidas principalmente al noroeste y centro del área de estudio, siendo estas: El Carol-Agua Fría, El Ñajo y El Ojochal, en las cuales existen manifestaciones superficiales que incluyen suelos calientes, manantiales termales, lodos hirvientes, fumarolas y alteración hidrotermal del suelo y rocas.
- La alteración argilítica avanzada es el tipo de alteración más significativa del sistema hidrotermal activo relacionado a la zona de El Carol-Agua Fría, cuya alteración es pervasiva y presenta la asociación mineral hidrotermal cuarzo + caolinita + esmectita + sulfatos
- Los geotermómetros aplicados para inferir la temperatura del fluido en algunas fumarolas localizadas en el área de estudio presentan estimaciones de temperaturas de 232 °C y 245 °C en las zonas de alteración hidrotermal El Carol-Agua Fría y El Ñajo, respectivamente. Esto indica que en estas zonas existe ascenso de fluidos ya que si las fumarolas se tratasen de un suelo humeante, los gases no presentarían valores altos de temperatura.
- Las altas temperaturas registradas del fluido y la composición del mismo (fluidos ácidos principalmente) han generado un gran efecto sobre la mineralogía original de las rocas, dando lugar a la ocurrencia de minerales de alteración como: Montmorillonita, Caolinita, Alunita, Bassanita, Magnesiocopiapita, Epsomita, Cuarzo, Cristobalita, Tridimita, Estilbita, Heulandita, entre otros.
- Las manifestaciones termales superficiales del área de estudio se definen principalmente por alteración ácida en la cual el sistema hidrotermal está caracterizado por un sistema activo de vapor calentado (Resultados de Análisis por Difractometría de Rayos X, LaGeo, El Salvador, 2014).

- Las manifestaciones termales identificadas y representadas en el Mapa de Manifestaciones Termales y Temperatura Superficial, delimitan la zona de descarga del sistema hidrotermal activo, la cual presenta evidencia en superficie debido al grado de fracturamiento y fallamiento local.
- La zona oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate se destaca como una zona potencial para el flujo de calor, ya que en ella se localizan numerosas fallas geológicas, existen manifestaciones termales superficiales y se ubica cerca de un volcán joven, el Volcán Telica, mientras la mayoría de volcanes ha mostrado una actividad más antigua, este es uno de los volcanes más activos de la Cadena Volcánica Nicaragüense.
- El tiempo de vida de cada sistema es generalmente poco conocido, así como el tiempo de circulación de fluidos (Arnórsson *et al.*, 2007). Sin embargo, en base a todos los resultados obtenidos, el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate puede considerarse como una zona favorable para la exploración geotérmica a profundidad.

## **CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES**

Se sugiere realizar Perfiles Eléctricos y Sondeos Eléctricos Verticales en el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate que permitan determinar con mejor precisión las características de las zonas de fallas en profundidad y delimitar la existencia de estructuras geológicas propicias para la existencia de un yacimiento geotérmico.

Realizar análisis hidrogeológicos de los cuerpos de agua localizados en el área de estudio para determinar elementos disueltos que puedan indicar el recorrido del fluido, su origen, edad y las condiciones de alimentación y realimentación del acuífero.

Realizar mediciones sub-superficiales de temperatura fijando en el terreno sondas del orden de 2 m de profundidad, ya que se considera que a una profundidad mayor de 1 m, las variaciones diarias de la temperatura debidas a la radiación solar, dejan de ser significativas.

Realizar dataciones radiométricas de muestras representativas de cada unidad litológica definida en este trabajo.

Realizar geoquímica de rocas pertenecientes a las unidades litológicas definidas para determinar con mejor precisión el tipo de roca.

Realizar levantamiento de CO<sub>2</sub>, ya que estos estudios confirman la localización y permeabilidad de posibles fallas e identificación de estructuras permeables adicionales con posible conexión a un acuífero profundo de alta temperatura.

Generar un modelo estructural 3D preliminar basado en los resultados obtenidos en la realización de este trabajo.

Una vez realizada las recomendaciones anteriores, la perforación de pozos de exploración de pequeño diámetro, serían de gran importancia ya que aportarían información sobre:

1. Si se cumple la secuencia litológica definida en superficie, en las primeras decenas de metros.
2. Si las fallas expuestas en superficie, representadas en el Mapa Geológico-Estructural elaborado y seleccionadas como posibles transportadoras de fluidos geotérmicos, muestran su evidencia en profundidad, así como presencia de su permeabilidad.
3. Si en profundidad la(s) falla(s) logran ser interceptada(s) según la proyección geológica vertical.
4. Si existe un reservorio geotérmico.
5. Si la temperatura obtenida a partir de geotermometría es la temperatura del reservorio.

## CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA

- Acton, G., *et al*, 2000. Paleolatitud of the Caribbean Plate since the late Cretaceous.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., 1985. New Gas Geothermometers for Geothermal Exploration - Calibration and Application.
- Arnórsson, S., 2000. Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Development and Use. Sampling methods, data handling, interpretation. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Arnórsson, S., *et al*, 2007. Fluid-Fluid Interaction in Geothermal Systems. Reviews in Mineralogy and Geochemistry.
- Avellán, D., *et al.*, 2012. Stratigraphy, Geomorphology, Geochemistry and Hazard implications of the Nejapa Volcanic Field, western Managua, Nicaragua.
- Brock T. D., *et al.*, 1994. Life at High Temperatures. Yellowstone Association for Natural Science, History and Education, Inc. Yellowstone National Park, Wyoming.
- Brodtkorb, 2006. Las especies minerales de la República de Argentina. Tomo II. Asociación Mineralógica Argentina, Buenos Aires.
- Browne, P. R., 1978. Hydrothermal Alteration in Active Geothermal Fields, New Zealand Geological Survey.
- Carr, M.J, *et al.*, 2007. Central America: Geology, Resources and Hazards, Petrology and Geochemistry of lavas.
- Cisne Altamirano J., 2009. Validación y Evaluación de la Incertidumbre en la Determinación de Na, K, Ca y Mg por Espectrofotometría de Emisión y Absorción Atómica en Muestras Geotérmicas y Aplicación de Geotermómetros para estimar la Temperatura del Reservorio. Tesis de Maestría en Química Analítica y Gestión de la Calidad, UNAN-León.
- Comisión Nacional de Energía, 2001. Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, Volumen IV: Evaluación del área del Volcán Telica-El Ñajo.
- Corbett & Leach, 1998. Common Alteration Mineralogy in Hydrothermal Systems.
- D'Amore F., Panichi C., 1980. Evaluation of Deep Temperatures in Hydrothermal Systems by a New Gas Geothermometer.

DeMets, C., 2001. A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American Volcanic Arc. *Geophysical Research*.

Espinoza, F. J., 2007. Neotectónica de la Falla Nejapa, porción oeste del Graben de Managua-Nicaragua.

Francis, P., 1983. Calderas Volcánicas Gigantes. Edición española de *Scientific American*. Prensa Científica, S.A. Barcelona, España.

González Partida E., 2000. Evidencias de Evolución de un Fluido Básico a Ácido a partir del análisis de la Alteración Hidrotermal del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Volumen 17.

Hedenquist & Richards, 1998. Evolution of an intrusión-centered hidrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines.

Hodgson, G., 1998. Geología Histórica Regional e Historia Geológica Estructural Tectónica Simplificada de Nicaragua y América Central.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 1968. Fotografías aéreas del área de Telica y San Jacinto–Tizate. Escala 1: 30 000.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 1996. Fotografías aéreas del área de Telica y San Jacinto–Tizate. Escala 1: 40 000.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 2006. Hoja Topográfica de Telica, número 2853 IV.

La Femina, P.C., *et al.*, 2002. Bookshelf faulting in Nicaragua. *Geological Society of America*. Bulletin 30.

LaGeo, 2014. Resultados de Análisis por Difractometría de Rayos X. Muestras entregadas por Polaris Energy Nicaragua S. A.

Lefebure, D., 1986. The Mina El Limón and the Telica Complex: Two Examples of Cenozoic Volcanism in Northwestern Nicaragua, Central America.

Maksaev, V., 2001. Metalogénesis. Universidad de Chile.

Navarro, M., 1994. Peligro Volcánico “Volcán Telica”, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER-CEPRENAC.

Olney, J. L., 2006. The Age and Geochemical History of the Telica Volcanic Complex, Central Nicaraguan Volcanic Front.

Páez, J. V., 2010. Análisis Estructural en la región de Pasco de la Yesca, límite entre los estados de Jalisco y Nayarit, México, D.F.

Pérez, M., 1998. Correlación Estratigráfica y Elaboración del Modelo Estructural Geológico del Campo Geotérmico de Ahuachapán, El Salvador.

Polaris Energy Nicaragua S. A, 2014. Reservoir Temperature Estimation Based on Gas Geothermometry.

Ramsay, G. J., 1977. Plegamiento y Fracturación de Rocas. Blume, Madrid.

Rivera, M., 2004. Síntesis de la Geología Histórica de Nicaragua.

Remote Sensing Technology Center of Japan, 2014. Imágenes Multiespectral ASTER.

Remote Sensing Technology Center of Japan, 2014. Imágenes de Radar PALSAR.

Schmid, R., 1980. Nomenclatura y Clasificación Descriptiva de Depósitos Piroclásticos y Fragmentos: Recomendaciones de la Subcomisión de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) sobre la sistemática de las rocas ígneas.

Sibson, R. H., 1990. Conditions for fault valve behaviour. In: Knipe, K. J. & Rutter, E. H (eds) Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, Geological, London, Special Publications.

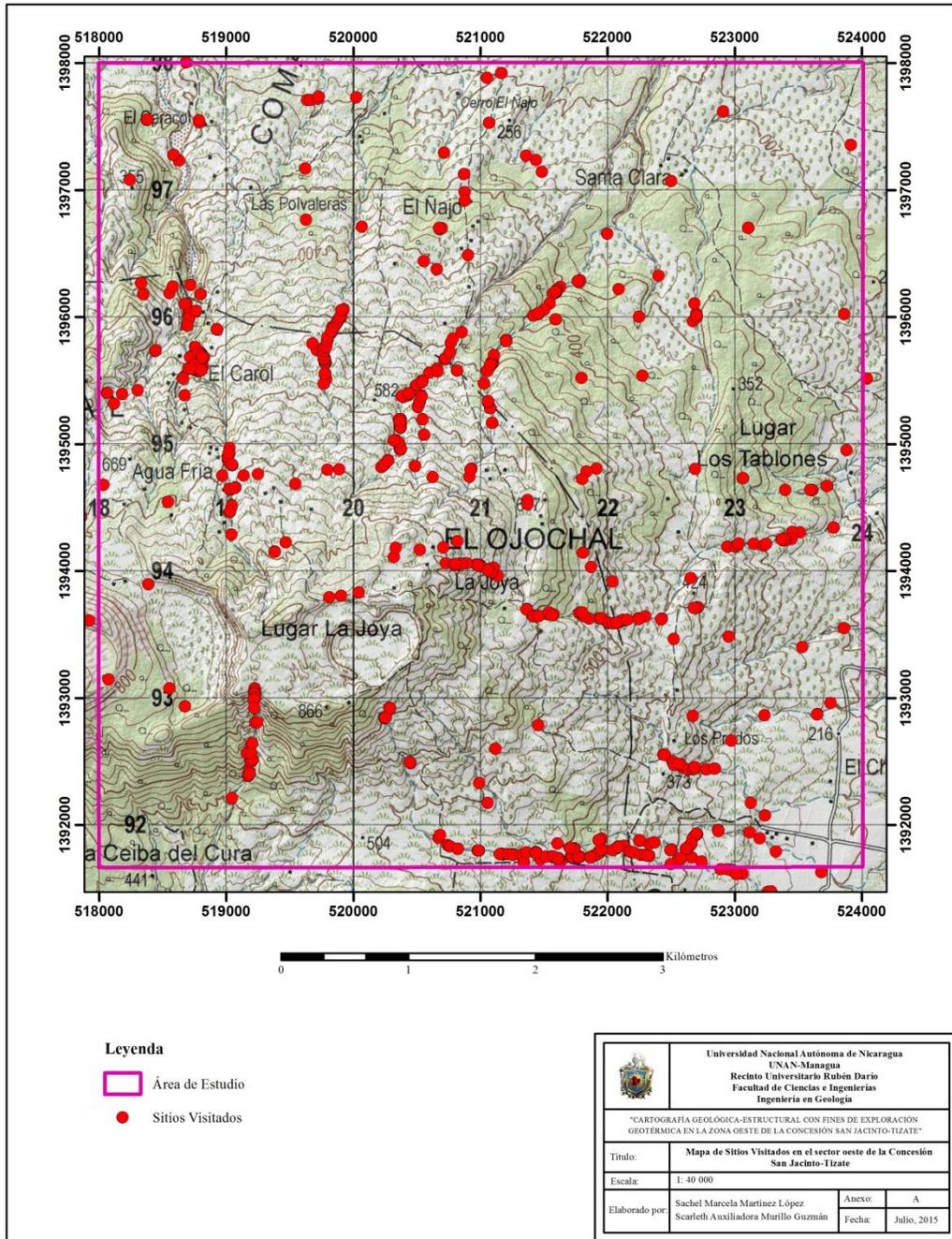
Spalleti, L. A., D'Elia, L., 2010. Rocas Piroclásticas y Sedimentación en Ambientes Volcánicos.

Stoffregen, R. E., 1987. Genesis of acid-sulfate alteration and Cu-Au-Ag mineralization at Summitville, Colorado.

## CAPÍTULO X: ANEXOS

### ANEXO A

#### Mapa de sitios visitados en el sector oeste de la Concesión San Jacinto-Tizate



**ANEXO B****Identificación de muestras de las cuales se elaboraron Secciones Delgadas**

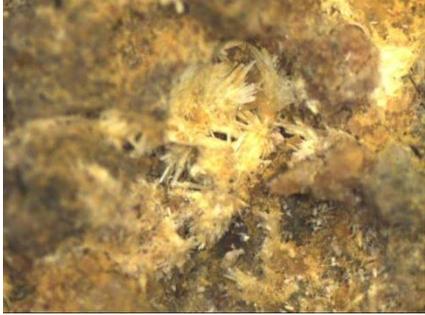
N°	Muestra	Coordenadas		Clasificación Petrográfica
		X	Y	
1	M1-02-07	518698	1395949	Andesita alterada
2	M1-05-03	522897	1396808	Andesita alterada
3	M1-13-02	523057	1394198	Toba litocristalina
4	M1-18-03	523367	1392141	Toba litocristalina
5	M1-23-09	521051	1397884	Andesita
6	M2-03-06	519782	1395633	Andesita basáltica
7	M2-21-05	523362	1391798	Toba litocristalina
8	M2-24-06	519230	1393061	Andesita alterada
9	M3-14-10	518248	1397080	Andesita
10	M3-15-05	522129	1391839	Toba cristalolítica
11	M3A-12-06	518708	1396018	Andesita alterada
12	M3B-12-06	518708	1396018	Andesita alterada con piritita diseminada
13	M4-13-05	520248	1392846	Andesita
14	M5-15-05	522888	1391653	Andesita basáltica
15	M5-24-06	519225	1392923	Andesita
16	M6-29-05	521083	1395630	Lava alterada
17	M8-29-05	521087	1395645	Brecha andesítica calcárea
18	M9-29-05	521118	1395710	Toba lítica alterada
19	M12-18-09	518350	1396179	Andesita

**ANEXO C**

**Identificación, localización y descripción de muestras analizadas por Difractometría de Rayos X (LaGeo, 2014)**

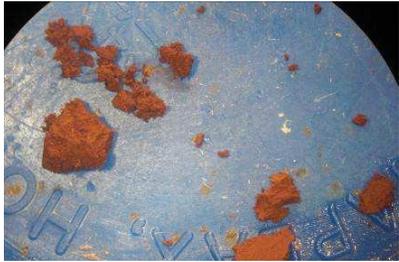
	Laboratorio de Geología	Área: GEO	Número: 31	
	Código: <b>REG-429-09</b>		Fecha: 20/06/14	
<b>Resultados de Análisis por Difracción de Rayos X Muestras entregadas por Polaris Geothermal Inc.</b>				
Muestra	Localidad	Composición mineralógica	%	Descripción macroscópica
CT027-14 M-1	Cañada Ojochal X: 521082 Y: 1395570	Montmorillonita (Na,Ca) <sub>0.3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> Saponitaférrica (Ca <sub>0.5</sub> (Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O) Nontronita (Na <sub>0.3</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .xH <sub>2</sub> O) Heulandita (Ca <sub>3.6</sub> K <sub>0.8</sub> Al <sub>8.8</sub> Si <sub>27.4</sub> O <sub>72</sub> .26.1H <sub>2</sub> O) O)	51 23 16 10	<p>Muestra compuesta por fragmentos de diferentes tamaños generalmente de color beige-café- claro-rojizo con algunos cristales blancos alargados. La mayoría se desintegran al tocarla. Se observa también fragmentos verdosos y grises con dureza media-baja. Asimismo, se encuentra manchas rojizas en las partículas.</p> <p>La mayoría de las muestras son hinchables al ponerle agua. Los fragmentos grises se observa como deleznable.</p> <p>Los cristales blancos no reaccionaron con el ácido clorhídrico, por lo que no pertenecen a los carbonatos.</p>  <p>Foto 1: M-1</p>

<p>CT028-14 M-2</p>	<p>Mud pool El Ñajo 751 X: 520678 Y: 1396704</p>	<p>Montmorillonita (<math>\text{Na}_{0.3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math>) Magnesiocopiapita (<math>\text{MgFe}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{20}</math>) Saponita (<math>\text{Ca}_{0.2}\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math>) Halotriquita (<math>\text{Fe}^{+2}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2.2\text{H}_2\text{O}</math>)</p>	<p>34 24 21 19</p>	<p>Muestra compuesta por fragmentos de color blanco-beige con algunas partículas finas blancas. Algunos fragmentos con manchas amarillentas. La mayoría son hinchables al echarle agua.  Dureza baja.</p>  <p>Foto 2: M-2</p>
<p>CT029-14 M-3</p>	<p>757 X: 521606 Y: 1396018</p>	<p>Calcita (<math>\text{CaCO}_3</math>) Saponita (<math>\text{Ca}_{0.2}\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math>) Estilbita (<math>(\text{Ca},\text{Na})_{1.3}(\text{Si},\text{Al})_9\text{O}_{18} \cdot 8\text{H}_2\text{O}</math>) Cloromagnesita (<math>\text{MgCl}_2</math>)</p>	<p>74 12 7 7</p>	<p>Muestra compuesta por láminas blancas con dureza media a alta. Espesor de hasta 9 mm.  Se observa algunos fragmentos de roca alterada de color morado – claro encima de las láminas blancas, los cuales pertenecen a una lava alterada.  En algunas láminas se observa una capa verdosa, la cual probablemente pertenece a alga termofílica.  Hubo reacción con el ácido clorhídrico.</p>  <p>Foto 3: Lámina blanca</p>

<p>CT030-14 M-4</p>	<p>Mud pool El Ñajo 761 X: 521095 Y: 1395675</p>	<p>Epsomita (MgSO<sub>4</sub>)(H<sub>2</sub>O)<sub>7</sub> Bassanita (CaSO<sub>4</sub>.0.5H<sub>2</sub>O) Bilinita (Fe<sup>+2</sup>Fe<sup>+3</sup>(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>.22H<sub>2</sub>O)</p>	<p>53 31 16</p>	<p>Muestra compuesta por fragmentos y partículas finas de color blanco- beige- amarillento. No hubo reacción con el ácido clorhídrico.</p> <p>Se observa cristales fibrosos de color amarillo.</p>  <p>Foto 4: Cristales fibrosos</p>
-------------------------	--	--	-------------------------	--

	Laboratorio de Geología	Área: GEO	Número: 45	
Código: <b>REG-429-09</b>		Fecha: 14/09/14		
<b>Resultados de Análisis por Difracción de Rayos X Muestras entregadas por Polaris Geothermal Inc.</b>				
Muestra	Localidad	Composición mineralógica (DFRX)	%	Descripción macroscópica
CT047-14 M-1	Agua Fría Sur X:518806 Y: 1395604	Cristobalita (SiO <sub>2</sub> ) Saponita (Mg, Al, Fe) <sub>3</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	58 42	<p>Muestra compuesta por fragmentos de diferentes tamaños y forma irregular, generalmente de color beige-café-claro, con algunas costras blancas y duras, y partículas pequeñas rojizas, blancas y transparentes.</p> <p>Las partículas más finas son generalmente minerales de arcilla hinchables al ponerle agua.</p> <p>Las costras blancas no reaccionaron con el ácido clorhídrico, por lo que no pertenecen a los carbonatos. Tiene dureza media a alta.</p> <div data-bbox="1040 1100 1479 1472" style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Foto 1: M-1</p>

<p>CT048-14 M-2</p>	<p>Agua Fría Norte X:518764 Y: 1395742</p>	<p>Cuarzo (SiO<sub>2</sub>) Azufre (S) Cristobalita (SiO<sub>2</sub>) Caolinita (Al<sub>4</sub> (OH)<sub>8</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>))</p>	<p>49 22 21 8</p> <p>Muestra compuesta por fragmentos pequeños y partículas terrosas de color blanco-beige-amarillento.</p> <p>La parte blanca terrosa al echarle agua se expandió.</p> <p>Los cristales amarillentos tienen textura brillante y dureza media a alta.</p> <p>No hubo reacción con el ácido clorhídrico.</p> <p>Dureza media a baja.</p>  <p>Foto 2: M-2</p>
-------------------------	--	---	---

<p>CT049-14 M-3</p>	<p>Agua Fría Sur Roja X:518806 Y: 1395604</p>	<p>Cristobalita (SiO<sub>2</sub>) Alunita (KAl<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>) Caolinita (Al<sub>4</sub>(OH)<sub>8</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)</p>	<p>53 23 24</p>	<p>Muestra compuesta partículas terrosas de color rojo, suave con algunas partículas blancas.</p> <p>Las partículas blancas son abundantes y no hubo reacción con el ácido clorhídrico.</p> <p>La coloración rojiza es debido a la presencia de Fe.</p>  <p>Foto 3: Muestra rojiza</p>
<p>CT050-14 M-4</p>	<p>Agua Fría Hot Spring X: 518706 Y: 1396042</p>	<p>Goetita (FeO(OH) Montmorillonita- Clorita (Na- Ca-Al-Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>-O)</p>	<p>58 42</p>	<p>Muestra compuesta por partículas muy finas de color café-rojizo. No hubo reacción con el ácido clorhídrico.</p> <p>Al echarle agua, se observa el hinchamiento leve.</p>  <p>Foto 4: Partículas finas</p>

<p>CT051-14 M-5</p>	<p>Agua Fría Sur Verde X: 518806 Y: 1395604</p>	<p>Natroalunita (<math>\text{Na}_{0.58}\text{K}_{0.42}\text{Al}</math> 3 (<math>\text{SO}_4</math>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>) Cristobalita (<math>\text{SiO}_2</math>) Cuarzo (<math>\text{SiO}_2</math>) Tridimita (<math>\text{SiO}_2</math>)</p>	<p>39 Muestra compuesta por fragmentos de color gris a gris-verdoso a blanco. 31 16 La parte gris a gris-verdosa tiene dureza alta, mientras la parte blanca es más suave. 14  La parte fina, suave y blanca se hincha al echarle agua.  No hubo reacción con ácido clorhídrico.</p>  <p>Foto 5: M-5</p>
-------------------------	---	--	--

## ANEXO D

### Clasificación Granulométrica de Piroclastos y Depósitos Piroclásticos, (Tomado de Schmid, 1980)

Tamaño del clasto (mm)	Piroclasto	Depósito Piroclástico	
		Predominantemente inconsolidado: tefra	Predominantemente consolidado: roca piroclástica
Mayor de 64	Bomba, bloque	Aglomerado, capa de bloques o tefra de bombas o de bloques	Aglomerado, Brecha piroclástica
64-2	Lapilli	Capa o lecho de lapilli o tefra de lapilli	Toba de lapilli
2-0.0625	Ceniza de grano grueso	Ceniza gruesa	Toba gruesa
Menor de 0.0625	Ceniza de grano fino	Ceniza fina	Toba fina

## **ANEXO E**

### **Descripción Petrográfica de muestras de Basalto analizadas por Jessica Lynn Olney (2006)**

#### **Sample TCA-03-21A**

X 518466

Y 1393825

Basaltic Lava: euhedral to subhedral plagioclase, augite, and olivine phenocrysts set in a highly oxidized, vesicular, cryptocrystalline matrix. Plagioclase (< 1.00 mm long), with Albite twinning and weak oscillatory zoning; melt inclusions within zones; highly altered; occur as single laths or in cumulates. Pyroxene occurs as augite (<0.70 mm), with altered rims and some embayment; some twinning is distorted; occurs alone or with opaque inclusions. Olivine (0.20 mm) occurs alone or with opaques. Groundmass is highly oxidized (red) with cryptocrystalline material and glass.

Phenocrysts = <10%; vesicles = <80%); matrix = 10%. Individual phenocrysts: plagioclase (<45%), pyroxene (<35%); olivine (<20%).

#### **Sample TCA-03-21B**

X 518393

Y 1393801

Basaltic Lava: euhedral to subhedral plagioclase and augite set in a highly oxidized, vesicular, cryptocrystalline matrix. Plagioclase (< 2.00 mm long), with Albite twinning and weak oscillatory zoning; melt inclusions within zones; some crystals embayed and show reaction with melt; occur as glomeroporphy with augite. Pyroxene occurs as augite (<1.50 mm), with some twinning; some showing optical intergrowth with other pyroxene; occur as glomeroporphy with plagioclase. Groundmass is highly oxidized (red) with cryptocrystalline material and glass. Phenocrysts = <10%; vesicles = <80%); matrix = 10%. Individual phenocrysts: plagioclase (-50%), pyroxene (-50%).

### **Sample TCA-04-7**

X 518177

Y 1394377

Basaltic Lava: euhedral to subhedral plagioclase and augite phenocrysts set in a matrix of microcrystalline feldspar and Fe-Mg minerals and red alteration material. Plagioclase occurs as single laths (< 0.50 mm long) or as cumulates (< 2.00 mm long) and occasional pyroxene inclusions; Carlsbad-Albite and Albite twinning. Pyroxene (<0.70 mm) occurs as fragmented single crystals; most occur as microphenocrysts (< 0.05 mm). Groundmass is microcrystalline. Phenocrysts = <70%; matrix = -30%. Individual phenocrysts: plagioclase (-90%), pyroxene (- 10%).

### **Sample TCA-04-8**

X 518292

Y 1394591

Basaltic Lava: euhedral to subhedral plagioclase, augite, and opaque phenocrysts set in a matrix of microcrystalline feldspar and Fe-Mg minerals. Plagioclase (<1.75 mm long) has Albite and Carlsbad-Albite twinning and weak zoning; abundant melt inclusions; few laths are embayed. Pyroxene single crystals (< 0.50 mm) are twinned; cumulates (<3.25 mm) are abundant; occurs with plagioclase and opaques. Opaque is black, disseminated throughout; most occur as inclusions in pyroxene (<0.25mm). Groundmass is microcrystalline. Phenocrysts = <70%; matrix = -30%. Individual phenocrysts: plagioclase (-55%), pyroxene (-40%); opaque (<5%).

### **Sample TCA-04-19**

X 517929

Y 1393506

Basaltic Lava: euhedral to subhedral plagioclase, augite, and olivine phenocrysts set in a vesicular matrix of altered glass and microcrystalline feldspar and opaques. Plagioclase laths (<2.65 mm long) have Albite twinning and weak oscillatory zoning; altered within zones; many are fractured laths. Pyroxene (<1.40 mm) occurs as augite; glass and opaque inclusions; simple twins; reaction rims; occurs as single crystals or more often as glomeroporphy of olivine and opaque. Olivine (<0.62 mm) is very slightly altered to iddingsite along fractures; some glass inclusions. Groundmass is oxidized glass with cryptocrystalline Feldspar and minor opaques. Phenocrysts = <40%; vesicles = -40%; matrix = -20%. Individual phenocrysts: plagioclase (<60%), pyroxene (<10%); olivine (<30%).

**ANEXO E.1****Datos Geoquímicos de Elementos Mayores y Traza correspondientes a muestras de Basalto (Tomado de Olney, 2006)**

<b>Sample</b>	<b>TCA-03-21 A</b>	<b>TCA-03-21-B</b>	<b>TCA-04-7</b>	<b>TCA-04-8</b>	<b>TCA-04-19</b>
<b>(wt %)</b>					
SiO <sub>2</sub>	49.21	53.44	46.3	52.74	47.48
TiO <sub>2</sub>	0.7	0.72	0.61	0.77	1.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.87	17.94	19.08	17.84	17.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.11	9.25	10.35	9.61	10.9
MnO	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17
MgO	5.16	6.1	6.2	3.65	5.29
CaO	10.4	10.2	12.8	8.92	11.3
Na <sub>2</sub> O	2.48	2.51	1.83	2.85	2.48
K <sub>2</sub> O	1.1	1.09	0.47	1.58	0.94
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.09	0.09	0.16	0.15
<b>Total</b>	<b>95.32</b>	<b>101.51</b>	<b>97.86</b>	<b>98.28</b>	<b>96.97</b>
<b>(ppm)</b>					
Rb	23.1	22.6	0.2	20.8	8
Sr	445.8	440.1	305.6	318.4	327.9
Sc	31.3	35	32.9	83.7	65.5
Zr	67.3	65.6	174.4	163.5	202
V	270	289.3	5.1	2.77	19.1
Cr	31.4	40.3			
Ni	8.8	15.8			
Co	46.8	51.5			

## ANEXO F

### Resultados de Geotermometría, Polaris Energy Nicaragua S.A, 2014

*Reservoir Temperature Estimation  
Based on Gas Geothermometry*

- Gas samples were collected from two fumaroles in El Ñajo area and three fumaroles from Agua Fria-El Carol area. Sampling and analyses were conducted by the Geochemistry Lab of the Ministry of Energy and Mines (Nicaragua).
- CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S/H<sub>2</sub> gas geothermometers given by Arnórsson and Gunnlaugsson (1985), in addition to gas geothermometer given by D'Amore and Panichi (1980) were applied for temperature estimation.

The retrieved result are the following:

- El Ñajo Area: ~245°C
- Agua Fria-El Carol Area: ~232°C (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S/H<sub>2</sub> Geothermometers applied)

#### Sampling General Data

#### Geothermometry Results

Source	Date	Time	X (m)	Y (m)	Z (m)	Arnórsson and Gunnlaugsson (1985)			D'Amore and Panichi (1980)
						CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S/H <sub>2</sub>	
El Ñajo S-E fumarole	29-May-14	10:45	521083	1395630	482	245	275		235
El Ñajo N fumarole	29-May-14	12:55	520067	1396711	351	240	278		255
Agua Fria - El Carol fumarole 1	02-Jul-14	10:28	518807	1395594	504		221		
Agua Fria - El Carol fumarole 2	02-Jul-14	11:05	518805	1395593	504		221	229	
Agua Fria - El Carol fumarole 3	02-Jul-14	12:15	518764	1395739	473		232	238	