

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias Básicas
Escuela Centroamericana de Geología

**Modelo volcano-sedimentario e historia geológica del
sector noreste de Lomas Barbudal
(Guanacaste, Costa Rica)**

Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Geología de la Universidad de Costa Rica

Geisell Barrantes Sandoval

A90845

Julio, 2018

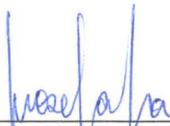
Tribunal examinador



Dr. Guillermo Alvarado Induni
Director del Comité Asesor



M. Sc. Elena Badilla Coto
Integrante del Comité Asesor



M. Sc. Monserrat Cascante Matamoros
Integrante del Comité Asesor



Dr. Percy Denyer Chavarría
Miembro del Tribunal Examinador



Dr. Mauricio Mora Fernández

Director de la Escuela Centroamericana de Geología
Presidente del Tribunal Examinador



Geól. Geisel Albania Barrantes Sandoval
Sustentante

Dedicatoria

A mis padres y abuelos.

Agradecimientos

A Dios.

Agradezco a mi director, Guillermo Alvarado, así como a mis codirectoras, Elena Badilla y Monserrat Cascante, por sus comentarios, recomendaciones y la guía durante este proceso.

A Kermith Carvajal, del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y al Servicio Nacional de Agua Riego y Avenamiento (SENARA), por permitirme usar datos del proyecto Embalse Río Piedras, así como la facilitación de vehículos y asistentes de campo, sin los que hubiera sido imposible realizar este trabajo.

A mi mano derecha durante las giras de campo, Marco Sancho; también a Jonathan Cortés, Alexis Vindas, Manuel Barrantes, Dione Barahona, Krista Thiel, Geovanni Obando, Ronald Bolaños y Martín Vargas por ayudarme en diversas labores.

A mi estimado amigo Luis Obando por su colaboración con el análisis de facies sedimentarias y por sus acertados consejos.

Un especial agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional.

Contenido

Capítulo I. Introducción	1
1. Justificación	2
2. Objetivos	3
Objetivo general.....	3
Objetivos Específicos.....	3
3. Ubicación geográfica	4
4. Metodología	6
4.1 Investigación y planificación	6
4.2 Trabajo de campo.....	6
4.3 Trabajo de gabinete	6
5. Marco teórico	9
1. Definiciones importantes	9
2. Trabajos previos	11
Capítulo II. Marco geotectónico y geológico regional	13
Capítulo III. Geología Local	16
Estratigrafía	16
Unidades ígneas	17
Unidad Rama de Nance (Rn)	17
Unidad Agua Fría (Af)	19
Unidad Pan de Azúcar (Pa)	23
Unidad Río Colorado (RC).....	26
Unidad Cañas (Cas).....	29
Unidad Montenegro (Mn)	31
Análisis y discusión de las unidades ignimbríticas	34
Unidades Sedimentarias	44
Unidad Falconiana (Fa).....	44
Unidad Biscoyol (Bi).....	46
Unidad Bejuquito (Be)	47
Unidad Veraneras (Ve)	49
Depósitos recientes.....	50
Análisis e interpretación de facies	51
Capítulo IV. Elementos estructurales y morfotectónica	65

Observaciones morfoestructurales	87
Capítulo V. Conclusiones	89
Historia geológica	89
Conclusiones	90
Capítulo VI. Referencias	93
ANEXOS	99

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio	5
Figura 2. Mapa de ubicación de afloramientos.....	7
Figura 3. Mapa de ubicación de localidades tipo de cada unidad.	8
Figura 4. Columna estratigráfica local.....	16
Figura 5. Sección enriquecida en pómez de la Unidad Rama de Nance, en la cual se observan pómez y escorias de gran tamaño, ubicada en las coordenadas 359181E/1157433N. En el detalle de la fotografía se puede apreciar una pómez blanca.....	17
Figura 6. Sección enriquecida en líticos y obsidianas de la Unidad Rama de Nance, ubicada al noroeste del puente de Llanos del Cortés, coordenadas 358865E/1161627N.	18
Figura 7. Fotografía microscópica de la Unidad Rama de Nance. La fotografía de la derecha se muestra a nicoles paralelos y la de la izquierda a nicoles cruzados; en cada fotografía se señala e identifica cada componente.....	19
Figura 8. Andesitas lajeadas de la Unidad Agua Fría, ubicadas en las coordenadas 360000E/1155400N.	20
Figura 9. Andesitas vesiculares de la Unidad Agua Fría, ubicadas en las coordenadas 360621E/1154260N.	20
Figura 10. Fotografía microscópica de los hipoabisales afíricos de la Unidad Agua Fría. La fotografía de la derecha se muestra a nicoles paralelos y la de la izquierda a nicoles cruzados; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes (Muestra tomada en las coordenadas: 358048E/1160868N).	21
Figura 11. Fotografía microscópica de las lavas afaníticas-porfíricas de la Unidad Agua Fría. La fotografía de la derecha se muestra a nicoles cruzados y la de la izquierda a nicoles paralelos; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes (muestra tomada en las coordenadas 360000E/1155400N).	22
Figura 12. Fragmento de la perforación 10a (359941E/1156016N), donde se observa el contacto entre la peperita y la arenisca. En la peperita los números señalan: 1. Clasto ignimbrítico, 2. Fragmento lávico vesicular rojizo, 3. Fragmento lávico masivo gris, 4. Clastos pumíticos, 5. Clasto de arenisca.	22
Figura 13. Ignimbrita bien soldada de la Unidad Pan de Azúcar. Donde se pueden apreciar fiammes de hasta 16 cm, ubicada en las coordenadas 363037E/1158383N.	23
Figura 14. Ignimbrita poco soldada de la Unidad Pan de Azúcar. Donde se destacan escorias negras de hasta 25 cm en la matriz, afloramiento localizado en las coordenadas 362218E/1156895N.	24
Figura 15. Sección delgada de la ignimbrita poco soldada de la Unidad Pan de Azúcar. La fotografía de la derecha se muestra a nicoles paralelos y la de la izquierda a nicoles cruzados; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes (Muestra tomada en las coordenadas: 362218E/1156895N).	25
Figura 16. Sección delgada de la ignimbrita soldada Pan de Azúcar. La fotografía de la derecha se muestra a nicoles paralelos y la de la izquierda a nicoles cruzados; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes, (muestra tomada en las coordenadas 363037E/1158383N).	25
Figura 17. Ignimbrita Unidad Río Colorado. Se puede apreciar la matriz roja y pequeños fiammes negros, foto tomada en las coordenadas 360447E/1159444N.	27

Figura 18. Disyunción columnar superficial en la ignimbrita de la Unidad Río Colorado, foto tomada en las coordenadas 360447E/1159444N.	28
Figura 19. Fotografía microscópica de la ignimbrita Río Colorado, la imagen de la derecha se encuentra a nicoles cruzados y a la izquierda se observa a nicoles paralelos (Muestra tomada en las coordenadas foto tomada en las coordenadas 360447E/1159444N).	28
Figura 20. Sección superior de la Unidad Cañas. Se observan laminaciones de pómez blancas en una matriz café claro, afloramiento ubicado en las coordenadas 362739E/1163188N.	30
Figura 21. Sección inferior y sección media de la Unidad Cañas, afloramiento ubicado en las coordenadas 361525E/1160920N.	30
Figura 22. Afloramiento con disyunción columnar de la ignimbrita de la Unidad Montenegro, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357915E/1158334N.	31
Figura 23. Contacto entre paleosueolo rojizo y la ignimbrita de la Unidad Montenegro, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.	32
Figura 24. Fotografía microscópica de la ignimbrita Montenegro, a la izquierda a nicoles paralelos y a la derecha a nicoles cruzados. Los componentes se señalan en cada figura (Muestra tomada en las coordenadas: 361688E/1159971N).	32
Figura 25. Fragmentos pumíticos y líticos, inmersos en una matriz vitroclástica con textura eutaxítica, observados a nicoles paralelos en una muestra de la Unidad Rama de Nance (muestra tomada en las coordenadas 362525E/1154508N).	36
Figura 26. Fragmentos pumíticos, líticos, opacos y cristales de plagioclasa inmersos en una matriz vitroclástica con textura eutaxítica, observados a nicoles paralelos en una muestra de la Unidad Pan de Azúcar (muestra tomada en las coordenadas 357356E/1160055N).	36
Figura 27. Plagioclasas con maclas polisintéticas y zonación, en una matriz vitroclástica eutaxítica observados a nicoles cruzados en una muestra de la Unidad Pan de Azúcar (muestra tomada en las coordenadas 361415E/1156626N).	37
Figura 28. Cristales de plagioclasas e hipersteno en una matriz vitroclástica de textura eutaxítica observados a nicoles cruzados en una muestra de la Unidad Pan de Azúcar (muestra tomada en las coordenadas 360287E/1154265N).	37
Figura 29. Cristales de plagioclasas, augita y opacos en una matriz vitroclástica eutaxítica observados a nicoles cruzados en una muestra de la Unidad Rama de Nance (muestra tomada en las coordenadas 361787E/1156491N).	38
Figura 30. Esquirlas de vidrio, opacos, plagioclasas y líticos, inmersos en una matriz vitroclástica con textura eutaxítica, observados a nicoles paralelos en una muestra de la Unidad Rama de Nance (muestra tomada en las coordenadas 362525E/1154508N).	38
Figura 31. Comparación de la unidad de flujo ideal, propuesta por Spark et al. (1973) y las unidades de flujo ignimbríticas de la zona de estudio.	41
Figura 32. Comparación de la configuración del grado de soldamiento en un flujo ignimbrítico teórico, según: Fisher & Schmincke (1984) y las unidades ignimbríticas presentes en el área de estudio.	43
Figura 33. Intercalación de areniscas finas, medias y gruesas con pómez de la Unidad Falconiana (Muestras tomadas en las coordenadas: 361003E/1155991N).	45
Figura 34. Intercalación de areniscas finas y medias enriquecidas en pómez de la Unidad Falconiana, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N.	45

Figura 35. Areniscas tobáceas enriquecidas en pómez de la Unidad Biscoyol, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362701E/1155897N.	46
Figura 36. Contacto entre areniscas y conglomerado fino de la Unidad Biscoyol, afloramiento ubicado en las coordenadas: 360000E/1156750N.	47
Figura 37. Conglomerado polimíctico de la Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.	48
Figura 38. Areniscas con laminación paralela de la Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.	48
Figura 39. Areniscas con laminación cruzada de la Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.	49
Figura 40. Areniscas finas, muy finas y medias con laminación paralela y laminación convoluta de la Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.....	50
Figura 41. Arenas con laminación paralela y cruzada en depósitos recientes inconsolidados en un margen del río Piedras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 359800E/1157868N.	51
Figura 42. Ubicación y distribución de los depósitos fluviales, (Fuente: Instituto Geográfico Nacional, datos digitales: IGN-PRCR, cartografía 1:50 000).....	52
Figura 43. Conglomerado polimíctico de la Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.	53
Figura 44. Areniscas con laminación cruzada, Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.	54
Figura 45. Areniscas con laminación paralela horizontal, Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.	55
Figura 46. Areniscas masivas guijarrosas, Unidad Falconiana, afloramiento en las coordenadas: 361003E/1155991N.	55
Figura 47. Areniscas con laminaciones finas contorsionadas y laminación paralela fina, Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.	56
Figura 48. Areniscas con bioturbación y restos mineralizados de materia orgánica, Unidad Falconiana, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N.	57
Figura 49. Mapa de ubicación de las secciones estratigráficas (para detalles ver anexo 2).....	58
Figura 50. Correlación de las secciones estratigráficas de la Unidad Falconiana.	60
Figura 51. Sección estratigráfica de la Unidad Biscoyol.	61
Figura 52. Sección estratigráfica de la Unidad Bejuquito.	62
Figura 53. Correlación de secciones estratigráficas de la Unidad Veraneras.	63
Figura 54. Mapa de fallas y elementos estructurales.	66
Figura 55. Rosa de rumbos de fracturas del sector sur de la Falla Bagaces.....	68
Figura 56. Fracturas con relieve positivo y “domo” de emanación de gases y agua, traza este del sector norte de la falla Bagaces (las líneas rojas señalan las fracturas),ubicado en las coordenadas 359101E/1162381N.	69
Figura 57. Rosa de rumbos de fracturas traza este del sector norte Falla Bagaces.....	70
Figura 58. Rosa de rumbos de fracturas, traza oeste del sector norte falla Bagaces.	71
Figura 59. Vista del afloramiento principal de la falla Carmona en Tajo Cortés, en azul se muestra la capa guía y en rojo las fallas, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N.....	73
Figura 60. Detalle de una de las trazas de la falla Carmona observadas en Tajo Cortés (afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N).	73

Figura 61. Rosa de rumbos de fracturas de las trazas de la falla Carmona.....	74
Figura 62. Rosa de rumbos de fracturas de la Falla Papaturreo.	75
Figura 63. Rasgos morfológicos de la Falla Lora. Se observan varios lagos alineados a lo largo de la traza propuesta, así como un alineamiento en el río.	76
Figura 64. Rosa de rumbos de fracturas de la Falla Lora.	78
Figura 65. Traza y escarpe de la falla Santa Isabel, foto tomada desde las coordenadas: 362126E/1159319N.	79
Figura 66. Rosa de rumbos de la Falla Santa Isabel.	79
Figura 67. Traza y escarpe de la falla Quebrada Pital, foto tomada desde las coordenadas: 362437E/1161362N.	80
Figura 68. Fracturas con desplazamiento normal asociadas a la falla Quebrada Pital cortando la Unidad Cañas, afloramiento ubicado en las coordenadas 361525E/1160920N.	81
Figura 69. Fracturas con relieve positivo, en cerro al NO de paso Mogote, ubicado en las coordenadas :359711E/1158888N.	81
Figura 70. Rosa de rumbos de las fracturas de la falla Quebrada Pital.....	82
Figura 71. Perfil representativo de las fallas Cabeza de Vaca.....	83
Figura 72. Rosa de rumbos de las fracturas de las fallas Cabeza de Vaca.	84
Figura 73. Rosa de rumbos de las fracturas de la Falla Biscoyol.....	85
Figura 74. Mapa regional de fallas, incluye las fallas de Climent et al. (2016), Denyer et al. (2014) y las de este trabajo (en rojo).	88

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen estratigráfico de la Formación Bagaces.....	11
Tabla 2. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Rama de Nance	18
Tabla 3. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Pan de Azúcar.....	26
Tabla 4. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Río Colorado.....	29
Tabla 5. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Montenegro	33
Tabla 6. Características de las partes de una unidad de flujo de una corriente de densidad piroclástica (Sparks et al., 1973; Freundt et al., 2000).....	39
Tabla 8. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas para el sector sur de la falla Bagaces.	67
Tabla 9. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas de la traza este del sector norte Falla Bagaces.	69
Tabla 10. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas, traza oeste sector norte Falla Bagaces.....	71
Tabla 11. Fallas normales observadas en Tajo Cortés.....	72
Tabla 12. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas asociadas a las trazas de la Falla Carmona..	74
Tabla 13. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas de la Falla Papaturre.	75
Tabla 14. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la Falla Lora.	77
Tabla 15. Datos de rumbo y buzamiento de la falla Santa Isabel.	79
Tabla 16. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la falla Quebrada Pital.....	82
Tabla 17. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la Falla Cabeza de Vaca.	84
Tabla 18. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la Falla Biscoyol	85
Tabla 19. Resumen de fallas identificadas en el área de estudio.	86

Índice de Anexos

Anexo 1. Mapa Geológico	100
Anexo 2. Detalle de las columnas estratigráficas de las unidades fluviales.....	102

Resumen

El área de estudio (76 km²) se localiza al NE de Lomas Barbudal, en el cantón de Bagaces. La geología está dominada por intercalaciones de depósitos fluviales y volcánicos de la Formación Bagaces (Plioceno – Pleistoceno Inferior), con algunos depósitos fluviales del Pleistoceno Medio al Holoceno. Se identificaron, mapearon y estudiaron 6 unidades volcánicas informales: lavas Agua Fría, ignimbrita Rama de Nance, ignimbrita Pan de Azúcar, ignimbrita Río Colorado, ignimbrita Cañas e ignimbrita Montenegro. Adicionalmente, se cartografiaron 5 unidades sedimentarias informales: Falconiana, Biscoyol, Bejuquito, Veraneras y Depósitos Recientes. Las unidades volcánicas son principalmente ignimbritas de composición dacítica, con amplia distribución, espesores variados y con diferentes grados de soldamiento. Por su parte, las rocas sedimentarias consisten en depósitos fluviales (intercalaciones de areniscas volcanoclásticas, conglomerados y paleo-suelos), de distribución y espesor limitado, a excepción de la unidad Falconiana que posee un espesor superior a los 70 m. Las facies sedimentarias predominantes son características a las encontradas en ambientes fluviales, conformando barras arenosas, relleno de canales arenosos u *overbank*, canales y canales abandonados, así como llanuras aluviales. En cuanto a la historia geológica, se interpreta que a inicios del Plioceno y posterior a la depositación de la unidad Falconiana, hubo actividad volcánica fisural, emplazamiento de lavas Agua Fría; posteriormente, durante el Plioceno y el Pleistoceno Inferior se mantuvo una intermitencia entre periodos eruptivos, durante los cuales se tenían un sistema de ríos, alternados con fases de desarrollo de suelos, intercalados entre los depósitos volcánicos. Desde el punto de vista estructural, la zona es neotectónicamente activa, donde sobresale la falla Bagaces con orientación N-S y de tipo transtensional, asociada a la cual se encuentran fallas con orientación NE (sistema de falla Pital) y con orientación NO (falla Biscoyol y alineamientos río Piedras).

Palabras Clave: unidades volcánicas, unidades sedimentarias, facies, estratigrafía, falla.

Capítulo I. Introducción

En el ciclo geológico, los sistemas volcánicos activos modifican el relieve y el gradiente hidráulico de los ambientes geográficos, al generar grandes volúmenes de sedimentos epivolcanoclásticos en cortos periodos de tiempo. La sedimentación volcánica no solo destruye la vegetación y cambia la red de drenaje y los niveles base de erosión, sino que aceleran los procesos de erosión, transporte y sedimentación, creando depósitos epivolcánicos entre los depósitos volcánicos primarios. Es decir, durante el tiempo que transcurre entre erupciones, se acumulan considerables cantidades de materiales volcánicos retrabajados. Debido a lo anterior, no es de extrañar la aparición de facies epivolcanoclásticas y volcanoclásticas secundarias interdigitadas entre depósitos volcánicos primarios. Ambos procesos pueden traer a la luz no solo la geometría de la cuenca de sedimentación, sino los eventos tectónicos y edafológicos que allí operaron, bien fundamentados para tener una historia geológica más completa (Fisher & Schmincke, 1984).

En el área de estudio predominan las rocas producto de corrientes de densidad piroclásticas (CDP), conocidas también como ignimbritas, mencionadas por primera vez por Dóndoli (1950), así como los depósitos sedimentarios producto del retrabajo de las mismas.

El análisis de los depósitos piroclásticos aporta información valiosa, con la que se puede determinar estratigrafía, temperatura de los flujos, velocidad, fuente de origen, periodos de inactividad, entre otros. En Costa Rica, Chiesa *et al.* (1987, 1992), Villegas (1997) y Pérez (2000) fueron los primeros en utilizar el análisis de detalle de los depósitos piroclásticos en distintas partes del país, incluyendo las ignimbritas de Guanacaste.

En cuanto a los depósitos sedimentarios, intercalados entre las ignimbritas de la Formación Bagaces, fueron mencionados por primera vez por Bohnenberguer (1968), Naciones Unidas (1975) y Chiesa *et al.* (1992); así como mapeados de modo regional por Denyer *et al.* (2014).

En el presente trabajo se describirán detalladamente los depósitos, tanto sedimentarios epivolcanoclásticos, como volcánicos presentes en el área de estudio y se dará a conocer la estratigrafía, petrografía, ambiente de depositación; así como la geología estructural y tectónica de la zona de estudio.

1. Justificación

A pesar de la existencia de numerosos estudios geológicos (inéditos y publicaciones) en la zona de Guanacaste y específicamente para la Formación Bagaces, no existen publicaciones de carácter local, donde se identifiquen y detallen las unidades geológicas presentes. Los trabajos principales en la zona fueron realizados por Dóndoli (1950), Dengo (1962), Bohnenberguer (1968), Chiesa *et al.* (1987), Gillot *et al.* (1994), Alvarado & Gans (2012) y Denyer *et al.* (2014) y son de índole regional, mientras que en el presente proyecto se realizó un levantamiento geológico minucioso del área de interés, que permite obtener una idea más clara de la evolución geológica y estratigráfica de la zona.

A pesar de la dificultad que conlleva el mapeo de rocas volcánicas, no cabe duda que es posible identificar y darles seguimiento a estos depósitos, por ejemplo, a unidades de ignimbritas extensas, tal como lo realizó Chiesa *et al.* (1992) con las unidades de la Formación Liberia, basándose en el mapeo detallado realizado por Civello (1990) y Pecchio (1990). Durante el desarrollo de esta tesis, se identificó, definió, mapeó y se dio seguimiento a cada una de las unidades volcánicas y sedimentarias presentes en el área de estudio; además se describieron y diferenciaron los depósitos sedimentarios presentes entre las unidades ignimbríticas.

Al detallar las facies volcánicas primarias y secundarias, se puede comprender la fuente de origen y geometría de parte de la cuenca receptora; asimismo, de la tectónica que imperó en ese momento. Todo lo anterior es la base para una mejor comprensión de la evolución y la historia geológica del área de estudio.

2. Objetivos

Objetivo general

Determinar las relaciones geológicas y estructurales de las facies de rocas volcánicas y epivolcanoclásticas, mediante el mapeo detallado y la aplicación de técnicas sedimentológicas y volcanológicas, para establecer un modelo volcano-sedimentario y la historia geológica del sector noreste de Lomas Barbudal.

Objetivos Específicos

- Realizar mapeo geológico a detalle 1: 15 000 en el sector noreste de Lomas Barbudal, para la identificación de las unidades geológicas y sus relaciones estratigráficas.
- Establecer las facies sedimentarias de los depósitos fluviales del noreste de Lomas Barbudal y su posible relación con las unidades volcánicas infrayacentes.
- Elaborar un modelo estructural para conocer la influencia de las estructuras presentes en el área de estudio.
- Identificar las posibles fuentes de origen de las ignimbritas y las variaciones laterales de facies presentes en el área de estudio, así como la historia geológica.

3. Ubicación geográfica

El área de investigación se localiza al noreste de Lomas Barbudal, en el cantón de Bagaces, Guanacaste; está limitada por los poblados de Llanos del Cortés al NO y Falconiana al SE (Figura 1). Abarca un área de 62 km² en los cuadrantes NO de la hoja topográfica Tempisque y SE de la hoja Topográfica Monteverde (escala 1:50 000 del I.G.N.). Además, esta área forma parte de la cuenca del paleo-Tempisque y, actualmente, constituye una parte importante de la cuenca del río Piedras. Dentro del área de estudio existen varios caminos de lastre, el más importante es la ruta 922, que atraviesa el área de norte a sur y comunica Bagaces con el Parque Nacional Palo Verde. Además, existe la ruta que comunica Llanos del Cortés con la Reserva Biológica Lomas Barbudal y otros caminos privados.

4. Metodología

El presente trabajo consta de tres etapas: a). investigación y planificación, b). trabajo de campo y c). análisis de la información recopilada. A continuación, se describe a detalle cada una de las etapas:

4.1 Investigación y planificación

Esta es la etapa inicial del trabajo; comprende la recopilación y análisis de la información referente al contexto geológico, geomorfológico, estratigráfico y estructural de la zona de interés y alrededores. De dicha revisión se obtuvieron los datos y mapas preliminares con los cuales se planificaron las giras de campo.

4.2 Trabajo de campo

Esta etapa se realizó en siete meses, efectuando giras al área de estudio de tres días por semana, durante los cuales se realizó el levantamiento detallado de unidades y estructuras geológicas, así como perfiles y secciones estratigráficas. Se tomaron los datos de tipo de roca, rumbo, buzamiento, tamaño de grano, redondez, esfericidad, color, meteorización, dureza, presencia de líticos, pómez, escorias, *fiammes*, entre otras características, dependiendo de la naturaleza de la roca; esto se realizó para cada una de las unidades geológicas. Además, se midió el espesor y dimensiones de cada una de las capas de roca aflorantes y se determinaron las características de los contactos inferior, superior y lateral. En cuanto a las estructuras, tales como fallas y diaclasas, se realizaron medidas de rumbo, buzamiento, relleno, apertura y longitud.

Durante esta etapa también se recolectaron muestras de roca y suelo para realizar descripciones macro y microscópicas. Se realizaron 21 secciones delgadas de los depósitos volcánicos presentes. Así mismo, se corroboró o modificó la información obtenida en la etapa de investigación.

Debido a la accesibilidad y a las facilidades otorgadas por el proyecto Embalse Río Piedras, fue posible recorrer el 95% del área de estudio y obtener un total de 782 afloramientos, obteniéndose una densidad promedio de 12,5 afloramientos por kilómetro cuadrado (Figura 2., mapa de ubicación de afloramientos y Figura 3., Mapa de localidades tipo de cada unidad).

4.3 Trabajo de gabinete

Durante esta etapa se integró y analizó la información obtenida durante la investigación y el trabajo de campo, obteniendo los productos finales: mapa geológico 1:15 000, columnas y secciones estratigráficas, realizados con los softwares ArcGis® y Adobe Ilustrador®. Sumado a lo anterior, se realizó el trabajo escrito, donde se incluyen los detalles y descripciones de cada uno de los productos obtenidos, así como el modelo evolutivo del área de estudio.

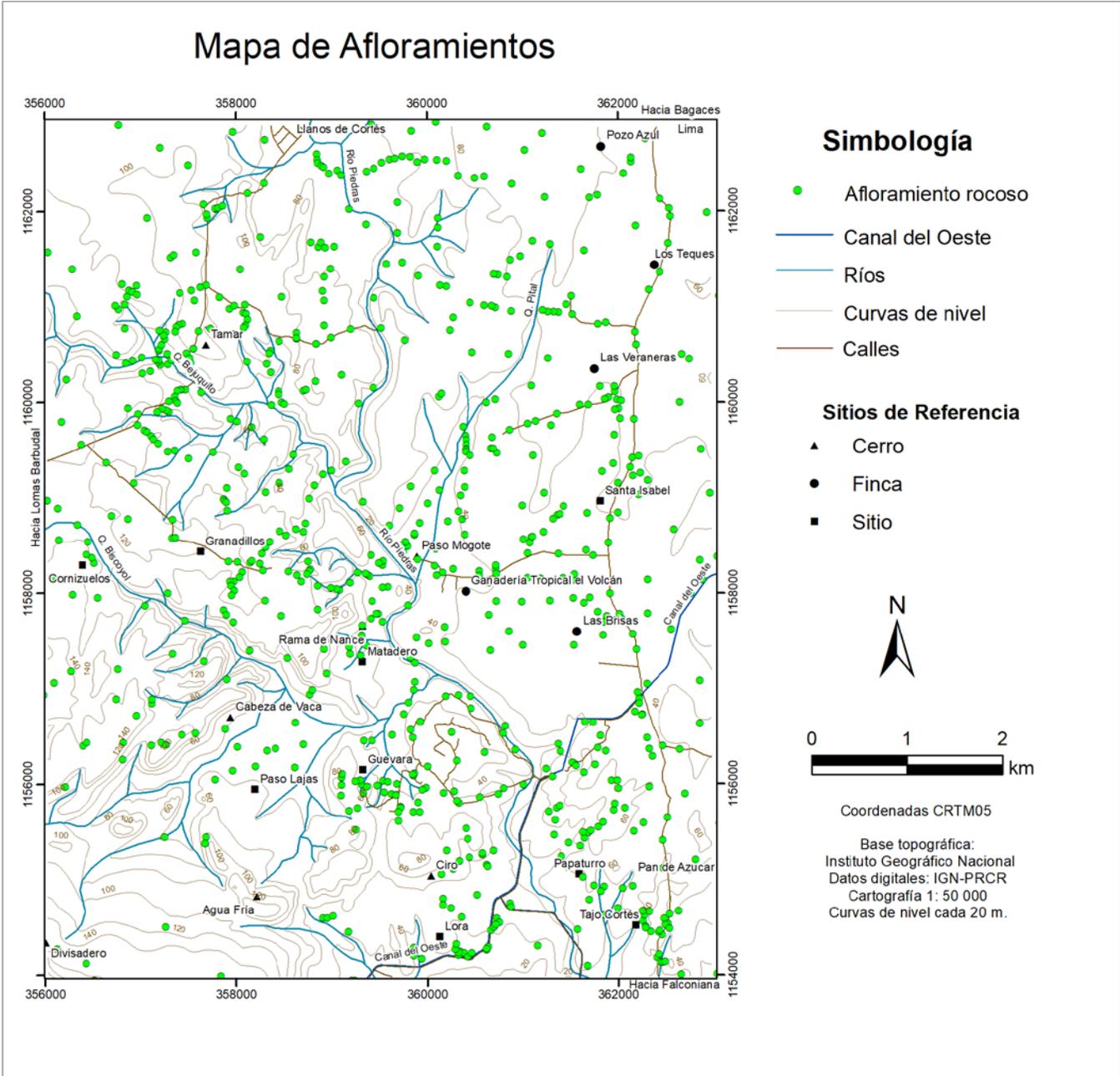


Figura 2. Mapa de ubicación de afloramientos.

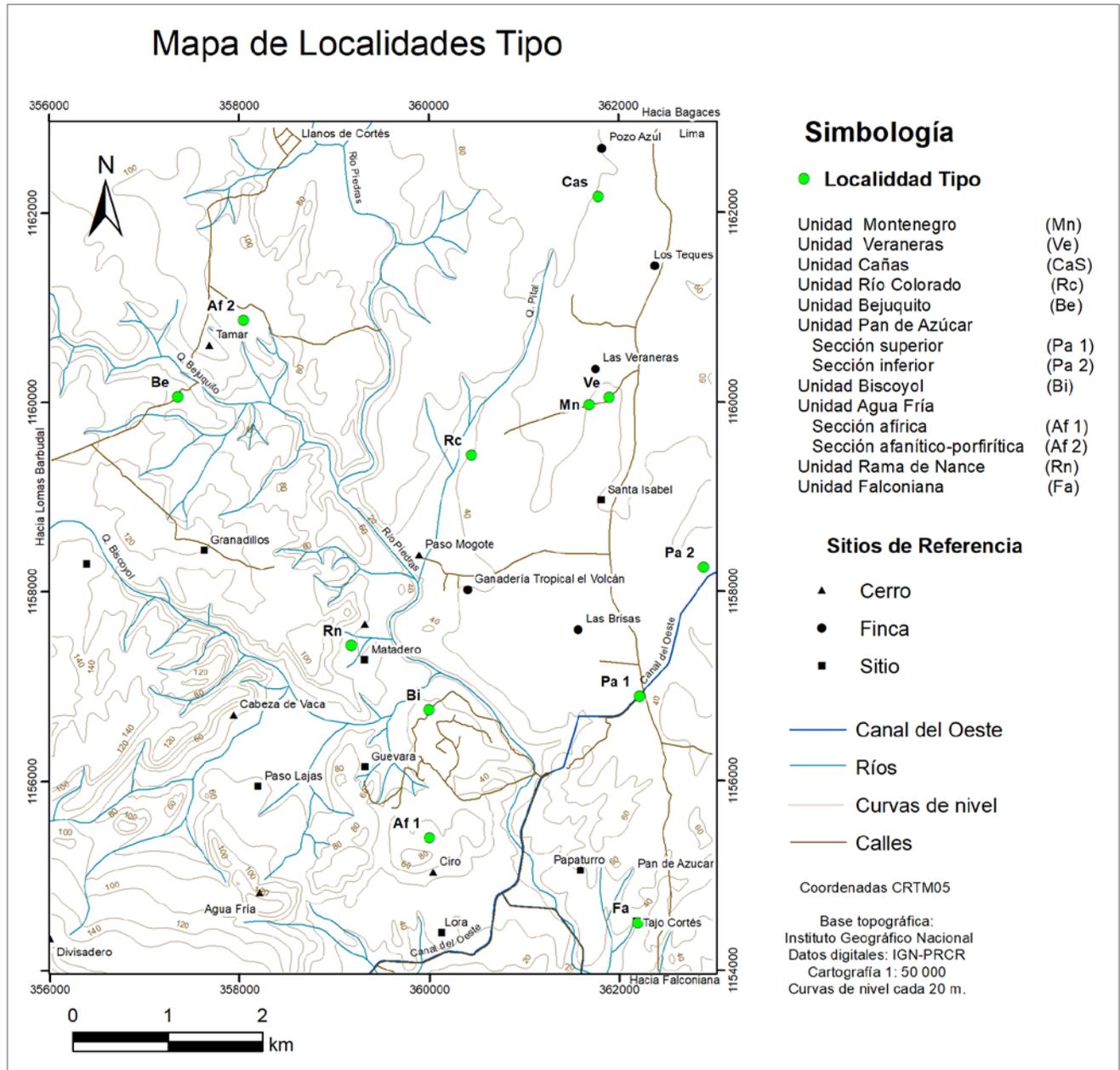


Figura 3. Mapa de ubicación de localidades tipo de cada unidad.

5. Marco teórico

El presente proyecto necesita manejar conceptos clave para el enfoque y entendimiento, los cuales se definen a continuación:

1. Definiciones importantes

Unidad Litoestratigráfica: Volúmenes de roca en los que se agrupan conjuntos de estratos en función de sus litologías y su posición estratigráfica. Existen unidades formales, nombradas de acuerdo a un esquema de clasificación establecido e informales, cuyos términos de unidad son nombres comunes y no están amparados por la clasificación establecida (Vera, 1994).

Formación (Fm.): Unidad fundamental dentro de las unidades litoestratigráficas formales. Se define como conjunto de estratos de rango intermedio en la jerarquía de las unidades litoestratigráficas formales y consiste en un cuerpo de roca que se identifica por sus características líticas y por su posición estratigráfica (Vera, 1994).

Miembro: Unidad litoestratigráfica de rango inmediatamente inferior al de la formación, se origina cuando en una formación se pueden diferenciar dos o más partes de acuerdo a las litofacies presentes (Vera, 1994).

Piroclasto: Fragmento originado durante una erupción volcánica explosiva, ya sea magmática, hidromagmática o freática. Los fragmentos piroclásticos se subdividen en: 1. Juveniles, aquellos que fueron formados por la fragmentación del magma emitido durante la erupción. 2. Accesorios, fragmentos volcánicos comagmáticos preexistentes, involucrados en la erupción. 3. Accidentales, son los fragmentos provenientes de rocas metamórficas o sedimentarias o rocas de origen ígneo no comagmático, involucrados durante el proceso eruptivo (Murcia *et al.*, 2013).

Depósitos piroclásticos: Estos Depósitos están definidos como un conjunto de piroclastos consolidados o inconsolidados. Para que un depósito sea considerado como piroclástico, más de un 75% de su volumen debe estar ocupado por piroclastos, el 25% restante puede estar constituido por epiclastos, materia orgánica u otro tipo de roca. Cuando el depósito se encuentra consolidado se le llama roca piroclástica y cuando el grado de consolidación es bajo se le asigna el nombre de tefra. Sin embargo, la mayoría de los depósitos piroclásticos son clasificados de acuerdo a las proporciones de los piroclastos presentes (aglomerados, brecha piroclástica, toba brechosa, toba de lapilli, roca de lapilli y toba de ceniza).

Toba: Roca piroclástica con un contenido de ceniza superior al 75%, dividida en toba gruesa (2 mm a 1/16 mm), toba fina (menor a 1/16 mm) y toba muy fina (*dusty tuff*). A menudo las tobas son clasificadas por su composición fragmentaria, en toba lítica, toba vítrea y toba cristalina (Bull & McPhie, 2007).

Pómez: Fragmento de origen piroclástico compuesto por vidrio volcánico, vesículas y cristales, poco denso, la mayoría de vesículas son pequeñas y se encuentran interconectadas y deformadas, sugiriendo magmas viscosos ricos en volátiles (Murcia *et al.*, 2013).

Escoria: Lava altamente vesicular, similar al pómez, pero de composición básica (Le Maitre *et al.*, 2002).

Ignimbrita: El término ignimbrita proviene del latín “*ignis*” = fuego y “*amber*” = lluvia y fue utilizado por primera vez por Marshall (1935). Las ignimbritas son rocas o depósitos originados por flujos piroclásticos; sin embargo, hay quienes utilizan este término para referirse únicamente a rocas soldadas procedentes de dichos flujos. Las ignimbritas son depósitos voluminosos de corrientes de densidad piroclásticas que varían desde ceniza inconsolidada hasta depósitos de ceniza densamente soldados y duros, que fácilmente pueden confundirse con flujos de lava (Cas & Wright, 1987).

Sparks *et al.* (1973) definen ignimbrita como una roca piroclástica compuesta principalmente por material juvenil vesicular (pómez y esquirlas de vidrio), originada a partir de un flujo piroclástico. Por su parte, Freundt *et al.* (2000) definen ignimbrita como el depósito de una corriente piroclástica de densidad rico en ceniza, pómez, escorias y otros materiales juveniles, soldado o no; cuya distribución areal es controlada por la topografía.

Murcia *et al.* (2013) define ignimbrita como una toba brechosa volcánica compuesta por pómez, cristales y fragmentos de roca en una matriz de fragmentos de vidrio.

Fiamme: fragmentos de pómez o vidrio volcánico aplastados, en forma de lentes, alineados paralelamente, que puede o no estar presente en ignimbritas soldadas (Bull & McPhie, 2007).

Depósitos volcaniclásticos: el término volcaniclástico fue introducido por Fisher (1961) y redefinido por Fisher & Smith (1991) e incluyen todos los materiales clásticos compuesto en parte o completamente por fragmentos volcánicos originados por procesos volcánicos primarios o re-sedimentados, incluyendo los producidos por meteorización de rocas volcánicas antiguas, sin importar la historia del depósito. Fisher & Schmincke (1984) indican que para que una roca sea volcaniclástica debe tener más del 25% del volumen de fragmentos volcánicos. Se dividen en volcaniclástico primario, si su fragmentación ocurre por un proceso volcánico tipo autobrechación, si su acumulación ocurre a partir de la caída de piroclastos, de una corriente de densidad o de una peperita, y si los fragmentos son principalmente piroclásticos o autoclásticos. Un depósito volcaniclástico es secundario cuando procede de la acción gravitacional o agentes como el viento, agua o hielo han participado activamente en su remoción y resedimentación a partir de un depósito volcánico previo (Murcia *et al.*, 2013).

Epiclasto: Cas & Wrigth (1987) indican que los epiclastos son fragmentos producidos por procesos superficiales normales. Por su parte, Murcia *et al.* (2013) dicen que los epiclastos son fragmentos de roca, de composición no volcánica, separados y transportados por procesos meteóricos físicos o químicos, como agua, viento, hielo o gravedad (2013).

Epivolcanoclasto: Propuesto por Vincet (2000) para enfatizar en el contenido de fragmentos volcánicos de los depósitos. Murcia *et al.* (2013) señalan que son fragmentos de composición volcánica, exclusivamente producidos por procesos de alteración meteórica física (erosión) o química, los cuales son transportados por agua, hielo, viento o gravedad.

Lahar: Los lahares según Pierson & Scott (1999), consisten en una mezcla de agua y sedimentos volcánicos que se mueve a grandes velocidades por cauces preexistentes. Se dividen, con base en la

relación agua sedimento, en: flujos de escombros (*debris flows*) y flujos hiperconcentrados (*hiperconcentrated flows*).

Flujos de escombros: Son clasificados con respecto a la concentración de agua y sedimento (>80 % en peso y >60 % en volumen de sólidos), reología y mecanismo de transporte de los sedimentos. Presentan resistencia al movimiento, con régimen de flujo predominantemente laminar y sistema de transporte de la fase sólida por suspensión, tendiendo a formar depósitos masivos o con gradación inversa (Borrero *et al.* 2008).

Flujos hiperconcentrados: Término introducido por Beverage & Culbertson (1963) para referirse a un flujo con un rango de concentración de sedimento entre el 40-80 % en peso y 20-60 % en volumen, los detritos son soportados por una combinación entre flotabilidad, interacción de granos y turbulencia. Los flujos hiperconcentrados representan una continuidad entre flujos de escombros y flujos de corriente, debido a un incremento en la concentración de clastos y una disminución de agua (Borrero *et al.* 2008; Miall, 1996).

2. Trabajos previos

En el área de estudio han trabajado varios autores dentro de los que destacan Dóndoli (1950), Dengo (1962), Bohlenberger (1968), PNUD (1975), Chiesa *et al.* (1987), Gillot *et al.* (1994), Aiazzi *et al.* (2004), Vogel *et al.* (2004), Vogel *et al.* (2006), Semm (2005), David (2005), Marquardt (2005), Mansor (2005), Ziegler (2005), Szymanski (2007), Alvarado & Gans (2012) y Denyer *et al.* (2014). A continuación, se presenta una tabla con el resumen estratigráfico de la Formación Bagaces:

Tabla 1. Resumen estratigráfico de la Formación Bagaces

Dóndoli (1950)	Dengo (1962)	PNUD (1975)	Chiesa <i>et al.</i> (1987 y 1992)	Aiazzi <i>et al.</i> (2004)	Alvarado & Gans (2012)	Denyer <i>et al.</i> (2014)
Toba Gris	Formación Bagaces	Bagaces Miembro superior	Pos-Carbonal (Bagaces)	Flujos Púmiticos No Soldados (Fm. Bagaces)	Bagaces Superior	Bagaces Superior
		Bagaces Miembro intermedio			Bagaces Intermedio o fluvial	Bagaces Medio
		Bagaces Miembro inferior	Flujos Soldados y Carbonal	Flujos Soldados (Fm. Bagaces)	Bagaces Inferior o Barbudal	Bagaces Inferior
			Pre-Carbonal		Bagaces Basal o Carbonal	
						Dacita Carbonal

En este trabajo se propone una clasificación estratigráfica diferente para la Fm. Bagaces, debido a que se estudió el área a un detalle mayor y se encontraron diferencias que no permiten continuar con las clasificaciones generales propuestas con anterioridad.

Capítulo II. Marco geotectónico y geológico regional

Este trabajo se ubica específicamente en las hojas cartográficas Tempisque y Monteverde (IGN, 1:50 000), al suroeste de la cordillera volcánica de Guanacaste (CVG). Geotectónicamente, se encuentra a unos 150 km de la fosa Mesoamericana y 50 km sobre la zona de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, así como al pie de la CVG.

El proceso de subducción en el noreste del país posee un dominio morfológico de batimetría suave, que posiblemente promueve una zona de contacto más continua entre placas y es capaz de generar sismos mayores ($M_w > 7,6$) (Protti *et al.*, 1994). Históricamente, la zona de subducción en la región noroeste del país ha generado importantes sismos como los de 1900, 1916, 1939, 1950, 1978, 1990 y 2012; en esta región se han identificado dos zonas sísmicas controladas por la subducción, Papagayo y Nicoya, las cuales coinciden con áreas de ruptura de sismos importantes (Morales, 1985).

Las rocas que conforman el basamento regional del país están mayormente expuestas en la península de Nicoya y son de afinidad oceánica; se originaron durante el Cretácico y desde entonces los procesos geológicos activos han generado nuevas rocas ígneas y sedimentarias que se han visto sometidas a los diferentes procesos tectónicos imperantes durante o posterior a su formación. Denyer *et al.* (2014) consideran la ocurrencia de tres fases paleotectónicas en la península de Nicoya.

Además, en el estudio realizado por Denyer *et al.* (2014), se definen dos dominios neotectónicos en la península de Nicoya. El primero se ubica en la zona central-NO de la península, es de tipo traslacional hacia el norte y se caracteriza por poseer fallas de movimiento dextral con rumbo N-S y en menor medida fallas sinestrales de rumbo ENE, oblicuas inversas-sinestrales y las inversas E-O a NO. El segundo dominio se encuentra en el sector sur de la península e incluye fallas de movimiento dextral y sinistral, sin que se haya logrado determinar un movimiento traslacional predominante.

Falla Bagaces:

En 1988 en un informe interno ICE-ENEL, esta falla es ubicada con una dirección NNE-SSO y una longitud de 40 km. Posteriormente, Montero & Alvarado (1988) asocian esta falla con los terremotos de Bagaces ocurridos en 1935 y 1941. Denyer *et al.* (2014) indican que es una continuación del Sistema de Falla Carmona. Además, sugieren que debido a los rasgos geomórficos (ríos, cerros y curvas de nivel con desvíos hacia la derecha) posee un movimiento dextral. En el mapa de Denyer & Alvarado (2007) dibujan la falla Bagaces cortando los depósitos de ignimbrita del Plio-Pleistoceno, lo cual la colocaría como una falla Neotectónica.

Climent *et al.* (2016), indican que la falla Bagaces posee una dirección N-S hasta NNO-SSE y se extiende por 40 km, pero se encuentra fragmentada en dos segmentos, limitados por la falla Quebrada Pital, que desplaza sinistralmente a la falla Bagaces. El segmento norte se extiende por 25 km desde la finca San Rafael hasta el cerro Rama de Nance. En este segmento, se muestra un valle de falla muy prominente, que se extiende a lo largo de 10 km y ha sido ocupado parcialmente por el río Salto y el río Potrero. Hacia el oeste de finca Cierra, la falla se abre en dos tramos, los

cuales buzan uno hacia el otro, lo que forma una pequeña cuenca. En el segmento sur se extiende por 15 km y finaliza en las cercanías de cerro El Roble, donde se observa un desplazamiento de 4 km de tipo dextral, entre la loma Agua Fría y la fila Cerro Gorda (Climent *et al.*, 2016).

En cuanto a las rocas presentes en el área de estudio, pertenecen a la Fm. Bagaces y consisten en rocas volcánicas y sedimentarias, descritas a continuación:

Formación Bagaces

La Fm. Bagaces aflora a lo largo de la vertiente pacífica de la Cordillera Volcánica de Guanacaste, desde el pie de la cordillera hasta la costa, en los cantones Cañas, Bagaces, Liberia, La Cruz y Carrillo.

La Formación Bagaces fue mencionada por primera vez por Dóndoli (1950), quien designó las rocas aflorantes con el nombre de *toba gris*. Dengo (1962b) la define como flujos piroclásticos, lavas y depósitos sedimentarios continentales intercalados. Posteriormente, Bohnenberger (1968) señala que fue originada por una sucesión de erupciones volcánicas y eventos sedimentarios y que los depósitos predominantes corresponden con ignimbritas oscuras desde ligeramente aglutinadas hasta bien soldadas, con alto porcentaje de vidrio volcánico, intercaladas con capas de cenizas, arenas y gravas de origen volcánico.

El Programa Naciones Unidas para el Desarrollo (1975) divide la Formación Bagaces en tres miembros:

1. Miembro Inferior, compuesto por rocas sedimentarias de tipo lacustre y fluviolacustre;
2. Miembro Intermedio, compuesto por lavas, ignimbritas y tobas aglutinadas y
3. Miembro Superior, constituido por tobas aglutinadas, tobas soldadas y material heterogéneo

Denyer *et al.* (2014) describen a la Fm. Bagaces en términos generales, como depósitos volcánicos del Mioceno y Plioceno, así como sedimentos fluviales y lacustres intercalados en ignimbritas. Además, separan a la Fm. Bagaces en tres miembros:

1. Bagaces Inferior, representado por ignimbritas bien soldadas, color gris blanuzco con *fiammes* blanuzcos y negros, tobas grises y blancas con intercalaciones de coladas basalto-andesíticas hasta dacíticas, masivas y lajeadas. Las dataciones radiométricas indican que la edad del miembro Bagaces Inferior varía entre 4,87 y 3,64 Ma (Denyer *et al.*, 2014).
2. Bagaces Medio, compuesto por tobas color gris y blancas intercaladas con conglomerados y capas de pómez de caída. Además, posee un espesor superior a los 30 m de depósitos fluviales y lacustres del paleo-Tempisque y otros ríos asociados (Denyer *et al.*, 2014). Según G. E. Alvarado (com. pers., 2013: en Denyer *et al.*, 2014) el rango de edad de este miembro es de entre 3 y 4 Ma.
3. Bagaces Superior, conformado por ignimbritas de *fiammes* grandes y pómez de color blanco amarillento. Las litologías poseen diferentes grados de soldamiento y alteración. En general, son piroclastos tipo vitropumítico. La edad asignada a este miembro varía entre 3,21 y 2,0 Ma (Denyer *et al.*, 2014).

La Fm. Bagaces sobreyace de forma discordante a la Fm. Descartes y es sobreyacida por la Fm. Liberia. La disposición estratigráfica de los miembros es muy irregular y la distinción en el campo de los miembros Inferior y Superior es difícil, excepto cuando se observa el miembro Medio (Denyer *et al.*, 2014).

También, dentro de la Fm. Bagaces se agrupan unidades informales como las ignimbritas Pan de Azúcar y Río Colorado. La unidad Pan de Azúcar fue definida por Szymanski (2007), quien la describe como una ignimbrita densa, bien soldada de color gris oscuro a café, con espesores de hasta 6 m, *fiammes* vidriosos color negro y de composición media. La ubica en los alrededores de Agua Caliente y en las proximidades del Canal del Oeste.

Por su parte, Kempter (1997) le asigna el nombre Río Colorado a una serie de ignimbritas con tres unidades de enfriamiento moderadamente soldadas. La parte superior de cada unidad de enfriamiento se encuentra poco soldada y con colores que varían entre el beige y el rosado; poseen fenocristales de plagioclasa, pómez y líticos. Posteriormente, David (2005) realiza una caracterización petrográfica de las unidades superiores de la Fm. Bagaces, de acuerdo al trabajo realizado por Marquardt (2005), Mansor (2005) y Ziegler (2005). Dentro de las cuales se encuentra la Unidad Río Colorado, la cual describe como una ignimbrita de matriz gris-rojiza a rojizo pálido, con *fiammes* oscuros y rojizos en los sectores más soldados y líticos de arcilla roja e ígneos con gradación normal. Estas unidades se encuentran en las cercanías del Parque Nacional Santa Rosa.

Otra unidad informal de la Fm. Bagaces es la unidad informal Cañas, definida por Chiesa *et al.* (1992) como flujo pumítico Montano; lo describe como flujos de pómez sin cristales, separados por paleosuelos, depósitos volcánicos de caída y volcánicos retrabajados. Posteriormente, Vogel *et al.* (2004) realizan una datación radiométrica Ar^{40}/Ar^{39} para un flujo con las mismas características al que denominan Cañas.

Capítulo III. Geología Local

Estratigrafía

Las rocas aflorantes en el área de estudio consisten en lavas hipoabisales, ignimbritas y depósitos fluviales vulcanoclásticos, intercalados, asociados a la Formación Bagaces. A continuación, se describen cada una de las unidades geológicas informales vistas y la respectiva columna estratigráfica del área de estudio (Figura 4).

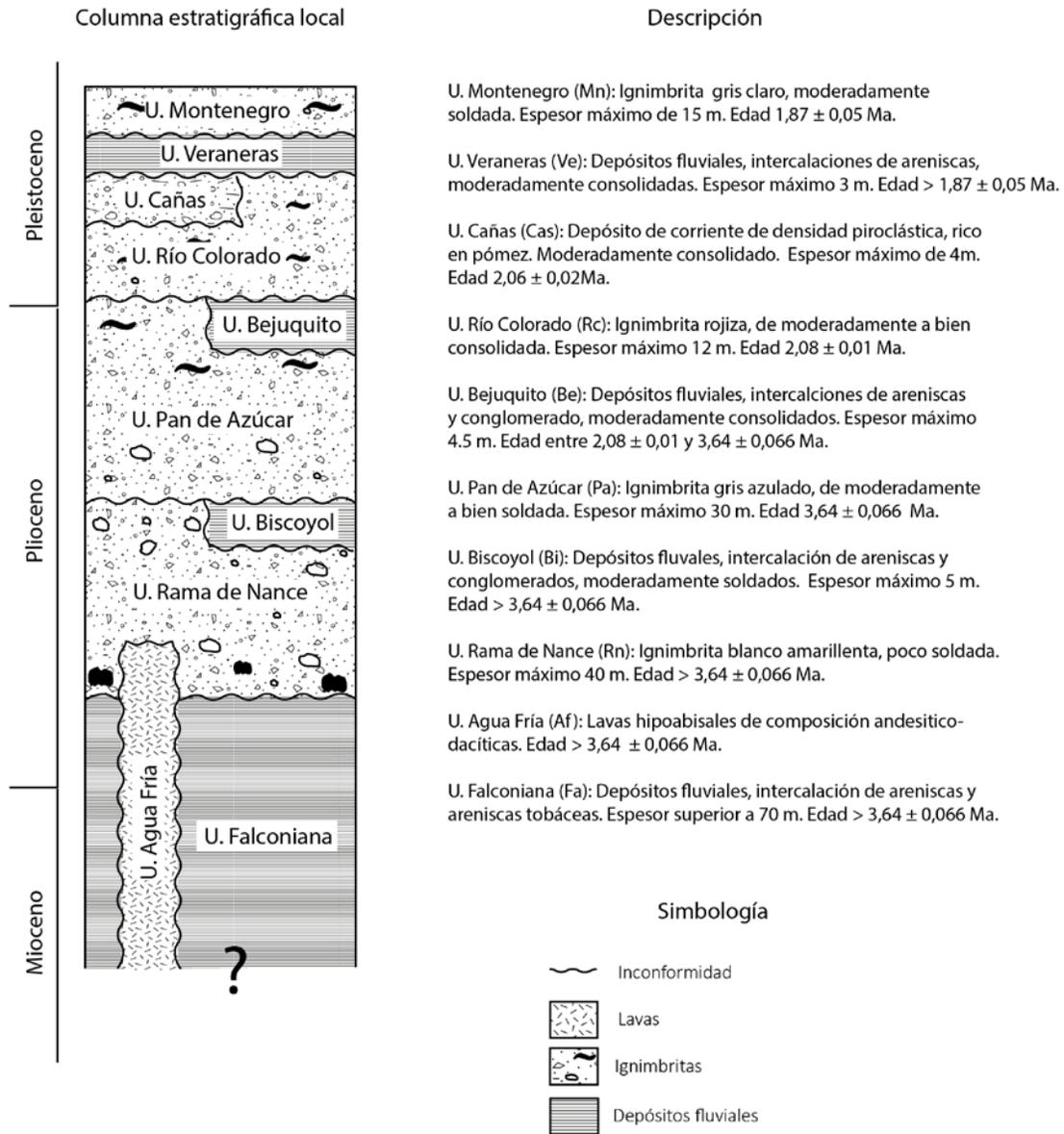


Figura 4. Columna estratigráfica local.

Unidades ígneas

Unidad Rama de Nance (Rn)

El mejor afloramiento para observar esta unidad se encuentra en el Cerro Rama de Nance. (Ver Figura 3. Mapa de localidades tipo)

Corresponde con una ignimbrita poco soldada, mal seleccionada, de matriz fina de color gris blanzuzco a gris violáceo, con manchas amarillentas producto de la meteorización de algunos de sus componentes. Dentro de la matriz se encuentran cristales de piroxenos (1 %) y plagioclasas (1 – 10 %), así como pómez y ceniza. Flotando en la misma se encuentran líticos dacíticos angulares de color gris oscuro a negro o café rojizos cuando se encuentran meteorizados, desde milimétricos hasta un máximo 20 x 12 cm (5 – 25 %), pómez de máximo 30 x 16 cm (10 - 40 %), escorias color negro, de máximo 60 x 25 cm (3 - 5 %), obsidianas angulares negras de máximo 5 x 3 cm (0 - 15 %) (Figuras 5 y 6). Los porcentajes de sus componentes varían en función de la ubicación geográfica y del espesor del depósito.

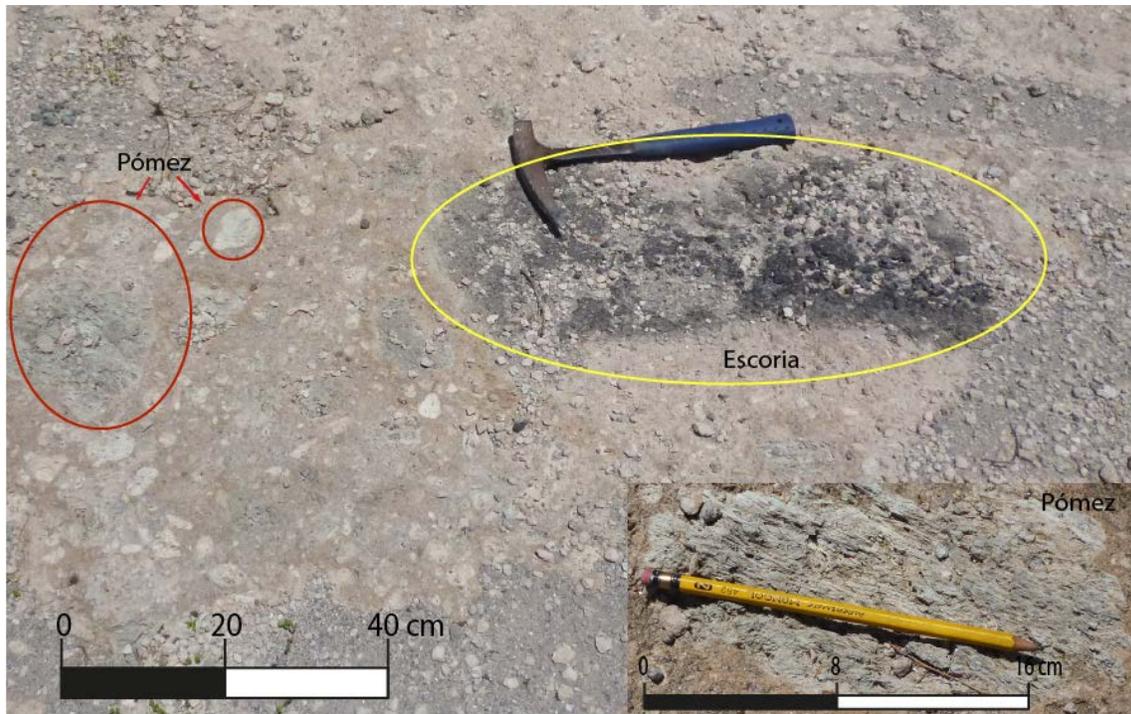


Figura 5. Sección enriquecida en pómez de la Unidad Rama de Nance, en la cual se observan pómez y escorias de gran tamaño, ubicada en las coordenadas 359181E/1157433N. En el detalle de la fotografía se puede apreciar una pómez blanca.

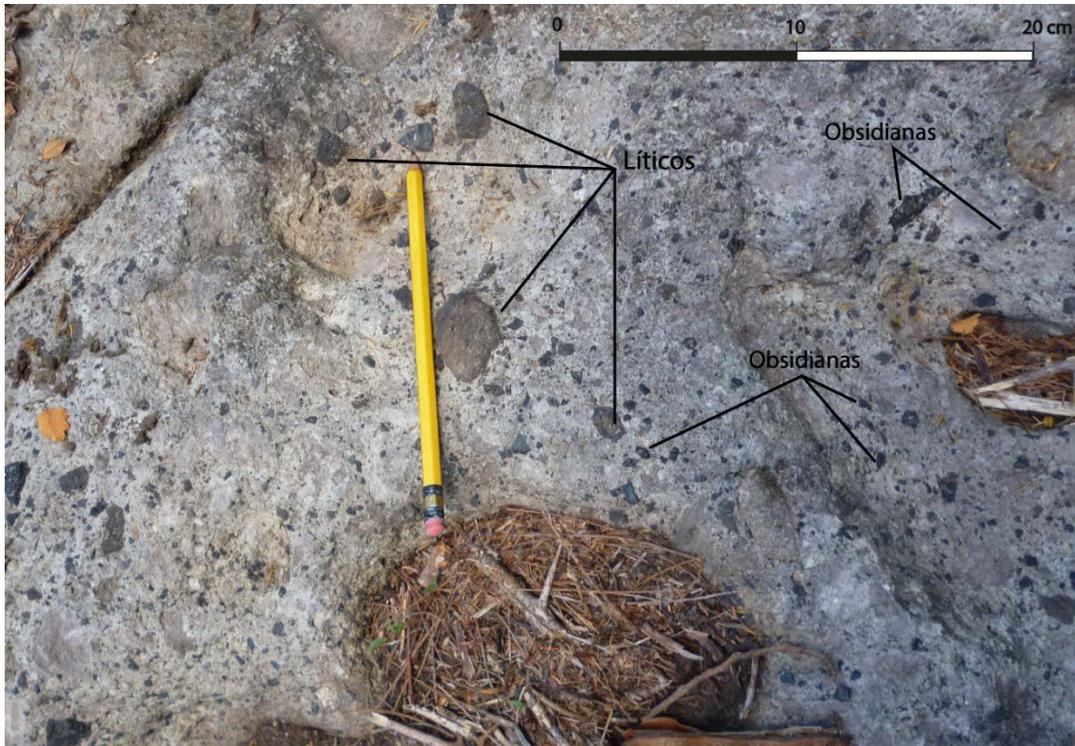


Figura 6. Sección enriquecida en líticos y obsidianas de la Unidad Rama de Nance, ubicada al noroeste del puente de Llanos del Cortés, coordenadas 358865E/1161627N.

Microscópicamente, posee una textura vitroclástica con una matriz eutaxítica poco soldada, compuesta principalmente por fragmentos de vidrio; las muestras contienen pocos fenocristales, casi únicamente de plagioclasa (5 %); también se observan líticos subangulares, sobre todo de composición dacítica (1 - 30%) con un tamaño máximo de 20 x 7 mm y pómez (35 – 45 %) con formas subredondeadas hasta redondeadas con un tamaño máximo de 12 x 8 mm (Figura 7 y tabla 2). Existe alteración de óxidos de hierro y arcillas en la matriz, además de pómez; algunos de los líticos se encuentran completamente sanos, sin embargo, otros, además de verse afectados por óxidos de hierro y arcillas, se encuentran silificados, con textura moteada o con minerales de alteración como sericita y epidota.

Petrográficamente, las tres muestras analizadas se clasifican como ignimbrita poco soldada de composición dacítica.

Tabla 2. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Rama de Nance

Muestra Código	% Plg	% Cpx	% Op	% Líticos	% Pómez	Nombre
M06	5	0	1	20	35	Ignimbrita poco soldada de composición dacítica
M10	5	0	1	15	45	Ignimbrita poco soldada de composición dacítica
M26	5	2	1	30	40	Ignimbrita poco soldada de composición dacítica

Léase: Plg: plagioclasa, Cpx: clinopiroxeno, Op: opacos.

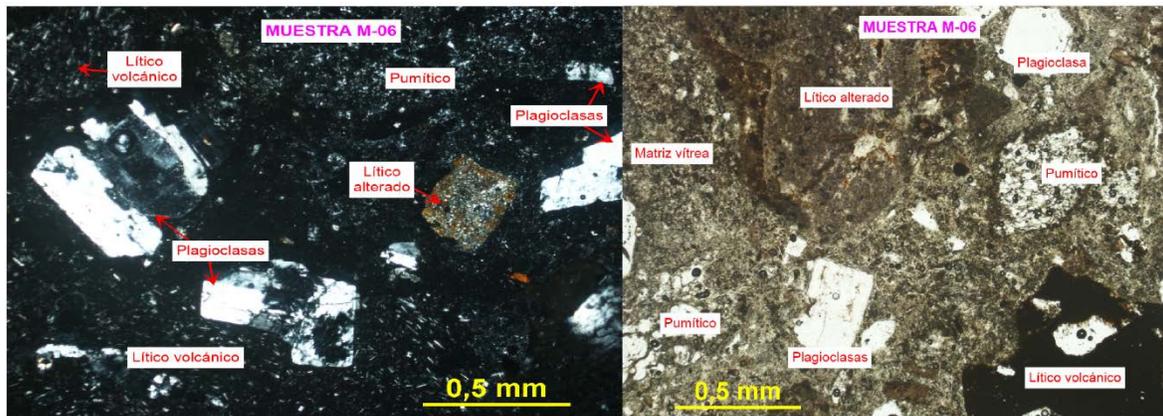


Figura 7. Fotografía microscópica de la Unidad Rama de Nance. La fotografía de la derecha se muestra a nicols paralelos y la de la izquierda a nicols cruzados; en cada fotografía se señala e identifica cada componente (Muestra tomada en las coordenadas 358865E/1161627N).

Existe una gran cantidad de afloramientos de esta unidad en el área de estudio; principalmente de la toba pumítico-lítica. El espesor máximo medido es de 23 m en la perforación ERP-PER-9a (360178E/1156291N). La unidad Rama de Nance sobreyace de manera concordante o interdigitada a la Unidad Fluvial Falconiana y es sobreyacida por la Unidad Fluvial Biscoyol. De acuerdo con la estratigrafía, se le asigna una edad superior a los $3,64 \pm 0,066$ Ma (edad de la Unidad Pan de Azúcar, según Szymanski en Alvarado & Gans (2012), por el método Ar^{40}/Ar^{39}).

Unidad Agua Fría (Af)

Esta unidad aflora al suroeste y noroeste del área de estudio (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de localidades tipo)

Está constituida por cuerpos hipoabisales de composición andesítica-dacítica. Macroscópicamente son rocas afíricas, vidriosas, color gris oscuro y negro, densas y con abundantes zeolitas, óxidos de hierro y manganeso en las vesículas y fracturas (Figuras 8 y 9). En un mismo afloramiento es posible observar que las lavas se encuentren masivas, vesiculares, con fracturas de tipo columnar y en lajas; además, localmente se encuentran plegadas, por morfología del flujo, y con estructuras de flujo.



Figura 8. Andesitas lajeadas de la Unidad Agua Fría, ubicadas en las coordenadas 360000E/1155400N.



Figura 9. Andesitas vesiculares de la Unidad Agua Fría, ubicadas en las coordenadas 360621E/1154260N.

Hacia el norte del área de estudio, se encuentran cuerpos lávicos con características similares a los mencionados anteriormente, con la diferencia de que poseen una textura afanítica-porfirítica, en la cual se distinguen cristales de plagioclasa y piroxenos en una matriz afírica color gris oscuro.

A continuación, se presenta la descripción petrográfica para cada uno de los tipos de lava:

- Afíricas (M21)

Microscópicamente, la textura es hipocristalina porfirítica, con una matriz o mesostaza pilotaxítica, compuesta por microlitos de plagioclasa, piroxenos y opacos finos, con muy poco vidrio en los intersticios. Los fenocristales presentes son de plagioclasa idiomórficos e hipidiomórficos (4%), clinopiroxenos hipidiomórficos (3 %) y opacos idiomórficos (magnetita) (< 1 %) (Figura 10). Los minerales de alteración presentes son arcillas y óxidos de hierro. De acuerdo con las características anteriores, la roca se clasifica como lava hipocristalina porfirítica de composición andesítica-dacítica.

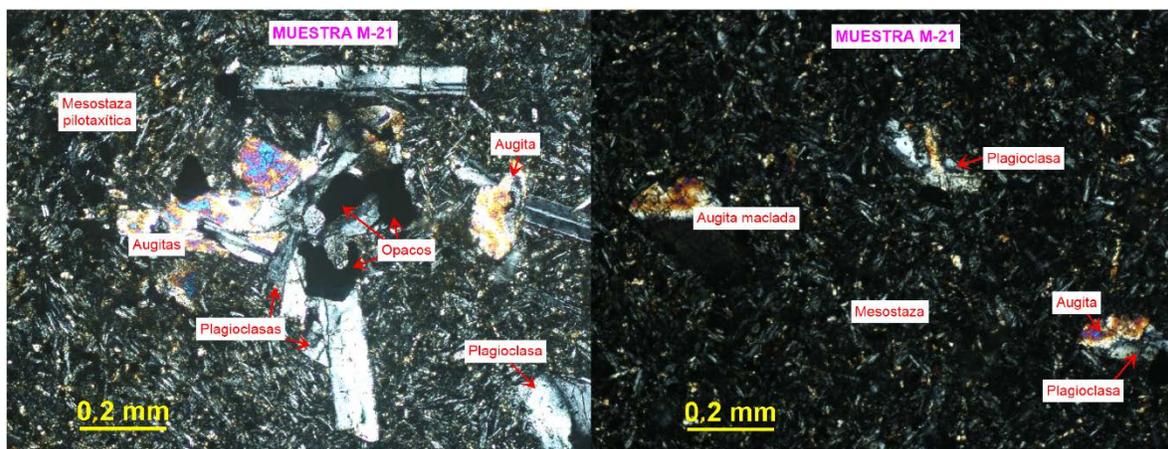


Figura 10. Fotografía microscópica de los hipoabiales afíricos de la Unidad Agua Fría. La fotografía de la derecha se muestra a nicols paralelos y la de la izquierda a nicols cruzados; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes (Muestra tomada en las coordenadas: 358048E/1160868N).

- Afanítica-porfirítica (M01)

Microscópicamente, posee una textura hipocristalina porfirítica con matriz o mesostaza hialopílica con microlitos de plagioclasa, piroxenos y opacos finos. Los fenocristales presentes son plagioclasas idiomórficas e hipidiomórficas (20%) con zonación oscilatoria y maclas, algunas inclusiones vítreas en corona e inclusiones de clinopiroxenos, clinopiroxenos xenomórficos e hipidiomórficos maclados (5 %), ortopiroxenos idiomórficos (3%) y opacos (magnetita y pirita) idiomórficos y xenomórficos (2%); los fenoristales adquieren una textura glomeroporfirítica (Figura 11). La roca se clasifica como una andesita hipocristalina-porfirítica.

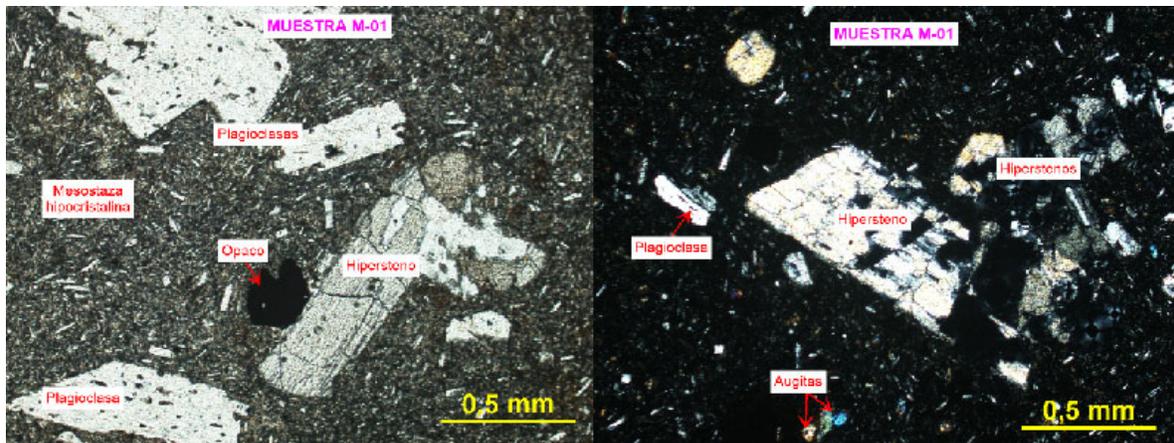


Figura 11. Fotografía microscópica de las lavas afáníticas-porfíricas de la Unidad Agua Fría. La fotografía de la derecha se muestra a nicoles cruzados y la de la izquierda a nicoles paralelos; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes (muestra tomada en las coordenadas 360000E/1155400N).

Es posible observar estas lavas entre los depósitos de la Unidad Fluvial Falconiana y en el contacto con la unidad Rama de Nance. El espesor de dicha unidad es muy variable, desde unos pocos centímetros hasta 40 m en la perforación ERP-PER-10a (359941E/1156016N). Por las características observadas en los afloramientos, tales como las intercalaciones con los sedimentos fluviales, con mezclas entre los sedimentos y las lavas, peperitas, así como contactos metamorizados, se deduce corresponden con cuerpos intrusivos hipoabisales, posiblemente tipo sills. Además, en algunos núcleos de las perforaciones realizadas en la zona, se observan variaciones de espesor y varias repeticiones entre las andesitas y los sedimentos, así como una peperita en el contacto superior entre la andesita y el sedimento (Figura 12). Dado que se observan por debajo de la unidad Pan de Azúcar, se estima una edad superior a los $3,64 \pm 0,066$ Ma.

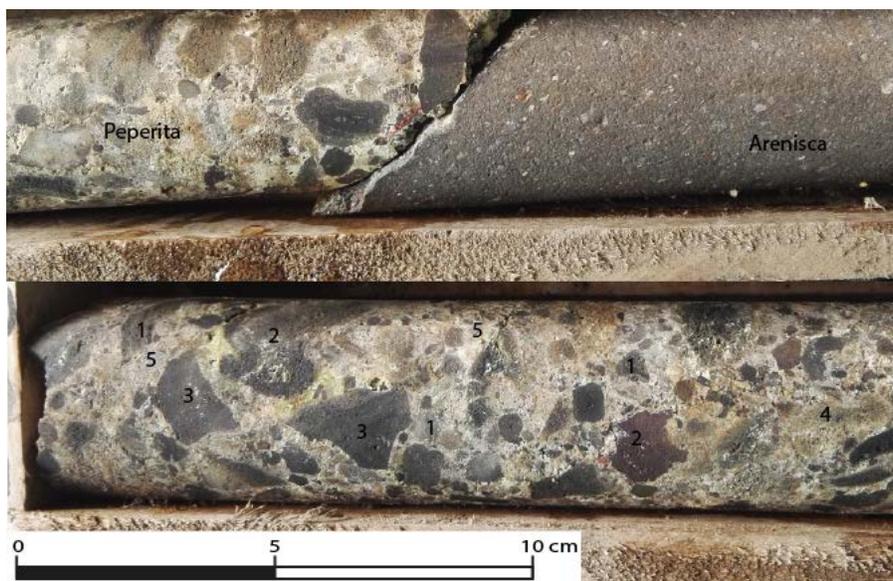


Figura 12. Fragmento de la perforación 10a (359941E/1156016N), donde se observa el contacto entre la peperita y la arenisca. En la peperita los números señalan: 1. Clasto ignimbrítico, 2. Fragmento lávico vesicular rojizo, 3. Fragmento lávico masivo gris, 4. Clastos pumíticos, 5. Clasto de arenisca.

Unidad Pan de Azúcar (Pa)

La unidad informal Pan de Azúcar fue definida por Szymanski (2007), indica que aflora, fuera del área de estudio, en los alrededores de Agua Caliente y en las proximidades del canal del Oeste. La describe como una ignimbrita densa, bien soldada, de color gris oscuro a café, con espesores de hasta 6 m, con *fiammes* vidriosos color negro y de composición media.

Esta unidad se encuentra distribuida en toda el área de estudio, excepto en el sector noreste, donde solo se encuentra en un par de pequeños afloramientos. La mejor localidad para observar ambas facies de esta unidad se encuentra en el cuadrante sureste (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo)

En general, las rocas pertenecientes a esta unidad son ignimbritas color gris hasta gris violáceo, con variaciones en la cantidad de líticos, *fiammes* y en el grado de soldamiento. Del piso al techo está unidad pasa de ser poco soldada a muy soldada, aumentando la cantidad y el tamaño de los *fiammes* y disminuyendo la cantidad y el tamaño de los líticos. La sección superior posee una matriz vidriosa con plagioclasas (15 – 30 %), *fiammes* negros que varían en tamaño desde 1 a 48 cm máximo (15 – 50 %); los líticos son angulares de composición andesítica de máximo 5 cm de diámetro y 1,5 cm de tamaño promedio (5 – 10 %) (Figura 13). Por su parte, la sección inferior es poco soldada, con una matriz color gris, con escorias negras fibrosas de hasta 35 cm de diámetro (10 %), posee *fiammes* gris oscuro pequeños de máximo 5 cm de largo (0 – 10 %), los líticos andesítico- dacíticos aumentan en tamaño y cantidad en este sector, con un tamaño máximo de 15 cm (5 – 20 %) (Figura 14). El contacto entre la sección inferior trata de una transición de la ignimbrita poco soldada a la ignimbrita bien soldada.



Figura 13. Ignimbrita bien soldada de la Unidad Pan de Azúcar. Donde se pueden apreciar *fiammes* de hasta 16 cm, ubicada en las coordenadas 363037E/1158383N.



Figura 14. Ignimbrita poco soldada de la Unidad Pan de Azúcar. Donde se destacan escorias negras de hasta 25 cm en la matriz, afloramiento localizado en las coordenadas 362218E/1156895N.

La ignimbrita poco soldada, microscópicamente tiene una textura piroclástica, con una matriz compuesta principalmente por vidrio alterado y esquirlas de vidrio. Posee plagioclasas < 10 %, clinopiroxenos < 3 % y ortopiroxenos < 1 %, opacos (magnetita) 1 %, líticos dacíticos entre 10 % y 15 %, *fiammes* < 10 % y pómez entre 20 % y 25 %. Las pómez poseen formas subredondeadas y el tamaño máximo medido es de 10 x 6 mm; los líticos son de composición dacítica, con formas de subangular a angular y un tamaño máximo de 8,2 x 5,3 mm. La matriz se encuentra poco arcillitizada; algunos líticos dacíticos están silicificados, o poseen ceolitas en sus bordes y cristales de epidota. Es posible observar también líticos ignimbríticos bastante arcillitizados, aunque en una proporción menor al 1 %. Las muestras se clasifican como ignimbritas poco soldadas y de composición dacítica (Figura 15 y Tabla 3).

Por su parte, la ignimbrita soldada de esta unidad posee una textura vitroclástica con una matriz eutaxítica y en ocasiones perlítica, rica en esquirlas de vidrio (*shards*) alteradas y en la mayoría de los casos deformadas por el alto grado de soldamiento. Inmersos en esta matriz se encuentran cristales de plagioclasa, entre 3 y 20 %, clinopiroxenos < 5 %, ortopiroxenos < 3 %, opacos (magnetita) 1 %, líticos 15 %, pómez colapsados o *fiammes* entre 5 y 30 % en dependencia del grado de soldamiento, así como pómez sin colapsar (5 % o menos). Los líticos son principalmente de composición dacítica; sin embargo, también se encuentran líticos andesíticos, tobáceos e ignimbríticos. Las formas de los líticos varían de angulares en los dacíticos a redondeados en los piroclásticos, el tamaño máximo medido es de 12 x 4,9 mm. Las pómez poseen formas subredondeadas a subangulares y el tamaño máximo medido para estas es de 3,8 x 0,5 mm (Figura 16 y Tabla 3). En cuanto a las alteraciones, en la matriz hay óxidos de hierro y arcillas y, en algunos sectores, las esquirlas se encuentran totalmente desvitrificadas. Los cristales y los clastos pumíticos

se encuentran sanos, siendo afectados de manera parcial por arcillas. Los líticos a veces poseen alteración a arcillas, así como parches de óxidos de hierro y, algunas veces, se encuentran silicificados. Otros minerales de alteración, que aparecen muy escasamente en la matriz o en alguno de los líticos son ceolitas, epidota y raramente sericita. Estas rocas se clasifican como ignimbrita bien soldada y de composición dacítica.

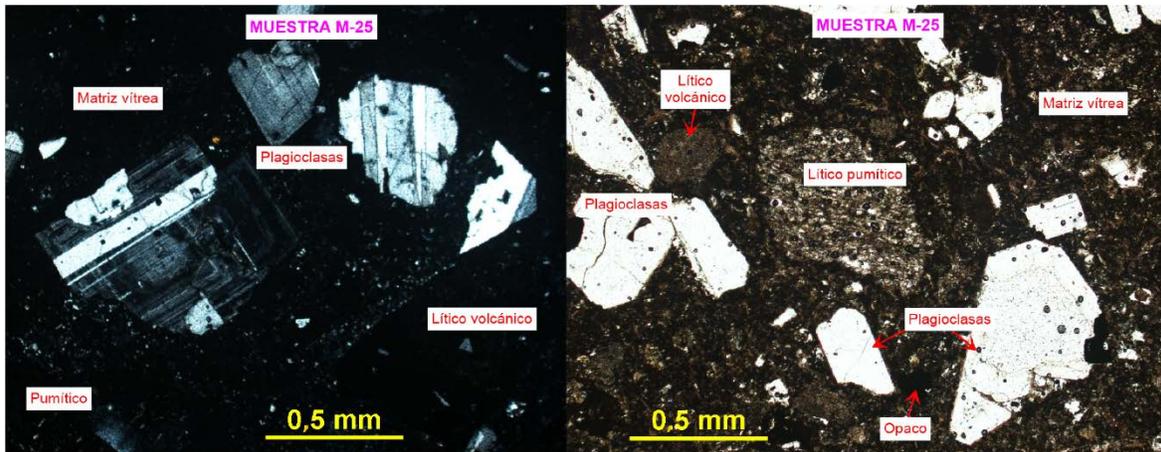


Figura 15. Sección delgada de la ignimbrita poco soldada de la Unidad Pan de Azúcar. La fotografía de la derecha se muestra a nicols paralelos y la de la izquierda a nicols cruzados; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes (Muestra tomada en las coordenadas: 362218E/1156895N).

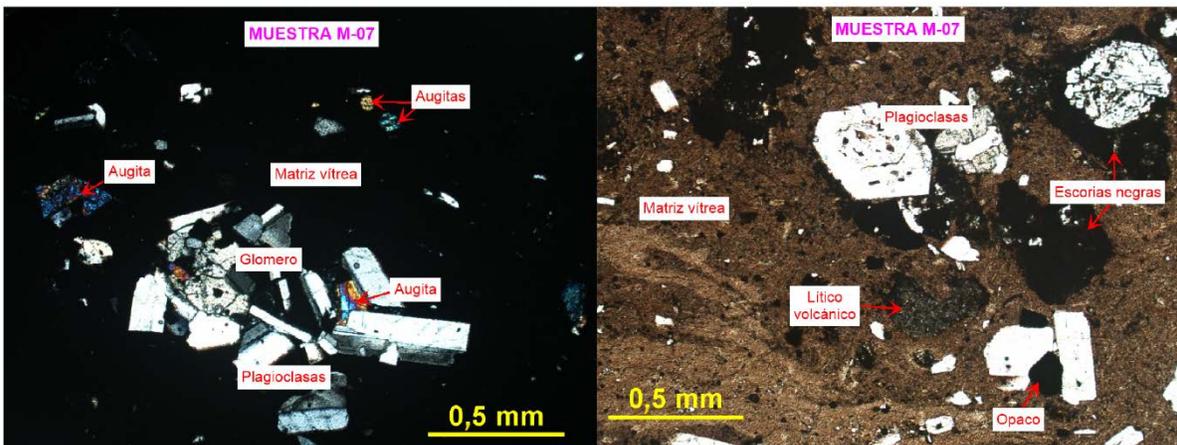


Figura 16. Sección delgada de la ignimbrita soldada Pan de Azúcar. La fotografía de la derecha se muestra a nicols paralelos y la de la izquierda a nicols cruzados; en cada fotografía se señalan e identifican los componentes, (muestra tomada en las coordenadas 363037E/1158383N).

Tabla 3. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Pan de Azúcar

Muestra	% Plg	% Cpx	% Opx	% Op	% Líticos	% Pómez	% Fiammes	Nombre
M03	5	1	1	1	10	25	10	Ignimbrita poco soldada de composición dacítica
M25	7	3	0	1	15	20	5	Ignimbrita medianamente soldada de composición dacítica
M07	20	5	3	1	15	0	30	Ignimbrita soldada de composición dacítica
M11	3	2	0	1	15	5	20	Ignimbrita soldada de composición dacítica
M12A	15	1	1	1	15	5	15	Ignimbrita soldada de composición dacítica
M23	15	5	1	1	15	5	5	Ignimbrita soldada de composición dacítica

Léa: Plg: plagioclasa, Cpx: clinopiroxeno, Opx: ortopiroxenos, Op: opacos.

El espesor máximo medido para esta unidad es de 30 m. En las ignimbritas el límite entre la sección inferior y superior es gradual, de modo que el grado de soldamiento aumenta hacia la sección superior.

Esta unidad sobreyace concordantemente a la Unidad Rama de Nance y a la Unidad fluvial Biscoyol, y es sobreyacida por las unidades Bejuquito 1 y Río Colorado. Además, esta unidad también se encuentra en contacto por falla con la Unidad Agua Fría. La edad de esta unidad según Alvarado & Gans (2012) es de $3,64 \pm 0,066$ Ma (Ar^{40}/Ar^{39}).

De acuerdo a las descripciones anteriores, se interpreta que las ignimbritas Pan de Azúcar se originaron como flujos piroclásticos de media a alta temperatura.

Unidad Río Colorado (RC)

Se puede observar afloramientos de la unidad Río Colorado en prácticamente toda el área de estudio; sin embargo, las mayores extensiones se localizan en el sector noreste (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo)

Macroscópicamente, corresponde con una ignimbrita de color gris y rojo, la tonalidad cambia entre estos dos colores en distancias muy cortas (2 m), de medianamente soldada a bien soldada. Contiene *fiammes* negros pequeños y delgados de 3 x 0,5 cm de tamaño máximo (1 – 5 %) y *fiammes*

rojos (pómez rojos aplastados) de 2 x 0,7 cm de tamaño máximo (0 – 7 %), los líticos son angulares de color gris o rojo con plagioclasas de máximo 1,5 cm (1 %). También, contiene pómez de anaranjado-amarillento hasta rojas de máximo 2 cm de diámetros (1 – 10 %), cristales de plagioclasas alineados de máximo 3 mm (5 – 10 %) y piroxenos de hasta 2 mm (1 – 2 %). Todos los anteriores inmersos en una matriz tobácea de color gris o rojos con costras de vidrio de hasta 1 cm en el techo de la unidad; además, presenta disyunción columnar incipiente y otras fracturas de enfriamiento en la parte superior de la ignimbrita (Figuras 17 y 18).



Figura 17. Ignimbrita Unidad Río Colorado. Se puede apreciar la matriz roja y pequeños fiammes negros, foto tomada en las coordenadas 360447E/1159444N.



Figura 18. Disyunción columnar superficial en la ignimbrita de la Unidad Río Colorado, foto tomada en las coordenadas 360447E/1159444N.

Microscópicamente, se caracteriza por poseer una textura vitroclástica con una matriz eutaxítica con abundantes esquirlas de vidrio, *fiammes* y opacos. Además, contiene fenocristales de plagioclasa $\leq 5\%$, clinopiroxenos $< 1\%$, ortopiroxenos 1% , opacos (magnetita) 1% , líticos 3% , pómez colapsadas o *fiammes* $< 5\%$ y pómez sin colapsar entre 5 y 15% . Los líticos subredondeados son de composición dacítica con un tamaño máximo de $3 \times 2,5$ mm, mientras que las pómez tienen una forma subredondeada y un tamaño máximo de $1,4 \times 0,5$ mm. En la matriz se encuentran arcillas y óxidos de hierro que le proporcionan un color café rojizo, algunos de los líticos se encuentran silicificados (Tabla 4 y Figura 19). Las muestras se clasificaron como ignimbritas soldadas de composición dacítica.

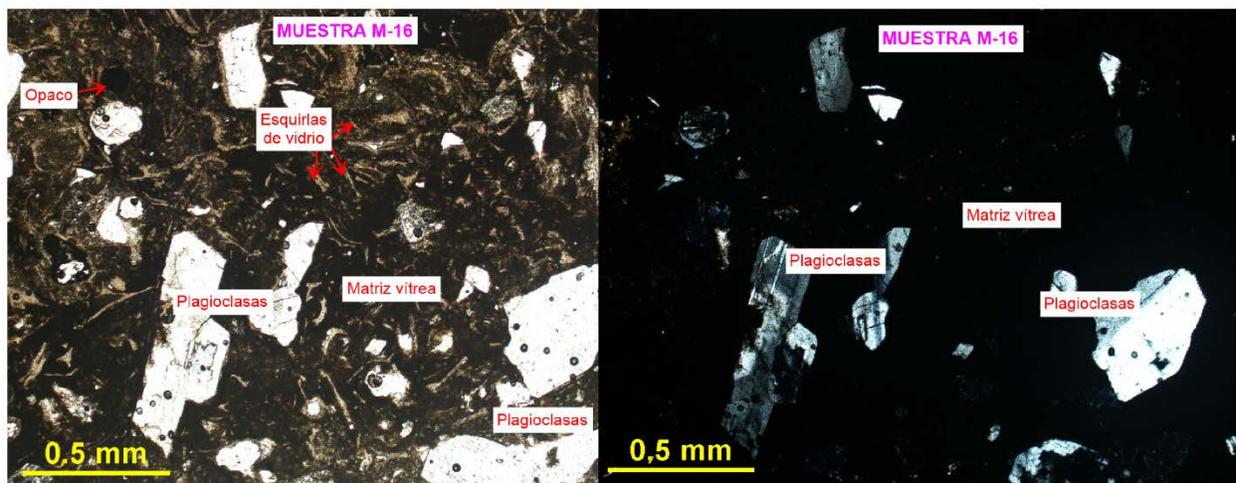


Figura 19. Fotografía microscópica de la ignimbrita Río Colorado, la imagen de la derecha se encuentra a nicols cruzados y a la izquierda se observa a nicols paralelos (Muestra tomada en las coordenadas foto tomada en las coordenadas 360447E/1159444N).

Tabla 4. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Río Colorado

Muestra	% Plg	% Cpx	% Opx	% Op	% Líticos	% Pómez	% Fiammes	Nombre
M04	5	1	0	1	3	5	2	Ignimbrita soldada de composición dacítica
M16	7	0	2	1	3	15	5	Ignimbrita soldada de composición dacítica

Léase: Plg: plagioclasa, Cpx: clinopiroxeno, Opx: ortopiroxenos, Op: opacos.

El espesor máximo aproximado es de 12 m y se encuentra en un afloramiento un kilómetro al este del Sitio Granadillos. En cuanto a su relación con otras unidades, se observa sobreyaciendo a la Unidad Pan de Azúcar y a la Unidad Fluvial Bejuquito; y es sobreyacida por la Unidad Cañas y la Unidad Fluvial Veraneras. Además, la edad de estimada es de $2,08 \pm 0,01$ Ma, según dataciones Ar^{40}/Ar^{39} realizadas por Alvarado & Gans (2012).

Unidad Cañas (Cas)

La unidad Cañas se encuentra únicamente en el sector noreste del área de estudio (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo).

Consiste en un depósito de una corriente de densidad piroclástica, rica en pómez color blanco amarillento, en ocasiones blanco rosáceo, monomítico, con porcentaje de líticos entre 10 % y 20 %, en una matriz tobácea (Figuras 20 y 21). Se puede subdividir en tres secciones:

1. Sección superior, depósito compuesto por pómez fibrosa, subredondeadas de máximo 5 cm de diámetro, mal seleccionadas, con una leve gradación inversa; el espesor máximo medido para esta sección es de 1,2 m.
2. Sección media, depósito constituido por pómez de 5 mm de diámetro en promedio, bien seleccionadas, subredondeadas y sin gradación. El espesor máximo medido para esta sección es de 2,5 m.
3. Sección inferior: compuesta por un depósito de pómez fibrosa, subredondeadas, mal seleccionadas, con gradación normal de máximo 1m de espesor.



Figura 20. Sección superior de la Unidad Cañas. Se observan laminaciones de pómez blancas en una matriz café claro, afloramiento ubicado en las coordenadas 362739E/1163188N.



Figura 21. Sección inferior y sección media de la Unidad Cañas, afloramiento ubicado en las coordenadas 361525E/1160920N.

Los espesores de las 3 secciones son muy variables, siendo el máximo de 4 m; la geometría de la unidad es acuñada y en algunos de los afloramientos no se observa la sección media. Por otro lado, los contactos entre las secciones son difusos e irregulares. Sobreyace a la unidad Río Colorado y es sobreyacida por la Unidad Fluvial Veraneras y por la Unidad Montenegro. La edad asignada por Vogel *et al.* (2004) es de $2,06 \pm 0,02$ Ma (Ar^{40}/Ar^{39}).

De acuerdo a las observaciones, tales como laminaciones, gradación, forma de los clastos se infiere que estos depósitos fueron originados por corrientes de densidad piroclásticas diluidas, provenientes del colapso de una columna eruptiva de composición ácida.

Unidad Montenegro (Mn)

Los afloramientos de la unidad Montenegro con mejor exposición se encuentran en la finca Las Veraneras (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo).

Macroscópicamente, corresponden con una ignimbrita color gris, varía de moderadamente soldada a bien soldada. Presenta *fiammes* gris oscuro de hasta 20 cm de largo (5 - 15 %); líticos andesíticos angulares, color gris oscuro con plagioclasas, de hasta 6 cm, cuyo porcentaje varía de la base (25 %) al techo (5 - 10 %). Además, posee obsidianas angulares de color negro de máximo 3 cm (1 - 10 %) y pómez fibrosas de color rosado y bordes irregulares de hasta 2 cm de diámetro (1 - 5 %). Todos los componentes anteriores se encuentran flotando en una matriz tobácea con pequeños cristales de plagioclasa (2 mm) hasta 3 %. El porcentaje de matriz varía entre 45 y 88 %. Los afloramientos de esta unidad en su mayoría presentan disyunción columnar (columnas delgadas de hasta 20 cm de diámetro y 80 cm de largo, de contornos redondeados). Sin embargo, la característica más significativa es la aparición de obsidianas en todos los afloramientos (Figuras 22 y 23).



Figura 22. Afloramiento con disyunción columnar de la ignimbrita de la Unidad Montenegro, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357915E/1158334N.



Figura 23. Contacto entre paleosuelo rojizo y la ignimbrita de la Unidad Montenegro, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.

Microscópicamente, las muestras presentan una textura vitroclástica con una matriz eutaxítica con abundantes esquirlas de vidrio y vidrio alterado a arcillas. Inmersos en esta matriz se encuentran fenocristales de plagioclasa < 10 %, ortopiroxenos < 1%, opacos (magnetita) < 2 %, líticos entre 5 y 20 %, *fiammes* entre 10 y 20 % y pómez sin colapsar entre 5 y 10 %. Los pómez son de forma subredondeada y poseen un tamaño máximo de 5 x 3 mm; los líticos de composición dacítica tienen forma subangular y un tamaño máximo de 15 x 11 mm (Figura 24 y Tabla 5). La matriz se encuentra poco arcillitizada y con algunos óxidos de hierro, mientras que los líticos se encuentran silicificados y arcillitizados; las pómez están compuestas únicamente por material vítreo en algunos casos se observan ceolitas y cuarzo fino secundario relleno de las vesículas. Las muestras analizadas para esta unidad se clasifican como ignimbritas medianamente a bien soldadas de composición dacítica.

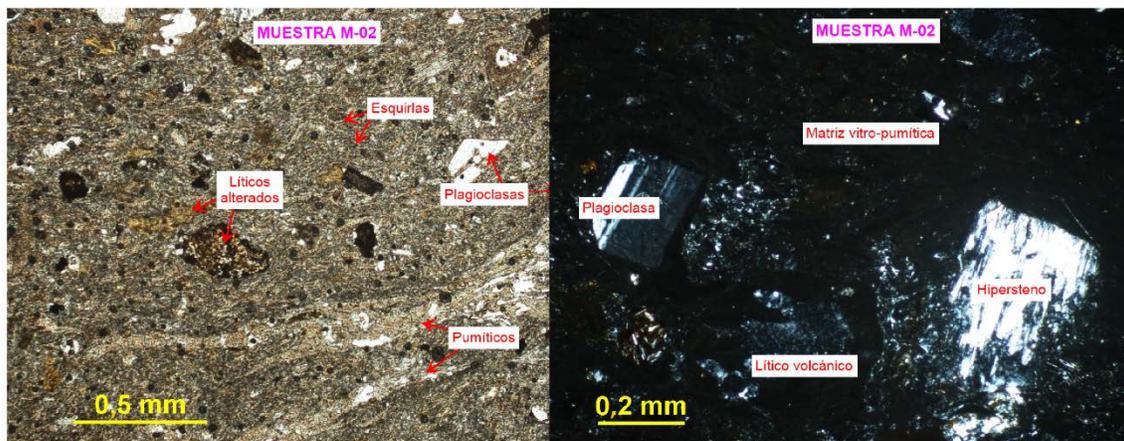


Figura 24. Fotografía microscópica de la ignimbrita Montenegro, a la izquierda a nicoles paralelos y a la derecha a nicoles cruzados. Los componentes se señalan en cada figura (Muestra tomada en las coordenadas: 361688E/1159971N).

Tabla 5. Resumen composicional de las muestras analizadas para la Unidad Montenegro

Muestra	% Plg	% Opx	% Op	% Líticos	% Fiammes	% Pómez	Nombre
M02	10	0	2	20	10	5	Ignimbrita soldada composición dacítica
M15	3	<1	1	5	20	10	Ignimbrita medianamente soldada de composición dacítica

Léase: Plg: plagioclasa, Opx: ortopiroxenos, Op: opacos.

El espesor de esta unidad varía desde 70 cm a 15 m y constituye la cima de la secuencia estratigráfica, sobreyaciendo la Unidad Fluvial Veraneras. Otra característica de esta ignimbrita es que al erosionarse genera columnas de bordes redondeados, que sobresalen del suelo como pequeñas torres. En cuanto a la edad, con base en la datación radiométrica Ar^{40}/Ar^{39} , realizada por Szymansky en Alvarado & Gans (2012), la unidad Montenegro posee una edad de $1,87 \pm 0,05$ Ma; la muestra datada (020702-4a) aparece dentro de las muestras de la unidad Río Colorado; sin embargo, tras una visita de campo se concluyó que las rocas aflorantes en el sitio de extracción de la muestra pertenecen a la unidad Montenegro.

Análisis y discusión de las unidades ígneas

En clasificaciones anteriores, como la de Denyer *et al.* (2014) se divide la Formación Bagaces en 3 miembros: 1. Bagaces inferior conformado por ignimbritas bien soldadas y coladas de lava basalto-andesíticas hasta dacíticas. 2. Bagaces medio, compuesto por tobas de color gris y blancas intercaladas con depósitos fluviales y lacustres. 3. Bagaces Superior, constituido por ignimbritas de *fiammes* grandes y pómez de color blanco amarillento. Además, no se diferencian las tobas, ignimbritas y depósitos fluviales en unidades, sino que se mencionan de manera general. Sin embargo, con el trabajo de campo realizado en este estudio, se determinó la presencia de 6 unidades ígneas, 4 de ellas ignimbritas, originadas por corrientes de densidad piroclásticas concentradas, 1 flujo de pómez inconsolidado proveniente de una corriente de densidad piroclásticas diluida, y por último 1 unidad de hipoabisales andesíticos. En medio de cada una de las unidades ígneas se encuentran unidades sedimentarias de origen fluvial y paleosuelos. El detalle de la distribución vertical de las unidades se observa en la columna estratigráfica general (Figura 4).

En un mismo afloramiento, por lo general, solo se observa parte de una unidad y en escasas ocasiones se observa la unidad completa. Además, en un mismo sitio se pueden observar variaciones en el grado de meteorización, coloración, grado de soldadura, compactación y en la cantidad de los componentes que constituyen las rocas.

Componentes

Este apartado sintetiza y describe las características petrográficas, como la textura y composición mineralógica, de las cuatro unidades ignimbríticas observadas en el área de estudio. Se utilizaron las siguientes referencias: Gifkins *et al.* (2005), MacKenzie & Guilford (1996) y MacKenzie *et al.* (1996), para la correcta descripción de las secciones delgadas y la identificación de sus componentes.

Las ignimbritas presentes en el área de estudio son de composición dacítica y están constituidas por cristales, fragmentos juveniles y líticos preexistentes. Estos componentes serán descritos a continuación:

Juveniles: Existe una gran variedad de estos fragmentos, escorias negras y grises, pómez blancas, grises, amarillentas y rosadas, obsidianas y *fiammes*.

Las escorias negras y grises se encuentran presentes en las unidades Rama de Nance, Pan de Azúcar y Montenegro. Presentan características variables en cuanto a textura, densidad y vesicularidad tanto macroscópicamente como microscópicamente. Algunas, poseen una apariencia fibrosa, por la forma alargada de las vesículas, otras en cambio poseen vesículas perfectamente redondas. Sin embargo, poseen una composición mineralógica similar, están constituidas por plagioclasas (3 – 5 %) y opacos (< 1 %), en una matriz de vidrio pardo vesicular.

Las pómez a pesar de las diferencias de color y textura, que varían desde pómez con vesículas redondas hasta pómez fibroso de vesículas irregulares y alargadas, poseen una composición

homogénea, constituidas por vidrio de diferentes tonalidades, fenocristales de plagioclasa (< 5 %), clinopiroxenos (< 1 %) y opacos (< 1 %) (Figura 25 y 26).

Las obsidianas están presentes en las unidades Rama de Nance y Montenegro, presentan formas irregulares con esquinas angulosas, son de color negro y poseen aglomeraciones de cristales de plagioclasa. Además, los *fiammes* de la unidad Montenegro están compuestos por obsidiana gris oscuro con plagioclasas (5 - 10 %).

Cristales: Los cristales dominantes son las plagioclasas y piroxenos, los cuales pueden encontrarse como fenocristales individuales o en texturas glomeroporfiríticas. A continuación, se describen las características para cada uno de los cristales:

- Plagioclasa, es el fenocristal más abundante, presente en todas las muestras. Es posible observarlo tanto en macroscopía como en microscopía, en porcentajes que varían desde 5 % a 20 %. Se caracteriza por su forma idio a hipidiomórfica. Presentan maclas polisintéticas, zonación oscilatoria y normal. En algunos cristales se observan inclusiones de vidrio con textura en corona y cristales de piroxenos, opacos y apatitos. Generalmente, los cristales se encuentran poco alterados, con algunas zonas con sericita, epidota y arcillas (Figura 27 y 28).
- Los clinopiroxenos, en general son poco abundantes (< 5 %) y poseen formas hipidiomórficas y xenomórficas; son de tipo augita. Algunos cristales presentan doble exfoliación y maclas.
- Los cristales de ortopiroxenos poseen forma idio a hipidiomórfica, generalmente son escasos (< 3 %), se encuentran sanos y en conjunto con las plagioclasas, clinopiroxenos y opacos, dan origen a la textura glomeroporfirítica (Figura 28 y 29).
- Opacos, minerales poco abundantes (1 %), aparecen como microlitos en la matriz y como fenocristales xenomórficos e idiomórficos, sanos o con escasa alteración a arcilla en sus bordes. Corresponden con cristales de magnetita (Figura 29).
- Entre los minerales de alteración, se pueden observar arcillas y óxidos de hierro, tanto en la matriz como en los cristales; además, es posible encontrar ceolitas rellenas de cavidades en la pómez y cuarzo fino con textura moteada alterando los líticos dacíticos. Además, ocasionalmente es posible ver sericita y epidota alterando las plagioclasas.

Líticos preexistentes: Los fragmentos líticos incluidos en los depósitos son de composición variable, predominan los de composición dacítica, en menor cantidad se encuentran líticos andesíticos e ignimbríticos. Los líticos dacíticos y andesíticos poseen una textura pilotaxítica hasta hipocristalinos, con microlitos de plagioclasa y opacos finos. Se observan fenocristales de plagioclasas, ortopiroxenos y opacos (Figura 30). Las formas de los líticos varían de subangulares a subredondeados y a veces presentan alteraciones a arcillas, así como parches de óxidos de hierro.

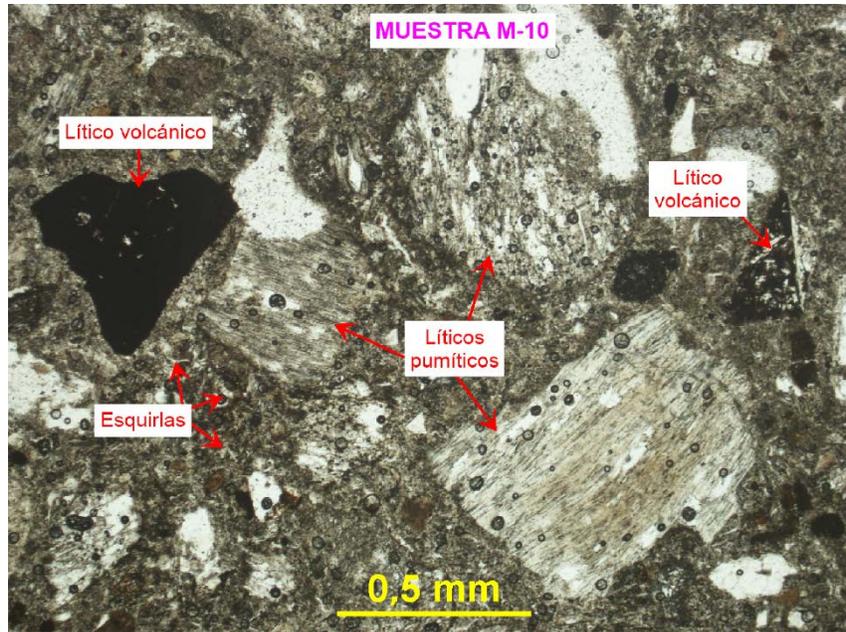


Figura 25. Fragmentos pumíticos y líticos, inmersos en una matriz vitroclástica con textura eutaxítica, observados a nícoles paralelos en una muestra de la Unidad Rama de Nance (muestra tomada en las coordenadas 362525E/1154508N).

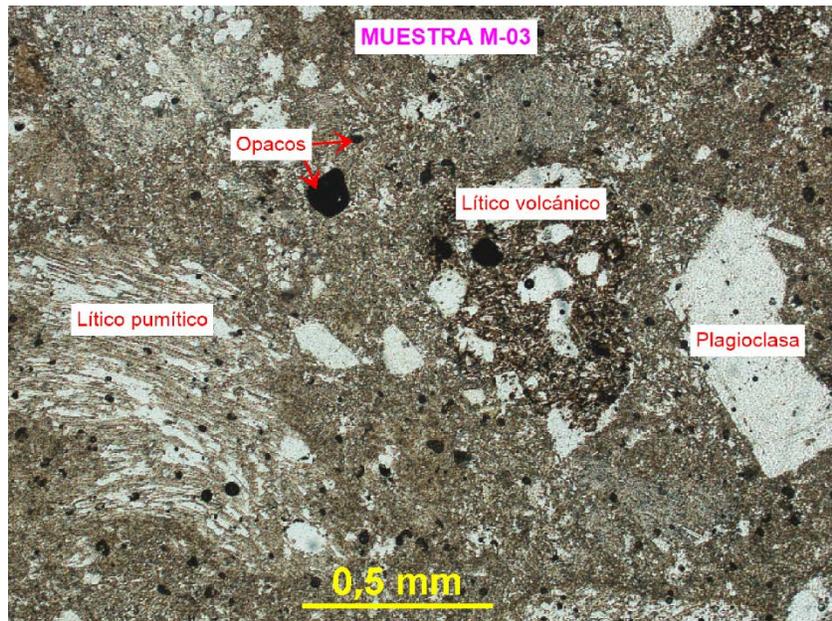


Figura 26. Fragmentos pumíticos, líticos, opacos y cristales de plagioclasa inmersos en una matriz vitroclástica con textura eutaxítica, observados a nícoles paralelos en una muestra de la Unidad Pan de Azúcar (muestra tomada en las coordenadas 357356E/1160055N).

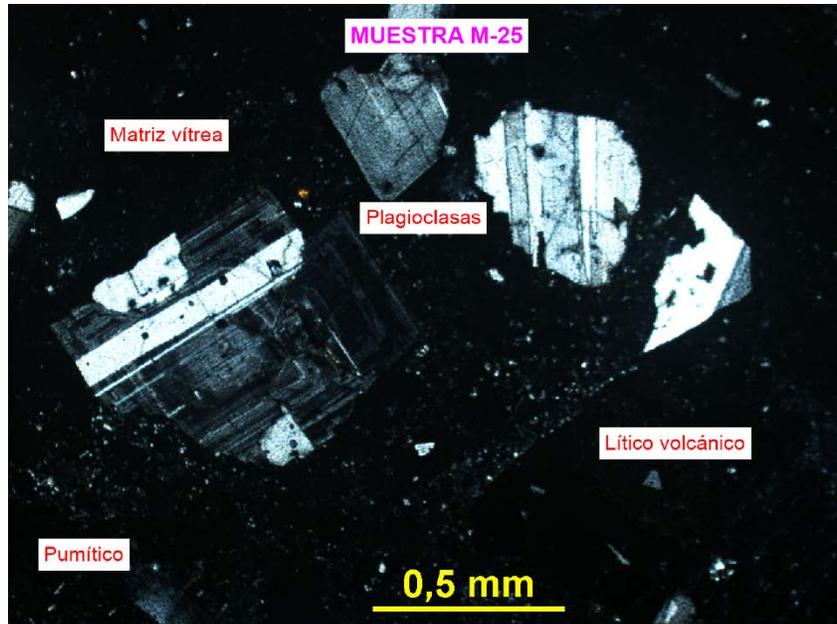


Figura 27. Plagioclasas con maclas polisintéticas y zonación, en una matriz vitroclástica eutaxítica observados a nícoles cruzados en una muestra de la Unidad Pan de Azúcar (muestra tomada en las coordenadas 361415E/1156626N).

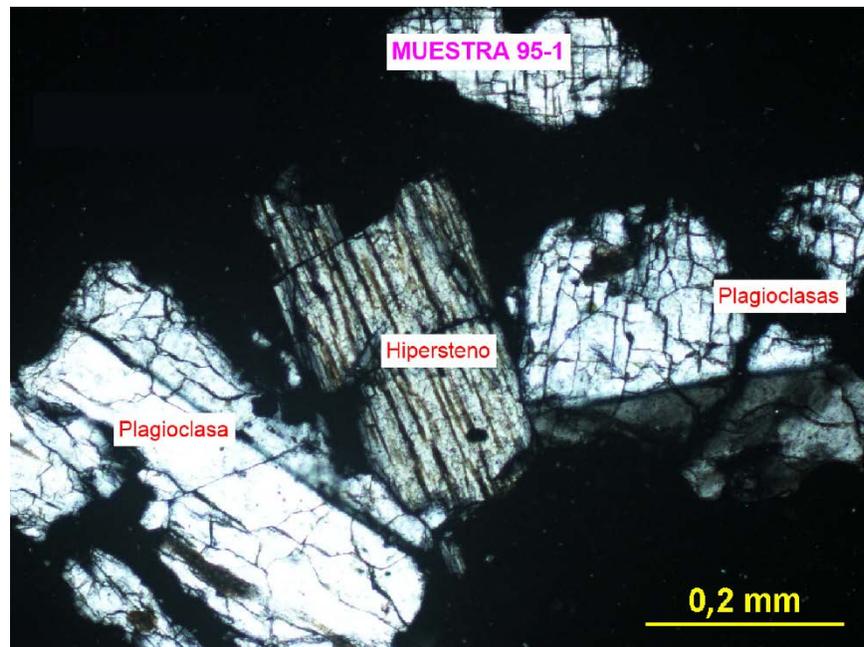


Figura 28. Cristales de plagioclasas e hipersteno en una matriz vitroclástica de textura eutaxítica observados a nícoles cruzados en una muestra de la Unidad Pan de Azúcar (muestra tomada en las coordenadas 360287E/1154265N).

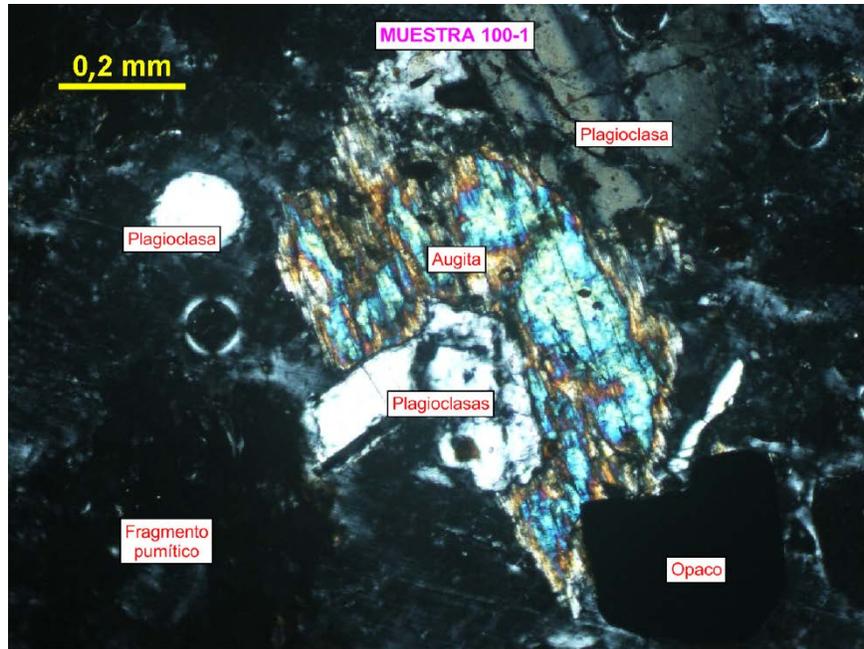


Figura 29. Cristales de plagioclasas, augita y opacos en una matriz vitroclástica eutaxítica observados a nicoles cruzados en una muestra de la Unidad Rama de Nance (muestra tomada en las coordenadas 361787E/1156491N).



Figura 30. Esquirlas de vidrio, opacos, plagioclasas y líticos, inmersos en una matriz vitroclástica con textura eutaxítica, observados a nicoles paralelos en una muestra de la Unidad Rama de Nance (muestra tomada en las coordenadas 362525E/1154508N).

Microscópicamente, las cuatro unidades ignimbríticas, Rama de Nance, Pan de Azúcar, Río Colorado y Montenegro, poseen características similares. La textura predominante es vitroclástica; mientras que la matriz de todas las muestras está compuesta por vidrio alterado, esquirlas de vidrio y unos pocos microlitos de plagioclasa, piroxenos y opacos. En general, la matriz es eutaxítica y en algunas

ocasiones posee fracturas perlíticas. El grado de soldamiento varía de poco soldado en las muestras unidad Rama de Nance a bien soldado en la unidad Pan de Azúcar.

Unidades de flujo

Las ignimbritas son las rocas ígneas más comunes en el área de estudio. Sparks *et al.* (1973) definen ignimbrita como una roca piroclástica compuesta predominantemente por material juvenil vesiculado, soldado o no, con características que indican un origen de corriente de densidad piroclástica. Además, indican que generalmente las ignimbritas son homogéneas y pueden dividirse en unidades de flujo. Wright (1981) definió el término ignimbrita compuesta, la cual se compone de varias unidades de flujo, cubren un amplio rango de cambios composicionales. Freundt & Wright (1981) y Schimincke (1985) definen una unidad de flujo piroclástico como un conjunto de depósitos formados por una corriente de densidad piroclástica, pudiendo subdividirse cada unidad de flujo en capas con características diferentes. Además, cada unidad de flujo es formada durante un intervalo de tiempo corto y de composición relativamente homogénea.

Sparks *et al.* (1973) y Freundt *et al.* (2000) señalan que cada unidad de flujo ignimbrítica posee cuatro capas (1, 2a, 2b y 3, Tabla 6 y Figura 31). Todas las capas pueden ocurrir en ignimbritas soldadas y no soldadas. Sin embargo, la diferenciación de las mismas en ignimbritas soldadas es complicada. Además, cada una de las capas representa una de las regiones de la corriente de densidad piroclástica que le dio origen.

Tabla 6. Características de las partes de una unidad de flujo de una corriente de densidad piroclástica (Sparks et al., 1973; Freundt et al., 2000).

Partes de la unidad de flujo	Descripción y Características
Capa 1	Primer depósito, proveniente del frente del flujo, el cual tuvo una interacción fuerte con el aire, el ambiente y la superficie del suelo. Se encuentra enriquecido en componentes líticos y cristalinos. Posee pocos centímetros de espesor y en ocasiones se encuentra estratificado y con laminación cruzada de bajo ángulo.
Capa 2a y 2b	Depósito del cuerpo principal y cola, la mayor porción del flujo corresponde con este depósito, frecuentemente está compuesta por una capa de ceniza fina basal con gradación inversa, el espesor es variable desde unos pocos centímetros hasta metros (2a), la parte principal del cuerpo del flujo (2b) es caracterizada por poseer un enriquecimiento en líticos en la base con gradación normal y un enriquecimiento en pómez en el techo con gradación inversa.
Capa 3	Depósito final, consiste en capas de ceniza muy fina comúnmente con evidencias de transporte lateral con estratificación y laminación cruzada.

En el área de estudio se identificaron cuatro ignimbritas, las cuales, como se mencionó anteriormente, no exponen su potencia total en los afloramientos, a excepción de los de la Unidad Montenegro y en algunos casos la Unidad Río Colorado. Las unidades Rama de Nance y Pan de Azúcar poseen espesores grandes, de decenas de metros. Además, todas las ignimbritas observadas en el área de estudio están conformadas por una única unidad de flujo, lo que, sumado al gran espesor, indica que se emplazaron con gran violencia y energía, en eventos cataclísmicos.

En la ignimbrita Rama de Nance, en algunas perforaciones del Proyecto Embalse Río Piedras se identificó la unidad de flujo completa (las capas 1, 2a, 2b y 3). El cuerpo principal (capa 2 b), que generalmente aparece en todos los afloramientos, se identificó claramente una sección inferior enriquecida en líticos con gradación normal y una sección superior enriquecida en pómez con gradación inversa. En el caso de las ignimbritas Pan de Azúcar, Río Colorado y Montenegro, únicamente se identificó el cuerpo principal del depósito (capa 2b) (Figura 30); sin embargo, los enriquecimientos en pómez y líticos no se observan claramente. En general, los afloramientos son extensos en horizontalidad y pequeños de espesor, lo que dificulta la visualización de la secuencia de la unidad de flujo.

Es muy difícil observar todas las capas de una unidad de flujo; comúnmente se encuentra la capa 2, debido a que, por su constitución, en comparación con los depósitos poco soldados de las capas 1 y 3, prevalece más fácilmente inalterada.

La extensión de las unidades encontradas supera por mucho al área cubierta en esta investigación, por lo que no se tienen datos de la extensión y distribución completa de las mismas.

La unidad Pan de Azúcar se distribuye principalmente en el sector central y este, predominando los afloramientos con ignimbritas de poco a moderadamente soldadas, relegando las secciones bien soldadas únicamente al sector central. Por su parte, la Unidad Rama de Nance aparece distribuida a lo largo de toda el área de estudio, en afloramientos poco potentes; donde generalmente, se observa la capa 2b de la unidad de flujo. Las unidades Río Colorado y Montenegro son poco potentes, pero sus afloramientos son extensos y se distribuyen al norte y oeste del área de estudio.

En general, las erupciones que emplazaron estos depósitos fueron eventos violentos de gran magnitud, en los que el colapso de la nube generó potentes corrientes de densidad piroclástica, en los cuales hubo una mezcla de materiales preexistentes y juveniles, que discurrieron a grandes velocidades por los cauces hasta perder la velocidad y emplazarse como potentes ignimbritas. Se puede asociar este tipo de depósitos con erupciones de tipo plinianas y con el colapso caldérico, la extensión, potencia y superposición de los flujos hace que la identificación de la fuente de origen sea difícil.

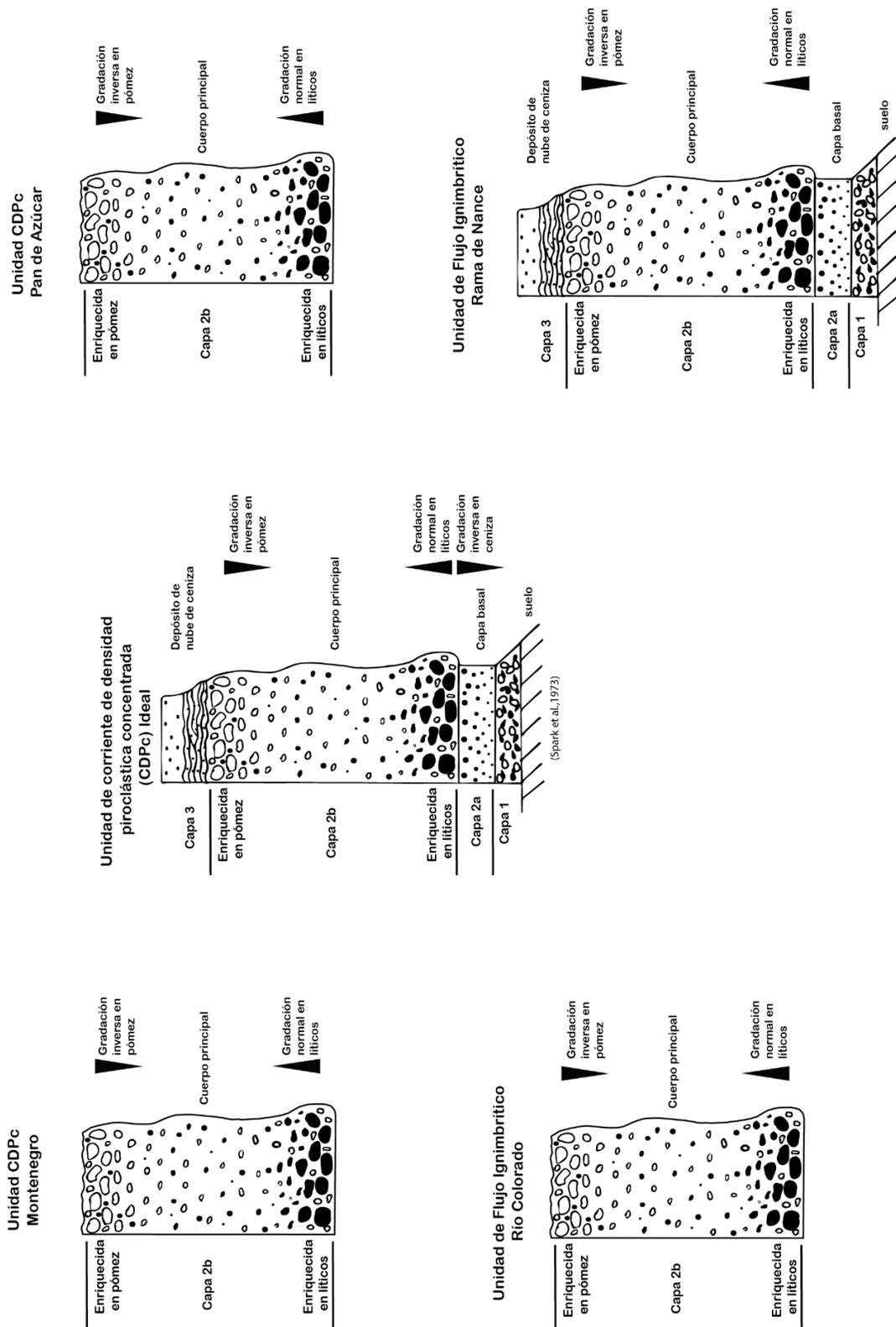


Figura 31. Comparación de la unidad de flujo ideal, propuesta por Spark et al. (1973) y las unidades de flujo ignimbríticas de la zona de estudio.

Grado de soldamiento

En cuanto al grado de soldamiento de un depósito piroclástico, depende principalmente de la temperatura, viscosidad, contenido de gas y de la presión de carga. Algunos de los rasgos característicos de las ignimbritas depositadas a altas temperaturas son la deformación plástica y el soldamiento de las esquirlas de vidrio, dando origen a la textura eutaxítica y a los *fiammes*. Otra característica de las ignimbritas de moderada a alta temperatura es la disyunción columnar (Fisher & Schmincke, 1984).

Las ignimbritas en el área de estudio poseen distintos grados de soldamiento, incluso dentro de la misma unidad de flujo. Por ejemplo, dentro del cuerpo principal (capa 2b) de la ignimbrita Pan de Azúcar, se observa la sección superior bien soldada con pómez aplastados y estructura fluidal, mientras que la sección inferior es medianamente soldada con pómez y escorias de forma redondeada, con pocos *fiammes* y con una porosidad mayor que la sección superior. Por su parte, la unidad Rama de Nance es pobremente soldada, con muy pocos afloramientos en los que se encuentra moderadamente soldada (Figura 32).

En el caso de las ignimbritas Río Colorado y Montenegro, el grado de soldamiento es de parcial a bien soldado, deducido a partir de la presencia y abundancia de *fiammes*. Además, Montenegro posee disyunción columnar completa y la unidad Río Colorado incipiente, donde las columnas no terminaron de desarrollarse dejando grietas de enfriamiento, con forma pentagonal y hexagonal en el techo de la unidad, de máximo 20 cm, las fracturas producto de las columnas permiten observar mejor la densidad de los *fiammes* en diferentes cortes.

Como se observa en la Figura 32, las ignimbritas del área de estudio poseen grados de soldamiento diferentes; sin embargo, la composición de estos depósitos es similar, por lo que se podría inferir una fuente común. Los cambios en el grado de soldamiento se pueden atribuir a la potencia de cada evento, tomando en cuenta la temperatura a la que fue emitido y la velocidad de emplazamiento y enfriamiento, de modo que en los flujos que se depositaron a una mayor velocidad y temperatura como, el de las ignimbritas Pan de Azúcar y Montenegro, se mezclaron y soldaron los componentes con una mayor eficacia; no así los flujos más fríos como los de la Unidad Rama de nance.

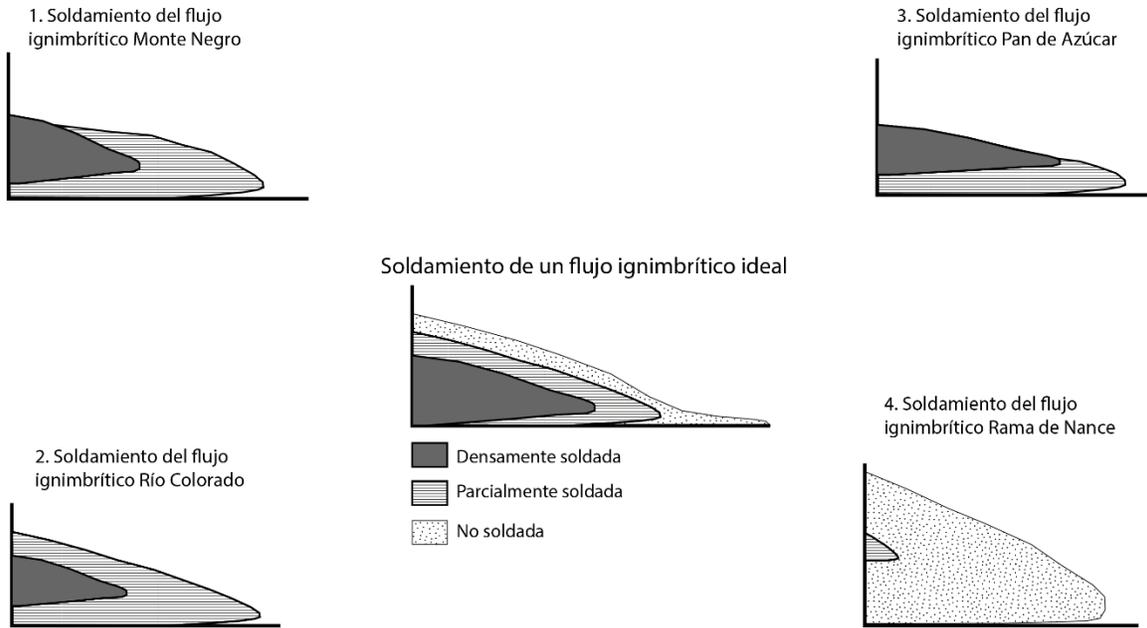


Figura 32. Comparación de la configuración del grado de soldamiento en un flujo ignimbrítico teórico, según: Fisher & Schmincke (1984) y las unidades ignimbríticas presentes en el área de estudio.

Fuente de origen

Las ignimbritas generalmente se asocian con erupciones volcánicas violentas provenientes de focos eruptivos fisurales o del colapso de columnas eruptivas plinianas (Vogel *et al.*, 2004); los depósitos más extensos se asocian al colapso del conos volcánicos y formación de calderas. En Costa Rica existen varias calderas, cerca del área de estudio. Sobreyaciendo a las ignimbritas de la Fm. Bagaces, se encuentran las ignimbritas de la Fm. Liberia provenientes de la caldera Alcántaro-Guachipelín-Cañas Dulces, con una edad entre 1,59 y 0,6 Ma y por encima de estas encuentra otro grupo de ignimbritas formadas en la caldera de Guayabo, cuya edad ronda entre 0,8 y 0,6 Ma (Alvarado & Gans, 2012).

Sin embargo, aún no se conoce la fuente de origen de las ignimbritas de la Fm. Bagaces. Durante este trabajo se tomaron datos para la realización de mapas de isopacas e isopleas, pero debido a la amplia extensión y distribución de los depósitos piroclásticos y a lo reducida que es el área de estudio en comparación con estos, los resultados obtenidos no arrojaron datos positivos. Además, la superposición de las ignimbritas de la Fm. Liberia hace imposible dar seguimiento a las capas inferiores. A pesar de esto, se supone que las corrientes de densidad piroclástica se originaron al norte o noroeste del área de estudio, en algún sitio cercano a la cordillera volcánica de Guanacaste y que la caldera o focos de emisión fueron cubiertos por las ignimbritas posteriores, dificultando aún más la tarea de identificarlos.

En el área de estudio ocurrieron erupciones plinianas de gran potencia sucedidas por periodos de inactividad volcánica; a pesar de estos periodos de calma la composición del magma no tuvo muchas

variaciones, esto basado en las similitudes físicas y texturales encontradas en la petrografía realizada para cada una de las unidades ignimbríticas

En cuanto a los cuerpos lávicos de la Unidad Agua Fría, pueden correlacionarse con las lavas del Miembro Bagaces inferior mencionado por Denyer *et al.* (2014); aunque estos autores no proponen un origen para estos cuerpos. Sin embargo, con las evidencias encontradas en el campo y otros datos geofísicos, que aquí no se presentan, del Proyecto Río Piedras, queda claro que se trata de cuerpos hiposabiales. Ello no excluye la presencia de coladas de lava que afloran, en el sector NO y fuera del área de estudio; las cuales, perfectamente, pueden correlacionarse cronológicamente con la Unidad Agua Fría. Se interpretan como una serie de posibles sills que intruyeron en los depósitos sedimentarios inconsolidados; incluso en algunos sectores se observa una peperita entre el contacto de la Unidad Falconiana y los hipoabisales. Los afloramientos de lavas afanítico-porfiríticas ubicadas al NO, se presume se formaron por actividad fisural, en la cual se derramó lava densa que se movió de manera reducida.

Unidades Sedimentarias

Unidad Falconiana (Fa)

Esta unidad se encuentra en el sector sur del área de estudio (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo).

Está compuesta por intercalaciones métricas a centimétricas de areniscas gruesas, medias y finas color gris, algunas enriquecidas en componentes de vidrio y pómez. Además, en ocasiones los estratos poseen laminación paralela y cruzada, abundante bioturbación y restos mineralizados de materia orgánica (hojas y tallos de hasta 5 cm de diámetro) (Figuras 33 y 34). En general, la consolidación de las rocas es de pobre a media, buena selección, granos redondeados de alta esfericidad, contactos netos. Los estratos varían de centimétricos a métricos, de geometría tabular, con espesores constantes y contactos netos ondulados; las areniscas finas se presentan en estratos discontinuos y de geometría lenticular. En medio de esta unidad se encuentra un paleosuelo limoso bien desarrollado, de 1,2 m de espesor máximo, de color café claro. Además, en la perforación ERP-PER-05, aparecen brechas peperíticas en el contacto con las lavas (Figura 3 y Anexo 1) y una brecha polimíctica matriz soportada, con clastos de lava vesicular, masiva y pómez, con una forma de subangular a subredondeada, matriz soportados.

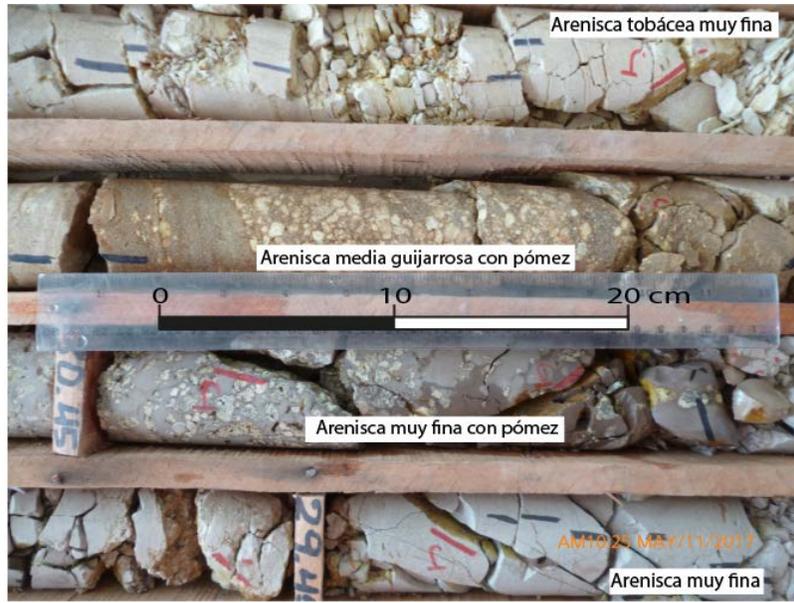


Figura 33. Intercalación de areniscas finas, medias y gruesas con pómez de la Unidad Falconiana (Muestras tomadas en las coordenadas: 361003E/1155991N).



Figura 34. Intercalación de areniscas finas y medias enriquecidas en pómez de la Unidad Falconiana, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N.

El contacto inferior de esta unidad no fue observado, por lo que corresponde con la base de la columna estratigráfica de este sector. El contacto superior es neto con la Unidad Rama de Nance. Su espesor máximo en afloramiento es de 8 m. Sin embargo, la perforación ERP-PER-05 (361153E/1155898N) tiene una profundidad de 67,5 m, de los cuales 61,5 m pertenecen a los fluviales de esta unidad y los restantes 6 m corresponden a un cuerpo lávico aférico, por lo que se estima un espesor superior a los 70 m. Además, corresponde con la unidad más vieja identificada

en el sector y aunque no se cuenta con dataciones, con base en correlaciones estratigráficas se estima una edad superior a los 3,64 Ma.

Unidad Biscoyol (Bi)

Aflora en las cercanías del cauce del río Piedras (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo).

Corresponde con areniscas medias, gruesas, conglomerados finos y areniscas guijarrosas. El color de las areniscas varía de gris claro a café blancuzco cuando se encuentra meteorizada. Los estratos centimétricos, se presentan bien definidos, con contactos ondulados netos. Las areniscas tobáceas medias y gruesas, están bien seleccionadas, con granos redondeados de alta esfericidad y laminación paralela; el espesor de estas varía entre 0,2 y 2 m (Figura 35). Por encima de ellas se encuentra un conglomerado polimíctico de 1 m de espesor, matriz arenosa gruesa y clastos subredondeados de esfericidad media en contacto flotante y puntual; los clastos corresponden con lavas vítreas afíricas, ignimbritas, pómez y escorias (Figura 36). El tamaño máximo de los clastos es de 15 cm. Por último, en la parte superior se encuentran 1,5 m intercalaciones de areniscas medias bien seleccionadas y areniscas gruesas con laminación cruzada, mal seleccionadas con lentes de arenisca guijarrosa. Estas últimas se encuentran enriquecidas en componentes volcánicos como cristales y pómez.



Figura 35. Areniscas tobáceas enriquecidas en pómez de la Unidad Biscoyol, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362701E/1155897N.



Figura 36. Contacto entre areniscas y conglomerado fino de la Unidad Biscoyol, afloramiento ubicado en las coordenadas: 360000E/1156750N.

Esta unidad sobreyace a la unidad Rama de Nance y es sobreyacida por la unidad Pan de Azúcar; en cuanto al espesor se observan variaciones entre 3 y 5 m. La edad de esta unidad basada en la estratigrafía sería menor a la edad de la unidad Rama de Nance, pero superior a los 3,64 Ma de la unidad Pan de Azúcar (Alvarado & Gans, 2012).

Unidad Bejuquito (Be)

El mejor afloramiento de esta unidad se encuentra al sur de la comunidad Llanos del Cortés (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo).

Los afloramientos de esta unidad son escasos y pequeños; en el punto antes mencionado se observa una secuencia de conglomerado polimíctico y areniscas finas, medias, gruesas y guijarrosas de colores gris, gris verdoso y café blancuzco, con estratificación paralela y cruzada (Figuras 37 y 38). El conglomerado polimíctico posee un espesor de 2 m con clastos esféricos, subredondeados de máximo 13 cm de diámetro, en contacto puntual y flotante inmerso en una matriz de arena media color gris claro. La litología de los clastos es de lavas afíricas masivas, lavas vesiculares, ignimbritas de la Unidad Pan de Azúcar y areniscas finas. Entre el conglomerado se encuentran lentes de arenisca fina y media, bien seleccionada de color gris claro y gris verdoso. Por encima del conglomerado se observan 2,5 m de intercalaciones centimétricas de arenisca fina, media y gruesa enriquecida en pómez, bien seleccionadas con laminación paralela y cruzada, restos mineralizados de materia orgánica (raíces y tallos) y lentes de areniscas guijarrosas con clastos lustrosos, esféricos y redondeados de máximo 2 centímetros. Además, al final de la secuencia se encuentra un

paleosuelo limo arenoso, bien desarrollado de al menos 0,8 m de espesor, de color gris claro a blancuzco, con algunos granos de pómez y materia orgánica.



Figura 37. Conglomerado polimíctico de la Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.



Figura 38. Areniscas con laminación paralela de la Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.

El espesor máximo de esta unidad es de 4,5 m y posee una geometría lenticular. La distribución de estos depósitos fluviales es local y de pequeñas dimensiones. Se encuentra sobre la Unidad Pan de Azúcar y es sobreyacida por la Unidad Río Colorado. En cuanto a la edad, al estar por encima de Pan

de Azúcar, es superior a 3,64 Ma e inferior los 2,08 Ma de la Unidad Río Colorado. El origen de estas rocas se debe a la erosión de las unidades subyacentes.

Unidad Veraneras (Ve)

Los mejores afloramientos de esta unidad se encuentran en la finca Las Veraneras (Ver Figura 3. Mapa de ubicación de Localidades Tipo).

Consiste en intercalación de:

1. Areniscas de finas a muy finas color blanco amarillento, con óxidos de hierro color café-anaranjado, laminación paralela planar, estructuras de carga, bioturbación y restos mineralizados de materia orgánica (pequeños troncos y raíces). Estratos de 0,5 a 3 cm de espesor. Presentan fracturas cerradas perpendiculares a la estratificación.
2. Arenisca fina, media y gruesa, color gris a gris azulado, con óxidos de hierro color café-anaranjado, con laminación paralela planar y laminación cruzada. Estratos de 2 a 50 cm de espesor, con contactos netos, bien definidos. Dentro de algunos estratos de arenisca gruesa se encuentran lentes enriquecidos en guijarros subredondeados de 2 cm de diámetro máximo. Cortando las areniscas se encuentran fracturas rellenas con una alteración blanca que no reacciona al HCl, probablemente sílice; no presenta una orientación preferencial, más bien son irregulares y contorsionadas. El buzamiento general de las capas es aproximadamente $S10^{\circ}O/8^{\circ}$ (361688E/1159971N); sin embargo, en la mayoría de los afloramientos el buzamiento no es claro debido a la laminación cruzada (Figura 39 y 40).
3. Paleosuelo limoso color rojo anaranjado de 0,5 m de espesor en el sector oeste y en el sector norte se observa un paleosuelo limoso plástico de 1 m de espesor, color gris claro.



Figura 39. Areniscas con laminación cruzada de la Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.



Figura 40. Areniscas finas, muy finas y medias con laminación paralela y laminación convoluta de la Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.

El espesor máximo medido es de 3 m, su estratificación es de decimétrica a centimétrica, en estratos tabulares y continuos; algunos se encuentran ligeramente plegados. Sobreyace inconformemente a las unidades Cañas y Río Colorado, y es sobreyacida por la Unidad Montenegro. De acuerdo a la posición estratigráfica en que se encuentra, se le asigna un rango de edad de entre 2,06 Ma y 1,87 Ma, tomando en cuenta las dataciones radiométricas utilizadas por Seems (2005) en Alvarado & Gans (2012) para la unidad Cañas y Montenegro.

Depósitos recientes

Consiste en suelos, aluviones y otros depósitos fluviales no consolidados, depositados recientemente; es posible encontrarlos en todos los sectores del área de estudio. Los suelos son de espesor limitado, no superan los 80 cm y en la mayoría de los casos están compuestos por una fina capa fina de material areno-arcilloso menor a los 20 cm. Al norte, en los alrededores de Llanos del Cortés, así como al sur, en Falconiana, los suelos están mejor desarrollados y alcanzan hasta 1,2 m de profundidad; en estas zonas se cultiva arroz, papaya y caña de azúcar con irrigación, por lo que el suelo se encuentra permanentemente saturado, lo que favorece la meteorización de las rocas infrayacentes y el desarrollo del mismo (Figura 41).

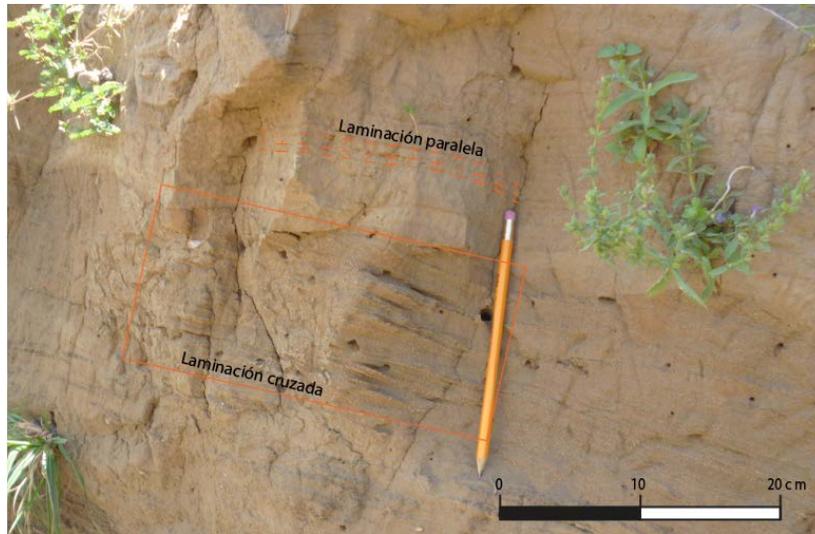


Figura 41. Arenas con laminación paralela y cruzada en depósitos recientes inconsolidados en un margen del río Piedras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 359800E/1157868N.

Análisis e interpretación de facies

En el área de estudio se identificaron cuatro unidades fluviales, intercaladas entre las ignimbritas, para cada una de las cuales se realizó el levantamiento de secciones estratigráficas para realizar la clasificación y análisis de facies. Como referencia para dicha interpretación se utilizaron los trabajos de Reineck & Singh (1980), Walker & James (1992), Vera (1994) y Miall (2006), , donde se toman en cuenta características como textura y estructuras sedimentarias, la cual se modificó y adaptó a los depósitos presentes.

La unidad fluvial más antigua es la Unidad Falconiana, aflora principalmente al centro y sur del área, y posee un espesor superior a 60 m; es la unidad fluvial más extensa. La Unidad Biscoyol, consiste en pequeños afloramientos, ubicados en el sector sur y con un espesor máximo de 5 m. Subiendo en la columna estratigráfica se encuentra la Unidad Bejuquito al noreste con un espesor máximo de 4.5 m. Por último, la unidad más reciente es la Unidad Veraneras, al norte y suroeste del área de estudio se encuentran afloramientos de extensión formidable, pero de pequeño espesor, para un máximo de 3 m. En todas las unidades mencionadas los depósitos predominantes corresponden con areniscas con diferentes características y granulometrías y en menor cantidad aparecen conglomerados y brechas. La Figura 42, muestra la ubicación y distribución de las unidades fluviales.

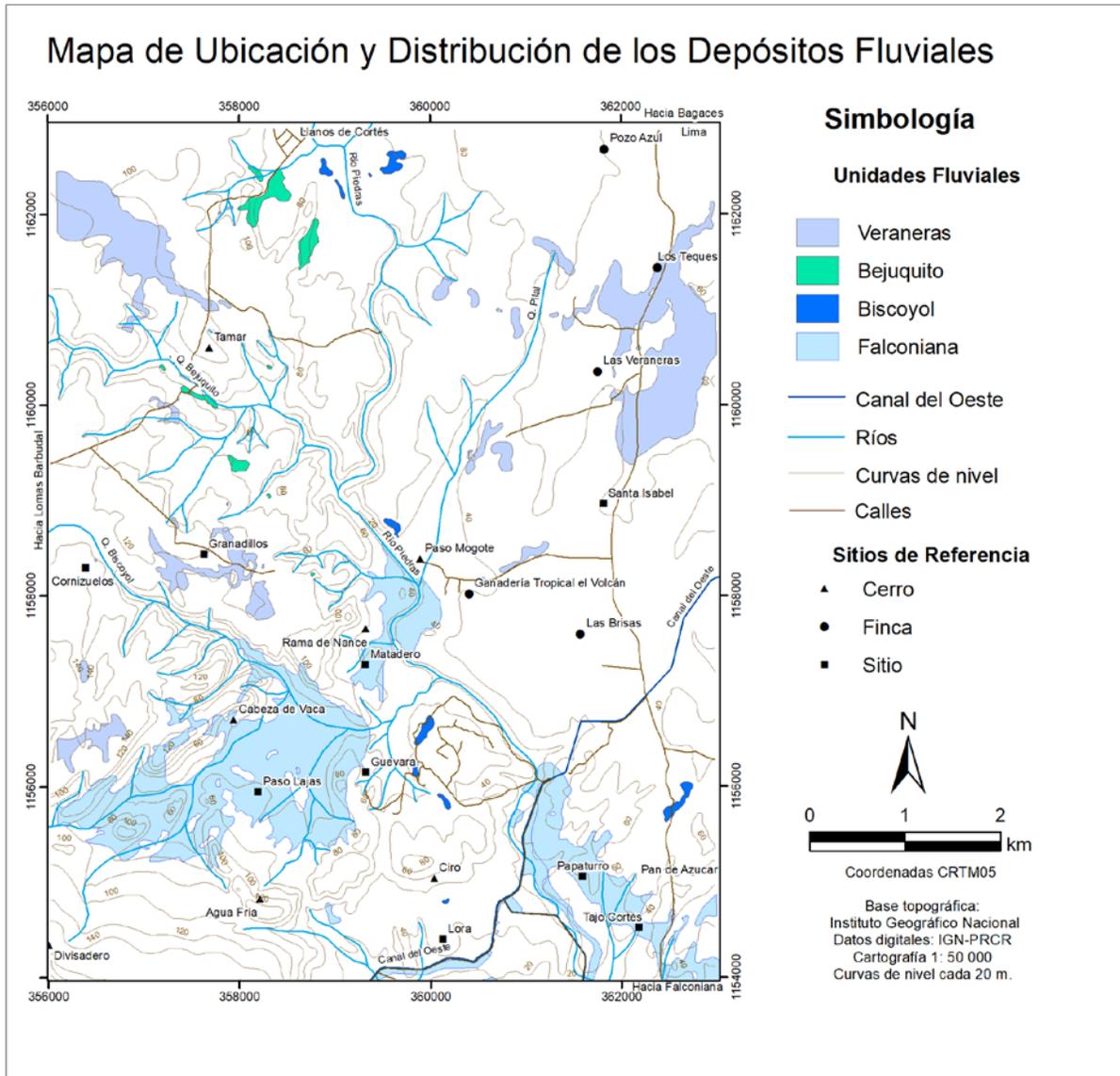


Figura 42. Ubicación y distribución de los depósitos fluviales, (Fuente: Instituto Geográfico Nacional, datos digitales: IGN-PRCR, cartografía 1:50 000).

A continuación, se describen las 6 facies encontradas en las unidades fluviales del área de estudio; la nomenclatura utilizada es una adaptación, de las utilizadas por Reineck & Singh (1980), Walker & James (1992), Vera (1994) y Miall (2006):

1. Facies de grava

Grava masiva soportada por matriz (Gmm)

Corresponde con una brecha polimíctica mal seleccionada con clastos subangulares (60 %) inmersos en una matriz arenosa gruesa, color café, bien consolidada. Los clastos se encuentran soportado por matriz y corresponden con lavas masivas y vesiculares de color

rojizo y gris de máximo 12 x 5 cm; y pómez de máximo de 10 x 7 cm. Estas gravas poseen un espesor de 3,5 m, no se observa la geometría de estas, debido a que únicamente se observaron en la perforación ERP-PER-05, de la Unidad Falconiana.

En esta misma facies y de manera más frecuente, se encuentran conglomerados polimícticos con bloques redondeados de alta esfericidad, inmersos en una matriz arenosa. Los clastos corresponden con lavas, ignimbritas y pómez, con tamaños variable entre 1 y 15 cm de diámetro. La matriz, en la mayoría de los casos, representa entre 20 y 40 % del volumen y está compuesta por arena de fina a gruesa. El contacto entre los clastos varía entre planares, puntuales y flotantes. Por su parte, la geometría de esta facies varía de lenticular a tabular con eventuales lentes de arenisca laminada; no se observaron estructuras sedimentarias ni de ordenamiento interno (Figura 43). Estos conglomerados se encuentran en las unidades Biscoyol y Bejuquito.



Figura 43. Conglomerado polimíctico de la Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.

2. Facies de arena

Son las facies más abundantes en el área de estudio en donde la morfología de los estratos arenosos depende de tres parámetros, tamaño de grano, profundidad y velocidad del flujo. Las facies de arena son clasificadas de acuerdo al tamaño de grano, estructuras sedimentarias primarias como la existencia o no de laminaciones.

Areniscas con laminación cruzada (Alc)

Areniscas tobáceas desde muy finas hasta gruesas, color gris claro, bien seleccionadas, con estratos tabulares continuos de más de 0,4 m de espesor y estratos lenticulares, con laminación cruzada, bien marcada (Figura 44). Se encuentran presentes en todas las unidades fluviales del área de estudio.



Figura 44. Areniscas con laminación cruzada, Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.

Areniscas con laminación paralela horizontal (Alp)

Areniscas y areniscas tobáceas, finas y medias, gruesas y gujarrosas, color gris blancuzco a blanco amarillento, de consolidación y selección variable de mala a buena. Poseen laminación paralela horizontal y en raras ocasiones lentes gujarrosos de líticos y pómez. En las granulometrías más finas es posible observar estructuras de carga y, en cantidades menos frecuentes, láminas de óxidos de hierro color café amarillento. Los estratos varían entre 0,2 y 2 m, con una geometría tabular continua y en raras ocasiones en forma de lentes; corresponde con la facies más abundante y se encuentra en todas las unidades fluviales (Figura 45).



Figura 45. Areniscas con laminación paralela horizontal, Unidad Bejuquito, afloramiento ubicado en las coordenadas: 357357E/1160058N.

Areniscas masivas (Am)

Areniscas de finas a gruesas y hasta guijarrosas, color gris, gris amarillento, gris rosáceo hasta gris azulado; el grado de consolidación es muy variable y en algunos estratos se observan lentes enriquecidos en pómez, otros poseen gradación normal en guijarros líticos e inversa en clastos pumíticos (Figura 46). La selección varía de buena a mala y los estratos poseen geometría tabular y lenticular, con espesores desde unos pocos centímetros hasta métricos.



Figura 46. Areniscas masivas guijarrosas, Unidad Falconiana, afloramiento en las coordenadas: 361003E/1155991N.

Arenas, limos y lodos con laminación fina (Alf)

Corresponde con areniscas muy finas y finas y en menor proporción areniscas medias de color gris claro a blanco amarillento hasta blanco rosáceo; se encuentran bien seleccionadas y están compuestas principalmente por cristales, líticos y pómez redondeados. Generalmente, se encuentran bioturbadas y con restos mineralizados de materia orgánica (hojas, tallos y raíces) acumulados en laminaciones delgadas (Figura 47 y 48). Además, tienen laminación paralela horizontal y en escasas ocasiones laminación paralela ondulada y manchas de óxidos de hierro café amarillento. Los estratos son tabulares y varían desde pocos centímetros a varios metros y se encuentran presentes en las unidades Falconiana, Bejuquito y Veraneras.

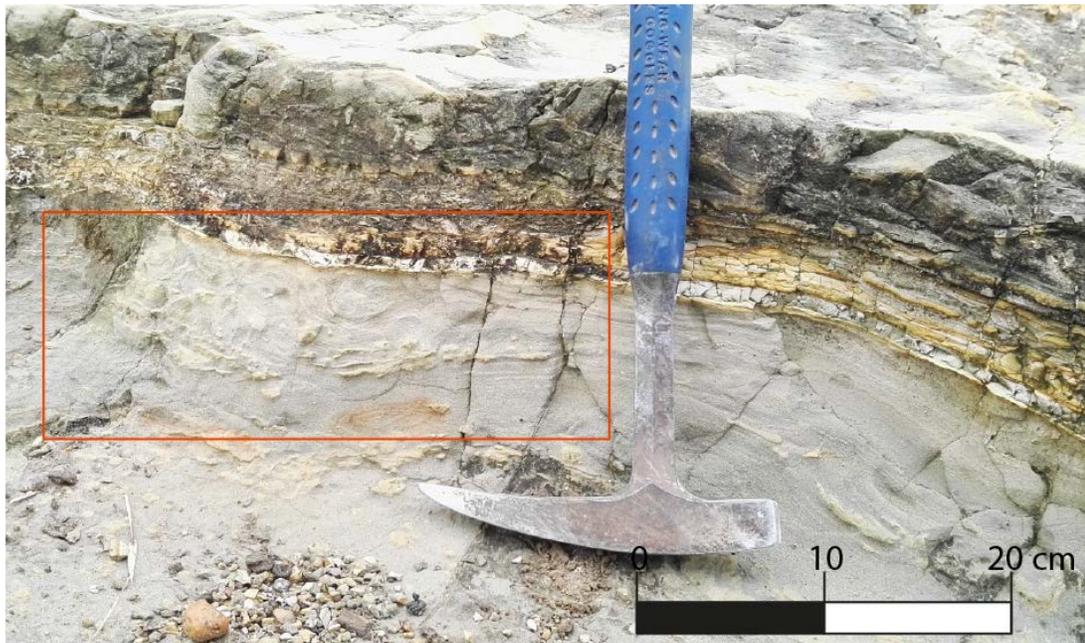


Figura 47. Areniscas con laminaciones finas contorsionadas y laminación paralela fina, Unidad Veraneras, afloramiento ubicado en las coordenadas: 361688E/1159971N.

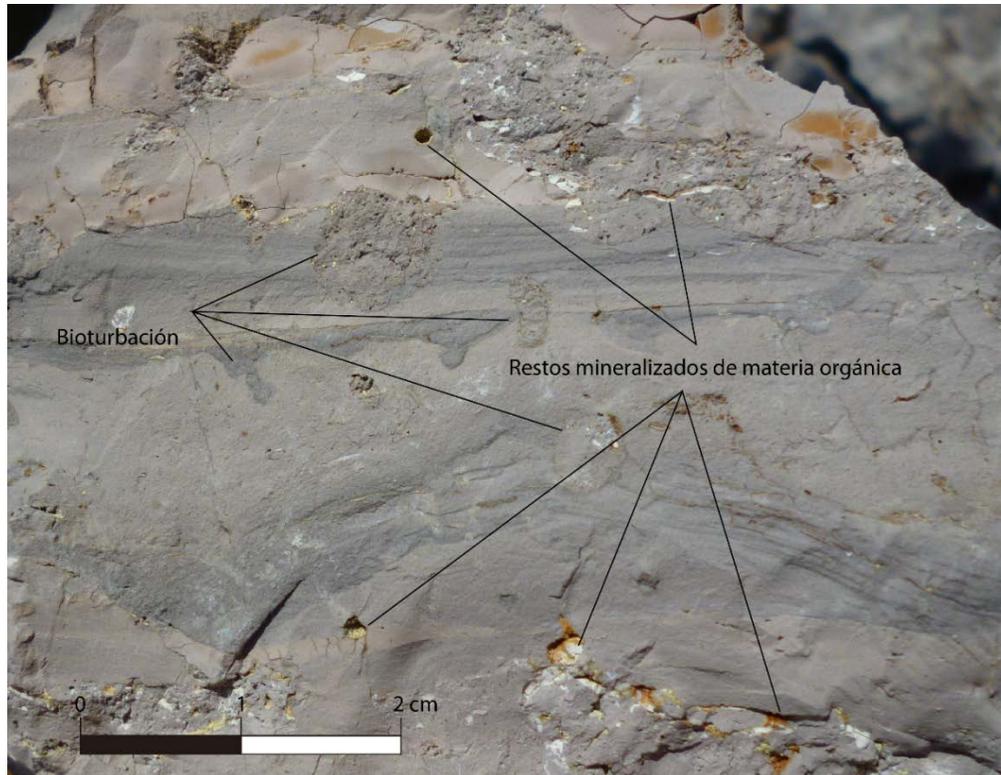


Figura 48. Areniscas con bioturbación y restos mineralizados de materia orgánica, Unidad Falconiana, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N.

Como se mencionó anteriormente, para la clasificación de facies se realizó el levantamiento de secciones estratigráficas; de las unidades Falconiana y Veraneras, donde se midieron tres y dos secuencias estratigráficas, respectivamente. Mientras que, para el resto de las unidades, debido a lo pequeño y escaso de los afloramientos (Figura 42), únicamente se recolectó información de una secuencia estratigráfica, para cada unidad. En la Figura 49 se muestra la ubicación de cada una de las secuencias levantadas.

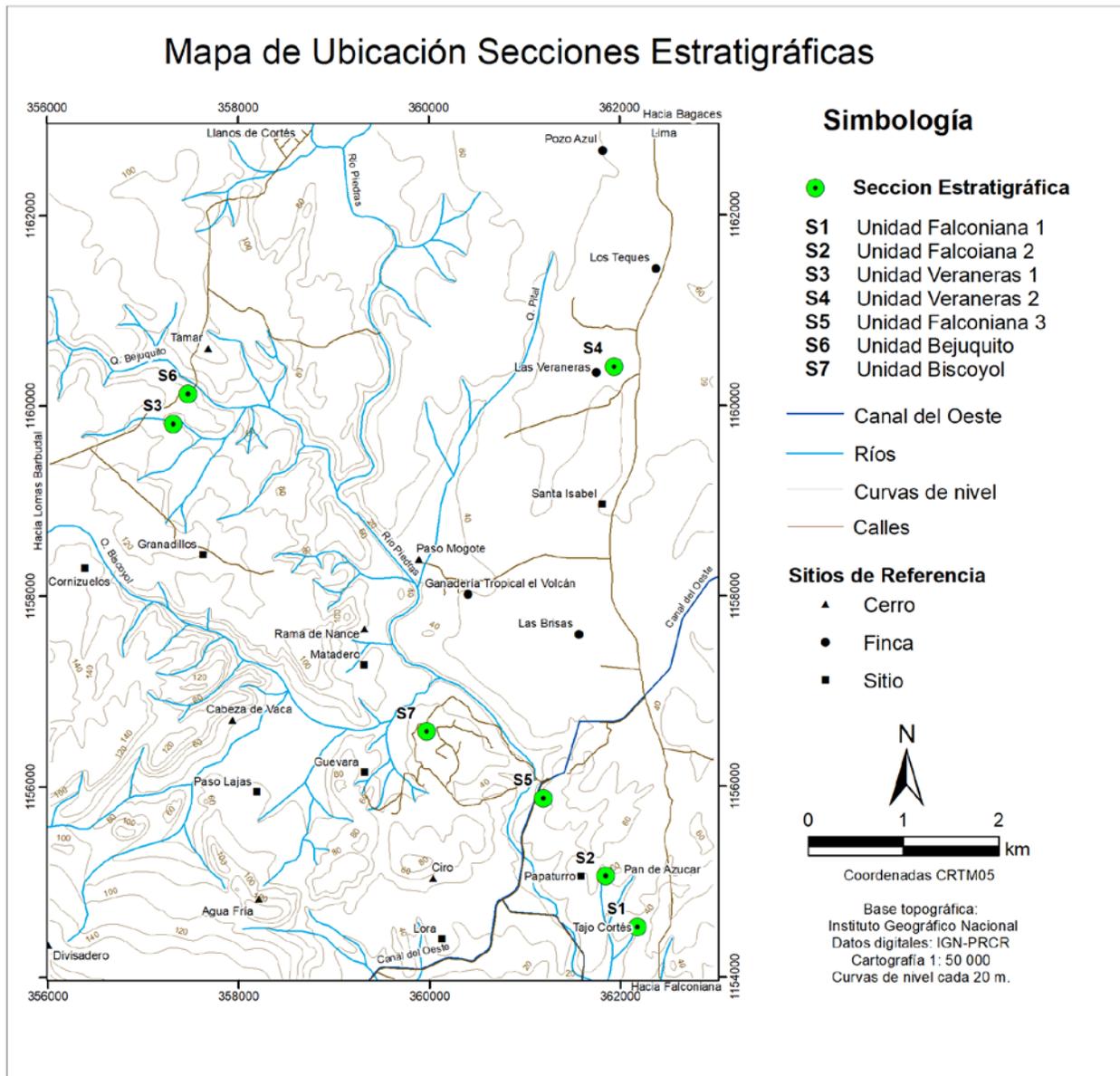


Figura 49. Mapa de ubicación de las secciones estratigráficas (para detalles ver anexo 2).

A partir del análisis de facies, fue posible determinar que el ambiente de depositación, para las cuatro unidades, corresponde con un ambiente fluvial. A lo largo del tiempo, la continuidad de la depositación se vio interrumpida por la actividad volcánica y tectónica, generando intercalaciones de componentes volcánicos con las unidades sedimentarias, así como periodos de no depositación, representados por la ausencia de materiales sedimentos y la erosión de los depósitos.

Para la unidad Falconiana, se analizaron los datos de tres secciones estratigráficas (Figura 50). El espesor y extensión de esta unidad indica la presencia de un río importante (¿paleo río Piedras?), el cual acarrea grandes volúmenes de sedimentos y los depositaba en la

cuenca. Es importante recalcar que la sección estratigráfica correspondiente con la base de la unidad, corresponde con la perforación número 5 del Embalse Río Piedras, en la cual no se atravesó por completo la unidad, de modo que la columna se encuentra incompleta y no se sabe con certeza el espesor total de la unidad. Sin embargo, de acuerdo con dicha perforación y a la correlación con las otras dos secciones estratigráficas, se estima existe un espesor superior a 70 m de depósitos sedimentarios, pertenecientes a la unidad Falconiana. El detalle de las secuencias se observa en el Anexo 2.

Las facies más abundantes en esta unidad corresponden con areniscas masivas y laminadas (Am, Alc y Alp), desde muy finas hasta gruesas. Además, algunos estratos poseen un enriquecimiento en componentes volcánicos, tales como líticos, guijarros y arenas de pómez, así como ceniza. La gradación inversa en las pómez indica una depositación en agua, en la cual el clasto pumítico se mantuvo flotando hasta que sus vesículas se saturaron y se sedimentó; mientras que las gradaciones normales en los mismos clastos indican una saturación previa al depósito y una depositación por los procesos sedimentarios normales (White *et al.*, 2001).

Se identificaron siete ciclos, se observan secuencias de canales erosionadas, seguidas por depósitos de barras arenosas (*point bar*), depósitos de sobre banco o relleno de canales arenosos (*overbank*), otros depósitos de canal y de planicie aluvial. Es posible determinar una dinámica fluvial activa, con migración y relleno de canales. Los ciclos correspondientes con canales poseen los materiales más gruesos (principalmente facies Gmm y Am), gravas y areniscas masivas, mal seleccionadas y con gradación normal en clastos líticos. Los ciclos de barras arenosas, se caracterizan por intercalaciones de areniscas gruesas en la base y finas en la cima, con materia orgánica mineralizada, laminación paralela y laminación cruzada (facies Alc y Alp). Por su parte, en los ciclos de sobrebanco y planicie aluvial, predominan los sedimentos de grano fino (facies Alf), con abundancia de restos de materia orgánica y bioturbación; en las cercanías del canal se encuentran materiales de granulometría media (Figura 50). Los ciclos superiores de la secuencia poseen un enriquecimiento en componentes volcánicos, gradación normal e inversa en pómez, lo cual indica un aumento en la actividad volcánica.

Correlación de las secciones estratigráficas de la Unidad Falconiana

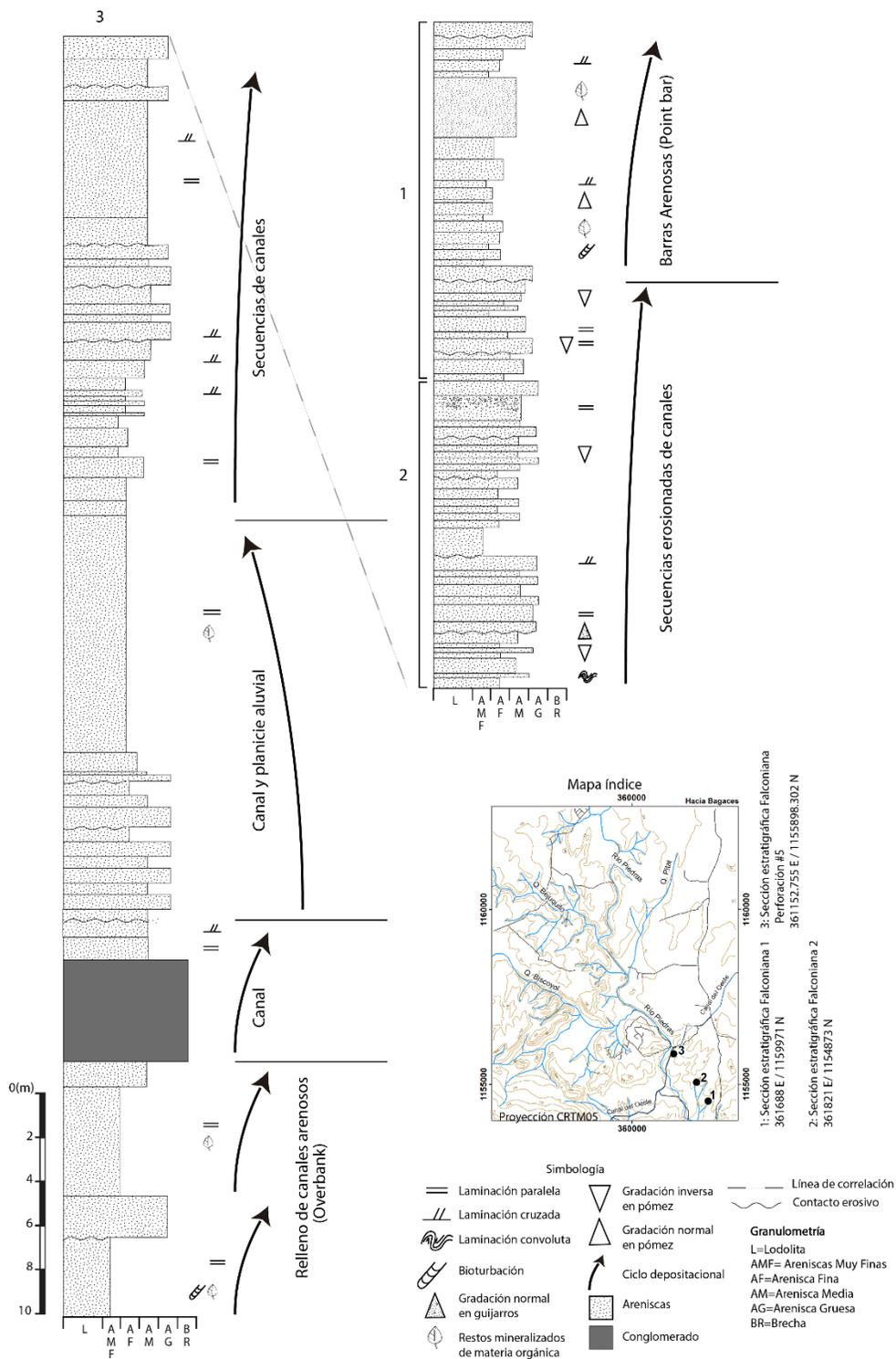


Figura 50. Correlación de las secciones estratigráficas de la Unidad Falconiana.

La Unidad Biscoyol consta de pequeños afloramientos (Figura 42) con un espesor inferior a los 5 m; la sección levantada para esta unidad posee dos ciclos, en la base se observa un ciclo de planicie aluvial con laminación paralela (facies Alp) y por encima de este, un canal fluvial (facies Gmm) y barras arenosas con areniscas de laminación cruzada y masivas (facies Am y Alc) (Figura 51 y Anexo 2).

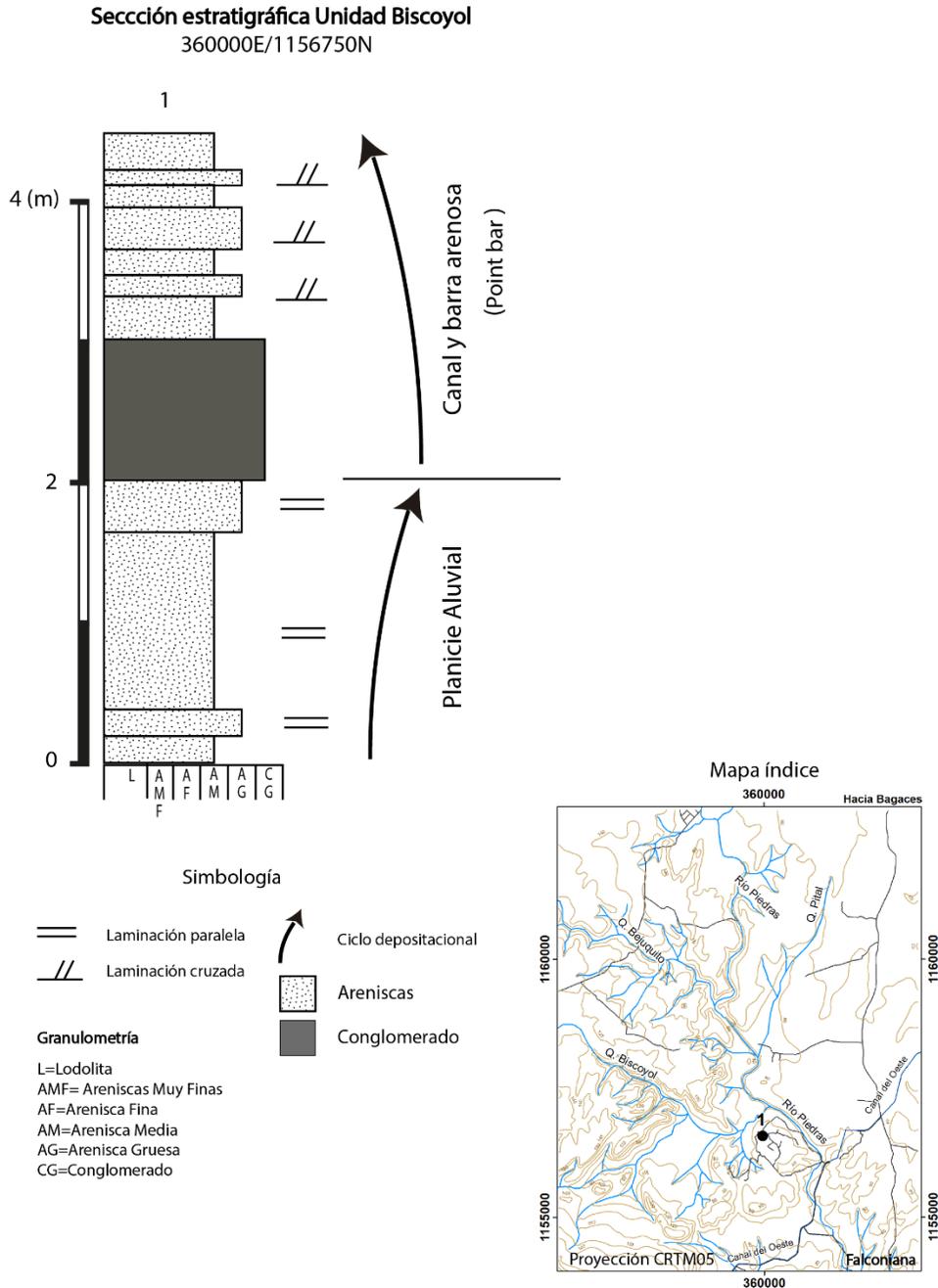


Figura 51. Sección estratigráfica de la Unidad Biscoyol.

Por su parte la Unidad Bejuquito, al igual que la Biscoyol, es poco extensa y espesa. En la secuencia analizada se identificó un ciclo de granulometría gruesa correspondiente con un canal fluvial, con gradación positiva en guijarros y, por encima de este, se encuentran barras arenosas, con areniscas con laminación paralela, cruzada y restos de materia orgánica intercaladas (Figura 52 y Anexo 2).

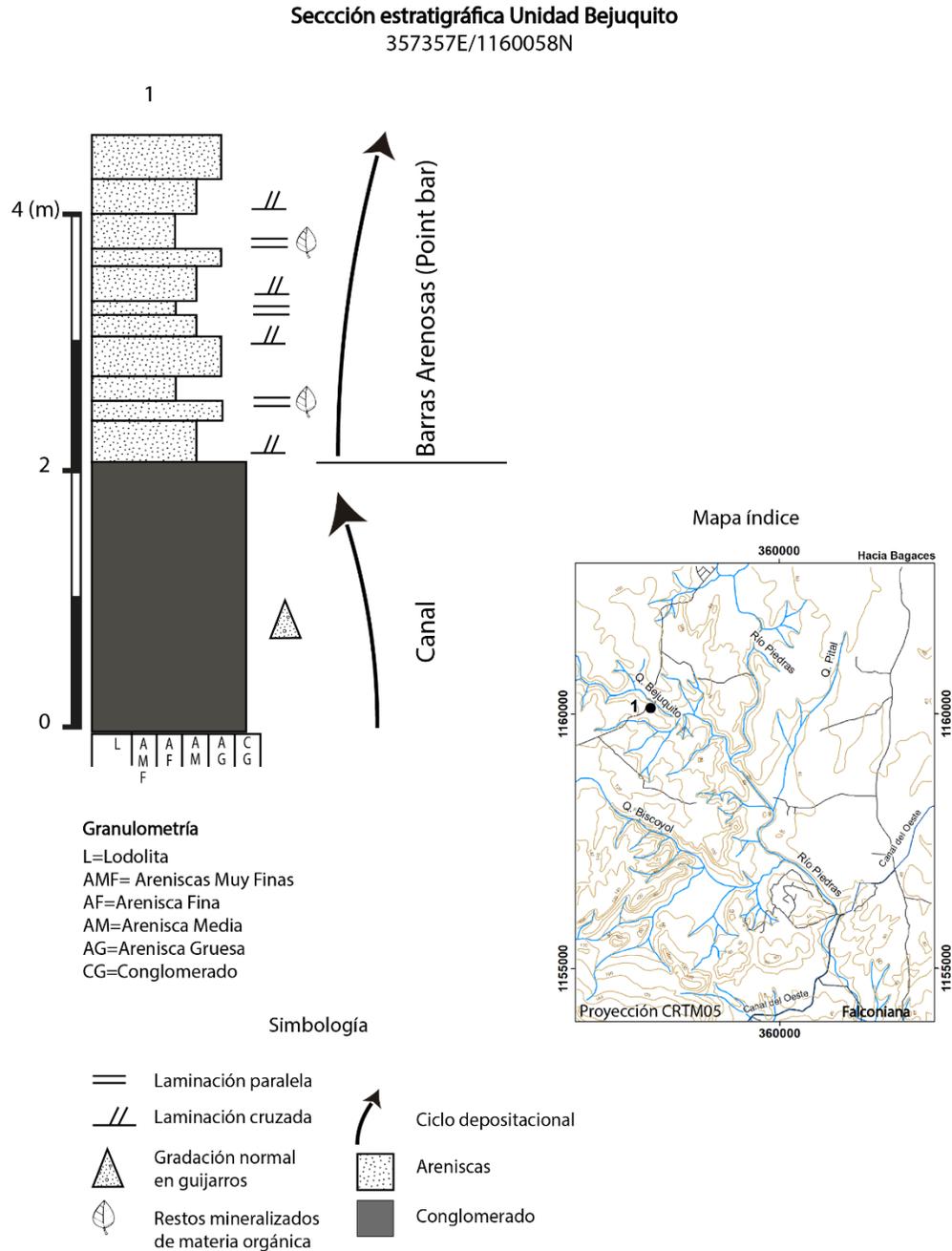


Figura 52. Sección estratigráfica de la Unidad Bejuquito.

En la Unidad Veraneras predominan las areniscas finas, medias y gruesas intercaladas, de las facies Am, Alc y Alp; los depósitos de esta unidad son poco espesos pero extensos (Figura 42) y representan ciclos de planicie aluvial, en los que se observan areniscas finas con bioturbación, restos mineralizados de materia orgánica y laminación paralela, barras arenosas de areniscas finas a gruesas con laminación paralela y cruzada y facies de areniscas medias y gruesas con lentes de guijarros y gradación inversa en pómez (Figura 53 y Anexo 2). En la correlación de secuencias se observan cambios laterales de facies, pasando de facies de canal a planicie aluvial.

Correlación de las secciones estratigráficas de la Unidad Veraneras

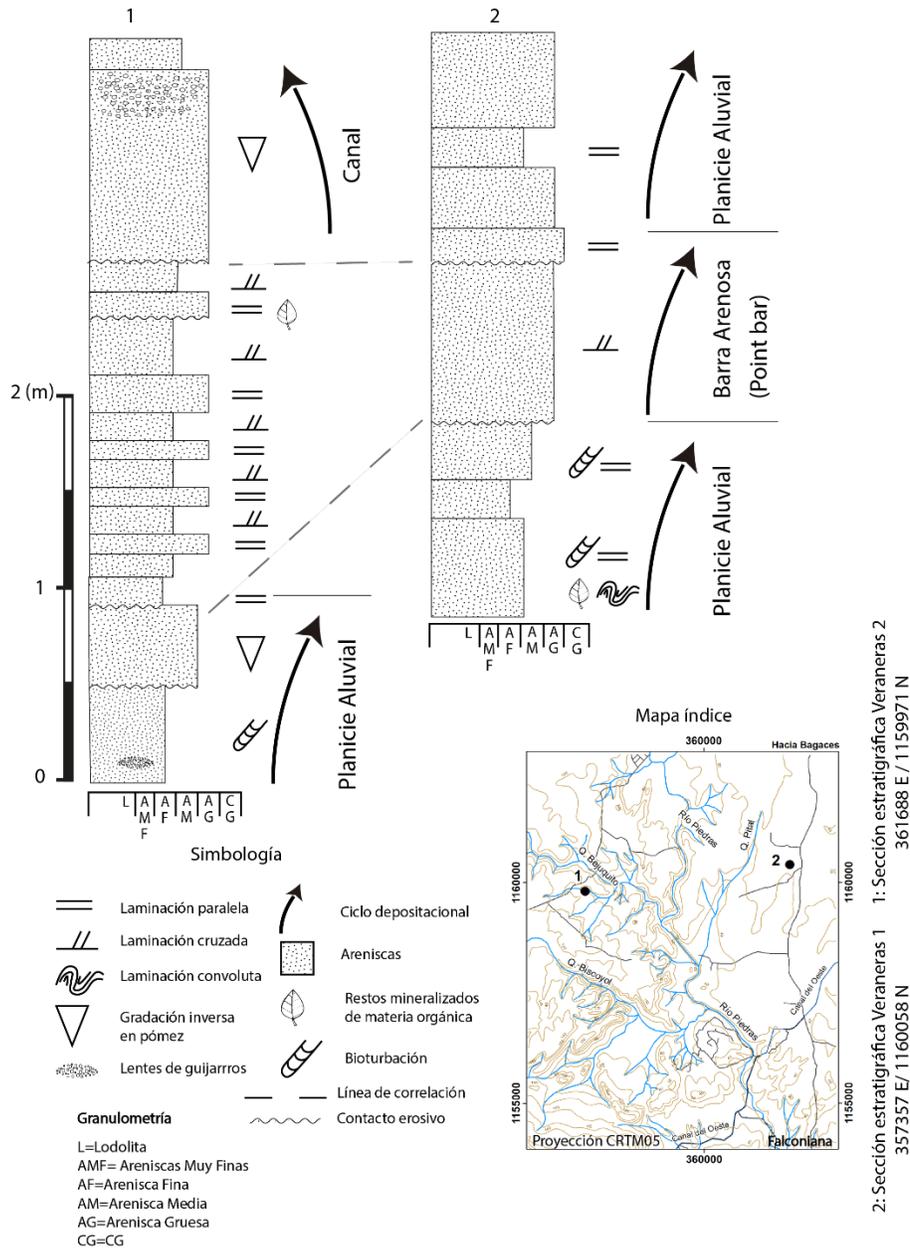


Figura 53. Correlación de secciones estratigráficas de la Unidad Veraneras.

En todas las unidades fluviales se observan cambios y fluctuaciones de energía baja a una un poco más alta, pasando de areniscas muy finas a areniscas gruesas y viceversa. Estas fluctuaciones se pueden observar en los depósitos correspondientes a llanura aluvial, en el sobrebanco (*overbank*), canal y barras arenosas.

Las facies de canal se caracterizan por depósitos de granulometría gruesa, brechas y conglomerados, sedimentos depositados por corrientes de tracción fuertes; en ocasiones se observan gradaciones. La aparición de canales y su actividad domina el ambiente fluvial y la depositación y distribución de las otras facies del ambiente fluvial. En las facies de llanura aluvial, los sedimentos son depositados por corrientes de tracción débiles; en ocasiones se pueden observar *ripples* pequeños, estratos ondulados, bioturbación, grietas de desecación, restos de plantas y raíces. El espesor varía de pocos centímetros a varios metros, dependiendo del estilo y el aporte fluvial. Se forman por el asentamiento de los sedimentos que viajan en suspensión, en zonas de desborde, canales abandonados e inundaciones decrecientes; la predominancia del color gris es indicativo de condiciones reductoras postdepositacionales. Por su parte, las facies de barra arenosa y relleno de canales arenosos (*overbank*) son intermedios entre el canal y la llanura aluvial.

Capítulo IV. Elementos estructurales y morfotectónica

Tectónicamente, nuestro país se ubica al NO del punto triple conformado por la interacción de las placas Nazca, Coco y Caribe (Morales, 1985). Frente a la costa pacífica se encuentra la Fosa Mesoamericana, sitio donde la placa Coco se subduce bajo la placa Caribe, esto incide en la alta sismicidad de Costa Rica, donde la mayoría de los terremotos son provocados por subducción. Además, toda la actividad geológica del país, incluido el fallamiento local, está influenciada por la interacción entre las placas.

Referente a el área de estudio, las fallas y otras estructuras se definieron de acuerdo a criterios morfológicos como alineamientos, sillas de falla, lagos alineados, escarpes de falla, ríos desplazados, ríos alineados (vistos en modelos de relieve, fotos aéreas y en afloramientos); y otros criterios como desplazamiento de capas y cambios muy marcados en la geología, que indican la presencia de las estructuras. Sin embargo, no se encontraron criterios cinemáticos del tipo de movimiento de las fallas (muy pocas y mal preservadas estrías, ningún criterio de Petit o fracturas secundarias asociadas al sentido de movimiento de la cizalla (Petit, 1987)), esto debido a que la naturaleza de las rocas no permite la formación o buena preservación de dichas estructuras. Por lo tanto, la naturaleza y movimiento de las fallas se asume acorde a lo observado en el campo y a la interpretación geomorfológica.

A continuación, se describen las principales fallas neotectónicas presentes en el área de estudio (Figura 54 y Anexo 1):

Mapa de Elementos Morfoestructurales

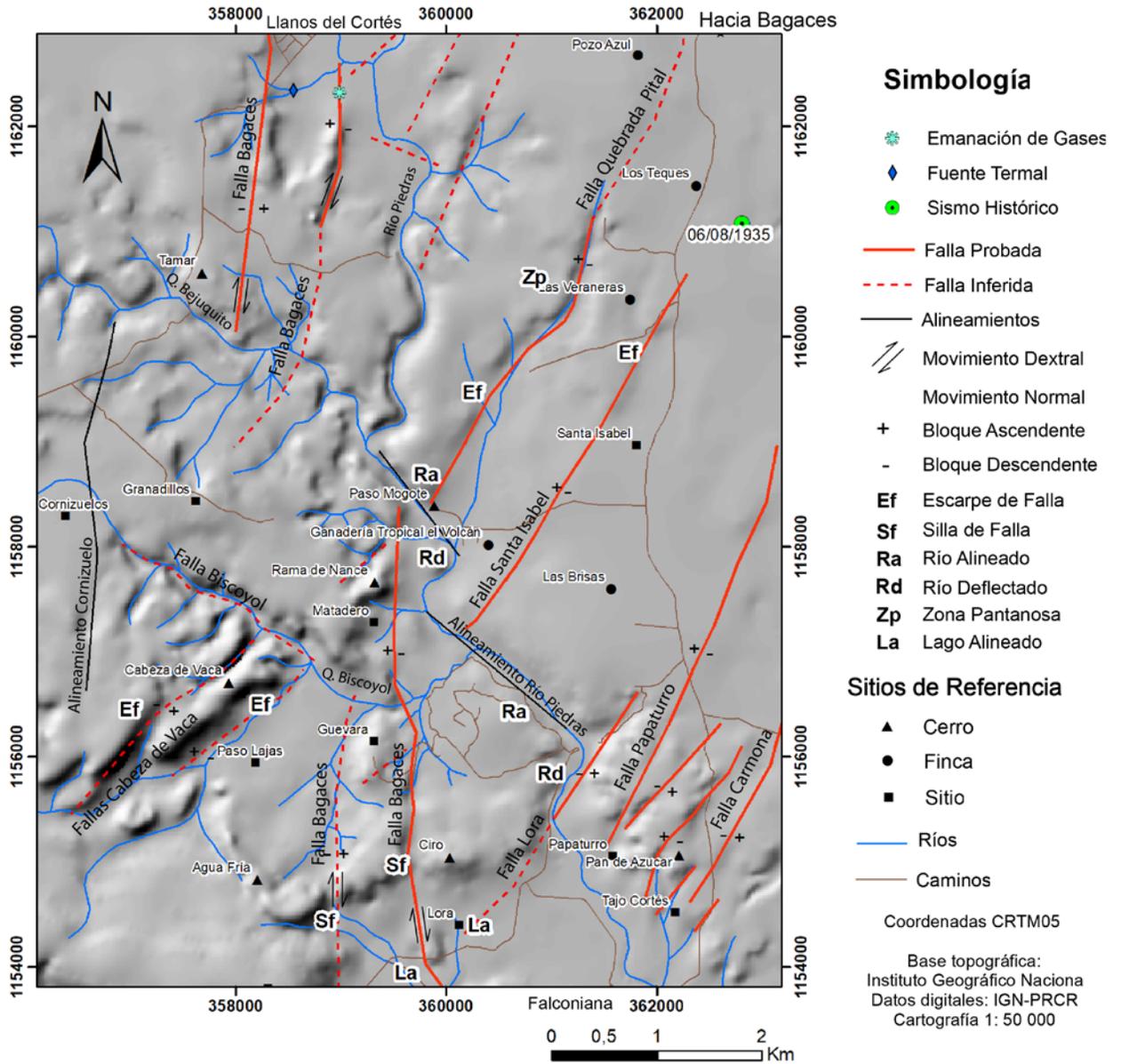


Figura 54. Mapa de fallas y elementos estructurales.

Falla Bagaces:

En el presente trabajo, el trazo de la falla Bagaces se definió de acuerdo al levantamiento de fracturas y fallas en el campo y a su comparación con modelos de relieve.

En el sector sur del área de estudio, consta de dos ramales ambos con dirección N-S; el ramal oeste inicia en las cercanías en las coordenadas 358966E/1153291N, atraviesa el cerro Agua Fría, en el cual se observa una silla de falla (Figura 54) y acaba al norte del sitio Guevara (359340E/1153417N), con una longitud de 3,5 km. La traza oriental inicia en Loma Lora (360399E/1153232N), pasa al oeste del cerro Ciro y al este del sitio Guevara, zona donde se observa otra silla de falla; atraviesa la quebrada Biscoyol y se dirige al norte hasta el lado este del cerro Rama de Nance. Ahí se midieron fallas verticales con desplazamiento aparente dextral y dirección N5°O y N10°O. La longitud total de este tramo es de 5,4 km. En ambos ramales se realizó levantamiento de fracturas (Tabla 8 y Figura 55), cuya dirección preferencial varía entre N10°O y N10°E. Tal y como se muestra en las rosas de rumbo; se observaron desplazamientos de 20 cm con movimiento dextral. Además, se infiere una componente normal, de acuerdo a las diferencias de altura de una misma unidad en diferentes lados de la falla.

Tabla 7. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas para el sector sur de la falla Bagaces.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
212	122	81
165	75	89
35	305	88
5	95	89
197	287	85
217	307	89
328	68	35
155	65	89
147	57	89
5	95	89
20	110	89
345	255	87
130	40	89
188	98	80
255	165	89
12	102	89
5	95	85

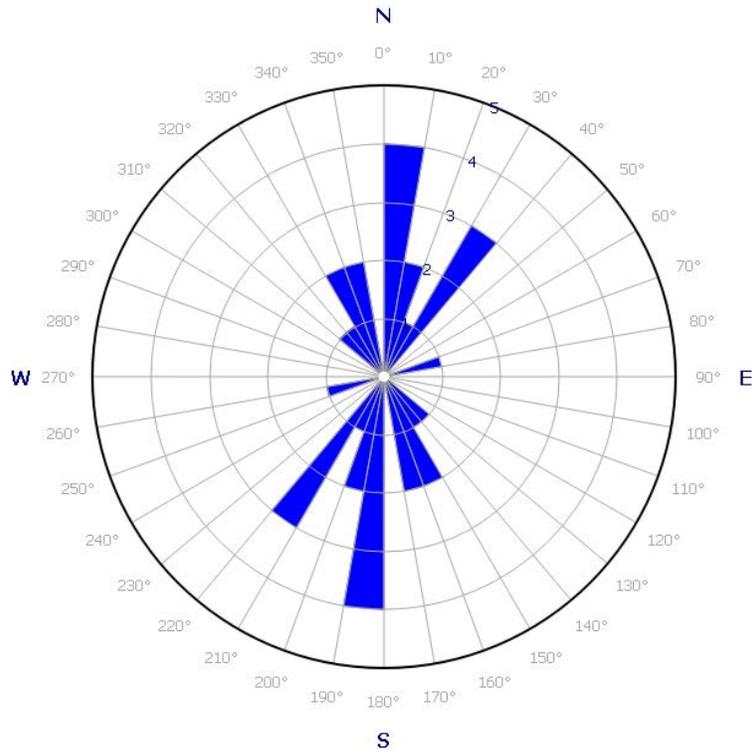


Figura 55. Rosa de rumbos de fracturas del sector sur de la Falla Bagaces.

En el sector central de la zona de estudio, la traza de la falla desaparece por aproximadamente dos kilómetros, pero reaparece en dos trazas en el sector norte. La traza este inicia al norte del sitio Granadillos (357980E/1158939N) y se extiende hasta la confluencia entre los ríos Potrero y Piedras, donde se observan fracturas con relieve positivo y emanaciones de gases y líquidos (Figura 56). En este sector existen dos familias principales de fracturas, las primeras y más evidentes con rumbo aproximado N20°O y la segunda cuyo rumbo es N10°E; en ambos casos las fracturas son verticales (Tabla 9 y Figura 57). La traza oeste del sector norte inicia al sur del cerro Tamar (358000E/1160060N) con un rumbo N-S muy rectilíneo. Al este del cerro Tamar se observa un escarpe de aproximadamente 4 m de alto por 1 km de largo; seguidamente es posible continuar la traza oeste de la falla, hasta la cascada Llanos de Cortés (358041E/1163942N). La longitud total de este tramo es de 3,9 km, mientras que la longitud del trazo este es de 3,8 km (Tabla 10 y Figura 58).



Figura 56. Fracturas con relieve positivo y “domo” de emanación de gases y agua, traza este del sector norte de la falla Bagaces (las líneas rojas señalan las fracturas), ubicado en las coordenadas 359101E/1162381N.

Tabla 8. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas de la traza este del sector norte Falla Bagaces.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
360	270	20
18	252	59
339	249	59
331	241	50
329	239	30
348	78	32
347	77	51
339	249	63
335	245	70

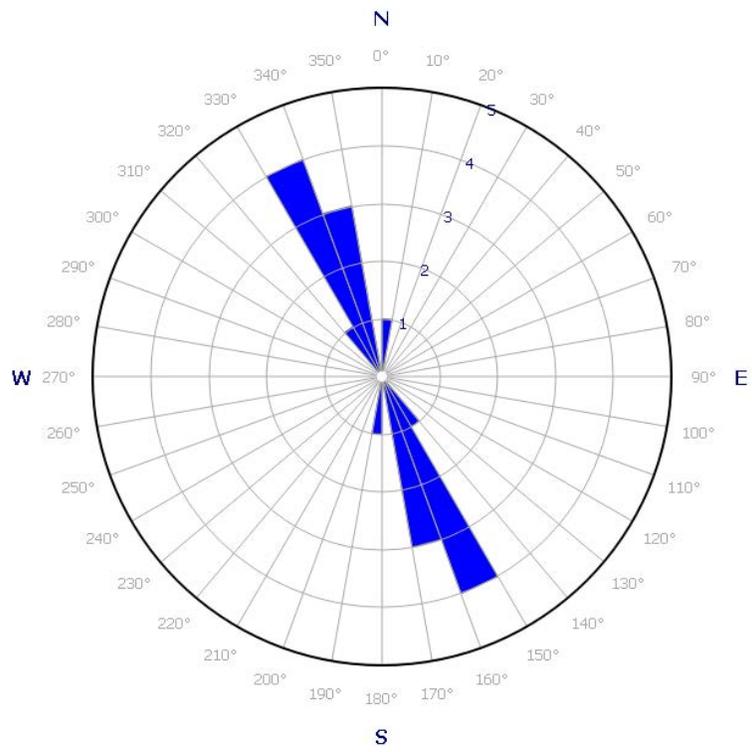


Figura 57. Rosa de rumbos de fracturas traza este del sector norte Falla Bagaces.

Tabla 9. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas, traza oeste sector norte Falla Bagaces.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento	Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
22	112	80	2	272	75
292	108	80	295	0	90
18		90	300	0	90
44	236	75	138	0	90
218	308	83	68	338	20
225	315	45	15	285	86
147	303	33	25	295	80
0	0	90	338	248	89
345	75	27	294	204	84
10	260	30	80	170	45
10	260	50	255	165	89
8	262	50	235	145	20
350	80	50	335	245	60
5	275	16	352	82	60
10	280	20	315	225	88
82	8	88	225	315	72
10	280	20	5	265	78

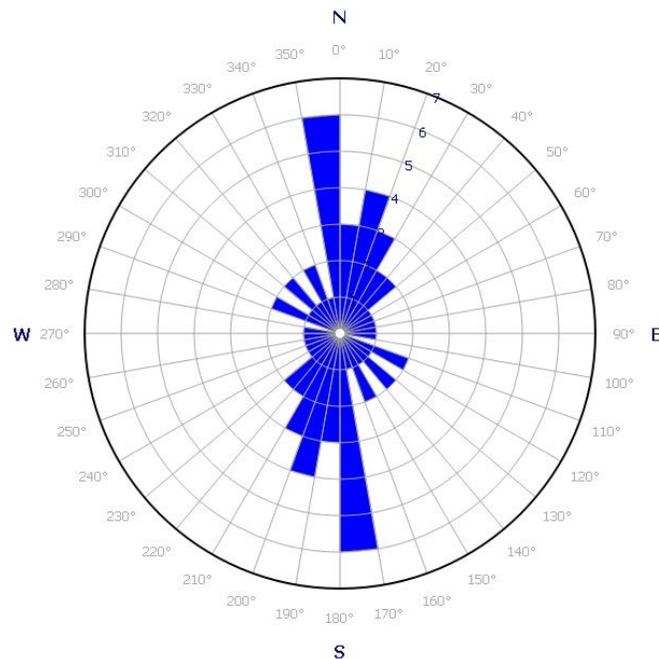


Figura 58. Rosa de rumbos de fracturas, traza oeste del sector norte falla Bagaces.

Sistema de Falla Pital:

Consiste en una serie de fallas de poca extensión, predominantemente de tipo normal, que probablemente han sido originadas por los esfuerzos asociados a la falla Bagaces.

Las fallas ubicadas al sur de este sistema, al parecer poseen una componente normal y generan un sistema horts-graben observable en las cercanías de loma Pan de Azúcar, en la falla Carmona. Las fallas que componen este sistema son: Carmona, Papatirro, Lora, Santa Isabel, Quebrada Pital y otras fallas menores; todas las anteriores se describen a continuación:

Falla Carmona: Se extiende aproximadamente por 5 km con una dirección NE-SO. En la finca El Poró de Grecia, existe un intenso fracturamiento con rumbo promedio N20°E, 76°E, asociado a esta falla. En la misma finca, hacia el NE se extienden un conjunto de fallas menores que conforman un sistema de horst y graben, el cual se puede observar claramente en el Tajo Cortés, donde se observa el movimiento aparente normal de las fallas, así como desplazamientos de hasta 90 cm. En general, dichas fallas poseen un rumbo NE-SO, las medidas de los planos en este sitio se muestran en la Tabla 11 (Figuras 59 y 60).

Para esta falla se midió una serie de fallas y fracturas asociadas que se muestran en la Tabla 12; en la Figura 61 se observa que el rumbo preferencial de dichas fallas y fracturas es N25°E con una dirección de buzamiento hacia el NE.

Tabla 10. Fallas normales observadas en Tajo Cortés.

Rumbo	Desplazamiento Normal	Zona de alteración
N26°E,89W	-	5 cm
N30°E,60°W	-	<5 cm
N32°W,75°W	-	<5 cm
N6°E,83°W	5 cm	80 cm
N29°E,70°W	-	20 cm
N27°E,70°W	90 cm	20 cm
N51°E,50°W	-	<5 cm
N7°E,75°W	-	>100 cm
N27°E,80°W	35 cm	20 cm
N14°E,89°W	15 cm	20 cm
N23°W,75°W	-	<5 cm

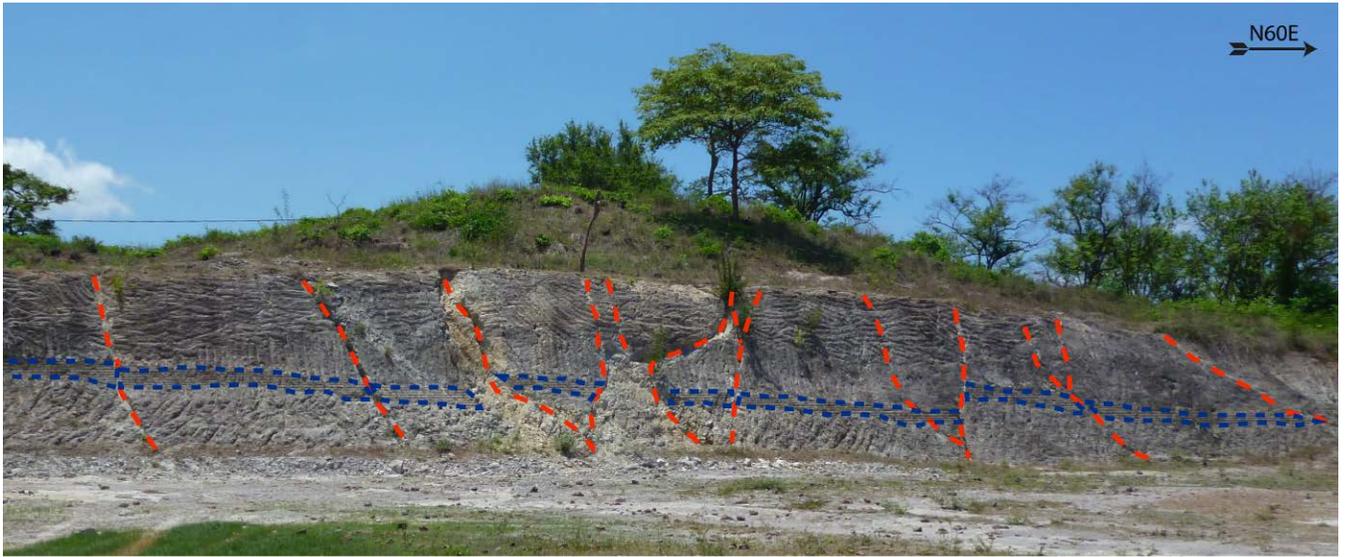


Figura 59. Vista del afloramiento principal de la falla Carmona en Tajo Cortés, en azul se muestra la capa guía y en rojo las fallas, afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N.



Figura 60. Detalle de una de las trazas de la falla Carmona observadas en Tajo Cortés (afloramiento ubicado en las coordenadas: 362281E/1154506N).

Tabla 11. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas asociadas a las trazas de la Falla Carmona.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
350	260	70
26	296	89
30	300	60
328	302	75
344	254	75
6	264	83
29	299	70
27	297	70
51	311	50
3	273	58
7	263	75
27	243	80
14	284	89
23	293	75
5	275	89
53	143	89

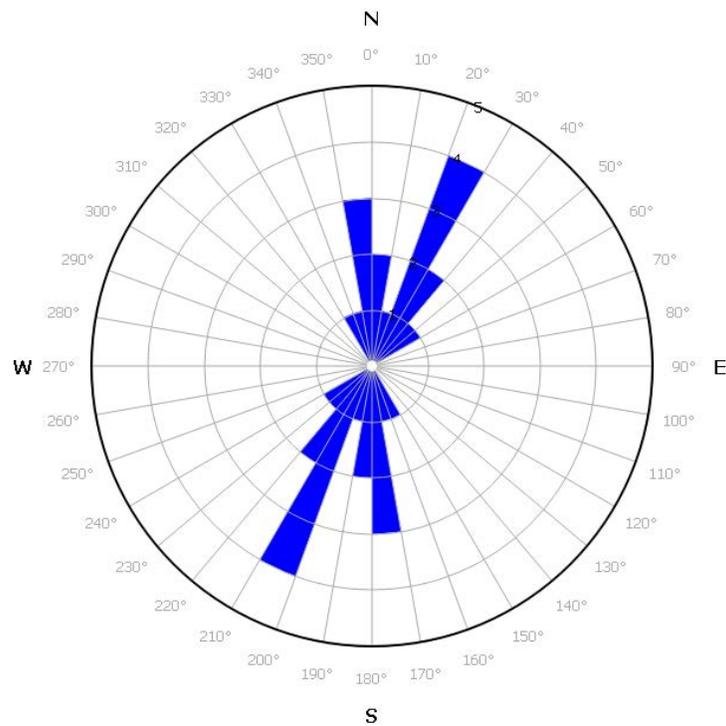


Figura 61. Rosa de rumbos de fracturas de las trazas de la falla Carmona.

Falla Papaturro: Se infiere es una falla normal, inicia en el sitio Papaturro y finaliza al noreste de finca San Martín. Posee una extensión de 4,2 km y un rumbo NE-SO, con una traza casi lineal. Pone en contacto las ignimbritas poco soldadas con las soldadas de la unidad de Ignimbrita Pan de Azúcar. Esta falla posee una dirección N20°E y buza hacia el este. A continuación, se muestran los datos de rumbo y buzamiento para esta falla en la Tabla 13 y la rosa de rumbos en la Figura 62.

Tabla 12. Datos de rumbo y buzamiento de fracturas de la Falla Papaturro.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
10	100	80
20	110	75
15	105	85

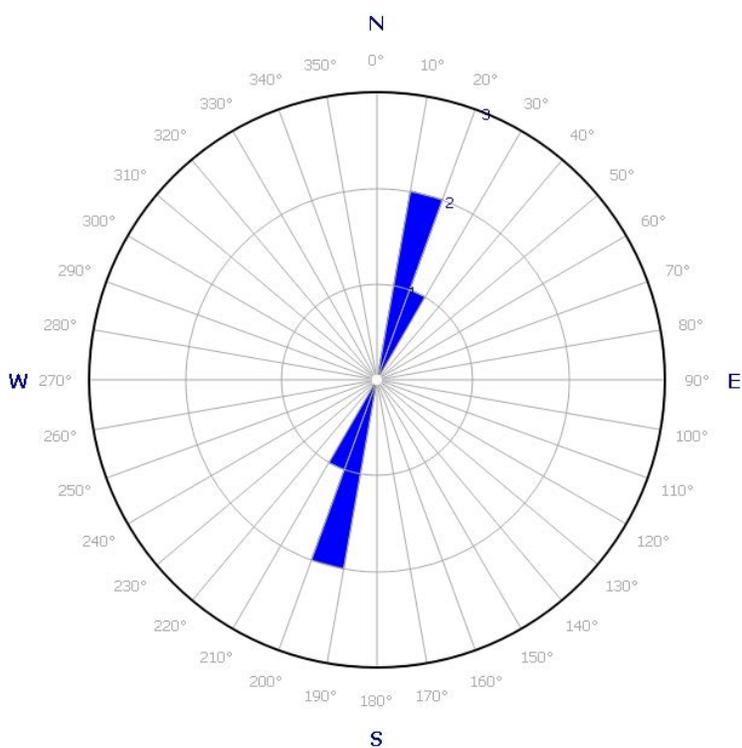


Figura 62. Rosa de rumbos de fracturas de la Falla Papaturro.

Falla Lora: Se infiere como una falla normal con una longitud aproximada de 2,5 km, se extiende desde el sitio Lora hacia el NE, con un rumbo NE-SO y una inclinación hacia el NO. Al norte del sitio Lora y hacia el este se observa una depresión alargada en la que actualmente se encuentra un lago, alimentado por el canal del oeste; igualmente en el extremo noreste de la falla se encuentra otra depresión utilizada como un pequeño embalse, alimentado por el canal del Oeste (Figura 63). En la Tabla 14 se muestran los datos de rumbo y buzamiento recolectados para esta falla y en la Figura 64 la rosa de rumbos correspondiente.

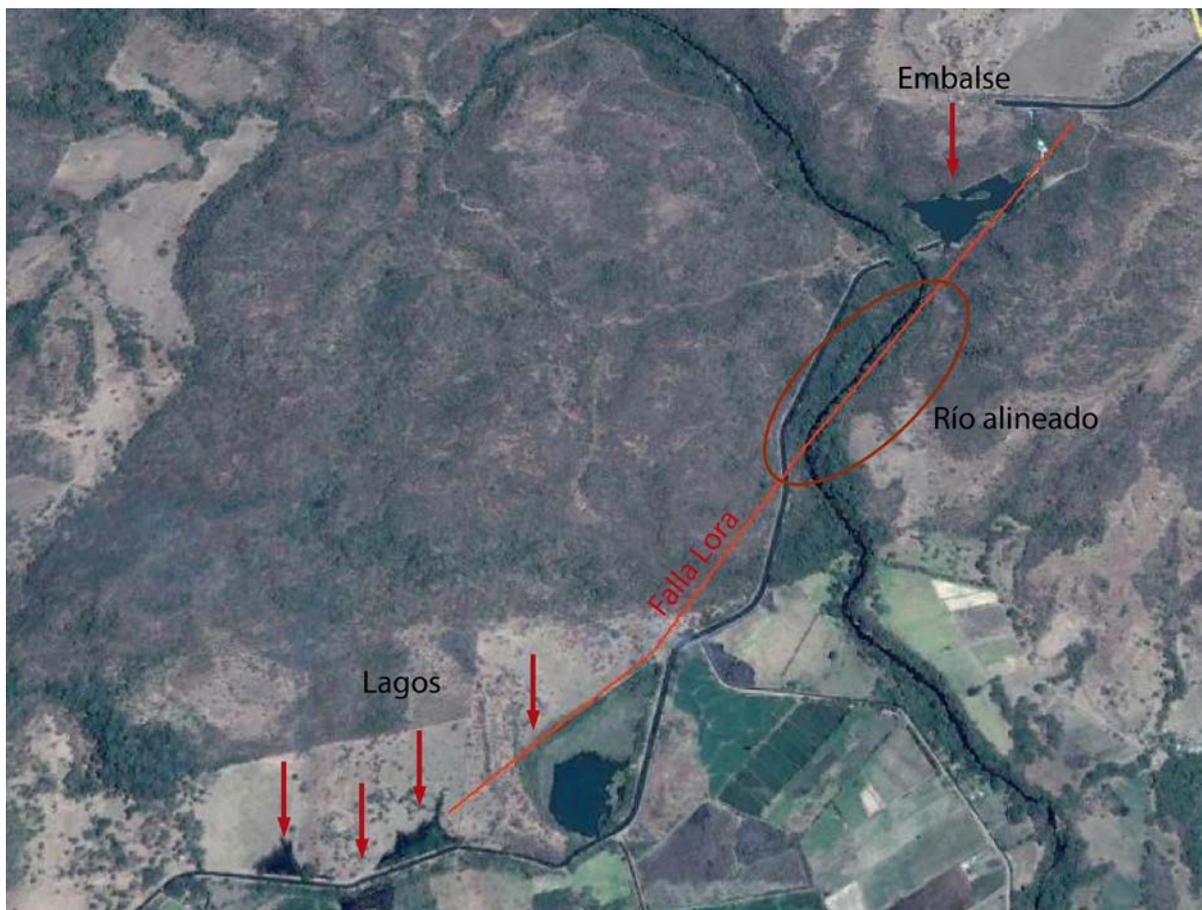


Figura 63. Rasgos morfológicos de la Falla Lora. Se observan varios lagos alineados a lo largo de la traza propuesta, así como un alineamiento en el río.

Tabla 13. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la Falla Lora.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento	Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
75	345	10	50	220	85
75	345	11	315	225	64
25	295	65	13	103	55
304	34	82	286	206	88
27	297	78	10	100	89
352	8	52	55	145	10
15	285	86	60	150	84
27	297	85	50	140	88
10	280	67	279	189	89
26	296	88	336	6	50
60	330	28	85	175	82
80	350	80	82	172	65
35	305	10	78	12	70
60	330	78	23	113	90
11	101	89	25	115	80
35	125	89	32	122	77
23	113	59	20	290	65
352	82	84	12	282	45
10	290	80	40	130	53
287	343	73	288	198	58
308	218	77	288	18	88
352	82	18	328	238	37
38	308	80	58	328	87
29	299	82	332	62	45
340	70	18	-	-	-

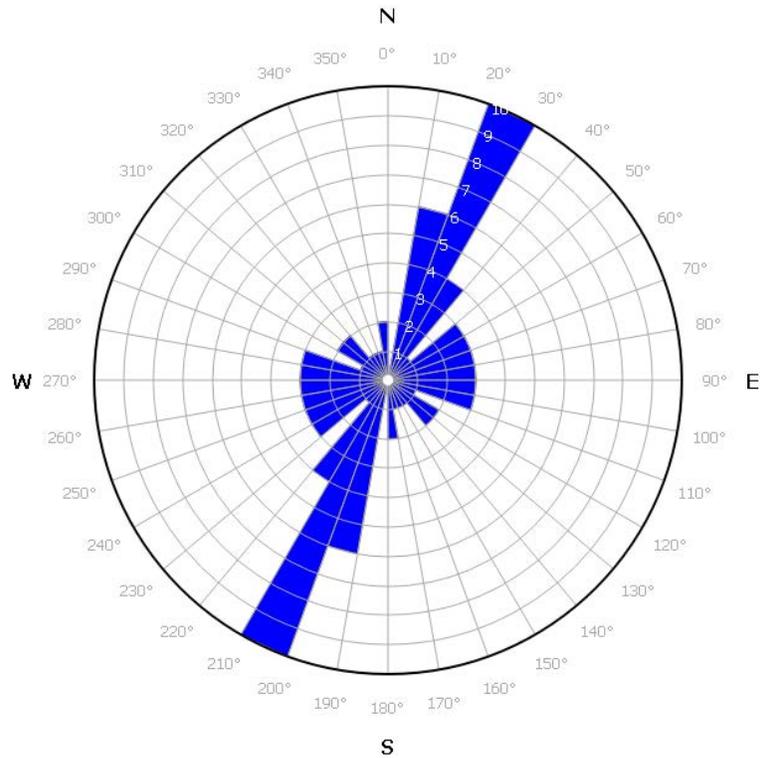


Figura 64. Rosa de rumbos de fracturas de la Falla Lora.

Falla Santa Isabel: Se extiende a lo largo de 7,5 km en el mapa. Se observa como un escarpe alineado a lo largo de toda su traza (Figura 65), en dirección NE-SO, pero hacia su parte más septentrional, este cambia a NNE-SSO. Se observa en un talud en la carretera interamericana, dos fracturas con dirección N20°E, 90° y N10°E, 85°NE, que presentan relleno blancuzco y alteración amarillenta. Al sur de finca Gaviota se observa con rumbo N15°E, 65°O y N18°E, 38°O con un desplazamiento aparente normal, inferido de acuerdo a los cambios litológicos (ver mapa geológico, Anexo 1.). También en el camino de finca Ganadería Tropical el Volcán, se midió esta falla con rumbo N25°E, 65°O (Tabla 15 y Figura 66).



Figura 65. Traza y escarpe de la falla Santa Isabel, foto tomada desde las coordenadas: 362126E/1159319N.

Tabla 14. Datos de rumbo y buzamiento de la falla Santa Isabel.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
31	121	70
35	125	78

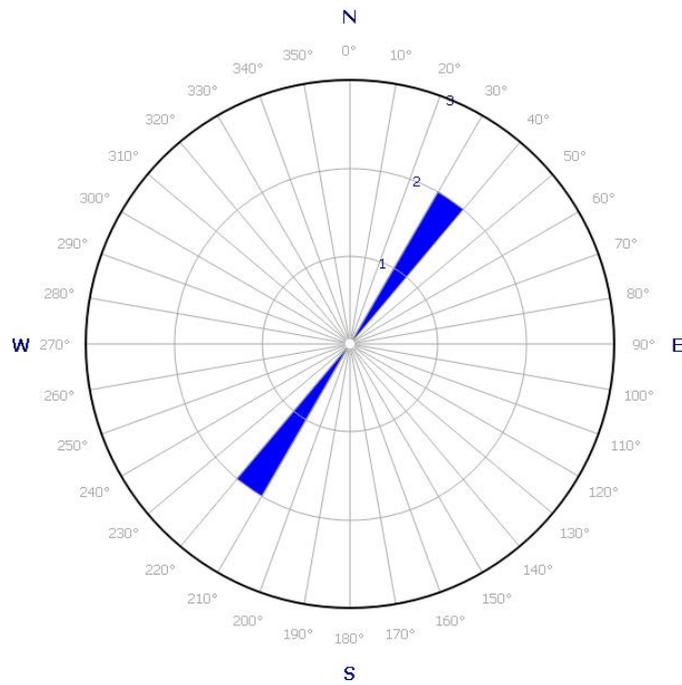


Figura 66. Rosa de rumbos de la Falla Santa Isabel.

Falla Quebrada Pital: Se extiende a lo largo de 13,7 km en el mapa, con dirección NE-SO observada en el campo en un cerro sin nombre, localizado al norte de Paso Mogote, donde existe escarpe de 20 y 40 m de altura, con una longitud menor a los 2 km, se asume se trata de una falla de tipo normal, donde el bloque SE baja en relación al NO (Figura 67 y 68). Todo ello se evidencia con claridad en el modelo de relieve y se observa en el campo, donde las rocas de la unidad Río Colorado se encuentran a una altitud menor respecto a la unidad Pan de Azúcar. En el cerro ubicado al norte de paso Mogote, se miden una serie de fracturas, en general mostrando un relleno blancuzco y relieve positivo; dichas fracturas cortan la unidad Pan de Azúcar (Figura 69). Además, se encuentra una zona de 2 m de espesor, rellena de un material blancuzco, la cual está limitada por dos planos: N10°E, 50°E y N30°E, 60°O; posiblemente el primero se asocia a la falla Bagaces y el segundo a la falla Quebrada Pital.



Figura 67. Traza y escarpe de la falla Quebrada Pital, foto tomada desde las coordenadas: 362437E/1161362N.



Figura 68. Fracturas con desplazamiento normal asociadas a la falla Quebrada Pital cortando la Unidad Cañas, afloramiento ubicado en las coordenadas 361525E/1160920N.



Figura 69. Fracturas con relieve positivo, en cerro al NO de paso Mogote, ubicado en las coordenadas :359711E/1158888N.

En la Tabla 16, se observan los datos de rumbos y buzamientos de la falla Quebrada Pital y en la Figura 70 la rosa de rumbos, donde es evidente una dirección preferencial de las fracturas hacia el N15°E, con una dirección de buzamiento hacia el este.

Tabla 15. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la falla Quebrada Pital.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
190	100	89
210	120	85
340	250	80
35	125	88
18	108	81
345	255	80
50	140	89
13	103	50
40	150	88
220	130	89
25	115	87
20	110	86
10	100	50
30	120	60
20	110	87

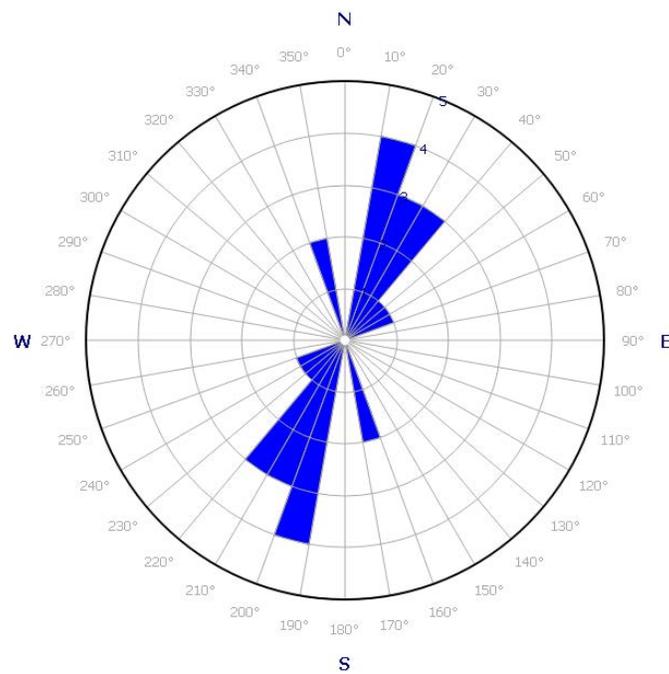


Figura 70. Rosa de rumbos de las fracturas de la falla Quebrada Pital.

Al NO de la falla Quebrada Pital, se encuentran otras dos fallas inferidas de menor longitud, 2,5 y 1,1 km respectivamente, con dirección NE-SE (Figura 54).

Fallas Normales Cabeza de Vaca:

Se trata de dos fallas en apariencia normales de longitud menor a los 2,5 km con rumbo NE-SO, ubicadas en el lado NO y SE del cerro Cabeza de Vaca. El buzamiento de dichas fallas es opuesto; la falla ubicada en el sector SE buza al SE y la del NO buza al NO (Figuras 54 y 71), en el modelo de relieve se observan dos escarpes alineados, además en el campo, se observaron zonas con alteración e intenso fracturamiento. En la Tabla 17 se muestran los datos de rumbo y buzamiento de las fracturas cercanas al trazo oriental de estas fallas; En la Figura 72 se presenta la rosa de rumbo correspondiente.

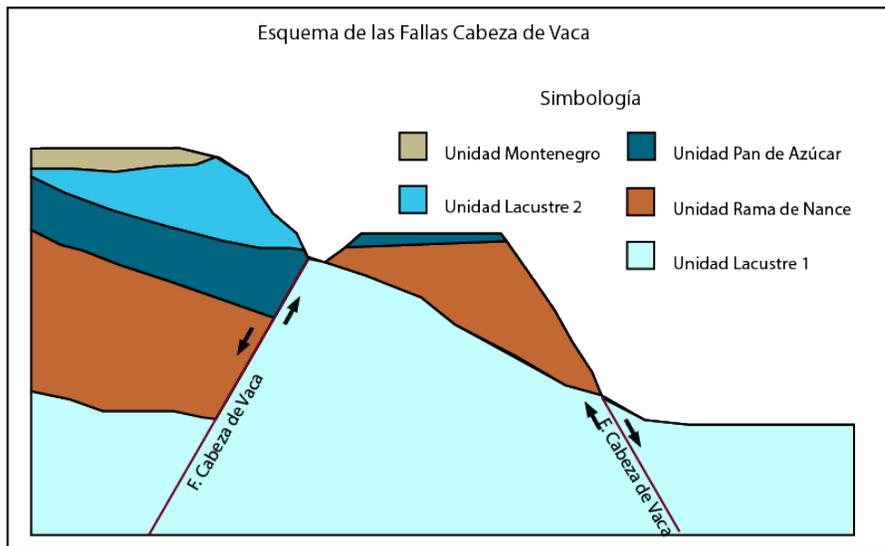


Figura 71. Perfil representativo de las fallas Cabeza de Vaca.

Tabla 16. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la Falla Cabeza de Vaca.

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
45	135	85
40	130	73
51	141	78
43	133	81

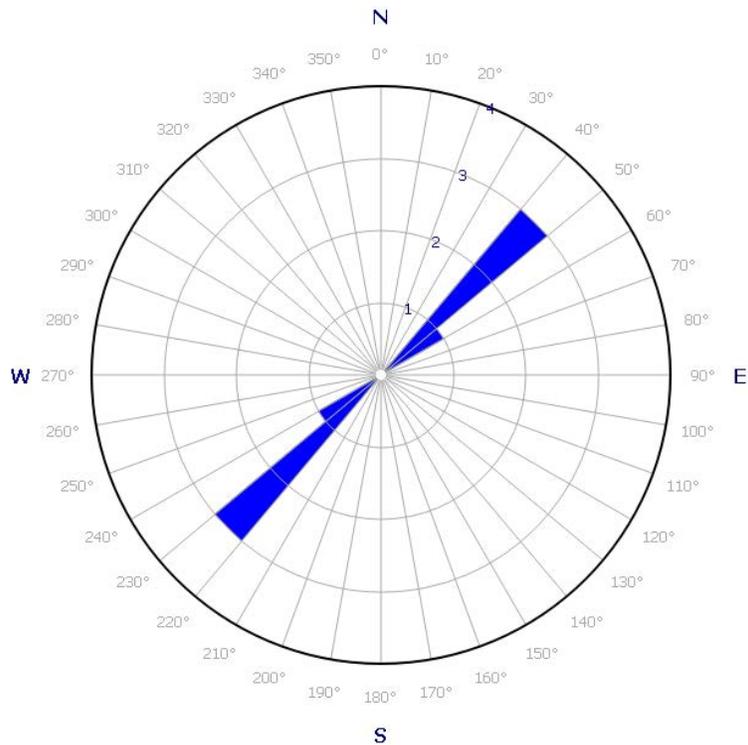


Figura 72. Rosa de rumbos de las fracturas de las fallas Cabeza de Vaca.

Falla Biscoyol:

Se extiende a lo largo de la quebrada Biscoyol, desde el sur de sitio Granadillos hasta el SO del sitio Matadero. Posee una longitud aproximada de 3 km y un rumbo SE. No se encontraron evidencias que indiquen el tipo y dirección del movimiento. Además, la quebrada Biscoyol en este sector es anómalamente rectilínea. Sin embargo, se encontraron una serie de fracturas con rumbo preferencial N50°O; los datos tomados se presentan en la Tabla 18 y en la Figura 73 se visualiza la rosa de rumbo de las fracturas asociadas a esta falla.

Tabla 17. Datos de rumbo y buzamiento de las fracturas de la Falla Biscoyol

Rumbo	Dirección de Buzamiento	Ángulo de Buzamiento
55	215	82
43	227	83
306	216	89
214	124	89
152	62	70
306	324	72
327	57	52
4	94	62
303	213	89
225	135	82
25	295	66

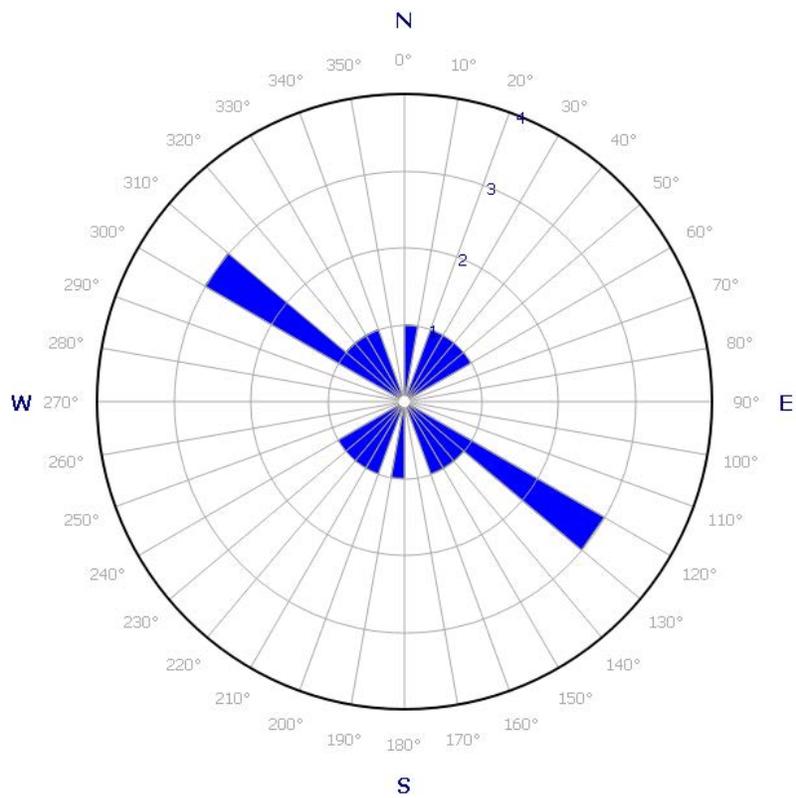


Figura 73. Rosa de rumbos de las fracturas de la Falla Biscoyol.

Alineamiento Cornizuelo:

Alineamientos observados en el modelo de elevación del terreno, de aproximadamente 3,6 km de longitud, con dirección N-S; se ubica al este de sitio Cornizuelos (Figura 54).

Alineamientos Río Piedras:

Se trata de tres alineamientos ubicados en tramos anómalamente rectos del cauce del río Piedras, la dirección de estos alineamientos es NO-SE en contraposición con el sistema de fallas Santa Isabel. No se encontraron evidencias de campo que los confirmen como fallas (Figura 54).

A continuación, en la tabla 19, se muestra un resumen de las fallas encontradas, sus características y los criterios por los cuales fueron identificadas.

Tabla 189. Resumen de fallas identificadas en el área de estudio.

Falla	Tipo de Falla	Rumbo	Criterios de identificación
Bagaces	Dextral	N-S	Trabajos previos, criterios geomorfológicos (sillas de falla, alineamientos), observaciones de campo (zonas muy fracturadas, emanación de gases, fracturas con relieve positivo).
Carmona	Normal	NE-SO	Criterios geomorfológicos (alineamientos), observaciones de campo (fracturas, estratos desplazados, zonas de alteración).
Papaturro	Normal	NE-SO	Criterios geomorfológicos (alineamientos, escarpe), observaciones de campo (zonas de alteración y fracturamiento intenso).
Lora	Normal	NE-SO	Criterios geomorfológicos (lagos alineados, río desplazado), observaciones de campo (zonas de fracturamiento y alteración).
Santa Isabel	Normal	NE-SO	Criterios geomorfológicos (escarpe, río alineado), observaciones de campo (zonas de fracturamiento y alteración).
Quebrada Pital	Normal	NE-SO	Criterios geomorfológicos (escarpe, zona pantanosa alargada), observaciones de campo (zonas de fracturamiento y alteración).
Cabeza de Vaca	Normal	NE-SO	Criterios geomorfológicos (escarpe alineado), observaciones de campo (zonas de fracturamiento y alteración).
Biscoyol	-	NO-SE	Criterios geomorfológicos (río alineado), observaciones de campo (zonas de fracturamiento intenso y alteración).

Observaciones morfoestructurales

En el área de estudio predominan las ignimbritas de poco a moderadamente soldadas y areniscas poco compactadas. Las características deleznable y poco consolidadas de estas rocas hacen difícil la preservación de evidencias tectónicas, como estrías y otros criterios cinemáticos que permitan identificar el tipo y dirección de movimiento de las estructuras. Sin embargo, se encontraron otras evidencias morfoestructónicas, de menor peso, que indican la presencia y movimientos relativos de las estructuras. Ejemplo de ellos son escarpes, ríos alineados, ríos deflectados, sillares de falla; así como otras evidencias observadas en el campo, como fracturas con relieve positivo y fallas menores con desplazamientos (Ver Figura 54).

La escasez de criterios cinemáticos imposibilita la creación de un modelo estructural preciso, en el que se muestre la dirección y naturaleza de los esfuerzos. Sin embargo, ya existen modelos cinemáticos propuestos para la región. Por ejemplo, LaFemina *et al.* (2009), revelan que además del esfuerzo compresivo con dirección NE, producto de la subducción de la placa Cocos bajo la Caribe, existe una deriva o escape tectónico paralelo a la fosa, hacia el noroeste.

Montero & Denyer (2011), en su modelo estructural para la península de Nicoya, proponen un dominio en la zona central noroeste de la península, de tipo translacional hacia el norte, donde existen fallas de movimiento dextral con rumbo N-S; estas fallas le dan peso a la teoría de escape tectónico, mencionada por LaFemina *et al.* (2009) (Movimiento de la península de Nicoya hacia el NO o *Sliver*). Montero & Denyer (2011), proponen un modelo en el cual existen bloques limitados por fallas dextrales, dentro de los cuales existe una transrotación en el sentido de las manecillas del reloj

Además, en la Figura 74 se observa a la izquierda la traza de la Falla Bagaces (Denyer *et al.*, 2014; Climent *et al.*, 2016; y la parte central de la traza, observada en este trabajo) y a la derecha la Falla Montenegro (Climent *et al.*, 2016). Ambas son fallas dextrales de gran extensión y corresponden con los límites de uno de los bloques propuestos por Montero & Denyer (2011). Además, entre estas dos estructuras, se han encontrado una serie de fallas menores de rumbo NE-SO, las cuales se infiere son fallas de acomodamiento, formadas por los esfuerzos de las fallas principales. Estas fallas menores conforman un sistema de horst-graben que se observa claramente en los cambios litológicos (Ver Anexo 1).

Las fallas presentes en el área de estudio son neotectónicas, esto basado en los terremotos de Bagaces ocurridos en 1935 y 1941, los cuales fueron asignados las fallas Bagaces y Motenegro, por Montero & Alvarado (1988) y Climent *et al.* (2016). Adicionalmente, se encontró que las fallas cortan a las unidades desde la Unidad Falconiana ($> 3,64 \pm 0.066$ Ma, Mioceno Superior-Plioceno?) hasta la Unidad Montenegro ($1,87 \pm 0,05$ Ma, Pleistoceno Inferior); sin embargo, no se observaron desplazando la Unidad de Depósitos Recientes, probablemente por la escasez y poco espesor de esta unidad.

MAPA REGIONAL DE FALLAS

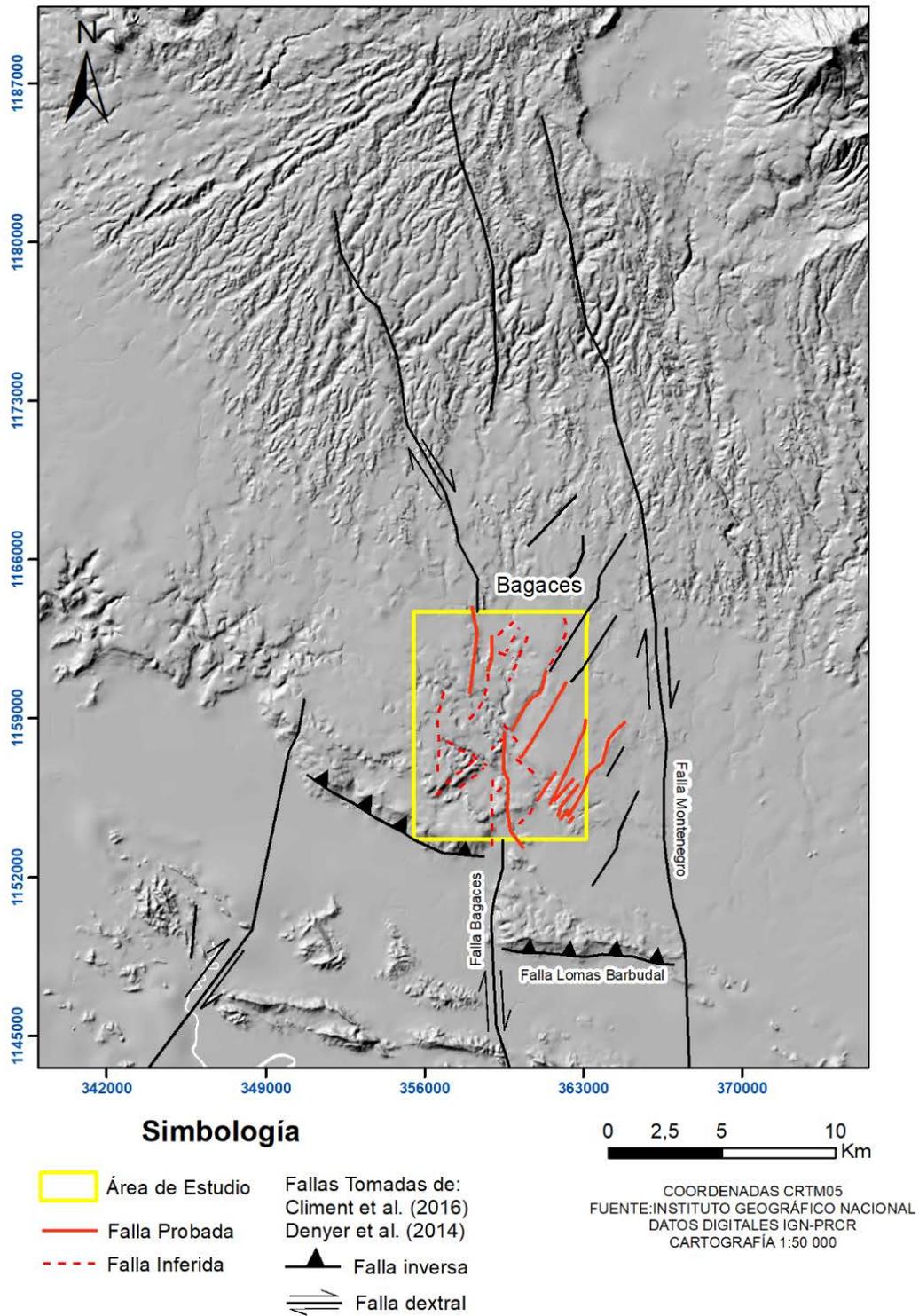


Figura 74. Mapa regional de fallas, incluye las fallas de Climent et al. (2016), Denyer et al. (2014) y las de este trabajo (en rojo).

Capítulo V. Conclusiones

Historia geológica

De acuerdo con las edades de las rocas expuestas en el área de estudio, es posible decir que el periodo de formación abarca desde el Plioceno hasta la actualidad. Según Denyer *et al.* (2014), durante el Mioceno superior ocurrió un evento tectónico y un incremento en la actividad volcánica, en la cual se generaron grandes volúmenes de ignimbritas, así como las dacitas Carbonal. Con este incremento en la actividad volcánica inicia la historia de la secuencia analizada en este trabajo. Lo anterior se comprueba con el presente estudio de detalle

Las rocas más antiguas, encontradas en el área, corresponden con extensos depósitos fluviales, depositados por un río importante, quizá el paleo-Tempisque o uno de sus afluentes principales, el cual depositó gran cantidad de sedimentos, en su mayoría finos y medios, enriquecidos en componentes volcánicos. La abundante presencia de fragmentos de pómez bien preservados en las litofacies, sugieren depósitos en periodos sineruptivos, o sea resedimentación inmediatamente después de la erupción, o una resedimentación posteruptiva en un corto período después de la erupción.

Las capas de areniscas laminadas finas (Alf) y las facies enriquecidas en elementos orgánicos, así como las que poseen una menor cantidad de fragmentos volcánicos, o aquellas en las que el retrabajo es muy evidente, representan periodos intereruptivos, cuando disminuía drásticamente la actividad volcánica y dominaba el ambiente fluvial. Probablemente, el ambiente depositacional era similar al actual, donde ocurren depósitos normales de pequeño espesor en verano y grandes acumulaciones de sedimentos durante las avenidas en la estación lluviosa, dejando depósitos en bancos de arenas cercanos al cauce y sedimentos más finos en la llanura de inundación, así como cambios en el curso de los ríos, que se evidencian por la presencia de canales abandonados.

A inicios del Plioceno, posterior a la depositación de la unidad Falconiana, hubo actividad volcánica fisural e hipoabisal, emplazamiento de lavas Agua Fría. Además, hubo un basculamiento de las rocas de la Unidad Agua Fría hacia el NNE en el sector sur del área de estudio. Posteriormente, durante el Plioceno y el Pleistoceno Inferior, se mantuvo una intermitencia entre periodos eruptivos, durante los cuales se depositaron las unidades Rama de Nance, Pan de Azúcar, Río Colorado, Cañas y, por último, Montenegro. Entre cada periodo eruptivo hubo un tiempo erosión de las rocas y depositación de los sedimentos volcanoclásticos, formándose así las areniscas y demás rocas sedimentarias y paleosuelos que se encuentran intercalados entre los depósitos volcánicos. Denyer & Alvarado (2007) y Denyer *et al.* (2014) consideran que durante el Mioceno hubo una compresión regional NNE-SSW, similar a la que existe desde el Plioceno al presente. Conjuntamente, Montero & Denyer (2011), proponen un dominio neotectónico de tipo translacional hacia el N, para la zona central-NO de la península de Nicoya, donde predominan fallas dextrales con rumbo N-S, similares a las fallas neotectónicas encontradas en el área de estudio.

La actividad volcánica frecuente genera un gran aporte de material que modificó la topografía y patrón de drenaje de la cuenca fluvial, lo cual produjo cambios en los canales principales. Las intercalaciones de litofacies, enriquecidas o no en elementos de origen volcánico, se asocian

directamente a periodos sineruptivos e intereruptivos, en los cuales los cambios en los niveles base de la cuenca y los amplios depósitos de ignimbritas, permitió la generación de llanuras de inundación amplias.

Actualmente, la región se encuentra en un periodo intereruptivo, en un ambiente fluvial, donde predominan la erosión de las rocas expuestas y sus respectivos depósitos; sin embargo, en este periodo no se observan casi nada de clastos grandes de pómez.

Conclusiones

- Durante el trabajo de campo se comprobó la existencia de cuatro ignimbritas bien diferenciadas y separadas por depósitos fluviales y paleosuelos; así como la presencia de una unidad lávica. También se comprobó que dentro de la Fm. Bagaces no existe un único miembro compuesto por depósitos fluviolacustres, sino más bien dichos depósitos se encuentran intercalados entre los eventos volcánicos.
- La estratigrafía del área de estudio está compuesta por la Formación Bagaces, que se divide, de la base al techo, en las siguientes unidades informales: Falconiana, Rama de Nance, Biscoyol, Pan de Azúcar, Bejuquito, Río Colorado, Cañas, Veraneras, Montenegro y Depósitos Recientes.
- La Unidad Falconiana está compuesta principalmente por areniscas tobáceas de muy finas a gruesas, es la base de la secuencia en el área de estudio y posee más de 70 m de espesor. Corresponden con depósitos de origen fluvial extensos, característicos de canales y llanura aluvial.
- La Unidad Rama de Nance es una ignimbrita poco soldada. En los afloramientos, únicamente se observa la sección 2b de la unidad de flujo, enriquecida en líticos en la base y en pómez en el techo; petrográficamente se trata de una ignimbrita pumítico-lítica poco soldada de composición dacítica. El espesor máximo medido para esta unidad es de 23 m. El enriquecimiento en líticos en la base y pómez en la cima, concuerda con las características de la capa 2b de una unidad de flujo.
- La Unidad Biscoyol corresponde con areniscas medias, gruesas, conglomerados finos y areniscas gujarrosas, con variaciones de espesor entre 3 y 5 m.
- La Unidad Pan de Azúcar, se trata de una ignimbrita dividida en dos secciones, de acuerdo al grado de soldamiento. La sección inferior es poco soldada con escorias dacíticas, negras de hasta 35 cm, *fiammes* pequeños de máximo 5 cm y líticos de composición andesítica y dacítica. La sección superior posee una matriz vidriosa bien soldada con *fiammes* dacíticos, negros y vidriosos de hasta 48 cm de largo y una menor cantidad de líticos que la sección inferior. El espesor máximo de esta unidad es de 30 m y la edad asignada es de $3,64 \pm 0,66$ Ma (Alvarado & Gans, 2012).

- La Unidad Bejuquito posee afloramientos escasos y pequeños de conglomerado polimítico y areniscas finas, medias, gruesas y guijarrosas enriquecida en pómez, de colores gris, gris verdoso y café blancuzco, con estratificación paralela y cruzada. Además, al final de la secuencia se encuentra un paleosuelo limo con arenoso. El espesor máximo de esta unidad es de 3,5 m. Estos depósitos corresponden con un ambiente fluvial de llanura aluvial donde predominaron los depósitos de canales y barras arenosas.
- Continuando la secuencia se encuentra la unidad Río Colorado, compuesta por una ignimbrita de color gris-rojizo a rojo, moderadamente soldada, fácil de reconocer en el campo por su coloración rojiza y una disyunción columnar incipiente en el techo de la unidad.
- Sobreyaciendo la unidad Río Colorado se encuentra el flujo de pómez Cañas, característico por no ser soldada y poseer pómez blanco-rosáceas, con laminaciones paralelas y cruzadas.
- La Unidad Veraneras consiste en una intercalación, de poco espesor, de areniscas desde muy finas a gruesas guijarrosas con laminaciones paralelas, cruzadas, estructuras de carga, óxidos de hierro, así como horizontes enriquecidos en componentes volcánicos; el espesor máximo es de 3 m y los afloramientos son de dimensiones limitadas. El ambiente de formación de esta unidad es fluvial, con facies de barras arenosas, llanura aluvial y canales.
- Por último, en la cima de la secuencia se encuentra la ignimbrita Montenegro, la cual generalmente se encuentra como una capa homogénea de poco espesor, entre 1 y 2 m, con *fiammes* gris oscuro, clastos de obsidias y de pómez rojo-rosado, moderadamente soldada. En algunos sectores posee disyunción columnar completa.
- En un mismo afloramiento las rocas pueden presentar variaciones de color (unidad Río Colorado) y cambios texturales (Unidad Cañas, Pan de Azúcar y Rama de Nance), debido a meteorización y a cambios composicionales y variaciones laterales y verticales en los flujos ignimbríticos.
- Las ignimbritas poseen espesores muy variables, debido al control topográfico imperante durante su depositación. Además, todas (a excepción de la Unidad Rama de Nance), son ignimbritas de medianamente soldadas a bien soldadas (Sección superior de la ignimbrita Pan de Azúcar), algunas inclusive poseen disyunción columnar y *fiammes* superiores a los 0,5 m de largo.
- Se encontraron depósitos fluviales separando todas las capas de ignimbrita. Además, dentro de estos depósitos se observaron cuatro paleosuelos limosos, que corresponden con hiatos depositacionales, donde hubo un equilibrio entre la erosión y la sedimentación.
- La acumulación de líticos con gradación normal en la base y pómez con gradación inversa en el techo de las capas 2b, se deben a las diferencias de densidad entre la matriz, los clastos

tanto líticos, son más densos y se van al fondo, como pumíticos que flotan en la parte superior del flujo.

- Los depósitos encontrados representan intercalaciones entre periodos eruptivos, donde predominan los depósitos volcánicos y periodos inter-eruptivos donde imperó la dinámica fluvial.
- En cuanto a la geología estructural, se identificó por medio de morfología y otros criterios de campo, la traza de la falla Bagaces, la cual corresponde con la falla principal, presente en el área. Además, se encontraron fallas asociadas, probablemente de acomodamiento con dirección NE-SO, como el sistema de fallas Pital.
- El bloque del sector oeste del área de estudio baja tectónicamente producto del desplazamiento de la falla Bagaces, con una diferencia de elevación con respecto al lado este de hasta 30 m. La falla Bagaces es de tipo dextral.
- El sistema de falla Pital forma una especie de escalera que es posible observar en el mapa geológico (Anexo 1), así como un sistema de *horst-graben*, en los alrededores de la loma Pan de Azúcar.
- Las fallas encontradas en la zona corresponden, la falla Bagaces con una falla dextral neotectónica, que junto con la falla Montenegro, propuesta por Climent *et al.* (2016), forman un bloque limitado por fallas dextrales con rumbo N-S, similar a lo propuesto por Montero & Denyer (2011). Entre estas dos fallas, se ubican fallas normales de acomodamiento con rumbo NE-SO, que conforman un sistema horst-graben.
- La escasez de criterios cinemáticos imposibilita la creación de un modelo estructural preciso, en el que se muestre la dirección y naturaleza de los esfuerzos. Sin embargo, existen modelos cinemáticos propuestos por LaFemina *et al.* (2009), Montero & Denyer (2011) & Denyer *et al.* (2014), que revelan que además del esfuerzo compresivo con dirección NNE, producto de la subducción de la placa Cocos bajo la Caribe, existe una deriva o escape tectónico, de la península de Nicoya, paralelo a la fosa, hacia el noroeste.
- Se recolectaron los datos para la elaboración de los mapas de isopleas, para la determinación de la fuente de origen de las ignimbritas; sin embargo, debido a la amplia distribución de las mismas y lo reducido del área de estudio en comparación con su extensión, los mapas no generaron resultados relevantes que indicaran la fuente de las mismas, por lo que se recomienda darle seguimiento a las ignimbritas en un área mayor para poder determinar a ciencia cierta la fuente.

Capítulo VI. Referencias

- AIAZZI, D., FIORLETTA, M., CIVELLI, G., CHIESA, S. & ALVARADO, G. E., 2004: GEOLOGÍA DE LA HOJA CAÑAS.- Rev. Geol. Amér. Central, 30:215-233.
- ALVARADO, G. E. & GANS, P. B., 2012: SÍNTESIS GEOCRONOLÓGIC DEL MAGNETISMO, METAMORFISMO Y METALOGENIA DE COSTA RICA, AMERICA CENTRAL.- Rev. Geol. Amér. Central, 46:7 – 122.
- BOHNENBERGER, O., 1968: UN RECONOCIMIENTO FOTOGEOLOGÍCO EN GUANACASTE.- 33 págs. Ministerio de Agricultura y Ganadería [Informe Interno].
- BORRERO, C., ROSERO, J., VALENCIA, J. & PARDO, A., 2008: LA SECUENCIA VOLCANICLASTICA DE ARANZAZU: REGISTRO DEL IMPACTO DEL VOLCANISMO EN UN SISTEMA FLUVIAL NEOGENO EN LA PARTE MEDIA DE LA CORDILLERA CENTRAL, COLOMBIA.-Boletín de geología Univ. de Caldas, 30:61-77.
- BULL, K. & McPHIE, J., 2007: FIAMME TEXTURES IN VOLCANIC SUCCESSIONS: FLAMING ISSUES OF DEFINITION AND INTERPRETATION. J. Volcanol. and Geotherm. Res. 164:205-216.
- CAS, R.A.F. & WRIGHT, J.V., 1987: VOLCANIC SUCCESSIONS, MODERN AND ANCIENT. -528 págs. Allen & Unwin, London, Englan.
- CHIESA, S., CORELLA, M. & MORA, O., 1987: GEOLOGÍA DE LA MESETA IGNIMBRITICA DE SANTA ROSA, GUANACASTE, COSTA RICA.- 133 págs. Instituto Costarricense de Electricidad, San José [Inf. Interno].
- CHIESA, S., CIVELLI, G., GILLOT, P.-Y., MORA, O. & ALVARADO, G. E., 1992: ROCAS PIROCLÁSTICAS ASOCIADAS CON LA FORMACIÓN DE LA CALDERA DE GUAYABO, CORDILLERA DE GUANACASTE COSTA RICA.- Rev. Geol. Amér. Central, 14:59-75.
- CIVELLE, G., 1990: GEOLOGIA DELLA CORDIGLIERA DEL GUANACASTE (Costa Rica): le piroclastiti dell' area Chorotega. Tesis. Univ. degli Studi di Milano, Dipartimento de Costa Rica, San José.

- DAVID, A., 2005: THE BAGACES FORMATION IN THE GUANACASTE PROVINCE, COSTA RICA; Refined stratigraphy and petrology.- 208 págs. Universitae zu Kiel, Alemania [Tesis M. Sc.].
- DENGO, G., 1962: ESTUDIO GEOLÓGICO DE LA REGIÓN GUANACASTE, COSTA RICA, Costa Rica.- 141 págs. Instituto Geográfico de Costa Rica, San José.
- DENYER, P., AGUILAR, T. & MONTERO, W., 2014: CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA PENÍNSULA DE NICOYA: estratigrafía y tectónica.- 207 págs. Editorial Universidad de Costa Rica, San José.
- DENYER, P., & ALVARADO, G., 2007: MAPA GEOLÓGICO DE COSTA RICA.- Mapa escala 1:400 000, Librería Francesa, San José.
- DÓNDOLI, C., 1950: LIBERIA Y SUS ALREDEDORES.- 8 págs. Boletín Técnico No.3, Ministerio de Agricultura e Industria.
- FISHER, V. & SMITH, G.A., 1991: SEDIMENTATION IN VOLCANIC SETTINGS. Society for sedimentary Geology, especial publication 45:255-263.
- FISHER, V. & SCHMINCKE, H.-U., 1984: PIROCLASTIC ROCKS.-472 págs. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- FRANCO, S. & VALDEZ, Ma. E., 2003: PRINCIPIOS BÁSICOS DE CARTOGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA AUTOMATIZADA.-155 págs. Univ. Autónoma del Estado de México, Toluca.
- FREUNDT, A., WILSON, C.J.N. & CAREY, S.N., 2000: IGNIMBRITES AND BLOCK AND ASH FLOW DEPOSITS. EN: SIGURDSSON, H.: ENCYCLOPEDIA OF VOLCANOES [2ª ed.], Academic press, 581-599. London, England.
- FREUNDT A. & SCHMINCKE H.U., 1985: HIERARCHY OF FACIES PYROCLASTIC FLOW DEPOSITS GENERATED BY LAACHER SEE-TYPE ERUPTIONS.- Geology, 13:278-281.

- GIFKINS, C., HERRMANN, W. & LARGE, R., 2005: ALTERATED VOLCANIC ROCKS: A GUIDE TO DESCRIPTION AND INTERPRETATION. -275 págs. Centre for Ore deposit Research, University of Tasmania, Australia.
- GILLOT, P.-Y., CHIESA, S. & ALVARADO, G. E., 1994: CHRONOSTRATIGRAPHY OF UPPER MIOCENE-QUATERNARY VOLCANISM IN NORTHERN COSTA RICA. *Geol. Amér. Central*, 17:45 – 53.
- LAFEMINA, P., DIXON, T.H., GOVERS, R., NORABUENA, E., TURNER, H., SABALLOS, A., MATTIOLI, G., PROTTI, M. & STRAUCH, W., 2009: FORE ARC MOTION AND COCOS RIDGE COLLISION IN CENTRAL AMERICA: GEOCHEMISTRY GEOPHYSIS GEOSYSTEMS, 10(1), doi: 10.1029/2008GC002181.
- LE MAITRE, R.W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B., LE BAS, M.J., BONIN, B., BATEMAN, P., BELLINI, G., DUDEK, A., EFREMOVA, S., KELLER, J., LAMEYRE, J., SABINE, P.A., SCHMID, R., SORENSEN, H. & WOOLLEY, A.R., 2002: *Igneous Rock a classification and glossary of terms* [2ª ed.]-236 págs. Cambridge University Press.
- MACKENZIE, W.S. & GUILFORD, C., 1996: ATLAS DE PETROGRAFÍA: MINERALES FORMADORES DE ROCA EN LÁMINA DELGADA.-98 págs. Masson S.A., Madrid.
- MACKENZIE, W.S., DONALDSON, C.H. & GUILFORD, C., 1996: ATLAS DE ROCAS IGNEAS Y SUS TEXTURAS.-148 págs. Masson S.A., Madrid.
- MANSOR, S., 2005: THE POST CARBONAL UNITS OF THE BAGACES FORMTION: The Meseta de Santa Rosa (National Park Santa Rosa, Costa Rica).- 54 págs. Universitae zu Kiel, Alemania [Tesis M. Sc.].
- MARQUARDT, M., 2005: REFINED STRATIGRAPHY OF THE BAGACES FORMTION, SANTA ROSA NATIONAL PARK/ COSTA RICA.- 73 págs. Universitae zu Kiel, Alemania [Tesis M. Sc.].
- MARSHALL, P., 1935: ACID ROCKS OF THE TAUPO-ROTORUA VOLCANIC DISTRIC. *Trans. R Soc. N.Z.*, 64: 323-366.

- MIALL, A., 2006: THE GEOLOGY OF FLUVIAL DEPOSITS: SEDIMENTARY FACIES, BASIN ANALYSIS, AND PETROLEUM GEOLOGY [4ª ed.]-582 págs. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, Berlin.
- MONTERO, W. & ALVARADO, G., 1988: LOS TERREMOTOS DE BAGACCES 1935 Y 1941: NEOTECTONISMO TRANSVERSAL A LA CORDILLERA DE GUANACASTE.-Ciencia y Tecnología, 12:69-87.
- MONTERO, W. & DENYER, P., 2011: FALLAMIENTO NEOTECTONICO DE LA PENINSULA DE NICOYA Y RELACIÓN CON EL ESCAPE TECTONICO DEL ANNTEARCO CENTROAMERICANO.-Rev. Geol. Amér. Central, 45:9-52.
- MORALES, L., 1985: LAS ZONAS SISMICAS DE COSTA RICA Y ALREDEDORES. - Rev. Geol. Amér. Central, 3: 69 – 101.
- MURCIA, H., BORRERO, C., PARDO, N., ALVARADO, G. E., ARNOSIO, M. & SCOLAMACCHIA, T., 2013: Depósitos volcaniclásticos: Términos y conceptos para una clasificación en español.- Rev. Geol. Amér. Central, 48: 15 - 39.
- PECCHIO, M., 1990: GEOVOLCANOLOGIA E PETROCHIMICA DELLA CORDIGLIERA DI GUANACASTE (Costa Rica): le lave dell'area Chorotega.-189 págs. Tesis. Univ. degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra.
- PÉREZ, W., 2000: VULCANOLOGÍA Y PETROQUÍMICA DEL EVENTO IGNIMBRÍTICO DEL PLEISTOCENO MEDIO DEL VALLE CENTRAL DE COSTA RICA.-170 págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de costa Rica [Tesis Lic.]
- PETIT, J.P., 1987: PRINCIPLES OF SENSE OF MOVEMENT ON FAULT SURFACE IN BRITTLE ROCKS.- Journal of Structural Geology, 9: 577 - 608.
- PIERSON, T.C. & SCOTT, K.M., 1999: SUPERFICIAL HYDROGEOLOGIC HAZARDS AND VOLCANOES: DEBRIS AVALANCHES, LAHARS AND FLOODS: processes, interpretation of deposits and tecniques of hazard assessment and mitigation.-U.S. Geological Survey, open-file report. 137 págs.

PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO, 1975: INVESTIGACIONES DE AGUAS SUBTERRANEAS EN ZONAS SELECCIONADAS DE COSTA RICA.- 261 págs. Informe técnico del programa de Naciones Unidas para el desarrollo, New York.

REINECK, H. & SINGH, I., 1980: DEPOSITIONAL SEDIMENTARY ENVIROMENTS WITH REFRENCE TO TERRIGENUOS CLASTICS [2ª ed.].-549 págs. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.

SCHMINCKE, H.-U. AND VAN DEN BOGAARD, P., 1991: TEPHRA LAYERS AND TEPHRA EVENTS IN: G. EINSELE, W. RICKEN, AND SEILACHER (Eds), CYCLES AN EVENTS IN STRATIGRAPHY.-Springer-Verlag Berlin, 429 págs.

SEMM, W., 2005: PLIOCENE IGNIMBRITES AROUND CAÑAS, GUANACASTE, COSTA RICA.- 133 págs. Universitae zu Kiel, Alemania [Tesis M. Sc.].

SMITH, G. A., 1991:FACIES SEQUENCES AND GEOMETRIES IN CONTINENTAL VOLCANICLASTICS SEDIMENTES.- Society for sedimentary Geology, especial publication 45:109-121.

SPARKS, R.S.J., SELF, S. & WALKER, G.P.L., 1973: PRODUCTS OF IGNIMBRITE ERUPTIONS.- Imperial College, geology department: 115-118, London, England.

SZYMANSKI, D., 2007: MAGMATIC EVOLUTION OF IGNIMBRITES IN THE BAGACES FORMATION, GUANACASTE PROVINCE, COSTA RICA.- 367 págs. Michigan State University, Michigan [Tesis Ph. D].

VERA, J., 1994: ESTRATIGRAFÍA: PRINCIPIOS Y MÉTODOS.-799 págs. Ed. Rueda S.L., Madrid, España.

VOGEL, T., PATINO, L., ALVARADO, G. E. & GANS, P. B., 2004: SILICIC IGNIMBRITES WITHIN THE COSTA RICAN VOLCANIC FRONT: EVIDENCE FROM THE FORMATION OF CONTINENTAL CRUST.- El Sevier, 226: 149 – 159.

VOGEL, T., PATINO, L., EATON, J., VALLEY, J., ROSE, W., ALVARADO, G. E. & VIRAY, E., 2006: ORIGIN OF SILICIC MAGMAS ALONG THE CENTRAL AMERICAN VOLCANIC FRONT: Genetic relationship to mafic melts.- J. Volcanol. Geother. Res., 156: 217 – 228.

VILLEGAS, A., 1997: GEODINAMICA DE LA CORDILLERA DE TILARÁN. -130 págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica [Tesis Lic.].

WALKER, R. & JAMES, N., 1992: FACIES MODELS.-409 págs. Geological Association of Canada, Saint Johns, Canada.

WHITE, J.D., MANVILLE, V., WILSON, C., HOUGHTON, B., RIGGS, N., & ORT, M., 2001: SETTLING AND DEPOSITION OF AD 181 TAUPO PUMICE IN LACUSTRINE AND ASSOCIATED ENVIRONMENTS.- Spec. Publis int. Ass. Sediment. 30: 141-150.

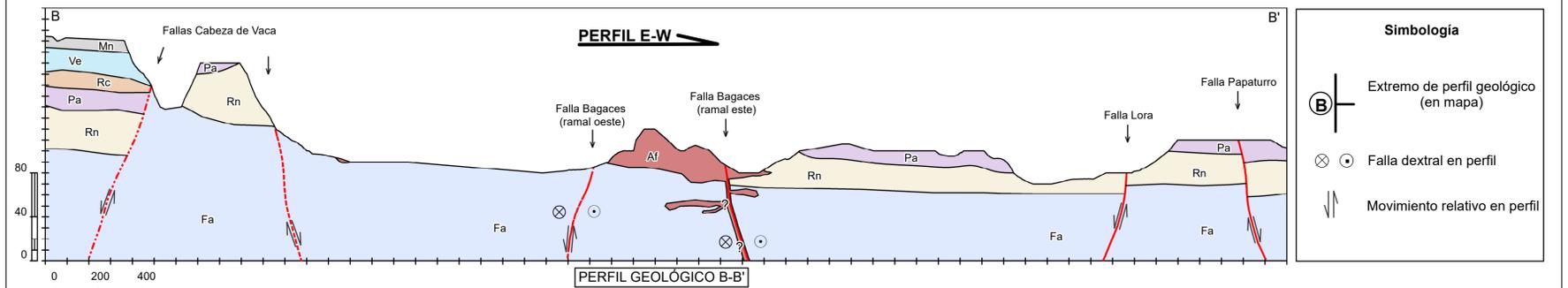
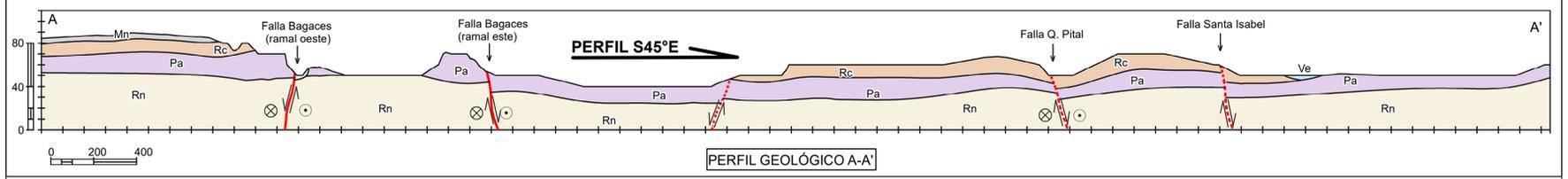
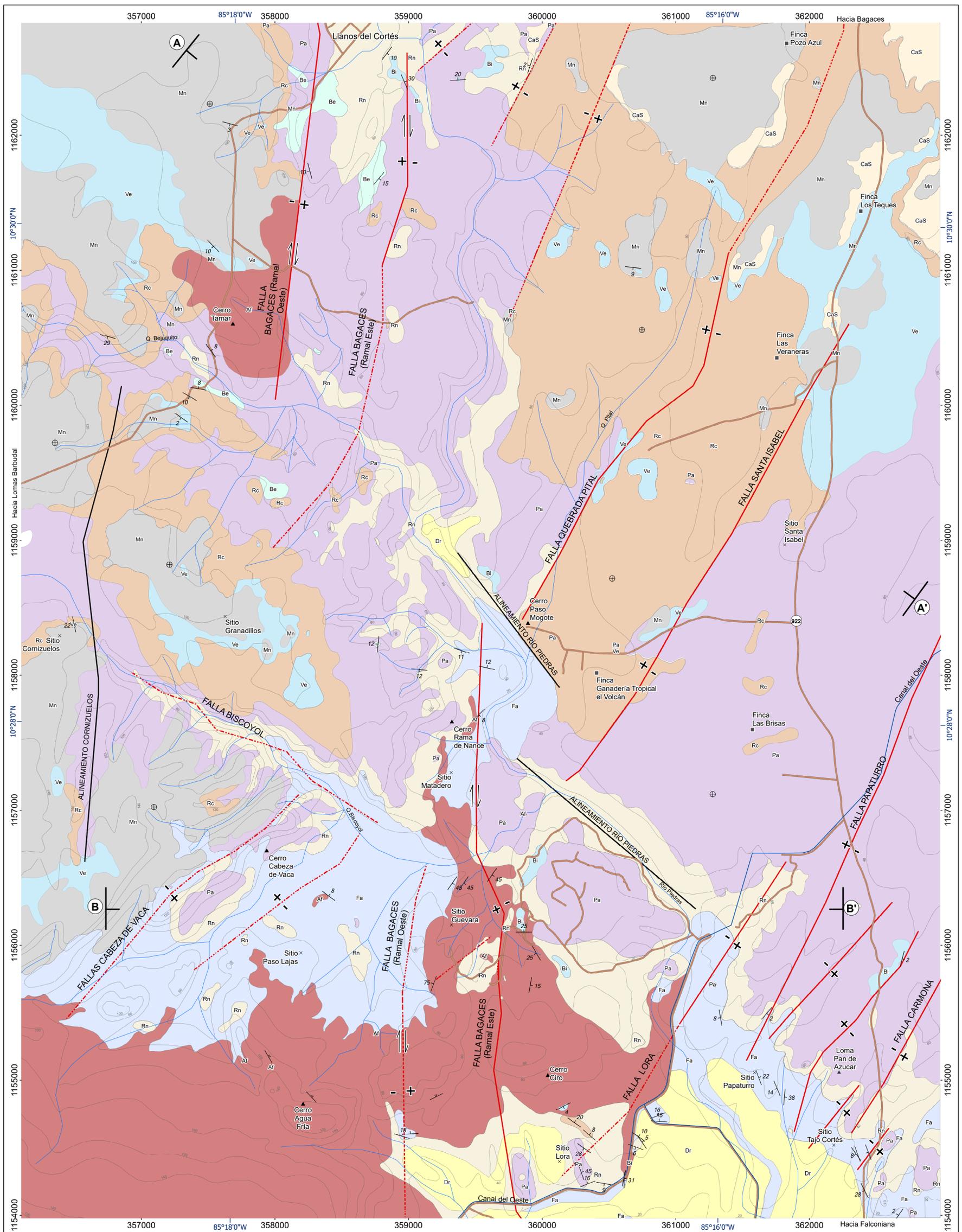
ZIEGLER, M., 2005: THE IGNIMBRITES OF THE BAGACES FORMATION, SANTA ROSA NATIONAL PARK, COSTA RICA.- 53 págs. Universitae zu Kiel, Alemania [Tesis M. Sc.].

ANEXOS

ANEXO 1. Mapa geológico

ANEXO 2. Detalle de las columnas estratigráficas de las unidades fluviales

Anexo 1. Mapa Geológico



Simbología

- Extremo de perfil geológico (en mapa)
- Falla dextral en perfil
- Movimiento relativo en perfil

Simbología

- Cerro
- Pueblo
- Estratificación inclinada fotogeológica
- Estratificación horizontal
- Falla Neotectónica
- Falla Neotectónica Inferida
- Alineamientos
- Ríos
- Canal del Oeste
- Curvas de nivel
- Caminos

Unidades Geológicas

Edad (Ma)	Unidad
0	Depósitos Recientes (Dr)
1,87 ± 0,05	Montenegro (Mn)
> 1,87 ± 0,05	Veraneras (Ve)
2,06 ± 0,02	Cañas (CaS)
2,08 ± 0,01	Río Colorado (Rc)
> 2,08 ± 0,01	Bejuquito (Be)
3,64 ± 0,066	Pan de Azúcar (Pa)
> 3,64 ± 0,066	Biscoyol (Bi)
> 3,64 ± 0,066	Agua Fría (Af)
> 3,64 ± 0,066	Rama de Nance (Rn)
> 3,64 ± 0,066	Falconiana (Fa)

MAPA GEOLÓGICO DEL SECTOR NORESTE DE LOMAS BARBUDAL

Geisell Albania Barrantes Sandoval
2018

Base topográfica
Instituto Geográfico Nacional
Coordenadas CRTM05 (Negro)
Coordenadas geográficas (Azul)

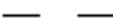
Proyección Costa Rica
Transversal Mercator
2005

Ubicación

Anexo 2. Detalle de las columnas estratigráficas de las unidades fluviales

Simbología Columnas Estratigráficas

Estructuras sedimentarias

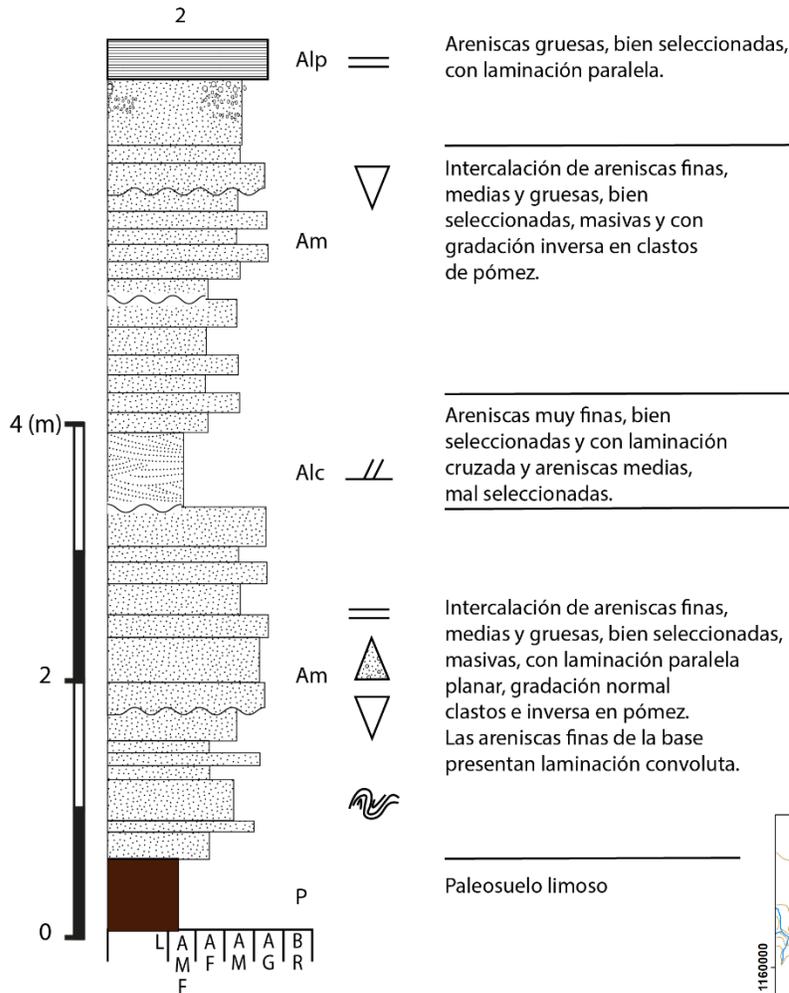
	Laminación paralela
	Laminación cruzada
	Laminación convoluta
	Gradación inversa en pómez
	Gradación normal en pómez
	Gradación normal en gujarros
	Restos mineralizados de materia orgánica
	Bloturbación
	Discordancia
	Contacto erosivo
	Línea de correlación

Clasificación de facies

	Alc: Areniscas con laminación cruzada		Alf: Areniscas con laminación paralela fina
	Alp: Areniscas con laminación paralela		Am: Areniscas masivas
	P: Paleosuelo		Gmm: Gravas masivas
			Lentes de gujarros
	Hipoabtsales		
	Brecha peperítica		

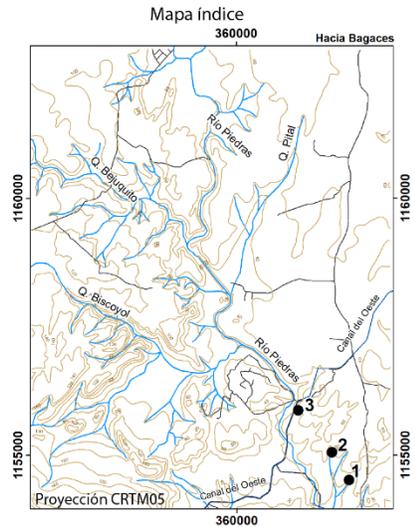
Sección estratigráfica Falconiana 2
 CRTM05: 361821 E/ 1154873 N

Litología/Granulometría Facies	Estructuras sedimentarias	Descripción
-----------------------------------	---------------------------	-------------



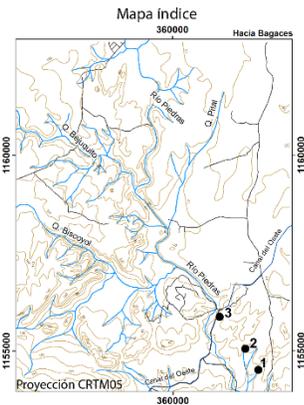
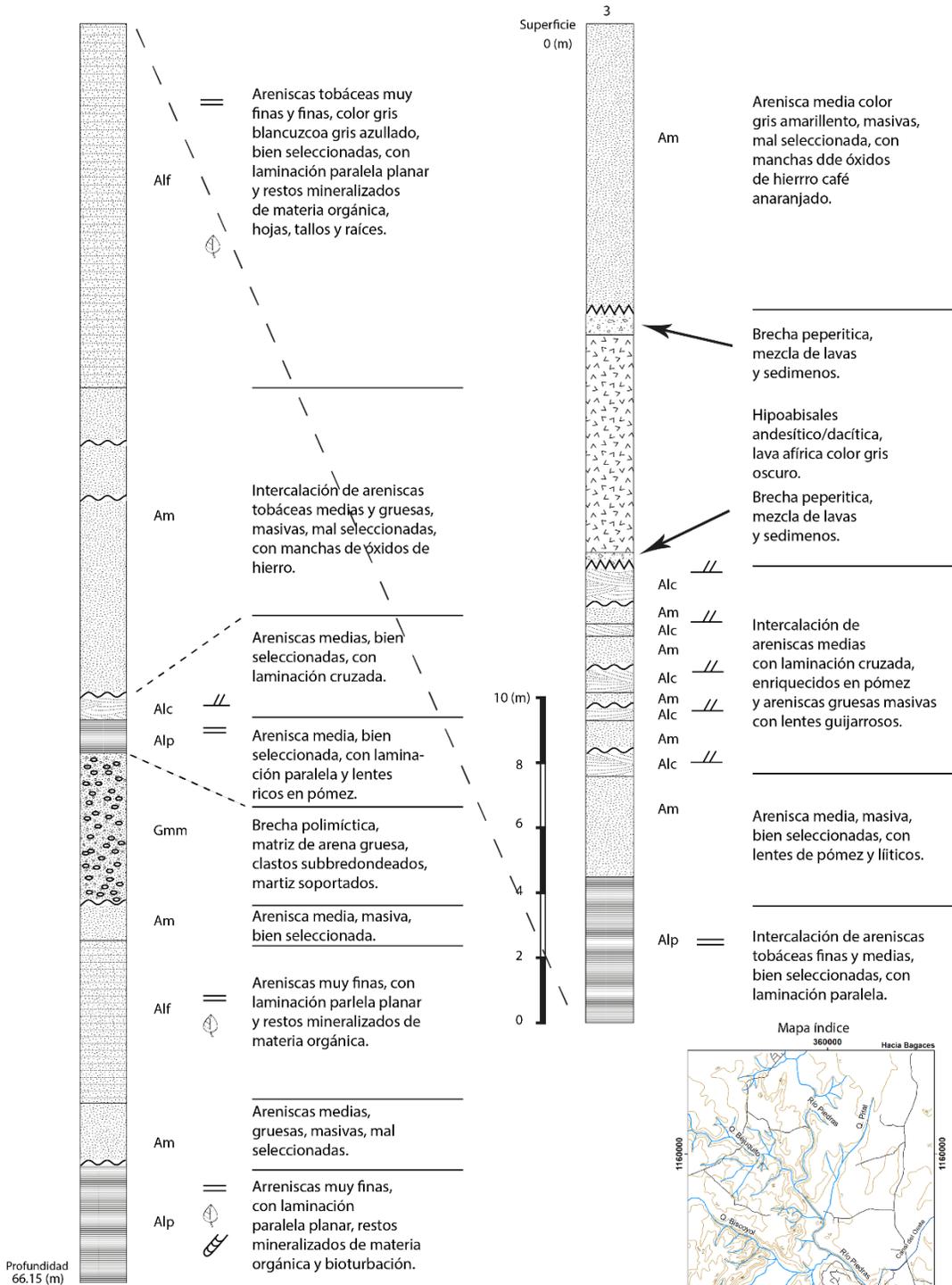
Granulometría

- L=Lodolita
- AMF= Areniscas Muy Finas
- AF=Arenisca Fina
- AM=Arenisca Media
- AG=Arenisca Gruesa
- BR=Brecha



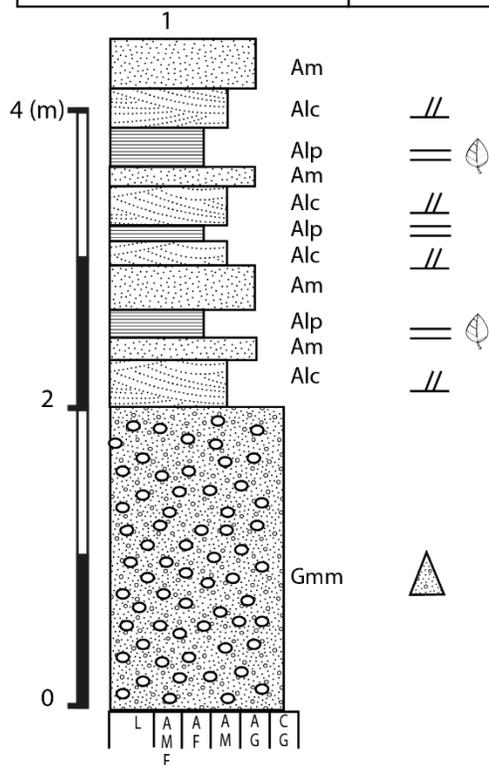
Sección estratigráfica Falconiana
Perforación #5
CRTM05: 361152.755 E / 1155898.302 N

Litología/Granulometría Facies	Estructuras sedimentarias	Descripción
-----------------------------------	---------------------------	-------------



Sección estratigráfica Unidad Bejuquito
357357E/1160058N

Litología/Granulometría	Estructuras sedimentarias	Descripción
-------------------------	---------------------------	-------------



Intercalación de areniscas finas con laminación paralela y restos de materia orgánica, areniscas medias con laminación cruzada, bien seleccionadas y areniscas gruesas, mal seleccionadas con lentes guijarrosas.

Conglomerado polimíctico, matriz de arena gruesa, clastos subredondeados matriz soportados, con lentes de areniscas finas y medias.

Simbología

Clasificación de facies

- | | | | |
|--|------------------------------|--|---|
| | Gmm: Gravas masivas | | Alc: Areniscas con estratificación cruzada |
| | Am: Areniscas masivas | | Alp: Areniscas con laminación paralela |

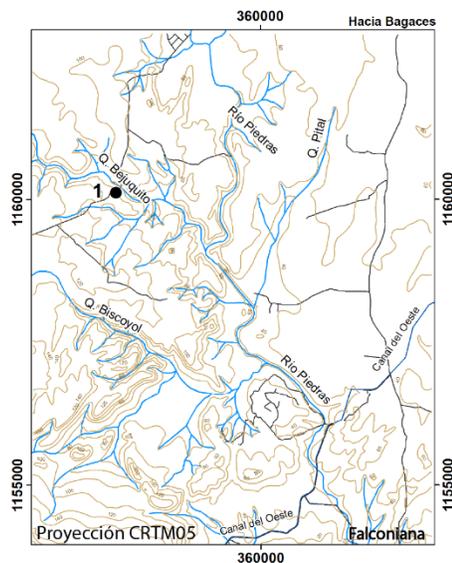
Granulometría

- L=Lodolita
- AMF= Areniscas Muy Finas
- AF=Arenisca Fina
- AM=Arenisca Media
- AG=Arenisca Gruesa
- CG=Conglomerado

Estructuras sedimentarias

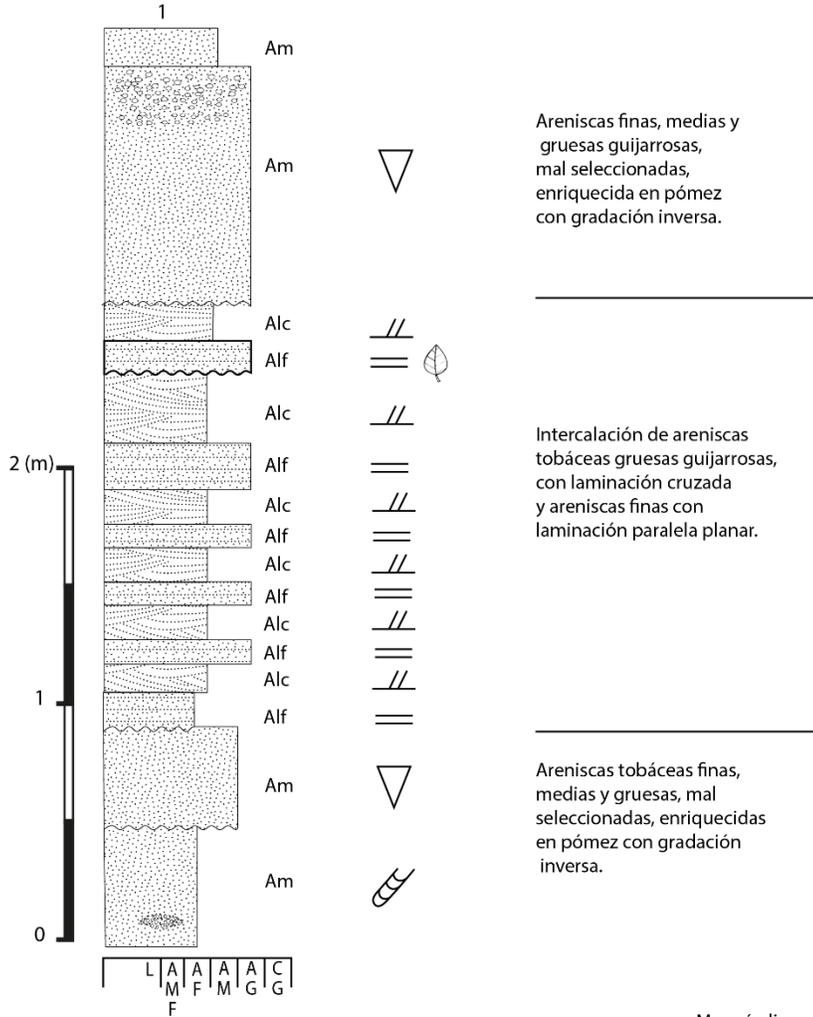
-
-
-
-

Mapa índice



Sección estratigráfica Veraneras 1
357357 E/ 1160058 N

Litología/Granulometría	Estructuras sedimentarias	Descripción
-------------------------	---------------------------	-------------



Areniscas finas, medias y gruesas guijarrosas, mal seleccionadas, enriquecida en pómez con gradación inversa.

Intercalación de areniscas tobáceas gruesas guijarrosas, con laminación cruzada y areniscas finas con laminación paralela planar.

Areniscas tobáceas finas, medias y gruesas, mal seleccionadas, enriquecidas en pómez con gradación inversa.

Simbología

Clasificación de facies según Miall (2006).

	Am: Areniscas masivas		Alp: Areniscas con laminación paralela
	Alc: Areniscas con laminación cruzada		Alf: Areniscas con laminación paralela fina

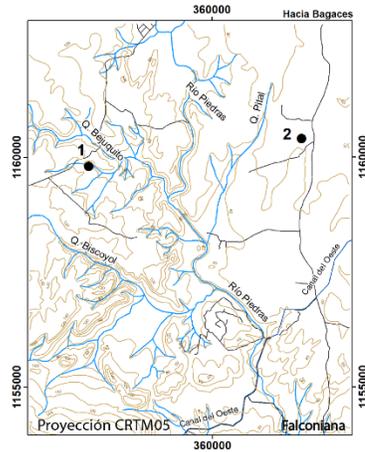
Estructuras sedimentarias

	Laminación paralela		Restos mineralizados de materia orgánica
	Laminación cruzada		Bioturbación
	Laminación convoluta		Contacto erosivo

Granulometría

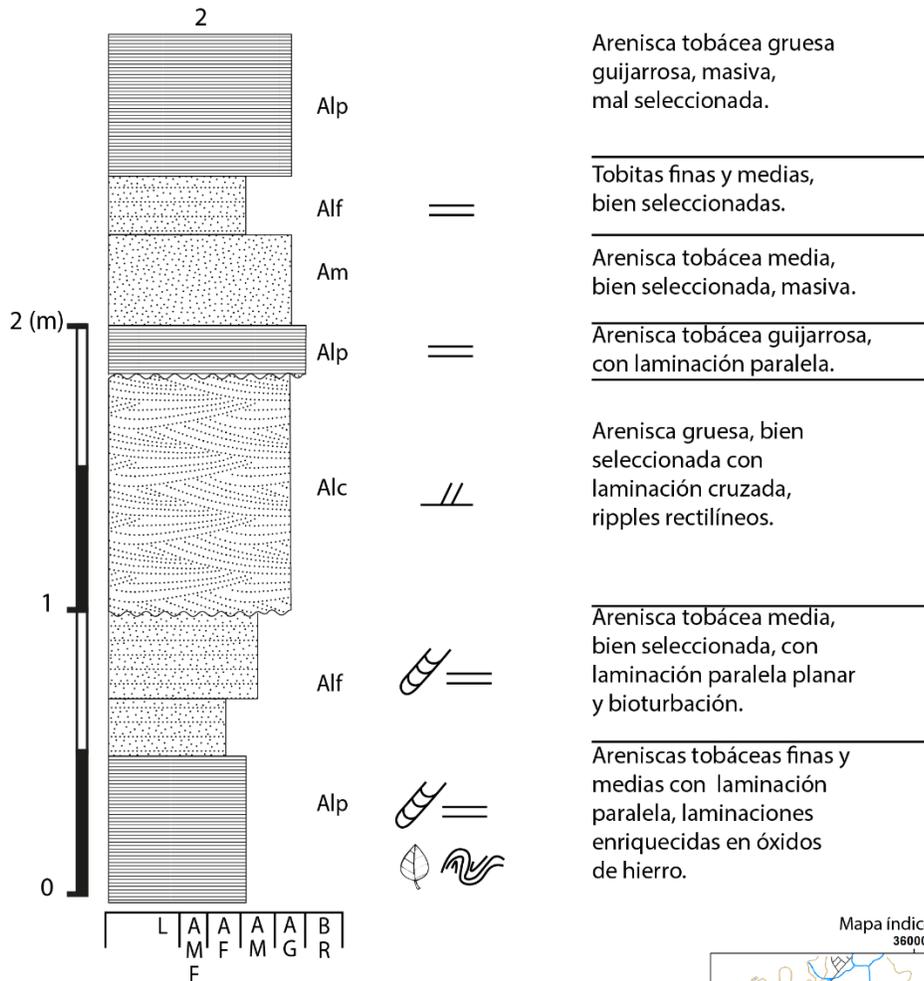
L=Lodolita	AM=Arenisca Media
AMF= Areniscas Muy Finas	AG=Arenisca Gruesa
AF=Arenisca Fina	CG=Conglomerado

Mapa índice



Sección estratigráfica Veraneras 2
361688 E / 1159971 N

Litología/Granulometría Facies	Estructuras sedimentarias	Descripción
-----------------------------------	---------------------------	-------------



Simbología

Clasificación de facies según Miall (2006).

Am: Areniscas masivas	Alp: Areniscas con laminación paralela
Alc: Areniscas con laminación cruzada	Alf: Areniscas con laminación paralela fina

Estructuras sedimentarias

Laminación paralela	Restos mineralizados de materia orgánica
Laminación cruzada	Bioturbación
Laminación convoluta	Contacto erosivo

Granulometría
 L=Lodolita
 AMF= Areniscas Muy Finas
 AF=Arenisca Fina
 AM=Arenisca Media
 AG=Arenisca Gruesa
 BR=Brecha

