



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

ECG Escuela centroamericana de
Geología



Estudios hidrogeológicos básicos en los distritos de Guápiles, Jiménez y Cariari, Cantón Pococí

INFORME FINAL

Investigadora responsable: Ingrid Vargas Azofeifa

21 de noviembre, 2019

Créditos

- Coordinación y compilación

Geol.-Hidrog. Ingrid Vargas Azofeifa

- Cartografiado geológico, muestreo de rocas, suelos y aguas, pruebas de infiltración

Geól. Allan Sanabria Jiménez

Geól.Licda. Paola Alvarado Piedra

Geol.-Hidrog. Ingrid Vargas Azofeifa

- Petrografía

Anthony Valverde Paniagua, asistente del proyecto 113-B9-506

Geol.-Hidrog. Ingrid Vargas Azofeifa

- Geomorfología

Geól. Paola Alvarado Piedra

- Digitalización de mapas

Geól. Paola Alvarado Piedra: compilación, diseño y elaboración de los mapas.

- Uso del suelo

Geól.Licda. Paola Alvarado Piedra

Geól. Allan Sanabria Jiménez

Antony Valverde Paniagua, asistente del proyecto 113-B9-506

- Geofísica

M.Sc. Mario Arias Salguero

Geol.Licda. Paola Alvarado Piedra

- Colaboradores

Anthony Valverde Paniagua, asistente del proyecto 113-B9-506

- Tabulación de datos y apoyo en la realización de las tomografías

Nazareth Jiménez Torres

- Apoyo en la realización de las tomografías

Contenido

1.	Introducción.....	6
1.1	Objetivos del proyecto.....	6
1.2	Alcances y limitaciones del informe.....	7
1.3	Metodología de trabajo.....	8
1.3.1	<i>Muestreo de suelos</i>	10
1.3.2	<i>Pruebas de infiltración</i>	10
1.3.3	<i>Muestreo de aguas</i>	11
1.3.4	<i>Geofísica</i>	13
1.3.5	<i>Red de monitoreo</i>	13
1.4	Generalidades de la zona de estudio.....	14
1.4.1	<i>Rasgos geográficos</i>	14
1.4.2	<i>Clima y vegetación</i>	17
2.	Resultados.....	19
2.1	Geomorfología.....	19
2.2	Geología Regional.....	25
2.2.1	<i>Paleo-Cordillera</i>	26
2.2.2	<i>Volcán Turrialba</i>	27
2.2.3	<i>Volcán Irazú</i>	28
2.2.4	<i>Avalancha del río Costa Rica</i>	30
2.2.5	<i>Depósitos de Abanico Aluvial</i>	30
2.2.6	<i>Llanura aluvial</i>	31
2.3	Marco Estructural.....	32
2.3.1	<i>Falla Guápiles</i>	32
2.3.2	<i>Falla Río Blanco, Falla Blanquito y Falla Alto Grande</i>	33
2.4	Geología local.....	34
2.4.1	<i>Unidad Reventado</i>	34
2.4.2	<i>Unidad de Depósitos volcánicos Turrialba</i>	40

2.4.3 Unidad Guápiles	41
2.5 Geofísica	43
2.5.1 Sondeos eléctricos verticales	46
2.5.2 Tomografías eléctricas	79
2.6 Características de los suelos	91
2.7 Uso de suelo	98
2.8 Información hidrogeológica	101
2.8.1. Trabajos previos	101
2.8.2. Información de pozos y concesiones de agua en las zonas de estudio.....	103
2.8.3 Perfiles hidrogeológicos	106
2.8.4 Red de monitoreo de niveles.....	69
2.8.4 Hidrogeoquímica.....	71
2.9 Disponibilidad de la información.....	79
3. Conclusiones.....	83
4. Recomendaciones.....	85
5. Bibliografía.....	86

Anexos

Anexo 1 Información meteorológica

Anexo 2 Resumen de pozos del SENARA

Anexo 3 Tabla de afloramientos

Anexo 4 Petrografía

Anexo 5 Sondeos eléctricos verticales y tomografías

Anexo 6 Pruebas de infiltración

Anexo 7 Tabla resumen de los análisis físicos de suelos

Anexo 8 Tabla resumen de los análisis químicos de suelos

Anexo 9 Resultados originales de análisis físicos y químicos de suelos

Anexo 10 Análisis químicos de aguas

Anexo 11 Red de monitoreo

1. Introducción

El SENARA y la UCR, uniendo esfuerzos tendientes a la obtención de fines de interés público y metas comunes, han identificado algunas zonas de interés hidrogeológico que merecen especial atención por el alto desarrollo turístico, inmobiliario, y explotación intensiva de los recursos de aguas subterráneas, razón por la cual acuerdan llevar a cabo las investigaciones necesarias para la ejecución del proyecto “Estudios hidrogeológicos básicos en los distritos Guápiles, Jiménez y Cariari, cantón Pococí”; dicho proyecto se realiza en el marco de la Carta de Entendimiento entre el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) y la Universidad de Costa Rica (R-CONV-018-2019) y corresponde con el proyecto del mismo nombre inscrito en la Vicerrectoría de Investigación con el código 113-B9-506.

1.1 *Objetivos del proyecto*

- Objetivo general

Caracterizar los acuíferos del cantón de Pococí mediante información científica que sustente la gestión integrada del recurso hídrico en la zona.

- Objetivos específicos

- 1) Recopilar la información geológica e hidrogeológica existente en los distritos Guápiles, Jiménez y Cariari, cantón Pococí para determinar las zonas en donde se requiere realizar muestreos y sondeos eléctricos verticales.
- 2) Caracterización física y química de los suelos en los distritos Guápiles, Jiménez y Cariari, cantón Pococí como insumos para determinar la capacidad de infiltración del agua de lluvia y la línea base de la condición actual de los suelos.
- 3) Clasificar el agua subterránea a partir de las concentraciones de iones mayores en los sitios de interés de acuerdo a su contexto geológico e hidrogeológico para establecer la línea base.

- 4) Determinar los rasgos geológicos, propiedades físicas de las rocas y elementos hidrogeológicos principales para los distritos Guápiles, Jiménez y Cariari, cantón Pococí como insumos para la gestión del agua subterránea en dichas zonas.

1.2 Alcances y limitaciones del informe

En este informe se presentan los resultados obtenidos de la recopilación y generación de datos de campo y laboratorio en los temas de geología, hidrogeología, geofísica, datos climáticos, uso de suelo, revisión de expedientes de pozos, muestreo de suelos y aguas subterráneas en los distritos de Guápiles, Jiménez y Cariari en el cantón de Pococí, Limón. Se identifican y clasifican las zonas de mayor y menor información geológica e hidrogeológica, y se brindan recomendaciones para trabajos futuros. Los resultados presentados en este informe corresponden a lo propuesto en la carta de entendimiento R-CONV-018-2019.

La población beneficiada del proyecto incluye los habitantes del cantón de Pococí, Limón, 125 962 habitantes según datos del (INEC, 2011); así como el gobierno local e instituciones del sector hídrico nacional: AyA, SENARA, Dirección de Aguas del MINAE, etc). Además, la información base generada podrá utilizarse en la realización de tesis de grado y posgrado en Geología.

Las principales limitaciones enfrentadas en este estudio son:

- Dificultad para encontrar afloramientos en las zonas planas de Guápiles y Jiménez y en el sector de Cariari.
- El acceso a las zonas montañosas de Guápiles y Jiménez, para encontrar afloramientos de mejor calidad, es complicado debido a la topografía en sectores muy encañonados, densidad de vegetación y por factores climáticos.
- No se obtuvieron algunos permisos para acceder a propiedades privadas y algunos puentes se encontraban colapsados, por lo que algunas pruebas de infiltración y SEVs debieron ser reubicados del punto inicialmente propuesto.
- Los pozos con información litológica no están distribuidos de manera uniforme, principalmente en el distrito de Guápiles donde existen zonas con grandes vacíos de información de pozos. Además, las descripciones litológicas suelen ser breves

y en algunos casos contradictorias en pozos cercanos entre sí. La profundidad promedio de los pozos es de 40 m y la profundidad máxima de 92 m.

- Los SEV son ensayos puntuales, de los cuales se crea una interpretación para el medio a su alrededor, estas interpretaciones, pueden variar y dependerán de la cantidad y cercanía de cada sondeo.
- La calidad de la interpretación geofísica depende sustancialmente de la existencia de otra información que permita modelar, tales como: pozos o afloramientos de roca que ayuden a la correlación de capas. En este caso particular, se contó únicamente con los reportes de algunos pozos y la correlación de campo.
- La resistividad eléctrica no caracteriza unívocamente los materiales litológicos, pues está ligadas a su naturaleza, estado e inhibición de agua y calidad de la misma.
- Las coordenadas de los pozos en la base de datos de SENARA no coinciden exactamente con los pozos localizados en el campo, de los cuales fueron seleccionados 11 para el muestreo de agua, la forma de subsanar esta limitación fue por medio del nombre del propietario.
- La mayor parte de los pozos perforados no cuentan con línea de aire y la mayoría están en uso, por lo que el nivel que se mide es dinámico, por estas razones la red de monitoreo incluye principalmente pozos excavados.

1.3 Metodología de trabajo

Para desarrollar el estudio se desarrolló la siguiente metodología de trabajo:

Fase I: se realizó un inventario y análisis de información existente de carácter geológico e hidrogeológico disponible en las bases de datos electrónicas del SIBDI (UCR), la biblioteca de la Escuela Centroamericana de Geología, el Instituto Meteorológico Nacional, Dirección de Aguas del MINAE, el Área de Investigación y gestión hídrica del SENARA y el Departamento de pozos del AyA. Además, se prepararon los mapas cartográficos base y se realizaron visitas de reconocimiento a las zonas de estudio para planificar el trabajo de campo y para contactar representantes de instituciones públicas locales y de las comunidades para la solicitud de permisos de ingreso a las propiedades.

La información base para la elaboración de los mapas (relieve, vías de transporte terrestre, hidrografía, límites de distritales, áreas protegidas) fue tomada del geoportal del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), utilizando los Servicios OGC y los nodos del Instituto Geográfico Naciones (IGN) y del Centro Nacional de Información Geo-Ambiental (CENIGA). Se presentan los mapas realizados en digital y las capas generadas usando la proyección CRTM05. La base cartográfica utilizada en la elaboración del mapa geológico de la zona escala 1:50 000, fueron las curvas de nivel escala 1:25 000 del SNIT y las Hojas Guápiles, Guácimo, Carrillo, Río Sucio y Agua Fría, escala 1:50 000, editadas por el Instituto Geográfico Nacional. Con base en esta información se generó el modelo de elevación digital.

Fase II: consistió en la recolección de datos de campo y análisis de laboratorio. Se realizó un mapa geomorfológico utilizando como base cartográfica las curvas escala 1:25 000 del SNIT y de las hojas 1:50 000 Guápiles, Guácimo, Carrillo, Río Sucio y Agua Fría, editadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), además se realizó el levantamiento de 80 afloramientos de las zonas de estudio y 7 análisis petrográficos para determinar las litologías presentes; se revisaron los registros de pozos de la Base de Datos del SENARA para obtener información relevante, que incluye: coordenadas del pozo, litología, profundidad del pozo, profundidad del agua, ubicación de la rejilla, caudal, etc; con toda esa información se elaboró el mapa geológico de las zonas a escala 1:50 000 y se construyeron 5 perfiles hidrogeológicos.

Además, se recolectaron muestras de suelos y aguas, también se realizaron pruebas de infiltración, prospección geofísica y se propone una red de monitoreo de niveles de pozos. Los procedimientos de estos trabajos se presentan en la siguiente sección.

Fase III: comprendió el proceso de interpretación, en esta se integró toda la información recopilada y generada durante el proyecto con la cual se identificaron las zonas en donde existen vacíos de información y se brindan recomendaciones. Toda la información generada fue sistematizada en tablas, gráficos y mapas, los cuales se incluyen en este informe y se entregan de manera digital y en formato digital (shape) en coordenadas CRTM 05, según lo establecido en el Convenio Específico de Cooperación.

A continuación se detallan los procedimientos seguidos para realizar los muestreos de suelos, aguas, la prospección geofísica y las pruebas de infiltración.

1.3.1 Muestreo de suelos

En cada sitio seleccionado, se recolectó una muestra del suelo para realizar análisis de textura, determinar la densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez; las muestras fueron analizadas en los Laboratorios de suelos y foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Las muestras se recolectaron a 20 cm de profundidad. A las muestras se les asignó el mismo código de la prueba de infiltración. También se recolectó un kilogramo aproximadamente más de muestra en una bolsa aparte para realizar análisis químicos completos de suelos. Los parámetros químicos que se midieron son: acidez, Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Zn, Mn, pH, conductividad eléctrica, carbón orgánico, nitrógeno total, C/N, CIC + bases. Dichos análisis se realizaron en el Laboratorio de Suelos y Foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). Los resultados se comentan en la sección 2.6.

También se recolectaron 10 muestras de suelos compuestas para realizar análisis de plaguicidas residuales según los cultivos presentes en la zona, el muestreo fue realizado por el Lic. Ing Agr. Melvin Alpizar del Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) de la Universidad de Costa Rica, se seleccionó un esquema de muestreo en forma de "W" el cual se aplicó a cada parcela seleccionada, se realizó un muestreo compuesto, con una separación entre cada punto de muestreo de 10 a 12 metros en promedio, las muestras fueron recolectadas en los primeros 10 cm de la parte superior del suelo.

Las muestras se tomaron usando un barreno manual de cuchilla abierta, cada barreno se lavó previamente y posteriormente se limpió con acetona para eliminar cualquier residuo previo, finalmente cada dispositivo fue colocado en bolsas individuales para evitar contaminación cruzada. Las muestras se introdujeron en hieleras frías para preservarlas para trasladarlas al Laboratorio de Plaguicidas del CICA en la Universidad de Costa Rica.

1.3.2 Pruebas de infiltración

Se realizaron 40 pruebas de infiltración usando el infiltrómetro de doble anillo o anillos de Mûntz. El método consiste en saturar una porción de suelo limitada por dos anillos concéntricos y para medir posteriormente la variación del nivel del agua en el cilindro interior. La prueba dura dos horas, tiempo en el que se deben medir los niveles y

mantener constante nivel en el anillo externo. La Foto 1 ilustra el método. Los anillos se instalaron a 30 centímetros de profundidad.



Foto 1. Anillos utilizados en prueba de infiltración #16.

1.3.3 Muestreo de aguas

Se recolectaron 11 muestras de agua en pozos seleccionados con el objetivo de determinar los parámetros físico-químicos del agua subterránea y la concentración de los iones mayores: calcio, sodio, potasio, magnesio, cloruros, sulfatos y bicarbonatos y nitratos, así como hierro, manganeso, fósforo, cobre, zinc, azufre, arsénico y amonio; se realizaron análisis de plaguicidas en aguas. Se tomó un duplicado de muestra para control de calidad de los resultados de los laboratorios. Los análisis físico-químicos de las aguas fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y Foliare Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) y en AQYLASA. También se realizaron análisis de plaguicidas en aguas, los envases utilizados fueron preparados previamente en el Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) de la Universidad Nacional donde se realizaron los análisis. Las muestras fueron debidamente identificadas y se colocaron en hieleras para

mantenerlas frías hasta su entrega al laboratorio, lo que ocurrió dos días después de su recolección.

Los pozos utilizados para realizar el muestreo son pozos de producción, en su mayoría se trató de pozos de empresas privadas y particulares, por lo que se solicitaron previamente los permisos de ingreso a las propiedades. En todos los casos eran pozos que se encuentran en uso. Antes de tomar la muestra se instaló una celda de flujo (Foto 2) para medir los parámetros de campo (pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox, oxígeno disuelto y alcalinidad); mediante la celda se evita el contacto del agua con la atmósfera, la muestra se tomó una vez que se estabilizaron los parámetros de campo, únicamente en la M10 no fue posible utilizar celda de flujo debido a no se obtuvo permiso para bombear el agua durante el tiempo necesario, sin embargo, el pozo es utilizado diariamente. Para medir los valores de pH y potencial redox se utilizó un ph-metro OAKTON pH 110, para conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD) se utilizó un conductivímetro OAKTON con 110 y para oxígeno disuelto (OD) y temperatura (T) se utilizó un oxímetro YSI 550 A. Todo el equipo y las botellas utilizadas fueron lavadas 3 veces con agua ultra pura previo a tomar cada muestra.



Foto 2. Celda de flujo y equipos utilizados para muestrear pozos.

Tres de las muestras fueron tomadas en el distrito de Guápiles, cinco en Jiménez y tres en Cariari Los resultados obtenidos en el campo y en el laboratorio se comentan en la sección 2.8.4.

1.3.4 Geofísica

El Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica realizó 20 sondeos eléctricos verticales (SEV), a través del proyecto 830-B4-06 denominado: *Servicios especializados de laboratorio y servicios técnicos en geofísica y recursos hídricos*, los trabajos fueron coordinados por el investigador M.Sc. Mario Arias Salguero. Además, personal nombrado en el proyecto 113-B9-506 realizaron 5 tomografías eléctricas con el Terrameter marca ABEM de la Escuela Centroamericana de Geología, la operación del equipo e interpretación de los datos estuvo a cargo de la geóloga Paola Alvarado Piedra.

La longitud total de los SEV fue de hasta 400m, equivalente a una abertura de AB/2 máxima de 200 m, permitiendo una profundidad de investigación teórica de 50 m. La ubicación de los SEV, se dio según el espacio en el sitio, así como de la información geológica e hidrogeológica disponible que permita su correlación.

La longitud total de las tomografías fue de 400 m, lo que permitió alcanzar una profundidad de investigación de 80 m. En todos los casos la separación entre los electrodos fue de 10 m. Los resultados obtenidos y su respectiva interpretación serán analizados en la sección 2.4.

1.3.5 Red de monitoreo

Se visitaron las zonas de estudio con el objetivo de establecer una red de monitoreo de niveles en pozos, en total se inventariaron 30 pozos en los cuales se midió el nivel de agua subterránea, 8 en Guápiles, 11 Jiménez y 11 en Cariari. La gran mayoría de los pozos de la red son excavados, debido a que los pozos tubulares (perforados) existentes no cuentan con línea de aire y además se encuentran en uso, por lo que el nivel que se mida sería dinámico y no estático, por lo que no es posible introducir la cinta para medir niveles.

1.4 Generalidades de la zona de estudio

1.4.1 Rasgos geográficos

El cantón de Pococí tiene una extensión de 2409 km², se divide en siete distritos con una población total de 125 962 habitantes, de los cuales los distritos Cariari y Guápiles son los que presentan mayor densidad de población (Cuadro 1). Es importante mencionar que la mayor parte de los distritos son rurales según el INEC (2011).

Cuadro 1. Datos poblacionales según distrito para el cantón de Pococí, Limón.

Distrito	Población	Hombres	Mujeres	Densidad de población
Guápiles	36 469	17 541	18 928	140,28
Jiménez	10 501	5 190	5 311	97,48
Cariari	34 176	17 099	17 077	152,37
Rita	24 041	12 283	11 758	51,25
Roxana	16 790	9 016	7 774	94,81
Colorado	3 985	2 144	1 841	3,41
Total	125 962	63 273	62 689	

Fuente: INEC (2011).

Las zonas de estudio se ubican en los distritos de Guápiles, Jiménez y una parte de Cariari del cantón de Pococí, en la provincia de Limón, comprende un área total de 426,8 km². Dichas zonas se localizan dentro de una parte de las cuencas de los ríos: Chirripó, Toro Amarillo, Jiménez, Tortuguero y Palacio. De acuerdo con las hojas cartográficas Río Sucio, Agua Fría, Guápiles, Guácimo y Carrillo, escala 1:50 000 editadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), las zonas de estudio se encuentran entre las coordenadas CRTM05 1112500 -1154200 Norte y 505000-536790 Este, tal y como se muestra en la Figura 1. Las elevaciones oscilan entre 30 m.s.n.m. en el sector este de Cariari y 1830 m.s.n.m. hacia el SSE de Jiménez, la pendiente es plana en la mayor parte de la zona de estudio, mientras que en la zona montañosa varía de media a alta.

El acceso a la zona se realiza por la ruta 32, autopista Braulio Carrillo y luego por medio de la red de caminos rurales los cuales son en su mayoría son de lastre.

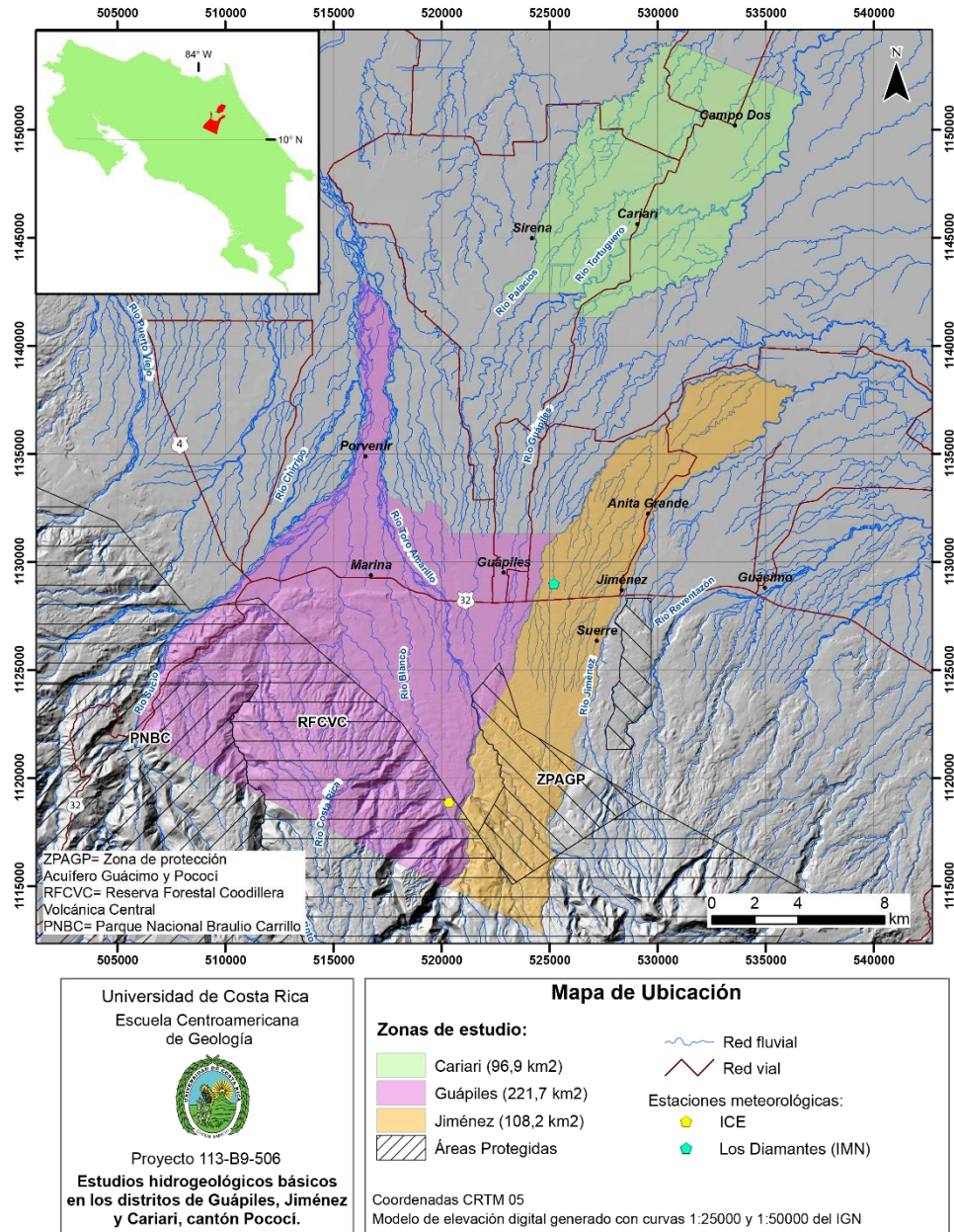


Figura 1. Mapa de ubicación.

El Cuadro 2 resume información de las ASADAS presentes en las zonas de estudio, las cuales en su mayoría captan manantiales y pozos para el abastecimiento público.

Cuadro 2. Lista de las ASADAS en las zonas de estudio.

Nombre de la Asada	Localidad donde se da el aprovechamiento	Tipo de captación
La Unión, Guápiles	La Unión, Guápiles	Manantiales
Los Sauces, Guápiles	Los Sauces, Guápiles	Pozo
El Ceibo y La Lucha de Cariari	El Ceibo y La Lucha de Cariari, Pococí	Pozo
San Bernardino, Horquetas, Sarapiquí	Guápiles, Pococí	Manantial
Bellavista, Pococí	Pococí, Guápiles	Manantial
Ciudadela El Progreso de Cariari de Pococí de Limón	Cariari, Pococí	Pozos
Campo cuatro	Cariari, Pococí	Pozo
Campo dos	Cariari, Pococí	Pozo
La Esperanza	Cariari, Pococí	Pozo
Sagrada Familia	Cariari, Pococí	Pozo
Los Ángeles de Cariari de Pococí de Limón	Cariari, Pococí	Pozo y manantiales
Suerre	Suerre, Jiménez, Pococí	Manantial
Buenos Aires Sur Jiménez	Buenos Aires, Jiménez	Manantial

Fuente: AyA (2019).

1.4.2 Clima y vegetación

Según Herrera (en Gómez 1986) el clima en la zona de estudio en el sector sur de la coordenada 240000, en la proyección Lambert Costa Rica Norte, es muy húmedo, caliente con una estación seca corta con <35 días intermitentes con déficit de agua. Mientras que al norte de la coordenada indicada, a elevaciones menores a los 200 metros sobre el nivel del mar, el clima sigue siendo muy húmedo, muy caliente sin estación seca, la cual puede ser de menos de 10 días en el mes de marzo (Herrera, 1986).

En cuanto a la vegetación de la zona, Gómez (1986) indica que predomina el bosque tropical lluvioso de bajura. La zona sur de los distritos de Guápiles y Jiménez se encuentran dentro del Parque Nacional Braulio Carrillo (PNBC), la zona de Reserva Forestal de la Cordillera Volcánica Central (RFCVC) y de la zona de protección del Acuíferos Guácimo y Pococí (ZPAGP) (Figura 1).

En la zona de estudio se encuentran 2 estaciones meteorológicas, pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), los detalles se resumen en el Cuadro 3, la información detallada se puede consultar en el Anexo 1 y la ubicación de estas se muestra en la Figura 1.

La estación Los Diamantes (7313) del IMN cuenta con un registro histórico de 34 años (1964-1998) de datos de precipitación, 27 años (1971-1998) de temperatura, brillo solar y radiación, y períodos menores de velocidad del viento, humedad y evaporación tanque; mientras que la estación Chindama (69638) del ICE cuenta únicamente con datos de precipitación con un rango de 26 años (1993-2019) (Anexo 1).

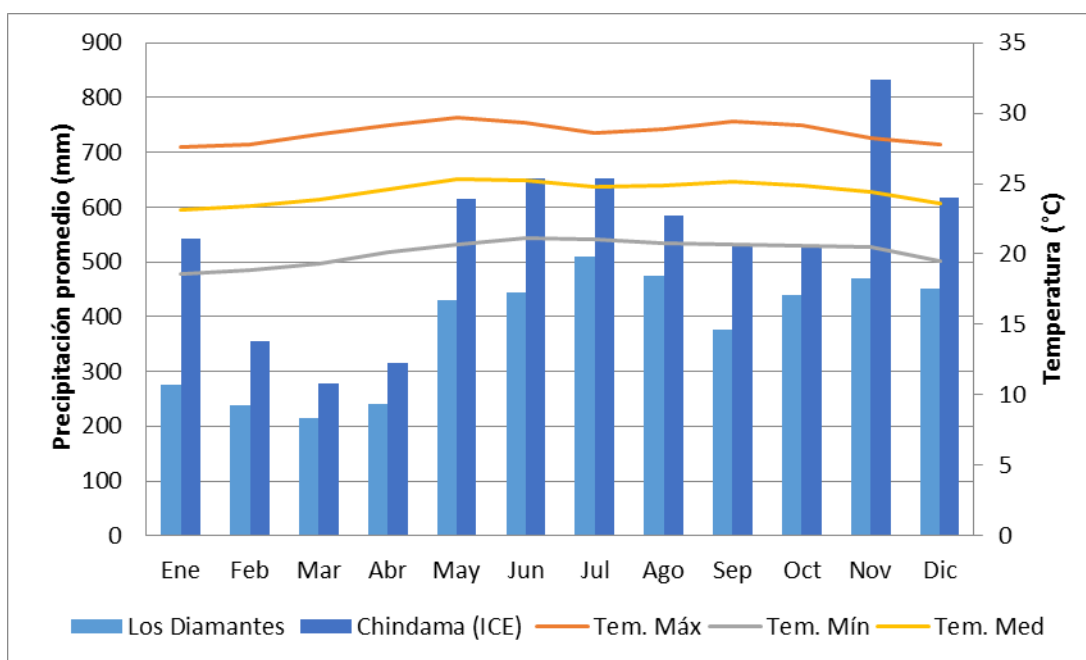
Para la estación Los Diamantes (Gráfico 1), la precipitación anual promedio en la zona es de 4567 mm y según la estación Chindama este promedio en los últimos 26 años es de 6502,12 mm, la distribución mensual de la lluvia es similar en ambas estaciones como se muestra en el Gráfico 1, en este se observa que las precipitaciones se dan durante todo el año, con una disminución durante los meses de enero a abril y también existe una ligera disminución durante el mes de septiembre. La temperatura máxima se da durante mayo y alcanza los 29,7 °C, mientras que la temperatura mínima se da durante los meses de enero y febrero y ronda los 18,7 °C.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas en los alrededores de las zonas de estudio.

Número	Nombre	Institución	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)	Período de registro
73013	Los Diamantes	IMN	243679	561506	249	1964 - 1998
69638	Chindama	ICE	233524	556638	729	1993 - 2019

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Centro de Servicios Estudios Básicos de Ingeniería – Hidrología (ICE).

Gráfico 1. Promedio de precipitación (1964-1998) y temperatura (1971-1998) de la estación meteorológica Los Diamantes del IMN y precipitación (1993-2019) de estación Chindama del ICE.



Fuente: elaboración propia, a partir de datos suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional y el Centro de Servicios Estudios Básicos de Ingeniería – Hidrología (ICE).

2. Resultados

2.1 Geomorfología

El área de estudio se encuentra dentro de una parte de las cuencas de los ríos Toro Amarillo, Chirripó, Jiménez, Tortuguero, Sucio y Palacio, estas cuencas se originan en las faldas de los volcanes Irazú y Turrialba y exhiben rasgos alargados en dirección NW y NE tal como se puede observar en la Figura 2. De acuerdo con Villela y Mattos (1975), en general, las cuencas alargadas presentan un río principal con diversos tributarios menores donde las aguas tienen que recorrer un camino más largo hasta el exutorio, por lo que el tiempo de concentración de la esorrentía es mayor pues el agua circula más tiempo a lo largo del río principal. De este modo, tiende a presentar crecientes más distribuidas con menor caudal de pico respecto a las cuencas más redondeadas (Villela y Mattos, 1975).

Las características físicas de las cuencas son importantes porque tienen una relación estrecha con los caudales que transitan por ella, además brindar información útil desde el punto de vista hidrogeológico, como determinación de zonas de mayor o menor infiltración debido a la velocidad de escurrimiento, densidad de drenaje, entre otros; para ello es necesario realizar un estudio morfométrico más detallado.

Es importante recalcar el carácter regional de este estudio, como se mencionó anteriormente, por lo que se presentan las unidades geomorfológicas principales, las cuales son utilizadas como base para el mapa geológico.

Las pendientes más elevadas se encuentran al Sur del área y disminuyen al alejarse de los macizos volcánicos, de acuerdo con Astorga (2012) el cambio en la pendiente a la zona plana corresponde con llamada "línea de bisagra" la cual marca el inicio de la cuenca transarco. En la zona plana la dinámica fluvial juega un papel importante en la construcción y modificación del paisaje (migración de cauces, flujos, inundaciones, etc).

La mayor elevación en la zona de estudio es de 1510 m.s.n.m. en el sector SE del distrito de Jiménez, mientras que la menor elevación es de 30 m.s.n.m. al norte de Cariari. La Figura 3 muestra las pendientes altas al S del área, donde algunos cursos de agua están encañonados con pendientes mayores a 30°, en algunos casos las laderas son casi

verticales, mientras que la zona plana, la cubre la mayor parte de la zona de estudio, las pendientes varían entre 0-10°.

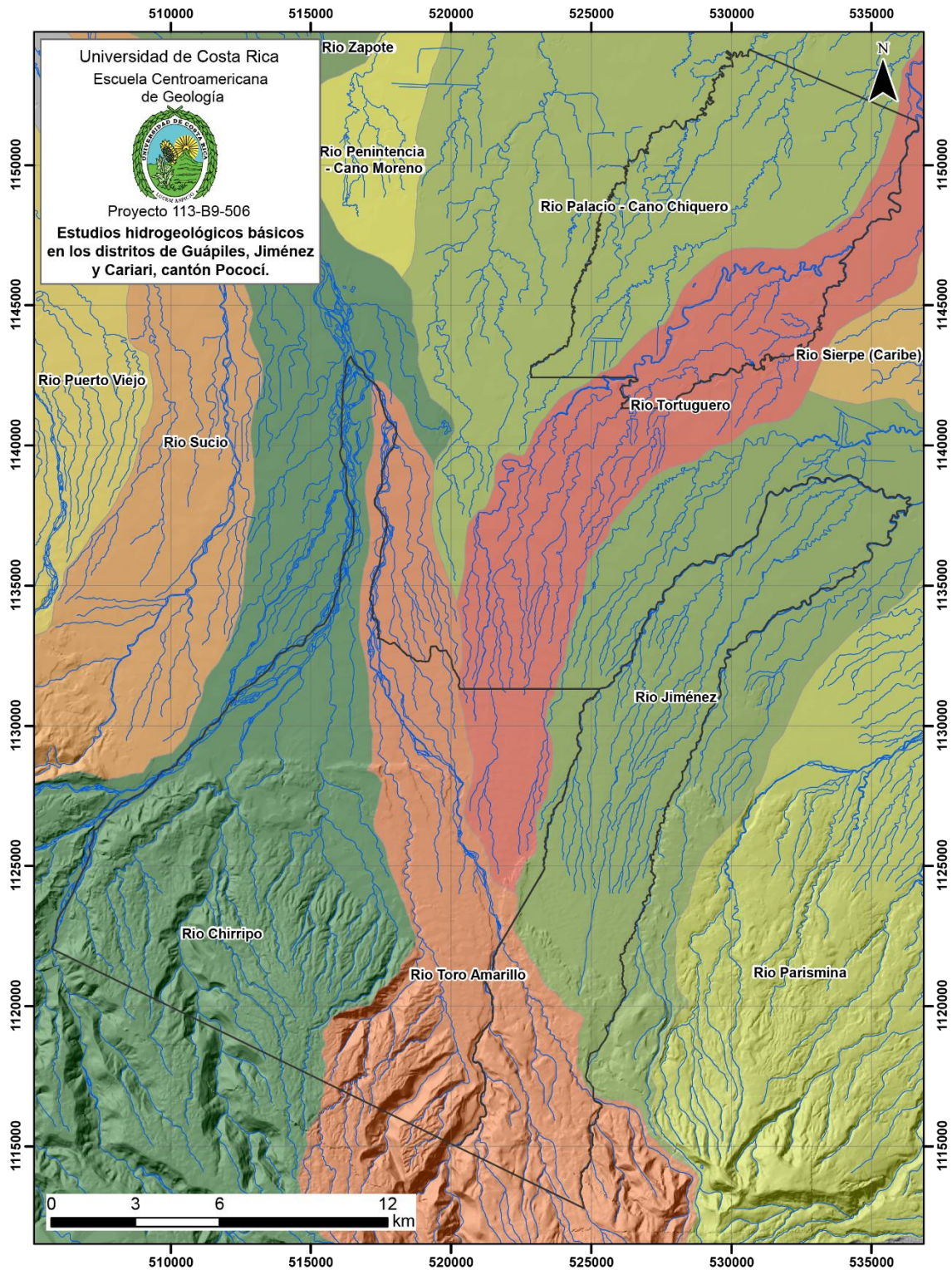


Figura 2. Cuencas que conforman el área de estudio

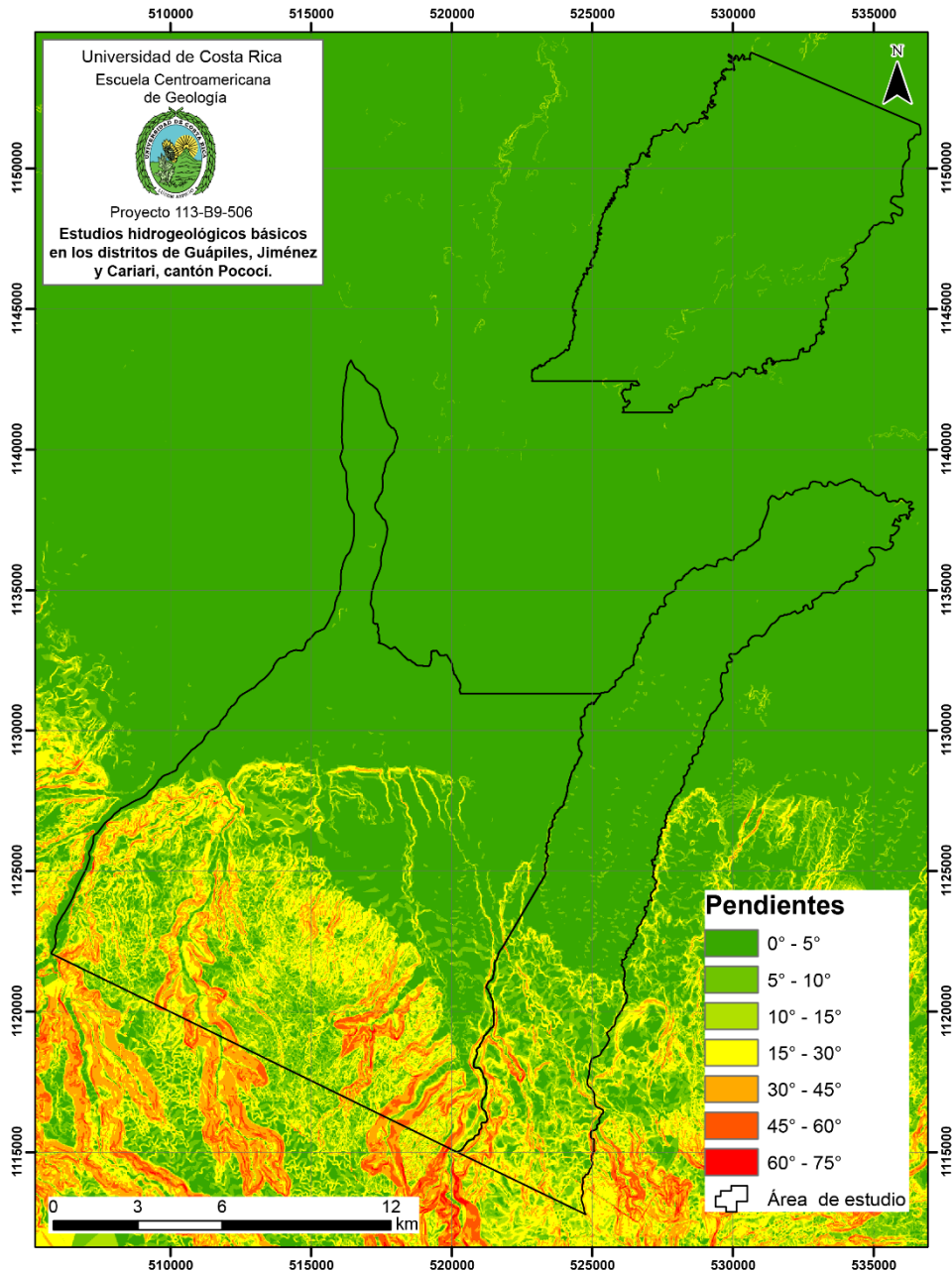


Figura 3. Mapa de pendientes de la zona de estudio

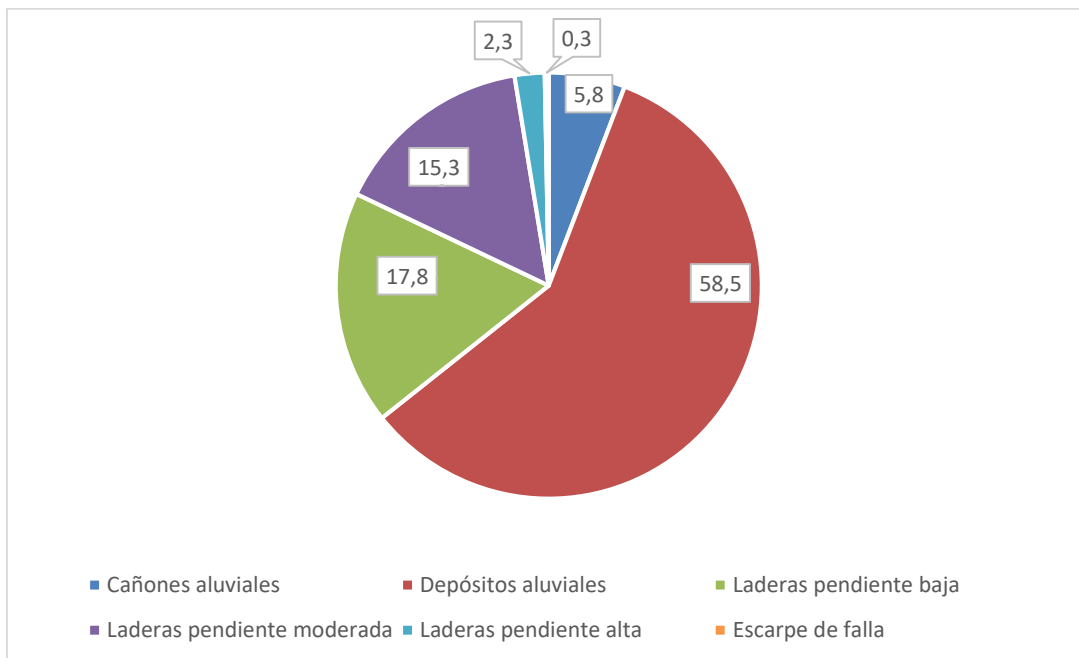
Es posible diferenciar varias zonas con un patrón de drenaje diferente en las zonas de estudio (Figura 4). En la parte alta de las cuencas de los ríos Chirripó, Toro Amarillo y Jiménez y predomina el patrón de drenaje radial, donde las corrientes son aproximadamente paralelas debido a los macizos volcánicos. Hacia al norte, en la zona media-alta de las cuencas y hasta la salida del sector montañoso, el patrón de drenaje es

rectangular lo que evidencia un control estructural importante, en esta misma zona se observan algunos lineamientos con rumbo NE-SE y W-E. Hacia el pie de monte y la zona plana los ríos presentan un patrón paralelo-subparalelo hasta dendrítico al norte, mientras que los ríos Chirripó y Toro Amarillo exhiben un patrón entrelazado, siendo un indicativo de mucha carga y arrastre de fracciones gruesas, estas corrientes han formado una compleja red de cauces separados por barras arenosas hasta que alcanzan un patrón meándrico hasta su desembocadura.

Según el IMN & CRRH (2008) por las condiciones climáticas y geográficas la región del Caribe es la zona de mayor frecuencia de inundaciones en el país; la frecuencia de las precipitaciones y las extensas llanuras al pie de las elevadas cordilleras, hacen que la densa red hidrográfica sea susceptible a desbordamientos prácticamente en cualquier mes del año, pero principalmente entre julio y diciembre.

Con base en la información anterior se diferenciaron seis unidades geomorfológicas principales, 5 de ellas de origen denudacional y una de origen estructural, su distribución porcentual se muestra en el Gráfico 2.

Gráfico 2. Distribución porcentual de unidades geomorfológicas.



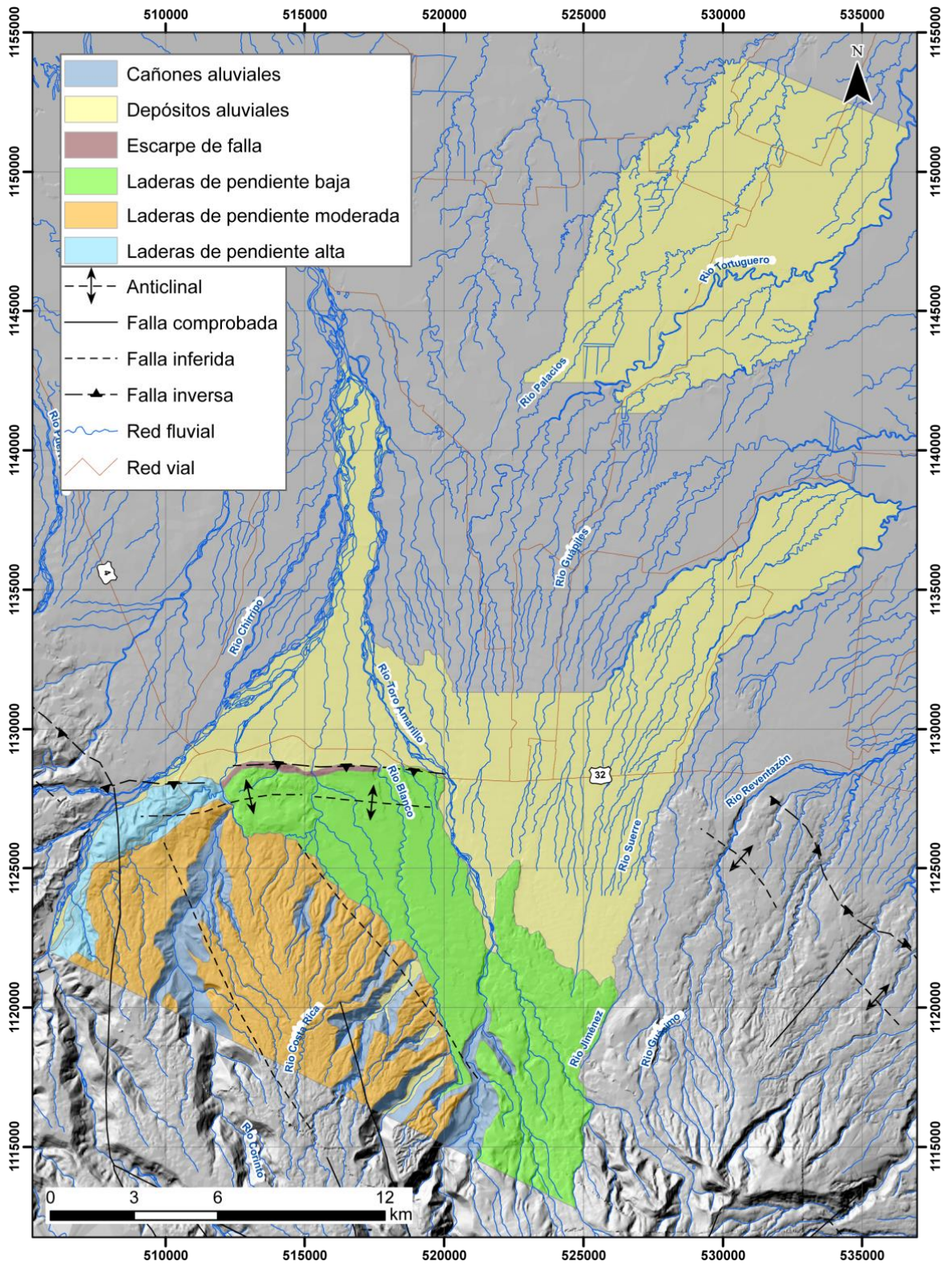


Figura 4. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio. Lineamientos tomados de Denyer & Alvarado (2007).

Laderas de pendiente baja

Se ubican al S del distrito de Jiménez, estas están distribuidas en las cuencas de los ríos Jiménez, Toro Amarillo y Chirripó y cubren un área de 75.8 km². La pendiente varía entre 5° y 15° y es interrumpida al SE del área por el cañón del río Toro Amarillo. La unidad limita al S con depósitos aluviales y con el escarpe de la Falla Guápiles (Figura 4).

Laderas de pendiente moderada

Estas se ubican al S del distrito de Guápiles y está distribuida en las cuencas de los ríos Chirripó y Toro Amarillo cubriendo un área de 65.5 km². En este caso los procesos de erosión y denudación son de mayor importancia produciendo pendiente que varía entre 5° y 45°.

La unidad es interrumpida por cañones y gargantas de los ríos Corinto, Costa Rica, Blanco, Blanquito, entre otros más pequeños.

Laderas de pendiente alta

Se ubica al NW del distrito de Guápiles dentro de la cuenca del río Chirripó, cubre un área de 9.72 km². Tiene una dirección aproximada SW-NE paralelo a la ruta nacional #32. Los procesos erosivos y denudacionales en esta unidad en esta unidad tienen una importancia significativa, las pendientes varían entre 15° y 60°.

La mayor parte de esta unidad presenta una cobertura boscosa natural que forma parte del Parque Nacional Braulio Carillo. Esta morfogénesis está asociada a la actividad de volcán Irazú que ha generado una espesa cobertura de lavas, tobas y otros depósitos volcánicos que han sido afectados por procesos de erosión y meteorización.

Cañones y gargantas aluviales

Se ubican al sur de la zona de estudio y cubren un área de 24,77 km². Corresponde con terrenos de pendiente elevada (15°-75°) con paredes casi verticales normalmente, estos están asociados a procesos de erosión fluvial y profundización del relieve.

Están formados por los ríos Corinto, Costa Rica, Blanco, Blanquito y algunos afluentes de estos. Algunos presentan un valle en el fondo del río como el río Blanco, Blanquito y Costa Rica que corresponde con la llanura de inundación de los mismos.

Depósitos aluviales

Se distribuyen en la mayor parte de la zona de estudio, cubre un área de 249.81 km². La pendiente normalmente es menor a 5°. La unidad es el resultado del aporte de los ríos Chirripó, Costa Rica, Blanco, Corinto, Toro Amarillo, San Rafael, Guápiles, Molino y Jiménez entre otros afluentes de estos. Dentro de esta se encuentran los principales poblados de Guápiles, Jiménez y Cariari.

En los alrededores de Guápiles y Jiménez abunda bloques de fracciones métricas hasta centimétricas de composición andesítica.

2.2 Geología Regional

Las áreas de estudio se encuentran entre una parte del arco interno y la cuenca trasarco del país (Montero, 2000), según Astorga (2012) el límite entre estas zonas está marcado por la línea de bisagra, la cual marca el inicio de la cuenca trasarco. Al sur del área se encuentra la Cordillera Volcánica Central (CVC), la cual es definida como parte del magmatismo calcoalcalino del Neógeno (Denyer & Alvarado, 2007), está se extiende en dirección noroeste-suroeste a lo largo de 80 km, conformada por cinco macizos volcánicos complejos: Plátanar-Porvenir, Poás, Barva, Irazú y Turrialba, este último está desplazado unos 10 km hacia el norte (Kussmaul, 2000).

De acuerdo con Kussmaul (2000) los volcanes Turrialba, Poás e Irazú estuvieron activos en los últimos 150 años y sus productos consisten de lavas, intercaladas con brechas volcánicas, capas de ceniza, lapilli, depósitos de oleadas piroclásticas y en la parte baja de los flancos predominan avalanchas volcánicas y especialmente lahares.

Al sur- sueste de la zona de estudio se encuentran los volcanes Irazú y Turrialba, estos comparten no solo el mismo basamento, sino gran parte de su plataforma eruptiva, constituyendo volcanes hermanos (Alvarado & Gans, 2012).

La Figura 5 muestra un mapa geológico simplificado propuesto por Alvarado (1993) y Alvarado et al. (2006) que abarca las zonas de estudio.

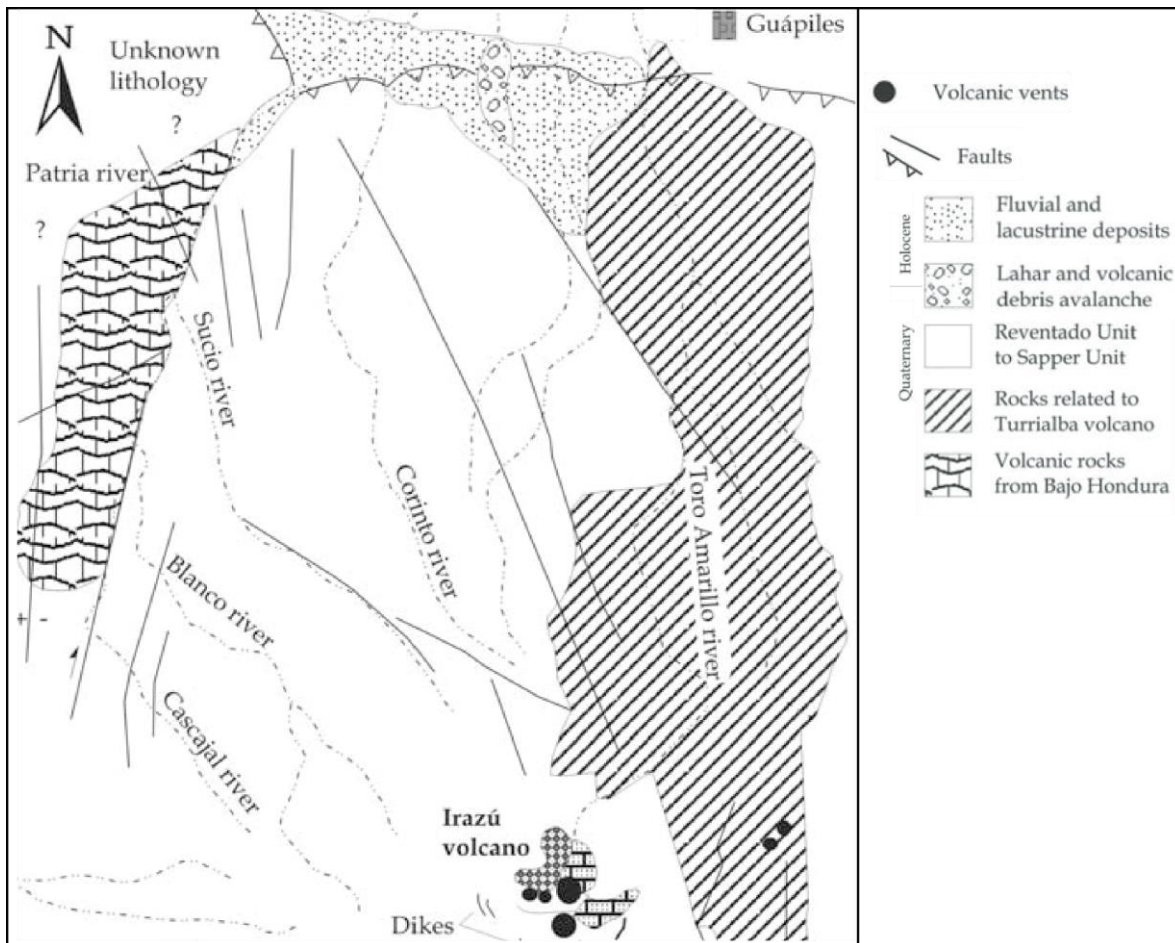


Figura 5. Mapa geológico regional. Elaborado por Alvarado (1993), modificado por Alvarado et al. (2006).

2.2.1 Paleo-Cordillera

Kussmaul (2000) describe una serie de rocas volcánicas que son los relictos de las primeras edificaciones volcánicas en el área de la cordillera Central actual y que probablemente forman la transición entre la Formación Grifo Alto del Grupo Aguacate y los volcanes activos.

Entre los volcanes Barva e Irazú se levantan unos cerros muy erosionados (cerros Zurquí y Hondura), compuestos por coladas basálticas, andesita-basálticas, brechas volcánicas, ignimbritas y lahares, cortadas por numerosos diques basálticos (Kussmaul, 2000). Una lava del cerro Zurquí ha sido datada en 0,5Ma (Bellon & Tournon, 1978).

Según Alvarado (2000) en la zona de Bajo de la Hondura, en los cortes de carretera a Guápiles, pueden observarse coladas de lava de regular espesor (2 m a 12 m), en algunos sitios pueden verse hasta cinco flancos lávicos superpuestos entre sí y separados por piroclastos o por autobrechas por ejemplo en las cercanías del túnel Zurquí.

Entre el camino que atraviesa el río la Hondura y el antiguo sitio Ventana, pueden observarse una interstratificación de lavas, tobas brechosas e ignimbritas (Alvarado, 2000). Los depósitos de ignimbritas son principalmente flujos de pómez negra junto con clastos de lava y cenizas, producto de enormes erupciones que generaron nubes ardientes rasantes (Alvarado, 2000). Las llamas de vidrio volcánico pueden ser particularmente abundantes, grandes (centimétricas a decimétricas) y alargadas. Son depósitos bien compactados pero no soldados (Alvarado, 2000).

Alvarado (2000) indica que en la superficie, estos cerros presentan una cubierta considerable de cenizas alteradas y coluvio, mientras que hacia su base Sur predominan los depósitos fluvio-volcánicos.

2.2.2 Volcán Turrialba

De acuerdo con Soto (1988) el macizo del Turrialba es un voluminoso complejo estratovolcánico de aproximadamente 290 km³, que abarca desde la ciudad de Turrialba hasta las llanuras de Guápiles, y desde el río Toro Amarillo hasta cerca del río Reventazón; el "Volcán Turrialba" es el cono compuesto actual, que corona al complejo estratovolcánico. Bajo el macizo del Turrialba hay una compleja, espesa y deformada secuencia sedimentaria perteneciente a la Cuenca Limón, cuya colmatación sucedió en el Mioceno Superior-Plioceno (Soto, 1988).

Soto (1988) ha definido 17 unidades volcanoestratigráficas asociadas al Turrialba y alrededores, estas incluyen estratovolcanes, conos piroclásticos, coladas y campos de coladas y una avalancha. Las rocas de estas unidades son andesitas y andesitas basálticas. Los minerales presentes son plagioclasas (An 30-60), clinopiroxenos, ortopiroxenos y olivino accesorio hasta un 6-7%. Hornblenda basáltica y biotita son accesorios (<1%) presentes en pocas unidades; las texturas son hipocristalinas

porfíricas, con matriz intersertal, con vidrio pardo a claro oscuro. La petroquímica indica que estas rocas son andesitas orogénicas, típicamente calcoalcalinas (Soto, 1988).

En el límite este del distrito de Jiménez, relacionadas con el volcán Turrialba, Salazar (1996) propone las coladas Jiménez y Turrialba:

Colada Jiménez

Fue propuesta por Salazar (1996) con una extensión de 10 km de largo por 3 km de ancho, según el autor es sobreyace discordantemente a la colada Fox Hall y a su vez es sobreyacida por las coladas indiferenciadas del volcán Dos Novillos, así como por la colada Turrialba, al este de la zona de estudio. El estratotipo se localiza en un tajo de lavas andesíticas ubicado en la margen derecha del río Jiménez, a tres kilómetros de al sur de la localidad del mismo nombre (Salazar, 1996); aflora en la margen derecha del río Toro Amarillo. Proceden del volcán Turrialba y tiene una edad de Pleistoceno (Salazar, 1996).

Colada Turrialba

Se trata posiblemente del último grupo de flujos lávicos del volcán Turrialba hacia el flanco norte; tiene forma alargada, se ha desplazado por la depresión dejada por la avalancha volcánica por lo que se estrecha en su parte media, hacia el sur parece tener varios pequeños flujos (Salazar, 1996). Subyace discordantemente a la unidad Jiménez y los depósitos piroclásticos del Volcán Turrialba, se trata de andesitas con dos piroxenos, plagioclasa, hipersteno y magnetita, además de vidrio (Salazar, 1996). El autor reporta un espesor de 100 metros para dicha colada e indica que procede del volcán del mismo nombre y tiene edad Pleistoceno.

2.2.3 Volcán Irazú

De acuerdo con Alvarado (1993) las rocas consisten en andesitas basálticas a andesitas altas en K, rara vez dacitas y basalto altos en Mg. Los flujos de lava andesita basáltica y los depósitos de tefra están subordinados, pero son muy importantes por ser los magmas más primitivos reconocidos en el Frente Volcánico Cuaternario del país (Alvarado, 1993). Las lavas del Irazú contienen fenocristales de plagioclasa (An 40-87) con zonificación variable, clinopiroxenos, ortopiroxenos con zonación débil, olivinos y óxidos de Fe/Ti; los

fenocristales y microcristales de biotita, apatito y hornblenda son poco comunes (Alvarado, 1993).

Formación Reventado

Krushensky (1972) divide el Grupo Irazú en: Formación Reventado, Formación Sapper, Formación Birris y Formación Cervantes. Según Alvarado (1993) al sur de la zona de estudio, en el distrito de Guápiles, afloran rocas de la Formación Reventado. Estas rocas tienen una edad Pleistoceno y provienen de la etapa neo-Irazú.

Krushensky (1972) la dividió cronológicamente en tres miembros:

- Miembro Paraíso compuesto por flujos de lava andesítica y en menor proporción lahares, datado por Alvarado et al. (2006) en 594 ± 16 ka y elevado al rango de formación por Sojo (2015).
- Miembro Capa de Ceniza conformado por ceniza fina altamente meteorizada, de color anaranjado a café rojizo y sin estratificación visible, edad Pleistoceno Medio-Superior. Berrangé & Whittaker (1977) lo excluyen como miembro y afirman que en realidad consiste en una capa de laterita proveniente de la meteorización de los basaltos infrayacentes y no de ceniza, esto es confirmado por Sojo (2015) quien observa repetidamente, en la ampliación de nuevos caminos, bloques lávicos dentro del material pardo que corresponde en su mayoría con arcillas producto de la meteorización de las lavas y brechas subyacentes.
- Miembro Superior el cual agrupa andesitas basálticas con lahares y ceniza intercalados, datado por Alegre & Condomines (1976) en 110 ka mediante el método U/Th.

Edad Irazú-Turrialba

Las dataciones radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ disponibles, agrupan los productos efusivos del volcán Irazú y Turrialba en tres grandes grupos de edades: el Proto-Irazú/Turrialba en 0,98 Ma o 0,85 Ma, seguido por la fase constructiva propiamente dicha del Paleo-Irazú-Turrialba a los 0,59-0,45 Ma, en correspondencia con los edificios erosionados y plataformas de lava (de edad similar a las lavas del Zurquí), y finalmente los productos efusivos y explosivos más recientes que 0,25 Ma, culminando con los dos grandes campos de lava de Cervantes y varias coladas de lava en bloques del Turrialba (Alvarado

& Gans, 2012). Según los mismos autores la historia eruptiva del Irazú Turrialba se puede resumir en:

- a. Presencia de un basamento volcánico y sedimentario pre-Pleistoceno, incluyendo al vulcanismo coetáneo del Grupo Aguacate o Fm. Grifo Alto: 2,15 Ma.
- b. Vulcanismo efusivo y explosivo muy localizada o que no está expuesto por formar parte del núcleo del Proto-Irazú/Turrialba: 0,98-0,85 Ma.
- c. Crecimiento del paleo-volcán(es): 0,59-0,45 Ma.
- d. Neovulcanismo: 0,25- 0 Ma.

2.2.4 Avalancha del río Costa Rica

Este depósito, asociado con el volcán Irazú, es mencionado por Alvarado (1993) aflora cerca de Guápiles, entre los ríos Corinto y Costa Rica, cubriendo un área de por lo menos 5 km², entre las poblaciones de Flores (La Unión) y Rancho Redondo de Guápiles. Según Alvarado et al. (2004) los *debris avalanche* (avalancha de detritos) corresponden con grandes deslizamientos de detritos y rocas, no saturadas a saturadas, sin cohesión, que se generan por el colapso parcial de una serranía rocosa o de un edificio volcánico, impulsado por explosiones freáticas, la intrusión de nuevo magma, terremotos, colapsos caldéricos u otros factores.

En el caso de la avalancha del río Costa Rica se desconoce su real extensión y a cuál de los diversos anfiteatros por colapso sectorial presentes en la cúspide del Irazú, se le deba de asociar dicho evento (Alvarado et al., 2004).

2.2.5 Depósitos de Abanico Aluvial

De acuerdo con Astorga et al. (2012) los abanicos se componen de una dominancia de lahares y corrientes de lodo, lo cual hace que el terreno esté formado de gran cantidad de bloques de lavas, dentro de una matriz arenosa o arcillosa; en la parte más alta puede presentarse lavas y piroclastos intercalados en la secuencia de abanicos. Según Salazar (1996) también está conformado por aluviones antiguos de granulometría variable, conglomerados finos y brechas.

Sobre ellos se pueden encontrar flujos de bloques lávicos de dimensiones métricas (hasta 6 m) y finalmente terrazas aluviales (Salazar, 1996). Mientras que en la parte inferior, se presenta la fracción fina con clastos de lava dentro de una matriz arcillosa; estas rocas más viejas y muy meteorizadas afloran en ciertas áreas ocasionando un cambio brusco en la condición del suelo (Astorga et al., 2012).

Los abanicos más importantes son los del río Toro Amarillo y Chirripó-Sucio, formado por la unión de otros abanicos más pequeños (Astorga et al., 2012). De acuerdo con Salazar (1996) los bloques son de una composición que varía desde andesitas-basálticas, basaltos hasta andesitas, con presencia de fenocristales de plagioclasa, olivino, augitas, hipersteno y piroxenos, entre otros. Su origen se relaciona a un proceso de transporte y depositación de los materiales por parte de los ríos principales de la zona (Salazar, 1996).

2.2.6 Llanura aluvial

Astorga et al. (2012) menciona que sobre los abanicos se han depositado materiales aluviales recientes. Estos se conforman principalmente por arenas de granulometría variable, con estratificación paralela milimétrica y laminación cruzada, también conglomerados finos en matriz arenosa y conglomerados centimétricos y arcillas; los bloques, gravas y guijarros principalmente se encuentran compuestos por andesitas-basálticas (Salazar, 1996).

Los cauces que cortan la llanura aluvial, tienen un valle ancho, con orillas casi siempre de uno a dos metros sobre el nivel del río; su patrón es meándrico, como consecuencia de la escasa pendiente (Astorga et al., 2012). De acuerdo con los mismos autores la forma de llanura es interrumpida en las vecindades de los ríos por un microrelieve producto de la erosión y de la depositación fluvial se observan bastantes canales abandonados.

Su edad estimada es reciente ya que es el producto de la erosión actual del relieve (Salazar, 1996).

2.3 Marco Estructural

2.3.1 Falla Guápiles

Es el rasgo estructural más notorio del área de estudio, se localiza en el flanco norte del macizo Irazú, dentro de la zona de estudio se observa su escarpe pronunciado en el distrito de Guápiles, cerca de la ruta 32 entre el río Corinto y el río Toro Amarillo, sin embargo, se extiende hasta el cantón de Jiménez (Foto 3).



Foto 3. Vista de escarpe de la falla Guápiles, desde La Unión de Guápiles.

Presenta una orientación promedio E-O, con una traza bastante lineal y un movimiento de tipo inverso (Borgia et al., 1990). En su parte delantera presenta un escarpe entre juvenil con una altura de entre 150-100 m en sus sectores O y central, que disminuye a unos 40 m hacia el E, donde es más joven y rectilíneo (Montero, 2001). Al S del escarpe existen lomas limitadas por contraescarpas de suave pendiente, debido a la presencia de un pliegue delantero asociado con una falla de propagación inversa. Del lado S de esta falla, el 30 de setiembre de 1998 se localizó un sismo de magnitud 4,0, con una profundidad de 8 km y un mecanismo focal inverso (Montero, 2001).

De acuerdo con Boschini (1989) es posible que la falla presente un componente dextral para esta falla, con base en una serie de pequeñas fracturas orientadas noroeste-sureste,

es decir, oblicuas al rumbo de la falla. Se desconoce su ángulo de inclinación, mientras su plano de falla se perfila hacia el sur (Montero, 2001).

Antiformas descritos por Borgia et al., 1990 y Montero, 1994, como estructuras que bordean el sector norte de la CVC, presentan un rumbo EW, con una longitud axial de aproximadamente 5 km. Litológicamente se compone de rocas provenientes del Volcán Irazú. Es cortado parcialmente por el fallamiento de tipo normal. Su origen se relaciona a los esfuerzos de compresión provocados por la falla Guápiles.

2.3.2 Falla Río Blanco, Falla Blanquito y Falla Alto Grande

Montero & Alvarado (1995) estudian el contexto neotectónico del Volcán Irazú, en este trabajo de redefinen algunas fallas ubicadas al norte de la zona de estudio. Estas tienen un rumbo aproximado noroeste-sureste y son aproximadamente paralelas.

La falla Río Blanco (13 km de longitud) posee un escarpe de falla regresivo con facetas trapezoidales de unos 100 m de altura (Montero & Alvarado, 1995). La falla Blanquito tiene una longitud mínima de 9 km, corresponde probablemente con un falla normal con escarpes originales pequeños (<10 m de altura), pero debido la erosión diferencial se han originado prominentes escarpes de línea de falla de unos 250 m de altura, tanto en el mismo sentido de movimiento de la falla como en el opuesto, generando en algunos casos valles de falla (Montero & Alvarado, 1995).

En la falla Alto Grande, que forma un sistema con las anteriores, ocurre algo similar a la falla Blanquito, en donde el escarpe de falla desplaza la superficie original del escudo volcánico unos 10 m, pero debido a la intensa erosión diferencial se han esculpido farallones de hasta 350-550 m de altura (Montero & Alvarado, 1995). Según los mismos autores, aunque es una falla importante, su velocidad de movimiento vertical juzgando el escarpe preservado de falla, ha de ser relativamente baja o bien, corresponde con una falla relativamente joven (< 50.000 años) en una zona con intensa erosión.

Interpretación Tectónica

Con respecto a la Falla Guápiles y sus antiformas éstos se produjeron debido a esfuerzos regionales que predominan a lo largo de la CVC, de ésta forma las fallas forman parte de un sistema regional de fallas y pliegues asociados con la interacción del levantamiento del Coco (Montero, 1994), así como también podrían formar parte de la zona de deformación que se presenta entre la denominada microplaca de Panamá y la región norte de Costa Rica (Fisher et al., 1994).

Con respecto a las fallas – alineamientos de tipo normal y de orientación radial, Montero (1994) considera que; originalmente se formaron fracturas tensionales relacionadas con los esfuerzos magmáticos, localizándose la zona focal en la región sumital de los macizos Irazú-Turrialba. Posteriormente estas fracturas radiales se reactivaron como fallas de desplazamiento de rumbo que permitieron el deslizamiento gravitacional diferencial de los diversos sectores del flanco norte de los volcanes.

2.4 Geología local

Se inventariaron un total de 80 afloramientos de roca, tal y como se muestra en las Figuras 6 y 7. Esta información, en conjunto con el mapa de pendientes, el mapa geomorfológico y la información de los pozos y los sondeos eléctricos verticales permitieron elaborar el mapa geológico de la zonas de estudio en donde se destacan tres unidades informales: la Unidad Reventado, la Unidad depósitos volcánicos Turrialba y la Unidad Guápiles que incluye lahares y aluviones recientes, en los Anexos 2 y 3 se presentan resultados usados para proponer dichas unidades, las cuales son descritas a continuación:

2.4.1 Unidad Reventado

Aflora en la zona suroeste del área de estudio, en el sector sur de la Falla Guápiles y al oeste del río Toro Amarillo (Figura 6 y 7). Se incluyen en esta unidad flujos de lavas que afloran en la Ruta 32 después del puente del río Sucio hasta antes del cruce de río Frío,

además de tobas y lahares. La columna 1 muestra un detalle de la ubicación espacial y temporal de los depósitos observados en el campo en el sector oeste del área de estudio, específicamente en la quebrada Molinete Grande; la descripción de los afloramientos se puede consultar en el Anexo 2. Esta unidad también incluye tobas intercaladas con flujos de lava, tal y como se muestra en la columna representativa del sector suroeste del área de estudio (Figura 8). La distribución espacial de esta unidad se muestra en la Figura 7.

Petrográficamente las lavas se clasifican como andesitas hasta andesitas-basálticas (Anexo 4) con textura holocristalina xenomórfica porfírica, tienen 60-80 % de matriz, con fenocristales de plagioclasa (65-75 %) tamaño máximo 8,4 x 2,25 mm y clinopiroxenos (15-38 %) con tamaño máximo de 4 x 1,75 mm; de las secciones analizadas el contenido de olivino varía entre 0 y 5%. Según Alvarado (1993) las andesitas-basálticas son las lavas más comunes del volcán Irazú; estas contienen fenocristales de plagioclasa (Anortita 40-86) de abundancia variada, su composición y zonación varían grandemente; también contiene olivino con inclusiones de espinelas de Cr, algunos están alterados a idingsita, son comunes los cristales euhedrales (Alvarado, 1993). Además, el autor menciona la presencia de augita en cristales euhedrales y en microcristales; están presentes ortopiroxenos con anillos de augita, así como titanomagnetita; abundan los microlitos de plagioclasa con clinopiroxenos como minerales predominantes en la matriz (Alvarado, 1993).

Esta unidad se correlaciona con la Formación Reventado propuesta por Krushensky (1972); la cual incluye una secuencia antigua del Irazú de flujos de lava principalmente andesítico-basálticos hasta andesitas hornbléndicas intercaladas con lahares y depósitos de tefra (Alvarado 1993).

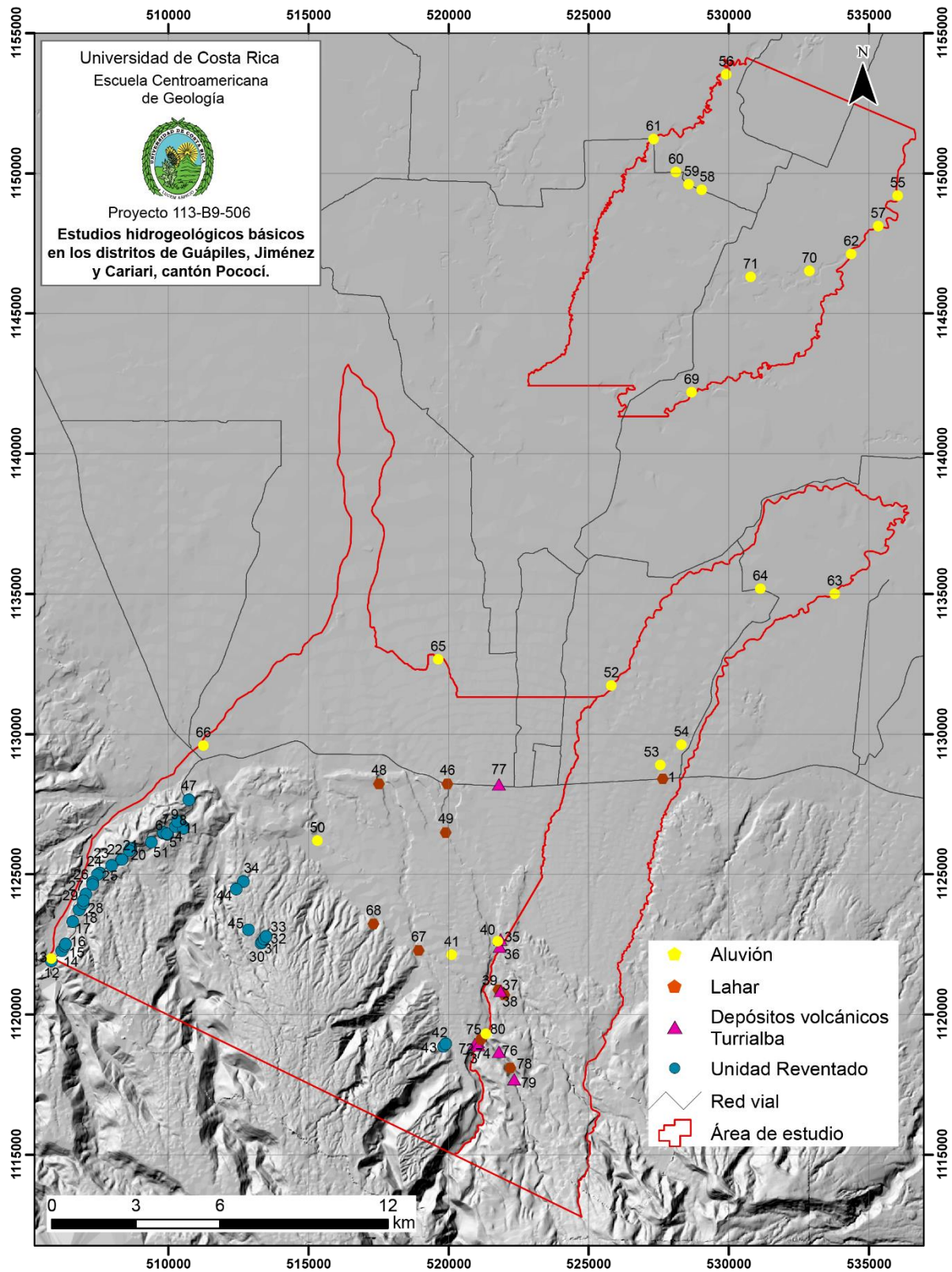


Figura 6. Mapa de afloramientos de las zonas de estudio.

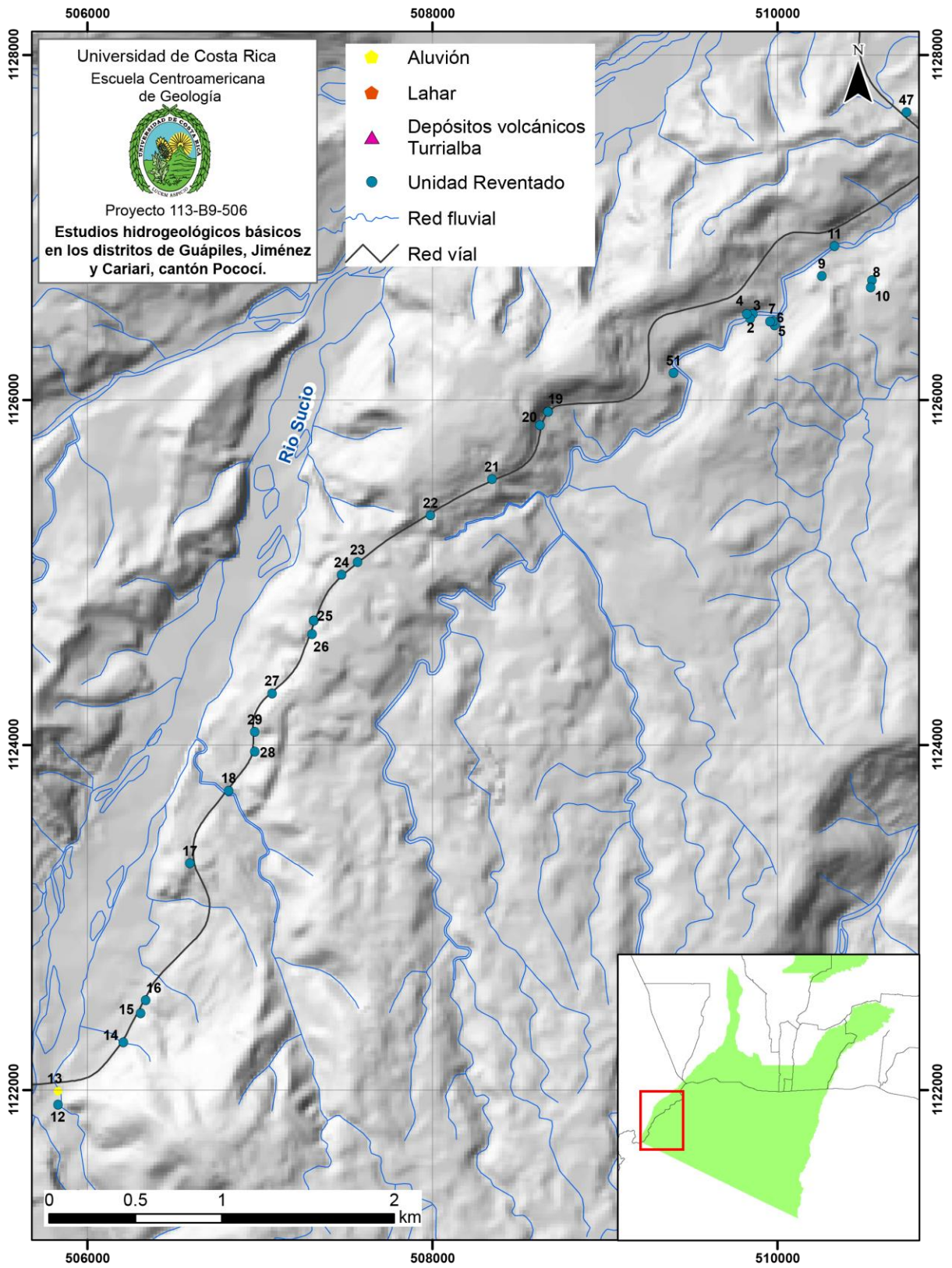


Figura 7. Detalle de afloramientos en ruta 32.

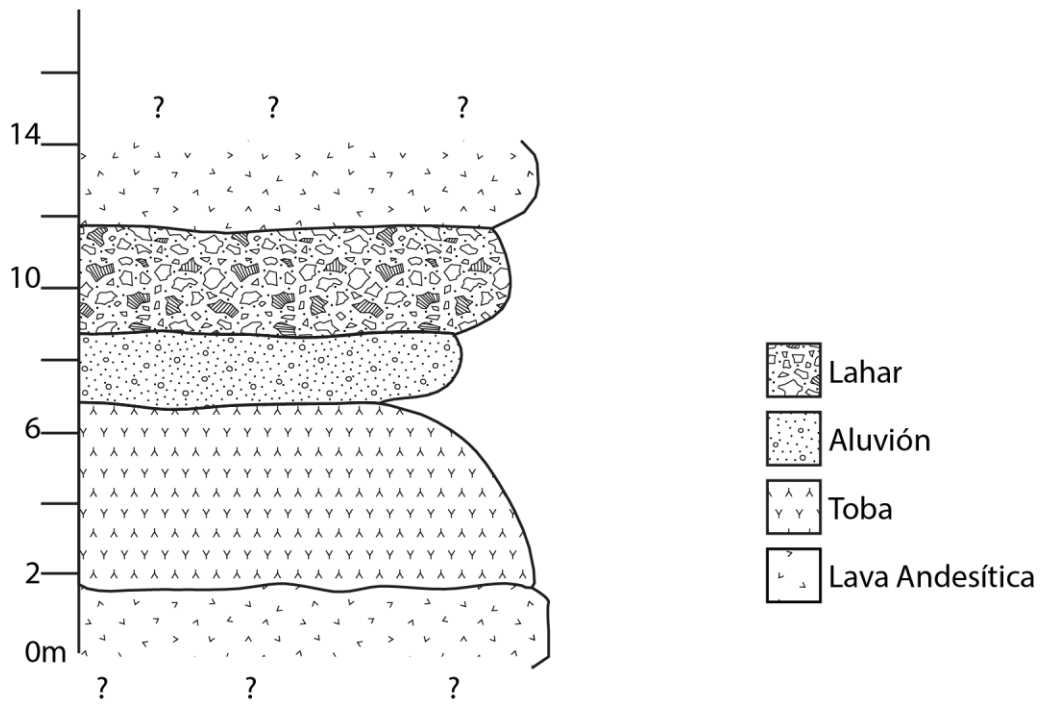


Figura 8. Columna representativa del sector suroeste del área de estudio. Afloramiento # 11 (Anexo 2).



Foto 4. Afloramiento # 3 de lavas andesíticas ubicadas en la base de la columna (Figura 5), muy fracturadas por actividad tectónica, margen derecha de la quebrada Molinete Grande, Unidad Reventado. Coordenadas CRTM05 112647.87 Norte y 509843.1 Este.

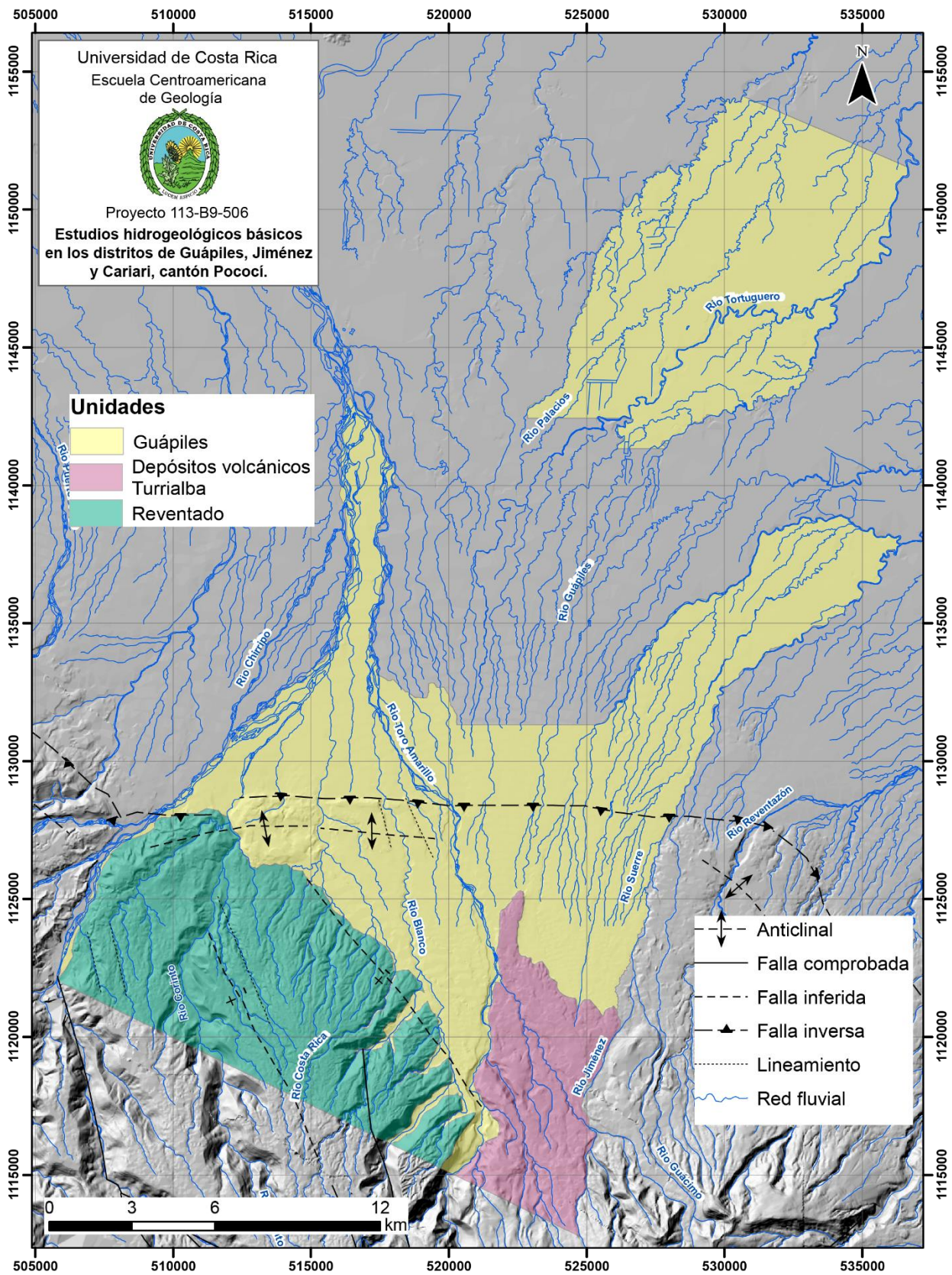


Figura 9. Mapa Geológico local de la zona de estudio. Rasgos estructurales adaptados de Denyer & Alvarado (2007).

2.4.2 Unidad de Depósitos volcánicos Turrialba

Afloran en la zona sur de distrito de Jiménez donde se observaron coladas alargadas norte sur y en la margen derecha del río Toro Amarillo, estas se extienden al norte hasta la coordenada 11250000 aproximadamente. Se trata de lavas andesíticas, con textura porfírica color gris, con plagioclasas 15%, hornblendas y piroxenos 10% cuarzo 3% lajeadas, se observó un espesor de 25 metros en el afloramiento # 35 (Foto 5).

En el río Mercedes, afluente del río Toro Amarillo, se observó una pared de lavas (conocida como Catarata Chindama) donde se observan aproximadamente 100 m de espesor, correlacionada con un frente de colada de esta unidad, se trata de lavas andesíticas columnares (Foto 6).

Se correlacionan con las coladas Jiménez y Turrialba propuestas por Salazar (1996), ambas asociadas con el volcán Turrialba según el mismo autor y en el área de estudio se ubican en el extremo sureste de las zonas de estudio.



Foto 5. Afloramiento # 35 de lavas andesíticas, apariencia lajas. Coordenadas CRTM05 1122786.43 Norte y 521806.19 Este.

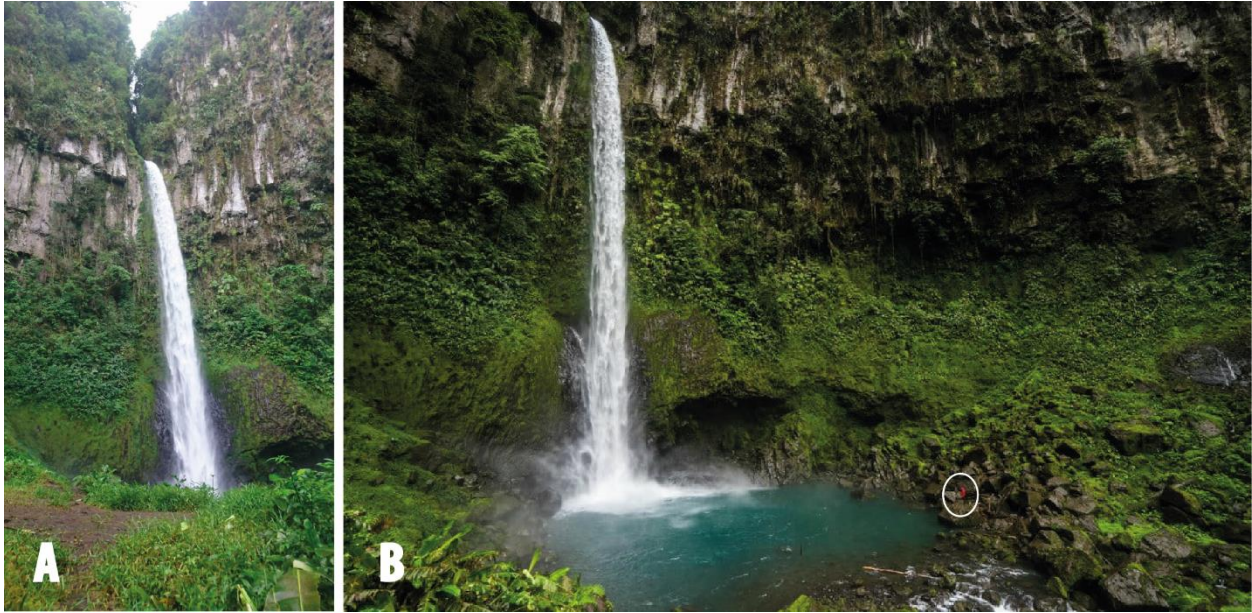


Foto 6. A) Afloramiento # 79 de lavas andesíticas columnares. Coordenadas CRTM05 1117697.44 Norte y 522352.9 Este. B) Foto de Catarata Chindama tomada de: <http://www.thewaterfalltrail.com/home/2016/11/7/chindama>, observar persona en parte inferior derecha.

2.4.3 Unidad Guápiles

Agrupación de depósitos producto de la erosión y depositación de materiales volcánicos erosionados de los volcanes Turrialba e Irazú. Por lo general los aluviones (Foto 9) se localizan en los ríos principales de la zona: Corinto, Costa Rica, Blanco y Toro Amarillo, mientras que los lahares se observan en la zona plana y en los cortes recientes de la ampliación de la Ruta 32 cerca del río Toro Amarillo se observan espesores de 10 metros en los márgenes de la carretera (afloramientos 45, 47 y 48, Anexo 3), en esta zona se observan algunos aluviones subordinados. Hacia el sector norte se encuentran aluviones de distinta granulometría (Foto 7 y 8), sin embargo aún en la zona plana se observan lahares por lo que se mantuvieron estos depósitos dentro de una sola unidad, al no contar con información suficiente para su separación.



Foto 7. Afloramiento # 50 de aluvión, en las Coordenadas CRTM05 1126197 Norte y 515331,1 Este.



Foto 8. Afloramiento # 52 de depósito aluvional, en las Coordenadas CRTM05 1131732,61 Norte y 525817,267 Este.



Foto 9. Afloramiento # 46 de debris avalanche (lahar), ubicado en el margen de la Ruta 32, en las Coordenadas CRTM05 1128219 Norte y 519967 Este.

2.5 Geofísica

Los equipos utilizados realizan una estimación de la resistividad del subsuelo a partir de su resistividad aparente, la cual se utiliza como un instrumento para evaluar los espesores de capas geológicas, las profundidades de niveles freáticos, zonas de dispersión salina, entre otros (Murillo, 2008).

El método de resistividad eléctrica utiliza una fuente generadora de corriente (I), que es inyectada en el suelo a través de dos electrodos (A y B), la corriente produce una diferencia de potencial (V) que es medida en los electrodos de potencial (M y N). La disposición relativa de los electrodos es conocida también como arreglo geoelectrico y su escogencia depende de las características del objeto de estudio. En aplicaciones geológicas este método geofísico es utilizado en las técnicas de SEVs, estos permiten medir la variación vertical de la resistividad aparente debajo de un punto único, y son usados para estimar la posición y espesor de capas litológicas horizontales en profundidad (Murillo, 2008).

Dispositivos electródicos Schlumberger

Tanto en los SEVs como en las tomografías se utilizó el arreglo electródico Schlumberger, la Figura 10 muestra el ordenamiento inicial del dispositivo.

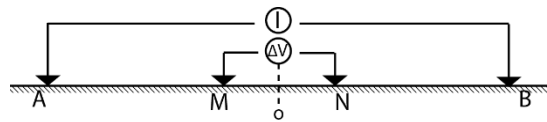


Figura 10. Distribución de electrodos en configuración Schlumberger.

Las mediciones que se centrarán en el punto central (O) y conforme se van extendiendo los pines, la distancia AB variará, lo que provoca que la corriente eléctrica atravesará cada vez a mayor profundidad (Sánchez, 2014) (Figura 11).

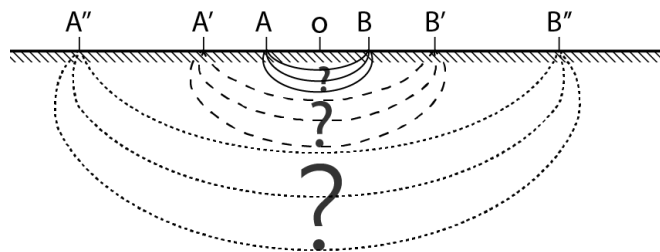


Figura 11. Esquema simplificado de un sondeo eléctrico: A medida que se abre la distancia AB, aumenta la profundidad de investigación. Tomado de Sánchez (2014).

Los sucesivos valores de resistividad aparente que se van obteniendo corresponden a profundidades cada vez mayores.

En el caso de los SEVs la profundidad de investigación teórica máxima alcanzada en este estudio mediante la utilización del método fue de hasta 68 m, la cual es aproximadamente la tercera parte de la abertura máxima de los electrodos $AB/2$.

Con la realización de una serie de SEV a lo largo de una determinada área se logra la interpretación del contexto geológico del subsuelo (Figura 12).

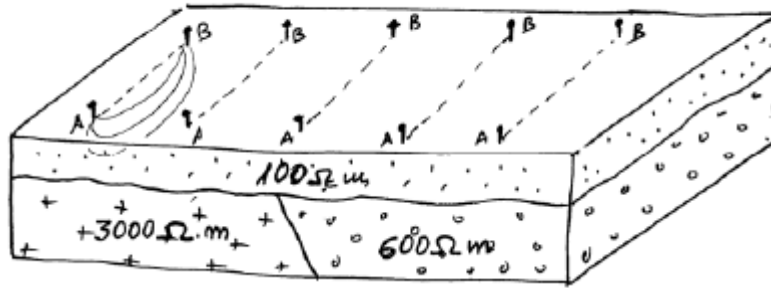


Figura 12. Esquema de una serie de SEVs a lo largo de un área dada, esto permite la interpretación del contexto geológico. Tomado de Sánchez (2014).

En el caso de las tomografías, como se mencionó anteriormente, también se utilizó el arreglo eléctrico Schlumberger. Si bien estas utilizan el mismo principio físico que los sondeos eléctricos verticales (SEV), es un modelo más preciso pues es bidimensional (2D), es decir, toma en cuenta que la resistividad cambia en la dirección vertical, así como en la horizontal a lo largo de la línea topográfica (Loke, 2004). En este caso, se supone que la resistividad no cambia en la dirección perpendicular, sin embargo, según Loke (2004) esta es una suposición razonable en muchos contextos geológicos.

El método consiste en colocar en el suelo una cantidad determinada de electrodos a lo largo de una línea recta, normalmente con espaciado constante entre electrodos adyacentes, que depende del grado de resolución que se necesite; los electrodos se conectan mediante un cable multicanal (Loke, 2004). Los parámetros y el arreglo a utilizar se ingresan a la computadora portátil, la cual selecciona automáticamente los electrodos apropiados para cada medición (Loke, 2004). Cada uno de esos cuadripolos hace una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuadripolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman (Arancil et al., 2003).

La Figura 13 muestra un ejemplo de la disposición de los electrodos y la secuencia de medición que se puede utilizar para un levantamiento de imágenes eléctricas en 2D.

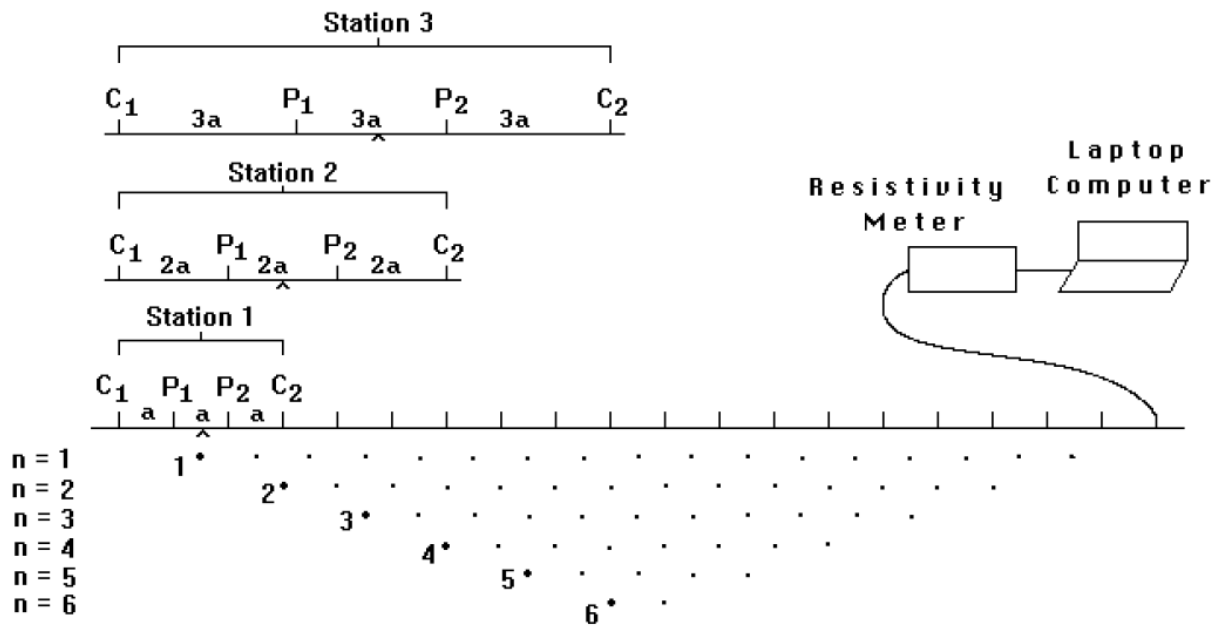


Figura 13. Secuencia de mediciones para construir una pseudosección eléctrica usando configuración de levantamiento de electrodos múltiples controlada por una computadora.

Los datos pueden ser interpolados y unidos por medio de líneas de iso-resistividad obteniendo una pseudosección en 2D (Arias, 2002). La técnica de inversión automatizada, generalmente está basada en el método de suavizado de mínimos cuadrados que produce un modelado de dos dimensiones a partir de los valores de resistividad aparente de la pseudosección, este modelo presentará la profundidad y resistividad real del subsuelo (Arias, 2002). La pseudosección proporciona una imagen muy aproximada de la verdadera distribución de resistividad sub-superficial, sin embargo, es importante tomar en cuenta que está depende del tipo de arreglo utilizado (Loke, 2004), por ellos es importante elegir adecuadamente la geometría a utilizar y realizar una inversión apropiada de los datos (Arias, 2002).

2.5.1 Sondeos eléctricos verticales

Se realizaron un total de 20 SEVs, nueve distribuidos en el distrito de Guápiles, seis en el distrito de Jiménez y 5 en Cariari. Se emplearon diferentes aperturas adaptadas a las condiciones encontradas en la zona de estudio, la abertura máxima de $AB/2$ fue de 200 m. El

equipo usado fue el modelo SYSCAL_R1/PLUS de la IRIS Instruments® con cuatro electrodos, propiedad del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (Foto 10).



Foto 10. A) Equipo utilizado para realizar los sondeos eléctricos verticales (SEV). B) SEV realizado en las cercanías del margen izquierdo del Río Chirripó, vista hacia el sur en donde se aprecia el macizo volcánico Turrialba.

Los resultados obtenidos fueron procesados mediante la utilización de los softwares libres IPI2WIN® y QWSELN® y correlacionados mediante la observación y descripción de geología de campo, realización de perfiles, así como la información de los expedientes de pozos de SENARA.

La ubicación se realizó en base a las recomendaciones brindadas. Cabe señalar que únicamente los sondeos SEV 10, SEV 12 y SEV 13 ubicados en el sector norte del distrito de Jiménez fueron reubicados con una diferencia no mayor a 1,2 km de distancia de la propuesta inicial, esto debido a problemas de acceso ya que en la zona había algunos puentes colapsados, así como caminos en fincas privadas en las cuales no se obtuvo acceso.

En el Cuadro 4 se muestra el código y las coordenadas de ubicación de los sondeos realizados, los cuales se pueden apreciar en la Figura 14. En el Anexo 5 se apreciarán los datos obtenidos en el campo, así como fotografías de cada uno de los sitios seleccionados.

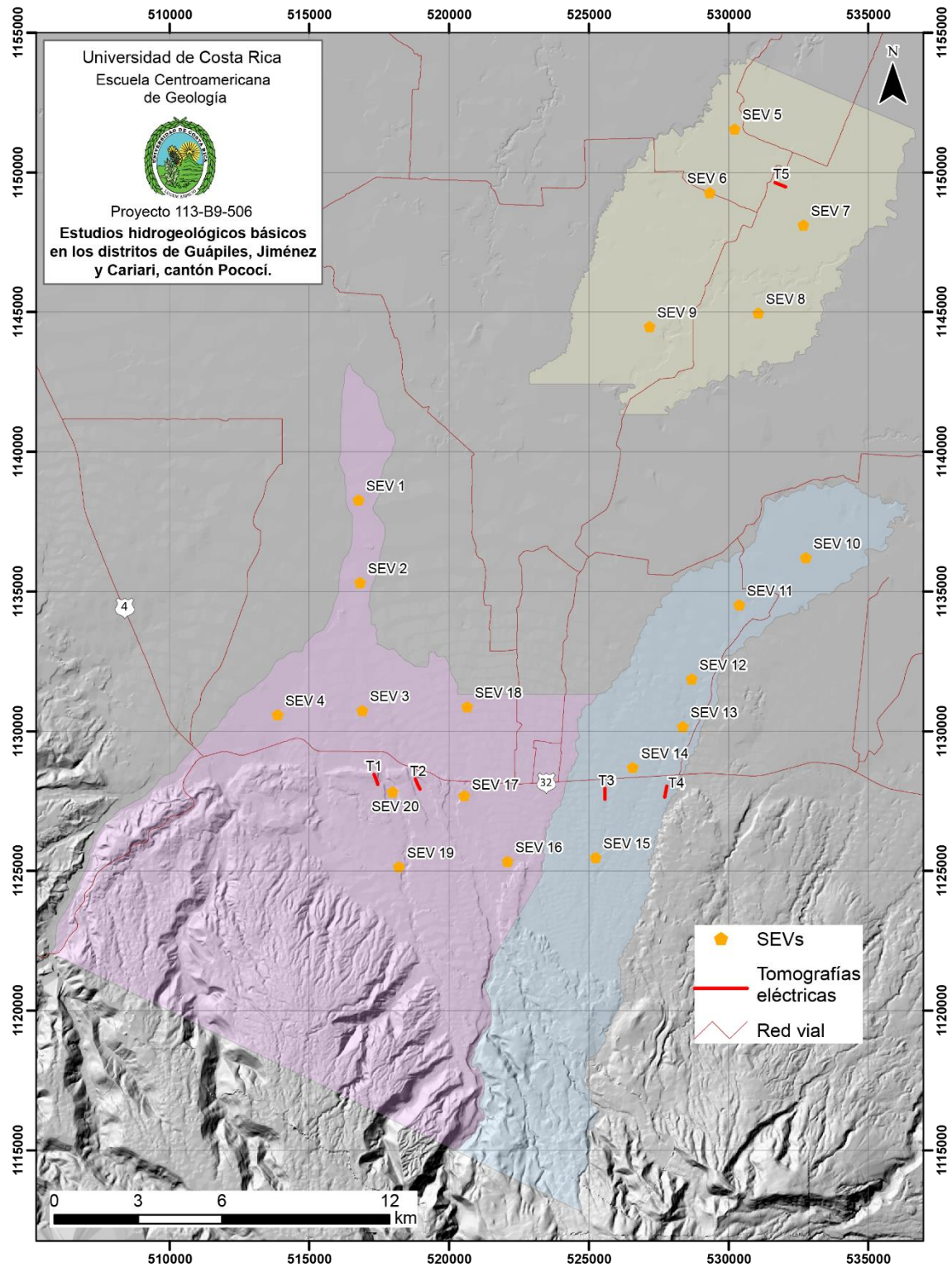


Figura 14. Ubicación de SEVs y tomografías eléctricas.

Cuadro 4. Coordenadas de los sondeos eléctricos verticales realizados en las áreas de estudio.

Código	Coordenadas Lambert Norte Longitud	Coordenadas Lambert Norte Latitud	Coordenadas CRTM05 Latitud	Coordenadas CRTM05 Longitud
SEV1	553062	252948	1138288,145	516761,317
SEV2	553127	249987	1135327,284	516823,193
SEV3	553203	245415	1130755,553	516894,336
SEV4	550177	245259	1130602,783	513868,403
SEV5	566507	266242	1151567,036	530219,463
SEV6	565619	263955	1149281,119	529329,109
SEV7	568958	262807	1148129,665	532666,687
SEV8	567360	259660	1144984,544	531065,461
SEV9	563469	259159	1144487,701	527174,174
SEV10	569062	250904	1136227,297	532758,045
SEV11	566690	249208	1134533,93	530384,389
SEV12	564982	246552	1131879,943	528673,671
SEV13	564676	244843	1130171,388	528365,872
SEV14	562874	243382	1128712,413	526562,437
SEV15	561552	240164	1125496,08	525237,1
SEV16	558403	240021	1125356,442	522088,19
SEV17	556850	242363	1127699,913	520537,812
SEV18	556948	245547	1130883,579	520639,185
SEV19	554524	239812	1125151,593	518209,278
SEV20	554287	242502	1127841,636	517975,167

Resultados Sondeos Eléctricos Verticales sector Guápiles-Jiménez

Una vez realizados los SEVs, las resistividades aparentes obtenidas en el campo se tabularon en el software IPI2WIN, con éste se graficaron los datos tratando de ajustar los valores con el objetivo de obtener la resistividad real del medio, esto mediante la aplicación de un modelo numérico que se ajustara a las características geológicas e hidrogeológicas más aceptables obtenidas y fundamentadas en la geología observada así como por medio de información de pozos cercanos a los sitios en donde se realizaron los sondeos.

A continuación, se muestran los gráficos realizados con el modelo de mejor ajuste para cada SEV en los distritos de Guápiles y Jiménez (Gráfico 3 y 4). Estos se pueden observar a una mejor escala en el Anexo 5.

Gráfico 3. Se muestra la inversión de datos planteada para los SEV del 1 al 4 y del 10 al 14, sector de Guápiles-Jiménez.

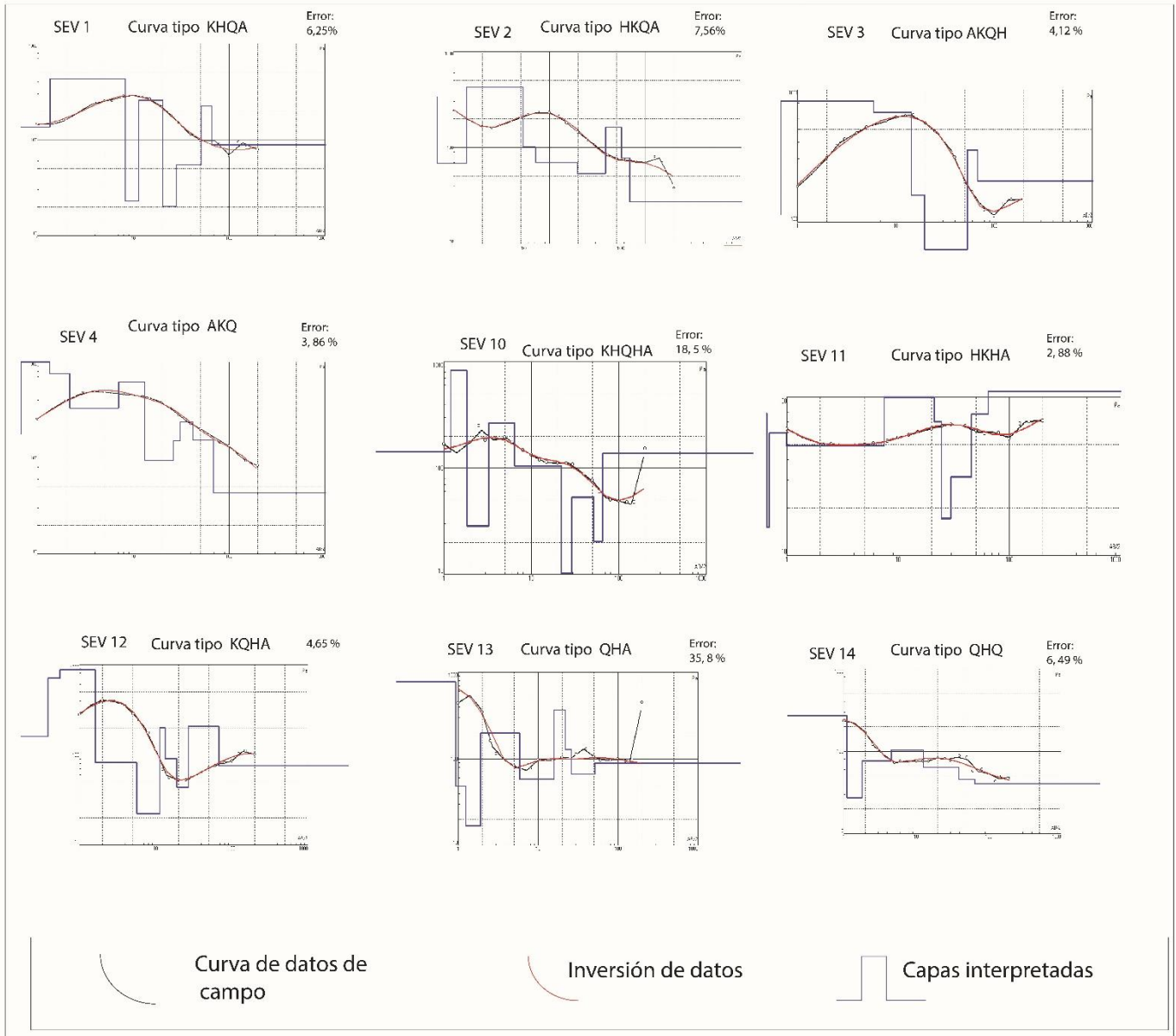
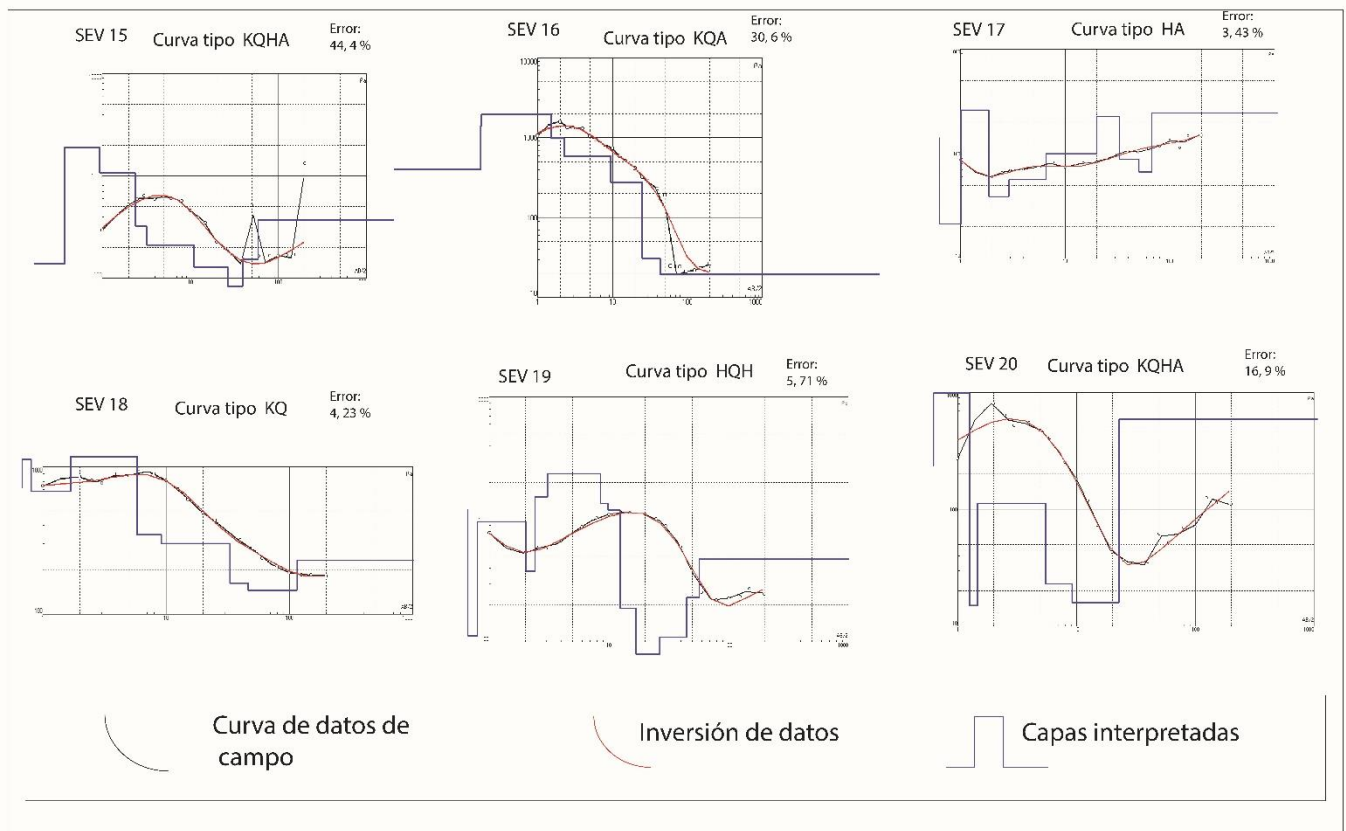


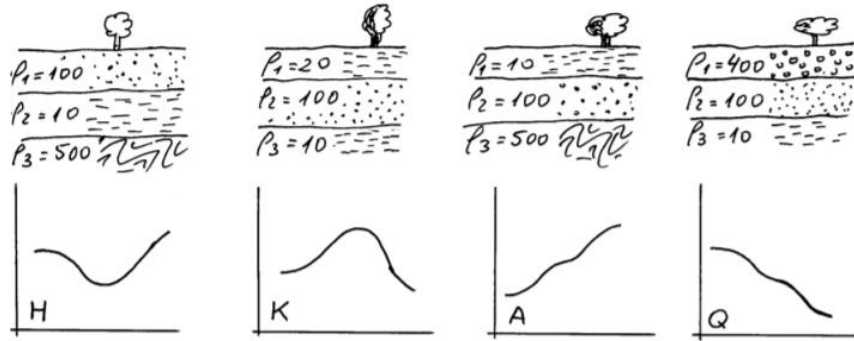
Gráfico 4. Se muestra la inversión de datos planteada para los SEV del 15 al 20, sector de Guápiles-Jiménez.



Una vez cotejadas las curvas de campo con las curvas de inversión de datos, se observaron algunas tendencias importantes de tomar en cuenta.

En primer lugar, los modelos presentados se caracterizan por ser de más de cuatro capas, esto se debe a una amplia variedad en los valores de resistividad que rondan desde los 1300 Ω m hasta 7 Ω m, los cuales cambian a pocos metros de profundidad, lo que genera que las curvas tiendan a ser muy pronunciadas y con ejes de inflexión muy abruptos, lo que genera que se deban agregar capas considerando secciones ocultas con el fin de lograr el mejor ajuste a la curva.

Las curvas se han clasificado por su tipo, basándose en el comportamiento de los valores de resistividad de cada capa conforme se profundiza el sondeo de acuerdo a la Figura 15.



Cuando el subsuelo se compone de tres capas, se admiten cuatro posibilidades:

Tipo H.- La segunda es la menos resistiva de las tres, es decir: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$.

Tipo K.- La segunda es la más resistiva de las tres, es decir: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$.

Tipo A.- La resistividad va aumentando con la profundidad, es decir: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.

Tipo Q.- La resistividad va disminuyendo con la profundidad, es decir: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$.

Figura 15. Tipos de curvas de acuerdo al comportamiento de la resistividad, para modelos mayores a 3 capas se hace una combinación de las mismas (Tomado de Sánchez, 2014).

Como resultado de dicha clasificación se observó mucha variabilidad en las resistividades en los primeros 10 metros prospectados, estos son sectores en donde los espesores definidos tienden a ser de pocos metros (menores a 4 m en general) y de amplia variabilidad de valores resistivos, lo que genera que la mayor cantidad de capas se localice en los primeros metros de profundidad, esto puede indicar la presencia de un medio litológico poco homogéneo.

En general el 46% de los SEV (7 sondeos) de la zona inician con curvas de tipo K, 4 sondeos inician con curvas tipo H, lo que equivale al 26,6 %, por último, tanto las curvas tipo Q y A representan cada una un 13,3% (dos sondeos cada una). Esto evidencia una leve predominancia de la presencia en superficie de capas resistivas entre capas más conductoras.

Con respecto a las últimas capas de los sondeos, en general éstas se ubican entre los 50 y 66 m de profundidad, se muestra que el 66,6% de los sondeos terminan con curvas de tipo A (10 sondeos), lo que implica una tendencia al aumento de la resistividad la cual se tiende a tornar constante, lo que podría implicar la presencia de un basamento para la zona estudiada.

El Cuadro 5 muestra los datos obtenidos una vez realizada la inversión de datos; se muestran las capas de resistividad encontradas, su espesor y su profundidad.

Cuadro 5. Resumen del modelado planteado para cada uno de los SEV, realizados en el área de los distritos de Guápiles-Jiménez.

Léase: resistividad en Ωm , espesor y profundidad en m.

SEV-1 ERROR 6,25%					SEV-2 ERROR 7,56 %				
Capas	resistividad	espesor	Profundidad	Interpretación*	Capas	resistividad	espesor	profundidad	Interpretación*
1	136	1,36	1,36	Aluvión Grueso	1	337	0,6	0,6	Aluvión Grueso
2	430	6,94	8,3	Aluvión Grueso	2	68,4	0,742	1,342	Aluvión fino
3	23,1	3,18	11,48	Aluvión Medio/Nivel	3	427	3,95	5,292	Aluvión Grueso
4	259	8,93	20,41	Aluvión Grueso	4	102	1,86	7,152	Aluvión Grueso
5	20,2	7,82	28,23	Aluvión medio/nivel	5	70	12,4	19,5	Aluvión Medio/Nivel
6	54,9	23,2	51,43	Aluvión Grueso	6	53,6	18,8	38,35	Aluvión Grano Grueso
7	225	14,7	66,13	Lavas	7	163	17,8	56,15	Lavas
8	88,6			Lavas Fracturadas/nivel	8	77,8	12,6	68,75	Lavas Fracturadas/Nivel
					9	27,3			Lavas Fracturadas
SEV-3 ERROR 4,12 %					SEV- 4 ERROR 3,86 %				
Capas	resistividad	espesor	profundidad	Interpretación*	Capas	resistividad	espesor	profundidad	Interpretación*
1	114	0,5	0,5	Aluvión Grueso	1	176	0,6	0,6	Aluvión Grueso
2	817	5,45	5,95	Aluvión Grueso	2	1215	0,75	1,35	Aluvión Grueso
3	678	8,45	14,4	Aluvión Grueso	3	753	0,828	2,2	Aluvión Grueso
4	160	5,2	19,6	Aluvión Grueso	4	329	4,88	7,1	Aluvión Grueso
5	62	34	53,6	Aluvión Medio/nivel	5	615	6,12	13,17	Aluvión Grueso
6	351	14,2	67,8	Lavas	6	94,5	13,1	26,27	Aluvión Medio/nivel
7	204			Lavas Fracturadas/nivel	7	151	4,62	30,89	Lavas Fracturas/Brechas
					8	236	11,1	42	Lavas
					9	154	26,9	68,8	Lavas Fracturadas/Nivel
					10	43,4			

SEV-10 ERROR 18,5 %					SEV- 11 ERROR 2,88 %				
<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>	<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>
1	143	1,21	1,21	Aluvión Grueso	1	79	0,56	0,56	Aluvión Grueso
2	832	0,635	1,84	Aluvión Grueso	2	15,1	0,12	0,69	Aluvión Fino
3	28,6	1,43	3,27	Aluvión Medio	3	59,6	0,29	0,98	Aluvión Medio
4	266	3,18	6,46	Aluvión Grueso	4	49,4	6,52	7,51	Aluvión Medio/Nivel
5	105	15,7	22,1	Aluvión Grueso	5	100	13,7	21,2	Lavas
6	10,2	7,04	29,2	Aluvión Fino/Nivel	6	69,9	3,3	24,5	Lavas Fracturadas/nivel
7	53,1	22,7	51,9	Aluvión Medio	7	17,1	5,31	29,8	Lavas
8	20,4	13,4	65,3	Aluvión Medio	8	31,4	16	45,7	Lavas
9	138			Lavas	9	78,1	19	64,7	Lavas
					10	109			
SEV- 12 ERROR 4,65 %					SEV- 13 ERROR 35,8%				
<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>	<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>
1	160	0,38	0,385	Aluvión Grueso	1	776	0,933	0,93	Aluvión Grueso
2	708	0,165	0,55	Aluvión Grueso	2	48,4	0,311	1,24	Aluvión Medio
3	881	1,05	1,6	Aluvión Grueso	3	16,8	0,66	1,91	Aluvión Fino
4	82,2	4,02	5,62	Aluvión Medio	4	141	7,05	8,96	Aluvión Medio
5	22,4	5,73	11,4	Aluvión medio/Nivel	5	77,6	10,4	19,4	Lavas fracturadas/Nivel
6	200	1,95	13,3	Lavas	6	146	8,91	28,3	Lavas
				Lavas	7	101	26,8	55,1	Lavas/Nivel
7	91,2	5,54	18,8	Fracturadas/Nivel	8	85,1			Lavas fracturadas
8	43,7	8,08	26,9	Lavas Fracturadas					
9	207	40,7	67,6	Lavas					
10	75,9			Lava Fracturadas					

SEV-14 ERROR 6,49%					SEV-15 ERROR 44,4 %				
<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>Profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>	<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>
1	271	1,11	1,11	Aluvión Grueso	1	138	0,37	0,4	Relleno
2	27,2	0,69	1,8	Aluvión Medio	2	1905	0,56	0,9	Coluvio
3	76,7	2,77	4,57	Aluvión Medio	3	1072	1,44	2,4	Coluvio/Aluviones
4	104	8,02	12,6	Lavas	4	325	0,828	3,2	Aluvión Grueso
5	63,8	26,3	38,9	Fracturadas/nivel	5	211	7,77	11,0	Aluvión Medio/Nivel
6	45,7	25,7	64,6	Lavas	6	129	15,6	26,6	Lavas
7	40,3			Lavas	7	74,1	12,7	39,3	Lavas Fracturadas/Nivel
					8	153	19,5	58,8	Lavas
					9	372			Lavas
SEV-16 ERROR 30,6 %					SEV-17 ERROR 3,43 %				
<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>	<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>
1	403	0,174	0,174	Coluvio/Aluviones	1	141	0,5	0,5	Aluvión Grueso
2	1380	0,1	0,176	Coluvio/Aluviones	2	21,4	0,5	1,013	Aluvión medio
3	1972	1,34	1,51	Coluvio/Aluviones	3	261	0,85	1,865	Aluvión Grueso
4	989	0,72	2,24	Coluvio/Aluviones	4	38,9	1,03	2,895	Aluvión medio
5	585	7,26	9,49	Lavas	5	56,6	3,65	6,54	Aluvión medio
6	278	15,5	25	Lavas	6	100	13,5	20,04	Aluvión grueso
7	30,8	18,5	43,6	Lavas Fracturadas/nivel	7	228	12,8	32,8	Lavas
8	19,3			Lavas Fracturadas	8	88,8	17,8	50,64	Lavas Fracturadas/Nivel
					9	67,1	16,4	67,04	Lavas Fracturadas
					10	246			Lavas

SEV-18 ERROR 4,23 %					SEV- 19 ERROR 5,71 %				
<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>	<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>
1	722	0,66	0,66	Coluvio	1	1193	0,5	0,5	Coluvio/Aluviones
2	1120	0,13	0,79	Coluvio	2	112	0,25	0,79	Coluvio/Aluviones
3	683,1	0,87	1,66	Coluvio	3	959	1,22	2,013	Coluvio/Aluviones
4	1176	4,129	5,79	Coluvio	4	379	0,38	2,4	Coluvio/Aluviones
5	346	3,338	9,13	Aluvión Grueso	5	1533	0,66	3,0	Coluvio/Aluviones
6	301,2	23,78	32,9	Aluvión Grueso	6	2369	5,46	8,52	Coluvio/Aluviones
7	163	13,36	46,27	Lavas	7	1352	1,32	9,84	Coluvio/Aluviones
8	80,3	17,7	63,9	Lavas Fracturadas	8	1192	2,59	12,43	Coluvio/Aluviones
9	232,4			Lavas	9	189	4,37	16,8	Lavas
					10	66,5	9,83	26,63	Lavas Fracturadas
					11	110	18,1	44,7	Lavas
					12	231	12,3	57,0	Lavas
					13	475			Lavas
SEV- 20 ERROR 4,65 %									
<i>Capas</i>	<i>resistividad</i>	<i>espesor</i>	<i>profundidad</i>	<i>Interpretación*</i>					
1	238	0,5	0,5	Coluvio/Aluviones					
2	2319	0,75	1,258	Coluvio/Aluviones					
3	15,1	0,212	1,47	Aluvión Fino					
4	112	4,05	5,52	Aluvión Grueso					
5	23	3,67	9,19	Aluvión Medio/Nivel					
6	16	13,6	22,79	Aluvión Medio					
7	591			Lavas Fracturadas/Nivel					

En cuanto a los porcentajes de error que muestran los datos procesados, cinco sondeos presentan valores menores al 5%, cuatro sondeos valores entre un 5% y 10%, mientras que cuatro sondeos presentan valores mayores al 10% de error.

En general, el porcentaje de error, relativamente elevado, se produce por la presencia de valores anómalos, principalmente ubicados ya sea en los primeros metros en superficie, en donde existe una amplia variabilidad en las resistividades o en los metros finales a profundidad como es el caso de los sondeos: SEV10, SEV15, SEV16 y SEV20, en donde la última medición presenta un valor de resistividad sumamente alto separado de la norma, lo que impide un

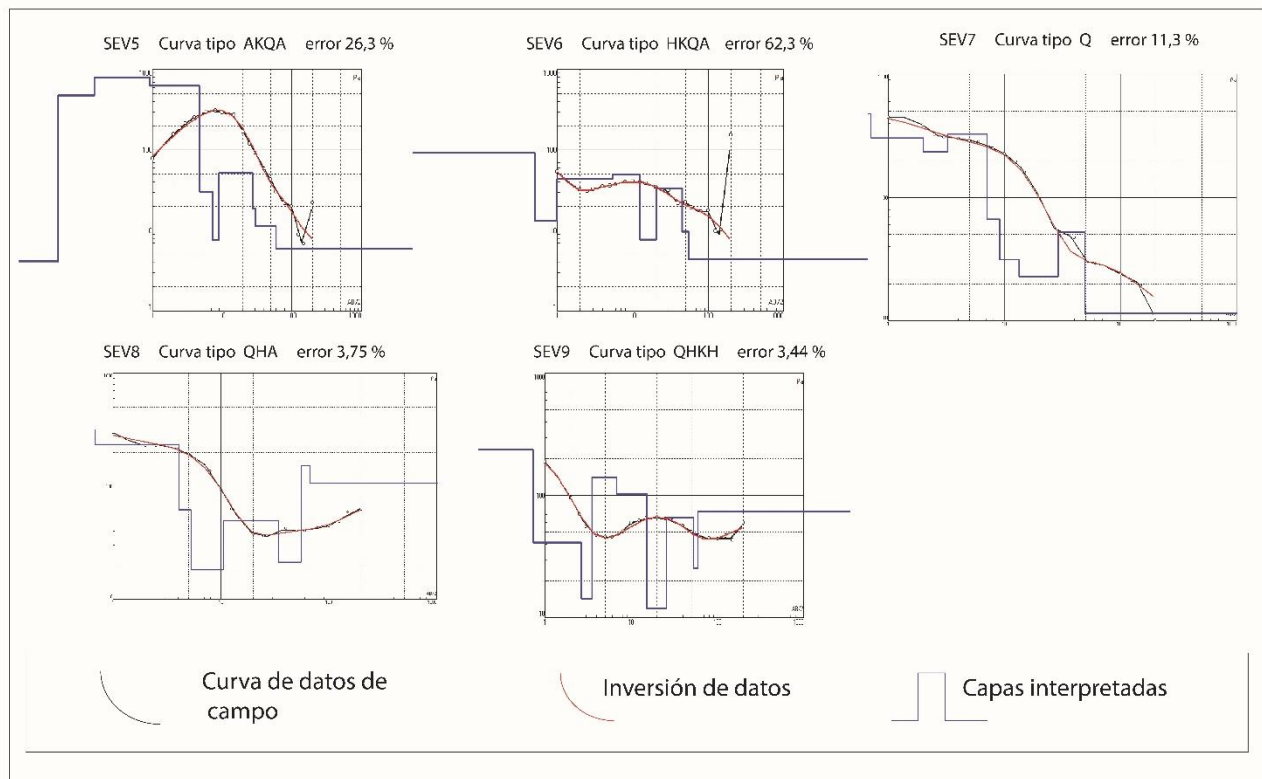
ajuste adecuado de las curvas de inversión y que en la interpretación final se han tenido que omitir debido a la imposibilidad de lograr un ajuste.

Resultados Sondeos Eléctricos Verticales sector Cariari

De la misma manera como se procedió con el sector de Guápiles-Jiménez los datos se graficaron tratando de ajustar los valores de campo a una curva teórica, con el objetivo de obtener la resistividad real del medio, esto por medio de un modelo numérico que se ajustara a las características geológicas e hidrogeológicas más aceptables obtenidas con base en la geología observada en el campo, así como por medio de información de pozos cercanos a los sitios en donde se realizaron los sondeos.

El Gráfico 5 muestra el modelo de mejor ajuste para cada SEV. Una vez cotejadas las curvas de campo con las curvas de inversión de datos, se observaron las siguientes tendencias.

Gráfico 5. Se muestra la inversión de datos planteada para los SEV del 5 al 9, sector Cariari.



En primer lugar, al igual que en Guápiles y Jiménez los modelos presentados se caracterizan por ser de más de cuatro capas, esto se debe a una amplia variedad en los valores de resistividad que en este caso rondan desde los 832 Ωm hasta 4,36 Ωm , los cuales cambian a pocos metros de profundidad, lo que genera que las curvas tiendan a ser muy pronunciadas como con ejes de inflexión muy abruptos lo que provoca que se deban agregar capas considerando secciones ocultas, con el fin de lograr el mejor ajuste a la curva. Capas que son típicas de materiales aluviales, ya sea por el cambio composicional o granulométrico incluso.

Las curvas se han clasificado por su tipo basándose en el comportamiento de los valores de resistividad de cada capa, de acuerdo a la Figura 14 mostrada anteriormente.

Como resultado de dicha clasificación se observó que, en general las curvas presentan un comportamiento conductivo en superficie el cual tiende a ascender a profundidades entre 10 y 20 m para luego ya sea normalizarse o tender a descender rápidamente para finalizar con una tendencia resistiva y por ende al alza en el gráfico, a profundidades cercanas a los 60 metros.

Tres de los sondeos de la zona inician con curvas de tipo Q, mientras que las otras dos gráficas representan curvas tipo H y A. Esto evidencia una leve predominancia en superficie de capas más conductoras sobre capas más resistivas. Esto podría deberse a la acumulación prevaeciente de materiales de grano medio y fino sobre granos gruesos, posiblemente por la localización tan distal de la zona de estudio con respecto a sectores montañosos, lo que implica un arrastre de materiales más finos, debido a la pérdida de energía de los ríos de la zona.

Con respecto a las últimas capas de los sondeos; en general estas se ubican entre los 50 y 66 m de profundidad, se muestra que el 60% de los sondeos terminan con curvas de tipo A (3 sondeos), lo que implica una tendencia al aumento de la resistividad en su tramo final, esto se interpreta como el paso al basamento geoelectrico para la zona estudiada.

En el Cuadro 6 se muestran los datos obtenidos, una vez realizada la inversión; se muestran las capas de resistividad encontradas, su espesor, su profundidad, así como su interpretación.

Cuadro 6. Resumen del modelado planteado para cada uno de los SEV realizado en el sector de Cariari.

Léase: resistividad en Ωm , espesor y profundidad en m.

SEV-5 ERROR 26,3%					SEV-6 ERROR 62,3 %				
Capas	resistividad	espesor	Profundidad	Interpretación*	Capas	resistividad	espesor	profundidad	Interpretación*
1	4,15	0,1	0,1	Grano fino	1	91,9	0,4	0,49	Aluvión Grueso
2	474	0,1	0,1	Aluvión Grueso	2	13,1	0,47	0,9	Aluvión fino
3	802	0,7	0,9	Aluvión Grueso	3	43,7	4,39	5,37	Aluvión Grueso
4	627	3,83	4,75	Aluvión Grueso	4	49,5	7,08	12,5	Aluvión Grueso
5	30,1	2,57	7,32	Aluvión Medio/ Nivel	5	7,74	7,97	20,4	Aluvión Medio/Nivel
6	7,58	1,69	9,01	Aluvión Fino	6	33,5	24,7	45,1	Aluvión Medio
7	51,8	18,3	27,3	Aluvión Medio	7	9,66	9,46	54,6	Aluvión Medio/Nivel
8	18,6	2,99	30,3	Aluvión Medio	8	4,36			Aluvión Fino
9	11,4	29,2	59,5	Aluvión Medio/Nivel					
10	5,95								
SEV-7 ERROR 11,3 %					SEV- 8 ERROR 3,75 %				
Capas	resistividad	espesor	profundidad	Interpretación*	Capas	resistividad	espesor	profundidad	Interpretación*
1	478	0,7	0,7	Aluvión Grueso	1	316,8	0,47	0,47	Aluvión Grueso
2	304	1,3	2	Aluvión Grueso	2	234,3	3,59	4,06	Aluvión Grueso
3	234	1,23	3,23	Aluvión Grueso	3	61,98	1,2	5,26	Aluvión Medio
4	327	3,87	7,1	Aluvión Grueso	4	18,22	5,228	10,488	Aluvión Medio/nivel
5	66,7	2,03	9,13	Aluvión Medio/nivel	5	49,39	23,8	34,288	Aluvión Grueso
6	31,4	4,24	13,37	Aluvión Medio	6	21,26	21,04	55,328	Aluvión Medio
7	22,9	15,8	29,17	Aluvión Medio	7	152,4	11,34	66,668	Lavas
8	52,3	20,2	49,37	Aluvión Medio/nivel	8	106,7			Lavas Fracturadas/Nivel
9	11,5								

		SEV-9	ERROR 3,44 %		
Capas	resistividad	espesor	profundidad	Interpretación*	
1	237	0,733	0,733	Aluvión Grueso	
2	41,2	1,9	2,63	Aluvión fino	
3	14,3	0,877	3,51	Aluvión fino	
4	141	3,25	6,76	Aluvión Grueso	
5	104	8,37	15,1	Aluvión medio	
6	11.9	10,6	25,7	Aluvión Medio/Nivel	
7	66.1	27,4	53,1	Aluvión Medio	
8	25.4	6,48	59,6	Aluvión Medio	
9	74.1			Lavas Fracturadas?	

En cuanto a los porcentajes de error resultantes, dos sondeos presentan valores menores al 5%, mientras que los 4 restantes presentan valores elevados mayores al 10% de error.

En general los elevados rangos de error se producen por la presencia de valores anómalos en los metros finales a profundidad, como es el caso de los sondeos SEV-5, SEV-6 y SEV-9, en donde la última medición presenta un valor de resistividad sumamente alto separado de la norma, lo que impide un ajuste adecuado de las curvas de inversión y que en la interpretación final se han tenido que omitir debido a la imposibilidad de lograr un ajuste, sin embargo estos valores se han usado al momento de realizar los perfiles geológicos con el objetivo de representar posibles litologías ubicadas a mucha profundidad.

A continuación, se detalla la interpretación de cada sondeo realizado:

Sondeo SEV- 1

Se localiza en las cercanías de los cauces de los ríos Toro Amarillo y Costa Rica, en un sector de topografía plana en donde se pueden observar bloques de aluvión dispersos por la zona.

El sondeo SEV-1 presenta una profundidad de aproximadamente 66 m, y en el cual se determinaron 8 capas con variaciones en la resistividad. La correlación se ha realizado con base en el pozo GU-39.

Las primeras dos capas abarcan un espesor de 8,3 m, la capa 1 se encuentra en superficie, se caracteriza por tener un valor de resistividad de 136 Ω m, y presenta un espesor de 1,36 m. La capa 2 aumenta la resistividad hasta los 430 Ω m, inicia a 1,36 m de profundidad y posee un espesor de 6,94 m.

Estas primeras capas al presentar pequeños espesores y valores resistivos altos se han correlacionado con depósitos de grano grueso. Como se mencionó en la geología local no fue posible separar los depósitos aluviales de los lahares, debido a la topografía plana, en este caso, por la ubicación del sondeo más al norte y por los bloques observados en los alrededores, es posible que se traten de bloques aluviales.

La capa 3 presenta una importante disminución en el valor de la resistividad llegando a 23 Ω m, finaliza a los 11,48 metros y se ha correlacionado con un lente de grano medio el cual posiblemente presente buenas condiciones de permeabilidad.

La cuarta capa nuevamente presenta un contraste al aumentar el valor de resistividad hasta 259 Ω m y posee un espesor de 8,93 m, ésta se ha asociado con un lente compuesto por depósitos de grano grueso relacionados a la Unidad Guápiles.

Para las capas 5 y 6 se presenta una disminución de la resistividad, la capa 5 corresponde con valores de 20 Ω m, presentando un espesor de 7,8 m; la sexta capa inicia a los 28,2 m, posee una resistividad del orden de 55 Ω m con un espesor de 23,2 metros. Dichas capas se han asociado a una serie de depósitos de grano medio (entre arenas y gravas) con posibilidades de presentar una buena permeabilidad.

A partir de la capa 7 se considera un cambio de litología a lavas masivas, debido a un aumento en la resistividad llegando a los 225 Ω m la cual se mantiene constante con un espesor de 14,7 metros.

Finalmente, la capa 9 se modela con una resistividad de 88,6 Ω m, inicia a los 66,13 m de profundidad y su espesor no ha sido posible de calcular debido a las limitaciones de la apertura del sondeo. La tendencia a la disminución en la resistividad y considerando capas de

espesores importantes, se ha correlacionado a la capa 9 con un sector de lavas más fracturadas y con potencial al almacenamiento de agua.

Sondeo SEV- 2

Se localiza en las cercanías de los cauces de los ríos Toro Amarillo y Costa Rica, en un sector de topografía plana en donde se pueden observar bloques de aluvión dispersos por la zona.

El sondeo SEV-2 logró profundizar hasta aproximadamente 68,7 m, y se determinaron 9 capas con variaciones en la resistividad. La correlación se ha realizado con base en los pozos GU-39 y GU-54.

Las primeras cuatro capas abarcan un espesor de 7,1 m, la capa 1 se encuentra en superficie, y se ha modelado con un valor de resistividad de 337 Ω m, con un espesor de 0,6 m. La capa 2 disminuye a 68 Ω m, inicia a 0,6 metros de profundidad y posee un espesor de 0,7 m. La capa 3 presenta un aumento en el valor de la resistividad llegando a 427 Ω m, y finaliza a los 5,2 m. La cuarta capa nuevamente presenta un contraste al disminuir el valor de resistividad de 102 Ω m y posee un espesor del orden de 1,9 m.

Estas primeras capas al presentar pequeños espesores y valores de moderados a altos se han correlacionado con depósitos de grano grueso relacionados a aluviones procedentes del aporte de ríos como el Toro Amarillo y General.

Para las capas 5 y 6 se presenta una disminución de la resistividad, conforme se profundiza el sondeo. La capa 5 corresponde con valores de 70 Ω m, presentando un espesor de 12,4 m. La sexta capa inicia a los 19,5 m posee una resistividad de 53,6 Ω m con un espesor de 18,8 m. Dichas capas se ha asociado a una serie de depósitos de grano medio (entre arenas y gravas) con posibilidades de presentar una permeabilidad buena.

A partir de la capa 7 se considera un cambio de litología a lavas masivas, debido a un aumento en la resistividad, llegando ésta a los 163 Ω m la cual se mantiene constante con un espesor de 17,8 m.

Las capas 8 y 9 presentan una tendencia a la disminución de los valores de resistividad, la capa 8 presenta un valor de 77,8 Ω m, inicia a una profundidad de 56,1 m y posee un espesor de 12,6 m, mientras que la capa 9 presenta una resistividad de 27,3 Ω m, inicia a los 68,7 m de profundidad y su espesor no ha sido posible de calcular debido a la abertura del sondeo.

Debido a la tendencia a la disminución en la resistividad y considerando capas de espesores importantes, se ha correlacionado a las capas 8 y 9 con un sector de lavas más fracturadas y con potencial al almacenamiento de agua.

Sondeo SEV- 3

Se localiza a unos 2 kilómetros al norte del pie de monte generado por el escarpe de la falla Guápiles en el inicio de una topografía plana.

El sondeo SEV-3 logró profundizar hasta aproximadamente 67 m, y se determinaron 7 capas con variaciones en la resistividad. La correlación se ha realizado con base en los pozos GU-39 y GU-54 y la geología local.

Las primeras 4 capas abarcan un espesor de 19,6 m, la capa 1 se encuentra en superficie, y se caracteriza por tener un valor de resistividad de 114 Ω m, presenta un espesor de 0,5 m. Las siguientes dos capas presentan un constante aumento en la resistividad. La capa 2 posee un valor de 817 Ω m, e inicia a una profundidad de 0,5 m y posee un espesor de 5,45 m. La capa 3 alcanza los 678 Ω m, inicia a 5,95 metros de profundidad y posee un espesor de 14,4 m. La cuarta capa marca una leve disminución en el valor de la resistividad llegando a 160 Ω m, finalizando a los 19,6 metros.

Las anteriores capas se han correlacionado con una serie de depósitos de grano grueso, posiblemente procedentes del aporte de ríos como el Toro Amarillo y General, o bien bloques gruesos de lahares o avalanchas de detritos provenientes de los macizos volcánicos.

En la quinta capa se presenta una importante disminución de la resistividad llegando a 62 Ω m, presentando un espesor de 34 m y finalizando a los 53,6 metros de profundidad. Dicha capa se ha asociado a una serie de depósitos de grano medio (entre arenas y gravas) con posibilidades de presentar una permeabilidad buena.

Las capas 6 y 7 presentan una tendencia al aumento en los valores de resistividad, la capa 6 presenta un valor de 351 Ω m, inicia a una profundidad de 53,6 m y posee un espesor de 14,2 m. La capa 7 presenta una resistividad del orden de 200 Ω m, la capa inicia a los 67,8 m de profundidad y su espesor no ha sido posible de calcular debido a la apertura del sondeo. Debido a la tendencia al aumento en la resistividad y considerando capas de espesores importantes, se ha correlacionado a la capa 6 con una colada de lava, mientras que a la capa 7

se relacionaría a un sector de la colada más fracturada y con potencial al almacenamiento de agua.

Sondeo SEV-4

Se localiza en las cercanías de los cauces de los ríos Toro Amarillo y Costa Rica, en un sector de topografía plana en donde se pueden observar bloques dispersos por la zona.

El sondeo presenta una profundidad de aproximadamente 68,8 m, y se determinaron 10 capas con variaciones en la resistividad. La correlación se ha realizado con base en el pozo GU-54 y la geología local.

Las primeras 3 capas abarcan un espesor en conjunto de 2,17 metros, la capa 1 se encuentra en superficie, y se caracteriza por tener un valor de resistividad de 176 Ω m, y presenta un espesor de 0,6m. La capa 2 aumenta la resistividad hasta los 1215 Ω m, la capa inicia a 0,6 metros de profundidad y posee un espesor de 0,75 m. La capa 3 posee un valor de resistividad de 753 Ω m, y presenta un espesor de 0,8 m.

Estas primeras capas al presentar pequeños espesores y valores resistivos altos se han correlacionado con depósitos de grano grueso asociados a la Unidad Guápiles.

Las capas 4 y 5 continúan presentando valores de resistividades elevados, la capa 4 se ha interpretado con valores de 329 Ω m, presentando un espesor de 4,8 m, la quinta capa inicia a los 7,0 m y posee una resistividad de 615 Ω m con un espesor de 6,12 m. Dichas capas se han asociado a una serie de depósitos de grano grueso (bloques).

En la sexta capa se presenta una importante disminución de la resistividad llegando a 94,5 Ω m, presentando un espesor de 13,1 m y finalizando a los 26,2 metros de profundidad. Dicha capa se ha asociado a una serie de depósitos de grano medio (entre arenas y gravas) con posibilidades de presentar una permeabilidad buena.

La capa siete nuevamente incrementa el valor de resistividad hasta los 151 Ω m presenta 4,62 m de espesor y se localiza desde los 26,2 m de profundidad hasta los 30,8 m. Debido al valor alto en la resistividad, así como su espesor, profundidad y relaciones estratigráficas, se ha interpretado esta sección como una capa fracturada relacionada a coladas de lavas, aunque también podría estar relacionada a un aluvión de grano grueso.

A partir de la capa 8 se considera un cambio de litología a lavas masivas, debido a un aumento en la resistividad llegando a los 236 Ωm la cual se mantiene constante a lo largo de un espesor de 11,1 m.

Finalmente, las capas 9 y 10 presentan una tendencia a la disminución de la resistividad (154 y 43,4 Ωm respectivamente), la capa 9 inicia a los 41,9 m de profundidad con un espesor de 26,9 m; mientras que la capa 10 inicia a los 68,9 m de profundidad y su espesor no ha sido posible de calcular debido a la apertura máxima del sondeo.

De acuerdo con la tendencia a la disminución en la resistividad y considerando capas de espesores importantes, se han correlacionado a las capas 9 y 10, con un sector de lavas fracturadas con potencial al almacenamiento de agua.

Sondeo SEV-5

Se localiza aproximadamente 700 m NW del poblado de Los Ángeles de Cariari en el sector de la llanura aluvial. Se logró profundizar hasta los 59,5 m obteniendo 10 capas con diferentes resistividades, éstas se correlacionaron con el pozo AF-42.

La primera capa posee una resistividad baja de 4,15 Ωm con un pequeño espesor de 0,1 m, la cual se correlaciona con un suelo superficial de textura arcillosa.

Las capas 2, 3 y 4 poseen altas resistividades muy contrastantes con las capas mencionadas en los sondeos anteriores, sus resistividades son de 474, 802 y 627 Ωm respectivamente; se extienden hasta la profundidad de 4,75 m y se correlacionan con depósitos de grano grueso asociados a bloques aluviales.

La capa 5 presenta una resistividad mucho menor a las capas anteriores con un valor de 30 Ωm ; se correlaciona con depósitos de grano fino (arenas y arcillas), con un espesor de 2,57 m.

En la capa 6, se genera una disminución importante de la resistividad llegando a estimarse en 7,58 Ωm , con un espesor de 1,69 m.

Después de los 9 m de profundidad, se genera un aumento en la resistividad el cual permanece constante a lo largo de 18,3 m correspondiente con la capa 7, ésta presenta un valor de resistividad de 52 Ωm ; se asocia a depósitos de grano fino.

En las capas 8 y 9 se observa una tendencia al descenso de la resistividad hasta los 18,6 y 11,4 Ωm , esta disminución se asocia a una zona con mayor productividad y permeabilidad correlacionada con depósitos de grano fino (arenas finas y arcillas). Dichas capas se extienden hasta los 59,5 m.

Finalmente, en la capa 10 se observa la misma tendencia al descenso en la resistividad, presentando un valor de 5,95 Ωm ; su espesor no logró ser medido debido a la apertura del sondeo.

Sondeo SEV-6

Se localiza a aproximadamente 1,4 km SW del poblado de Hojancha en el distrito de Cariari y cercano al cauce del río Desenredito. Dicho sondeo logró interpretarse hasta los 54,6 m de profundidad y se determinaron 8 capas con resistividades distintas. Se correlacionan con la información de los sondeos SEV-5 y SEV-9 debido a que no se encontraron pozos cercanos.

La primera capa posee una resistividad del orden de 90 Ωm , con un pequeño espesor de 0,499 m de la misma forma que en el sondeo SEV-9, esta capa es correlacionada con un relleno del material del camino de lastre.

Las capas 2, 3 y 4 poseen resistividades entre los 13 a los 49 Ωm y abarcan un total de 12 m, debido a sus resistividades y contexto geológico son asociadas con depósitos de grano grueso relacionados a cantos aluviales.

En la capa 5 se genera un descenso en el valor de resistividad hasta los 7,74 Ωm , esta capa se correlaciona con depósitos de grano fino (arenas finas y arcillas) con un espesor de 7,97 m.

La capa 6 presenta una elevación en la resistividad hasta los 33,5 Ωm con un espesor de 24,7 m asociada a depósitos de grano fino (arenas finas-arcillas).

Nuevamente, se genera un descenso en la resistividad muy similar a la capa número 5, la capa 7 presenta una resistividad de 9,66 Ωm y finaliza hasta los 54,6 m, que corresponde con la profundidad total del sondeo.

Finalmente; la capa 8 presenta una resistividad de 4,36 Ωm , inicia a los 54,6 m y su espesor no logró ser calculado debido a la apertura del sondeo.

Sondeo SEV-7

Ubicado en el poblado conocido como Campo Cinco, distrito de Cariari. El sondeo muestra la presencia de 9 capas resistividad y la inversión ha alcanzado una profundidad de aproximadamente 49,3 m, y su correlación se ha realizado con base en los pozos AF-86, AF-88 y AF-8.

Las primeras cuatro capas geoelectricas abarcan en conjunto un espesor de 7,1 m. La capa 1 se encuentra en superficie, y se caracteriza por tener un valor de resistividad de 478 Ω m, y un espesor de 0,7m. La capa 2 tiene una resistividad de 304 Ω m, inicia a 0,7 metros de profundidad y finaliza a los 2 m. La sección 3 posee un valor de resistividad de 234 Ω m, y presenta un espesor de 1,23 m. Por último, la cuarta capa presenta una resistividad de 327 Ω m, con un espesor de 3,87 metros, finalizando a los 7,1 m de profundidad. Estas primeras capas al presentar espesores variables a poca profundidad y valores resistivos altos se han correlacionado con depósitos de bloques asociados a zonas aluvionales, posiblemente relacionados a zonas de inundación.

A partir de la capa 5 se nota un cambio muy fuerte en los valores de resistividad al disminuir a valores menores de 66 Ω m a lo largo del resto del sondeo; con lo cual se denota un cambio fuerte a zonas más conductivas relacionadas a litologías de granulometrías finas (arenas finas/arcillas).

La capa 5 presenta un valor de 66,7 Ω m con un espesor de 2,0 m, inicia a los 7,1 m y finaliza a los 9,13 m de profundidad. Se ha relacionado a una zona de textura de grano medio posiblemente correspondiente con arenas medias.

La capa 6 continúa con la tendencia de la resistividad a disminuir, llegando a un valor de 31,4 Ω m con un espesor de 4,24 m, culmina a una profundidad de 13,37 m. Esta zona se ha correlacionado con una capa de grano fino asociada con arenas medias con la posible presencia de un nivel de agua.

La capa 7 presenta un comportamiento similar, continuando con la reducción en la resistividad llegando ésta a valores de 23 Ω m, la capa presenta un espesor de 15,8 metros y culmina a una profundidad de 29,1 metros, su litología sería muy similar a la de la capa 6.

La capa 8 presenta un ligero aumento en la resistividad llegando a 52,3 Ω m, presenta un espesor de 20,2 m y culmina a una profundidad de 49,3 metros. Dicha capa se relaciona con

un sector compuesto por texturas con dominancia de grano medio, como lo pueden ser arenas medias.

La última capa presenta una tendencia a disminuir el valor de resistividad hasta los 11,5 Ω m y su espesor no ha sido posible de calcular debido a la apertura del sondeo. Sin embargo, debido a la tendencia a la disminución en la resistividad se considera esta sección como un paso a arenas finas o capas arcillosas.

Con respecto al basamento de la zona, los sondeos no mostraron un contraste significativo que pudieran identificarlo, por lo cual se deduce que éste se encuentra ubicado a mayores profundidades que las alcanzadas en las mediciones.

Sondeo SEV-8

Se ubica al norte del poblado conocido como Sagrada Familia, distrito de Cariari. Se logró profundizar hasta los 66,6 m determinándose la presencia de 8 capas de resistividad, las cuales se han correlacionado con el pozo AF-85.

La primera capa presenta una resistividad de 316,8 Ω m y un espesor de 0,47 m. La capa 2 presenta valores menores de resistividad de 234,3 Ω m y se extiende hasta los 4,06 m de profundidad. Ambas capas se asocian con depósitos de grano grueso relacionados con cantos aluviales.

En la capa 3 y hasta la capa 6 se genera un descenso en los valores de resistividad, las cuales se asocian con depósitos aluviales de grano medios. La capa 4 posee un valor de resistividad de 18,22 Ω m a los 10,48 m, este valor posiblemente está relacionado con la presencia de un nivel de agua.

La capa 7 presenta un aumento en los valores de resistividad hasta 152,4 Ω m, tiene un espesor de 11,34 m y se ha relacionado con lavas masivas. En la capa 8 hay una disminución hasta alrededor de 106 Ω m, que se logran correlacionar con una capa de lavas fracturadas localizada a los 48 m en el pozo AF-85, su espesor no se logró calcular debido a la apertura del sondeo.

Sondeo SEV-9

Se localiza cercano al cauce del río Tortuguero en el distrito de Cariari, en un sector de topografía plana. Dicho sondeo, logró profundizar, a partir del modelado, hasta los 59,6 m determinándose la presencia de 9 capas con valores de resistividad distintos, correlacionadas con el pozo RS-69 el cual se localiza a 1,3 km de distancia.

La primera capa posee un valor de resistividad de 237 Ω m con un espesor de 0,733 m, este valor de resistividad contrasta con los valores de las capas siguientes; debido a su pequeño espesor y su alta resistividad se relaciona con una capa superficial de relleno de camino.

La capa 2 posee una resistividad del orden de 40 Ω m y un espesor de 1,9 m, se relaciona con depósitos de grano fino (arenas finas-arcillas), que se logra relacionar con la capa de arcillas más superficial del pozo RS-69.

En la capa 3 se genera una disminución importante en el valor de resistividad llegando a calcularse en 14,3 Ω m y finaliza hasta los 3,51 m, se correlaciona con un depósito de grano medio que funciona como una zona potencialmente productora con condiciones buenas de permeabilidad.

Las capas 4 y 5 abarcan un espesor de 11,62 m, en el cual se presenta un aumento importante en la resistividad, ya que contienen resistividades de 141 y 104 Ω m respectivamente; debido al aumento en la resistividad se correlacionan con un lente de depósitos de grano grueso.

La sexta capa posee una resistividad de 12 Ω m con un espesor de 10,6 m, esta capa corresponde con una zona posiblemente productora, debido al valor de resistividad y al descenso importante en la resistividad que presenta es correlacionada con la capa 3 de este sondeo.

En la capa 7, se genera un aumento en la resistividad hasta un valor de 66 Ω m con un espesor de 27,4 m, la cual se asocia con depósitos de grano fino correlacionada con arcillas del pozo del pozo RS-69 con permeabilidad baja.

Seguidamente, se localiza la capa 8 con una resistividad de 25 Ω m, esta se extiende hasta los 59,6 m que corresponden con la profundidad total del sondeo. La capa se correlaciona con los depósitos de grano medio (arenas) localizada a los 54 m de profundidad en el pozo RS-69, caracterizada por presentar alta permeabilidad.

Finalmente, la capa 9 presenta una resistividad de 74 Ωm e inicia a los 59,6 m de profundidad, su espesor no logró ser calculado debido a la apertura del sondeo; al generarse un aumento en la resistividad se logra correlacionar con una capa de lavas fracturadas localizada a los 64 m de profundidad en el pozo RS-69.

Sondeo SEV-10

Se ubica a 1,8 km NE de San Luís de Jiménez en las cercanías del cauce del río Cristina. Se logró profundizar a partir del modelado hasta los 65,3 m, diferenciándose 9 capas con resistividades distintas. La correlación se realizó con base en el pozo GM-13.

Las capas 1 y 2 poseen un valor de resistividad de 143 y 832 Ωm respectivamente y se extienden hasta una profundidad de 1,84 m.

En la capa 3, se genera un descenso en la resistividad hasta un valor de 28,6 Ωm y posee un espesor de 1,43 m, se correlaciona con un depósito de grano fino similar al encontrado en el pozo GM-13.

A los 3,27 y hasta los 22,1 m se observa un aumento importante en la resistividad abarcando las capas 4 y 5 con valores de 266 y 105 Ωm respectivamente. Debido a que son altamente resistivas se asocian a una capa lente de depósitos de grano grueso.

A partir de los 22,1 m donde inicia la capa 6, se genera un descenso importante en la resistividad hasta un valor de 10,2 Ωm , esta capa posee un espesor de 7,04 m y se asocia con depósitos de grano fino.

La capa 7 presenta una resistividad de 53,1 Ωm y se extiende hasta los 51,9 m de profundidad, debido a su resistividad es asociada a depósitos de grano medio.

En la capa 8 se genera un descenso en la resistividad hasta un valor modelado de 20,4 Ωm y se extiende hasta los 65,3 m que corresponde con la profundidad total del sondeo. Debido a su valor de resistividad es asociada a depósitos de grano medio (arenas) con permeabilidad alta, correlacionadas con la última capa del Pozo GM-13.

En la capa 9 se observa una tendencia a un aumento importante en la resistividad con un valor de 138 Ωm , no se conoce su espesor debido a la apertura del sondeo. Tomando en cuenta la geología de la zona y los sondeos realizados se asocia con el inicio de una colada de lavas masivas.

Sondeo SEV-11

Se localiza a 1,3 km SW de San Luís de Jiménez en las cercanías del cauce del río Cristina. Logró profundizar a partir del modelado hasta los 64,7 m, determinándose diez capas geoelectricas, estas se correlacionaron con la información del Pozo GM-100.

La primera capa posee una resistividad de 79 Ωm y un espesor de 0,569 m, debido a este pequeño espesor se asocia con relleno de la carretera. Las capas 2 y 3 presentan resistividades de 15,1 y 59,6 Ωm respectivamente, son asociadas con depósitos de grano fino correlacionados con la primera capa del pozo GM-100 correspondiente con arcillas y arenas finas. Estas capas se extienden hasta los 0,982 m de profundidad.

En la capa 4 se observa un pequeño descenso en la resistividad hasta casi los 50 Ωm , se correlaciona con depósitos de grano medio con potencial de almacenamiento de agua. La misma se extiende hasta los 7,51 m.

En la capa 5 se genera un aumento importante en la resistividad hasta los 100 Ωm , este valor se mantiene a lo largo de 13,7 m; correlacionándose con lavas masivas, las cuales a su vez se logran asociar con la capa 3 del pozo GM-100 antes descrito.

Descendiendo en la columna, a los 21,2 m se encuentra la capa 6, donde se genera una disminución en el valor de la resistividad calculada hasta un valor de 70 Ωm , la cual se mantiene hasta una profundidad de 24,5 m. Se correlaciona con una zona de lavas fracturadas debido al valor de resistividad, por lo tanto, se considera un sector con potencial al almacenamiento de agua.

En la capa 7 se observa un descenso importante en el valor de resistividad hasta los 17 Ωm ; esta capa se extiende a lo largo de 5,31 m, asociadas de igual manera a la zona de lavas fracturadas.

Se observa una tendencia al aumento en la resistividad en las capas 8 y 9, éstas se asocian a una colada de lavas masivas. La capa 8 posee un valor de resistividad de 31,4 Ωm y se extiende hasta los 45,7 m de profundidad; mientras que la capa 9 posee un valor de resistividad de 78,1 Ωm y se extiende hasta los 64,7 m de profundidad. Dichas capas son similares a la capa 5 anteriormente descrita.

Finalmente, la capa 10 se ubica a los 64,7 m, posee una resistividad de 109 Ωm asociada a las capas anteriores; no se conoce su espesor debido a la apertura del sondeo.

Sondeo SEV-12.

Se localiza a 1,6 km del SEV-11 cercano al cauce del río Cristina. El sondeo alcanzó una profundidad de interpretación de 67,6 m, donde se lograron determinar 10 capas con variaciones en sus resistividades.

Las capas 1, 2 y 3 presentan resistividades entre los 200 a los 800 Ωm , y se extienden hasta los 1,6 m de profundidad, se relaciona con depósitos de grano grueso o bloques, asociados a la Unidad Guápiles.

Seguidamente se genera una disminución en el valor de resistividad hasta los 82,2 Ωm , la cual se correlaciona con granulometrías medias de la misma unidad, las cuales se extienden hasta los 5,62 m de profundidad.

A los 5,62 m se ubica la capa 5 hasta una profundidad de 11,4 m, en esta se genera un descenso importante en la resistividad hasta un valor en el orden de 20 Ωm , esta sección se ha asociado a depósitos de grano medio con posible permeabilidad alta y potencial de almacenamiento de agua.

En la capa 6 se genera un aumento importante en la resistividad hasta alcanzar un valor de 200 Ωm , valor que se mantiene hasta los 13,3 m de profundidad. Debido a su alta resistividad la capa se asocia con lavas masivas.

La capa 7 presenta un pequeño descenso en el valor de resistividad hasta un valor de 91 Ωm , esta sección se correlacionó con una zona de lavas fracturadas con potencial de almacenamiento de agua; se extiende hasta una profundidad de 18,8 m. Seguidamente en la capa 8, la resistividad calculada baja hasta un valor de 43,7 Ωm , se extiende hasta los 26,9 m y es correlacionado igualmente a la zona de lavas fracturadas.

Finalmente, las capas 9 y 10 se observa una tendencia al aumento en la resistividad hasta valores de 207 Ωm , son asociadas con coladas de lavas masivas y fracturadas respectivamente.

Sondeo SEV-13

Se localiza a aproximadamente 1,4 km NW de Jiménez, cercano al cauce del río Jiménez. Por medio de la inversión de datos realizada se alcanzó una profundidad de 55 m, diferenciándose 8 capas con base en la variación de sus resistividades.

La primera capa se extiende hasta los 0,933 m de profundidad con un valor de resistividad de 776 Ω m; debido a su valor alto de resistividad se asocia a depósitos coluvio-aluviales procedentes de las coladas de lava cercanas presentes en la zona.

La capa 2 presenta una resistividad de 48,4 Ω m con un espesor de 0,311 m y se ha correlacionado con una capa aluvial de textura de grano fino.

En la capa 3 se presenta un descenso importante en la resistividad hasta un valor de 16,8 Ω m, la cual se ha correlacionado con una capa de depósitos de grano medio (arenas) posiblemente con permeabilidad alta, generando así una zona con potencial para almacenar agua, dicha capa se extiende hasta 1,91 m.

La capa 4 presenta una resistividad de 141 Ω m y se extiende hasta los 8,96 m de profundidad, y se asocia a depósitos de grano medio (gravas con arenas) similares a los definidos en la capa 3.

En la capa 5 se presenta una resistividad de 77,6 Ω m la cual se mantiene constante a lo largo de 10,4 m, esta se correlaciona con una sección de lavas fracturadas con posible permeabilidad alta y potencial de almacenamiento de agua.

Seguidamente, en las capas 6, 7 y 8 se presenta un aumento en la resistividad con valores en un rango de 85,5 a los 205 Ω m. La capa 6 presenta un valor de 146 Ω m, este valor se mantiene constante hasta una profundidad de 28,3 m, debido al valor elevado es correlacionado con coladas de lavas masivas.

En la capa 7 se presenta un descenso en la resistividad hasta los 100 Ω m, dicho valor se mantiene constante a lo largo de 26,8 m. Debido a la variación en la resistividad y su valor constante en un extenso espesor, se ha relacionado con una zona de coladas de lavas fracturas; estas representarían una posible zona permeable y con potencial de almacenamiento.

Finalmente, a los 55 m de profundidad total del sondeo, se ubica la capa 8, esta presenta un valor de 85 Ω m, de igual manera correlacionada con la zona de lavas fracturadas; no se logra determinar su espesor total debido a la apertura del sondeo.

Sondeo SEV-14

Se localiza entre los cauces de los ríos Molina y Cristina, en el sector este del área de estudio junto al límite con el cantón de Guácimo. El sondeo presenta una profundidad estimada de 64,6 m, dividida en 7 capas de diferente resistividad. Su correlación se ha realizado con base en los pozos GU-24, GU-58, GU-54 y GU-42 y la geología local.

La primera capa posee una resistividad de 271 Ω m y un espesor de 1,11 m, la cual se correlaciona con depósitos volcánicos de grano grueso como los lahares con bloques métricos observados en los cortes de la ampliación de la ruta 32.

Las siguientes dos capas se ubican hasta los 4,57 metros de profundidad y presentan valores de resistividad menores a 76,7 Ω m, con espesores que rondan entre los 0,69 m a 2,77 m respectivamente. Estos valores de resistividad bajos en relación a los observados en los sondeos anteriores, estas capas se han correlacionado con granulometrías medias relacionado de la unidad anterior, con capacidad para presentar un nivel de agua a aproximadamente 1,8 m de la superficie.

A partir de la capa 4 se considera un cambio de litología a lavas masivas, debido a un aumento en el valor de resistividad, llegando en este caso a los 104 Ω m, la cual se mantiene constante con un espesor de 8 m.

Las últimas 3 capas presentan una tendencia a la disminución de su resistividad, pasando a partir del modelaje de 63,8 Ω m a 45,7 Ω m para finalizar con una capa de 40,3 Ω m, en conjunto las capas presentan un espesor de 52 m y llegan hasta los 64,6 m de profundidad.

Debido a su amplio espesor, los valores de resistividad con tendencia a la baja, así como la información correlacionada de pozos cercanos y la geología descrita por Salazar (1996) en el sector de Guácimo, se han correlacionado dichas capas con litologías relacionadas a lavas fracturadas con un sector potencial para el almacenamiento y transmisión de agua el cual se localizaría a partir de los 12,6 m.

Sondeo SEV-15

Se localiza a 2,7 km de la traza de la falla Guápiles y presenta la mayor altura del perfil realizado ubicándose a aproximadamente 450 metros sobre el nivel del mar. El sondeo posee una profundidad de 58,9 m, a lo largo de la cual se determinaron 9 capas con valores de resistividad distintos.

La primera capa posee una resistividad de 138 Ωm y un pequeño espesor calculado de tan solo 0,372 m, por lo tanto; se asoció a una capa superficial de relleno del camino.

En las capas 2 y 3 se observa un aumento importante en la resistividad llegando a valores de 1905 y 1072 Ωm respectivamente, las cuales se extienden hasta los 2,37 m de profundidad; a esta sección le siguen las capas 4 y 5 con valores de resistividad entre los 200 a los 400 Ωm , las cuales se extienden hasta los 11 m de profundidad. Debido a los valores altamente resistivos de las capas anteriores, se les asocia con depósitos de coluvio-aluviales procedentes de las coladas de lava cercanas presentes en la zona. Además, se asocian a la primera capa presente en el pozo GM-54.

La capa 6 presenta una resistividad calculada de 129 Ωm y un espesor de 15,6 m; debido a que el valor de resistividad se mantiene constante a lo largo de esos 15,6 m se asocia con el inicio de una colada de lavas masivas.

En la capa 7 la resistividad disminuye hasta los 74 Ωm a lo largo de 12,7 m, correlacionándose con una zona de lavas fracturadas, generando así, un sector con potencial al almacenamiento de agua a los 26,6 m de profundidad.

En las capas siguientes se observa una tendencia al aumento en la resistividad; la capa 8 presenta una resistividad de 153 Ωm con un espesor de 19,5 m hasta llegar a la profundidad total del sondeo eléctrico vertical; finalmente, en la capa 9 se genera un aumento en la resistividad hasta los 372 Ωm ; debido a los altos valores resistivos, la geología de la zona y los amplios espesores que presentan dichas capas se correlacionan con coladas de lava similares a la capa 6.

Sondeo SEV-16

Se localiza entre los cauces del río Toro Amarillo y el río Guápiles, cerca del límite entre los distritos de Guápiles y Jiménez. La profundidad alcanzada es de 43,6 m y lograron identificar 8 capas geoelectricas.

Las primeras 4 capas poseen valores de resistividad que varían desde 403 Ω m hasta los 1972 Ω m y tienen un espesor total de 2,2 m, los cuales se han asociado con depósitos coluviales provenientes de las coladas cercanas.

A partir de la capa 5 hay una disminución de la resistividad desde los 585 Ω m hasta los 19,3 Ω m las cuales se han asociado a lavas masivas las capas 5 y 6, y lavas fracturadas las últimas dos capas, las cuales representarían un sector con potencial para almacenamiento de agua.

Sondeo SEV-17

Se ubica en la margen derecha del río Toro Amarillo al suroeste de la ciudad de Guápiles, el sondeo presenta una profundidad de aproximadamente 67 m y se lograron identificar 10 capas de resistividad diferente.

Las primeras 6 capas muestran intercalaciones de valores entre 100 Ω m y 261 Ω m con capas de menor resistividad que varían de 21 Ω m a 56 Ω m, con espesores menores a 1 m hasta la capa 4 y de 3,6 m y 13,5 en las capas 5 y 6 respectivamente. Estas han sido correlacionadas a intercalaciones de depósitos de granulometrías gruesas y medias asociados con lahares como el observado en el afloramiento 46, que se extiende varios metros en los cortes por la ampliación de la por la ruta 32, y posiblemente también aluviones medios a gruesos depositados por el río Toro Amarillo, el cual se encuentra unos 100 m al oeste del sondeo.

En la capa 7 hay un aumento en el valor de resistividad hasta llegar a los 228 Ω m, la capa presenta 12,8 m de espesor y se asocia con lavas masivas. Posteriormente en la capa 8 y 9 hay una disminución en la resistividad hasta llegar a los 67,1 m correlacionándose con una zona de lavas fracturadas, estas representarían una posible zona permeable y con potencial de almacenamiento.

En la última capa inicia a los 67,4 m y no se ha podido estimar su espesor debido a la apertura del sondeo, en este la resistividad incrementa a los 246 Ω m por lo que se considera como un paso a lavas masivas.

Sondeo SEV-18

Ubicado en entre los cauces de los ríos Tortuguero y San Rafael, el sondeo muestra la presencia de nueve capas de distinta resistividad.

El sondeo presenta una profundidad de aproximadamente 64 m, y su correlación se ha realizado con base en los pozos GU-46, GU-38, GU-69 y GU-5.

Las primeras 3 capas abarcan un espesor en conjunto de 1,6 m. La capa 1 se encuentra en superficie, y se caracteriza por tener un valor de resistividad de 722 Ω m con un espesor de 0,6m. La capa 2 aumenta la resistividad hasta los 1120 Ω m, la capa inicia a 0,6 metros de profundidad y finaliza a los 0,79 m. La capa 3 posee un valor de resistividad de 683,1 Ω m, y presenta un espesor de 0,8 m. Estas primeras capas al presentar pequeños espesores y valores resistivos altos se han correlacionado con depósitos de bloques métricos de origen coluvio/aluvial o *debris avalanches*, esto de acuerdo a las descripciones realizadas en la geología local.

Las capas 4, 5 y 6 continúan presentando valores de resistividades elevados, la capa 4 corresponde con valores de 1176 Ω m y un espesor de 5,7 m, la quinta capa inicia a los 9,1 m y posee una resistividad de 346 Ω m con un espesor de 3,33 m. La capa 6 presenta un valor de resistividad del orden 300 Ω m con un espesor de 23,78 m y culmina a una profundidad de 32,9 m.

Estas capas al presentar espesores altos y resistividades elevadas se han asociado a una serie de depósitos de grano grueso (bloques) asociados a la descripción del pozo GU-46 y a la Unidad Guápiles.

A partir de la capa 7 se considera un cambio de litología a lavas masivas, el valor de resistividad abarca los 163 Ω m, la cual se mantiene constante con un espesor de 13,6 m.

La capa 8 inicia a los 46,2 m de profundidad con un espesor de 17,7 m, posee un valor de 80 Ω m y se ha correlacionado con un sector de lavas fracturadas con potencial para almacenar agua.

La capa 9 inicia a los 63,9 m de profundidad y su espesor no ha sido posible de calcular debido a las limitaciones propias del sondeo. Debido a la tendencia al aumento en la resistividad se considera esta sección como un paso a lavas masivas.

Sondeo SEV-19

Ubicado en el sector montañoso del área de estudio, el sondeo muestra la presencia de 13 capas de diferente resistividad.

Las primeras 8 capas se ubican en los primeros 12,4 metros de profundidad y se caracterizan por tener valores de resistividad promedios mayores a los 1000 Ω m, con espesores que rondan entre los 0,5 m a 5,46 m. Esta variabilidad en capas con presencia de valores altamente resistivos se ha correlacionado con una serie de depósitos de lahares o avalanchas de detritos con grandes bloques, procedentes del volcán Irazú.

La capa que les sigue, presenta una disminución importante en la resistividad hasta llegar a los 189 Ω m, posee un espesor de 4,37 m y se ha correlacionado con el inicio de una colada de lava.

La capa 10, continúa con una disminución en la resistividad llegando hasta un valor de 66 Ω m, la capa inicia a 16 m de profundidad, posee un espesor de 9,83 m aproximadamente, y estaría relacionada con una zona de lavas fracturadas, la cual podría tener potencial para el almacenamiento de agua.

Si se interpola esta relación con la información del pozo CL-7AYA 93-16, a pesar de la distancia entre el sondeo y el pozo que es de 3 kilómetros, se puede notar una posible correlación considerando que la información del pozo indica el cambio entre coladas alrededor de los 31 metros de profundidad, zona en donde se esperaría una lava más fracturada debido al roce o tracción de las coladas al momento de depositarse, Dicha zona también se puede correlacionar con parte de la zona productora del pozo el cual sitúa la rejilla entre los 18 y 54 metros de profundidad.

Las últimas 3 capas presentan una tendencia a aumentar su resistividad, pasando de 110 Ω m a 231 Ω m para finalizar con una capa de 475 Ω m, estas capas en conjunto presentan un espesor de 40 m y llegan hasta los 57 m de profundidad. Debido a su amplio espesor y a los valores de resistividad elevados se han correlacionado dichas capas con litologías relacionadas a lavas masivas.

Sondeo SEV-20

Se realizó en las cercanías del río Blanco, sector montañoso en donde se presentaban abundantes bloques métricos de lava angulares a sub-redondeados. La inversión para este sondeo presenta un total de 7 capas geoelectricas.

Las primeras 3 capas se presentan hasta una profundidad de 1,47 m y se caracterizan por espesores de medio metro con valores de resistividad que varían desde los 2319 Ω m hasta 15 Ω m, con una capa más resistiva en medio de capas más conductivas. La variabilidad en capas con presencia de valores de resistividad muy contrastantes y por su cercanía con el río Blanco se ha correlacionado con coluvio-aluvionales, procedentes de la erosión de las coladas de lava cercanas y el aporte del río Blanco.

Las capas 4, 5 y 6 presentan una tendencia a la disminución de los valores de resistividad iniciando a 1,47 m con 112 Ω m. La capa 5 presenta un valor de 23 Ω m, inicia a una profundidad de 5,52 m y posee un espesor de 3,67 m. La capa 6 presenta una resistividad 16 Ω m, inicia a los 9,19 m de profundidad y posee un espesor de 13,6 m. Dichas secciones se han agrupado en una serie de depósitos proximales de textura posiblemente de grano medio y con una posible capacidad de almacenamiento de agua importante.

La última capa presenta nuevamente aumento importante en la resistividad, llegando hasta un valor de 591 Ω m, el inicio de esta capa es a aproximadamente a los 22,79 m de profundidad y se ha relacionado a el inicio de capas de lava masivas.

2.5.2 Tomografías eléctricas

Para la ejecución de las 5 tomografías eléctricas se utilizó el equipo TERRAMETER LS de la casa ABEM propiedad de la Escuela Centroamericana de Geología, todas ellas con una longitud de 400 m con lo que se obtuvieron profundidades de aproximadamente 80 m, mediante el método eléctrico Schlumberger como se mencionó anteriormente.

Las tomografías localizadas en Guápiles y Jiménez (Figura 14) se realizaron con el objetivo de estudiar la posible continuidad de la Falla de Guápiles, debido a esto se realizaron con rumbo aproximadamente perpendicular a la dirección de la falla, la ubicación de la falla se puede observar en la Figura 9.

Para la inversión de los datos se utilizó el software RES2DINV, únicamente se aplicó corrección topográfica en la tomografía 1, dado que en el resto de terrenos son planos, tal como se observa en las Fotos 11 y 12.



Foto 11. Vista de los sectores donde se realizaron las tomografías. A-B (Tomografías 1 y 2, Guápiles), C y D (Tomografías 3 y 4, Jiménez).

Tomografías en distrito de Guápiles

En este distrito se realizaron dos tomografías eléctricas al sur del escarpe de falla y con rumbo sureste-noreste, la ubicación se puede observar en la Figura 14. La longitud de ambas es de 400 m y se utilizó un espaciamiento entre electrodos de 10 m y se alcanzó una profundidad de 80 m aproximadamente. Las coordenadas inicial, central y final se pueden observar en el Cuadro 7.



Foto 12. Vista del sector donde se realizó tomografía 5, Cariari.

Cuadro 7. Ubicación de tomografías eléctricas en el distrito de Guápiles.

Tomografía	Coord. Inicial		Coord. Final	
	Norte	Este	Norte	Este
1	1128100.14	517545.795	1128470.660	517304.281
2	1127925.39	518960.420	1128288.349	518783.816

Las Figuras 16 y 17 muestra los resultados obtenidos, en cada caso la primera imagen corresponde con la resistividad aparente medida, la segunda con la resistividad aparente calculada y la tercera con el modelo de resistividad. La inversión se realizó con un total de 5 y 4

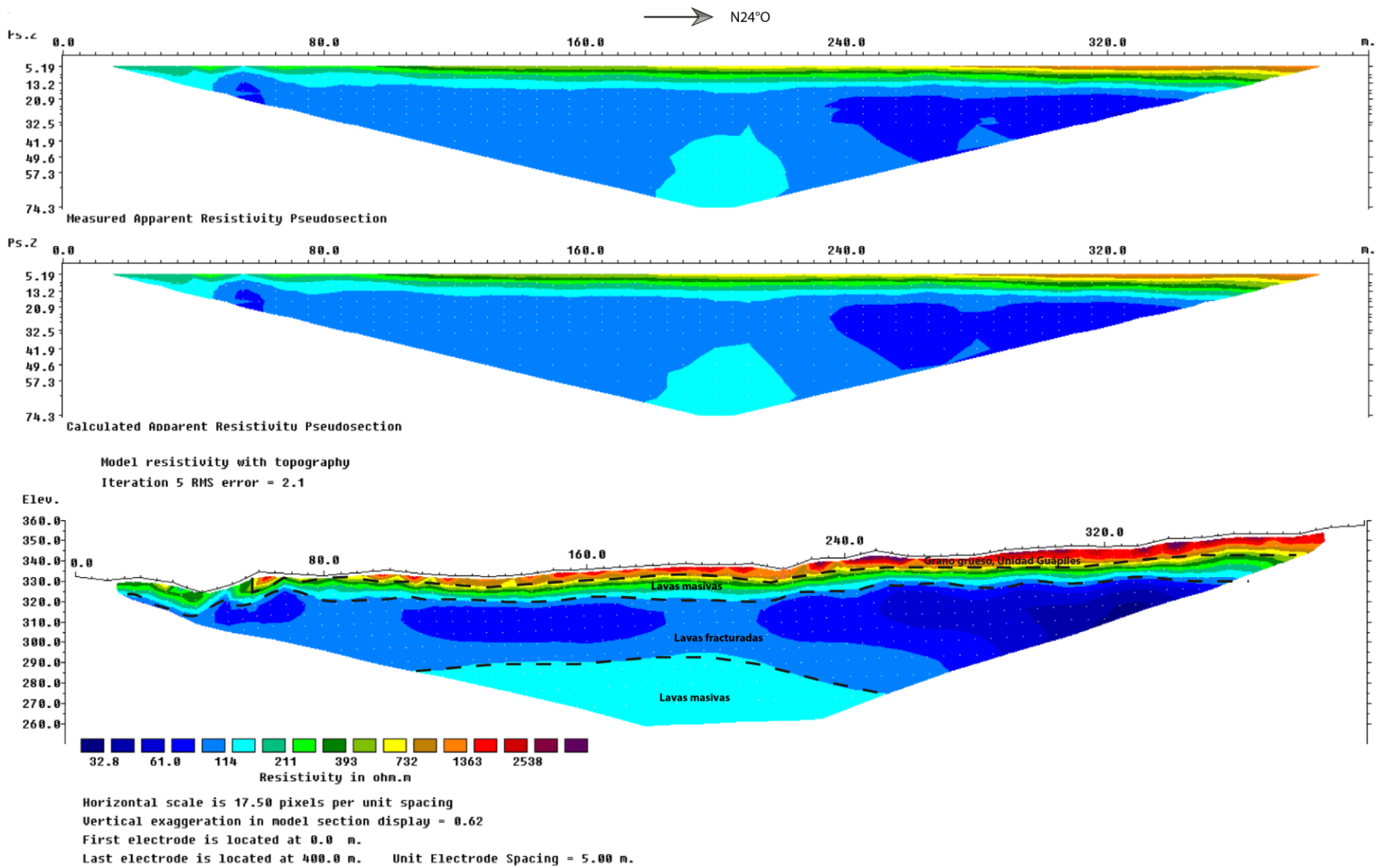


Figura 16. Pseudosección eléctrica e interpretación de la tomografía 1.

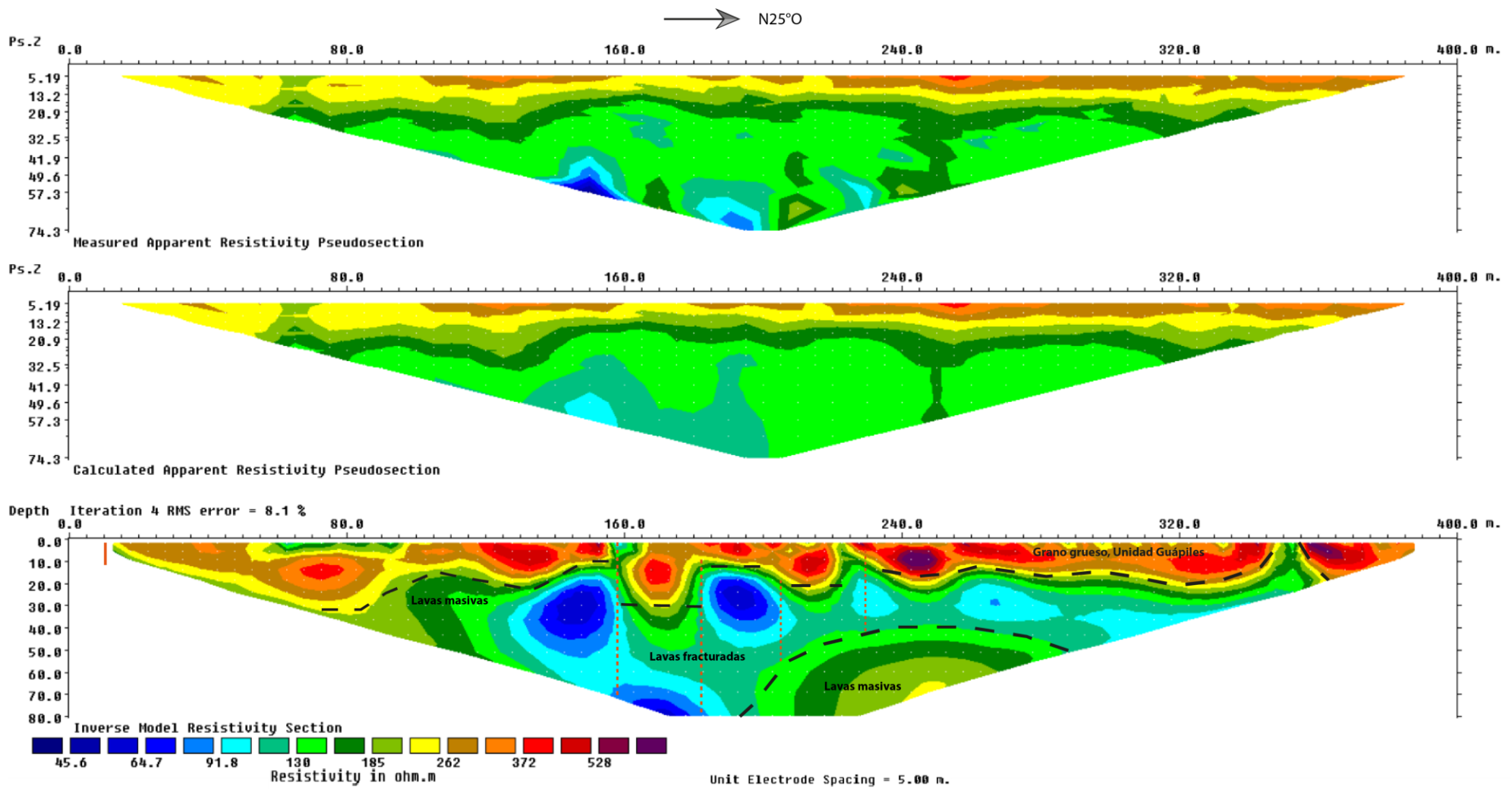


Figura 17. Pseudosección eléctrica e interpretación de la tomografía 2.

interacciones respectivamente, con lo que se obtuvieron errores de 2.1% y 8.1%. Las correlaciones se realizaron con base en los pozos cercanos, la geología local y los resultados de los SEVs descritos anteriormente.

Como se mencionó anteriormente en la tomografía 1 se realizó una corrección topográfica debido a una diferencia de unos 25 m en la elevación entre el punto inicial y final. Esta presenta valores de resistividad que varían desde 33 Ωm y 2500 Ωm y no se observan anomalías geofísicas que pudieran estar relacionadas con la falla o estructuras asociadas, posiblemente al estar cerca de la parte superior del escarpe no se alcanzó la profundidad de la misma.

Los valores más altos de resistividad se presentan en la parte superior de la tomografía, en las primeras capas estos varían entre 1300 Ωm y 2500 Ωm , con la capa más resistiva en la parte superior y en espesores de aproximadamente 2 a 3 m cada una. De acuerdo a las observaciones de campo estas capas se correlacionan con depósitos aluviales, los cuales presentarían bloques decimétricos a métricos, su elevada resistividad estaría relacionada con la porosidad de la matriz de dichos depósitos.

Posteriormente se da una disminución de los valores de resistividad los cuales varían entre 114 Ωm y 393 Ωm , los cuales se han asociado a lavas masivas cuyo espesor es aproximadamente constante de 10 m, con un ligero aumento en ambos extremos de la pseudosección.

En la siguiente capa las resistividades disminuyen hasta valores de 33 Ωm a 61 Ωm , y presentan un espesor máximo de 50 m, con los valores más bajos hacia el noroeste, esta capa se correlaciona con lavas fracturadas con un potencial alto para el almacenamiento de agua. La última capa reporta un aumento de la resistividad hasta unos 114 Ωm , es espesor es de aproximadamente 30 m en el sector central, se ha asociado a coladas masivas.

La tomografía 2 las resistividades varían entre 45 Ωm y 528 Ωm , al igual que la anterior, los valores más resistivos se encuentran en la capa más superficial, en esta las resistividades van de 200 Ωm a 528 Ωm y tiene una profundidad promedio de 10 m, la cual aumenta hasta un máximo de 30 m hacia el extremo sureste. Entre las distancias horizontales de 160 m a 240 m, también hay un mayor espesor, debido a estructuras tipo horst y grabens asociados con el fallamiento en la zona, las cuales dan un mayor espesor a la capa 1. Esta se ha asociado con depósitos porosos de grano grueso de la Unidad Guápiles, cuyo origen podría estar relacionado con debris Flow, debris avalanches como los descritas por Alvarado et al. (2004) y/o depósitos aluviales de grano grueso aportados por ríos cercanos.

La capa subyacente muestra una disminución de la resistividad, esta varía entre 130 Ω m y 185 Ω m y su espesor promedio es de aproximadamente 15 m, el cual aumenta hasta 40 m hacia el sector sureste, entre los 90 m y 120 m horizontales. Esta capa se ha relacionado con lavas masivas, las cuales también han sido afectadas por las estructuras asociadas al fallamiento local. Las resistividades continúan disminuyendo hasta alcanzar 45 Ω m, este sector de menor resistividad y de aproximadamente 60 m de espesor se ha asociado con lavas fracturadas las cuales representarían la zona saturada.

Finalmente se puede observar una capa en el sector central, hacia el noroeste, entre los 195 m 285 m horizontales, un aumento en la resistividad a valores entre 130 Ω m y 200 Ω m, la cual tiene un espesor máximo de 35 m que se asocia con coladas de lavas masivas.

Tomografías en distrito de Jiménez

Las dos tomografías en el distrito de Jiménez tienen un rumbo similar a las realizadas en Guápiles, ambas tienen también una longitud de 400 m y el espaciamiento entre electrodos es de 10 m. Las coordenadas inicial, central y final se pueden observar en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Ubicación de tomografías eléctricas en el distrito de Jiménez.

Tomografía	Coord. Inicial		Coord. Final	
	Norte	Este	Norte	Este
3	1127568,430	525572,178	1127968,833	525580,274
4	1127641,170	527722,178	1128031,604	527795,041

Las Figuras 18 y 19 muestran los resultados obtenidos, al igual que las anteriores, la primera imagen corresponde con la resistividad aparente medida, la segunda con la resistividad aparente calculada y la tercera con el modelo de resistividad. En este caso se realizaron 5 y 4 interacciones y se obtuvo un error de 2,8% y 1,57% y se alcanzó una profundidad de 80 m. Las correlaciones se realizaron con base en los pozos cercanos, la geología local y los resultados de los SEVs descritos anteriormente.

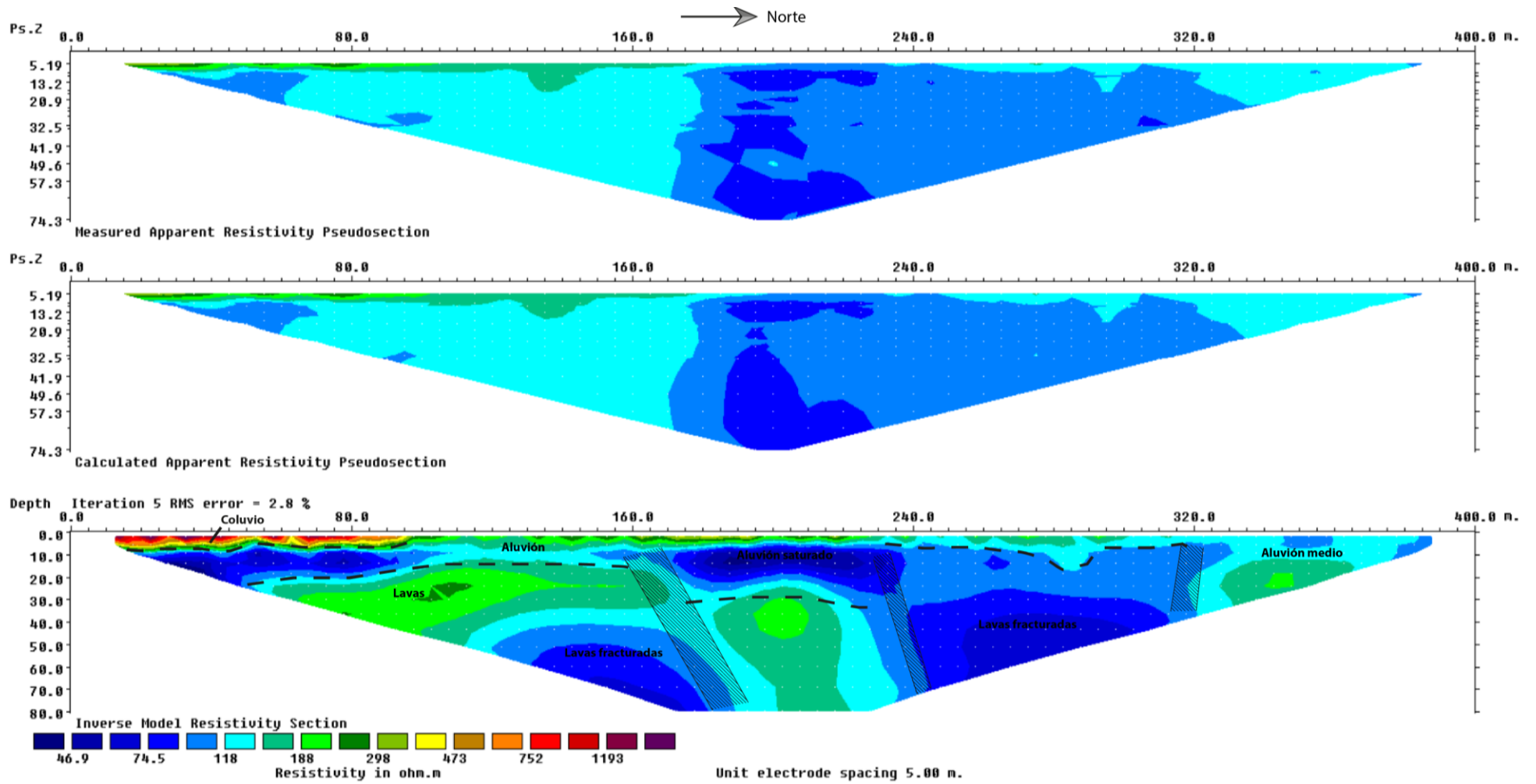


Figura 18. Pseudosección eléctrica e interpretación de la tomografía 3.

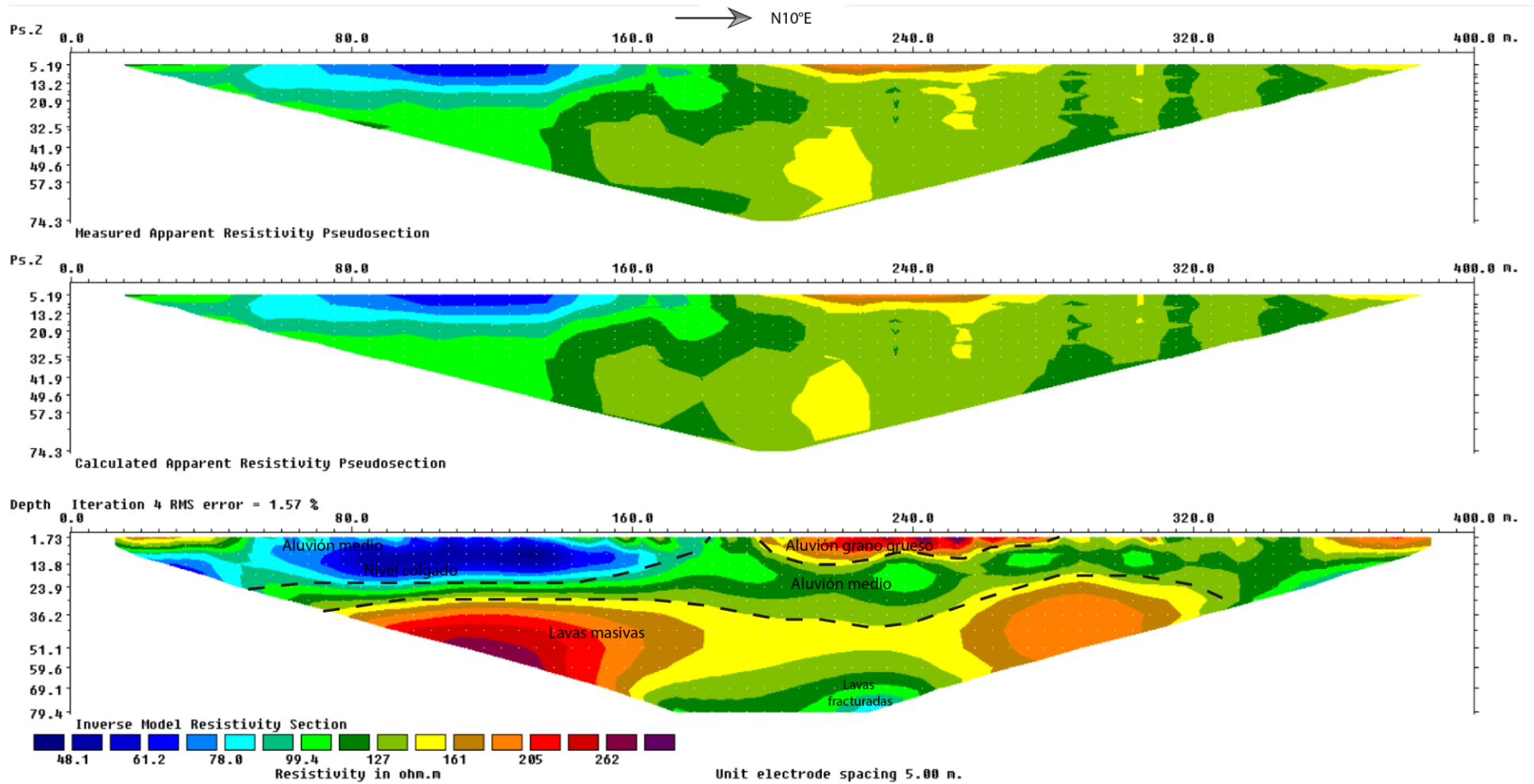


Figura 19. Pseudosección eléctrica e interpretación de la tomografía 4.

La tomografía 3 presenta valores de resistividad que varían entre 47 Ωm y 1193 Ωm , además se observan una serie de anomalías geofísicas que podrían estar asociadas con la zona de falla.

Debido a los valores altamente resistivos de la capa en el sector sur, ubicada entre lo 0 m y 90 m horizontales, se asocia con depósitos coluvio-aluviales procedentes de coladas de lava como los descritos en el SEV-15, el espesor promedio es de 2,5 m. Hacia el norte también sobre la parte superior de la pseudosección, la resistividad varía entre 100 Ωm y 400 Ωm , con un valor máximo en el extremo norte el cual se asocia con depósitos aluviales de distinta granulometría.

En los 160 m, 240 m y 320 m horizontales se observan anomalías geofísicas debido a variaciones laterales, entre las cuales varían los valores de resistividad. Estas han sido relacionadas como contacto de las unidades y asociadas con la zona de deformación de la falla que se extienden hasta los 80 m de profundidad en la zona central. En la primera capa asociada con el aluvión, los valores menores de resistividad, que varían entre 46 Ωm y 74 Ωm , estas zonas podrían presentar distintos contenidos de humedad, se ubican en el sector central y al sur, con un espesor máximo de 15 m.

Subyaciendo los aluviones las resistividades entre 188 Ωm y 300 Ωm , se ha asociado con lavas, las variaciones de resistividad que se dan dentro de esta podría ser el resultado del fracturamiento y la presencia de humedad dentro de las fracturas que favorecerían el almacenamiento del agua subterránea, también podría deberse a la presencia de arcillas producto de la molienda, ambos casos implicarían una disminución de la resistividad.

En el caso de la tomografía 4, ubicada al este de la anterior, los primeros 36 m han sido correlacionados de depósitos aluviales cuyas variaciones de resistividad están asociadas a las granulometrías, la porosidad y contenido de humedad en cada uno, presentándose mayor contenido de agua en la capa superior en el sector más al sur y los valores mayores representarían secciones porosas pero no saturadas.

Subyaciendo los aluviones, desde los 36 m y hasta los 80 m, se ha correlacionado con lavas provenientes del Volcán Turrialba, las cuales se presentan más sanas, o masivas entre los 80 m y 160 m horizontales, con un espesor de unos 30 m. Hacia el norte y desde los 50 m a 80 m de profundidad aproximadamente, los valores disminuyen por lo que posiblemente haya un mayor grado de fracturamiento y posiblemente con algún grado de contenido de agua.

Tomografía en distrito de Cariari

La tomografía realizada en Cariari se ubica entre las coordenadas 1149634.377 N – 1149488.007 N y 531662.761 E -532035.847 E, con un rumbo S66°E y una longitud de 400, al igual que las anteriores el espaciamiento entre pines fue de 10 m y se alcanzó una profundidad de 70 m. La Figura 20 muestra la pseudosección obtenida, en la que se utilizaron 5 iteraciones y se obtuvo un error de 3.5%.

Debido a que esta zona se encuentra en la llanura aluvial el espesor del aluvión aumenta de manera considerable respecto a las zonas montañosas más al sur en Guápiles y Jiménez. En la tomografía 5 las resistividades varían entre 16 Ω m y 233 Ω m, estas se asociaron con depósitos aluviales.

Los sectores con mayor resistividad en la parte más superficial de la pseudosección, entre primeros 100 m horizontales y entre los 240 m y 320 m horizontales, se asocia con sectores de mayor porosidad, pero no saturados, lo que se manifestaría con resistividades altas. El nivel del agua se encontraría aproximadamente a los 20 m de profundidad y hasta los 70 m representaría la zona saturada, la cual se caracteriza por resistividades entre 17 Ω m y 35 Ω m.

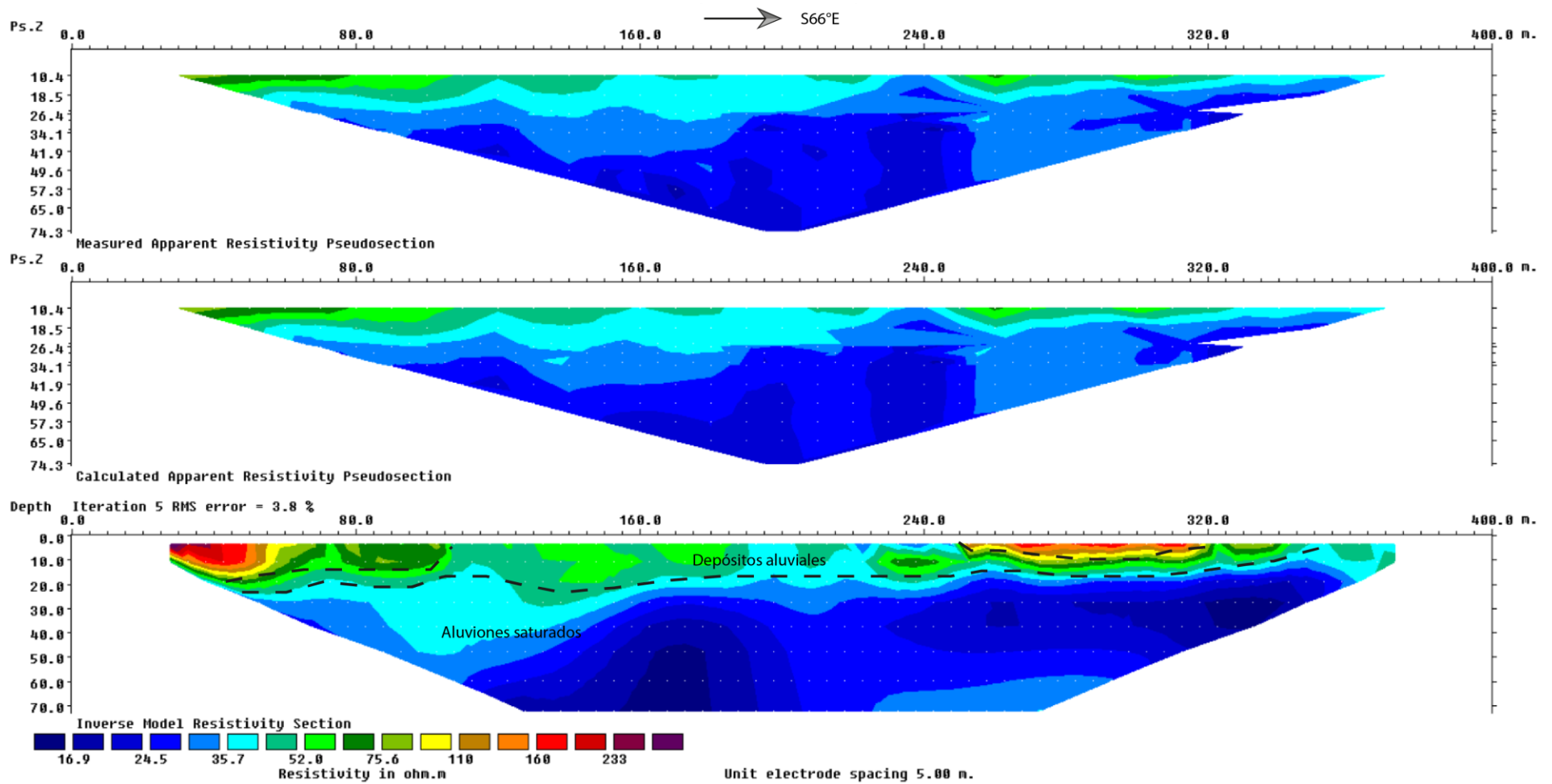


Figura 20. Pseudosección eléctrica e interpretación de la tomografía 5.

2.6 Características de los suelos

Se caracterizaron los suelos de la zona a partir de sus propiedades físicas (texturas, densidades, CC y PM), químicas y además se determinaron las conductividades hidráulicas a partir de pruebas de infiltración utilizando el método de doble anillo y a partir de las texturas se calcularon las porosidades efectivas. La ubicación de los sitios de muestreo y de las pruebas de infiltración se muestra en la Figura 21.

Mediante la realización de 40 pruebas de infiltración se calcularon las tasas de infiltración de los suelos de la zona. Se localizaron 18 pruebas en el distrito de Guápiles, 14 en Cariari y 8 en Jiménez tal como se fue propuesto (Figura 21). En cada uno de sitio propuesto se recolecto una muestra de suelo para realizar análisis físicos y según lo establecido en la carta de entendimiento en 34 sitios se realizaron análisis químicos del suelo (2 menos en cada distrito), las muestras a las cuales no se les realizó análisis químico son: PI-1, PI-2, PI- 11, PI-24, PI-28 y PI-36.

A partir de los análisis texturales los suelos de la zona se clasificaron como francos arcillosos predominantemente, aunque en menor grado también existen suelos franco arenosos y arcillosos (Anexo 7).

Las densidades de los suelos están en el rango 1.8 g/cm^3 y 2.6 g/cm^3 debido a que se trata de suelos de origen volcánico o bien de aluviones o lahares donde los componentes principales son de origen volcánico.

Los suelos de las zonas presentan pH ácidos entre 4,7 y 6,1; con porcentajes de materia orgánica variables, entre 1,8 y 17, 1; tienen capacidades de intercambio catiónico bajas-moderadas, entre 13,5 y 49,1. Estos parámetros son importantes para la evaluación del transporte de contaminantes en la zona no saturada. El detalle de los análisis se puede ver en el Anexo 7.

Porosidad efectiva

La porosidad efectiva es la diferencia entre la porosidad total y la retención específica. La porosidad total es la razón entre el volumen de poros y el volumen total de la muestra, mientras que la retención específica es el agua retenida alrededor de los granos después de que estos han sido drenados (Custodio & Llamas, 2001; Younger, 2001). De acuerdo

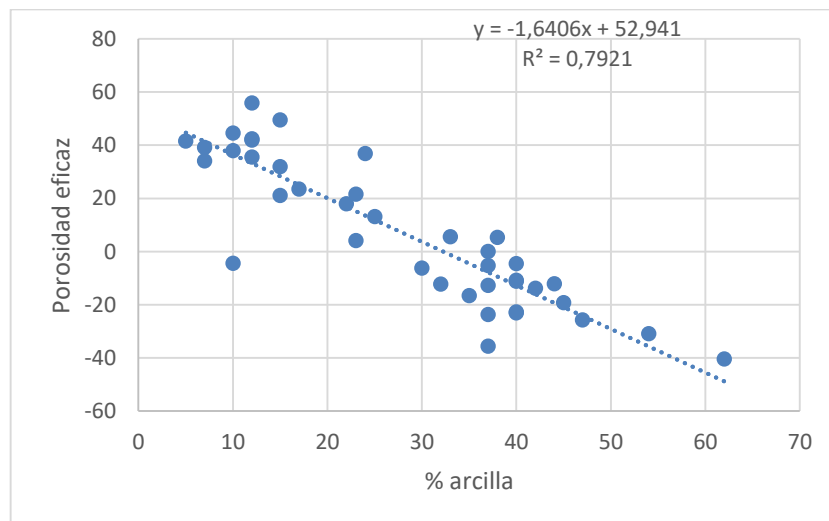
con Escuder et al. (2009), la porosidad efectiva varía con el tamaño del grano, de manera que una arcilla o un limo tendrá una porosidad eficaz mucho menor que una arena gruesa, debido a que la retención específica en materiales finos es mayor, aunque las porosidades totales en ambos materiales sean equivalentes. Para calcular la porosidad efectiva de las muestras analizadas se utilizó el método de correlación granulométrica donde se resta de la porosidad total la retención específica (m_r) de los suelos; la fórmula utilizada para calcular la retención específica (m_r) fue tomada de Briggs y Shantz (En Johnson, 1967):

$$m_r = 0.03(\% \text{ arena}) + 0.35 (\% \text{ limo}) + 1.65 (\% \text{ de arcilla})$$

*Los % son en peso.

Los resultados de la aplicación de este método se muestran en el Anexo 6, donde se observa que el 37.5 % de las muestras tienen valores negativos, dichos valores se explican debido a que esas muestras tienen cantidades variables de arcillas; el Gráfico 6 muestra la fuerte correlación que existe entre contenido de arcilla y la porosidad eficaz, tal y como se mencionó anteriormente.

Gráfico 6. Relación entre la porosidad eficaz y el porcentaje de arcilla en las muestras de suelo de la zona.



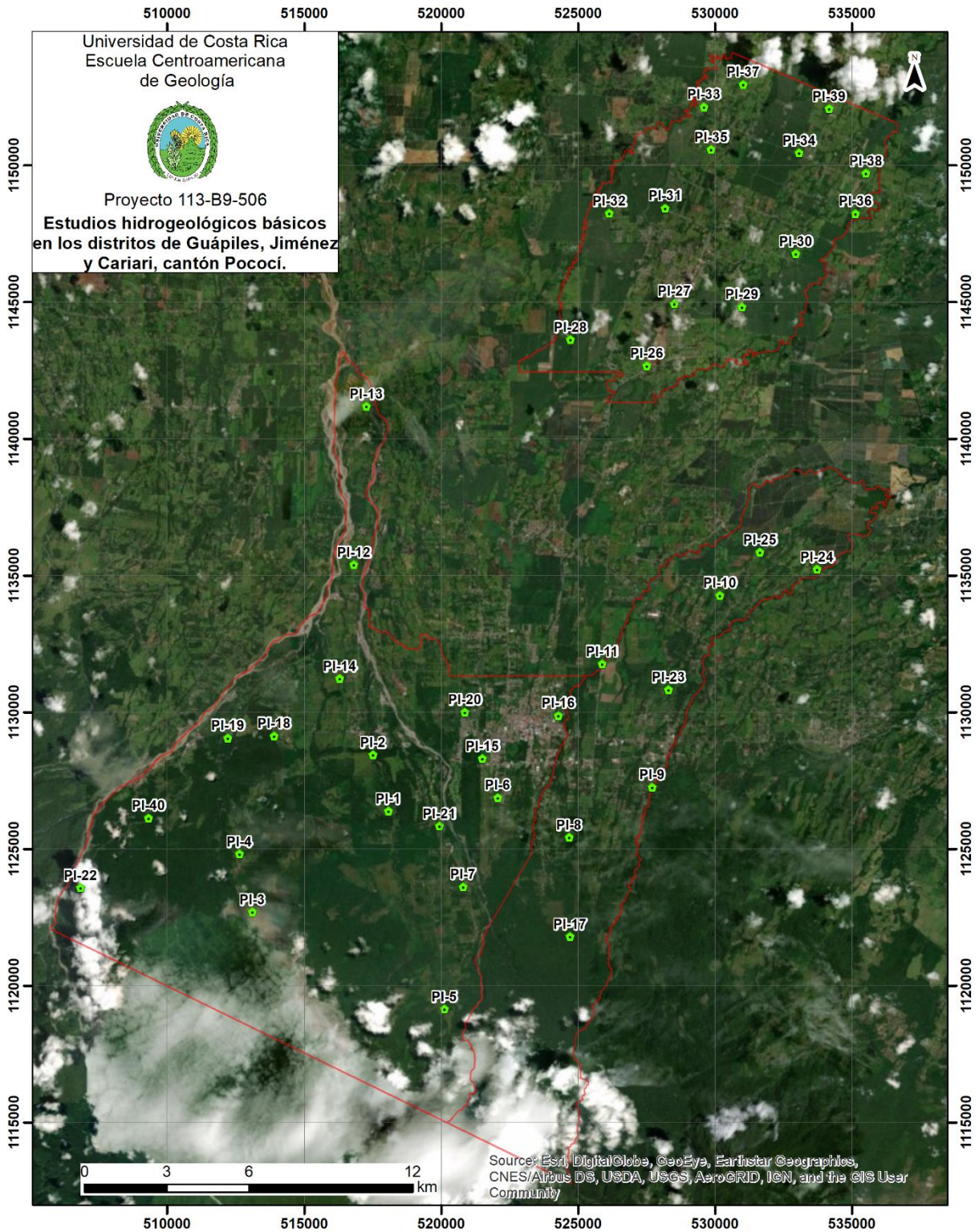
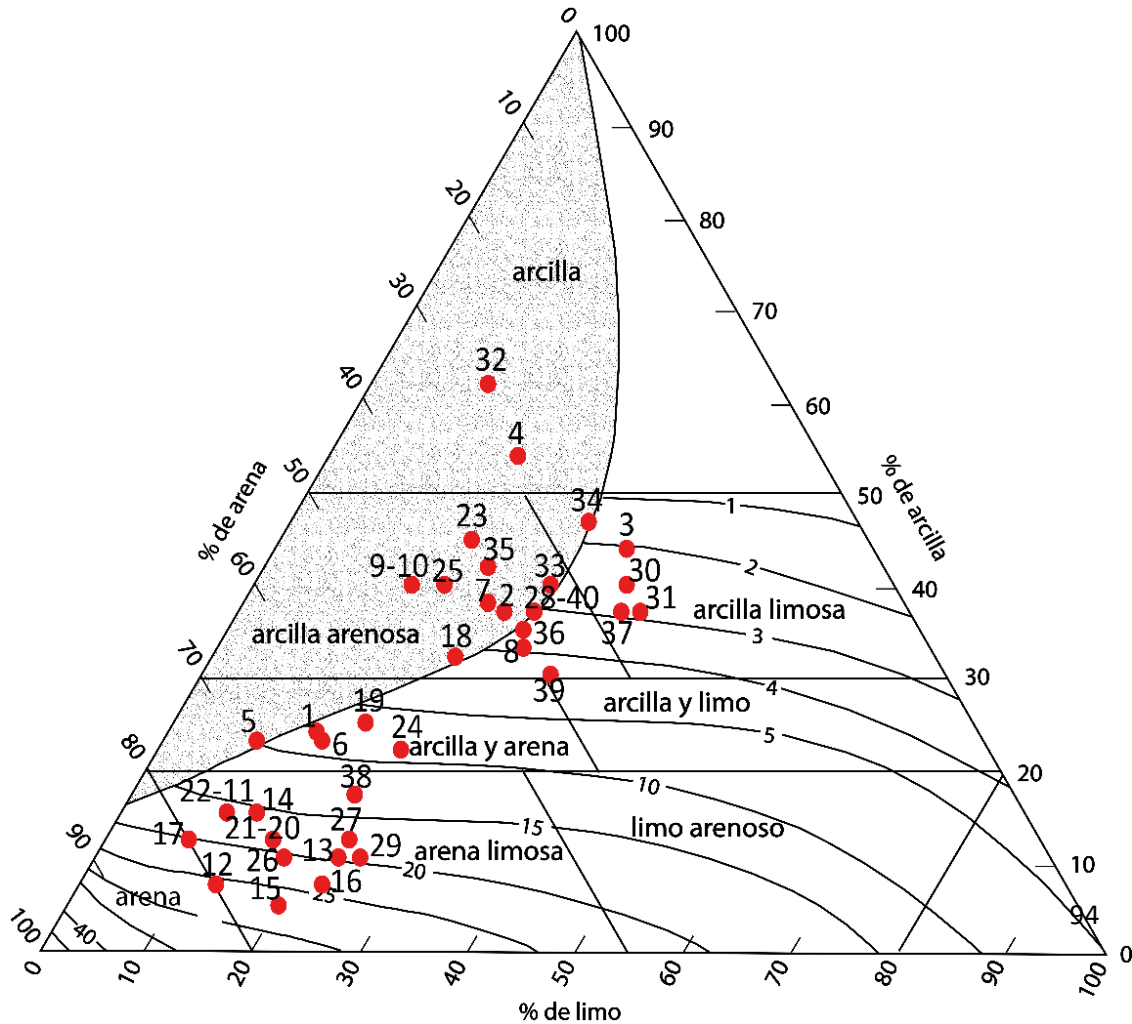


Figura 21. Ubicación de las pruebas de infiltración y muestreo de suelos.

A partir de los resultados del análisis de granulometría de las muestras también se pueden utilizar diagramas ternarios como el propuesto por Johnson (1967), tal y como se muestra en el Gráfico 7; se observa que en el caso de los suelos las zonas de estudio, estos tienen cantidades variables de arcilla y limo, por esta razón con este método no se pudo determinar el valor de porosidad eficaz para el 27,5% de las muestras, para las demás muestras se obtuvieron valores que están en el rango entre 1 y 21% y estos suelos se clasifican como franco arcillosos hasta franco arenosos.

Es importante mencionar que la determinación de la porosidad eficaz se aplica para caracterizar materiales en la zona saturada, no para suelos, en este caso se realizó el cálculo a solicitud de SENARA.

Gráfico 7. Clasificación de los suelos de la zona de estudio y determinación de la porosidad eficaz a partir de los isovalores de la porosidad eficaz (adaptado de Johnson, 1967).

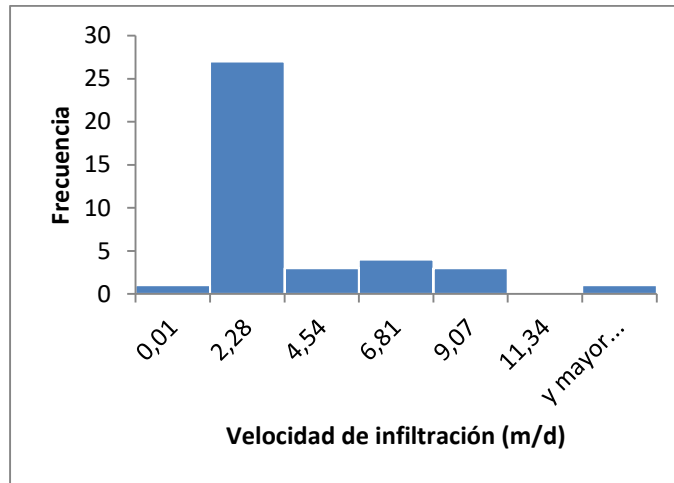


Conductividad hidráulica de los suelos

De acuerdo con los resultados la mayor parte de las velocidades de infiltración se encuentran entre 0,01 m/d y 2,28 m/d, sin embargo, se obtuvieron resultados de hasta 13,64 m/d (Gráfico 8). Estos resultados concuerdan con lo esperado para suelos donde predomina la fracción arenosa. Los gráficos y el análisis realizado se encuentran en el Anexo 6.

Los resultados se clasificaron de acuerdo con la clasificación propuesta por Henríquez y Cabalceta (1999) (Cuadro 8); se observa que la mayor parte de los valores de conductividad hidráulica se clasifican como lentos hasta rápidos (Gráfico 9).

Gráfico 8. Histograma de velocidades de infiltración obtenidas.

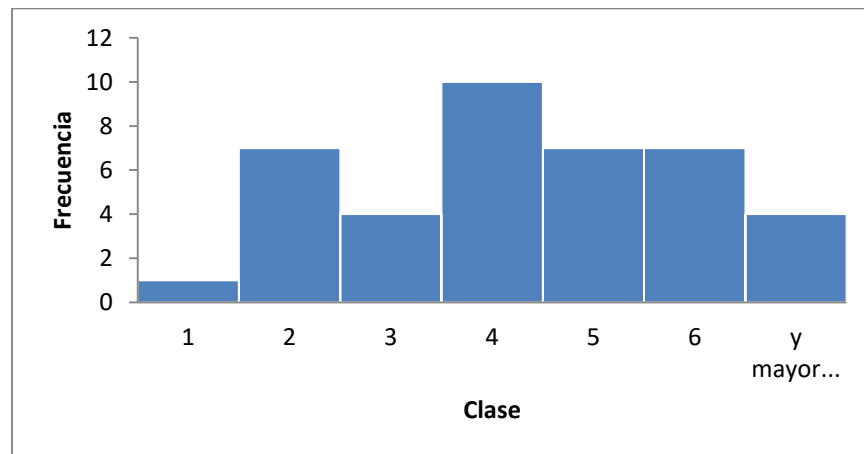


Cuadro 8. Clasificación de la conductividad hidráulica.

Clase	Conductividad hidráulica	
	cm/h	m/d
Lenta:		
1. Muy Lenta	< 0,13	< 0,0312
2. Lenta	0,13-0,51	0,0312-0,1224
Moderada:		
3. Moderadamente lenta	0,51-2,00	0,1224-0,48
4. Moderada	2,00-6,30	0,48-1,512
5. Moderadamente rápida	6,30-12,70	1,512-3,048
Rápida:		
6. Rápida	12,70-25,40	3,048-6,096
7. Muy rápida	>25,40	>6,096

Tomado de: Henríquez y Cabalceta (1999).

Gráfico 9. Histograma de conductividades hidráulicas obtenidas, según clasificación de Henríquez y Cabalceta (1999).



Espacialmente se puede observar que al sur de Guápiles la conductividad hidráulica varía de moderada a muy rápida, mientras que en sector norte varían de lentos a moderados principalmente (Figura 22).

Por su parte en Jiménez las conductividades hidráulicas son moderadas a muy rápidas y en Cariari estas varían en moderadas a muy rápidas.

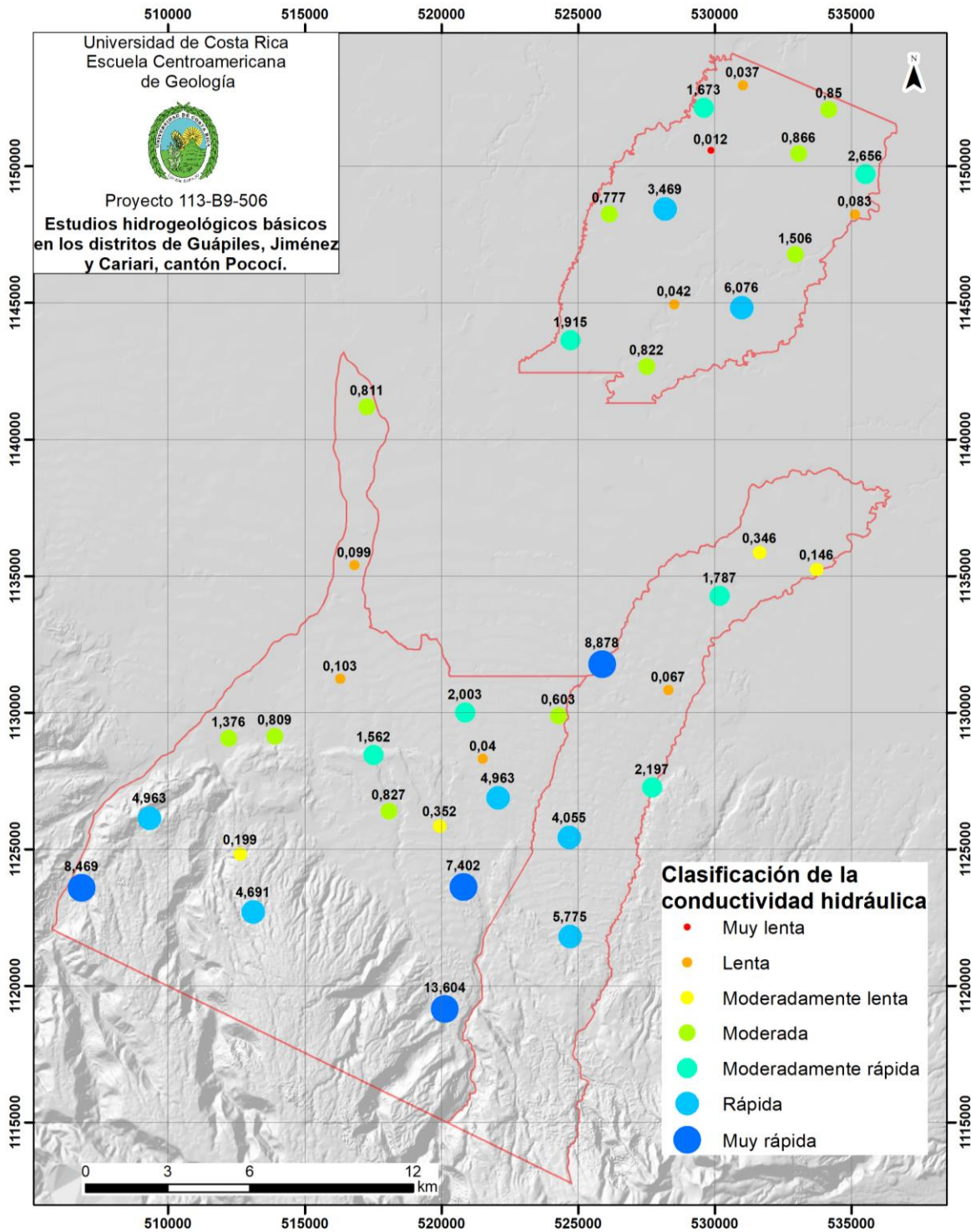


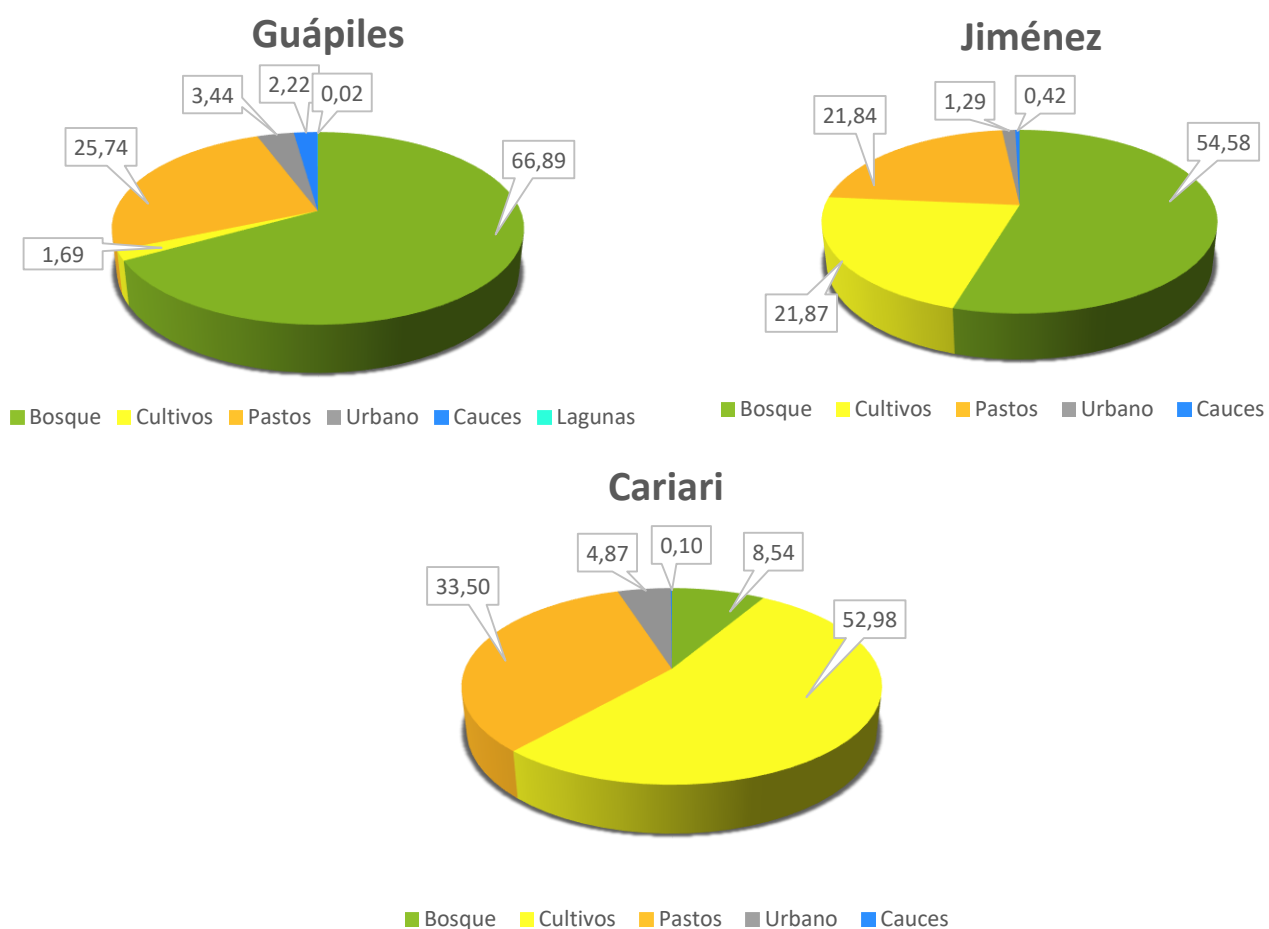
Figura 22. Distribución espacial de la conductividad hidráulica. Según clasificación de Henríquez y Cabalceta (1999).

2.7 Uso de suelo

Se elaboró un mapa del uso de suelo con base en las capas de cobertura forestal y cultivos del Centro Nacional de Información Geo-Ambiental (CENIGA) tomadas del SNIT, las ortofotos del IGN, imágenes del 2019 Google Earth y 141 puntos de control tomados durante el trabajo de campo. Las capas bases fueron editadas para delimitar los polígonos de los distintos tipos de uso del suelo.

Las categorías utilizadas se ajustaron a la propuesta de Schosinsky (2006), se incluyó además algunos cauces debido a su tamaño (Figura 23). De acuerdo con los resultados la mayor parte de las zonas de estudio están cubiertas por bosques (215.86 km², 50.52%), seguido por pastos con árboles aislados (113.29 km², 26.52%) y cultivos (78.81 km², 18.45%), sin embargo, la distribución es distinta por distrito, como se puede observar en el Gráfico 10:

Gráfico 10. Distribución porcentual del uso de suelo en las zonas de estudio.



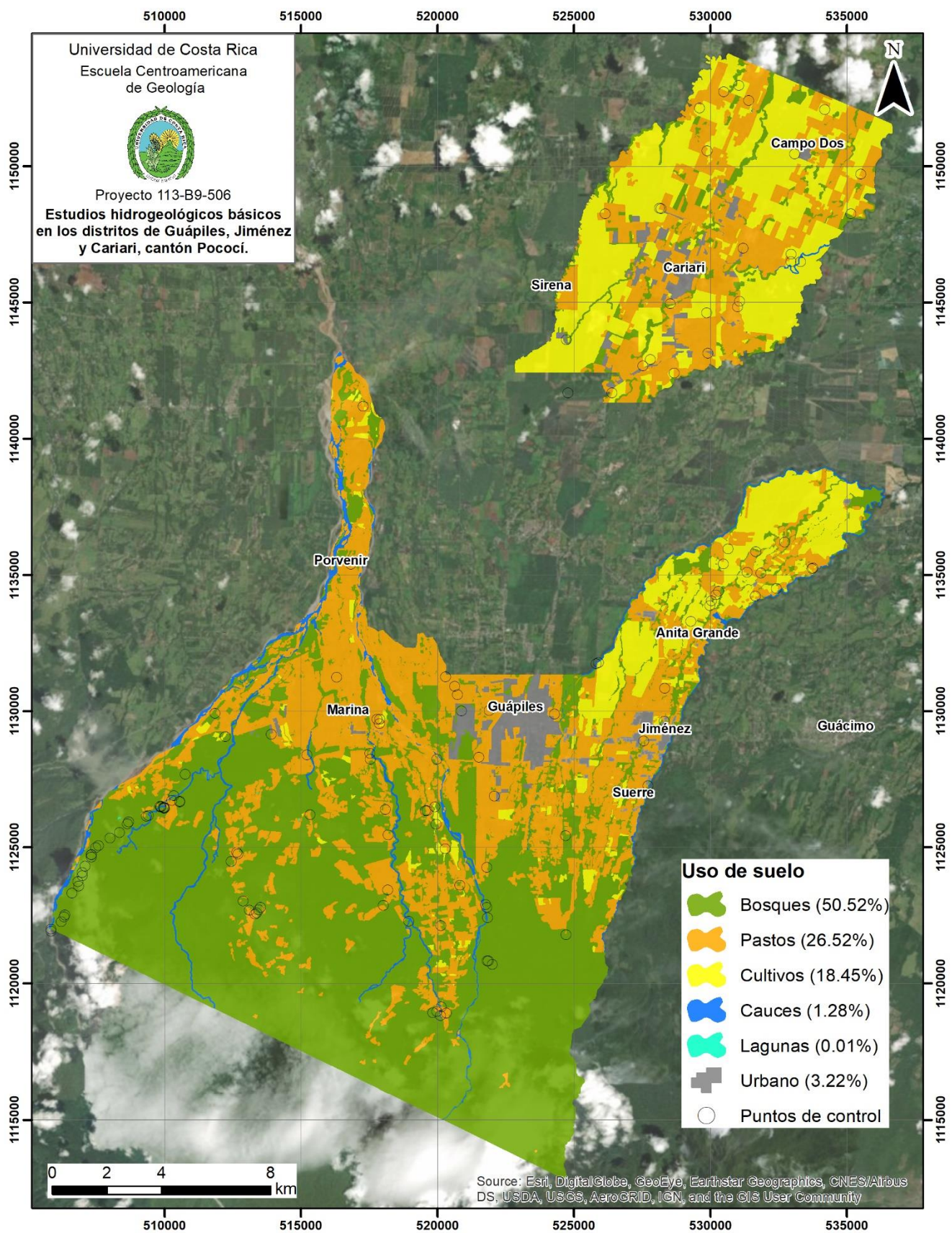


Figura 23. Mapa de uso de suelo de las zonas de estudio.

La mayor parte del área de Guápiles está cubierta por bosques (148,5 km², 66.89%), estos se ubican principalmente en el sector sur, se incluyeron algunas zonas que han sido reforestadas con teca, cacao, entre otros. Hacia el norte de este distrito se encuentran pastos con árboles aislados, los cuales cubren 57.2 km² lo que representa un 25.74% del distrito. Al noreste se localiza la zona urbana que corresponde con la Ciudad de Guápiles y cubre un área de 7,6 km² (3.44%), se consideró en esta categoría las zonas con mayor densidad de edificaciones (Cuadro 9).

Cuadro 9. Resumen de la distribución de uso de suelo en los distritos estudiados.

<i>Distrito</i>	<i>Uso</i>	<i>km²</i>	<i>%</i>
<i>Guápiles</i>	Bosque	148.5	66.89
	Cultivos	3.7	1.69
	Pastos	57.2	25.74
	Urbano	7.6	3.44
	Cauces	4.9	2.22
	Lagunas	0.1	0.02
	Total	222.03825	100.00
<i>Jiménez</i>	Bosque	59.061157	54.58
	Cultivos	23.66089	21.87
	Pastos	23.636498	21.84
	Urbano	1.396558	1.29
	Cauces	0.45528	0.42
	Total	108.210383	100.00
<i>Cariari</i>	Bosque	8.288191	8.54
	Cultivos	51.4057	52.98
	Pastos	32.50521	33.50
	Urbano	4.725773	4.87
	Cauces	0.097032	0.10
	Total	97.021906	100.00

Los cultivos en el distrito de Guápiles son aislados, cubren únicamente 3.7 km², es decir 1.69% de área del distrito, estos corresponden principalmente con cultivos de yuca y palmito de acuerdo con las observaciones en el campo. Algunos cauces de ríos amplios también fueron incluidos en el mapa, estos corresponden con los ríos Sucio-Chirripó, Corinto (General), Blanco y Toro Amarillo, en total estos cubren un área de 4,9 km², lo que representa un 2.22% de este distrito. Finalmente se identificaron algunas lagunas las cuales únicamente cubren 0,1 km² (0.02%).

La distribución porcentual de uso de suelo en Jiménez es similar a la de Guápiles, predominan los bosques ubicados en el sector norte del distrito, estos cubren un área de 59,06 km² es decir un 54.58% del total del distrito. Los pastos con árboles aislados se localizan principalmente de la zona central hacia el norte donde cubren 23.64 km² (21.84%). El terreno con cultivos es mayor en el distrito de Jiménez comparado con Guápiles, estos se encuentran en 23.66 km² lo que representa un 21.87% del área total del distrito, y se localizan en el sector norte, principalmente se encuentra yuca, piña, palmito, plantas ornamentales y papaya, según las observaciones en el campo. Las áreas de cauces corresponden con el río Santa Clara, en el límite entre Guápiles y Jiménez, el río Jiménez en el límite oeste y una parte del río Toro Amarillo, en el límite entre los distritos al sur del área, estos cubren un 0.45 km², es decir un 0.42% del distrito de Jiménez.

En el caso de Cariari, disminuye de manera considerable la cobertura de bosques y predominan los cultivos, los cuales cubren 51.4 km², lo que representa un 52.98% del distrito, los cultivos en esta zona incluyen plátano, piña, yuca, guanábana, palmera de pipas, banano, ñame, entre otros. Los pastos cubren 32,5 km² (33.5%) y se encuentran distribuidos por toda el área del distrito. Los bosques se limitan a las márgenes de los ríos Tortuguero, Desenredito, Desenredo principalmente y cubren 8,28 km² lo que representa 8,54%. Finalmente se incluyó un sector del cauce del río Toro Amarillo que cubre 0.097 km², es decir 0.1% del área del distrito.

2.8 Información hidrogeológica

2.8.1. Trabajos previos

Tecnoambiente (2003) realizó para el SENARA, un diagnóstico de los recursos hídricos en la región Atlántica, el cual incluye las hojas cartográficas Guápiles y Guácimo. De acuerdo con este estudio, en la zona se pueden identificar 4 unidades hidrogeológicas, del acuífero más profundo al más somero se tiene: Acuífero inferior Santa Clara, Acuífero de Suerre, Acuífero lávico Guácimo y Acuífero aluvial Guápiles.

Acuífero inferior Santa Clara

Está compuesto por depósitos volcánicos que comprenden lavas andesíticas fracturadas y depósitos de aglomerados de matriz permeable sobreyacidos por un paleosuelo; el grado de confinamiento varia de semiconfinado a confinado conforme se avanza hacia el norte de las hojas cartográficas, donde existe una zona de descompresión que propicia la formación de manantiales. Los valores de transmisividad varían en el orden de 500 m²/día a 1000 m²/día (Tecnoambiente, 2003).

Acuicierre de Suerre

Se considera un acuitardo que aísla hidráulicamente al Acuífero Santa Clara; está formado por materiales de depósitos de avalancha compuestos por bloques de rocas volcánicas de composición heterogénea y con evidencias de alteración hidrotermal en algunos clastos, también se ha encontrado restos de madera carbonizada a profundidades mayores a 50 m. Durante el estudio del P.H. Jiménez se obtuvieron permeabilidades del orden de los $1,8 \times 10^{-5}$ y $4,7 \times 10^{-6}$ cm/s (Tecnoambiente, 2003).

Acuífero lávico de Guácimo

Este se alberga en lavas andesíticas cuyos espesores máximos se estiman en 30 m, contiene bloques métricos que se extienden en forma de lonas elongadas con dirección se sur a norte, las coladas además presentan textura vesicular con estructuras de diaclasamiento por enfriamiento, las cuales presentan aberturas de hasta 2 m de ancho y en algunos casos alcanzan 10 m de profundidad, hacia el núcleo estas lavas se presentan de forma masiva (Tecnoambiente, 2003).

Acuífero aluvial Guápiles

Se alberga en depósitos aluviales heterogéneos que comprenden arenas y gravas de origen fluvial y gran extensión, su espesor supera los 60 m en algunas zonas, es un acuífero libre con niveles estáticos someros, por lo que podría presentar una vulnerabilidad de moderada a alta, dependiendo de las condiciones locales del depósito aluvial (Tecnoambiente, 2003).

2.8.2. Información de pozos y concesiones de agua en las zonas de estudio

La Figura 24 muestra la ubicación de concesiones de aguas de pozos y manantiales según el visor de mapas de la Dirección de Aguas (MINAE); de acuerdo con esta información, dentro de las zonas de estudio se han tramitado 110 concesiones de agua para pozos y 53 de manantiales, el total de agua concesionada para pozos es de 222,14 l/s, donde la mayor parte corresponde al uso agroindustrial con un caudal de 120,94 l/s, mientras que para consumo humano el caudal es 64,47 l/s. El total de agua concesionada en manantiales es de 324,27 l/s principalmente para consumo humano.

Por otra parte, según la base de datos del SENARA en la zona de estudio existen 66 pozos con información litológica, la mayor parte de estos se ubican en el sector de Cariari (34), mientras que Guápiles cuenta con la menor cantidad de pozos (10), en Jiménez se ubican 23, como se puede observar en la Figura 24. Además, de acuerdo con los datos, la mayor parte de los pozos tiene una profundidad entre 25 m y 44 m, también la mayoría fueron perforados entre 1990 y 1997 tal como se puede observar en el Gráfico 11.

El Anexo 1 resume la descripción de la litología de los pozos; los pozos tienen profundidades que varían entre 16 y 74 metros de profundidad, por lo general captan un acuífero superficial ubicado en aluviones y lahares presentes en la zona central y norte del área de interés. Son pocos los pozos que intersectan lavas ya que por lo general estas rocas se localizan a profundidades superiores a los 60 metros y los pozos normalmente no exceden esta profundidad. Los caudales varían entre 1 y 10 L/s.

Se han identificado algunos informes de perforación en los cuales se reportan coordenadas específicas que no corresponden con los datos de las concesiones de la Dirección de Agua del MINAE, por lo tanto se consideró mantener las coordenadas indicadas en el informe de cada perforación.

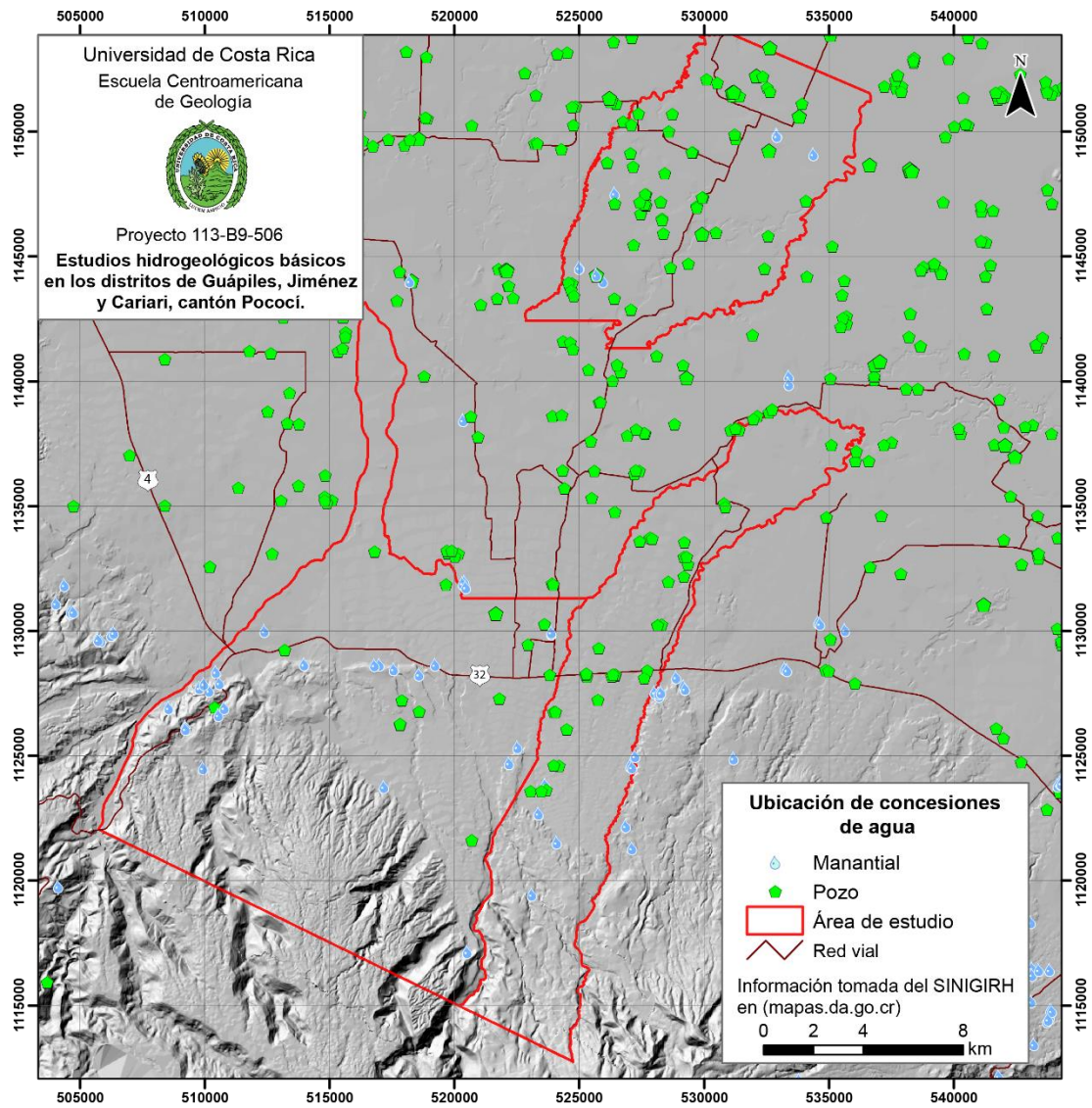
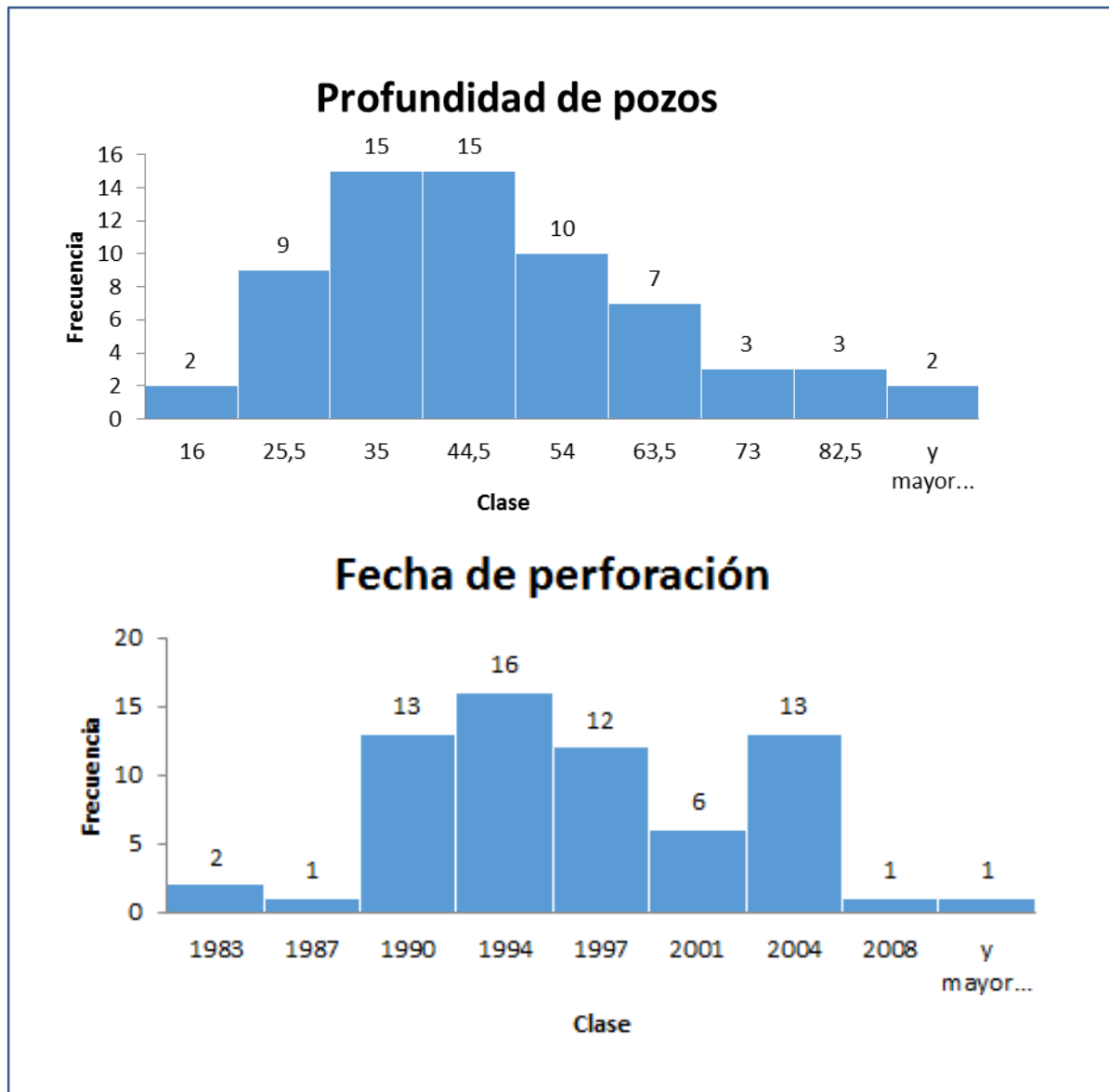


Figura 24. Ubicaciones de concesiones de agua de pozos y manantiales tramitadas en la Dirección de Aguas.

Gráfico 11. Histogramas de la profundidad y fechas de los pozos registrados en las zonas de estudio. Elaboración propia: a partir de la información de la Base de datos de pozos del SENARA, 2019.



2.8.3 Perfiles hidrogeológicos

Se realizaron 4 perfiles hidrogeológicos con base en la información de los pozos existentes, la información geofísica y la geología en superficie, la ubicación se muestra en las Figuras 25 y 26. Los perfiles A-A' y C-C' tienen orientación norte-sur aproximadamente, mientras que el perfil B-B' es oeste-este y el perfil D-D' es sureste-noreste.

El perfil A-A' (Figura 25) atraviesa gran parte de las zonas de estudio con un rumbo Sur-Norte principalmente en Guápiles y en Jiménez, presenta lavas en la zona sur, las cuales conforman el basamento regional, escasos pozos tienen la rejilla en las lavas, únicamente el pozo CL-7 atraviesa estas rocas (Figura 27), las cuales se correlación con la Unidad Reventado, proveniente del Volcán Irazú. Conforme el perfil se extiende hacia el norte, de acuerdo con los SEVs realizados existen más lavas, sin embargo es posible que estas lavas se asocien con materiales provenientes del Volcán Turrialba debido a la ubicación geográfica que tienen, sin embargo debido a la semejanzas petrológicas que tienen ambos Volcanes y a las limitadas descripciones de los reportes de perforación, no es posible diferenciarlas con certeza, por lo que el perfil muestra una interpretación, independientemente de la procedencia de las lavas, es evidente que su extensión llega al menos hasta el SEV 10, más al norte de este punto, las lavas se acunan y se profundizan para dar paso a un espeso paquete de sedimentos de distintas granulometrías, el cual aparece desde el río Toro Amarillo según el perfil y se amplía al norte del mismo. El relleno sedimentario reciente incluye aluviones, lahares y coluvios de la Unidad Guápiles.

Con base en los reportes de perforación se considera que existen al menos dos niveles de agua subterránea en la zona, uno somero localizado en los materiales granulares de la Unidad Guápiles y el segundo nivel se ubica en las lavas, en el pozo CI-7 el nivel es superficial, se reporta a 3 m.b.n.s.

El perfil B-B' muestra una secuencia similar a la descrita en el perfil A-A' (Figura 25); las lavas se encuentran en promedio a 25-30 metros de profundidad de acuerdo con los SEVs realizados (SEV-4, SEV-3, SEV-18 y SEV-13), los pozos GU-46, GU-28, GU-31 y GU-58 solo atraviesan aluviones según los reportes de perforación (Figura 27), se reporta un nivel de agua subterránea a menos de 5 metros (Anexo 2). Los SEVs 3 y 4 localizan el nivel a 13 m y 19 m de profundidad respectivamente.

El perfil C-C' (Figura 26), se localiza en la zona de Cariari y abarca materiales sedimentarios principalmente. Ni los pozos ni los sondeos revelan claramente la ubicación del basamento, esto debido al gran espesor de las capas areno-arcillosas presentes en el área. Únicamente los datos finales del pozo AF-85 mencionan la presencia de lavas y el SEV-8 indica la presencia de un valor muy alto al final del sondeo, el cual podría indicar la presencia de una litología mucho más resistiva, no obstante, sería necesario realizar un sondeo de mayor profundidad para obtener datos para corroborarlo (Figura 28). El nivel del agua subterránea se localiza a los 4 m de profundidad promedio.

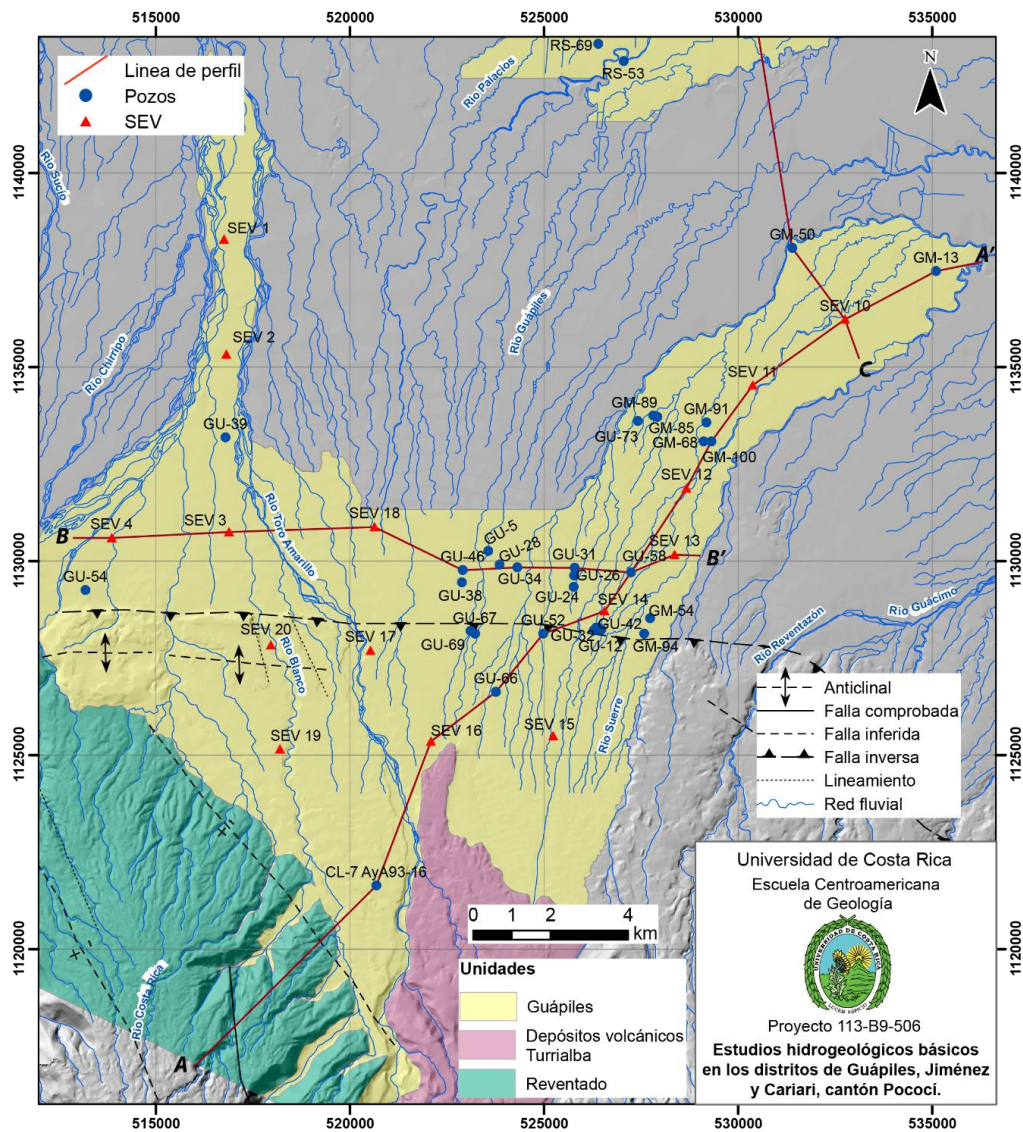


Figura 25. Ubicación de las líneas de perfiles hidrogeológicos realizados en Guápiles y Jiménez.

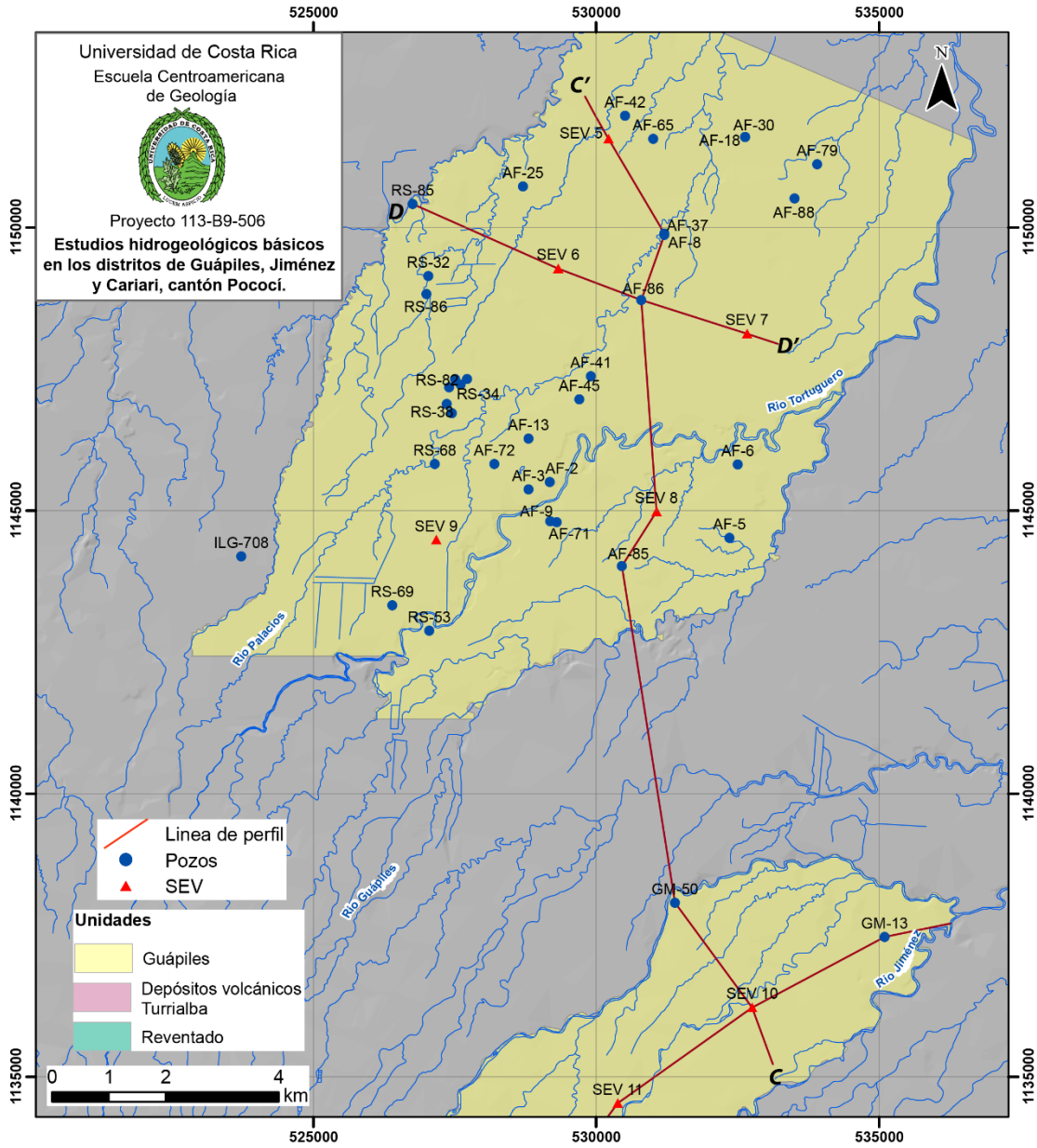


Figura 26. Ubicación de las líneas de perfiles hidrogeológicos realizados en Cariari.

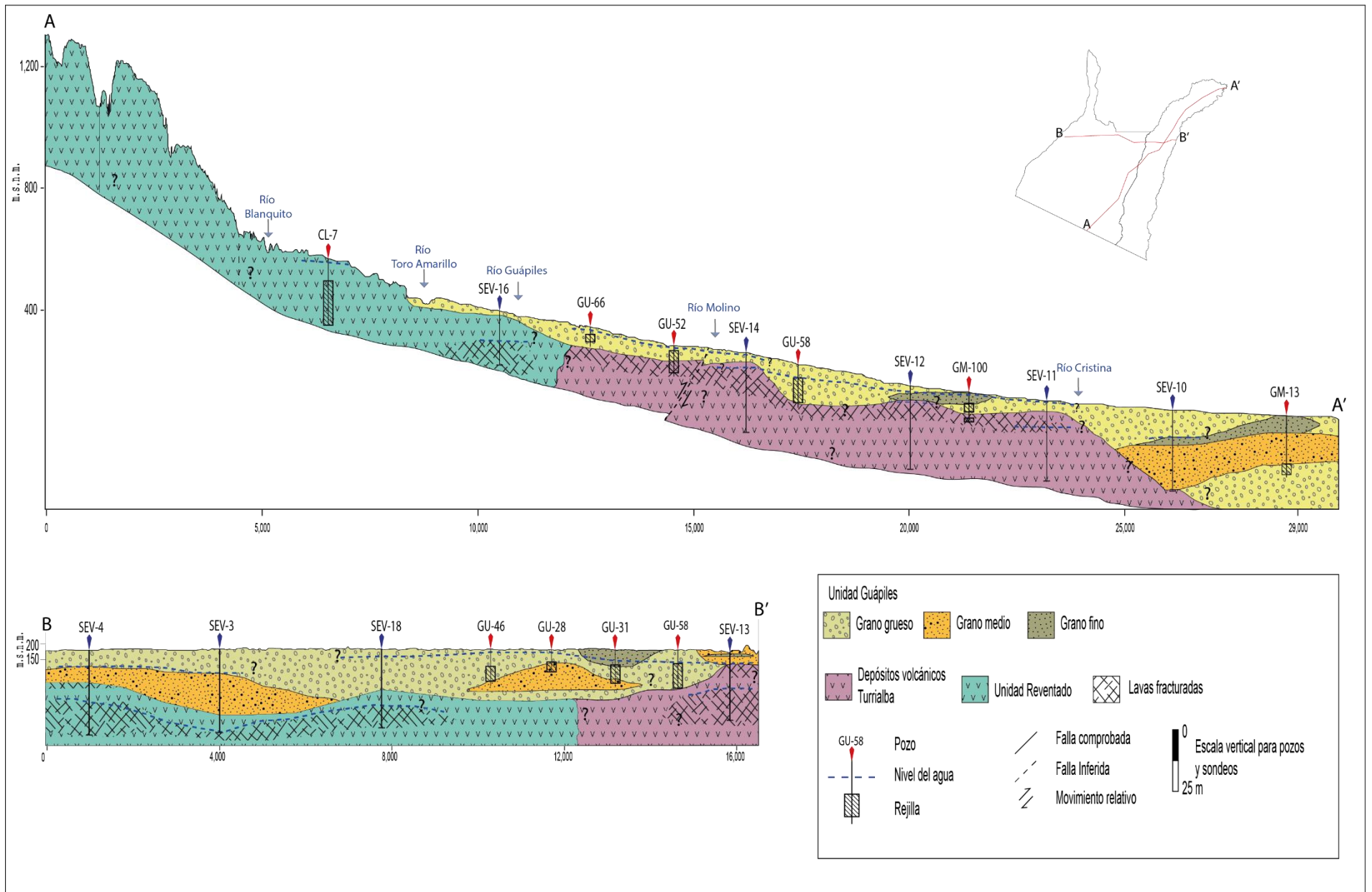


Figura 27. Perfiles hidrogeológicos de las zonas de estudio.

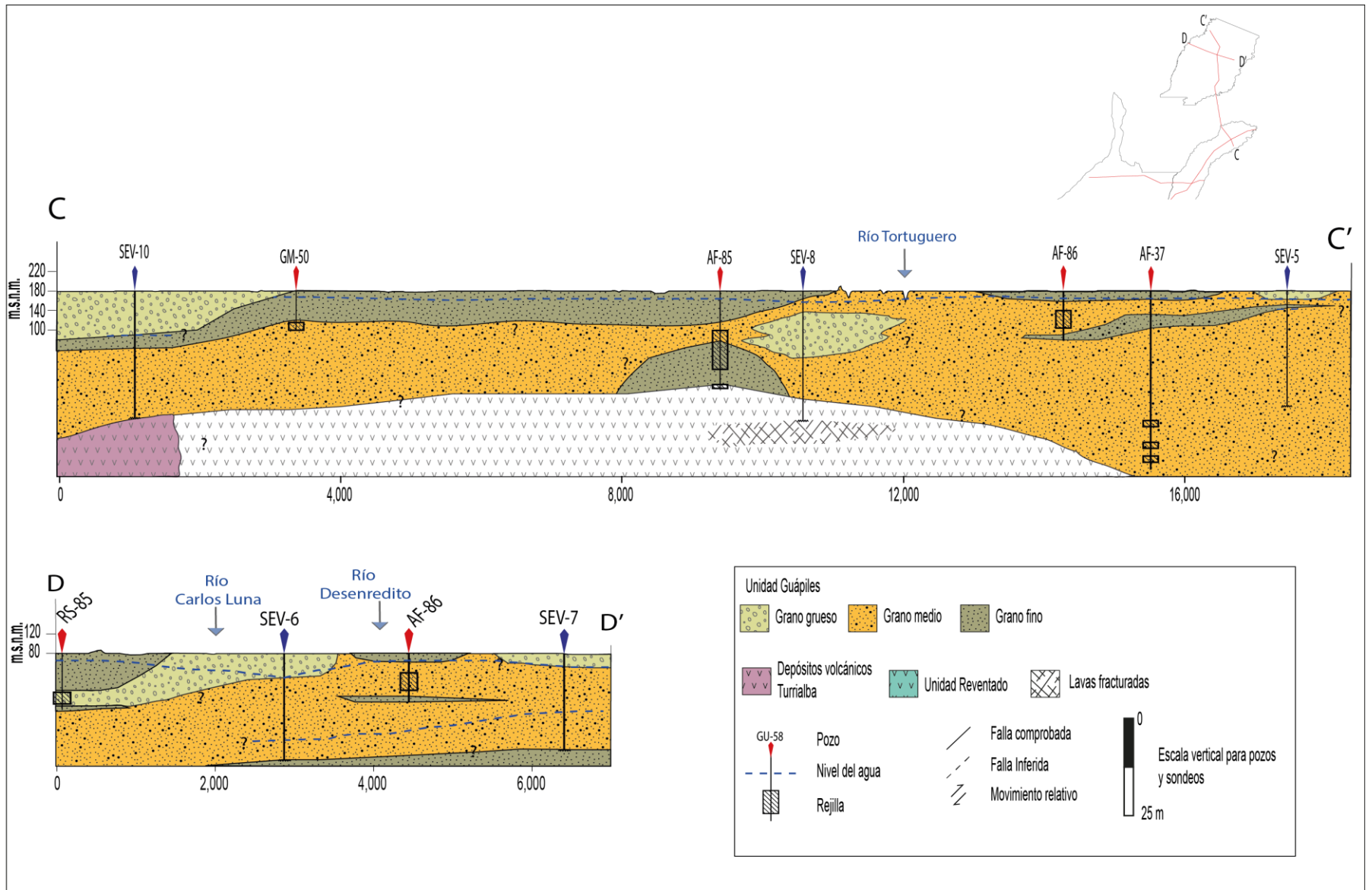


Figura 28. Perfiles hidrogeológicos de las zonas de estudio.

Finalmente, el perfil D-D' (Figura 28) muestra únicamente materiales sedimentarios, se observa que los pozos son someros, los SEVs tampoco alcanzan las lavas, ya que en este sector posiblemente estén más profundas debido a la ubicación en la cuenca sedimentaria.

2.8.4 Red de monitoreo de niveles

Se midieron niveles de 30 pozos distribuidos de la siguiente manera: 8 en el distrito de Guápiles, 11 en Jiménez y 11 en Cariari, la distribución espacial se muestra en la Figura 29 y los datos se incluyen en el Anexo 10. La mayoría son pozos artesanales hechos con cañería de 30" de diámetro y profundidades de excavación que van desde los 3,5m hasta los 11m. Dos de los pozos medidos corresponden a pozos perforados estos localizados en el distrito de Guápiles.

Los niveles en Guápiles van desde los 1,2m hasta los 3,5m aproximadamente, en Jiménez desde los 67cm hasta 2,5m aproximado y en Cariari desde los 41cm hasta 4,2m aproximado. Las mediciones se realizaron posterior a un periodo de intensas lluvias en la zona de estudio por lo que el nivel, específicamente en Cariari y Jiménez tiende a ser muy somero.

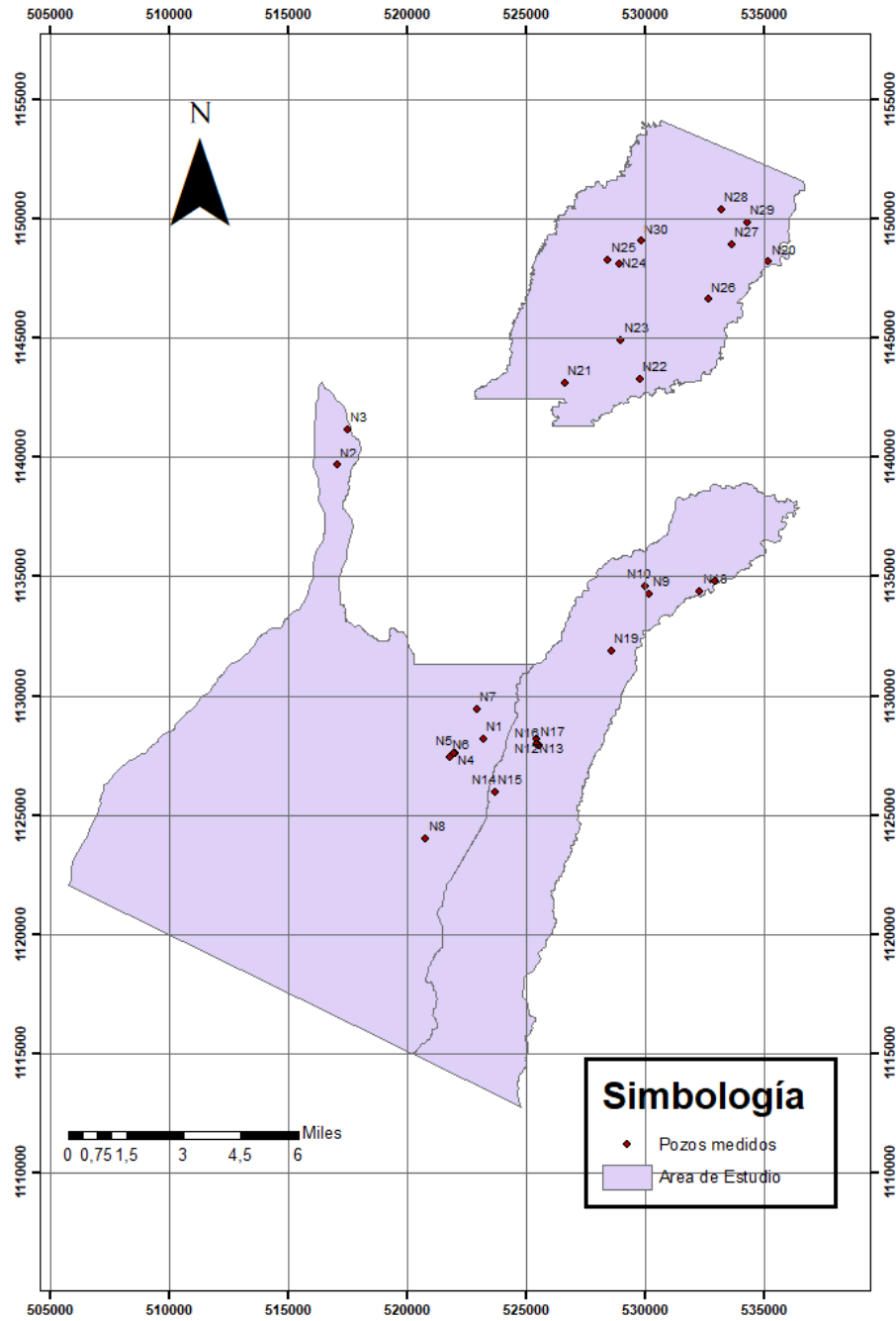


Figura 29. Red de monitoreo de niveles en pozos.

2.8.4 Hidrogeoquímica

Tal y como se mencionó en la sección 1.3.3, se realizó un muestreo de aguas; la ubicación de los puntos de muestreo se presenta en la Figura 30 y los datos se presentan en el Anexo 10. A continuación se comentan los resultados de campo y posteriormente los determinados en laboratorio.

Parámetros de campo

De acuerdo con los resultados se observa que la temperatura en las muestras varía entre 25 °C y 27,3 °C, como se puede observar en el Gráfico 12. Los valores de pH fueron medidos tanto en el campo como en el laboratorio, en el Gráfico 12 se puede observar que los valores del laboratorio son mayores, estos varían entre 7.41 y 8.1, mientras que los valores de campo varían entre 4.61 y 6.6, en general la tendencia de los datos en ambas mediciones es similar, las diferencias se dan por la variación de las condiciones de muestra desde que se tomó hasta que se midió en el laboratorio, en el caso de las muestras M3, M6, M7 la diferencia es considerable recordando que la escala es logarítmica, por lo que estos valores debe utilizarse cuidadosamente, la diferencia podría deberse algún error en la toma de datos o la calibración del equipo.

También existe una ligera variación entre los datos de campo y de laboratorio de la conductividad eléctrica, sin embargo, este es un parámetro más estable, la tendencia es la misma en ambos casos, los valores varían entre 122 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Gráfico 13), estos valores cumplen con la normativa vigente para el consumo humano, los valores más altos se reportan para los pozos M3 y M9 y se asocia con condiciones locales. Los resultados de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos sugieren que hay poca interacción entre el agua y el medio geológico.

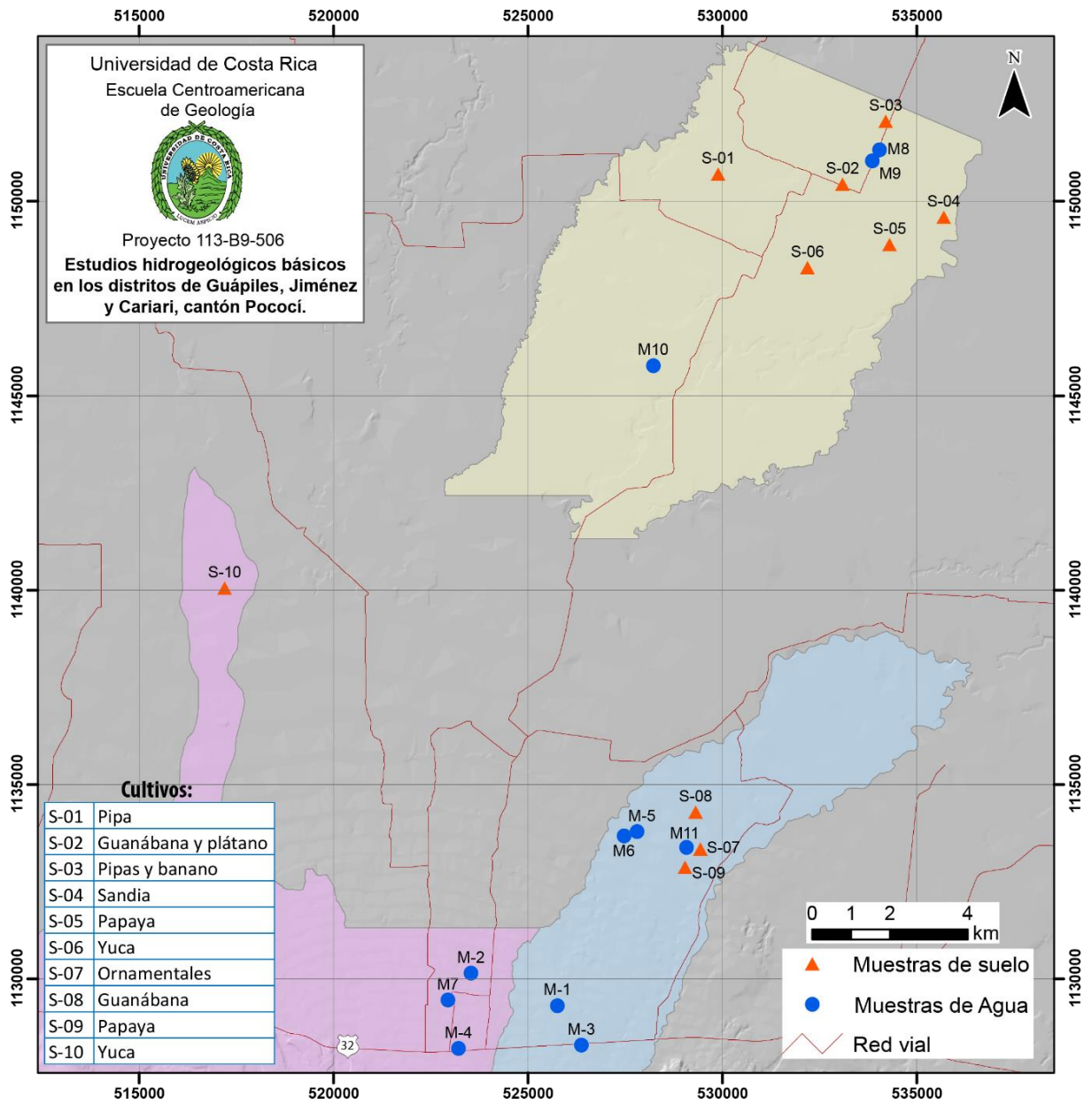
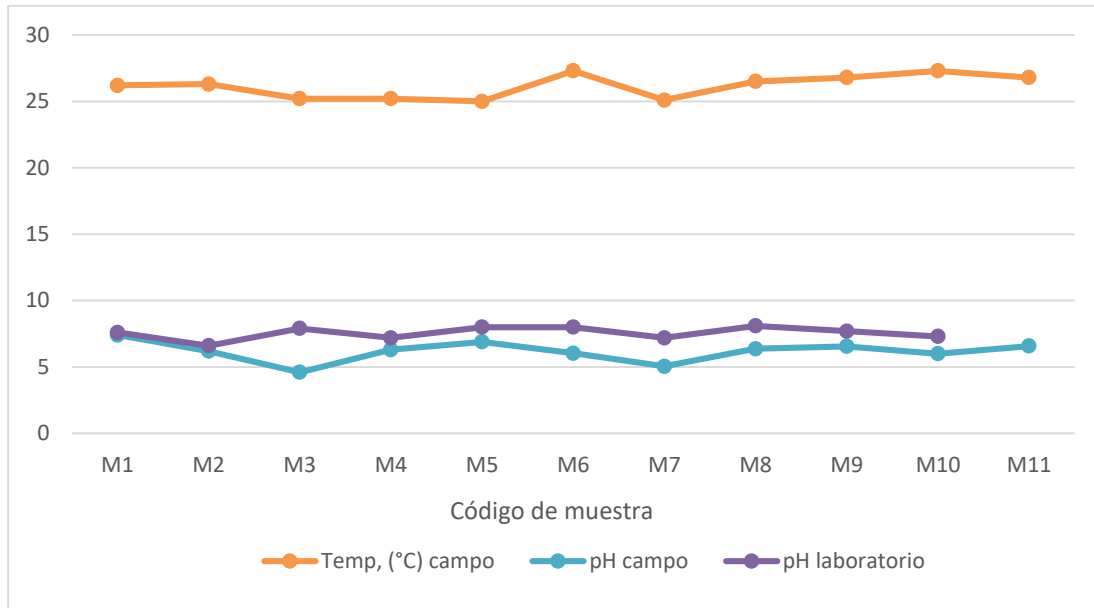


Figura 30. Ubicación de los sitios de muestreo.

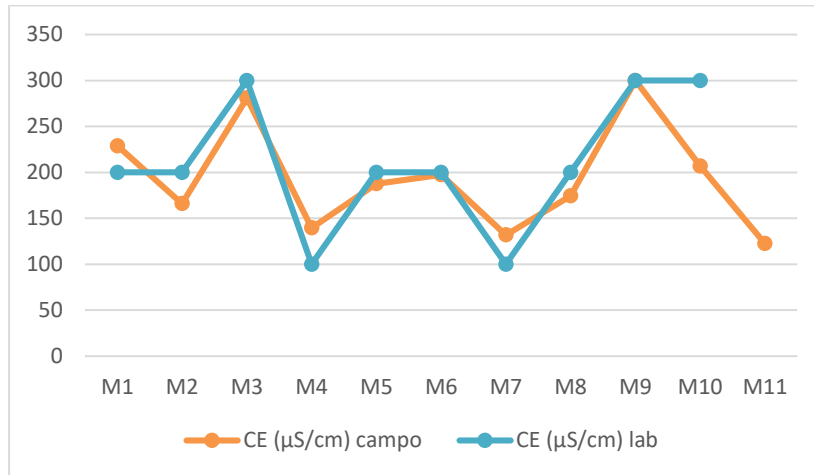
Gráfico 12. Valores de temperatura y pH medidos en campo y laboratorio.



Es importante mencionar que los valores de los parámetros de campo son más representativos que los del laboratorio, ya que estos parámetros son sensibles a cambios en la temperatura y la presión, porque el agua en el acuífero tiene ciertas características (presión y temperatura determinadas) y cuando el agua es llevada hasta la superficie del terreno se podrían dar cambios, es por esta razón que los parámetros deben medirse *in situ* antes del traslado al laboratorio.

Los valores de OD medidos en el campo indican condiciones reductoras (<2,5 mg/L) en los pozos M2, M6, M7, M8, M9 y M10, lo que sugiere que el medio geológico presenta condiciones anaeróbicas o reductoras, de manera que se considera que el agua subterránea se mueve relativamente lento lo que hace que el oxígeno que trae consigo el agua de recarga se vaya gastando a lo largo del flujo a través de los materiales granulares (lahares y aluviones), esta condición podría favorecer la presencia de algunas especies reducidas en el agua subterránea, sin embargo a partir de los resultados de laboratorio solo los pozos.

Gráfico 13. Conductividad eléctrica medida en campo y laboratorio de las muestras de agua.



Resultados de laboratorio

Las muestras de agua subterránea fueron clasificadas a partir de las concentraciones de los iones mayores, los resultados se pueden apreciar en la Gráfico 14, donde se muestra que las aguas analizadas son bicarbonatadas cálcico-sódicas. La muestra M9 se encuentra cerca del límite hacia el sector del diagrama de Piper en donde el agua es bicarbonatada con algunas ligeras variaciones en la concentración de sodio, calcio y magnesio sódica-cálcica, a lo largo del flujo aumenta ligeramente el calcio y el sodio (Gráfico 15), para detallar más este resultado se elaboraron gráficos de Siff los cuales se muestran en el Gráfico 16, con base en estos cationes se pueden diferenciar tres grupos hidrogeoquímicos:

- 1) aguas bicarbonatadas magnésicas donde se incluyen las muestras: M1, M3, M5, M6, estas muestras se localizan en Jiménez y Guápiles donde hay lavas y depósitos volcániclasticos;
- 2) aguas bicarbonatadas sódico-cálcico-magnésicas: M11 y M12, localizadas en Jiménez
- 3) aguas bicarbonatadas cálcicas: M2, M4, M7; ubicadas en Guápiles

Las muestras M8, M9 y M10 tienen una composición distinta a las demás muestras, estas muestras fueron recolectadas en la localidad de Cariari al norte de las áreas de estudio, donde cambian las condiciones geológicas, ya que existe un espesor de sedimentos

considerable, además las lavas se encuentran más profundas que en la zona sur de las áreas de estudio. Las muestras M9 y M8 las cuales tienen concentraciones mayores de sodio, lo cual podría deberse a un aumento en la salinidad de las aguas, es importante mencionar que en esta zona algunos pozos han reportado la presencia de arenas con restos de conchas por la influencia marina costera lo que podría explicar la composición del agua.

Las muestras cumplen con casi todos los parámetros del Reglamento para la Calidad de Agua Potable (decreto ejecutivo N° 38924-S), excepto por las muestras M1, M6, M9 y M10 donde la suma de los valores de Fe y Mn es mayor al valor máximo admisible, eso se debe las condiciones reductoras que caracterizan la zona (Cuadro 10).

Cuadro 10. Comparación de resultados de análisis químicos realizados en aguas con Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica.

Código de muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Valor Alerta	Valor máx admisible
Temp, (°C) campo	26.2	26.3	25.2	25.2	25	27.3	25.1	26.5	26.8	27.3	26.8	26.8	18	30
pH campo	7.41	6.19	4.61	6.3	6.9	6.04	5.05	6.38	6.56	6	6.58	6.58	6	8
pH laboratorio	7.6	6.6	7.9	7.2	8.0	8.0	7.2	8.1	7.7	7.3	7.0	7.2		
CE (µS/cm) campo	229	166.1	281	139.5	187.6	197.4	131.8	174.3	300	207	122.7	122.7	400	-
CE (µS/cm) lab	200	200	300	100	200	200	100	200	300	300	100	100		
STD (ppm)	-	83	141	69.6	-	99	65.7	87.1	152	102	61.5	61.5	-	1000

Cl (mg/L)	7.3	5.3	6.3	3.2	3.2	3.1	4.4	3.8	4.9	4.1	3.8	3.7	25 mg/L	250 mg/L
NO3 (mg/L)	0.1	2.0	0.9	0.4	0.1	0.2	2.0	0.1	0.1	0.1	3.2	2.6	25 mg/L	50 mg/L
Na (mg/L)	12.3	8.1	17.7	6.1	9.1	8.9	6.0	13.4	25.6	8.3	7.3	7.3	25 mg/L	200 mg/L
K (mg/L)	7.5	4.4	6.2	4.8	4.0	4.9	3.1	4.3	11.6	4.0	1.9	1.9	---	10 mg/L
Ca (mg/L)	12.4	15.0	14.7	12.8	12.9	14.7	16.1	13.2	17.8	27.7	7.2	7.6	---	100 mg/L
Mg (mg/L)	14.4	5.3	17.7	5.5	11.5	11.2	4.1	6.8	8.2	11.2	5.3	5.6	30 mg/L	50 mg/L
Arsénico (µg/L)	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	3.48 ± 0.07	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	---	0,01 mg/L
SO4 (mg/L)	1.04 ± 0.06	6.2 ± 0.3	1.04 ± 0.06	<0.50	3.1 ± 0.2	8.3 ± 0.4	5.2 ± 0.3	2.1 ± 0.1	<0.50	<0.50	4.1 ± 0.2	5.2 ± 0.3	25 mg/L	250 mg/L
P (mg/L)	0.4	ND	0.5	ND	0.2	0.1	ND	0.4	0.6	ND	0.1	0.1	Sin norma	
Zn (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	---	3 mg/L
Cu (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1,0 mg/L	2,00 mg/L
S (mg/L)	0.7	3.6	1.2	1.5	2.0	3.0	2.9	1.3	0.5	1.3	2.3	2.1	Sin norma	
Fe (mg/L)	0.1	ND	ND	ND	0.1	0.1	ND	ND	0.3	1.0	ND	ND	---	0,3 (b) mg/L
Mn (mg/L)	0.3	ND	0.2	ND	0.1	0.3	ND	0.1	0.2	0.2	ND	ND	0,1 mg/L	0,5 (b) mg/L
Fe+Mn (mg/L)	0.4	ND	0.2	ND	0.2	0.4	ND	0.1	0.5	1.2	ND	ND		0.3 mg/L

(b) En aguas subterráneas, donde se encuentran estos dos metales, el VMA (Fe + Mn) es 0,3 mg/L.

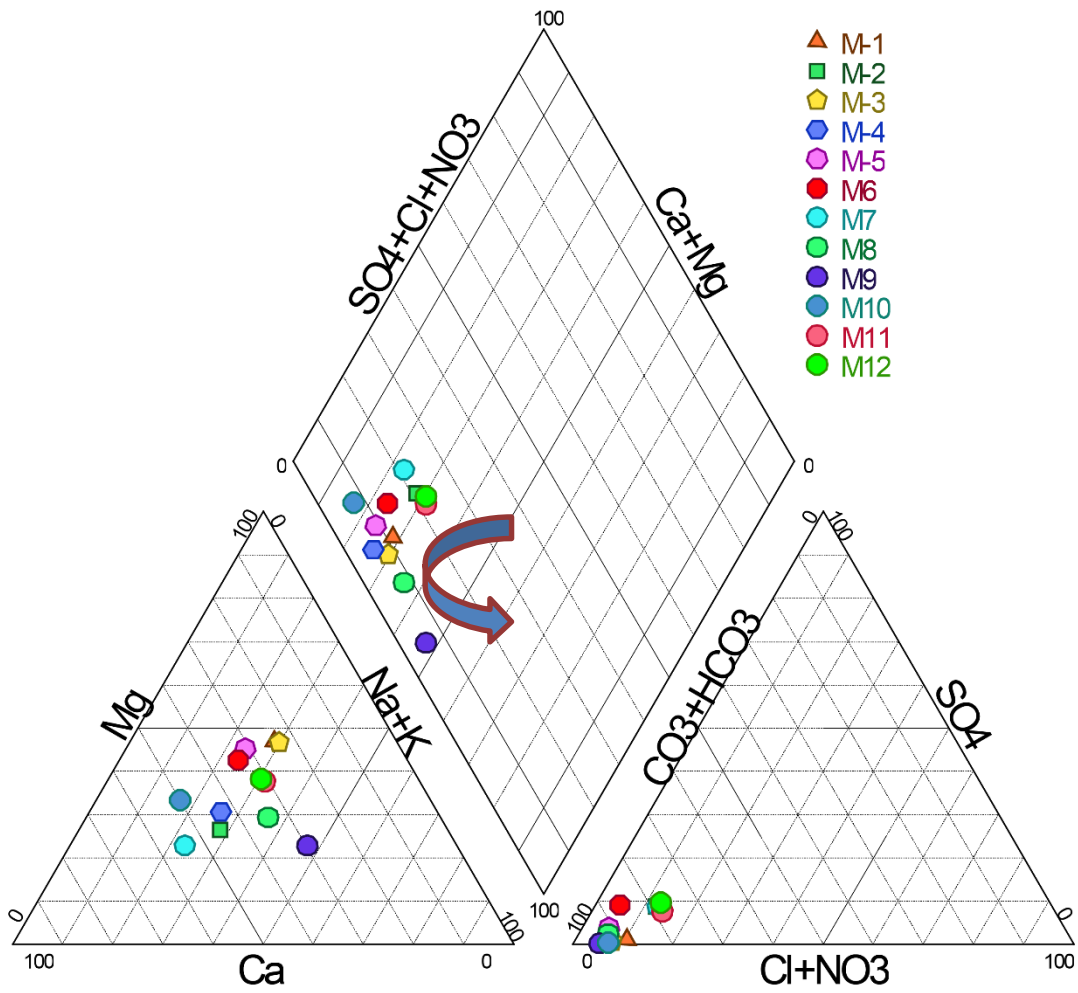


Gráfico 14. Diagrama de Piper de las muestras analizadas

Gráfico 15. Diagrama de Schoeller de las muestras analizadas.

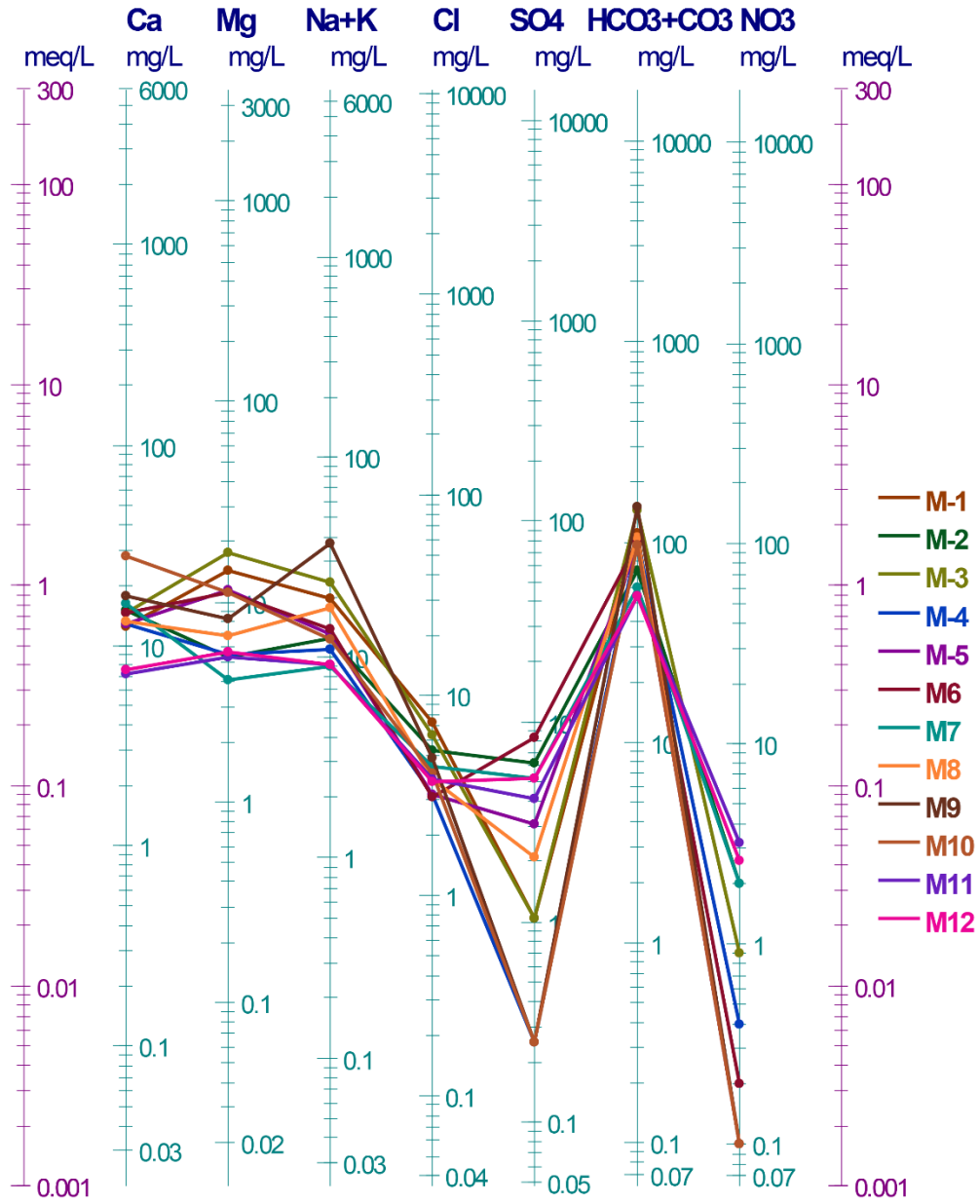
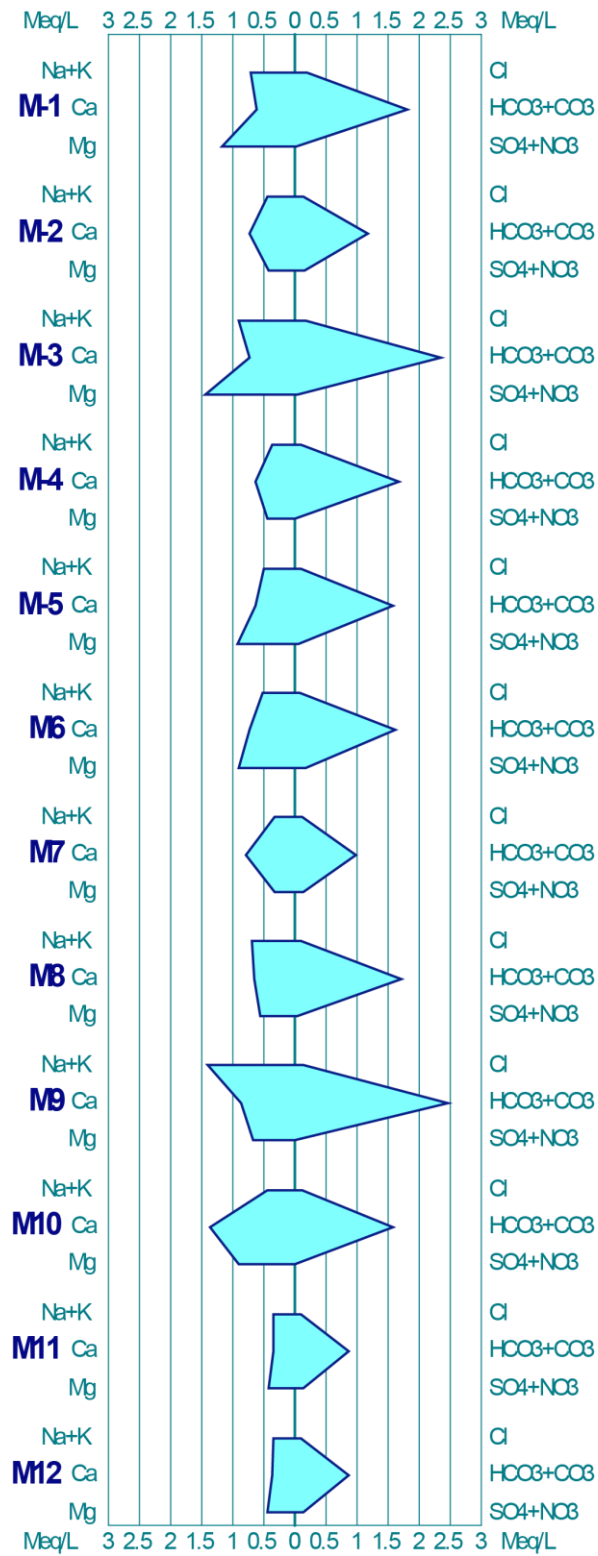


Gráfico 16. Diagrama de Schoeller de las muestras analizadas



2.9 Disponibilidad de la información

A partir de la búsqueda de información en distintas instituciones y el trabajo de campo realizado, se identificaron zonas en donde existen distintos niveles de información geológica, hidrogeológica disponible, a partir de dicha información se prepararon las Figuras 31 y 32 donde se muestran las tres zonas de estudio y los distintos datos que existen; por ejemplo actualmente se cuenta con información cartográfica básica y geológica a la escala 1: 50 000 para todas las zonas, sin embargo la información hidrogeológica y climática es muy limitada. La mayor parte de los pozos se localizan en las zonas con topografía plana al norte de la coordenada 1125000 (CRTM05) y además como se mencionó los pozos no exceden en general los 70 metros de profundidad. El Cuadro 11 resume los resultados del presente estudio.

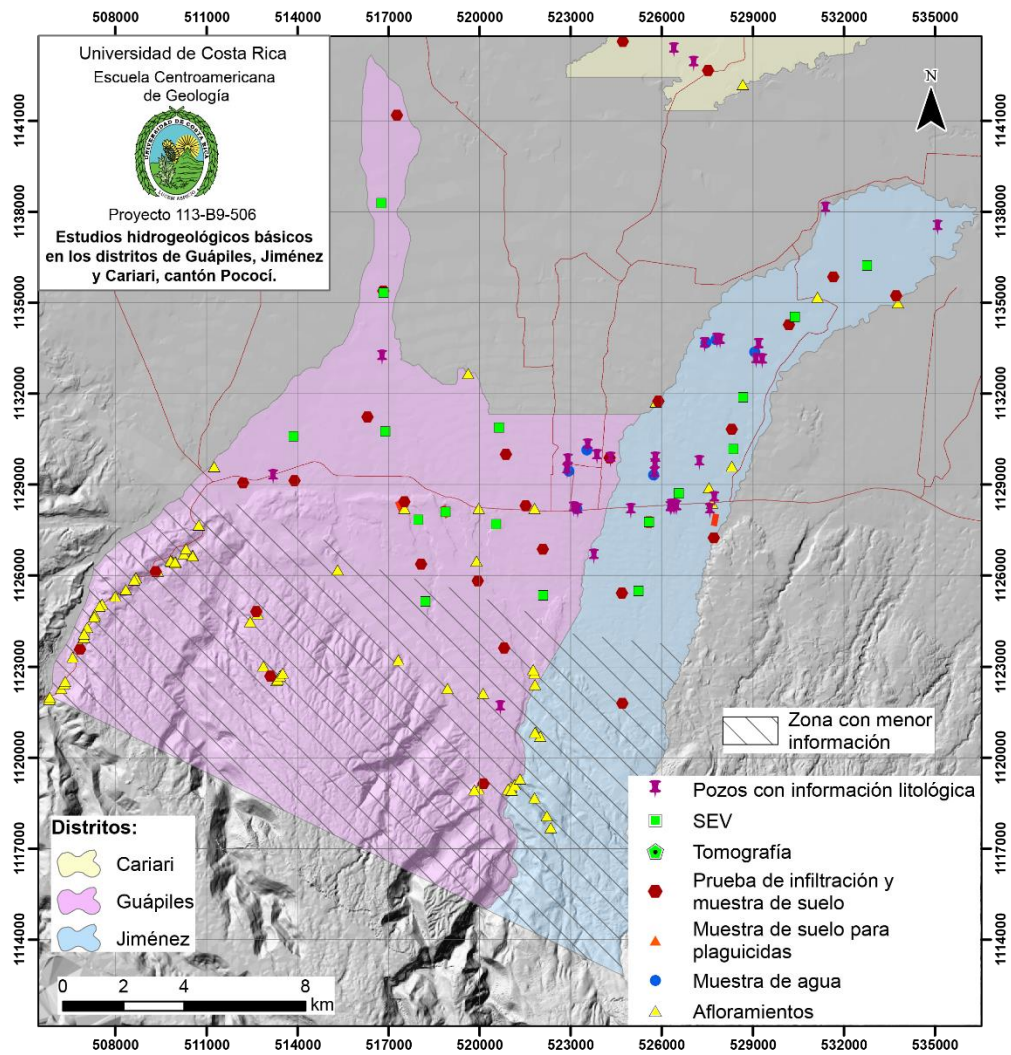


Figura 31. Información disponible para Guápiles y Jiménez.

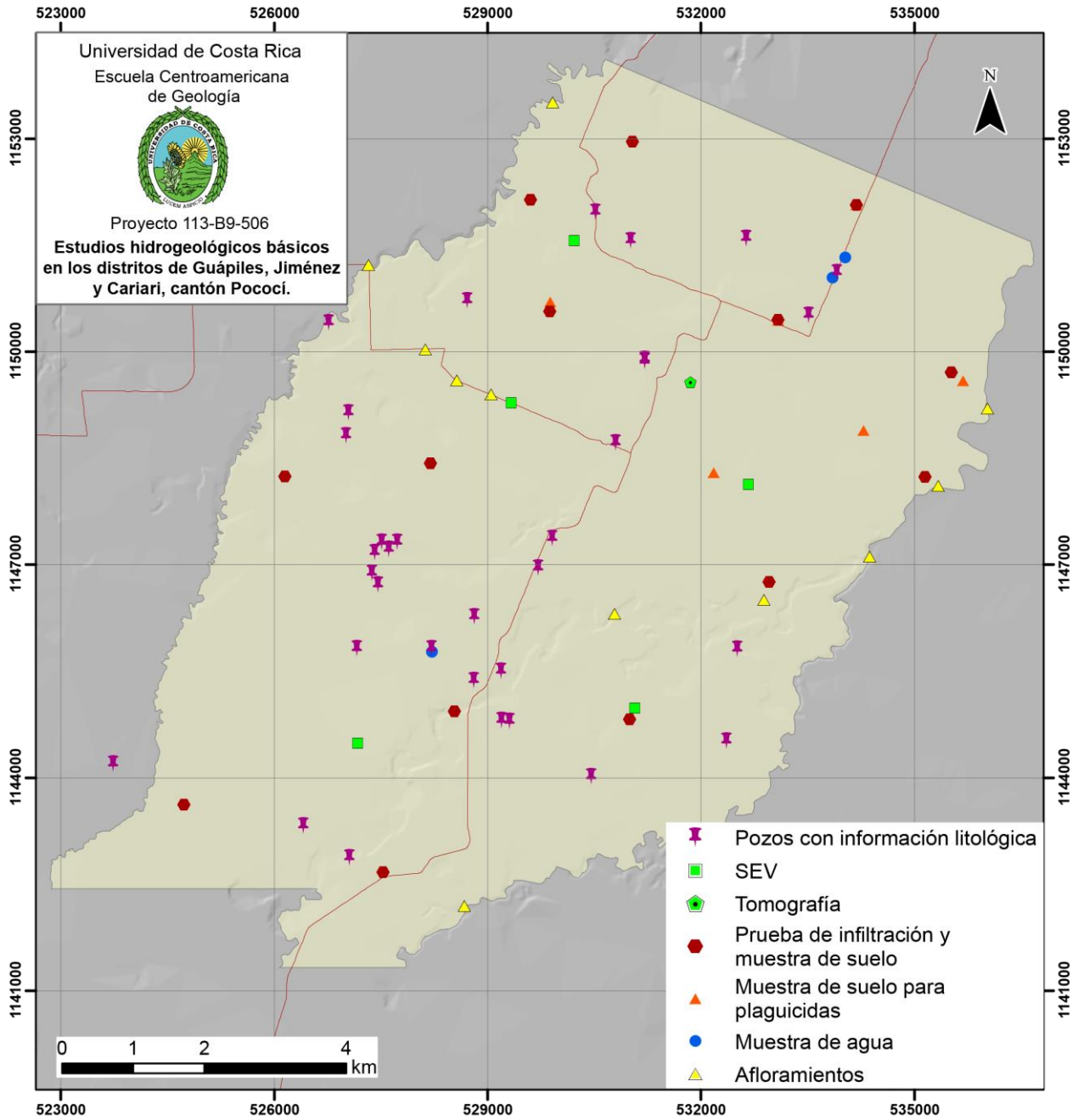


Figura 32. Información disponible en Cariari.

Cuadro 11. Resumen de los resultados del presente estudio

Tipo de información	Detalle	Utilidad
Recopilación de los trabajos anteriores	Revisión bibliográfica	Contexto regional
Análisis químicos en aguas (iones mayores, nitratos, trazas, parámetros de campo tales como: conductividad eléctrica, pH, temperatura, oxígeno disuelto y Eh)	11 análisis de aguas (más un duplicado)	Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos Calidad del agua según los parámetros solicitados
Compilación de datos climáticos (precipitación, temperatura, brillo solar)	Registro completo de 2 estaciones meteorológicas	Información base para el cálculo de la evapotranspiración como insumo para el balance hídrico
Levantamiento y descripción de afloramientos	80 puntos	Actualización de los mapas geológicos existentes
Pruebas de infiltración (método de doble anillo)	40 sitios	Determinación de velocidad de infiltración y conductividad hidráulica
Mapas de afloramientos y mapas geológicos de las zonas de estudio	mapas de las áreas	Base para la elaboración de modelos conceptuales y perfiles hidrogeológicos
Geofísica	20 Sondeos eléctricos verticales 5 tomografías	Base para la elaboración de modelos conceptuales y perfiles hidrogeológicos
Recolección y análisis físicos de muestras de suelos (capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente, porosidad efectiva, porosidad total, análisis de textura, porcentajes de arcillas y limos)	40 análisis físicos	Insumos para el balance hídrico y cálculo de la recarga acuífera
Recolección y análisis químicos de muestras de suelos (sólido químico completo, pH, conductividad eléctrica, carbón orgánico, nitrógeno total, C/N, CIC + bases). Análisis de plaguicidas residuales en suelos	34 análisis químicos 10 análisis de plaguicidas	Permite conocer la composición química del suelo (línea base, análisis de la atenuación de contaminantes en la zona no saturada)
Propuesta de red de monitoreo	30 pozos	Datos base para la calibración de modelos

		numéricos y establecimiento de distintos escenarios hidrogeológicos
Análisis de la información hidrogeológica		Identificación de zonas con vacíos de información, recomendaciones para estudios futuros

3. Conclusiones

La geología de las zonas de estudio está representada por rocas volcánicas asociadas con los volcanes Irazú y Turrialba, los cuales muestran similitudes en sus características petrográficas tal y como han sido reportadas por otros autores. Estas rocas están representadas por flujos de lavas andesíticas, andesítico-basálticas, tobas subordinadas; los flujos de lava predominan en la zona Sur de las zonas estudiadas, en superficie se encuentran en afloramientos ubicados al sur de la coordenada 1125000 Norte. Estas rocas son sobreyacidas por una cubierta de depósitos recientes que incluyen lahares, coluvios y aluviones, cuyo espesor aumenta hacia el norte de la zona de estudio.

En el sector montañoso y en sectores aledaños al pie de coladas de lava, se presentan depósitos coluviales de tamaños métricos sobreyaciendo a las lavas, dichos depósitos se caracterizan por valores de resistividad sumamente elevados, lo cuales son superiores a los 1000 Ωm , y con espesores desde 1 m hasta 12 m.

Conforme se desplaza hacia el norte del área de estudio y sobre las coladas de lava y en contacto lateral con los depósitos coluvio-aluviales, se presenta una capa aluvial compuesta principalmente por una serie de subcapas interdigitadas de granulometrías de grano medio (gravas y arenas), que generalmente presentan valores de resistividad menores a los 100 Ωm , un espesor entre los 35 m en los sectores cercanos al pie de monte (Guápiles -Jiménez) hasta de 68 m en los sectores ubicados en el distrito de Cariari.

Además, en el sector de Cariari las capas con valores de resistividad entre 10 y 60 Ωm se han asociado a arenas medias, las cuales se presentarían en forma de lentes, o largadas según el origen del sistema de depositación (paleocanales, meandros abandonados o llanuras de inundación). Las capas de grano fino se asocian a arenas finas y arcillas, cuyo rango de resistividades sería menor a los 20 Ωm .

Con base en la información analizada se tiene un panorama regional de las condiciones hidrogeológicas de la zona de estudio, en donde se ubican al menos dos acuíferos, uno somero localizado en los materiales granulares (aluviones, coluvios y lahares), el cual se clasifica como libre y otro más profundo, ubicado en las lavas, por lo que se considera del tipo fracturado o fisural, el cual podría considerarse libre donde no hay cobertura de los depósitos granulares recientes y más al norte libre a semiconfinado

Las lavas poco fracturadas conforman el basamento local los cuales tienen aumentos en los valores de resistividad entre los 100 Ωm y 300 Ωm , y espesores de capa eléctrica mayores a 10 metros, mientras que las lavas fracturadas presentan valores de resistividad entre 200 Ωm y 60 Ωm aproximadamente, y se caracterizan por una leve disminución de la resistividad con respecto a los sectores más masivos.

Los análisis realizados en los suelos indican que se trata de suelos franco-arcillosos hasta franco arenosos con velocidades de infiltración moderadas a rápidas.

La composición del agua subterránea es bicarbonatada magnésica, cálcica y sódico-cálcica y se asocia con las condiciones geológicas de la zona. Con base en los parámetros analizados se puede concluir que el agua es potable, sin embargo se debe indicar que por las características del estudio no se incluyeron otros parámetros de calidad como coliformes fecales. Se realizaron análisis de plaguicidas en agua pero no fueron detectaron.

4. Recomendaciones

- Ampliar el cartografiado geológico, principalmente al sur de la zona, ya que en este sector es donde hay más afloramientos, ya que por los alcances de este estudio no fue posible realizarlo.
- Realizar perforaciones exploratorias en los sitios propuestos con el fin de caracterizar en detalle la presencia de los depósitos asociados tanto al Volcán Irazú como el Turrialba mediante geoquímica y dataciones radiométricas. Esas mismas perforaciones servirían para estudiar las condiciones de los acuíferos en la zona (profundidad, grado de confinamiento, etc).
- Instalar piezómetros para vigilar los niveles del agua subterránea y la calidad de la misma, donde se contemplen los análisis microbiológicos.
- Realizar más exploración geofísica en la zona de la falla Guápiles para delimitar su geometría.
- Definir una red de vigilancia de la calidad del agua subterránea, principalmente al norte de Guápiles donde existen cultivos en donde podrían darse afectaciones debido al uso de plaguicidas para el control de plagas.
- Realizar un análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea.
- Realizar análisis de isótopos estables en el agua subterránea y el agua de lluvia para ayudar a entender la dinámica del flujo del agua subterránea en la zona de estudio.
- Coordinar con las ASADAS de la zona para alertar en forma temprana cualquier posible impacto local en la calidad del agua subterránea ya sea en la zona urbana como en las zonas agrícolas.

5. Bibliografía

- ACEVEDO, B., 2016. Análisis geoarqueológico de los cambios ambientales y la ocupación de espacios, dentro del sitio arqueológico Nuevo Corinto (1 500 a.C. – 1 550 d.C.), Limón, Costa Rica. Escuela Antropología-UCR. San José, Costa Rica. 143 págs. [Tesis de licenciatura].
- AGUILAR BRENES, E., SEGREDA RODRÍGUEZ, A., SABORÍO ARGÜELLO, D., MORALES GONZÁLEZ, J., CHACÓN LIZANO, M., RODRÍGUEZ ROJAS, L., . . . GÓMEZ BONILLA, Y. (2017). Manual del cultivo de yuca *Manihot esculenta* Crantz. San José: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria INTA .
- ALLEGRE, C. & CONDOMINES, M., 1976. Fine chronology of volcanic process using ^{238}U - ^{230}Th systematics. *Earth Planet Sci Lett.* 28: 395-406.
- ALVARADO, G. E. (1993). *Volcanology and petrology of Irazú Volcano, Costa Rica* (Tesis de doctorado inédita). Universidad de Kiel, Kiel, Alemania.
- ALVARADO, G. E., CARR, M. J., TURRIN, B. D., SWISHER, C. C., SCHMINCKE, H., & HUDNUT, K. W. (2006). Recent volcanic history of Irazú volcano, Costa Rica: Alternation and mixing of two magma batches, and pervasive mixing. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, 412, 259.
- ALVARADO, G. E. Y SOTO, G. J. (2008). Volcanoes in the precolumbian life, legend, and archaeology of Costa Rica (Central America). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(3), 356-362, doi: 0.1016/j.jvolgeores.2008.01.032
- BORGIA, A., BURR, J., MONTERO, W., ALVARADO, G., & MORALES, L.D., 1990. Fault propagation folds induced by gravitational failure and slumping of the Costa Rica Volcanic Range: Implications for large terrestrial and Martian edifices. *J. Geophy. Res.*, 95: 14357-14382.
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M. R. 2001. *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Barcelona: Omega.
- DENYER, P. & ALVARADO, G. E., 2007. *Mapa Geológico de Costa Rica.- Escala 1: 400 000, Oficializado por la Dirección de Geología y Minas.* Librería Francesa, San José, Costa Rica.
- FISHER, D. M., GARDNER, T. W., MAESHALL, J., & MONTERO, W., 1994. Kinematics associated with the late Cenozoic deformation in Central Costa Rica: Western boundary of the Panamá microplate. *Geology*, 22: 263-266.
- HENRÍQUEZ, C. & CABALCETA, G., 1999. *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola.*- 111 pág. CIA-UCR.
- KRUSHENSKY, R., 1972. *Geology of the Istarú Quadrangle, Costa Rica.* - Geological Survey Bulletin 1358. – 46 págs.

- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA .s.f. Platano MUSA sp. Recuperado el 14 de octubre de 2019, de Mag.go.cr:
http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec_platano.pdf
- MALAVASSI, E. & CHAVES, R., 1970. Estudio geológico Regional de la Zona Atlántico Norte de Costa Rica. Inf. Técnico y Not. Geól., año 9(35), Ministerio de Industria Comercio- Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 12 págs.
- MONTERO, W., 1994. Neotectonics and related stress distribution in a subduction collisional zone: Costa Rica. En SYEGRIED & HELLMANN (eds). En Geology of an evolving island arc: Southeastern Central America. Profil, 7, 125-141.
- MONTERO, W., & ALVARADO, G. E. 1995. El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 (Ms= 5, 9) y el contexto neotectónico de la región del volcán Irazú, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*.
- MONTERO, W. 2001. Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24, 29-56.
- MURILLO., D., 2008. Aplicación ambiental del método de resistividad eléctrica en el modelado del acuífero costero en playa panamá, Guanacaste, Costa Rica. *Revista geológica de América Central*, 38: 21-31.
- SALAZAR, M.G, 1996. Análisis Geológico y Geomorfológico aplicado al Plan Regulador de Parte del Cantón de Guácimo, Costa Rica.- ECG-UCR. San José, Costa Rica. 202 págs. [Tesis de licenciatura].
- SÁNCHEZ.J., 2014. Sondeos eléctricos Verticales. Material de curso- Dpto Geología Universidad Salamanca. España <http://web.usal.es/javisan/hidro> (Consultado el 14 de diciembre de 2014).
- SENARA, 2019. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, Base Nacional de Pozos.
- SOTO, G. 1988. Estructuras volcano-tectónicas del volcán Turrialba, Costa Rica, América Central, Actas V congreso Geológico Chileno, 8-12 agosto de 1988, Santiago, Tomo III: 163-177.
- YOUNGER, P. 2006. Groundwater in the environment: An introduction. Blackwell Publishing. 318 p.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrología Aplicada. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245pp.