

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL SITIO DE PRESA DEL PROYECTO RÍO
PIEDRAS, BAGACES, GUANACASTE.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Posgrado de Estudios de Posgrado
en Geología, para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y
Manejo del Recurso Hídrico

MAUREEN BONILLA HIDALGO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres por sus oraciones y enseñanzas a lo largo de toda mi vida, y todavía sigo aprendiendo de ellos. A mi compañero de vida, Iván Sanabria Coto por sus palabras de motivación y apoyo en toda esta travesía 🐻.

Parte del trabajo de investigación de esta tesis se realizó durante el tiempo de pandemia del COVID-19, en los primeros brotes mortales, por lo que el temor, la ansiedad y las limitaciones sanitarias eran el pan de día a día, y a pesar de haber vivido en este ambiente tan estresante, puedo decir que la voluntad humana y la constancia mueven fuerzas invisibles, para encaminarnos a realizar lo que creemos imposible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi grupo de asesores y mi director de tesis, por el tiempo invertido para dirigir mi tesis con dedicación y constancia, a pesar de las situaciones y momentos en que su ánimo y espíritu desistían, apoyándome desinteresadamente con la mejor actitud y compromiso. Muchas gracias, Marco.

Agradezco a todas las instituciones públicas involucradas de forma directa e indirecta como lo son: el Servicio Nacional de Aguas, Riego y Avenamiento (Senara) y al director del Proyecto Paacume Ing. Osvaldo Quirós Arias; al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Coordinador del Área de Geofísica M. Sc. Waldo Taylor Castillo, a mi compañero y amigo jubilado Gerardo Torres Méndez, al Dr. Guillermo Alvarado Induni por el apoyo brindado desde el inicio del proyecto. A la Universidad de Costa Rica y los laboratorios y centros involucrados como el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme), por la amabilidad y colaboración en la elaboración de los ensayos texturales y granulométricos. A la Escuela Centroamericana de Geología, por facilitarme el laboratorio para los ensayos de carga constante y a mi director de tesis Marco Barahona, por colaborar conmigo con el tiempo y la supervisión de los ensayos.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geología de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo del Recurso Hídrico.”

M. Sc. Ingrid Vargas Azofeifa
Representante de la Decana Sistema de Estudios de Posgrado

Dr. Marco Barahona Palomo
Director de Tesis

M. Sc. Marta Chaves Quirós
Asesora

Dr. Asdrúbal Vargas Sanabria
Asesor

Dr. Maximiliano Garnier Villareal
Representante del director del Programa de Posgrado en Geología

Maureen Bonilla Hidalgo
Sustentante

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Hoja de aprobación.....	iv
Resumen	x
Lista de Figuras.....	xii
Lista de tablas	xxi
Lista de acrónimos y siglas.....	xxiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo General	4
1.2 Objetivo Específicos	4
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Problema	6
1.5 Justificación	7
1.6 Alcances y limitaciones	10
II. ÁREA DE ESTUDIO	12
III. CONTEXTO FÍSICO-POLÍTICO.....	13
3.1 Relieve	14
3.2 Clima.....	15
3.3 Precipitación.....	16
3.4 Temperatura	17
3.5 Vegetación.....	18

3.6	Cuenca Hidrográfica	19
IV.	METODOLOGÍA	20
4.1	Fases de Investigación.....	21
4.1.1	FASE 1: Recopilación de datos bibliográficos	21
4.1.2	FASE 2: Generación de datos de campo	22
4.1.3	FASE 3: Sistematización y análisis de datos	23
4.1.4	FASE 4: Resultados.....	23
4.2	Categorías.....	24
V.	ANTECEDENTES.....	32
5.1	Modelos Hidrogeológicos en Obras Civiles.....	32
5.2	Métodos Geofísicos Aplicados a la Hidrogeología.....	34
VI.	MARCO TEÓRICO	36
6.1	Definición de Modelos	36
6.1.1	Modelo conceptual.....	36
6.1.2	Modelo Hidrogeológico	37
6.2	Parámetros Hidrogeológicos.....	39
6.3	Ensayos para determinar la Conductividad Hidráulica	46
6.3.1	Ensayos de Lugeon.....	46
6.3.2	Ensayos tipo Slug Test.....	51
6.3.3	Ensayos con Permeámetro de carga constante	60
6.3.4	Permeabilidad en Sedimentos.....	61
6.4	Métodos geofísicos	64

6.4.1	Sondeos eléctricos verticales (SEV)	64
6.4.2	Método de tomografía eléctrica 2D (ERT-2D)	69
6.4.3	Método electromagnético en dominio del tiempo (TDEM o TEM).....	70
6.4.4	Configuraciones de campo	73
6.4.5	Equipos utilizados	75
6.4.6	Sensibilidad de los equipos.....	76
6.4.7	Ventajas y desventajas de los métodos propuestos	77
6.4.8	Resistividad de las rocas	78
VII.	GEOLOGÍA	79
7.1	Geología Regional	79
7.2	Geología Local	84
7.2.1	Unidades Sedimentarias	91
7.2.2	Unidades Volcanoclásticas e Ígneas	104
7.3	Marco Tectónico Regional y Local.....	117
7.3.1	Fallas Regionales.....	122
7.3.2	Fallas Locales.....	125
7.3.3	Alineamientos	129
VIII.	GEOFÍSICA	132
8.1	Sondeos eléctricos verticales (SEV).....	134
8.2	Tomografías eléctricas (ERT).....	136
8.3	Método electromagnético en dominio del tiempo (TDEM)	138
8.4	Discusión e integración de métodos geofísicos	141

IX.	HIDROGEOLOGÍA	154
9.1	Hidrogeología Regional	154
9.1.1	Acuífero Bagaces (Formación Bagaces)	154
9.1.2	Vulnerabilidad	155
9.2	MODELO HIDROGEOLÓGICO LOCAL	157
9.2.1	Inventario de pozos	157
9.2.2	Análisis hidrogeoquímico de pozos recopilados en los alrededores del área de estudio	168
9.2.3	Red de monitoreo	175
9.2.4	Aforos	183
9.2.5	Flujo del agua subterránea	187
9.2.6	Unidades Hidrogeológicas	190
9.2.7	Parámetros Hidráulicos de los Acuíferos	198
X.	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL BAJO LA PRESA	231
XI.	CONCLUSIONES	239
XII.	RECOMENDACIONES	245
XIII.	REFERENCIAS	246
XIV.	ANEXOS	263
14.1	Registro de las Perforaciones modificados de ICE (2018)	263
14.2	Perfiles geofísicos	276
14.3	Tabla de resultados del análisis de fraccionamiento de arenas, CIA-UCR. .	280
14.4	Gráficos Granulométricos con método del hidrómetro, Lanamme-UCR....	281

14.5 Gráficos de los ensayos Slug Test realizados en cada piezómetro de Río Piedras. 286

RESUMEN

El área de estudio comprende el sitio de ubicación de las obras de la Presa del Proyecto Embalse Río Piedras el cual forma parte de las obras que integran el Proyecto Paacume del Senara. Las investigaciones del diseño de la presa, realizadas por el ICE (2018) se encuentran anexas a los estudios de Factibilidad del Paacume. A partir de la información recopilada de dichas investigaciones y generada en el presente trabajo, se definieron cuatro unidades hidrogeológicas presentes, definidas como: acuífero “a” en la unidad volcanoclástica Rama de Nance, el acuífero “b” en la unidad sedimentaria superior Falconiana, el acuífero semiconfinado “c” en la unidad ígnea Agua Fría y el acuífero “d” en la unidad sedimentaria inferior Falconiana. De estas unidades hidrogeológicas el acuífero c y d, son los que presentan mayor importancia debido a que tienen piezómetros de monitoreo asociados, y corresponden a las unidades bajo las cuales se localiza la mayor parte de la fundación de la Presa del Embalse Río Piedras. El acuífero fracturado c, se localiza en la unidad geológica ígnea Agua Fría, dicha unidad corresponde macizo de fundación de la presa. Esta unidad hidrogeológica presenta espesores asociados de 3 a 9 m y una profundidad del techo del acuífero que varía entre la cota de 2,5 a 16 m.s.n.m. El grado de confinamiento hidráulico de tipo semiconfinado, el valor de K asociada a este acuífero corresponde a $5,27 \times 10^{-5}$ cm/s, obtenido a partir de los ensayos slug test con el cálculo de Hvorlev de $K = 1,79 \times 10^{-5}$ cm/s, y los valores de *Lugeon* $K = 8,75 \times 10^{-5}$ cm/s. La transmisividad asignada varía entre 0,1 a 0,4 m²/d. De acuerdo con la red de flujo, la recarga lateral de este acuífero proviene desde ambos márgenes, desde el oeste-noroeste en margen derecha con un gradiente hidráulico (i) de 0,02 y desde el oeste-noreste con un $i = 0,024$, para posteriormente converger hacia la parte baja entre el río Piedras y el canal Oeste y finalmente orientarse al sureste con un $i = 0,010$.

El acuífero confinado d, se localiza en los depósitos sedimentarios inferiores ubicado bajo la unidad geológica ígnea Agua Fría, presenta espesores entre los 10 a 80 m y una profundidad del techo del acuífero que varía entre la cota de 13 a -20 m.s.n.m. el valor de K asignado a esta unidad es de $1,76 \times 10^{-4}$ cm/s, obtenido a partir de los ensayos Slug test con el cálculo de Hvorlev de $K=3,58 \times 10^{-5}$, de los valores de *Lugeon* de $K=2,01 \times 10^{-4}$, los ensayos de carga constante con valores de $K=1,98 \times 10^{-4}$ y los análisis granulométricos de $K=6,69 \times 10^{-4}$ cm/s. Los valores de transmisividad para este acuífero son de 1,5 a 12,0 m²/d. De acuerdo con la red de flujo, este acuífero presenta una recarga lateral, desde ambas márgenes, en el noroeste en la margen derecha con un $i=8,5 \times 10^{-3}$ y el noreste en la margen izquierda con un $i=0,01$, para converger hacia la zona baja entre el río y el canal, y orientarse al sureste con un $i=0,01$. A partir de los valores de K, se determina que el acuífero d, presenta una mayor permeabilidad debido a las facies inconsolidadas que lo componen, algunas de las cuales tienden a localizarse hacia los contactos inferiores con la unidad ígnea Agua Fría, particularmente hacia la zona entre las fallas F4 y F5, donde las lavas fracturadas tienden a reducir significativamente el espesor y existe capas poco cementadas a través de las cuales puede generarse una mayor filtración de las aguas provenientes del embalse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en el sector de Río Piedras, cantón de Bagaces, distrito 1° de Bagaces. (Base cartográfica tomada de Malavassi, 2014).....	12
Figura 2. Límites políticos del cantón de Bagaces, y sus respectivos distritos (Tomado de base Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica [MIDEPLAN], 2007 En: Malavassi, 2014)	13
Figura 3. Mapa de elevación del cantón de Bagaces (Tomado y modificado de Malavassi, 2014)	14
Figura 4. Mapa climatológico del cantón de Bagaces (Tomado y modificado de base IMN, ICE y Comité Nacional de Hidrología y Meteorología [CNHM], 2002, en Malavassi, 2014)	15
Figura 5. Mapa de precipitaciones promedio anual para el cantón de Bagaces. (Tomado y modificado de base IMN, 2010 en Malavassi, 2014)	16
Figura 6. Mapa de temperaturas media anual para el cantón de Bagaces. (Tomado y modificado de base IMN, 2010 en Malavassi, 2014).....	17
Figura 7. Mapa Ecológico de zonas de vida según la clasificación Holdridge para el cantón de Bagaces (Tomado y modificado de base Malavassi, 2014)	18
Figura 8. Mapa de subcuencas que abarcan el cantón de Bagaces (Tomado y modificado de Malavassi, 2014)	19
Figura 9. Localización de los pozos de SENARA en relación con el área de estudio y a la escala de mapeo 1:3000.	27
Figura 10. Distribución de los 7 perfiles geofísicos realizados por el ICE (2016a), y las 11 perforaciones a las que se les realizarían los ensayos <i>slug test</i>	29
Figura 11. Esquema de análisis para la aplicación de los ensayos: textural y de carga constante, a partir de la cantidad y las características de las muestras de los núcleos recolectadas.....	30

Figura 12. Gráfico de variación entre la porosidad efectiva y la granulometría de materiales inconsolidados (Johnson 1967, Tomado de Sánchez, 2017).	41
Figura 13. Esquema de ensayo de <i>Lugeon</i> (Tomado de Quiñones-Rozo, 2010)	48
Figura 14. Tipos de flujos interpretados por los ensayos de <i>Lugeon</i> (Tomado de Abanto, 2018).	49
Figura 15. a) Geometría y parámetros necesarios de piezómetro para utilizar el método Hvorslev, b) Obtención del valor T_0 , a partir del 63% de recuperación o el 0,37. (Tomado y modificado de Freeze & Cherry, 1979)	59
Figura 16. Esquema de permeámetro de carga constante. (Tomado de Angelone et al. 2006)	60
Figura 17. Gráfico de Shepherd, en el que se relaciona la conductividad hidráulica (K) y el diámetro promedio del grano en mm (Tomado de Fetter, 2014).....	63
Figura 18. Distintas configuraciones de electrodos corriente y voltaje para los diferentes arreglos geométricos (Tomado y modificado de Loke, et al., 2013)	66
Figura 19. Distribución volumétrica de las curvas equipotenciales dentro de un perfil (Tomado de Auge, 2008).	69
Figura 20. Distribución de las curvas equipotenciales a lo largo de un perfil utilizando un cable multieléctrodo con un arreglo dipolo-dipolo para un perfil tomográfico en 2D (Tomado y Modificado de IGC, 2011)	70
Figura 21. Representación esquemática del comportamiento de la Tierra como un circuito eléctrico Transmisor (Tx), Receptor (Rx), Separación entre los equipos (s), campo primario (H_p), Flujo campo primario (1), flujo del campo secundario (2), Resistencia eléctrica (RL), Inductancia mutua (M), dirección del flujo (z). (Tomado de Serralde, 2011).	72
Figura 22. Esquema de disposición de un SEV con la configuración Schlumberger (Tomado y modificado de Todd, 1959).....	73
Figura 23. Esquema de la configuración dipolo-dipolo para la tomografía eléctrica.....	74

Figura 24. Esquema de la configuración TDEM (Tomado y modificado de TODA Corp, 2016).....	75
Figura 25. Sección del mapa geológico de Costa Rica 1: 400.000, correspondiente a el cantón de Bagaces, (Tomado de Denyer & Alvarado, 2007).....	79
Figura 26. Sección del mapa geológico de la Hoja Tempisque 1:50.000 de Denyer et al. (2014), en amarillo se muestra la localización de la zona de estudio. (Tomado y Modificado de Denyer et al., 2014).....	80
Figura 27. Sección del mapa geológico del Sector Noreste de Lomas de Bambudal. (Tomado y modificado de Barrantes, 2018).....	83
Figura 28. Sección del mapa geológico de la Hoja Tempisque 1:50.000. (Tomado y modificado de Denyer et al. 2019).....	84
Figura 29. Columna estratigráfica local del Sitio de Presa Río Piedras, (Tomado y modificada de Barrantes, 2018).....	86
Figura 30. Perfil Geológico A-A' y Mapa Geológico (Tomado y modificado de Barrantes, 2018; ICE, 2018).....	89
Figura 31. Perfil Geológico B-B' y Mapa Geológico (Tomado y modificado de Barrantes, 2018; ICE, 2018).....	90
Figura 32. A) Corte en Tajo Cortes, entrada a la finca Poró, contacto neto entre las unidades Falconiana (sedimentaria profunda) y Rama de Nance (volcanoclástica). B) Detalle de las litologías asociadas a la unidad Sedimentaria Falconiana, de areniscas gruesas a guijarros bien seleccionados y areniscas finas.	91
Figura 33. A) Afloramiento de la unidad sedimentaria Falconiana, en finca el Poró camino a la perforación 3 y 7. B) Detalle de la muestra de areniscas medias de color gris y un nivel de guijarros de pómez.....	93
Figura 34. Muestra de lutita negra de 15 cm de espesor con posible fracturación y alteración hidrotermal, fracturas rellenas de minerales silíceos. Perforación 3: tramo 43,85 a 44,0 m.	94

Figura 35. Área mapeada de la unidad Falconiana con la ubicación de los buzamientos recopilados y la rosa de dirección asociada a dichos los buzamientos. Los números en los círculos corresponden a lo buzamientos más cercanos numerados en la tabla 11 (Tomado y modificado de Barrantes, 2018).....	96
Figura 36. Columna estratigráfica detallada de la unidad sedimentaria Falconiana, en donde se señalan las capas con mayor potencial hidrogeológico, de acuerdo con la litología descrita (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)	97
Figura 37. A) Afloramiento del contacto entre las unidades volcanoclástica Rama de Nance (inferior) y sedimentaria Biscoyol (superior). B) Capa de areniscas medias masivas bien seleccionadas C) Laminación cruzada hacia el techo del afloramiento.	99
Figura 38. Área mapeada de la unidad sedimentaria Falconiana y el paleosuelo (Tomado y modificado de Barrantes, 2018).....	100
Figura 39. Contacto neto e irregular entre la capa de paleosuelo y la unidad volcanoclástica Rama de Nance.....	101
Figura 40. Área mapeada de los depósitos recientes (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)	102
Figura 41. Depósitos recientes sobre margen derecha de río Piedras y localizados a lo largo de una quebrada estacional.	103
Figura 42. Área mapeada de la unidad volcanoclástica Rama de Nance (Tomado y modificado de Barrantes, 2018).	104
Figura 43. A) Afloramiento de la unidad Rama de Nance sobre el camino hacia el embalse río Piedras, se muestra el tamaños centimétricos de las scoreas B) Bloque con detalle de las pómez de tamaños centimétricos C) Afloramiento meteorizados de la unidad Rama de Nance, con coloración café oscuro.	106
Figura 44. Área mapeada de la unidad volcanoclástica Pan de Azúcar (Tomado y modificado de Barrantes, 2018).	108

Figura 45. A) Afloramiento blocoso ubicado en la parte alta de las lomas en el sector de la margen derecha del Embalse de río Piedras, corresponden a bloques métricos de ignimbritas muy soldadas con fiammes alargados B) Contacto inferior de tipo neto y ondulante entre la unidad Pan de Azúcar y la unidad Rama de Nance.	110
Figura 46. Área mapeada de la unidad ígnea Agua Fría (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)	112
Figura 47. A) Afloramiento de lavas andesíticas densamente lajeadas, B) bloques masivos afaníticos C) con estructuras de bandeamiento rojizo.	114
Figura 48. A) Lavas con textura vesicular densa en perforación 3, tramo de 27 a 30 m de profundidad, B) detalle de relleno de zeolitas en forma botroidal y C) vesículas con patinas de minerales secundarios color verde.	115
Figura 49. A) Afloramiento de brecha peperítica sobre la Quebrada Biscoyol, B) bloque sano de andesitita tamaño 10x14 cm, C) Brecha peperítica basal en perforación 3, tramo de 43 a 44 m de profundidad, se observa un borde de alteración café claro alrededor del bloque que flota en sedimentos de areniscas tobáceas finas.	116
Figura 50. A) Mapa tectónico simplificado de Costa Rica, en el cuadro negro la zona de los bloques tectónicos propuestos por Denyer et al. (2019), y las principales estructuras tectónicas regionales como lo son: Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), Escarpe de Hess (EH), Fallas del Arco Volcánico (FAV), Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), (Tomado y modificado de Arroyo et al. 2017). B) Mapa de bloques tectónicos propuestos por Denyer et al. (2019), en donde se muestra la ubicación del área de estudio cerca de la Falla Bagaces Este, y entre los límites de los bloques tectónicos V y VIII (Tomado y modificado de Denyer et al. 2019).	119
Figura 51. Sistemas de fallas regionales y locales que afectan el sitio de estudio, se muestra el detalle de la referencia bibliográfica recopilatoria de las estructuras tectónicas presentes.	121

Figura 52. Mapa de estructuras tectónicas dentro del área de mapeo y en el sitio de estudio.	126
Figura 53. A) Perforación 5 tramo 61,50 a 67,10 m, zona de falla color verde intenso asociada a la Falla F5, B) detalle de planos con espejos de falla transversal al núcleo.	128
Figura 54. Estructuras tectónicas y alineamientos propuestos en el sitio de estudio y en el área de mapeo, a partir de las fotos históricas n°798 y 799 (IGN, 1952).....	130
Figura 55. Calibración del sondeo SEV P1.0+600 con la perforación 3, ubicada en el estacionamiento 0+600 del perfil geofísico 1.....	135
Figura 56. Líneas agrupadas con los datos de resistividad (puntos rojos) que integran el perfil 1.....	137
Figura 57. Sondeos de TDEM que conforman los perfiles 11 y 12. A) Los 5 sondeos TDEM con tendencias a reducir la resistividad en profundidad B) Procesamiento con el software WinGlink e interpretación del sondeo TDEM_1 con las curvas sintética (línea rosada) y manual (línea verde).....	140
Figura 58. Perfil Geofísico 1 A) realizado con el método SEV y B) realizado con el método ERT.	143
Figura 59. Comparación de perfiles geofísicos 2 y 1 realizados con el método SEV.....	145
Figura 60. Perfil Geofísico 4. A) realizado con el método SEV y B) realizado con el método ERT.	148
Figura 61. Perfil Geofísico 7 A) realizado con el método SEV y B) realizado con el método ERT.	152
Figura 62. Perfiles 11 y 12 realizados con el método de TDEM.	153
Figura 63. Mapa de vulnerabilidad para los acuíferos de Bagaces y Liberia. Tomado y modificado de SENARA (2000).....	156
Figura 64. Ubicación y características de las perforaciones más cercanas al área de estudio.	157

Figura 65. Gráfico de distribución de los pozos con relación al uso del agua y caudal reportado en los 17 pozos de Senara.	158
Figura 66. Distribución y tipo de litología asociada a cada una de las rejillas de las perforaciones en el área de estudio. En el cuadro blanco se indica el número de perforación en paréntesis [1] y la cantidad de piezómetros (#Pz) así como los diámetros de las tuberías en pulgadas 1", ½", ¾" para cada piezómetro por perforación.	167
Figura 67. Diagramas de Stiff y distribución de los 7 pozos con análisis químico de aguas en las hojas geológicas Tempisque y Cañas 1:50.000 (Tomado y Modificado de Denyer et. al 2019).	169
Figura 68. Ubicación de los pozos con análisis químicos y fuentes termales en relación con los elementos estructurales presentes en la zona.	171
Figura 69. Diagrama ternario de la distribución de las concentraciones de aniones mayores para los análisis químicos de aguas en los 7 pozos recopilados.....	173
Figura 70. Medición de niveles estáticos en los piezómetros dentro del área de estudio.	175
Figura 71. Ubicación de los <i>diver</i> en los piezómetros localizados hacia ambas márgenes del río en la zona baja entre el canal Oeste y el Río Piedras.....	177
Figura 72. Gráfico de niveles y temperatura obtenidos con <i>diver</i> para los piezómetros de margen derecha 12 y 8, sección media entre canal y el río 6.1 y 2.1, y la margen izquierda 7 y 3.1.....	179
Figura 73. Comparación de niveles para los diferentes piezómetros monitoreados ..	180
Figura 74. Ubicación de los foros realizados en dos secciones del río Piedras.	184
Figura 75. Perfiles de flujo de los dos aforos realizados en el río Piedras.....	186
Figura 76. Red de flujo para el acuífero en lavas fracturadas.	188
Figura 77. Red de flujo para el acuífero en el sedimentario inferior.....	190

Figura 78. Modelo Hidrogeológico conceptual del área de estudio. A) Equipotenciales en acuífero en lavas fracturadas, acuífero c. B) Equipotenciales en acuífero en sedimentario inferior, acuífero d.	197
Figura 79. Clasificación textural de las muestras de núcleos obtenidas de los registros de perforación de los pozos del área de estudio (Clasificación USDA)	201
Figura 80. Gráfico circular de la distribución porcentual de las partículas en las catorce muestras.	203
Figura 81. Gráficos radiales de la distribución porcentual para la clasificación de la fracción de arenas en las nueve muestras analizadas, las muestras 6A y 12 corresponden al acuífero superior b, las restantes muestras al acuífero inferior d.....	205
Figura 82. Clasificación USCS simplificada (Tomado de Santamaria & Narsilio, 2017) .	207
Figura 83. Curvas granulométricas de las nueve muestras ensayadas, la 6A y 12 corresponden al acuífero b, las restantes al acuífero inferior b.	207
Figura 84. Gráfico de valores de K, con las cuatro ecuaciones asociadas al tamaño del grano D_{10} , D_{20} y D_{50} , para las muestras asociadas al acuífero en el sedimentario inferior (Acuífero d).	212
Figura 85. Distribución de las conductividades hidráulicas obtenidas con los ensayos de <i>Slug test</i> para A) el acuífero c fracturado y B) el acuífero d sedimentario inferior.....	220
Figura 86. Gráfico de valores de unidades de <i>Lugeon</i> (UL) y presiones efectivas asociadas a el acuífero en lavas fracturadas (Acuífero c).	223
Figura 87. Gráfico de valores de unidades de <i>Lugeon</i> (UL) y presiones efectivas asociadas a el acuífero sedimentario inferior (Acuífero d).	224
Figura 88. Distribución de las conductividades hidráulicas obtenidas con los ensayos de <i>Lugeon</i> para A) el acuífero c fracturado y B) el acuífero d sedimentario inferior.....	226
Figura 89. Triángulo que relaciona la clasificación textural de sedimentos inconsolidados y la porosidad efectiva (n_e) (Tomado y modificado de Fetter, 2014).....	228

Figura 90. Esquema de la red de flujo que atraviesa por debajo de la presa y tiende a deformarse de acuerdo con las variaciones de las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (Tomado y modificado de Freeze & Cheery, 1979)..... 232

Figura 91. Modelo hidrogeológico conceptual bajo la Presa del Embalse Río Piedras. 234

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Muestra las metas, actividades e indicadores asociados a cada uno de los objetivos planteados.....	5
Tabla 2. Cuantificación de datos ICE (2018), generados para el Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras.	21
Tabla 3. Cantidad de ensayos a realizarse en cada campaña propuesta.	22
Tabla 4. Resumen del análisis documental a recopilar de acuerdo con las tres variables mencionadas.....	25
Tabla 5. Distribución de los piezómetros en las 11 perforaciones ubicadas en el Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras.	28
Tabla 6. Valores de Almacenamiento para los diferentes acuíferos (Tomado de Sánchez, 2017).	45
Tabla 7. Comparación de métodos utilizados en los ensayos tipo <i>slug test</i> para la obtención de la conductividad hidráulica (K).	52
Tabla 8. Valores del coeficiente “C” utilizado en el método de Hanzen (tomado de Fetter, 2014)	62
Tabla 9. Comparación de las ventajas y desventajas de los métodos empleados.....	77
Tabla 10. Rangos de resistividad para diferentes tipos de materiales (Astier, 1975).	78
Tabla 11. Recopilación de las direcciones de buzamiento de la unidad sedimentaria Falconiana	95
Tabla 12. Perfiles de la geofísica realizada por el ICE (2018) con los métodos asociados, los equipos utilizados y las coordenadas de inicio y fin.	132
Tabla 13. Rangos de resistividad asociados a las diferentes unidades litológicas propuestas.	133
Tabla 14. Parámetros de los perfiles geofísicos realizados con el método SEV	136
Tabla 15. Parámetros de los perfiles geofísicos realizados con el método ERT	138

Tabla 16. Parámetros de los perfiles geofísicos realizados con el método TDEM	139
Tabla 17. Resumen de las 6 perforaciones con descripción litológica cercanas al sitio de estudio, recopiladas de la base de datos de Senara.....	161
Tabla 18. Parámetros hidráulicos recopilados para las perforaciones TE-57 y TE-61...	164
Tabla 19. Perforaciones reportadas por el ICE (2018) para el proyecto Paacume.....	165
Tabla 20. Datos físicos-químicos de las aguas de las perforaciones recopiladas en la base de datos de Senara 1976-1985	168
Tabla 21. Clasificación de las aguas subterráneas según Schoeller (1962) para los valores de temperatura reportados.....	181
Tabla 22. Clasificación de Schoeller (1962) para las aguas en el área de estudio a partir de los datos de temperatura.	182
Tabla 23. Parámetros de los aforos realizados en dos secciones del río Piedras.....	185
Tabla 24. Resumen de las principales características hidrogeológicas de los acuíferos descritos en el área de estudio.....	196
Tabla 25. Resumen de los ensayos realizado en muestras de núcleos y en los piezómetros del área de estudio, para la estimación de la conductividad hidráulica (K).....	199
Tabla 26. Cantidad de muestras analizadas y los diferentes tipos de ensayos realizados para el Acuífero d en el Sedimentario inferior.	200
Tabla 27. Distribución de los porcentajes granulométricos asociados las muestras ensayadas.....	202
Tabla 28. Tabla de clasificación de suelos utilizada en la CIA (Basada en la clasificación de la USDA, modificado para el límite inferior de las arenas de 0,05 a 0,063)	204
Tabla 29. Coeficientes de uniformidad (Cu), coeficiente de curvatura (Cc) y valores del tamaño del grano asociados a la cantidad porcentual de muestra para el 10%, 20%, 30%, 50% y 60%.....	209
Tabla 30. Ecuaciones que relacionan los tamaños de los granos con la conductividad hidráulica (K)	210

Tabla 31. Valores de K para las relaciones de tamaño de grano D10, D20 y D50, según los diferentes autores.	211
Tabla 32. Resultados de los valores de K, para las pruebas de carga constante.....	215
Tabla 33. Valores de K de Hvorslev para los acuíferos c y d, rejilla mixta.....	219
Tabla 34. Condiciones del macizo rocoso asociada a los diferentes valores de <i>Lugeon</i> (Quiñones-Rozo, 2010)	221
Tabla 35. Valores de <i>Lugeon</i> asociados al acuífero sedimentario superior	222
Tabla 36. Valores de K de <i>Lugeon</i> para los acuíferos c y d.	225
Tabla 37. Resumen de los valores de K por cada ensayo realizado y para cada acuífero en estudio.	227
Tabla 38. Valores de la porosidad efectiva determinada a partir de los ensayos texturales de las muestras franco-arenosas perteneciente al acuífero b y d, con el diagrama ternario de Johnson (1967).....	229
Tabla 39. Valores de transmisividad (T) asociada a los acuíferos c y d.	230
Tabla 40. Esquema de las principales fuerzas que actúan en el diseño de las Presas (Tomado de Freeze & Cherry, 1979; Segura, et al. 1998)	231
Tabla 41. Esquema de aplicación general de varias metodologías y las consideraciones asociadas de acuerdo con el tipo de acuífero.	244

LISTA DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ARESEP: Autoridad Reguladora de Servicios Públicos

ARCOSA: Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobicí-Sandillal

BCIE: Banco Centroamericano de Integración Económica

CAN: Comisión de Alto Nivel

CRTM05: Costa Rica Transversal Mercator 2005

CODEINTE: Comisión Coordinadora para el Desarrollo Integral de la Cuenca Baja del río Tempisque

DRAT-SENARA: Dirección de Riego Arenal Tempisque- Servicio Nacional de Aguas Subterránea, Riego y Avenamiento

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad

Inder: Instituto de Desarrollo Rural

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

MIDEPLAN: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica

PAACUME: Proyecto Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del río Tempisque y Comunidades Costeras.

PAE I: Programa de Ajuste Estructural IPAG: Programa Agua para Guanacaste

PIAAG: Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste

SENARA: Servicio Nacional de Agua Subterránea, Riego y Avenamiento

SENAS: Servicio Nacional de Aguas Subterráneas

SETECOOP: Servicios Técnicos de Cooperación

SETENA: Secretaría Técnica Ambiental

SEV: Sondeo Eléctrico Vertical

SNE: Servicio Nacional de Electricidad

TDEM: *Time Domain Electromagnetic Method*



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Maureen Arlene Bonilla Hidalgo, con cédula de identidad 111620449, en mi condición de autor del TFG titulado Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras, Bagaces, Guanacaste.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

I. INTRODUCCIÓN

En 1974 se creó la Comisión Coordinadora para el Desarrollo Integral de la Cuenca Baja del río Tempisque (CODEINTE), quien definió los objetivos centrales del Proyecto de Riego y ordenó la elaboración del estudio Plan Maestro que finalizó en 1978. Las gestiones de CODEINTE condujeron por Decreto 10148 del 15 de junio de 1979 a la creación del Departamento de Riego y Avenamiento órgano adscrito al Servicio Nacional de Electricidad (SNE, actual ARESEP) para administrar el Distrito de Riego (ICE, 2018)

Para la década de los años 80 con la implementación del primer Programa de ajuste estructural (PAE I) impuesto por el Fondo Monetario Internacional y el Banco Mundial para devengar prestamos de Ajuste Estructural, se realizó una reestructuración del aparato productivo nacional, particularmente en relación a la diversificación del sistema agrario, por lo que se elaboró un Proyecto de Riego en la Cuenca Baja del Tempisque – Plan Maestro por parte del consorcio BEL Ingeniería & Bookman-Edmonston Engineering Inc. en 1984. (ICE, 2018).

Dicho Plan incluía el desarrollo agrario a lo largo de la cuenca baja del río Tempisque y contemplaba la construcción de obras de riego como canales (canal Sur, canal Oeste), presas para el almacenamiento de embalses estacionarios en el río Tempisque, río Sardinal, río Brasilito y río Piedras; y la utilización de las aguas de los embalses Arenal y Corobicí para dicho fin.

Para la ejecución y planificación de estas obras de riego se modificaron las competencias del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas (SENAS) y se instauró de acuerdo con el Decreto 6877 del año 1983, el Servicio Nacional de Aguas Riego y Avenamiento (SENARA, 2008).

El SENARA ha desarrollado en al menos IV etapas las obras de riego propuestas en el plan maestro, y establecieron distritos de riego en las cuencas de interés agrario, en el caso

del sector de la cuenca Baja del río Tempisque se estableció el Distrito de Riego Arenal-Tempisque, en 1984 mediante el Decreto Ejecutivo N°15321-MAG con potestad para administrar y controlar las aguas generadas en el complejo hidroeléctrico ARCOSA (Arenal - Corobicí - Sandillal); en función de su aprovechamiento para irrigación en las partes bajas de los cantones Cañas, Bagaces, Abangares, Liberia y Carrillo (ICE, 2018).

A medida que se avanzaba con el desarrollo de las etapas constructivas del Plan Maestro de Riego, surge la necesidad de incrementar el caudal para ampliar la capacidad de los canales y los volúmenes de agua y así alcanzar el sector oeste de la cuenca baja del río Tempisque, de ahí el interés de potenciar el Embalse Río Piedras el cual se localiza en una sección estratégica sobre los tramos principales del canal del Oeste y presenta condiciones topográficas que permiten incrementar su capacidad de almacenamiento (ICE, 2018).

Sin embargo, no fue hasta el 2006 que el proyecto Río Piedras denominado “Presa Embalse Regulatorio del Canal del Oeste del Distrito de Riego Arenal – Tempisque” es retomado a partir en el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010, y surgió como el “Programa Agua para Guanacaste” (PAG) con el fin de obtener el máximo aprovechamiento de las aguas provenientes del Embalse Arenal y del Distrito de Riego Arenal-Tempisque que administra el SENARA, y dicho proyecto fue declarado interés público según Decreto 34678 (La Gaceta N°156, 2008). El objeto principal del programa es subsanar la necesidad de las limitaciones hídricas naturales en la zona de Guanacaste, como consecuencia del cambio climático, que modifican el patrón de las lluvias y alteran por consiguiente la recarga de los acuíferos.

Nuevamente en el 2014 que se retoma el “Proyecto Agua para Guanacaste” y se redefine como un Programa integral de abastecimiento de agua para Guanacaste-Pacífico Norte (PIAAG) contemplado como una acción estratégica de desarrollo y ejecución dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018, estableciendo en el 2014 una Comisión de Alto

Nivel (CAN) según el Decreto 38665 (La Gaceta N° 218, 2014) con el fin de coordinar y apoyar la ejecución del PIAAG; posteriormente en el 2015 según el Decreto N° 39145 (La Gaceta N°184, 2015) es declarado de interés público y conveniencia nacional, en el cual se retoman los proyectos mencionados en el Decreto 34678 como los son: el Proyecto de abastecimiento de agua potable para la margen occidental del Río Tempisque a partir del sistema Arenal, Proyecto Presa-Embalse La Cueva y Proyecto Embalse Piedras (ICE, 2018).

En el 2010, el consorcio SETECOOP-SOCOIN elaboró el Estudio de Factibilidad, Diseño Preliminar y Documentos de Licitación del proyecto Embalse Río Piedras, el diseño propuesto se planteaba como un embalse multipropósito: riego del distrito, agua potable (1,8 m³/s), riego de zonas costeras y aprovechamiento hidroeléctrico.

A partir de este último Proyecto Embalse Río Piedras, el SENARA adjudica la fase de factibilidad y diseño a la empresa Setecoop R.L., mientras que la fase constructiva se maneja a partir del 2016 bajo el esquema de convenio institucional de prestación de servicios con el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Actualmente el ICE desarrolla los insumos técnicos necesarios para la construcción y ampliación de los canales de riego administrados por el Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT-SENARA) específicamente los canales del Oeste y Sur, cuyas aguas provienen de los embalses Arenal-Corobicí, y Sandillal que forman parte de los proyectos homónimos del ICE.

En esta etapa de factibilidad y construcción del embalse, se solicitaron una serie de estudios técnicos entre los cuales se incorporan los trabajos geofísicos, necesarios para caracterizar geotécnicamente el medio geológico, y proveer los insumos necesarios para el diseño de las obras. Como adicional a los trabajos solicitados, se emplea varios métodos eléctricos y electromagnéticos, que permiten adquirir conocimientos en

relación con la respuesta de los métodos geofísicos con el medio hidrogeológico sobre el que se aplican y a partir del cual se desarrolla el presente trabajo.

1.1 Objetivo General

Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual a partir del uso de métodos directos (*slug test*, ensayos de *Lugeon*, descripción de núcleos, medición niveles estáticos) e indirectos (datos geofísicos, ensayos de carga constante, ensayos granulométricos y levantamiento geológico), para determinar las posibles implicaciones del agua subterránea en el diseño y construcción de la obra del Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras.

1.2 Objetivo Específicos

1. Determinar parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y transmisividad) en los diferentes piezómetros realizados por el ICE, mediante la aplicación de métodos directos tales como: ensayos de *slug test* y pruebas de tipo *Lugeon*, y métodos indirectos como: ensayos de carga constante y ensayos granulométricos, con el fin caracterizar las diferentes unidades hidrogeológicas.
2. Establecer la geometría de las unidades hidrogeológicas a partir de la información proveniente en la aplicación de métodos geofísicos, descripciones litológicas y medición de niveles estáticos, para el entendimiento de las condiciones locales del flujo subterráneo

En la tabla 1, se presentan las actividades necesarias a realizar los objetivos planteados.

Tabla 1. Muestra las metas, actividades e indicadores asociados a cada uno de los objetivos planteados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	METAS	ACTIVIDADES	INDICADORES
<p>1. Determinar parámetros hidráulicos en los diferentes piezómetros realizados por el ICE, mediante la aplicación de métodos directos o "in situ" tales como ensayos de <i>slug test</i>, datos de <i>Lugeon</i> y ensayos granulométricos, con el fin caracterizar las diferentes unidades hidrogeológicas.</p>	<p>Determinación de la conductividad hidráulica, en los 18 piezómetros de interés.</p> <p>Obtención de valores de conductividad hidráulica a partir de muestras de los núcleos de perforación.</p> <p>Adquisición y análisis de los datos de <i>Lugeon</i>, realizados en cada perforación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Giras de campo para realizar los ensayos <i>slug test</i> - Verificación de los datos de <i>slug test</i> mediante el análisis con el método de Hvorslev - Repetición de lecturas de <i>slug test</i> en caso de valores inconsistentes - Recolección de muestras en las cajas de perforación - Ensayos granulométricos en el laboratorio - Solicitud de datos de las pruebas de <i>Lugeon</i>, realizadas en cada perforación al ICE. 	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de conductividad hidráulica en cada uno de los 18 piezómetros. - Datos de granulometrías y conductividad hidráulica de 19 muestras recuperadas. - Valores de permeabilidad de las pruebas de <i>Lugeon</i> en las 11 perforaciones.
<p>2. Establecer la geometría de las unidades hidrogeológicas a partir de la información proveniente en la aplicación de métodos geofísicos, descripciones litológicas y medición de niveles estáticos, para el entendimiento de las condiciones locales del flujo subterráneo.</p>	<p>Elaboración de mapa geológico con la información bibliográfica del sitio y su respectiva confirmación en campo.</p> <p>Integración de la información de las resistividades eléctricas obtenidas con la geofísica, descripción litológica de los núcleos de perforación y los datos de niveles estáticos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Recopilación bibliográfica de los trabajos realizados en el sitio - Giras de campo para verificación de la geología - Solicitar la información respectiva al SENARA - Giras al campo para la medición de niveles estáticos actualizados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa geológico 1:3000 - Mapa de equipotenciales y líneas de flujo. - Perfiles hidrogeológicos 2D.

1.3 Hipótesis

“En la zona de estudio existen al menos dos unidades hidrogeológicas diferenciables en depósitos predominantemente sedimentarios. Una unidad superior asociada a un acuífero semi-confinado a libre y una unidad inferior asociada a un acuífero confinado”

1.4 Problema

El proyecto Embalse Río Piedras ubicado en el cantón de Bagaces, provincia de Guanacaste, es uno de varios proyectos a cargo del Servicio Nacional de Aguas Subterránea Riego y Avenamiento (SENARA), que han sido catalogados de interés nacional, pues su construcción implica un incremento en el desarrollo agrario, así como abastecimiento de agua de las comunidades localizadas hacia el sector este y oeste del Río Tempisque.

El proyecto Embalse Río Piedras consiste en ampliar el volumen existente del embalse actual, a partir del diseño y construcción de las obras de la Presa, para lo cual en el 2015 el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), inicio una serie de investigaciones técnicas que incluían: perforaciones, geofísica y levantamientos geológicos del sitio, con el fin de generar un diseño técnicamente sustentable del proyecto.

La presente investigación, plantea la integración de la información generada por el ICE, adicionándole ensayos “in situ” para la obtención de los parámetros hidráulicos que permitan elaborar un modelo hidrogeológico conceptual del sitio de Presa de Río Piedras.

La importancia de establecer un modelo hidrogeológico que defina cuántas unidades hidrogeológicas existentes por debajo del sitio de Presa, así como las características hidráulicas que las definen, permite generar información significativa a considerarse tanto en el diseño como en la construcción de la Presa de Río Piedras.

Ante este contexto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas presentes en el sitio de Presa del Proyecto Río Piedras?

1.5 Justificación

González de Vallejo et al. (2002), menciona que los mayores accidentes en presas se han relacionado por el fallo en las cimentaciones en las mismas, dos casos particulares en las que el agua subterránea incidió en situaciones que generaron fallos importantes de las estructuras, corresponden a la presa de Vajont en Italia (1963), y la presa de Teton en Estado Unidos (1975). En Vajont, la presencia de un acuífero de alta carga hidráulica ubicado por debajo del nivel de ruptura de una zona de deslizamiento, produjo la formación de una mega olas (*seiche*) generada en el embalse, mientras que en Teton, la presencia de una capa muy permeable y fracturada ubicada bajo la cimentación de la presa, generó el colapso de la estructura ya construida producto de la socavación de la base; en ambos sitio hubo víctimas mortales en los pueblos ubicados aguas abajo de las obras, en cantidades desde decenas a miles.

En nuestro país existieron algunas situaciones evidenciadas en los análisis de los estudios detallados para el diseño de las presas, particularmente en relación con el tratamiento de las fundaciones debido a los altos valores de permeabilidad de los materiales de fundación, tal es el caso de la Presa Santa Rosa se realizaron galerías de drenajes, pozos de alivio y una pantalla de impermeabilización para reducir la subpresión en materiales de fundación con permeabilidades reportadas de $6,00E-04$ m/s; para la presa San Miguel se realizó una cortina de impermeabilización para homologar la permeabilidad de la roca de fundación y en la caso de la presa Cachí (Segura et. al, 1998).

A partir de estos precedentes D'Souza (2006), explica que en 1997 el Banco Mundial formó una Comisión Mundial de Presas por sus siglas en inglés WCD, la cual vela por que las inversiones realizadas en los países, sean factibles analizándolas a partir de tres ejes fundamentales, los aspectos ambientales, sociales y económicos, a partir de los cuales los inversionistas deciden asumir el empréstito inicial que involucra el presupuesto cedido para la construcción de obras de este tipo, particularmente cuando se trata de obras de gran tamaño.

Actualmente, el Proyecto del Embalse Río Piedras forma parte de una de las obras que componen el Proyecto Sistema de Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME) desarrollado por el SENARA, presenta una inversión cercana a los \$425 millones, y es financiados por el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE). El proyecto PAACUME involucra las obras de la presa (Embalse Río Piedras) con una minicentral hidroeléctrica localizada en la base de la esta, cual presentaría una generación anual estimada de entre 36 a 44 GWh, una conducción de 55 km de canal denominado Canal Oeste, subdividido en tres tramos I, II y III, los dos primeros actualmente existen y se les deben realizar mantenimiento, el tercero es completamente nuevo e involucra una construcción de 35 km de canal, y finalmente una red de distribución de canales secundarios hacia la margen derecha del río Tempisque, distribuidos entre los cantones de Carrillo, Santa Cruz y Nicoya, los cuales presenta una longitud total de 300 km (Portal web Senara, 21/04/2022).

Las obras de la Presa para el Embalse de Río Piedras involucran un diseño propuesto por el ICE, a partir del cual se definió una altura de máxima de la cresta de la presa de 40 m y un volumen de agua embalsada de 71 Hm³ (ICE, 2018), por su preponderancia y declaratoria de interés nacional (Senara, 2008).

En el año 2021 la Secretaría Técnica Ambiental (SETENA) mediante la resolución n° 1226-2021-SETENA, da la viabilidad ambiental al proyecto PAACUME, una vez que la Sala

Constitucional de la Corte Suprema de Justicia (Sala IV), declara sin inconstitucionalidad la Ley 9610 que permite modificar los límites de la Reserva Lomas de Barbudal para el proyecto PAACUME, mediante las resoluciones n° 2020-0013836 y 2020-021308. (Resolución No 1226-2021-SETENA, 2021)

El 4 de abril del presente año, el BCIE, el Ministerio de Hacienda y Senara, firmaron el contrato del empréstito por los \$425 millones, para financiar el proyecto PAACUME e iniciar la construcción de este (Comunicado de Prensa, 04 abril 2022).

A partir de la información técnica generada por el ICE en el 2016, se plantea en esta investigación adicionar a los estudios realizados, una serie de ensayos “in situ” como lo son: medición de niveles estáticos, los *slugs test*, pruebas granulométricas y de permeabilidad, para plantear un modelo hidrogeológico conceptual del sitio de Presa de Río Piedras.

El aporte del modelo hidrogeológico conceptual del presente estudio, brinda información significativa en relación a la extensión y comportamiento de las unidades hidrogeológicas existentes por debajo de las obras de la presa, las cuales a mediano o largo plazo, pueden comprometer la estabilidad de las cimentaciones, y para las cuales se deben generar diseños adicionales en las cimentaciones (cortinas de inyección y profundidad de la cimentación) así como en el emplazamiento de estructuras auxiliares como aliviaderos, desagües de fondo, galerías de desvío, y drenajes (González de Vallejo et al. 2002), las cuales posiblemente no fueron contempladas en el diseño original, y su implementación tardía, generan un costo adicional al presupuesto contemplado en la construcción del proyecto.

El estudio propuesto genera a nivel académico un aporte significativo de integración de una cantidad importante de metodologías aplicadas a una misma área, que incluye métodos directos como: *slug test*, ensayos de *Lugeon*, mediciones de niveles estáticos, análisis granulométricos, ensayos de permeabilidad, y descripción de núcleos de

perforación; y métodos indirectos tales como: tomografía eléctrica, TDEM, perfiles de SEV, y levantamiento geológico de campo, aplicados en el desarrollo de un modelo hidrogeológicos conceptual y con interés hacia una obra ingenieril preponderante como lo es una Presa.

1.6 Alcances y limitaciones

El alcance del proyecto de investigación consiste realizar un estudio especializado que demuestre la necesidad de realizar modelos hidrogeológicos en la fase de pre-inversión, en Proyectos asociados a la construcción de presas, permitiendo que los modelos hidrogeológicos sean integrados como insumos necesarios para el desarrollo de las particularidades tomadas en consideración en el diseño de las obras, y reducir los imprevistos generados a partir del comportamiento del agua subterránea, durante la excavación de la presa, lo que tiende a incrementar los costos asociado en la etapa de construcción de este tipo de Proyectos.

A su vez se pretende generar una metodología sobre la información necesaria para desarrollar un estudio hidrogeológico en este tipo de obras civiles, a partir de cual se incorporan ensayos hidrogeológicos básicos a los estudios técnicos que ya de por si son necesarios en el diseño geológico-geotécnico de un sitio de Presa.

Las limitaciones asociadas al estudio consisten en las condiciones climáticas del sitio, ya que durante la época lluviosa y con tormenta eléctrica, se dificulta el aprovechamiento del tiempo efectivo de las giras de campo, en lo que se refiere a levantamiento geológico y ensayos en los piezómetros. También la realización de los ensayos *slug test*, durante la época seca, dificulta elevar el nivel de la columna de agua en los piezómetros, lo que involucra un mayor acarreo de agua, y por lo tanto una logística de campo mayor en relación con el almacenamiento de dicho volumen.

Una limitante adicional, corresponde a el tiempo de respuesta de las instituciones involucradas, en relación con la disponibilidad de los recursos necesarios para realizar los métodos “in situ” y la toma de muestras a ensayar, así como las condiciones físicas y mecánicas de dichos recursos, para ser aprovechados al máximo durante los ensayos.

Las muestras a ensayar involucran la recolección de una cantidad de material mínima cercana a los 2 kg, obtenida de las cajas de registro perforadas, y cuya cantidad debe ser dividida para ser utilizada en los dos tipos de ensayos propuestos, tanto el de carga constante y como el granulométrico o textural, por lo tanto, la cantidad disponible de muestras de las perforaciones, es una limitante para la realización de dichos ensayos.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El sitio corresponde al área que comprende la Presa del Proyecto Embalse Río Piedras, se localiza en la hoja topográfica Tempisque 1:50.000, provincia de Guanacaste, cantón de Bagaces, distrito 1° Bagaces, entre las coordenadas CRTM05: 360619- 361534 E y 1155271-1156071 N, ocupa un área de 284.576 m² (Figura 1).

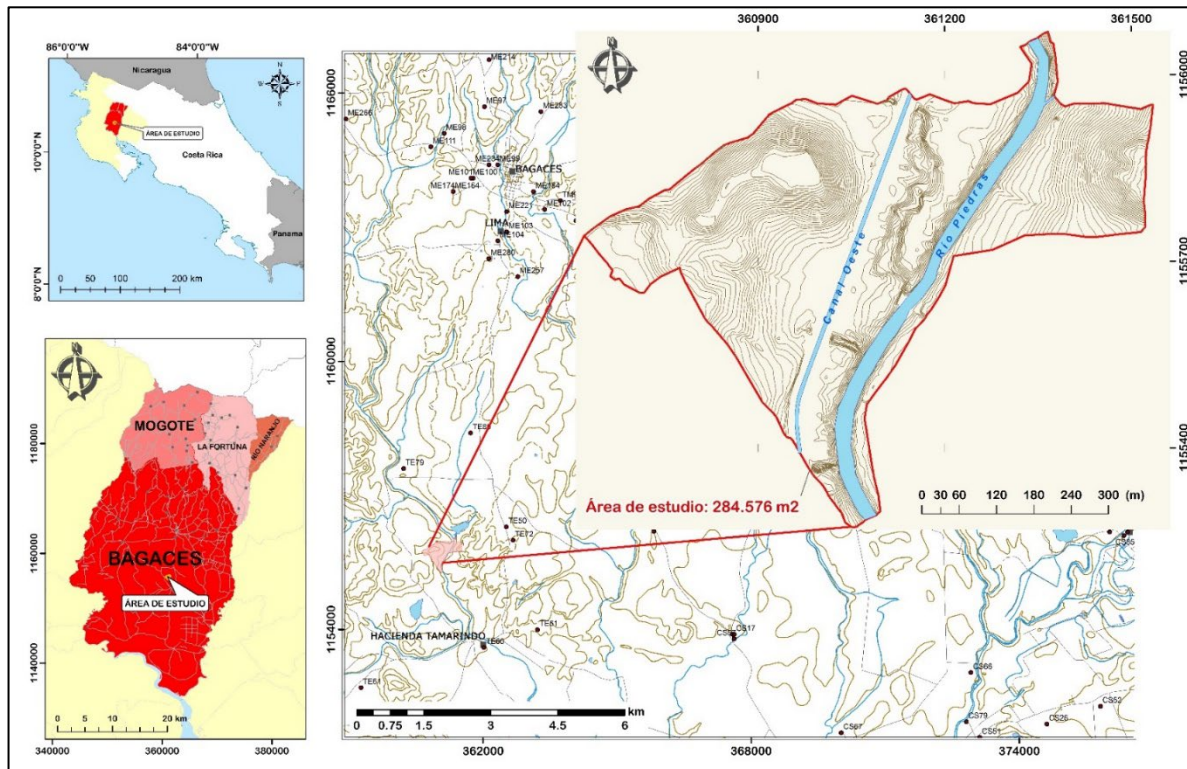


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en el sector de Río Piedras, cantón de Bagaces, distrito 1° de Bagaces. (Base cartográfica tomada de Malavassi, 2014)

III. CONTEXTO FÍSICO-POLÍTICO

El cantón Bagaces es número 4 de la provincia de Guanacaste, con una superficie aproximada de 1273,49 km² y se compone por cuatro distritos Bagaces, Mogote, Fortuna, Río Naranjo (Figura 2), de los cuales destaca su ciudad cabecera Bagaces con una extensión de 886,72 km² (Instituto de Desarrollo Rural [Inder], 2015)

Los límites políticos corresponden al norte con cantones de Upala (distritos Aguas Claras y Bijagua), al oeste con Liberia (distrito Liberia), Carrillo (distrito Filadelfia), y Santa Cruz (distrito Bolsón), al este con Cañas (distritos Palmira, Cañas, Bebedero y Porozal) y al sur con Nicoya (distritos San Antonio y Quebrada Honda).

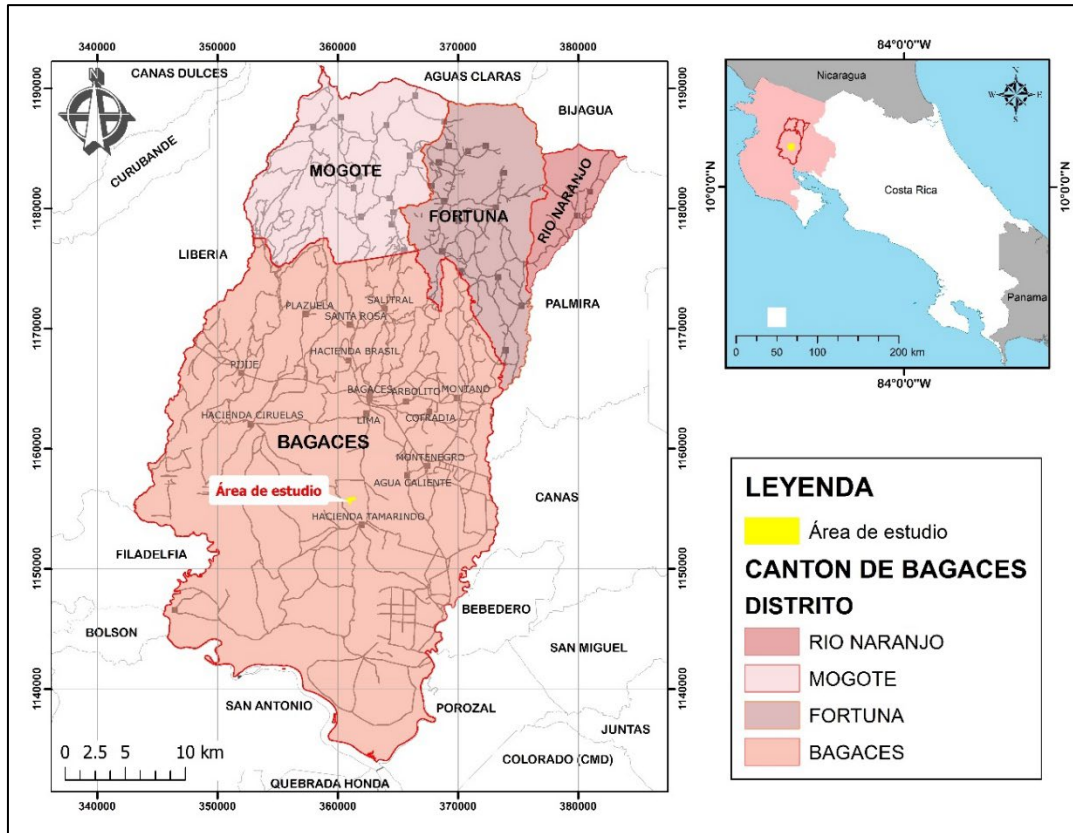


Figura 2. Límites políticos del cantón de Bagaces, y sus respectivos distritos (Tomado de base Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica [MIDEPLAN], 2007 En: Malavassi, 2014)

3.1 Relieve

Según datos del Inder (en Malavassi, 2014), el cantón de Bagaces presenta una elevación mínima registrada de 18 m.s.n.m, la cual se localiza en los sectores de llanura ubicados al sur del cantón sobre el cual se localiza el área de estudio, la elevación máxima de 2028 m.s.n.m, corresponde al sector norte del cantón sobre el volcán Miravalles (Figura 3).

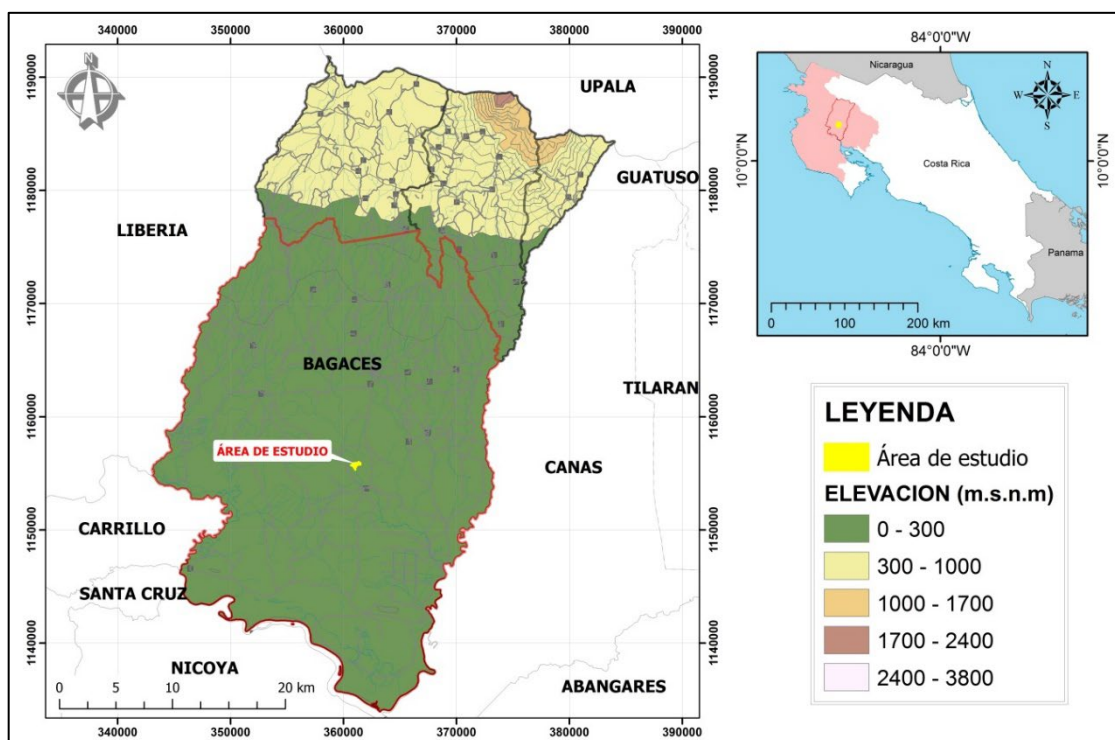


Figura 3. Mapa de elevación del cantón de Bagaces (Tomado y modificado de Malavassi, 2014)

3.2 Clima

A partir de los datos del Instituto Meteorológico Nacional (en Malavassi 2014), se determinan dos zonas climáticas bien definidas, asociadas a las diferencias de elevación entre la cordillera volcánica de Guanacaste al norte y la zona de llanura al sur, las mismas corresponden con el clima tropical lluvioso y clima tropical lluvioso y seco respectivamente, en esta última zona de clima se ubica precisamente el área de estudio (Figura 4).

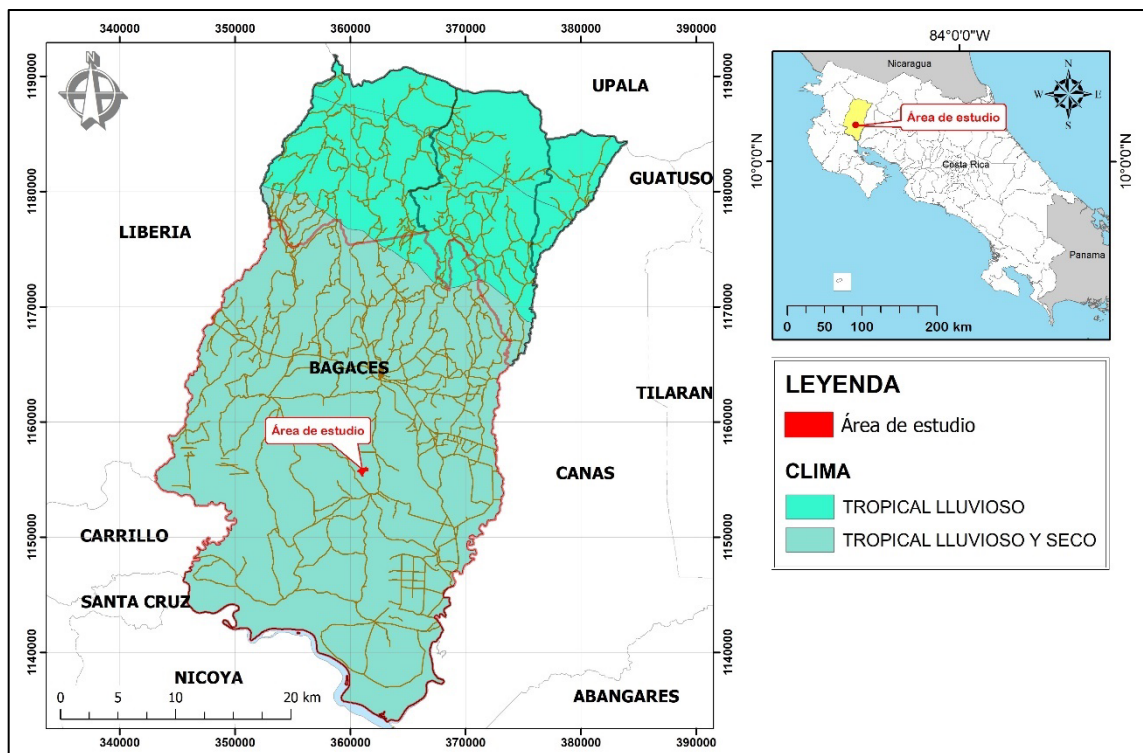


Figura 4. Mapa climatológico del cantón de Bagaces (Tomado y modificado de base IMN, ICE y Comité Nacional de Hidrología y Meteorología [CNHM], 2002, en Malavassi, 2014)

3.3 Precipitación

Las precipitaciones promedio anuales según IMN (en Malavassi 2014), comprenden desde los 4500 mm/año en sus zonas de mayores altitudes asociadas a la cordillera volcánica, hasta los 1400 mm/año en la zona de llanura, en donde se localiza el área de estudio (Figura 5).

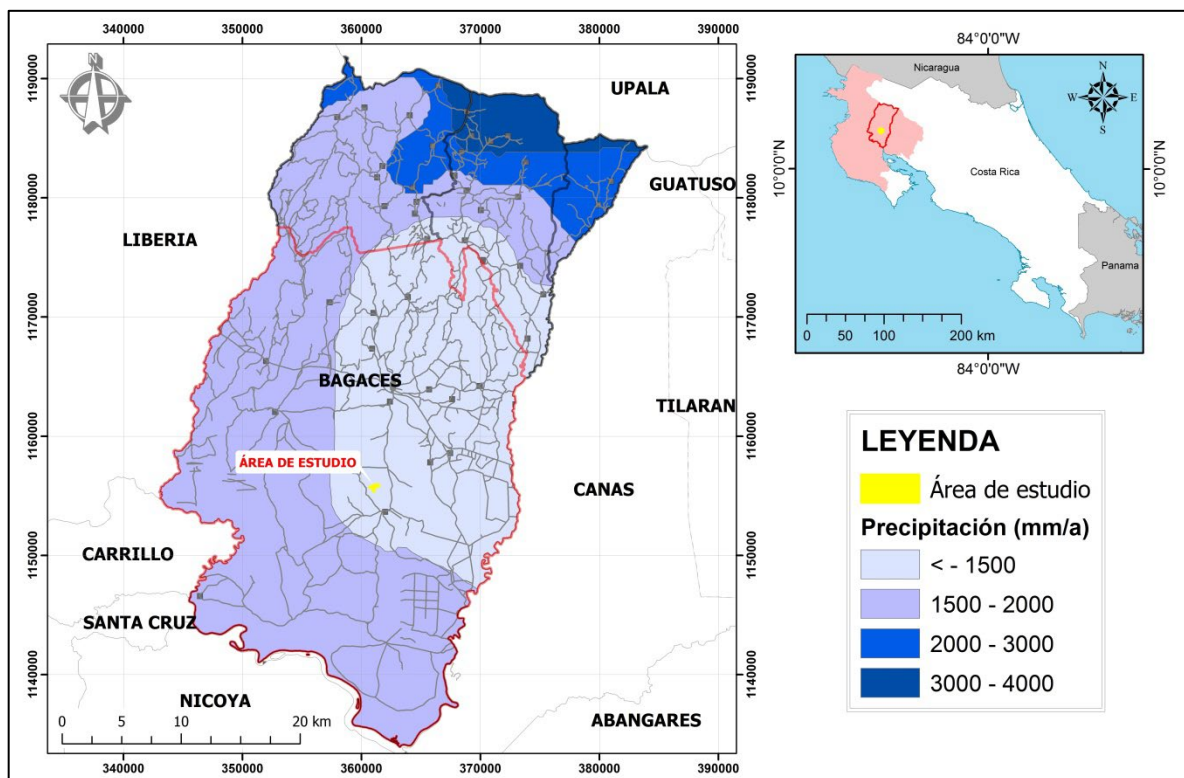


Figura 5. Mapa de precipitaciones promedio anual para el cantón de Bagaces. (Tomado y modificado de base IMN, 2010 en Malavassi, 2014)

3.4 Temperatura

Para Inder (en Malavassi, 2014) las temperaturas promedio en las zonas de menor altitud pueden llegar alcanzar 27,02 °C, mientras que en las zonas altas las temperaturas bajas promedio se encuentran alrededor de los 17,11°C (Figura 6). La máxima temperatura media anual (> 28°C) se localiza en el área de estudio.

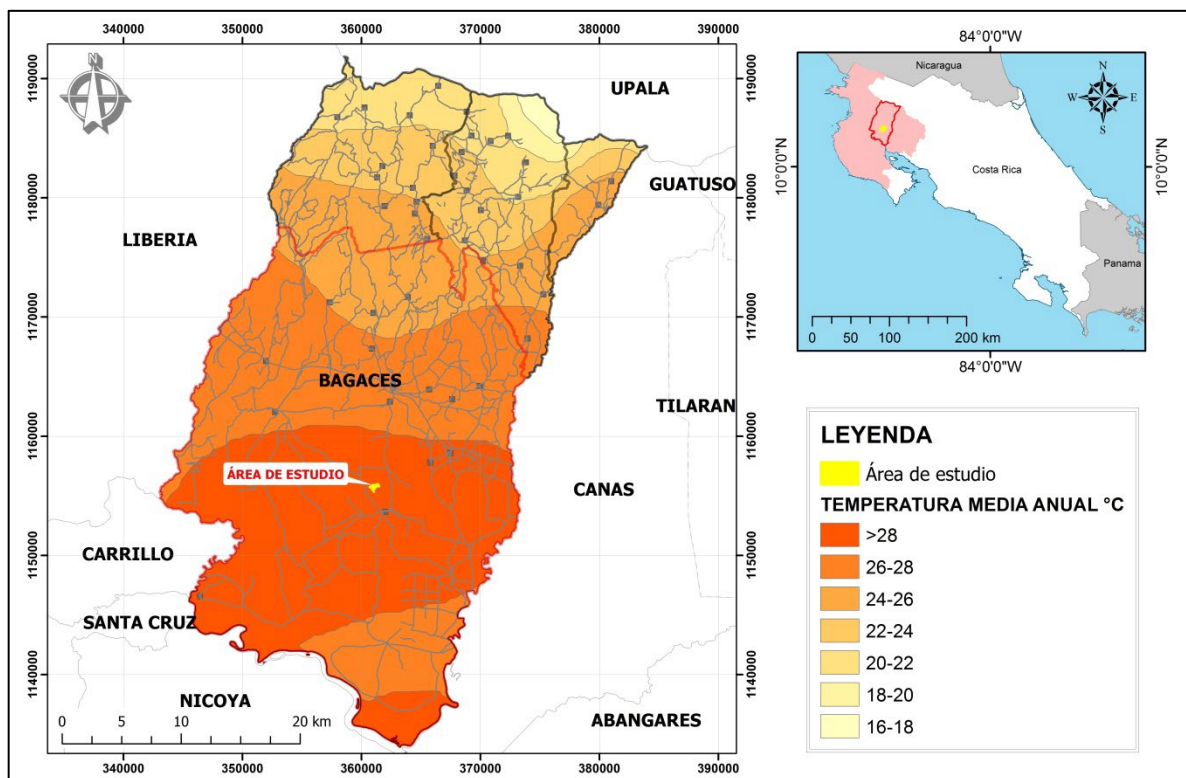


Figura 6. Mapa de temperaturas media anual para el cantón de Bagaces. (Tomado y modificado de base IMN, 2010 en Malavassi, 2014)

3.5 Vegetación

Según la clasificación de Holdridge (1963) de zonas de vida, el cantón de Bagaces presenta 9 zonas de vida asociadas a las diferencias de altitudes que permiten crear multiplicidad de climas, las zonas de vida están representadas desde el Bosque Seco Tropical (bs-T) hasta el Bosque Pluvial Montano Bajo (pb-MB).

Las zonas de vida más representativas en el cantón son: el bosque seco tropical (bs-T) y bosque húmedo pre-montano transicional a basal (bh-P6), el área de estudio se localiza de manera limítrofe entre ambas zonas de vida (Figura 7).

El resto de las zonas de vida se agrupan hacia las faldas de la cordillera, dispuestos en franjas paralelas asociadas a los cambios de altitud.

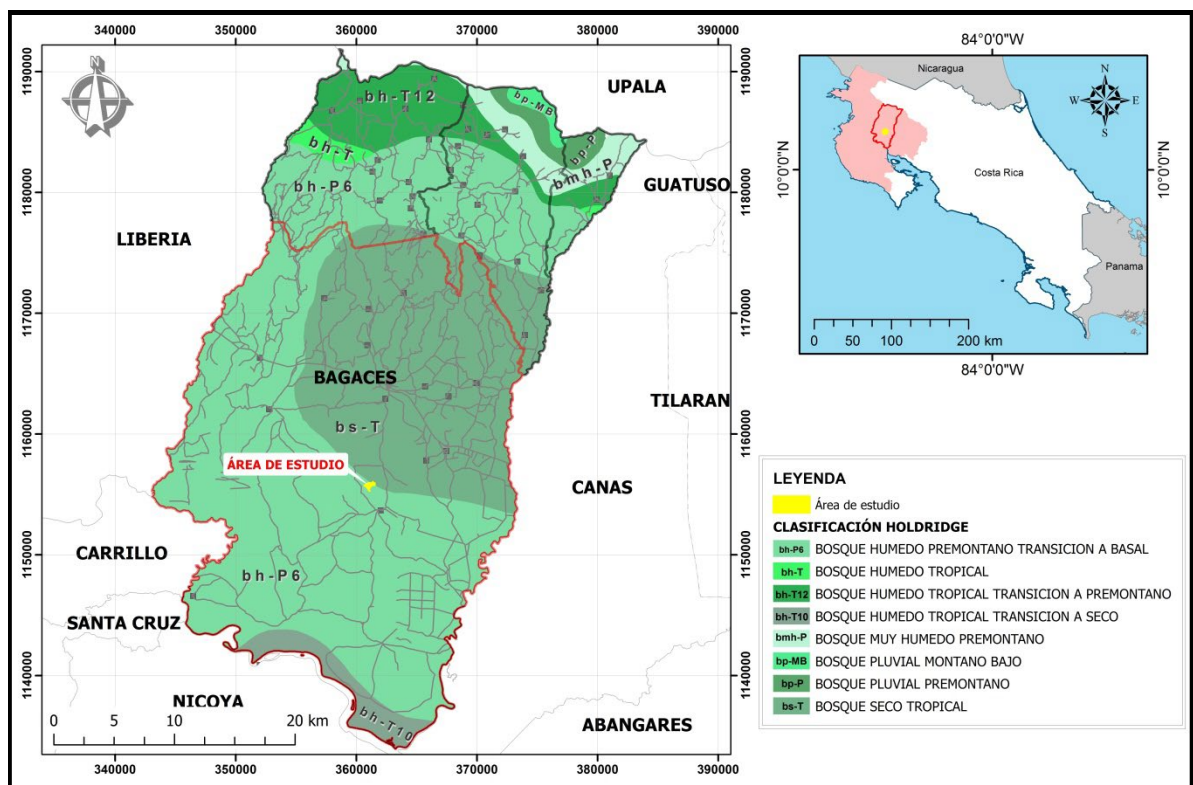


Figura 7. Mapa Ecológico de zonas de vida según la clasificación Holdridge para el cantón de Bagaces (Tomado y modificado de base Malavassi, 2014)

3.6 Cuenca Hidrográfica

El cantón de Bagaces comprende 7 subcuencas hidrográficas que forman parte de la cuenca del río Bebedero la cual presenta un área de 2.054,4 km², parcialmente el borde limítrofe del cantón incluye a las subcuencas de Río Bebedero-Río Lajas, Río Tenorio, y Río Salto-Río Pijije; e incluye de forma total las subcuencas de Quebrada Laguna Palo Verde, Río Blanco, Río Cabuyo y Río Piedras-Río San Jerónimo (Figura 8).

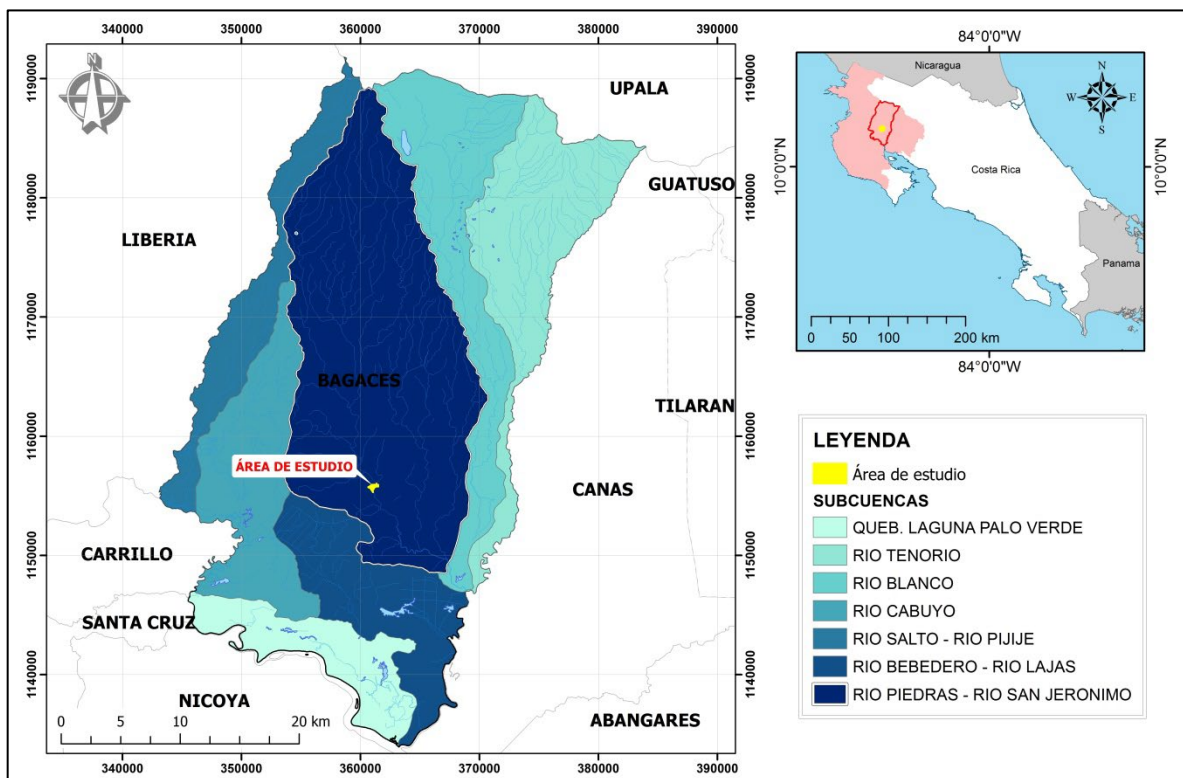


Figura 8. Mapa de subcuencas que abarcan el cantón de Bagaces (Tomado y modificado de Malavassi, 2014)

La subcuenca del Río Piedras -San Jerónimo es la más extensa de las que se encuentran en su totalidad dentro del área del cantón, presenta un área estimada de 455 km² (Inder, 2015), y corresponde a la subcuenca sobre la que se ubica el área de estudio (Figura 8).

IV. METODOLOGÍA

El enfoque es de tipo cualitativo el cual se define como “aquella que utiliza preferente o exclusivamente información de tipo cualitativo y cuyo análisis se dirige a lograr descripciones detalladas de los fenómenos estudiados” (Cauas, 2015), pues se basa en una metodología práctica ligada en la recolección de datos directos e indirectos adquiridos de forma sistemática.

El estudio tiene un alcance descriptivo ya que “se fundamenta en la descripción de fenómenos en una circunstancia temporal y especial determinada y buscan especificar las propiedades importantes de cualquier fenómeno natural que es sometido a análisis” (Cauas, 2015), ya que se limita a la identificación de las principales variables naturales relacionadas con las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos, mediante la aplicación de ensayos de tipo slug test, granulométricos, ensayos de permeabilidad y medición de niveles estáticos, para su consecuente integración con las características geológicas y geofísicas, con fin de generar un modelo hidrogeológico conceptual bien desarrollado.

El diseño del estudio es de campo pues implica la adquisición de datos hidrogeológicos “in situ” y la comprobación de características geológicas previamente mapeadas en el sitio; así como de gabinete, ya se permite la integración de ambos métodos directos e indirectos, producto de los datos generados en campos y la recopilación de estudios técnicos previos.

4.1 Fases de Investigación

Para el presente estudio se proponen las siguientes cuatro fases, y sus actividades esquematizadas de manera puntual.

4.1.1 FASE 1: Recopilación de datos bibliográficos

- Establecimiento del marco teórico asociado con la investigación y su respectiva recopilación bibliográfica.
- Investigación y recopilación de trabajos de investigación previos tanto del enfoque geofísico como de la geología del sitio: tesis, artículos científicos e informes de proyectos.
- Identificación de los materiales, recursos y equipos necesarios para la toma de datos y su respectiva planificación en campañas de muestreo.
- Recolección y discretización de datos de pozos cercanos al sitio (SENARA)
- Solicitud de datos generados por el ICE en el período 2016-2017, en el Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Cuantificación de datos ICE (2018), generados para el Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras.

	Tipo de Estudio	Cantidad unitaria total	Longitud total (m)
Topografía	A- Puntos de levantamiento	6682	
	B- Perfiles topográficos	10	4780
Geofísica	A- Perfiles	5 (ERT)	2710
		7 (SEV)	3130
	B- Sondeos	5 (TDEM)	
		313 (SEV)	
Geología	A- Perfiles	3	1650
	B- Mapas	1	

		(escala 1:1000)	
Perforaciones	A- Pozos	11	557,2
	B- Piezómetros	18	
	C- Ensayos <i>Lugeon</i>	98	
	D- Descripciones litológica núcleos	11	
	E- Medición niveles piezométricos	88	

4.1.2 FASE 2: Generación de datos de campo

- Cartografiado geológico y estructural del sitio a escala 1:3000.
- Toma y recolección de datos, en tres campañas: *slug test*, toma de muestras de núcleos y validación de la geología de campo.
- Realización de ensayos *slug test* y toma de muestras para análisis granulométrico y para los ensayos de carga constante. En la Tabla 3, se detallan la cantidad de ensayo o muestras a realizarse.

Tabla 3. Cantidad de ensayos a realizarse en cada campaña propuesta.

Tipo de Ensayo		Cantidad total de muestras o datos (11 Pozos)
1)	<i>Slug Test</i>	18
2)	Análisis granulométrico	19
3)	Ensayos de Carga constante	19

- Ordenamiento y sistematización de datos de campo,
- Validación de datos de campo y repetición de ensayos en caso de que se requiera.

4.1.3 FASE 3: Sistematización y análisis de datos

- Ordenamiento y procesado de datos de ensayos *slug test*, aplicados por cada piezómetro.
- Envío de muestras para análisis granulométricos.
- Realización de ensayos en permeámetro de carga constante.
- Integración de datos de mediciones estáticas y generación de mapas de equipotenciales
- Análisis de resultados de datos de conductividad hidráulica.
- Correlación de modelos geofísicos con el modelo hidrogeológico conceptual (perfiles y mapas).
- Generación del modelo hidrogeológico conceptual mediante la integración de las variables directas e indirectas obtenidas.

4.1.4 FASE 4: Resultados

- Redacción de la tesis
- Elaboración de figuras (mapas, perfiles)
- Ajustes y revisión de formatos de texto, tablas y Figuras
- Revisiones del director de tesis.
- Revisiones del comité asesor.

4.2 Categorías

A continuación, se enlistan las categorías propuestas en el presente trabajo, cuyas definiciones se transcribieron a partir del Glosario Geológico (Neuendorf, Mehl & Jackson., 2011) y González de Vallejo et al, (2002).

1. LITOLÓGÍA: parte de la geología que estudia las rocas y sus características físicas: textura, color, composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.
2. ACUÍFERO: es una capa o estrato permeable y saturado, capaz de transmitir agua en cantidades aprovechables hacia pozos, manantiales y ríos; el mismo puede constituir de forma total o parcial una formación o grupo de formaciones geológicas.
3. NIVEL ESTÁTICO o PIEZOMÉTRICO: distancia vertical medida en metros (m) desde un punto fijo en la superficie del pozo hasta el nivel libre de la superficie del agua, cuando esta no está influenciada por bombeo u otras formas de extracción de agua subterránea.
4. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA: como la resistencia que ofrece al paso de la corriente un cubo de terreno de un metro de lado, sus unidades son dadas en ohmios por metro ($\text{Ohm} \cdot \text{m}$).
5. PERMEABILIDAD INTRÍNSECA: o coeficiente de permeabilidad es la propiedad intrínseca del medio y está definida como la facilidad o dificultad con que un fluido fluye a través la roca sus unidades son dadas en longitud entre tiempo (cm/s).
6. PERMEABILIDAD DE LUGEON: absorción de 1 litro de agua por metro del sondeo y por minuto, con 10 atmósferas de presión durante 10 minutos, cuya unidad de medida corresponde a *unidad de Lugeon* (UL), la cual es equivalente a el coeficiente de permeabilidad $k=10^{-5}$ cm/s.

7. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K): corresponde a la velocidad del fluido de un caudal dado cuando se trasmite a través de una sección transversal y a lo largo de un gradiente hidráulico.
8. POROSIDAD EFECTIVA: se define como el volumen de espacios vacíos interconectados que se encuentran en los materiales.

Se aplicarían las siguientes técnicas de investigación con el fin de sustentar el modelo hidrogeológico conceptual:

- Análisis documental: consiste en un proceso intelectual a partir del cual se extraen nociones de un documento para representarlo y facilitar el acceso a los originales. Dicho análisis se aplica en el estudio al incorporar datos de campo como: litología, niveles estáticos, valores resistivos que se tabulan en hojas electrónicas, así como la recopilación de datos de pozos ya existentes solicitados en la base de datos disponibles de SENARA y del ICE en el Sitio de Presa (Figura 9).

El análisis documental por realizarse en cada una de las tres categorías mencionadas se cuantifica en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen del análisis documental a recopilar de acuerdo con las tres variables mencionadas

CATEGORÍAS	DATOS DOCUMENTALES	CANTIDAD UNIT/METRAJE
Litología	Descripciones litológicas de núcleos del ICE	11
	Perfiles Geológicos ICE	3
	Mapa geológico ICE 1:1000	1
	Mapa geológico Barrantes (2018) 1:50000	1

Niveles estáticos	Datos de medición de niveles en piezómetros ICE	88
	Datos de pozos en la base de datos SENARA	5
Perfiles Geofísicos ICE:		
Valores de Resistividad	Perfil 1-SEV	700
	Perfil 1-ERT	780
	Perfil 2-SEV	350
	Perfil 3-SEV	300
	Perfil 3-ERT	380
	Perfil 4-SEV	300
	Perfil 4-ERT	380
	Perfil 5-SEV	600
	Perfil 5-ERT	650
	Perfil 7-SEV	530
	Perfil 7-ERT	520
	Perfil 8-SEV	350
	Sondeos TDEM	5

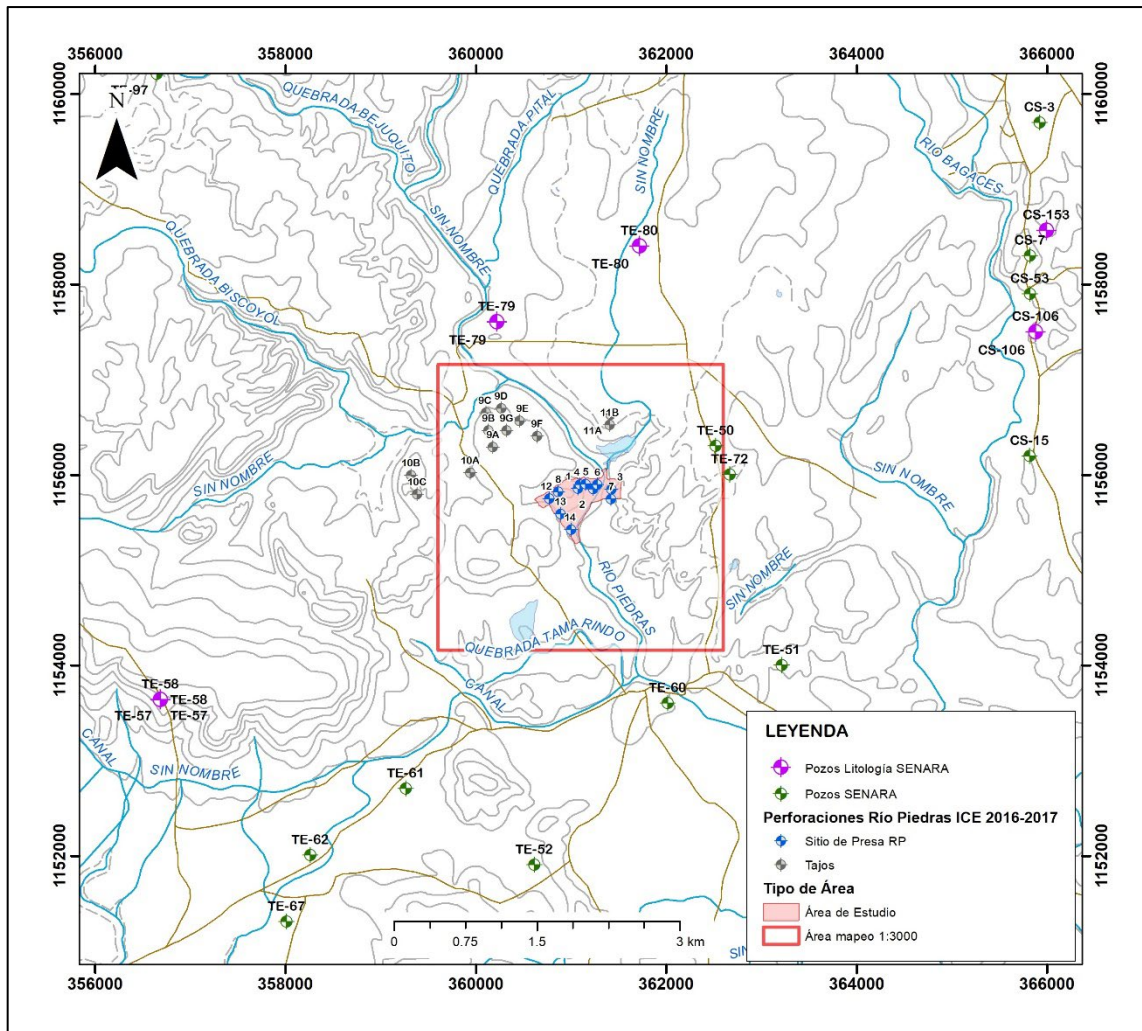


Figura 9. Localización de los pozos de SENARA en relación con el área de estudio y a la escala de mapeo 1:3000.

- Mapeo geológico a escala 1:3000 (Figura 9), consiste en una representación de la naturaleza litológica de la roca sobre una base topografía y planimétrica de un área de estudio dada, en la que se representan todas aquellas relaciones estructurales y estratigráficas de las mismas. El instrumento utilizado para el mapeo corresponde a la hoja topográfica Tempisque a escala 1:50000, y a partir de la cual se reduce a la escala de mapeo 1:3000. El equipo que se utilizó en el

mapeo geológico consistió en: piqueta, brújula, lupa, lápices, diario de campo, instrumentación de posicionamiento global (gps).

- Campaña de medición de niveles estáticos: consiste adquirir los datos de los niveles de la columna de agua dentro de cada uno de los 18 piezómetro ubicados en el área de estudio, el instrumento de adquisición es una sonda de niveles, un diario de campo y una hoja de cálculo.

En la Tabla 5, se detalla la cantidad de piezómetros por cada perforación, en la Figura 10, se muestra la distribución de las perforaciones en el Sitio de Presa.

Tabla 5. Distribución de los piezómetros en las 11 perforaciones ubicadas en el Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras.

Cant.	Código Perforaciones	Número Perforación	Cantidad de Piezómetros por perforación	Profundidad total perforada (m)
1	ERP-PER-01	1	2	60
2	ERP-PER-02	2	2	60
3	ERP-PER-03	3	2	60
4	ERP-PER-04	4	2	60
5	ERP-PER-05	5	3	67,5
6	ERP-PER-06	6	3	60
7	ERP-PER-07	7	1	38,5
8	ERP-PER-08	8	1	51,2
9	ERP-PER-12	12	1	40
10	ERP-PER-13	13	1	30
11	ERP-PER-14	14	1	30
TOTAL			19	557,2

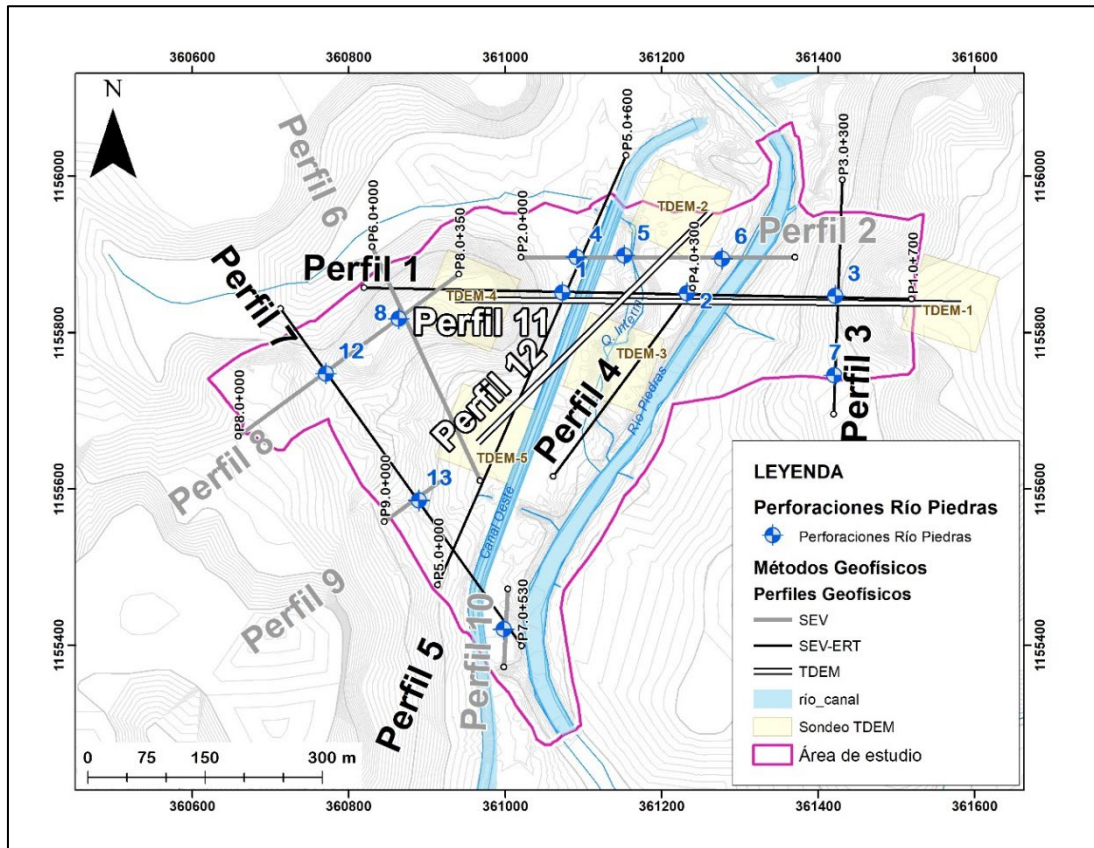


Figura 10. Distribución de los 7 perfiles geofísicos realizados por el ICE (2016a), y las 11 perforaciones a las que se les realizarían los ensayos *slug test*.

- Campaña de ensayos *slug test* y mediciones piezométricas: consiste en adicionar un caudal de agua dentro de un piezómetro, hasta incrementar la columna de agua a un nivel inicial (H) y determinar el abatimiento o disminución de dicho nivel (Δh) en un rango de tiempo conocido, hasta que el nivel se estabilice a su valor inicial (H_0), en cada uno de los 18 piezómetros ubicados en las 11 perforaciones del Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras. El instrumento de

adquisición utilizado para el ensayo es la sonda de niveles, diario de campo, cronómetro digital y la hoja de cálculo, en donde se anotan los datos obtenidos.

- Campaña de recolección de muestras: consiste en tomar muestras representativas de los acuíferos granulares, a partir de los núcleos de recuperación obtenidos durante las perforaciones, estas muestras serán analizadas mediante dos tipos de ensayos: el análisis textural o granulométrico y el ensayo de permeabilidad; en relación al peso, se deben recolectar al menos un mínimo de 2,0 kg de muestra, para cada una de las 19 muestras a utilizarse en cada ensayo, por lo que se debe obtener un total de 38 muestras para ser analizadas. El instrumento de adquisición utilizado son las bolsas de muestreo y el diario de campo.

El criterio que se utilizó en caso de que la cantidad de muestra no fuera suficiente para realizar ambos ensayos, se detalla en el esquema de la Figura 11.

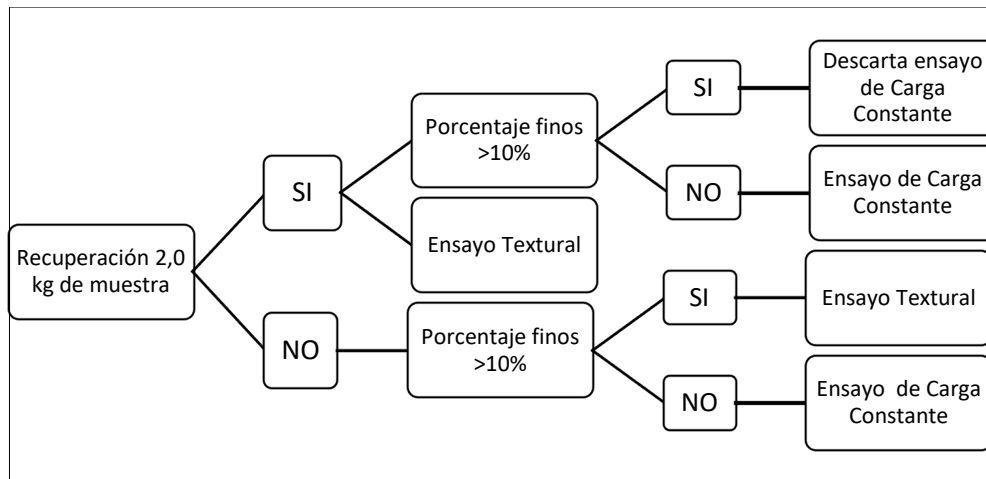


Figura 11. Esquema de análisis para la aplicación de los ensayos: textural y de carga constante, a partir de la cantidad y las características de las muestras de los núcleos recolectadas.

Las muestras obtenidas a partir de los núcleos de las perforaciones, deben cumplir con tres características:

1. Deben corresponder a un nivel asociados a un acuífero.
 2. Deben asociarse a un valor de *Lugeon* coincidente con el tramo muestreado.
 3. Debe corresponder a una muestra no consolidada de arena.
- Observación cuantitativa: es una técnica de recolección de información sistemática, que aparece generalmente reflejada de forma numérica conformada por datos medibles y objetivos. Mediante esta técnica de observación se describen los núcleos de las perforaciones, los ensayos *slug test* y los afloramientos, el instrumento de aplicación de la misma es el diario de campo.
 - Análisis estadístico de los datos: consiste en agrupar y comparar los datos de conductividad hidráulica, obtenidos a través de las diferentes metodologías aplicadas, tanto directas (*slug test*, y ensayos de *Lugeon*) como indirectas (ensayos carga constante y textural), para una misma unidad hidrogeológica bien definida, con el fin de analizar las similitudes y diferencias en la obtención de este parámetro hidráulico, en relación con los valores esperados de acuerdo con la literatura.

V. ANTECEDENTES

Los modelos hidrogeológicos conceptuales corresponden a un compendio de hipótesis para entender el comportamiento del agua subterránea, pues parten de un alto grado de incertidumbre para modelar el flujo y transporte del agua (Enemark et al. 2019).

Según Anderson et al. (2015), el primer paso para el desarrollo de un modelo hidrogeológico es un modelo conceptual que proporcione una visión general, sistemática y consistente de los límites del sistema, así como sus propiedades y procesos, los cuales reducen la brecha entre la caracterización y el modelo hidrogeológicos.

El desarrollo de los modelos conceptuales se basa en la información geológica e hidrológica disponible, a partir de datos observados tales como: niveles estáticos, perforaciones y concentración de trazadores, en los que adicionalmente se incluye el conocimiento y la interpretación geológica experta (Enemark et al. 2019).

Debido a la naturaleza física del flujo del agua subterránea, los resultados de la modelación conceptual de un sistema hidrogeológico deben incluir como mínimo la caracterización de la geometría del o los acuíferos, los parámetros hidrogeológicos que lo representan, las líneas de dirección del flujo, y el tipo de unidades hidrogeológicas (Ordoñez, 2011).

5.1 Modelos Hidrogeológicos en Obras Civiles

Los primeros estudios publicados en relación a la caracterización de acuíferos en proyectos hidroeléctricos, corresponden a Vargas & Cervantes (2000), los cuales realizaron una descripción de los principales acuíferos ubicados en el Sitio de Presa del proyecto Angostura, ya que durante la excavación de la presa y en las perforaciones de investigación, se detectó la presencia de un nivel artesiano que superaba en algunos sectores los 10 m de altura, y por lo tanto, podía comprometer la estabilidad de las obras de la Presa, a partir de esta situación se implementó la necesidad de aplicar un estudio

hidrogeológico, para caracterizar los acuíferos en el sitio, lo que permitió establecer la existencia de tres niveles confinados en depósitos aluviales antiguos (conglomerados) con espesores muy variables, y altas conductividades hidráulicas, en el orden de 10 a 43 m/día. Complementando lo anterior, Vargas (2003) hace una estimación numérica de caudales de bombeo y abatimientos del acuífero inferior, por medio del uso del software ModFlow, para lo cual estableció valores de 20 m/día para la conductividad hidráulica y 1×10^{-4} de coeficiente de almacenamiento, para simular el acuífero.

Seguidamente, Chaves et al. (2001) realiza una caracterización hidrogeológica del sitio de presa del proyecto hidroeléctrico Pirrís, en el que se identificó un acuífero confinado, cuya zona de recarga se localizaba a unos 650 m aguas arriba del eje de Presa, dentro del área del embalse. Vargas (2016), continúa con los estudios hidráulicos de este acuífero, y realiza pruebas de bombeo que determinan un caudal asociado de 1,9 L/s, durante la prueba de bombeo, se registró el sismo de Golfito de 6,2 Mw, a partir del cual desarrolla un análisis del abatimiento y recuperación del comportamiento de los niveles dinámicos, producto del sismo y sus réplicas.

Varios autores han utilizado la temática de caracterizar o determinar el comportamiento del agua subterránea en obras importantes ligadas a los proyectos hidroeléctricos, tal es el caso de Vargas & Fernández (2002), los cuales determinaron mediante el uso de trazadores, que la construcción del dique y la construcción del Embalse Cipreses, en el Proyecto Hidroeléctrico Cariblanco, no tendría influencia en el manantial que capta y abastece el poblado de San Miguel. Seguidamente Calvo (2002) estudió la influencia del abatimiento de los niveles piezométricos, en la subsidencia de los suelos ubicados en el área del cuenco del Vertedor del Proyecto Hidroeléctrico Angostura. Posteriormente, Madrigal (2004), planteó un modelo hidrogeológico conceptual bajo el sitio de la Casa de Máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Peñas Blancas, y finalmente Chaves (2016), realizó una estimación de los efectos en el caudal y el nivel del agua subterránea,

productos de la excavación de los Túneles de Desvío, en el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, al comparar los resultados obtenidos entre los métodos analíticos y un modelo numérico de diferencias finitas.

Pocos estudios plantean el desarrollo y la publicación de un modelo hidrogeológico, previo a la construcción de las obras, los cuales son determinantes para el diseño de las mismas; por lo que este estudio pretende establecer un modelo hidrogeológico del Sitio de Presa de Río Piedras, a partir de la integración de la información generada por el ICE en el 2016, con los parámetros hidráulicos obtenidos en el desarrollo del presente trabajo, lo que permita mostrar el comportamiento del agua subterránea, previo a la excavación de las obras.

5.2 Métodos Geofísicos Aplicados a la Hidrogeología

Los métodos geofísicos eran utilizados inicialmente según Ambronn & Cobb (1928) como herramientas en la búsqueda de minerales, hidrocarburos y gas principalmente. La geofísica utilizada para la investigación relacionada al agua subterránea se restringía al uso de sondas eléctricas utilizadas en las perforaciones, cuyos sondeos conocidos como diagráfias eléctricas, se utilizaban para determinar niveles saturados, porosidad de las capas y resistividades asociadas tal es el caso de los estudios de Jones & Skibitzke (1956), Allud et al. (1965), Bennet & Patten (1960), Hossin (1969), y Keys (1967).

A medida que se desarrollaba la instrumentación en la adquisición de datos de campo, sumado a la necesidad de implementar la geofísica en situaciones comunes, relacionadas a problemas de corte ingenieril y geológico se hacía más evidente mejorar las técnicas de campo de allí que surgen los trabajos de Desio (1949), Cantos (1974), Telford et al. (1976), Parasnis (1979) y Griffiths & King (1981), los cuales implementaron aplicaciones

de varios métodos con el fin de diversificar la geofísica hacia aplicaciones menos frecuentes.

Posteriormente los primeros estudios enfocados propiamente a aplicaciones hidrogeológicas en relación a la caracterización de las aguas subterráneas a partir de la geofísica superficial corresponden a Van Dam & Meulenkamp (1967), Bodmer et al. (1968), Zohdy (1969), Morley (1970), y Astier (1975), muchos de los cuales se realizaban mediante el uso de métodos de resistividad eléctrica con configuraciones básicas que mostraban una tendencia general de las capas y una percepción básica de la presencia de zonas posiblemente saturadas.

En Costa Rica, los estudios geofísicos han sido aplicados inicialmente en obras de ingeniería civil tales como Alfonso (1971), Saénz (1985) y Quesada (1989), los cuales utilizaron varios métodos geofísicos para evaluar la factibilidad de proyectos hidroeléctricos y caracterizar geológicamente los proyectos geotérmicos. A pesar de este enfoque general de los métodos geofísicos, Protti (1981) implementó de forma particular la aplicación de métodos geofísicos de resistividad eléctrica con fines hidrogeológicos para delimitar zonas de protección en acuíferos costeros, seguidamente Arias (1999), Arias (2000), Arias (2002b), y Conseza & Arias (2006) utiliza la comparación de métodos de resistividad eléctrica y electromagnéticos para la delimitación y caracterización de acuíferos.

Conforme se ha incorporado la geofísica como herramienta para modelos conceptuales en acuíferos particulares Castro (2010), Zúñiga (2006), Suárez (2014), así como para determinar la vulnerabilidad intrínseca Arévalo (2005) y Urrutia & Arias (2006); se han desarrollado estudio específicos en acuíferos predominantemente costeros, tal es el caso de Arias (2001a), Arias (2001b), Arias (2002a), Arias (2002c), Arias (2007a) en los cuales se utilizan técnicas geofísicas de resistividad eléctrica de obtener información que

permita desarrollar un modelo conceptual del acuífero, con el fin determinar la extensión de la intrusión salina, situación muy particular en este tipo de acuíferos.

El presente estudio brinda un aporte significativo en la modelación hidrogeológica, ya que plantea el uso de tres métodos geofísicos de tipo eléctrico y electromagnético, para determinar las condiciones resistivas del medio, mediante las cuales se elabora un modelo hidrogeológico conceptual del sitio.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 Definición de Modelos

6.1.1 Modelo conceptual

Anderson & Woessner (1992) definen un modelo conceptual como una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea que se realiza incorporando información de la geología e hidrogeológica disponible en un simple esquema del modelo a realizar, o bien según Betancur et al. (2009), como una representación pictórica del sistema de flujo de agua subterránea, frecuentemente en forma de un bloque diagrama o una sección transversal

Córdoba et al. (2012), determina que la fase inicial en la elaboración de un modelo conceptual consiste en definir la litología dominante, espesores, continuidades y estructuras de los acuíferos y de las unidades confinantes de forma que se puedan identificar los límites y el comportamiento del acuífero a estudiar, con esta previsualización se logra identificar el sistema de flujo característico, el cual es necesario para entender el movimiento del agua a través del sistema hidrogeológico.

Anderson & Woessner (1992) agregan que el modelo conceptual comprende también las características de los parámetros hidráulicos de cada unidad, las posiciones de las

superficies freáticas y piezométricas y, por lo tanto, las condiciones de flujo subterráneo, además, identifica zonas y procesos de recarga y evaluación de reservas.

Bredehoeft (2005) menciona que el propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva. Dicha simplificación es necesaria ya que la reconstrucción completa del sistema es imposible, por lo que un modelo conceptual es la idea básica de cómo operan los sistemas y procesos y agrega que en relación a la incertidumbre de los modelos conceptuales se puede utilizar el término “sorpresa” para referirse a la situación en la cual la colección de nueva información invalida un modelo conceptual original, dicha sorpresa puede surgir a causa de la revisión de la teoría científica o como consecuencia de la nueva información que se obtenga sobre un sitio particular y ello ocurre en 20-30% de los casos estudiados, lo cual indica que no es fácil construir un modelo hidrogeológico apropiado (Bredehoeft, 2005).

Carrera et al. (2005), menciona que el conocimiento de la naturaleza de los medios subterráneos se logra a partir de información cuantitativa (*hard*) pero también cualitativa (*soft*), y es posible incluso para un mismo sistema elaborar varios modelos conceptuales.

6.1.2 Modelo Hidrogeológico

Para Voss (2005), la hidrogeología es fundamentalmente una ciencia descriptiva que trata de acercarse cada vez más al rigor cuantitativo con la idea de responder con más precisión a las preguntas que se formulan en torno al manejo de los recursos hídricos subterráneos. Betancur et al. (2009) afirma que la hidrogeología está lejos de ser una ciencia clásica cuantitativa y que cada modelo o cada predicción corresponden a hipótesis que rara vez se pueden probar, además agrega que el producto de la exploración hidrogeológica básica en una zona determinada es un modelo conceptual

del sistema hidrogeológico existente, según Custodio & Llamas (1996) la exploración de aguas subterráneas, se define como el conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se puede obtener agua en cantidad y de calidad adecuada para el fin que se pretende.

Para Córdoba et al. (2012), los modelos hidrogeológicos se definen como representaciones físicas o numéricas de un sistema hidrogeológico real, que permite observar el comportamiento hidrogeológico de un acuífero como herramienta de investigación hidrogeológica, la cual se fundamenta en información proveniente de laboratorio y de campo.

Betancour et al. (2009), recalca que la calidad de los modelos hidrogeológicos obtenidos depende de la calidad de la información disponible para su construcción, la que a su vez está limitada por la disponibilidad de recursos financieros. Además, señala que un modelo hidrogeológico contiene numerosas interpretaciones cualitativas y subjetivas y la prueba de su validez sólo se logra mediante la aplicación de técnicas de investigación específicas.

A- Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas se conforman a partir de un conjunto de elementos hidrogeológicos básicos denominados acuíferos, los cuales se definen según Custodio & Llamas (1996), como un estrato o formación geológica que permite la circulación (almacenar y transmitir) agua por sus poros o grietas en cantidades económicamente apreciables para cubrir las necesidades humanas. La permeabilidad intrínseca de los acuíferos debería estar en el rango de 10^{-2} darcys (Fetter, 2014). Las capas no asociadas a acuíferos y que se consideran capas confinantes, se subdividen en tres tipos: 1) acuitardos o capas semi-permeables, para aquellas formaciones geológicas que contienen agua en cantidades apreciables y la transmiten muy lentamente; 2) acuícludo, para aquellas que contiene agua y no la

trasmiten por lo que drenan con mucha dificultad; y 3) acuífugo, para aquellas formaciones geológicas que ni contienen agua ni la pueden transmitir.

B- Tipos de Acuíferos

Los acuíferos se dividen en tres tipos (González de Vallejo, 2002):

- a. Acuíferos libres: aquellos cuyo nivel de agua se encuentra por debajo de nivel del techo de la formación permeable, son muy susceptibles al bombeo de pozos registrando un importante descenso del nivel y radios de influencia cortos. En estos acuíferos la superficie piezométrica también corresponde a la superficie freática.
- b. Acuíferos semi-confinados: son aquellos se encuentran sobreyacido por un acuitardo, que permite la recarga directa por goteo de un acuífero superior, el nivel de agua o piezométrico, se localiza por encima del techo del acuífero. Los valores tanto de bombeo de pozos como los radios de influencia, corresponde a rangos intermedios.
- c. Acuíferos confinados: son aquellos cuyo nivel de agua o piezométrico, está por encima del techo del acuífero, y se encuentra de forma confinante por debajo de capas que pueden considerar acuícludo o acuífugo. Los conos de bombeo de los pozos son de menor altura, pero los radios de influencia son grandes.

6.2 Parámetros Hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos que definen un acuífero y su potencial hídrico son (González de Vallejo, 2002):

A- Porosidad (n): se define como el volumen de espacios vacíos (V_V) entre el volumen total (V_T)

$$n = \frac{V_V}{V_T}$$

Sin embargo, es la porosidad efectiva o eficaz (n_e) es la que condiciona la facilidad del flujo de agua a través de las formaciones geológicas, pues es la que interconecta los poros. La porosidad efectiva se define como el volumen de agua libre (V_L) generada por la acción de la gravedad, entre el volumen total (V_T), según:

$$n_e = \frac{V_L}{V_T}$$

A partir de la porosidad efectiva o eficaz (n_e) se puede determinar la capacidad de retención específica (s_r) del acuífero, esta se define por:

$$s_r = n - n_e$$

La porosidad eficaz se ve afectada por el tamaño del grano, y su concepto difiere de la porosidad total. La figura 12, muestra la relación entre la porosidad efectiva y la granulometría de materiales no consolidados

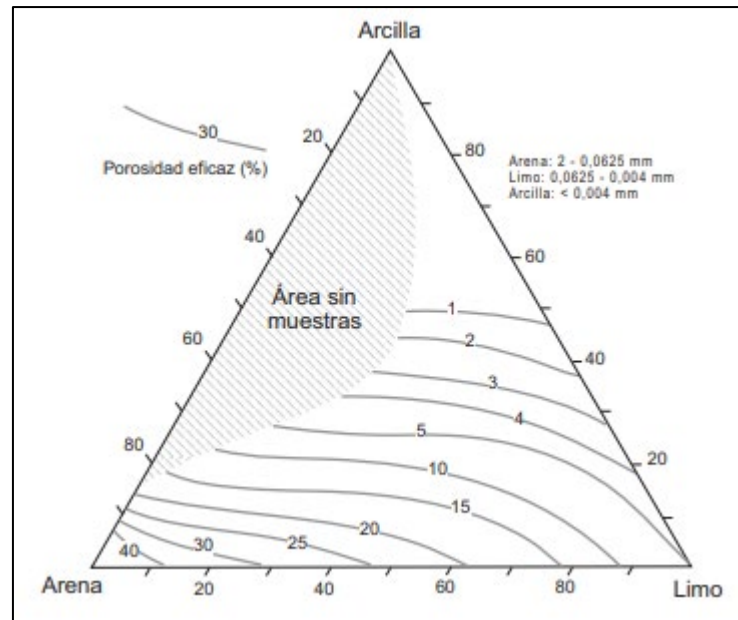


Figura 12. Gráfico de variación entre la porosidad efectiva y la granulometría de materiales inconsolidados (Johnson 1967, Tomado de Sánchez, 2017).

B- Conductividad Hidráulica (K) (Weight, 2008; Bear, 1972; Sánchez, 2017)

La ley de Darcy establece que el caudal (Q) obtenido en un medio es directamente proporcional a la permeabilidad propia de cada material y fluido (K), a la sección unitaria (A) normal al flujo y al gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta l$).

$$Q = K A \left(\frac{\Delta h}{\Delta l} \right)$$

Siendo, el gradiente hidráulico o piezométrico definido por:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Donde K se conoce también como permeabilidad de Darcy o conductividad hidráulica, y se puede definir en relación a Q como:

$$Q = -K A i$$

El signo negativo permite que el caudal sea positivo, ya que el nivel en sentido del flujo disminuye (Δh) y por lo tanto su diferencia presenta valores negativos. Las unidades de Q se definen como volumen entre tiempo (L^3/T), y la conductividad hidráulica como una velocidad (L/T).

En la ecuación de Darcy, la conductividad hidráulica (K) depende tanto de las características texturales del medio físico como del fluido.

Y se define como:

$$K = k_i \frac{\gamma}{\mu}$$

Donde k_i es la permeabilidad intrínseca o coeficiente de permeabilidad, γ es el peso específico del fluido y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

La permeabilidad intrínseca denominada k_i se define como la relación entre el factor de forma C y el diámetro medio del poro al cuadrado D .

$$k_i = C d^2$$

La permeabilidad intrínseca (k_i) en unidades de área [L^2]

El factor de forma (C), es una constante adimensional relacionada con la configuración del fluido

El diámetro promedio de los poros del material (d), en unidades de longitud [L]

Asumiendo que la viscosidad dinámica (μ) corresponde a la viscosidad cinemática (ν) por la densidad (ρ), donde la viscosidad del fluido varía con la temperatura.

$$\mu = \nu * \rho$$

La viscosidad cinemática (ν) en unidades de área y tiempo [L^2/T]

La densidad (ρ) en unidades de masa y volumen [M/L^3]

La viscosidad dinámica (μ) en unidades de masa entre longitud y tiempo [$M/L*T$]

Y el peso específico (γ) corresponde a la densidad (ρ) por la gravedad (g), se tiene que, la conductividad hidráulica se puede expresar en términos de la viscosidad y la gravedad:

$$K = k_i * \frac{g}{\nu}$$

La densidad (ρ) en unidades de masa y volumen [M/L^3]

La gravedad (g) en unidades de longitud y tiempo al cuadrado [L/T^2],

El peso específico (γ) en unidades de masa-fuerza y volumen [Mf/L^3]

La ecuación de Darcy, también puede expresarse en términos de las variables de K, como:

$$Q = - \frac{Cd^2g}{\nu} A \left(\frac{\Delta h}{\Delta l} \right)$$

A pesar de esta relación, la variación del fluido en el agua subterránea a nivel regional es despreciable y se tiende a utilizar la K como “la permeabilidad del medio poroso”, sin embargo, por definición no es el término correcto.

C- Transmisividad (T)

Evalúa la capacidad de transmitir agua en los acuíferos, teniendo en cuenta la textura del material, las características del fluido y las características estructurales o geométricas.

Se define como el producto de la conductividad hidráulica (K) y el espesor (b)

$$T = K * b$$

Las unidades de la transmisividad se dan en área entre tiempo (L²/T).

D- Coeficiente de Almacenamiento (S)

Corresponde a la capacidad que presenta un acuífero de liberar el agua, en un modelo correspondiente a un prisma de base unitaria, se define como la equivalencia del descenso de 1 m del nivel piezométrico por liberación elástica del medio.

La liberación total del agua por liberación elástica, será la suma de sus dos volúmenes:

$$S = \Delta V_W + \Delta V_A$$

Donde: ΔV_W es el agua cedida en la descompresión del agua contenida en el acuífero y ΔV_A diferencia del valor del volumen inicial del acuífero con respecto al agua que cederá en la descompresión.

En acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento esta igual a la porosidad eficaz o efectiva y S es conceptualmente adimensional.

está dado por:

$$S' = S + n_e$$

Los valores típicos de S para los acuíferos son según la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de Almacenamiento para los diferentes acuíferos (Tomado de Sánchez, 2017).

Tipo de acuífero	Rangos de Almacenamiento (S)	Característica del almacenamiento
Acuíferos Libres	0,3- 0,01	El agua viene del vaciado de los poros
Acuíferos semiconfinados	$10^{-3} - 10^{-4}$	El agua viene de la descompresión y goteo de las capas confinantes
Acuíferos confinados	$10^{-4} - 10^{-5}$	El agua proviene de la descompresión

6.2.1 Niveles Piezométricos

También llamado altura piezométrica, corresponde a la suma de las alturas de posición y presión de una columna de agua, y está dada por:

$$h_A = z_A + \frac{P_A}{\gamma_w}$$

Donde γ_w es el peso específico del agua, z_a altura de posición y P_a altura de presión.

La superficie piezométrica une los puntos de igual nivel piezométrico dentro de la formación, y se obtienen mediante medidas directas de niveles de pozos, sobre un mismo acuífero, cuando dichas líneas cortan la superficie topográfica se generan una naciente o manantial.

Las líneas que unen iguales niveles estáticos (piezométricos) se denominan equipotenciales, las cuales son paralelas a las líneas de carga y descarga del acuífero, y perpendiculares a las direcciones de flujo.

6.3 Ensayos para determinar la Conductividad Hidráulica

6.3.1 Ensayos de Lugeon

Sánchez (2017) & Gonzalez de Vallejo et al, (2002), mencionan que los ensayos de *Lugeon* son realizados usualmente para fines geotécnicos, los mismos consisten en inyectar dentro de una perforación sin armadura, una carga de agua a diferentes valores de presión manométrica en un rango de tiempo determinado, esta presión se ejerce hacia las paredes laterales y confinadas, mediante el uso de obturadores, en un tramo específico perforado, lo que finalmente permite obtener valores de permeabilidad puntual, así como el comportamiento de la porosidad efectiva y el régimen del agua en un determinado espesor litológico.

Los ensayos de *Lugeon* se basan en el modelo analítico desarrollado para los acuíferos confinados (Método de Theis), por lo que se define como:

$$k = \frac{Q}{2\pi L H_t} \log_e \left(\frac{L}{r_p} \right)$$

Donde:

k = Permeabilidad (L/T)

Q= Caudal (L³/T)

H_t= presión aplicada en la zona ensayada (L), se considera como la suma de la presión manométrica y profundidad del nivel estático respecto al manómetro; en caso de que el tramo ensayado se encuentre sobre el nivel estático se considera como la suma de la presión manométrica y el punto medio del tramo ensayado.

L= Longitud del tramo ensayado

r_p = radio del pozo

El ensayo (Figura 13) consiste básicamente en inyectar agua a una presión constante de 1 MPa (10 kp/cm²) en un tramo obturando de la perforación durante 10 minutos. Normalmente se ensayan secciones de 5 m de longitud como máximo, los cuales se aíslan del resto de la perforación mediante obturadores. Durante el transcurso del ensayo se va midiendo la admisión lateral de agua, en las paredes de la roca expuesta. La presión se va aplicando en escalones de carga y descarga de 0, 1, 2, 5 y 10 kp/cm², en cada incremento de rango se debe mantener la presión durante un lapso de 10 minutos, hasta finalmente alcanzar la presión de 10 kp/cm², esta presión máxima se omite en materiales identificados como rocas blandas, o no consolidadas en las que podría producir una fracturación hidráulica. El ensayo proporciona los resultados en unidades *Lugeon*, que se corresponden con 1 litro de agua inyectado en el macizo por un metro de longitud durante un minuto de ensayo. Una unidad *Lugeon* es equivalente a una permeabilidad de 10⁻⁵ cm/s. (Gonzales de Vallejo, 2002, Geotecniafacil, 2019)

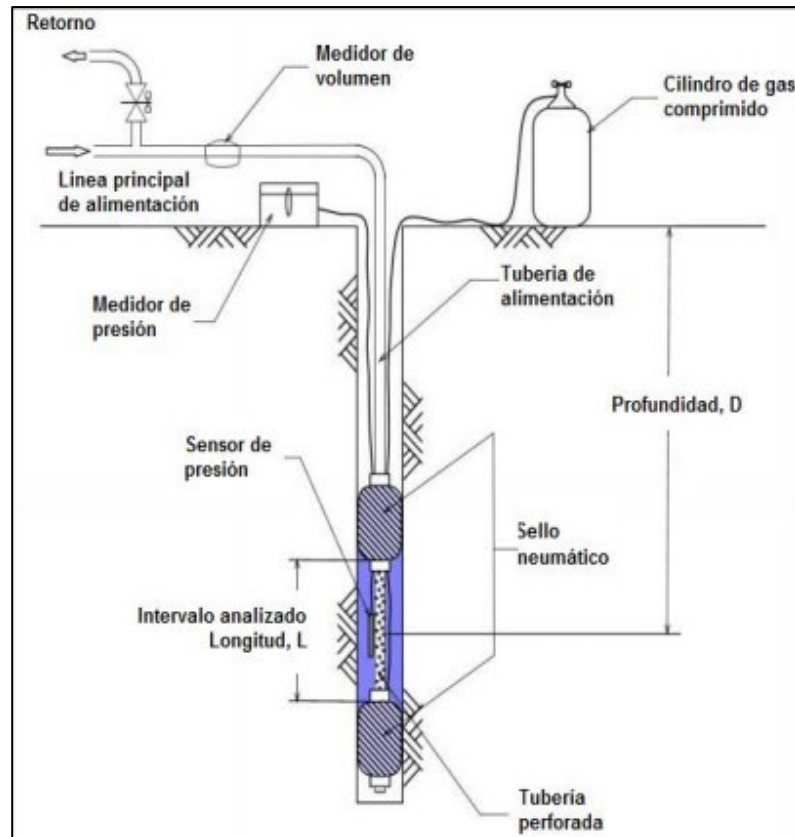


Figura 13. Esquema de ensayo de *Lugeon* (Tomado de Quiñones-Rozo, 2010)

La ventaja del ensayo de *Lugeon*, es que puede realizarse en cualquier litología y estado de fracturación, además que se puede utilizar como un valor semicualitativo de la permeabilidad de los macizos rocosos.

Los valores de permeabilidad obtenidos mediante ensayos de *Lugeon*, en macizos rocosos sanos poco permeables corresponden al orden de 10^{-8} a 10^{-10} cm/s, en caso de macizos porosos, fracturados y permeables, los valores rondan los 10^{-3} a 10^{-2} cm/s.

Existen 5 tipos de comportamiento (Figura 14) en las curvas de *Lugeon* (Abanto, 2018):

PATRONES DE RESULTADOS DE PRUEBAS LUGEON						
Tipo de Flujo	Etapas	Patrones Lugeon	Interpretación de Patrones	Valor a Usar	Interpretación	Curva de interpretación
Flujo Laminar	1º		Los 5 valores Lugeon son aproximadamente iguales	Se usa el promedio de los 5 valores	Fracturas finas aproximadamente iguales, existe una relación lineal similar. Fracturas finas y relleno granular, esta asociado a valores menores de 3 UL.	
	2º					
	3º					
	4º					
	5º					
Flujo Turbulento	1º		El valor Lugeon mas bajo ocurre en la presión máxima.	Se usa el valor Lugeon para la presión máxima	La absorción a la máxima presión es relativamente menor que las presiones intermedias y mínimas. Se explica por fracturas de diferente grosor, esta asociada a valores mayores de 4 UL.	
	2º					
	3º					
	4º					
	5º					
Flujo Dilatación	1º		El valor Lugeon mas alto ocurre en la presión máxima	Se usa el valor Lugeon para las presiones mínimas y medias.	A presión máxima hay una dilatación temporal de la abertura y se comprime momentáneamente el relleno por efectos de la presión de agua y la absorción es mayor, el proceso es reversible y las fracturas serán elásticas.	
	2º					
	3º					
	4º					
	5º					
Flujo Erosión	1º		Los valores Lugeon aumentan en el proceso de la prueba (por cambios en el medio rocoso)	Se usa el valor lugeon mas alto	El material fino de las fracturas es lavado, la absorción se incrementa con el tiempo, las flechas son en sentido horario	
	2º					
	3º					
	4º					
	5º					
Flujo relleno	1º		Los lugeones decrecen en el proceso de la prueba (los vacíos son gradualmente rellenos)	se usa el valor Lugeon mas bajo	Por aberturas son gradualmente rellenas y selladas a medida que transcurre el ensayo, la absorción decrece en función al tiempo en sentido antihorario. La disminución se debe a la resistencia capilar de penetración de agua en fracturas finas.	
	2º					
	3º					
	4º					
	5º					

<p>CLASIFICACIÓN DEL VALOR LUGEON REPRESENTATIVO</p> <p>0 - 1 : U.L. MUY FAVORABLE</p> <p>0 - 3 : U.L. FAVORABLE</p> <p>3 - 10 : U.L. DESFAVORABLE</p> <p>> 10 : U.L. MUY DESFAVORABLE</p>	<p>EQUIVALENCIAS APROXIMADAS</p> <p>10⁻¹ : 6000 lts</p> <p>10⁻² : 600 lts</p> <p>10⁻³ : 60 lts</p> <p>10⁻⁴ : 6 lts</p> <p>10⁻⁵ : 0.6 lts</p> <p>10⁻⁶ : 0.06 lts</p>	<p>U.L. : 1 x 10⁻⁴ cm/s</p> <p>U.L. : 1.67 x 10⁻⁵ cm/s</p> <p>U.L. : 1.30 x 10⁻⁵ cm/s</p>
--	--	--

Figura 14. Tipos de flujos interpretados por los ensayos de *Lugeon* (Tomado de Abanto, 2018).

I. Flujo laminar

El flujo laminar se produce cuando los resultados de permeabilidad del ensayo son aproximadamente iguales e independientemente de la presión aplicada y si estamos en la rama de carga o descarga del ensayo.

II. Flujo turbulento

El flujo turbulento tiene lugar cuando con la presión más alta se obtiene el menor valor de permeabilidad y con las presiones más bajas, tanto en carga como en descarga, los mayores resultados de permeabilidad *Lugeon* y más o menos del mismo valor.

III. Dilatación de diaclasas

Se produce cuando con la mayor presión se obtiene un valor de permeabilidad significativamente más elevado al resto de presiones. El resto de los valores *Lugeon* son significativamente similares.

Se interpreta, como una apertura de fracturas del tipo elástico. En el que la fractura vuelve a cerrarse después del ensayo. Si durante la descarga, se obtuvieran valores de permeabilidad elevados sería síntoma de una apertura permanente de las fisuras o limpieza de las mismas.

IV. Lavado de diaclasas

El lavado de diaclasas se lleva a cabo cuando se produce un incremento de la permeabilidad con el aumento de la presión del ensayo y sigue aumentando dicha permeabilidad, aunque se produzca la reducción de la presión durante la descarga.

Se produce un lavado del material que rellena las fisuras y, es un indicador de que la presión utilizada en el ensayo es demasiado elevada.

V. Llenado de vacíos

Se trata de un decrecimiento de los valores de permeabilidad, tanto en la carga como en la descarga de la prueba.

6.3.1.1 Consideraciones de los ensayos de Lugeon

Según Fuentes (2014), al evaluar el ensayo de *Lugeon* a partir de la relación entre la conductividad hidráulica en un macizo cristalino, rocoso y fracturado, con las

características de las discontinuidades y su análisis vectorial, determina que existe poca congruencia al asociar la permeabilidad obtenida mediante *Lugeon* como la conductividad hidráulica, pues los ensayos de *Lugeon* asumen un medio poroso confinado basado en el análisis de recarga de un acuífero, en un modelo físico de pozo de bombeo invertido o *slug test* (Badillo & Rodríguez, 1989), por lo que equiparar valores de permeabilidad de *Lugeon* con la conductividad hidráulica de un acuífero fracturado, trae errores asociados por las consideraciones iniciales del ensayo (Schneider, 1982).

6.3.2 *Ensayos tipo Slug Test*

Para determinar los valores de conductividad hidráulica (K) “*in situ*” en un acuífero, se pueden realizar dos tipos de ensayos dentro de los piezómetros ya armados, un primer ensayo que implica extracción de una determinada carga de agua a lo largo del tiempo, denominado Prueba de Bombeo; y un segundo ensayo que implica inyectar un caudal dentro del piezómetro, el cual permite elevar la carga de agua dentro del mismo y determinar su descenso a lo largo del tiempo, denominado *Slug Test*.

Entre los métodos para interpretar los datos de los ensayos tipo *slug test*, se encuentran los siguientes (Tabla 7)

Tabla 7. Comparación de métodos utilizados en los ensayos tipo *slug test* para la obtención de la conductividad hidráulica (K).

Método de interpretación	Tipo de acuífero	Limitaciones o Ventajas	Ecuación y parámetros que involucra:
① Hvorslev (Fetter, 2014 y Freeze & Cherry, 1929)	Libres Confinados	No requiere una rejilla completamente penetrante al acuífero	conductividad hidráulica K $K = \frac{r^2 \ln \frac{L}{R}}{2LT_0} \quad \text{aplica si } \frac{L}{R} > 8$ <p><i>r</i> = radio del pozo <i>R</i> = radio efectivo del piezómetro <i>L</i> = Longitud de la rejilla del piezómetro <i>T</i>₀ = tiempo al 0,37 del descenso con respecto al nivel inicial (gráfico <i>H-h/H-H₀</i> vrs Tiempo)</p>
② Cooper-Bredehoeft-Papadopulos (Fetter, 2014 y Freeze & Cherry, 1929)	Confinados	Rejilla completamente penetrante al acuífero Pozos de gran diámetro	Almacenamiento S, Transmisividad T, K conductividad hidráulica $T = \frac{Wr_c^2}{t}$ $S = \frac{\mu r_c^2}{r_s^2}$ $K = \frac{T}{b}$

			<p>μ = ecuación de la curva patrón con la que se comparan los datos</p> <p>W = Valor del eje axial proyectado de las curvas patrón (usualmente se usa valor de 1)</p> <p>r_c = radio efectivo del pozo</p> <p>r_s = radio efectivo del piezómetro</p> <p>t_1 = valor obtenido al sobreponer los datos a las curvas patrón cuando $W=1$</p> <p>b = espesor del acuífero</p>
3	Bouwer-Rice (Bouwer-Rice,1976; en: Manual Aquifer Test Pro 9.0)	Libres Confinados	<p>No hay flujo por encima del nivel freático.</p> <p>Rejilla parcial o completamente penetrante al</p> <p>Conductividad hidráulica K</p> $K = \frac{r_s^2 \ln \frac{R_{cont}}{r_c}}{2L} * \frac{1}{t} * \ln \left(\frac{h_e}{h_t} \right)$ <p>r_s = radio efectivo del piezómetro</p> <p>r_c = radio efectivo del pozo</p> <p>R_{cont} = distancia radial a partir de la cual la influencia de la carga de agua es disipada en el acuífero.</p> <p>L = longitud de la rejilla</p> <p>b = espesor del acuífero</p> <p>h_t = diferencia del cambio del nivel a lo largo del tiempo</p> <p>h_0 = nivel inicial de la carga de agua incorporada en el piezómetro.</p>

④

High-K Butler
(Butler et al., 2003
en: Manual Aquifer
Test Pro 9.0)

Libres
Confinados

Rejillas parcialmente
penetrantes al acuífero

Para acuíferos con alta
conductividad hidráulica

$$w_d(t_d) = e^{-\frac{C_D}{2}t_d} \left[\cos(\omega_d t_d) + \frac{C_D}{2\omega_d} \sin(\omega_d t_d) \right]$$

Para $C_D < 2$

$$w_d(t_d) = e^{-t_d} (1 + t_d)$$

Para $C_D = 2$

$$w_d(t_d) = \left(\frac{1}{\beta_1 - \beta_2} \right) [\beta_1 e^{\beta_2 t_d} - \beta_2 e^{\beta_1 t_d}]$$

CD = valor adimensional

g = valor de gravedad

H_0 = nivel inicial de la carga de agua incorporada en el
piezómetro

L_e = nivel estático

t_d = parámetro de tiempo adimensional

w = derivada del nivel estático en el pozo

w_d = normalización de la derivada del nivel de agua en el pozo
(w/H_0)

$$\beta_1 = -\frac{C_D}{2} - \omega_d \quad \beta_2 = -\frac{C_D}{2} + \omega_d$$

ω_d = parámetro de frecuencia adimensional

$$\omega_d = \left| \sqrt{1 - \left(\frac{C_D}{2}\right)^2} \right|$$

Los valores de K son estimados para:

1. Acuíferos libres *Bower y Rice* para:

$$K = \frac{t_D}{t} \frac{r^2 \ln(R_e/r_w)}{2LC_D}$$

2. Acuíferos confinados *High-K Hvorslev*

$$K = \frac{t_D}{t} \frac{r^2 \ln \left[\frac{L}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_w}\right)^2} \right]}{2LC_D}$$

5	Dagan (Dagan, 1978 en: Manual Aquifer Test Pro 9.0)	Libres	Rejilla atraviesa el acuífero libre La longitud (L) de la rejilla es mayor al radio (R) del pozo $L/R > 50$	Conductividad hidráulica K $K = \frac{r_c^2 \left(\frac{1}{P}\right)}{2LT_0}$ $r_c = \text{radio del pozo}$ $L = \text{Longitud de la rejilla del piezómetro}$
---	--	--------	--	---

				<p>T_0= tiempo al 0,37 del descenso con respecto al nivel inicial (gráfico $H-h/H-H_0$ vs Tiempo)</p> <p>P= valor adimensional del flujo</p>
⑥	Binkhorst and Robbins Binkhorst and Robbins,1998 en Manual Aquifer Test Pro 9.0)	Confinados	<p>Acuíferos granulares (arenas)</p> <p>Rejilla cruza y atraviesa el acuífero</p> <p>Las arenas deben tener al menos una conductividad de dos órdenes de magnitud mayor que la roca confinante</p>	Utiliza la ecuación de Bouwer & Rice, para el cálculo de la conductividad hidráulica (K)
⑦	Gilg-Gavard (Sánchez, 2017)	Libres Confinados	<p>Comúnmente utilizado para fines geotécnicos</p> <p>Rejilla completamente penetrante al acuífero</p>	<p>Conductividad hidráulica K</p> $K = \frac{1,308d^2 \Delta h}{Ah_m \Delta t}$ <p>Δt= intervalo de tiempo en que se midió el descenso Δh= diferencia del descenso d= diámetro efectivo del pozo A= factor de forma (Custodio 1983) L= longitud de rejilla</p> <p>Si $L > 6$ $A = (1,032 * L + 30d)$ Si $L \leq 6$</p>

			$A = (1.032 * L + 30d) * (-0.14L^2 + 0.178L + 0.481)$ <p><i>h_m</i>= nivel medio en el intervalo Δ<i>t</i></p>
⑧	Lefranc (Sánchez, 2017)	Libres Confinados	<p>La zona filtrante tenga un diámetro igual o distinto a la entubación del piezómetro.</p> <p>Rejilla completamente penetrante al acuífero</p> <p>Comúnmente utilizado para fines geotécnicos</p> <p>Conductividad hidráulica K</p> $K = \frac{d_s^2 \ln\left(\frac{2L}{d}\right)}{8Lt} \ln \frac{h_1}{h_2}$ <p><i>h₁, h₂</i>= altura del agua al principal y al final de ensayo <i>t</i>= tiempo transcurrido entre los niveles <i>h₁</i> y <i>h₂</i>. <i>d</i>= diámetro del pozo <i>d_s</i>= diámetro del piezómetro</p>

Con base en la comparación de la tabla 3, y los parámetros solicitados para el análisis del ensayo, se determina que el método de Hvorslev se adapta a cualquier tipo de acuífero, en caso de desconocer si se trata de un acuífero libre o confinado, y a la incertidumbre del armado de los piezómetros en relación con el porcentaje de la rejilla que es realmente penetrante al acuífero.

6.3.2.1 Método de Hvorslev

El método consiste en incorporar agua al piezómetro y medir los descensos de la columna de agua a lo largo del tiempo, y corresponde a un tipo de interpretación del ensayo tipo *slug test*.

La Figura 15a, muestra los parámetros necesarios para incorporarlos a la ecuación de Hvorslev (Tabla 7). Particularmente el valor del tiempo T_0 , se obtiene al graficar los datos de caída del nivel normalizados a los valores entre 0 y 1, en una escala logarítmica, versus el tiempo total que le requirió al acuífero retomar al nivel estático previo al ensayo. El valor que corresponde al tiempo (T_0), se toma del valor 0,37, que corresponde al 37% del abatimiento del pozo (o 63% de recuperación), proyectado al eje axial (Figura 15b).

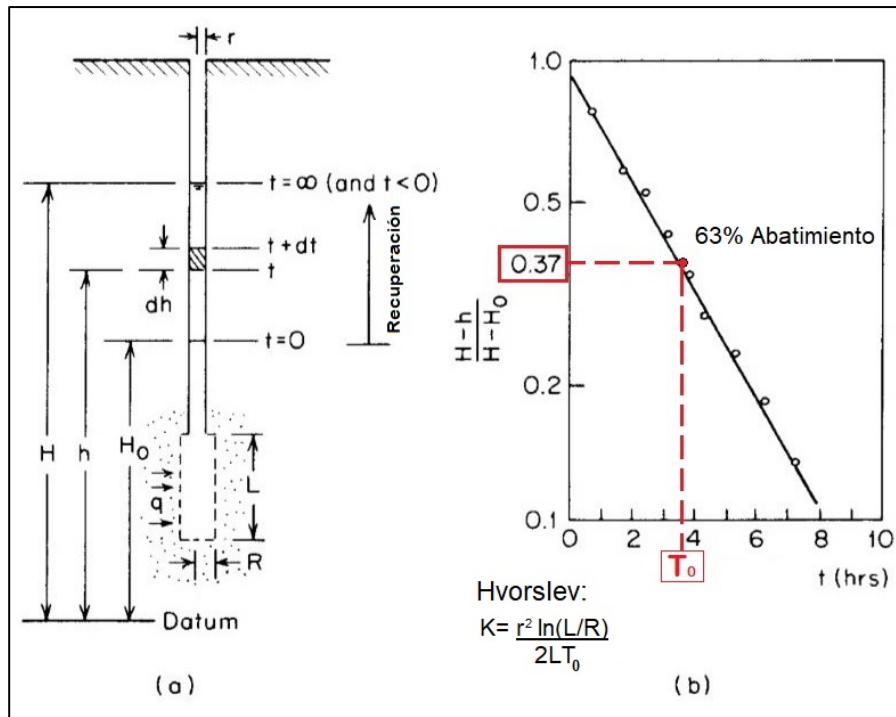


Figura 15. a) Geometría y parámetros necesarios de piezómetro para utilizar el método Hvorslev, b) Obtención del valor T_0 , a partir del 63% de recuperación o el 0,37. (Tomado y modificado de Freeze & Cherry, 1979)

En la ecuación de K , basada en el método de Hvorslev, se determina por la relación:

$$K = \frac{r^2 \ln \frac{L}{R}}{2LT_0}$$

Donde:

K = conductividad hidráulica (cm/s)

L = longitud de la rejilla (cm)

R = radio del pozo (cm)

r = radio del piezómetro (cm)

T_0 = t_{37} del gráfico (s)

Según Fetter (2014), en acuíferos muy permeables, en donde el nivel se recupera en 30 s o menos, o en acuíferos muy poco permeables, como en el caso de los granulares con un alto contenido de arcillas, se recomienda utilizar un registrador de datos (o *data logger* por su nombre en inglés) para adquirir las medidas de forma más precisa.

6.3.3 Ensayos con Permeámetro de carga constante

El permeámetro de carga constante se utiliza en suelos granulares, cuyos cilindros de ensayo deberán tener un diámetro mínimo de aproximadamente 8 a 12 veces el tamaño máximo de las partículas de la muestra a ensayarse. Para limitar la influencia de la consolidación durante el ensayo, la muestra debe tener una fracción de finos menor o igual al 10% del total de la muestra a ensayarse, o sea, partículas que pasen tamiz No.200 (75 μm) (ASTM D2434-68).

Este ensayo consta de dos reservorios cuyos niveles de agua son mantenidos constantes (Figura 16), de forma tal que mantengan la carga h , a lo largo de un rango de tiempo, el agua filtrada a través de la muestra es recolectada en un recipiente graduado.

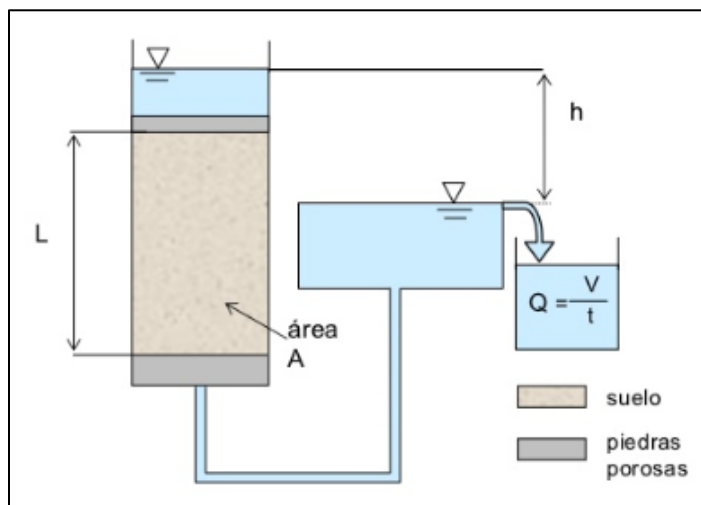


Figura 16. Esquema de permeámetro de carga constante. (Tomado de Angelone et al. 2006)

Conocidas la longitud L de la muestra ensayada, y el área de la sección transversal A, se calcula el valor de la conductividad hidráulica (K), a través de la ecuación:

$$K = \frac{QL}{Aht}$$

Donde:

Q= cantidad de agua medida en la probeta (cm³)

L= longitud de la muestra medida en el sentido del flujo (cm)

A= área de la sección transversal

h= diferencia del nivel entre el reservatorio superior e inferior (cm)

t= tiempo medido entre el inicio y el fin del ensayo (s)

6.3.4 Permeabilidad en Sedimentos

La conductividad hidráulica en los sedimentos de tipo arenas, puede ser estimada a partir del tamaño del grano, distribuido en la curva asociada al método Hazen. Este método sólo aplica para sedimentos donde el tamaño del grano (d_{10}) se encuentra entre 0,1 a 0,3 mm (Hazen (1911), en: Fetter (2014)).

Para lo cual la se aplica la ecuación:

$$K = C(d_{10}^2)$$

Donde:

K= conductividad hidráulica (cm/s)

d_{10} = tamaño del grano efectivo (cm)

C= coeficiente de forma adimensional, estimados a partir de los valores de la Tabla 8.

Tabla 8. Valores del coeficiente “C” utilizado en el método de Hazen (tomado de Fetter, 2014)

Características de las arenas d_{10}	C
Arenas muy finas, pobremente sorteada	40-80
Arenas finas con arcillas	40-80
Arenas medias bien sorteadas	80-120
Arenas gruesas pobremente sorteadas	80-120
Arenas gruesas bien sorteadas y limpias	120-150

Posteriormente Shepherd (1989), en Fetter (2014), analizó el comportamiento de la conductividad hidráulica con el tamaño de grano, y concluyó que se relacionaban según la ecuación:

$$K = C(d_{50}^j)$$

Donde:

C= factor de forma (adimensional)

d_{50} = medida promedio del tamaño del grano (mm)

j= exponencial (gráfica Figura 16)

Shepherd (1989, en Fetter, 2014), generó un gráfico en el que relaciona el diámetro promedio del grano con la conductividad hidráulica, para diferentes tipos de sedimentos (Figura 17).

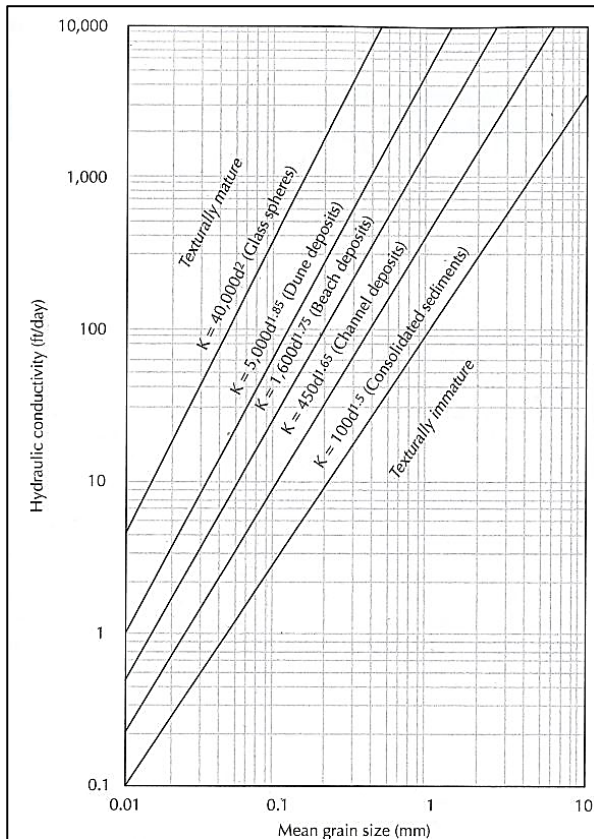


Figura 17. Gráfico de Shepherd, en el que se relaciona la conductividad hidráulica (K) y el diámetro promedio del grano en mm (Tomado de Fetter, 2014).

En el gráfico (Figura 17), el factor de forma (C) y el exponente (j), son valores altos para sedimentos texturalmente maduros, los cuales están bien sorteados y presentan alta esfericidad y redondez en los granos, cuyos valores de j son del orden de 2; por el contrario, en sedimentos consolidados o inmaduros ambos parámetros se reducen, y los valores de j pueden ser del orden de 1,5 (Shepherd (1989), en Fetter, 2014)

Los valores de C, en el gráfico son los que brindan el valor de conductividad hidráulica (K) en las unidades de pies/día (Fetter, 2014).

6.4 Métodos geofísicos

Kirsch (2010), menciona que los métodos geoelectricos son de especial interés para propósitos hidrogeológicos debido a que permiten diferenciar entre acuíferos compuestos por agua dulce y agua salada, acuíferos en arenas y materiales arcillosos de muy baja permeabilidad, así como entre acuíferos en rocas fracturadas y materiales rocosos poco fracturados.

Según Kirsch (2010), la resistividad corresponde a la dificultad u oposición que presenta un cuerpo al paso de una corriente eléctrica que circular a través de él. Para determinarlo se requiere el uso de dos electrodos de corriente A y B, y dos electrodos que midan la diferencia de potencial. En un medio homogéneo con un arreglo arbitrario la resistividad (ρ) puede ser calculada a partir de la corriente (I) y la diferencia de potencial (U) definido por:

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I}$$

Donde K, es denominado factor geométrico, calculado a partir del espaciamiento de los electrodos dado por la ecuación:

$$K^{-1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

Sin embargo, como los medios geológicos no son homogéneos la resistividad (ρ), se denomina resistividad aparente (ρ_a) (Kirsch, 2010).

6.4.1 Sondeos eléctricos verticales (SEV)

Para Auge (2008) consiste en un conjunto de determinaciones de la resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivos lineal y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción.

Kirsch (2010), menciona que la idea básica de un SEV para profundizar es incrementar la corriente a medidas que aumenta el espaciamiento en los electrodos, de forma que esas líneas equipotenciales penetren a la profundidad deseada.

Las configuraciones más comunes utilizadas para la distribución de los electrodos según Kirsch, (2010) corresponde con Schlumberger, medio-Schlumberger, Wenner y Dipolo-Dipolo, además existen otras configuraciones como Polo-Polo y Polo- Dipolo (Figura 18), entre muchas otras variaciones, utilizadas según las características del medio y los objetivos del estudio.

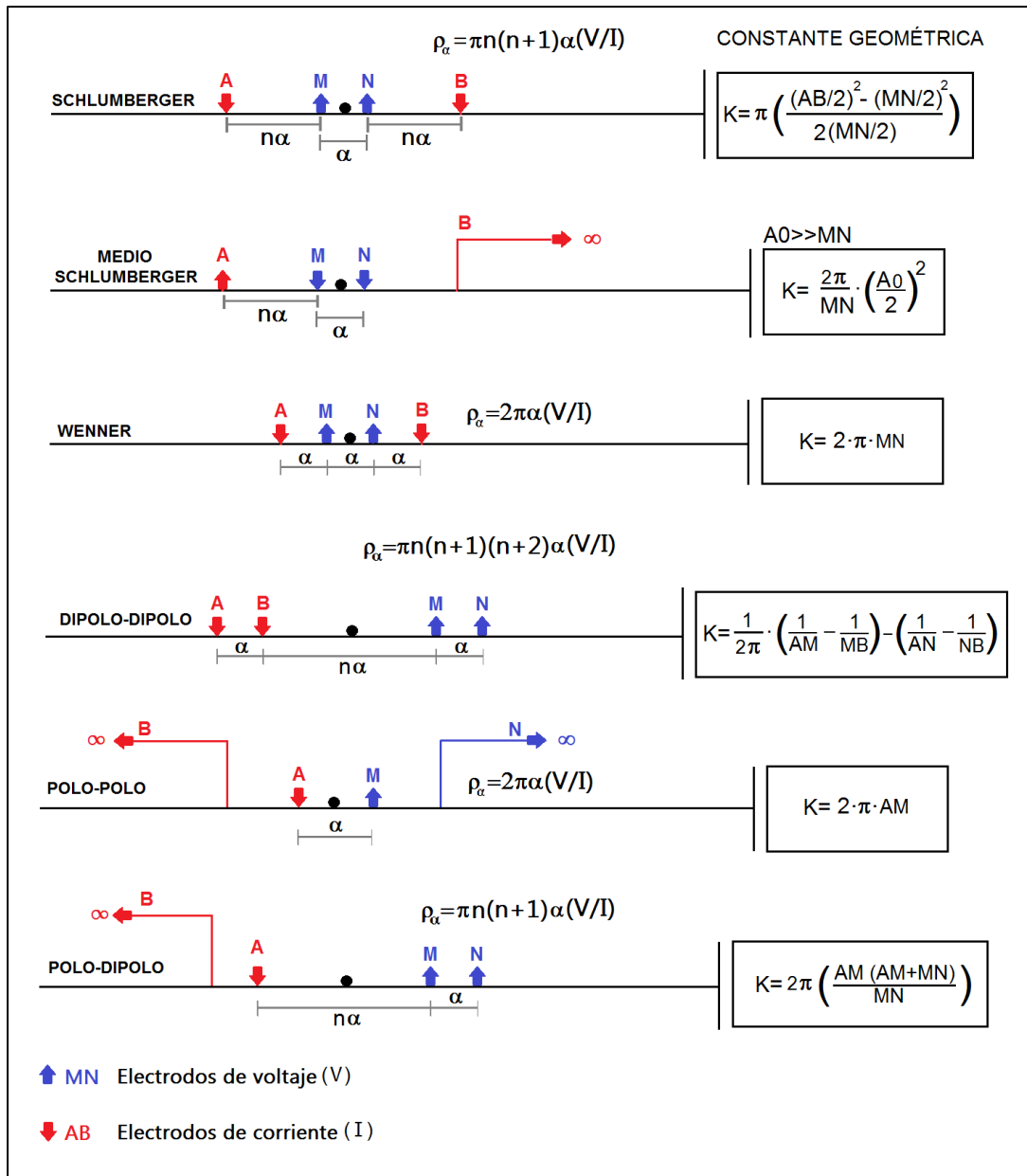


Figura 18. Distintas configuraciones de electrodos corriente y voltaje para los diferentes arreglos geométricos (Tomado y modificado de Loke, et al., 2013)

Debido a la practicidad y a la ventaja metódica, el dispositivo más empleado en los SEV es el Schlumberger, en cuya configuración los electrodos M-N se encuentran muy

cercanos entre sí, y se localizan fijos y céntricos entre los electrodos A-B, lo que permite un factor geométrico para $AB \gg MN$, según:

$$K_{SCHLUMBERGER} = \frac{\pi}{MN} \cdot \left(\frac{AB}{2}\right)^2$$

En algunas ocasiones se utiliza frecuentemente medio-Schlumberger (polo-dipolo), el cual provee ventajas cuando la topografía no permite realizar un Schlumberger completo (Kisch, 2010).

Teóricamente en el arreglo polo-dipolo, el electrodo B es desplazado al infinito, generando una distribución de potencial "0",

Con un factor geométrico de $A0 \gg MN$ (Kisch, 2010).

$$K_{MEDIO-SCHLUMBERGER} = \frac{2\pi}{MN} \cdot \left(\frac{A0}{2}\right)^2$$

En la configuración Wenner de un SEV, todos los electrodos son desplazados simultáneamente, siendo equidistante la separación entre ellos $AM=MN=NB$, y el factor geométrico viene dado por:

$$K_{WENNER} = 2 \cdot \pi \cdot a$$

En la configuración dipolo-dipolo, los electrodos A-B y M-N, se encuentran muy cercanos entre sí, generando una corriente dipolar y un potencial dipolar, generalmente los electrodos de corriente se mantienen fijos y los de potencial se desplazan. El factor geométrico viene a ser dado por:

$$K^{-1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

El objetivo de un SEV es la obtención de un modelo de variación de la resistividad aparente en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie. La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia A-B, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas.

Para generar y registrar un SEV se requiere, según Auge (2008), un circuito de emisión integrado por una fuente de energía, un amperímetro para medir la intensidad de la corriente, en los puntos de emisión (A y B) correspondientes a dos pines metálicos, y un circuito de recepción, compuesto por un milivoltímetro electrónico de alta impedancia y dos electrodos para la medición del potencial (M y N) no polarizables.

La finalidad del SEV es establecer la distribución vertical de la resistividad específica o real y por debajo del sondeo, tomando como base la curva de resistividad aparente (Auge, 2008). Esto no resulta sencillo pues la profundidad de investigación no es igual a $AB/2$ (Schlumberger) ni al parámetro " α " (Wenner), debido a que depende de la geometría de estos dispositivos y de los cambios de resistividades en el subsuelo. Con el objeto de disponer de órdenes de magnitud de los volúmenes involucrados, Auge (2008) explica que la mayor parte de la corriente inyectada, queda dentro de un paralelepípedo geológico (Figura 19) de un ancho $AB/2$, de un largo de $3 AB/2$ y de un espesor de $AB/4$.

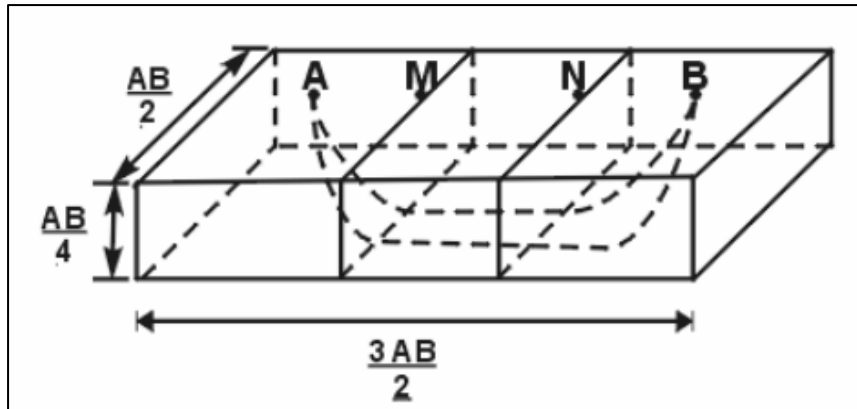


Figura 19. Distribución volumétrica de las curvas equipotenciales dentro de un perfil (Tomado de Auge, 2008).

6.4.2 Método de tomografía eléctrica 2D (ERT-2D)

La tomografía eléctrica o imagen resistiva (*resistivity imaging*) es un método eléctrico, que permite obtener una densificación de datos cuyos valores presentan una mayor sensibilidad a los cambios resistivos laterales. Parte del mismo principio de los SEV (Figura 20), para la adquisición de los datos de resistividad aparente, mediante el uso de una configuración geométrica mixta (Wenner-Schlumberger, Gradiente, etc) o tradicional (Dipolo-Dipolo, Schlumberger, Wenner), a partir de la cual se realiza un barrido continuo, lateral y profundo, de los valores de resistividad del terreno. Para lo cual se requiere un equipo programado para alternar automáticamente, los electrodos tanto de inyección como de corriente, de acuerdo con la configuración previamente escogida.

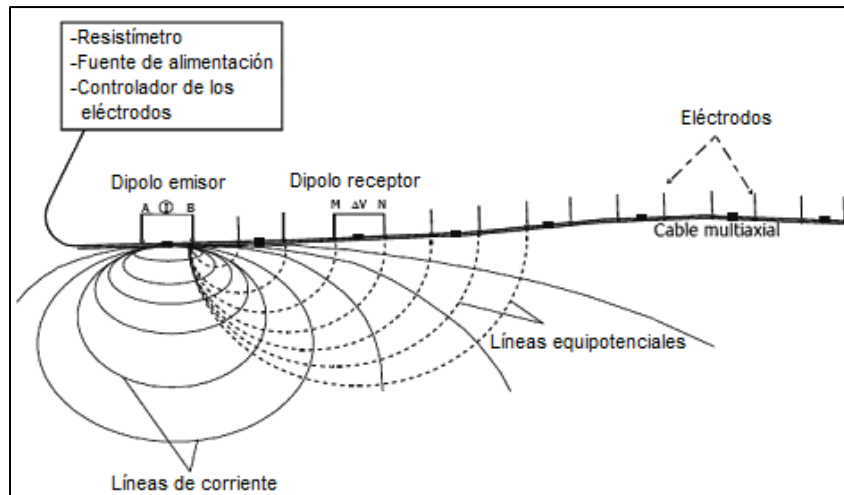


Figura 20. Distribución de las curvas equipotenciales a lo largo de un perfil utilizando un cable multieléctrodo con un arreglo dipolo-dipolo para un perfil tomográfico en 2D (Tomado y Modificado de IGC, 2011)

Los perfiles de tomografía eléctrica (ERT) son actualmente, los más utilizados dentro de la prospección eléctrica. Ya que miden las variaciones de la resistividad eléctrica de los materiales en el subsuelo, y aportan una imagen 2D detallada tanto en profundidad como lateralmente, de las capas que presentan diferentes comportamientos eléctricos.

Las configuraciones tradicionales de los perfiles de tomografía eléctrica (ERT) utilizan cuatro electrodos. A través de dos de ellos se inyecta una corriente eléctrica en el terreno y con los otros dos se mide la diferencia de potencial. A partir de los valores de corriente y de diferencia de potencial medidos se puede obtener la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo (Figura 20).

6.4.3 Método electromagnético en dominio del tiempo (TDEM o TEM)

Según Serralde (2011) los métodos de exploración electromagnética, fueron desarrollados principalmente por las escuelas suecas y rusas hacia 1920, éstos se

basan en establecer un campo electromagnético variable mediante el flujo de una corriente alterna por una bobina o un cable largo, denominados transmisor o emisor, el campo generado por éstos es denominado campo primario (Chelotti, et al. 2009).

El campo primario induce corrientes eléctricas alternas en cualquier conductor que encuentre en su recorrido de propagación, particularmente al incidir sobre la superficie de la Tierra, considerada como un conductor ($\sigma > 0$), comparada con el aire ($\sigma = 0$), el campo primario penetra verticalmente el interior del terreno generando corrientes eléctricas aleatorias, corrientes *eddy* o remolino

La intensidad de estas corrientes depende fundamentalmente de la resistividad del conductor y de la frecuencia del campo primario, su intensidad será mayor cuanto menor sea la resistividad del medio y cuanto mayor sea la frecuencia del campo inductor. Las corrientes alternas inducidas en el conductor (tierra) generan a su vez un campo electromagnético que se opone al campo primario, denominado campo secundario.

La interacción de los campos primario y secundario es detectada en un circuito eléctrico localizado en superficie, una bobina o un cable largo, denominado receptor, en general con características semejantes al circuito inductor o generador del campo primario.

Así, los sistemas de adquisición de los métodos electromagnéticos pueden considerarse como la interacción de tres campos electromagnéticos, el campo primario, el secundario y el observado en el receptor, de la relación entre el campo primario y el observado es posible inferir las características o propiedades electromagnéticas generadoras del campo secundario, esto es de la tierra, entendida como la zona de estudio y comportándose como un circuito eléctrico (Figura 21)

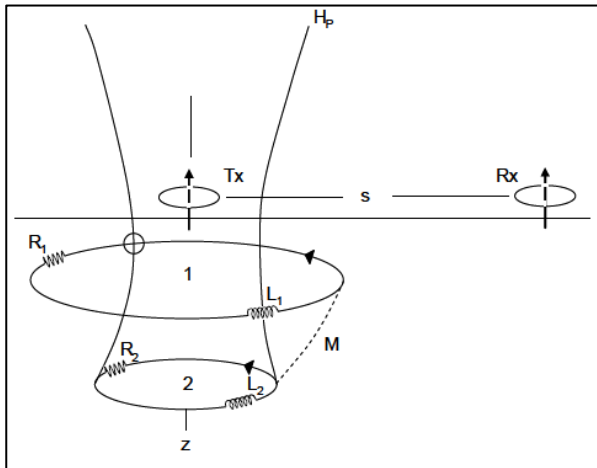


Figura 21. Representación esquemática del comportamiento de la Tierra como un circuito eléctrico Transmisor (Tx), Receptor (Rx), Separación entre los equipos (s), campo primario (H_p), Flujo campo primario (1), flujo del campo secundario (2), Resistencia eléctrica (RL), Inductancia mutua (M), dirección del flujo (z). (Tomado de Serralde, 2011).

Los sistemas de fuente controlada, además de la generación de pulsos, se consideran cuatro tipos fundamentales que dependen del tipo de circuito emisor: un dipolo vertical, un cable largo inductor, una bobina horizontal y una bobina vertical, para el receptor se pueden utilizar los mismos circuitos resultando 16 posibles configuraciones (Gómez, 2002; Serralde, 2011)

Según Serralde (2010) en cuanto a la frecuencia de la corriente alterna primaria, ésta se elige de manera tal que el campo electromagnético inducido por la presencia de las corrientes *eddy* en terreno, resulte significativa en el receptor, y se determina de acuerdo con las necesidades, tanto de penetración como del detalle requerido en el estudio. Aunque no es necesario tener contrastes de conductividad muy elevados, si resulta importante no tener un cubrimiento conductivo cuya respuesta sea muy alta y minimice la de conductores más profundos. Las mejores condiciones para su aplicación son una topografía suave y cubrimiento superficial de alta resistividad (Chelotti, I., et.al., 2009; McNeil, 2002).

6.4.4 Configuraciones de campo

A- Sondeos eléctricos verticales (SEV)

A partir de la geometría Schlumberger, el esquema se distribuye en cuatro electrodos incrustados en el terreno, conectado por cable de cobre aislado paralelo (calibre 12), hacia el equipo Syscal (Figura 22), el cual inyecta una corriente sobre el terreno en los electrodos AB, una vez que se detiene la inyección por períodos de milisegundos, se determina la diferencia de potencial de dicha corriente a través del terreno la cual es determinad por el equipo en los electrodos MN, de mediación de voltaje.

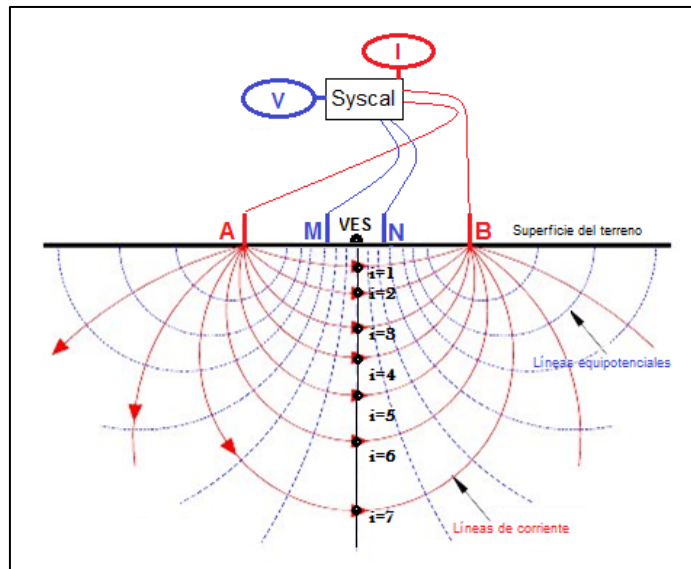


Figura 22. Esquema de disposición de un SEV con la configuración Schlumberger (Tomado y modificado de Todd, 1959)

B- Tomografía eléctrica 2D (*Imaging electric*)

A partir del uso de la geometría dipolo-dipolo, se distribuyen dos electrodos de corriente (A-B) unidos al equipo T3 y al RXU que es el receptor remoto que controla

el inicio de la toma de datos por parte de los receptores V8 acoplados al tendido por cada electrodo M_n-N_n (Figura 23).

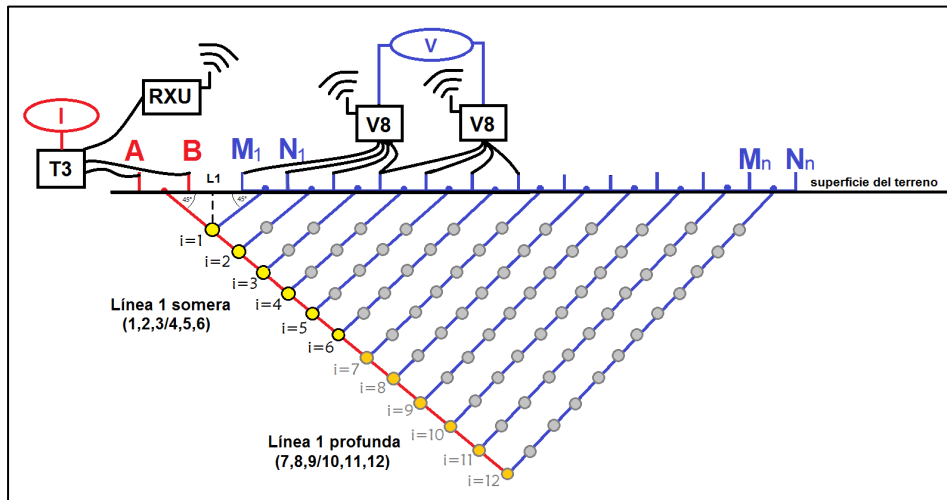


Figura 23. Esquema de la configuración dipolo-dipolo para la tomografía eléctrica.

C- Método electromagnético en dominio del tiempo (TDEM)

La configuración para un arreglo TDEM, consiste básicamente en colocar un lazo cable coaxial, simétrico en forma cuadrangular conectado al transmisor T3, en el centro del arreglo se coloca la bobina circular receptora, unida a la unidad V8 (Figura 24)

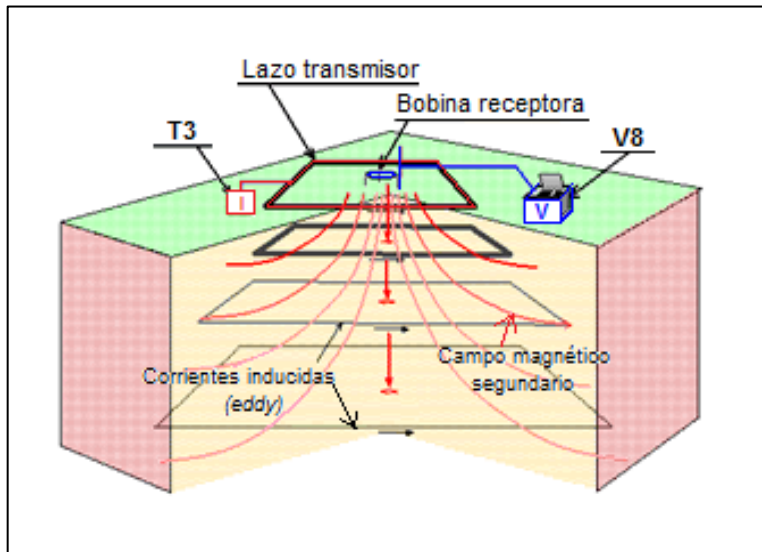


Figura 24. Esquema de la configuración TDEM (Tomado y modificado de TODA Corp, 2016).

La profundidad de investigación depende del tamaño de los lazos de cable y se prevé que sea aproximadamente cinco veces el tamaño de lazo. Es decir, un lazo transmisor de 50 m, normalmente tiene una profundidad de investigación de 250 m, por debajo de la superficie del suelo (BGS), y dependiendo de las propiedades litológicas de cada sitio.

La resolución vertical para determinar el espesor mínimo detectable de una capa; corresponde al 10% de la profundidad de investigación; o sea 10 m a una profundidad de 100 m o 20 m a una profundidad de 200 m. Sin embargo, estos parámetros de resolución se definen en cada sitio en función de la conductividad y la saturación de las formaciones del subsuelo.

6.4.5 Equipos utilizados

El equipo utilizado para realizar los SEV, corresponde con el modelo Syscal Pro de la casa Iris Instruments, el equipo tiene incorporado tanto el transmisor como el receptor de corriente. Presenta un voltaje máximo de 1000V en modo manual y una corriente de 2,5 A, posee pulsos duración de 0.2s, 0.5s, 1s, 2s, 4s, 8s. Muestra un filtro digital de 120 dB

para líneas de alta tensión 50 y 60 Hz, e incluye un proceso de corrección de deriva lineal de potencial espontáneo (SP) y desviación estándar.

Para los métodos electromagnéticos (TDEM), se utilizan los equipos de la empresa Phoenix Geophysics, los cuales consisten en dos equipos separados, los cuales consisten en un transmisor multipropósito modelo T-3 y un receptor V8; el transmisor emite un voltaje máximo de 1100 V, una corriente de 50 mA a 9 A.

La temporalización interna en el dominio del tiempo es de 32 Hz para 16 s y en el dominio de la frecuencia es de 10 kHz para 8 s. El receptor multifuncional modelo V8 (RXU-3ER) presenta rangos de frecuencia para lecturas corresponden entre los 10.000 Hz a 0.00005 Hz (20.000 s), y tiene una capacidad de almacenamiento de 96.000 muestras por segundo en cada canal.

6.4.6 Sensibilidad de los equipos

Según Sheriff (2006) la sensibilidad se define como la diferencia mínima en la variación de una cantidad que puede ser percibida por un instrumento, la validez se describe como el cambio mínimo del valor de lecturas que puede ser detectado en un dispositivo y puede ser fácilmente corroborado por otros medios; y la resolución como el cambio mínimo entre los datos la entrada en un instrumento que podría producir un cambio detectable en los datos de salida.

El equipo Syscal Pro utilizado para muestreos de SEV, presenta una precisión de 0,2%, una resolución en la lectura de 1 μ V.

El equipo de la casa Phoenix, T3 presenta un rango de regulación de la corriente de \pm 0.2% para una variación de \pm 10% en voltaje interno o impedancia de los electrodos. El equipo V8 presenta un rango de muestreo mínimo de frecuencia $0,5 \times 10^{-4}$ Hz.

6.4.7 Ventajas y desventajas de los métodos propuestos

En la Tabla 9, se resume las ventajas de los tres métodos geofísicos empleados.

Tabla 9. Comparación de las ventajas y desventajas de los métodos empleados

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Sondeo Eléctrico Vertical SEV	<ul style="list-style-type: none"> - Permite determinar variaciones verticales de la resistividad - Delimitación detallada de las primeras capas geoelectricas ($AB/2 \leq 10$ m) - Procesamiento de los datos fácil y rápido - Poco sensible a la interferencia del ruido ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> - Pierde detalle sobre las capas de poco espesor (< 5-10m) - Dificultad en la definición de contacto en terrenos con alto contrastes resistivos - Requiere mayor tiempo de recolección de datos - Requiere la manipulación y uso de grandes longitudes de cable unidos a los inyectores y receptores - Requiere mayor personal para agilizar los muestreos en campo
Tomografía Eléctrica 2D 2D	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible a terreno conductores - Pierde resolución en las primeras capas ($\approx 5-10$ m) - Tiende a deformar las capas, en terrenos con topografía abrupta - Alta sensibilidad a las variaciones laterales de resistividad 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere mayor tiempo de ordenamiento, reacomodo y procesamiento de los datos - Requiere un estricto orden durante la toma de datos.
Método Eléctromagnético en Dominio del Tiempo TDEM	<ul style="list-style-type: none"> -Alta sensibilidad a las variaciones de la resistividad de terrenos conductores (Arias, 1999) -Rápida adquisición de datos y uso del equipo en el terreno - Requiere terrenos planos con pendientes no superiores a los 20° 	<ul style="list-style-type: none"> -Pierde resolución en terrenos con altos valores resistivos (Arias, 1999) -Alta sensibilidad a la interferencia de corrientes eléctricas externas o ruido ambiental -Las lecturas puede ser afectadas por la presencia de estructuras metálicas (cercas, postes, líneas ferroviarias. ect)

6.4.8 Resistividad de las rocas

Astier (1975), indica que la conductividad en las rocas puede ser metálica o electrolítica. La conductividad metálica se caracteriza por el transporte de electrones en la matriz de la roca, mientras que la conductividad electrolítica se debe al desplazamiento de los iones contenidos en el agua dentro de los poros de la roca.

En rocas estratificadas, la resistividad varia con la dirección del flujo subterráneo, los valores mínimos y máximos de resistividad en diferentes direcciones de una misma capa, se relacionan a si la dirección del flujo es paralelo o perpendicular a la estratificación.

La Tabla 10, muestra los rangos de resistividad para diferentes tipos de materiales.

Tabla 10. Rangos de resistividad para diferentes tipos de materiales (Astier, 1975).

	Tipo material	Resistividad (Ohm*m)
AGUA	Agua de mar	0,2
	Agua de acuíferos aluviales	10-30
	Agua de nacientes	50-100
DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS	Grava saturada	100
	Arena y grava seca	1000-10.000
	Arena y grava seca con agua dulce	50-500
	Arena y grava seca con agua salada	0,5-5
	Arcillas	2-20
	Arenas arcillosas	50-300
	Calizas	300-10.000
DEPÓSITOS VOLCÁNICOS	Tobas volcánicas	20-100
	Lavas	300-10.000

VII. GEOLOGÍA

7.1 Geología Regional

A partir del mapa geológico de Costa Rica definido por Denyer & Alvarado (2007) se delimita la geología regional asociada al cantón de Bagaces que comprende las formaciones: Complejo de Nicoya ($\beta 2$), Cañas Dulces ($\alpha 4$), Curú (K-t1), Descartes (PE-t), Barra Honda (P-c2), Liberia ($\alpha 8$), Bagaces ($\alpha 6$), Monteverde ($\alpha 7$), Sabana Grande (K-cs) y los depósitos volcánicos recientes ($\alpha 9$) y cuaternarios (Q) (Figura 25).

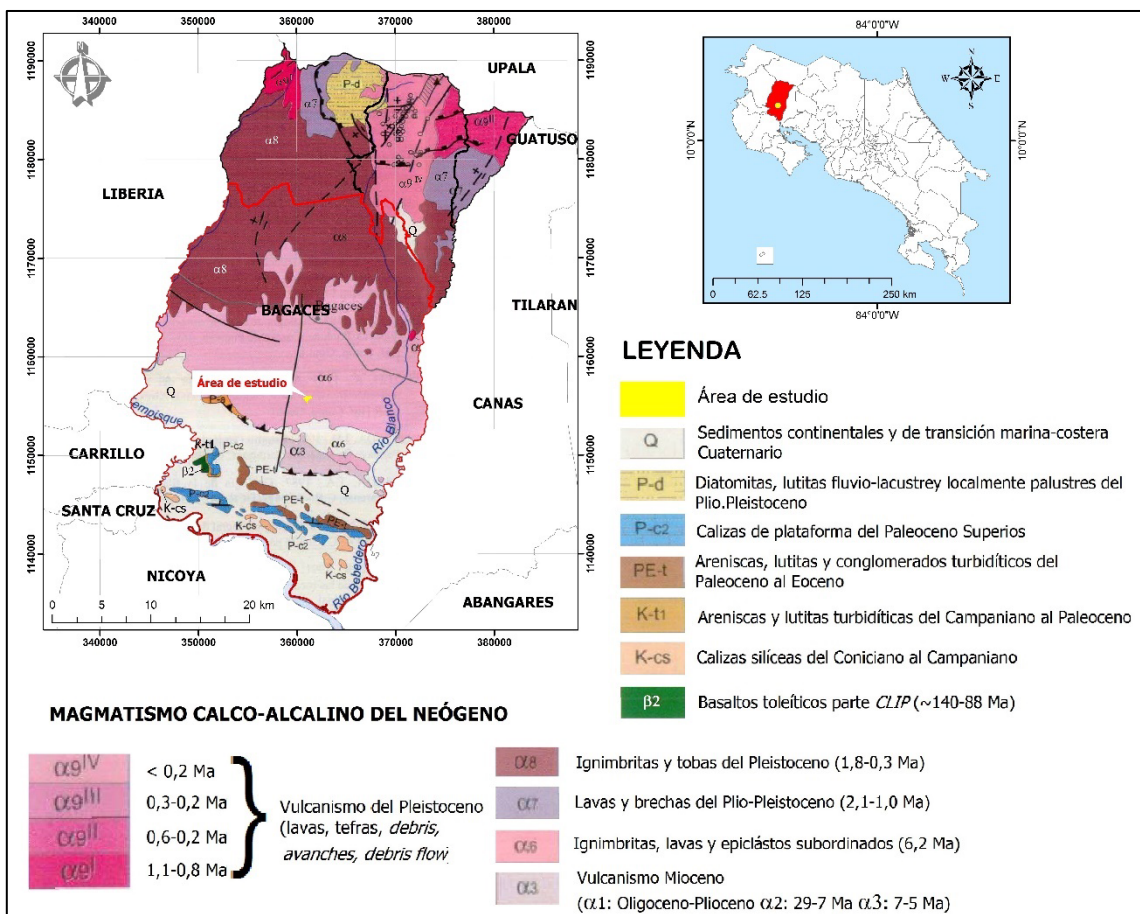


Figura 25. Sección del mapa geológico de Costa Rica 1: 400.000, correspondiente a el cantón de Bagaces, (Tomado de Denyer & Alvarado, 2007)

El sector donde se ubica el área de estudio corresponde a los depósitos asociados a la formación Bagaces, definida así por Dengo (1962). Varios autores han desarrollado mapas geológicos propios o cercanos al sitio, entre ellos se menciona a Calvo (1990), Jaccard & Munster (2000), y Flores (2003) quienes realizaron un levantamiento geológico en sectores muy limitados, localizados al Sur de la zona de estudio, dichos mapas muestran un enfoque sedimentológico y tectónicos por lo que presentan mayor detalle en los depósitos Cretácicos- Paleógenos en relación con las unidades volcánicas de la Formación Bagaces.

Sin embargo, Denyer et al. (2014) realiza un mapeo de la Hoja Tempisque 1:50.000, en el que se detallan las diferentes unidades asociadas a la formación y sobre la cual se localiza el área de estudio (Figura 26).

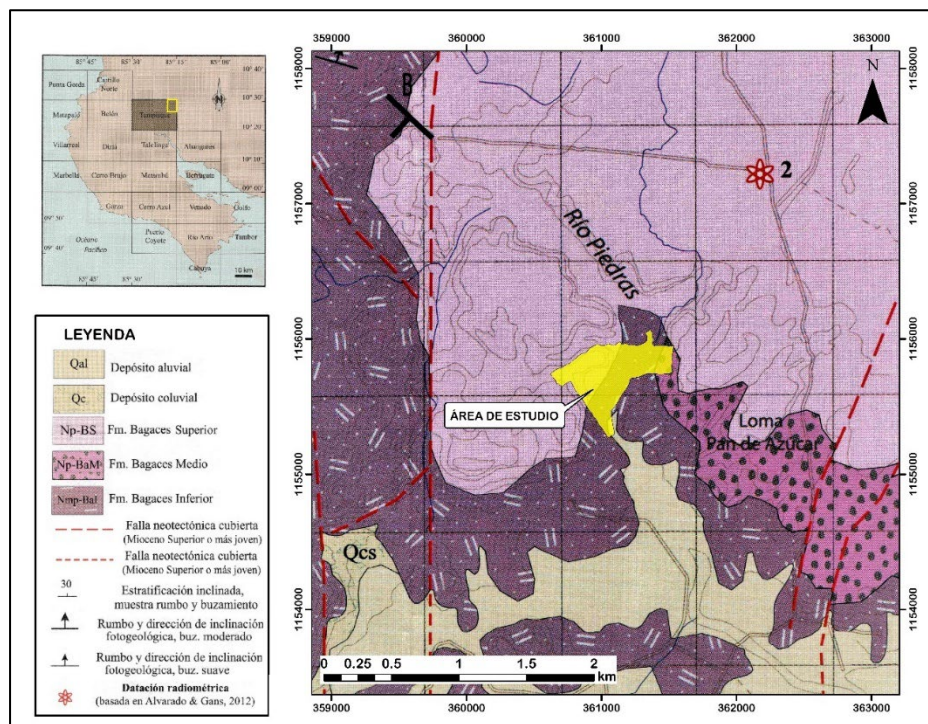


Figura 26. Sección del mapa geológico de la Hoja Tempisque 1:50.000 de Denyer et al. (2014), en amarillo se muestra la localización de la zona de estudio. (Tomado y Modificado de Denyer et al., 2014)

Denyer et al. (2014) menciona que la formación Bagaces en general, corresponde con depósitos volcánicos del Mioceno y Plioceno que conforman las planicies de la zona NW de Costa Rica.

Básicamente se define como impulsos eruptivos de flujos piroclásticos con lavas y depósitos sedimentarios continentales intercalados (Herrera & Vargas, 2012), que sobreyacen a la Dacita de Carbonal (Denyer et al. 2014)

Según Denyer et al. (2014) las litologías son piroclásticas principalmente ignimbritas, cuya matriz es rica en vidrio con variaciones de texturas vítreas.

Denyer et al. (2014) basándose en los estudios de Bohnenberger (1968), ONU (1975), Tournon (1984), Chiesa et al. (1994), Herrera & Vargas (2012) y Alvarado & Gans (2012), hace la descripción de cuatro unidades o miembros:

- I. La Dacita Carbonal: corresponde a una dacita negra vidriosa, con estructura de flujo (pliegues), disyunción columnar y brechas locales. Presenta una edad de $8,05 \pm 0,09$ Ma.
- II. Miembro Bagaces Inferior: se asocia a ignimbritas bien soldadas, de color gris-blancuzco con *fiammes* (blancos y negros), y tobas con intercalaciones de coladas masivas y lajeadas de tipo basaltos-andesíticas a dacíticas. Presenta una edad de 4,87 a 3,64 Ma.
- III. Miembro Bagaces Medio: consiste en sedimentos fluviales y lacustres intercalados en los depósitos ignimbríticos y tobáceos de los miembros superior e inferior; se incluyen también los depósitos de tobas de color gris a blancas intercaladas con conglomerados y capas de pómez de caída. La mayoría de los

piezómetros realizados en el Sitio de Presa del Proyecto Río Piedras se localizan en este Miembro.

- IV. Miembro Bagaces Superior: corresponde a ignimbritas con *fiammes* de tamaños centimétricos y grandes pómez de color blanco y amarillento, con diferentes grados de soldamiento y alteración. Presenta una edad de 3,21 y 2,0 Ma.

Barrantes (2018) subdividió la Formación Bagaces en nueve Unidades estratigráficas, cinco de las cuales son de origen volcánoclastico, particularmente compuestas por ignimbritas y tobas, y nombradas en orden estratigráfico de la más antigua a la reciente, como: Unidad Rama de Nance, Unidad Pan de Azúcar, Unidad Río Colorado, Unidad Cañas y Unidad Montenegro. Estas unidades volcanoclasticas se encuentran intercaladas por cuatro Unidades sedimentarias de origen fluvial, compuestas predominantemente por areniscas y conglomerados finos a medios, y nombradas en orden estratigráfico de la más antigua a la reciente, como: Unidad Falconiana, Unidad Biscoyol, Unidad Bejuquillo y Unidad Veraneras. Finalmente, e intruyendo las dos Unidades más basales de la secuencia estratigráfica, como lo son la Unidad Falconiana y la Unidad Rama de Nance, se ubica la Unidad de origen ígneo e intrusivo de tipo hipoabisal, que corresponde a la Unidad Agua Fría.

De la estratigrafía propuesta por Barrantes (2018), cuatro unidades son de mayor interés, pues se localizan dentro del área de estudio (Figura 27), particularmente la Unidad Falconiana, que corresponde con los depósitos sedimentarios más espesos, ubicados en la base del área de investigación del Proyecto Río Piedras, los cuales pueden tener un mayor potencial hidrogeológico.

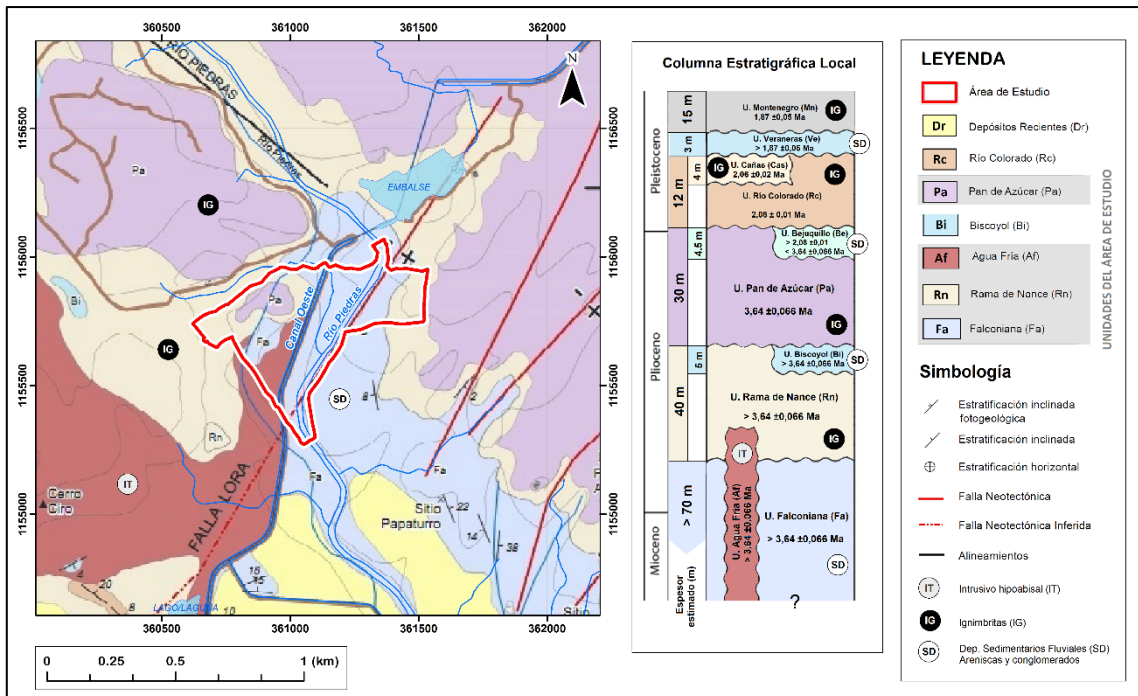


Figura 27. Sección del mapa geológico del Sector Noreste de Lomas de Bambudal. (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)

Denyer et al, (2019), publica una actualización de la geología de la Hoja Tempisque 1:50.000; en el sector correspondiente al área de estudio (Figura 63), mantiene los nombres y la mayoría de los contactos litológicos de las Unidades volcanoclásticas propuestas por Barrantes (2018), mencionándolas por el nombre genérico de tobas en vez de ignimbritas e incluyéndolas todas en la Formación Bagaces, sin embargo, la cartografía geológica se realiza en las respectivas Unidades Tobáceas que la conforman. En el caso de las unidades sedimentarias las agrupa mencionándolas como depósitos epiclásticos. Y nombra a la unidad ígnea Agua Fria de Barrantes (2018), como Lavas Pelón de la Bajura, la cual integra los afloramientos asociados a lavas basálticas a dacíticas de comportamiento hipoabisal, color gris oscuro a morados, y ampliamente diseminadas en las Hojas Ahogados, Cañas, Monteverde y Carrillo Norte.

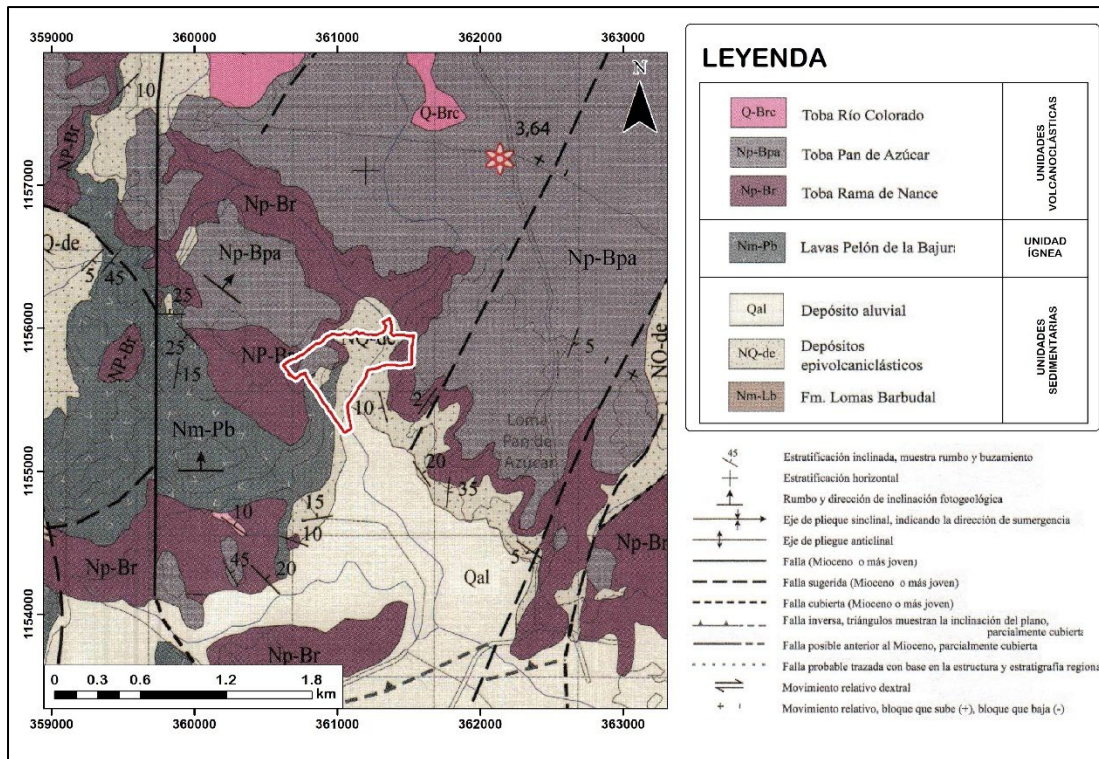


Figura 28. Sección del mapa geológico de la Hoja Tempisque 1:50.000. (Tomado y modificado de Denyer et al. 2019)

7.2 Geología Local

En el área de investigación que corresponde al Proyecto Río Piedras, se realizó un mapeo geológico a escala 1:3000, basándose en la estratigrafía y geología previa, propuesta por Barrantes (2018), por lo que se mantiene la nomenclatura de las unidades informales establecidas, así como la integración de las descripciones litológicas realizadas a las once perforaciones (ICE, 2018), para el Proyecto Paacume.

Estratigráficamente las unidades presentes en el sitio (Figura 29) corresponde desde la base de la secuencia hacia el techo con: la unidad Falconiana (Barrantes, 2018), esta

unidad sedimentaria profunda es la más predominante en el sitio de Río Piedras, se asocia a depósitos de areniscas guijarrosas a medias, con espesores estimados máximos de hasta 300 m, observables en los perfiles de geofísica de TDEM (Figura 62). Esta unidad es sobreyacida por la unidad volcanoclástica Rama de Nance (Barrantes, 2018), compuesta por tobas de cenizas finas a medias con líticos de tonalidades blancuzcas a grisáceas poco soldada, con importante presencia de pómez blancas y escorias de tamaños centimétricos, cuyos espesores estimados corresponden a los 20 m como máximo; sobreyaciendo a la unidad Rama de Nance, se localiza la unidad sedimentaria Biscoyol (Barrantes, 2018), que corresponde a areniscas tobáceas medias a gruesas, con espesores de 5 m como máximo, las cuales se localizan de forma esporádica como parches o lentes muy limitados y usualmente localizados hacia los afluentes estacionarios que confluyen al Río Piedras. Sobreyaciendo ambas unidades Rama de Nance y Biscoyol, se ubica la unidad volcanoclástica Pan de Azúcar (Barrantes, 2018), que corresponde de manera general a una ignimbrita muy soldada, vidriosa y con fiammes usualmente alargados, la cual se ubica predominantemente hacia las secciones más cúspidales de los cerros y lomas, muestra espesores máximos de 10 a 20 m como máximo. Intruyendo las unidades Falconiana y Rama de Nance, se muestra la unidad ígnea Río Frío (Pelón de la Bajura), que corresponde con lavas andesíticas a dacíticas, las cuales presentan la particularidad de generar en la mayoría de los casos, entre los contactos superiores o inferiores con la unidad sedimentaria Falconiana, una brecha ígnea con matriz sedimentaria usualmente de color blanco, denominada brecha peperítica blocosa (Alvarado y Soto, 2012). Finalmente, y sobre toda la secuencia anterior se localizan los depósitos recientes, que corresponden desde arenas finas a arcillas poco cementadas, asociadas a la dinámica de depositación de Río Piedras y sus afluentes tributarios.

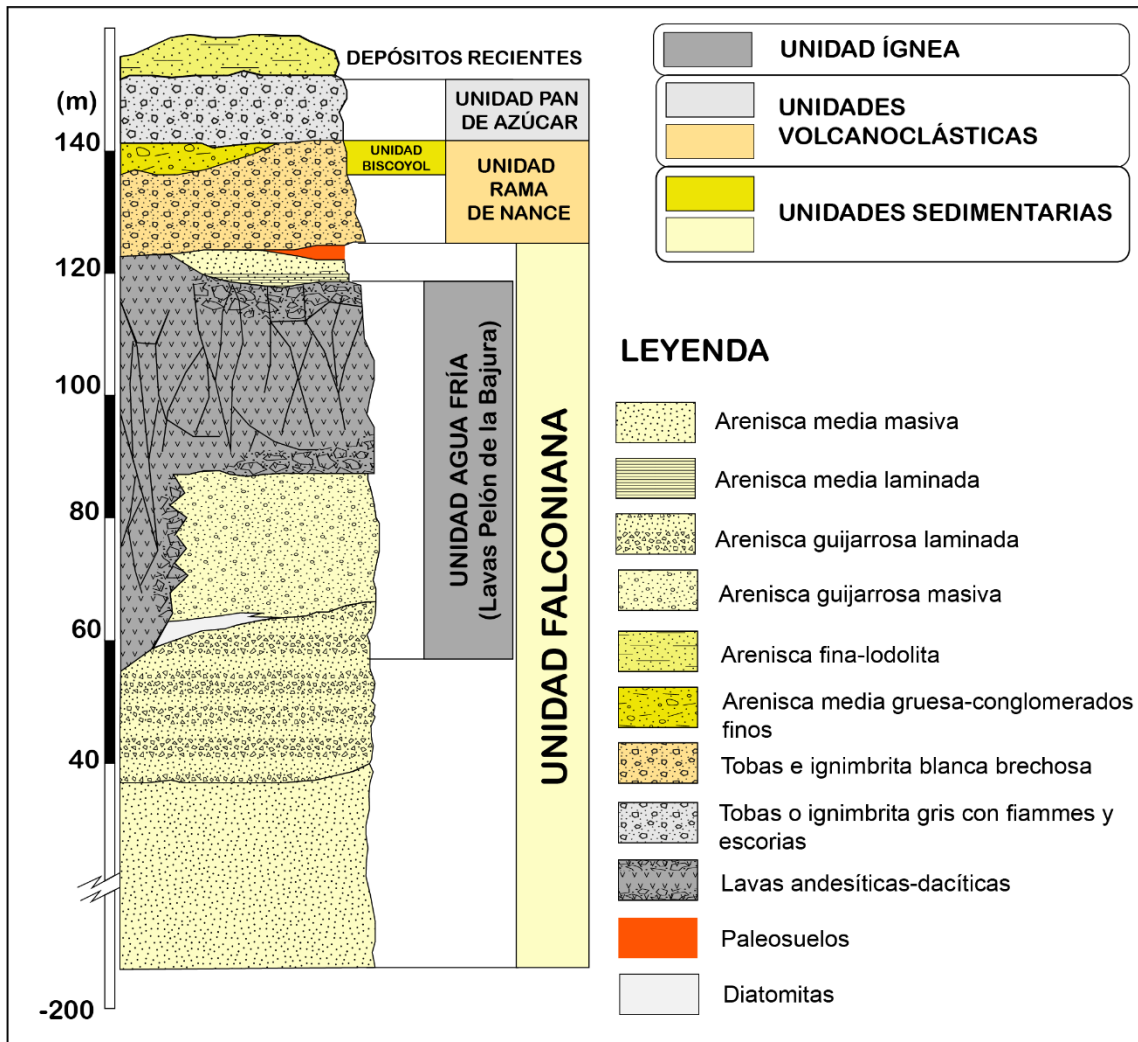


Figura 29. Columna estratigráfica local del Sitio de Presa Río Piedras, (Tomado y modificada de Barrantes, 2018)

En el mapa geológico local del sitio de Presa de Río Piedras, y los perfiles geológicos obtenidos a partir del mismo, denominados A-A' y B-B' (Figuras 30 y 31), muestran la extensión y los espesores estimados para las diferentes unidades, a partir de la integración de las perforaciones y la geofísica realizadas para el Proyecto Paacume (ICE, 2016a; ICE, 2018), y los contactos entre las unidades propuestas por Barrantes (2018), y su verificación en campo, se incorpora al mapa geológico local, una capa de paleosuelo ubicada entre el contacto de las unidades volcánicas (unidad Rama de Nance) y

sedimentaria (unidad Falconiana), presente en los núcleos de la perforación 7 (Anexo 14.1).

El Perfil geológico A-A' (Figura 30) presenta una longitud de 3,0 km, y se orienta de este a oeste y de forma longitudinal al eje de Presa de Río Piedras, y transversal al Canal Oeste y al Río Piedras, e incorpora las perforaciones n° 1, 2 y 3, siendo proyectada la perforación 5, para estimar el espesor de la unidad ígnea en este sector. Estas perforaciones tienen profundidades máximas de 60 m e integran dos piezómetros cada una, las rejillas de los piezómetros se localizan particularmente a lo largo de la longitud correspondiente a las litologías de las unidades ígnea (unidad Agua Fría) y sedimentaria profunda (unidad Falconiana, a excepción de las perforaciones 1 y 5, cuyas rejillas más someras se encuentran en los contactos inferiores de ambas litologías (Anexo 14.1). Bajo la ubicación del eje de la Presa, y en este perfil A-A', se muestra una predominancia de las unidades sedimentaria profunda (unidad Falconiana) e ígnea (unidad Agua Fría).

El perfil geológico B-B' (Figura 31), presenta una longitud de 2,95 km, se orienta desde el NE hacia el SW, a lo largo de la margen derecha del Canal Oeste, el cual cruza en dos ocasiones, y de forma transversal al eje de Presa de Río Piedras. Este perfil incorpora las perforaciones 4, 1 y 14, las cuales presentan profundidades de entre los 60 a 30 m, las perforaciones 4 y 1 tiene dos piezometro cada una, las rejillas más superficiales de ambos se localizan en el contacto inferior entre la unidad ígnea (unidad Agua Fría) y la unidad sedimentaria (unidad Falconiana), por el contrario la perforación 14, presenta un único piezómetro, con la particularidad de que la rejilla se extiende desde la longitud media de la unidad ígnea (unidad Agua Fría) atraviesa el contacto entre esta y la unidad sedimentaria profunda (unidad Falconiana), y finaliza hasta la máxima profundidad de perforación (Anexo 14.1).

La unidad sedimentaria profunda y basal (unidad Falconiana), se muestra mayormente predominante a lo largo de ambos perfiles geológicos (Figura 30 y 31), presenta un

continuidad lateral y un espesores máximos estimados de 50 m en las perforaciones, proyectándose hasta los 250 m de profundidad en los perfiles geofísicos (Figura 61). Esta unidad es lateralmente interrumpida por el contacto abrupto con la Unidad ígnea que la intruye y algunas zonas de falla (F4, F5 y F6), que la segmenta hacia la sección central del perfil A-A', entre el Canal Oeste y el Río Piedras (Figura 30). En el perfil B-B', muestra un basculamiento de 5 a 8° hacia el N-NE, entre las fallas F4 y la Falla Lora, el cual tiende a incrementar el espesor de dicha Unidad hacia la perforación 14.

La unidad ígnea se muestra como un cuerpo intrusivo posiblemente fisural, el cual tiene una proyección vertical a lo largo de dos zonas de fallas inferidas (F2 y F3), la cual le da una apariencia de domo o criptodomo, con tendencia a intruir lateralmente la Unidad sedimentaria profunda (unidad Falconiana), en forma de un sill muy segmentado hacia la sección central del perfil, entre el Canal Oeste y el Río Piedras, por varias zonas de fallas (F2, F3, F4, F5, y Falla Lora). Bajo el Río Piedras, esta unidad tiende a engrosarse ligeramente en una forma cóncava hasta acuñarse y desaparecer, cerca o en la Falla Papaturre. A lo largo del perfil B-B', esta unidad se muestra muy continua y paralela a la unidad sedimentaria profunda, mostrando un ligero basculamiento en el contacto inferior con dicha unidad y entre las zonas de falla F4 y Falla Lora.

Hacia las zonas altas asociadas a las lomas y los cerros, se localizan las unidades volcanoclásticas, como lo son la unidad Rama de Nance y la unidad Pan de Azúcar, las cuales sobreyacen tanto a la unidad sedimentaria profunda (unidad Falconiana) como a la ígnea (unidad Agua Fría). De manera muy relegada y bajo el estacionamiento 500 del perfil A-A' (Figura 30), se muestra un pequeño lente asociado a la unidad sedimentaria (unidad Biscoyol), la cual se ubica por encima de la unidad volcanoclástica Rama de Nance. Finalmente y hacia el sector S y SE, del área se muestran predominantemente la unidad sedimentaria Falconiana y los depósitos recientes.

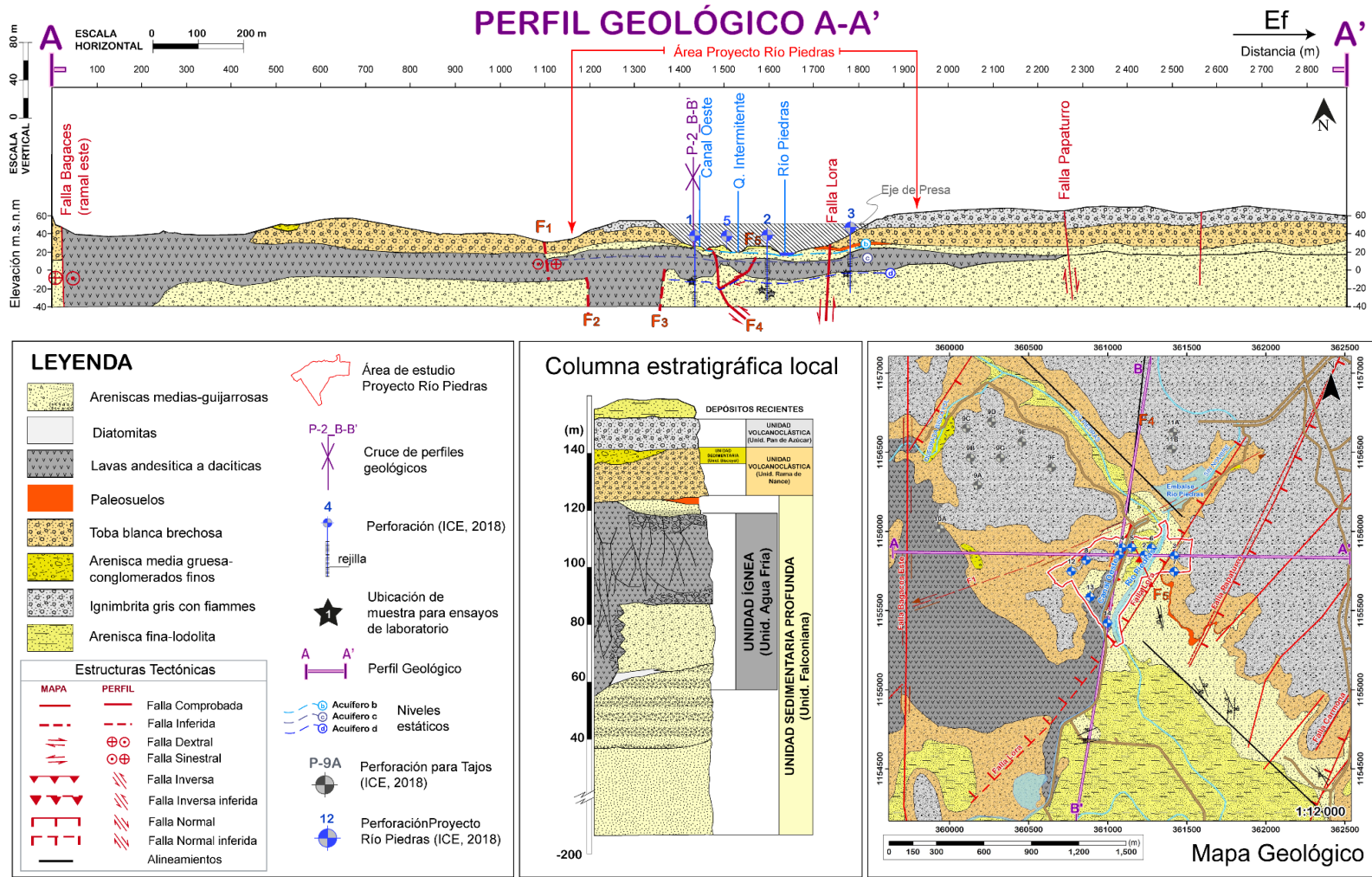


Figura 30. Perfil Geológico A-A' y Mapa Geológico (Tomado y modificado de Barrantes, 2018; ICE, 2018)

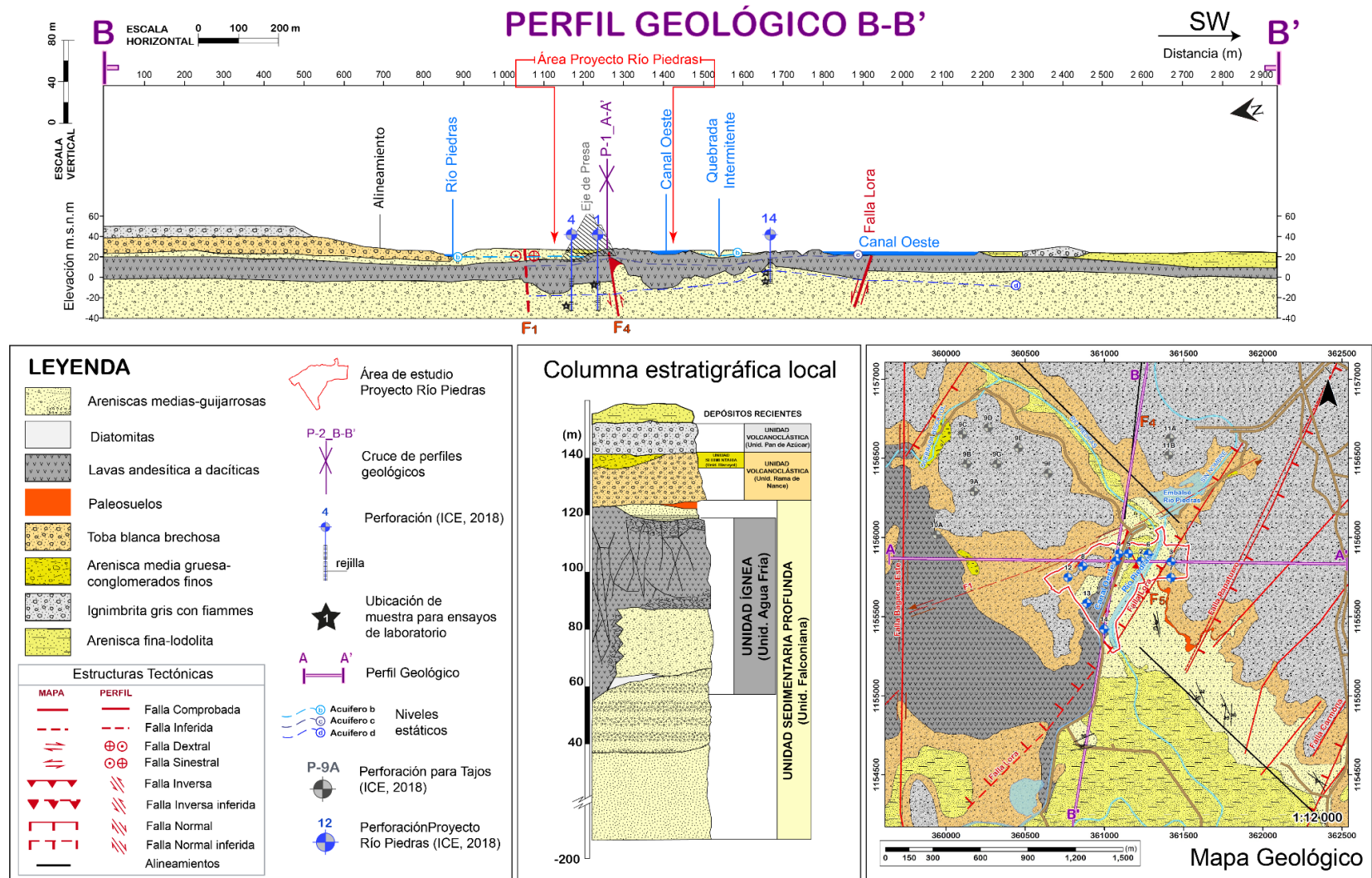


Figura 31. Perfil Geológico B-B' y Mapa Geológico (Tomado y modificado de Barrantes, 2018; ICE, 2018)

A continuación, se describen las principales unidades y capas litológicas, localizadas en el Sitio de Río Piedras:

7.2.1 Unidades Sedimentarias

A- Unidad Sedimentaria Falconiana (Areniscas medias guijarrosas)

Esta unidad se localiza en varios afloramientos, alrededor de ambos márgenes de Río Piedras. Los afloramientos más representativos se localizan en los cortes de lomas a lo largo del camino privado de la Finca el Poró, que comunica la vía principal (Bagaces-Falconiana) con las perforaciones 3 y 7 (Figura 32).

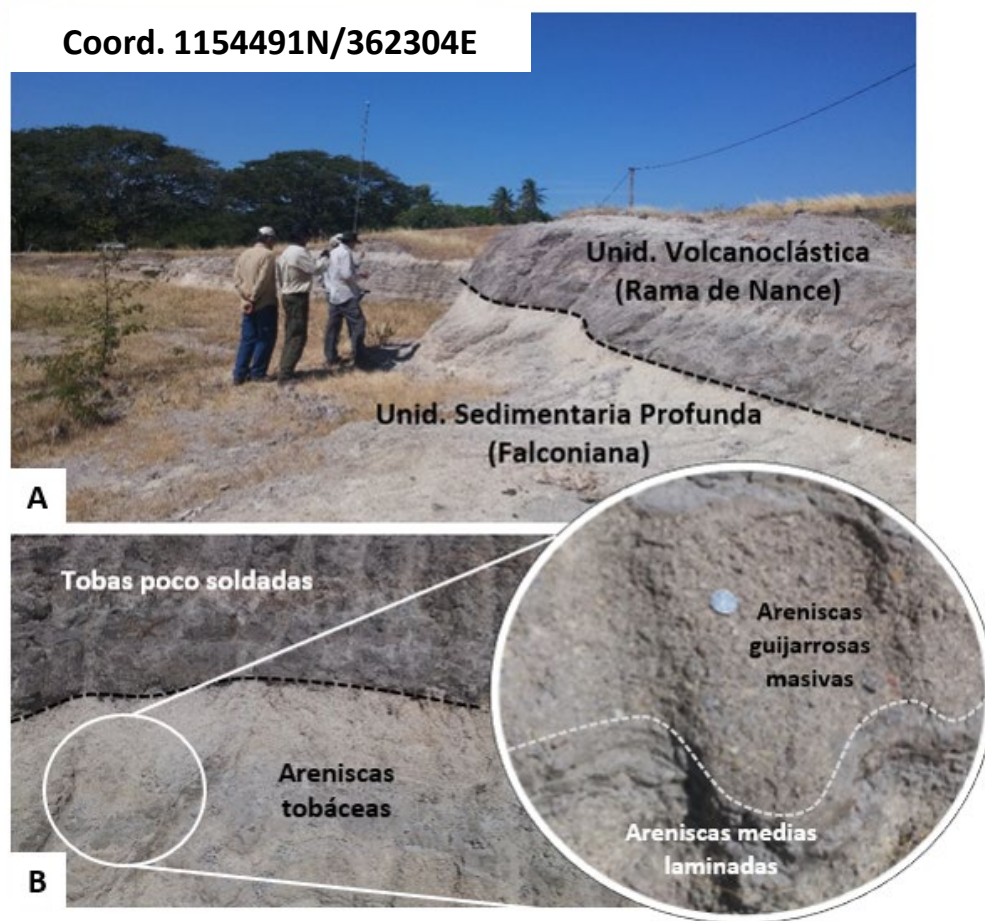


Figura 32. A) Corte en Tajo Cortes, entrada a la finca Poró, contacto neto entre las unidades Falconiana (sedimentaria profunda) y Rama de Nance (volcanoclástica). B)

Detalle de las litologías asociadas a la unidad Sedimentaria Falconiana, de areniscas gruesas a guijarros bien seleccionados y areniscas finas.

Esta unidad sedimentaria se extiende en una forma tabular continua a lo largo de toda la zona de estudio y corresponde al basamento local del sitio, esto se muestra en los perfiles geológicos (Figura 30 y 31), así como en las perforaciones de Río Piedras, en las cuales muestran espesores máximos de 60 m (perforación 5), sin embargo, este espesor se asocia a la profundidad máxima alcanzada en dicha perforación, y no a un contacto inferior de la misma con otra Unidad, por lo que en los perfiles geofísicos realizados en el sitio de presa, la proyección de la misma puede rondar hasta los 250 m de espesor (Figura 61).

Presenta coloraciones que varían de gris a gris-violácea y café blanco-amarillento, siendo esta última la coloración más distintiva de la unidad en campo. El contacto superior con la unidad volcanoclástica Rama de Nance, es de tipo neto y ligeramente ondulante (Figura 32)

Litológicamente se asocia con depósitos de areniscas tobáceas de finas a guijarrosas con diferentes grados de cementación, cuyas capas pueden variar de paquetes continuos, homogéneos y masivos con espesores desde los 1,4 m hasta los 9,6 m, a paquetes con laminaciones desde milimétricas a centimétricas, los cuales presentan espesores de 1,5 m a 7,15 m. Las capas laminadas presentan alternancias granulométricas de arenas medias a gruesas y guijarros. Los niveles guijarrosos están constituidos predominantemente por bloques de pómez blanquecinas subangulares a subredondeado, y líticos ocasionales, los tamaños son muy variados desde 0,5 cm hasta los 4,2 cm, los presentan con contactos puntuales a flotantes. La matriz que rodea los guijarros esta usualmente constituida por arenas tobáceas finas a medias, bien seleccionada, algunos

niveles de laminación de guijarros presentan estructuras imbricadas poco desarrolladas (Figura 33).



Figura 33. A) Afloramiento de la unidad sedimentaria Falconiana, en finca el Poró camino a la perforación 3 y 7. B) Detalle de la muestra de areniscas medias de color gris y un nivel de guijarros de pómez.

En algunos de los registros de las perforaciones se muestra una capa de color gris oscuro a negro que podría asociarse a un nivel enriquecido de materia orgánica, esta capa predomina en las perforaciones ubicadas en la sección media entre el Canal Oeste y el Río Piedras (Perforaciones 2, 5 y 6), y en las perforaciones ubicadas en la loma de la margen izquierda de Río Piedras (Perforaciones 3 y 7). Hacia la margen izquierda del río y en las perforaciones 3 y 7, esta capa oscura se localiza entre los 37 a 42 m de profundidad y presenta entre 15 a 55 cm de espesor; mientras que en las perforaciones 2, 5 y 6, de la margen derecha, esta

capa oscura se localiza entre los 55 a 64 m de profundidad y presenta entre 5 a 45 cm de espesor.

Esta capa oscura se asocia a lutitas y areniscas finas con laminaciones milimétricas, las cuales se ubican usualmente hacia la base del contacto inferior de la unidad ígnea (Agua Fría) en las perforaciones 3 y 7, o bien en las secciones más basales de las perforaciones 2, 5 y 6 (Anexo 14.1). Esta capa se identifica por la coloración, la presencia de materia orgánica vegetal, laminaciones y un ligero a moderado olor a hidrocarburo aromático. Particularmente en la perforación 3, presenta una fracturación en forma de “rompecabezas” y vetillas rellenas de minerales silíceos de color blanquecino, que le confieren una mayor resistencia, ya que en el resto de las perforaciones este nivel es usualmente muy disgregable cuando se seca; lo que podría indicar la presencia de mineralización por acción de fluidos hidrotermales (Figura 34).



Figura 34. Muestra de lutita negra de 15 cm de espesor con posible fracturación y alteración hidrotermal, fracturas rellenas de minerales silíceos. Perforación 3: tramo 43,85 a 44,0 m.

Los buzamientos recopilados para esta unidad sedimentaria varían de dirección desde suroeste (SW), sureste (SE), noreste (NE) y noroeste (NW), las direcciones preferenciales son SE y SW, siendo esta última la más cercana al área de estudio,

y a lo largo de la cual se presentan ángulos de buzamiento bajos entre los 8° a 10°, tal como se muestra en la tabla 11 y Figura 35.

Tabla 11. Recopilación de las direcciones de buzamiento de la unidad sedimentaria Falconiana

	Latitud	Longitud	Dirección Buz/Ángulo Buz	Referencia
1*	1155462.8	361329.5	S82W/8°	Barrantes, 2018
2	1155022.7	361617.6	N67E/22°	Barrantes, 2018
3	1154 940.1	361753.2	S66W/14°	Barrantes, 2018
4	1154878.4	361813.3	S88E/38°	Barrantes, 2018
5	1154454.1	362345.0	S58W/8°	Barrantes, 2018
6	1154699.1	360872.8	N3E/15	Barrantes, 2018
7	1154746.1	360867.0	N23W/16	Barrantes, 2018
8*	1155452.1	361317.4	S76W/10°	Denyer et al. 2019
9	1154987.4	361588.3	N55E/20°	Denyer et al. 2019
10	1154860.7	361770.8	S85E/35°	Denyer et al. 2019
11	11544359.0	362337.5	S34W/5°	Denyer et al. 2019
12	1154675.6	360855.9	N10W/15°	Denyer et al. 2019
13*	1155438.2	361322.6	S78W/10°	Presente trabajo

*Buzamientos más cercanos al área de estudio

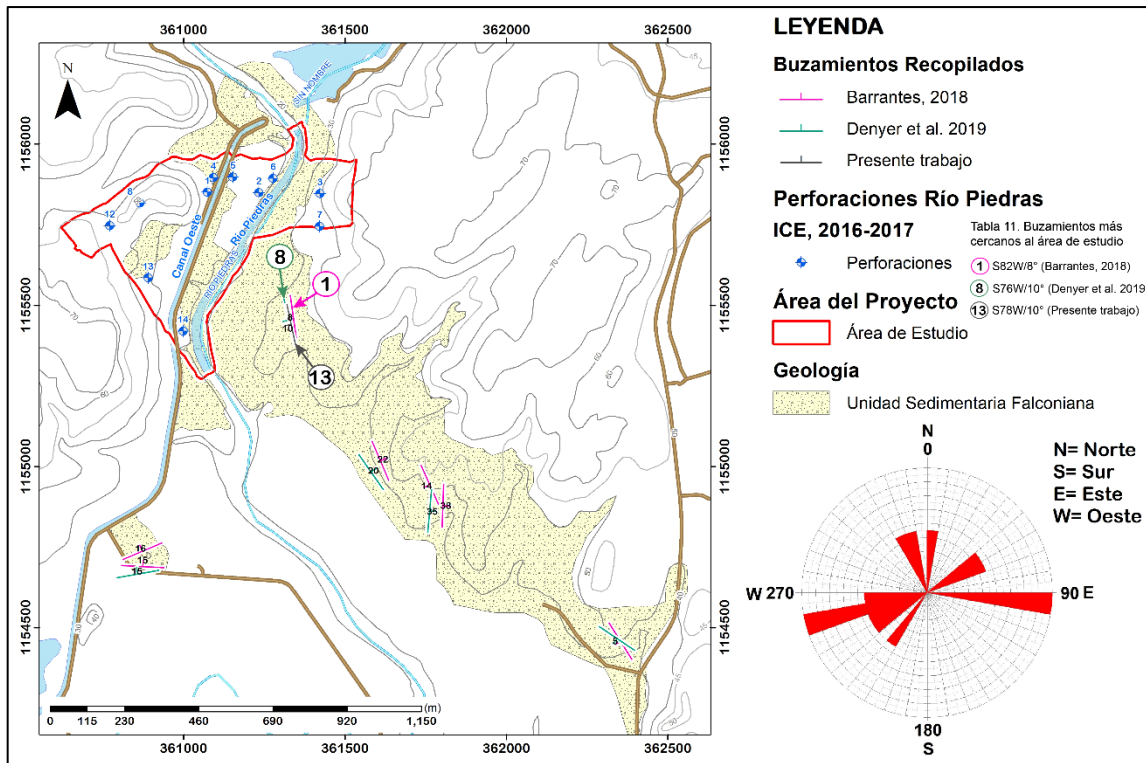
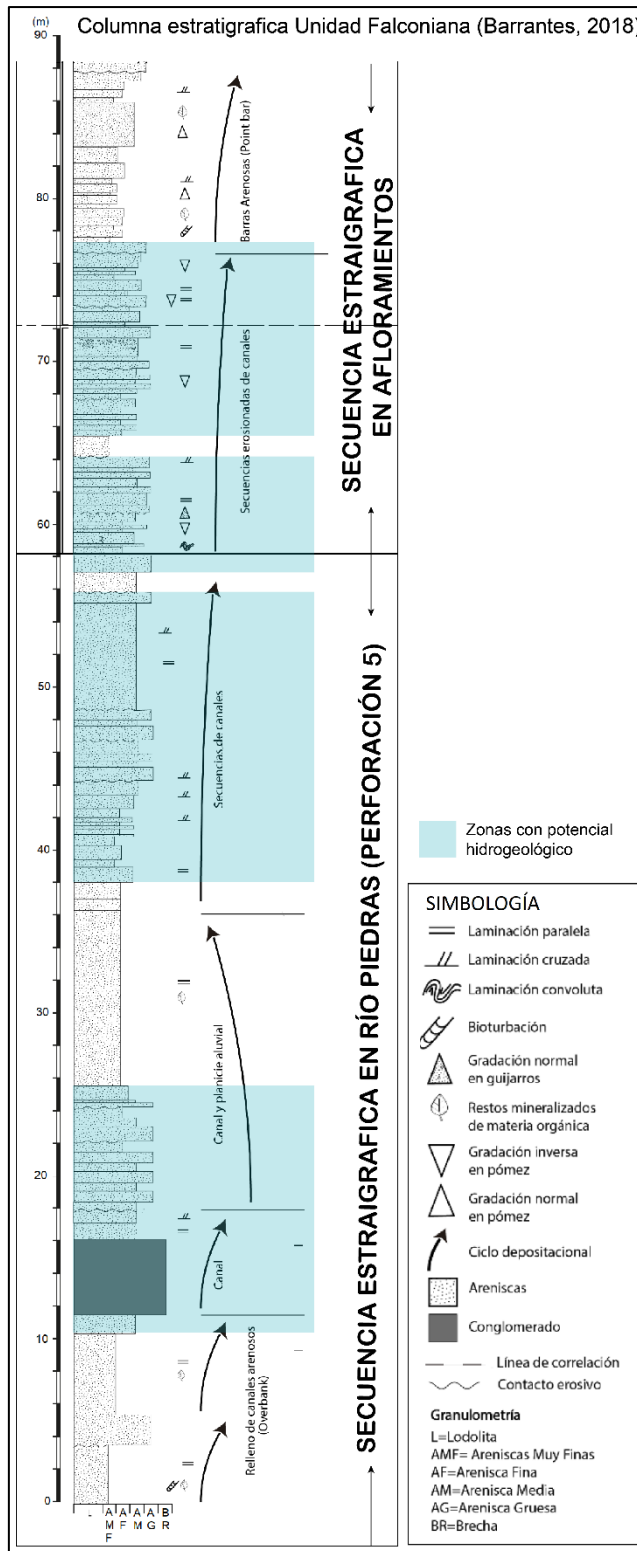


Figura 35. Área mapeada de la unidad Falconiana con la ubicación de los buzamientos recopilados y la rosa de dirección asociada a dichos los buzamientos. Los números en los círculos corresponden a lo buzamientos más cercanos numerados en la tabla 11 (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)

A esta unidad compuesta por depósitos fluvio-lacustres, se le asocian facies de canales rellenos, planicies aluviales y barras arenosas (Barrantes, 2018), lo que indica una dinámica mayormente fluvial activa en materiales retrabajados predominantemente de origen volcánico, y posibles ambientes asociados a pequeños lagos incipientes, laterales a los afluentes.



El potencial hidrogeológico de esta unidad se detalla en la columna estratigráfica definida por Barrantes (2018), y se asocian a los paquetes de capas laminadas de arenas a areniscas medias-gruesas a guijarrosas, que tienden a ubicarse hacia la sección media e inferior de la secuencia estratigráfica. El área de estudio de Río Piedras corresponde a los niveles medios e inferiores de la secuencia e integra dos zonas con alto potencial hidrogeológico las cuales presentan espesores entre los 16 a 18 m (Figura 36).

Figura 36. Columna estratigráfica detallada de la unidad sedimentaria Falconiana, en donde se señalan las capas con mayor potencial hidrogeológico, de acuerdo con la litología descrita (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)

B- Unidad Sedimentaria Biscoyol (Areniscas medias gruesas)

Esta unidad se ubica en pequeños afloramientos muy localizados y esporádicos en el área de estudio, siendo evidentes en una pequeña sección a lo largo de la Quebrada Biscoyol y hacia el norte en el camino paralelo al Embalse actual de Río Piedras (Figura 37A). En la secuencia estratigráfica esta unidad se localiza por encima de la unidad volcanoclástica Rama de Nance y por debajo de la unidad volcanoclástica Pan de Azúcar (Barrantes, 2018). El contacto inferior de esta unidad sedimentaria con la unidad Rama de Nance es de tipo neto y ondulado (Figura 37A), mientras que el contacto superior con la unidad Pan de Azúcar no se observó en campo. Por la forma y ubicación de esta unidad, presenta formas lenticulares a lobulares de poca extensión, así como escasos espesores, los cuales no superan los 2 a 5 m. En los registros de las perforaciones de Río Piedras, no se muestra presente esta Unidad, que según la secuencia de depositación se ubica en el contacto inferior de la unidad volcanoclástica Pan de Azúcar, en la que se localiza propiamente la perforación 8.

Litológicamente, se asocia a areniscas de color gris a café amarillento, de granulometrías medias a gruesas, bien seleccionadas, que varían desde paquetes de capas masivas de 0,40 a 1,30 m de espesor, a niveles con laminaciones cruzadas de 0,20 a 0,50 m de espesor hacia el techo de la unidad (Figura 37B-C). Barrantes (2018), describe también la presencia de conglomerados y areniscas guijarrosas, hacia la sección media de la columna estratigráfica que desarrolla para esta unidad.

Esta unidad se asocia a depósitos de ambientes fluviales, particularmente facies de planicies aluviales, canales y barras de arenas (Barrantes, 2018).

El potencial hidrogeológico de esta unidad es muy escaso, debido a la limitada extensión y al poco espesor asociado a la misma, así como a la ubicación tan

superficial en la secuencia estratigráfica. Particularmente en el área de estudio de Río Piedras, no se encuentra evidencia de la presencia de dicha Unidad, por lo que no se incluye dentro de las Unidades Hidrogeológicas.

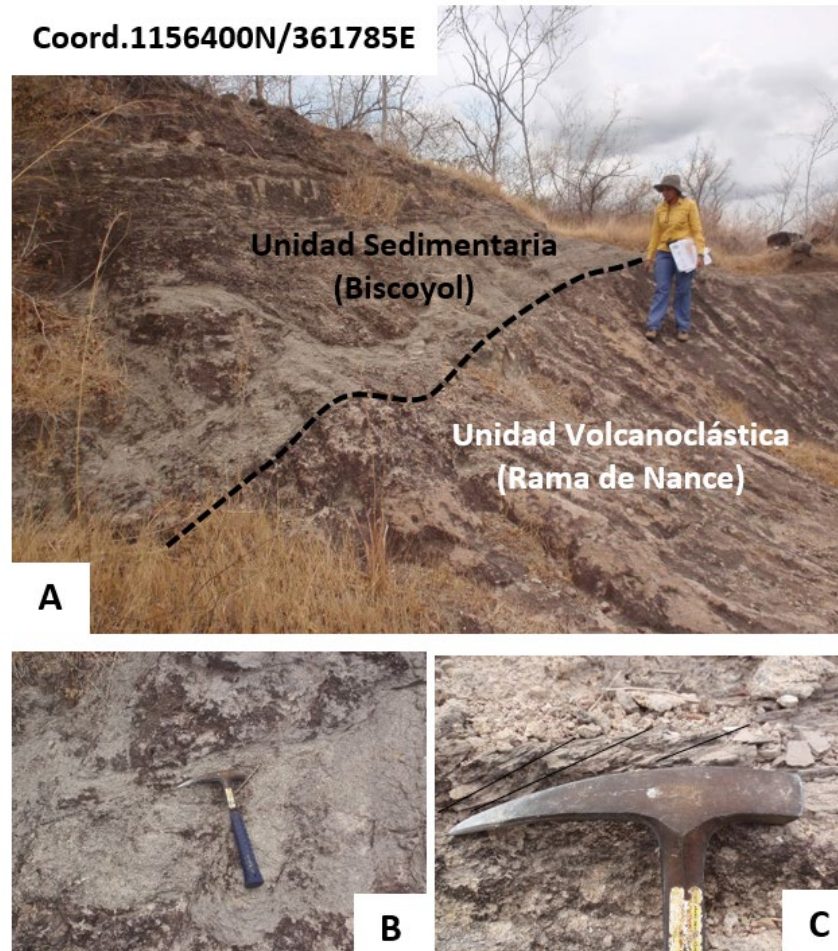


Figura 37. A) Afloramiento del contacto entre las unidades volcanoclástica Rama de Nance (inferior) y sedimentaria Biscoyol (superior). B) Capa de areniscas medias masivas bien seleccionadas C) Laminación cruzada hacia el techo del afloramiento.

C- Paleosuelos

Esta capa se desarrolla escasamente hacia la margen derecha de Río Piedras (Figura 30), por debajo de la unidad volcanoclástica Rama de Nance y sobre de la unidad sedimentaria Falconiana.

A lo largo de la sección de la margen izquierda del río Piedras, se muestra como un lente alargado que cubre una longitud aproximada de 1 km y un área cartografiable de 12.000 m² (Figura 38).

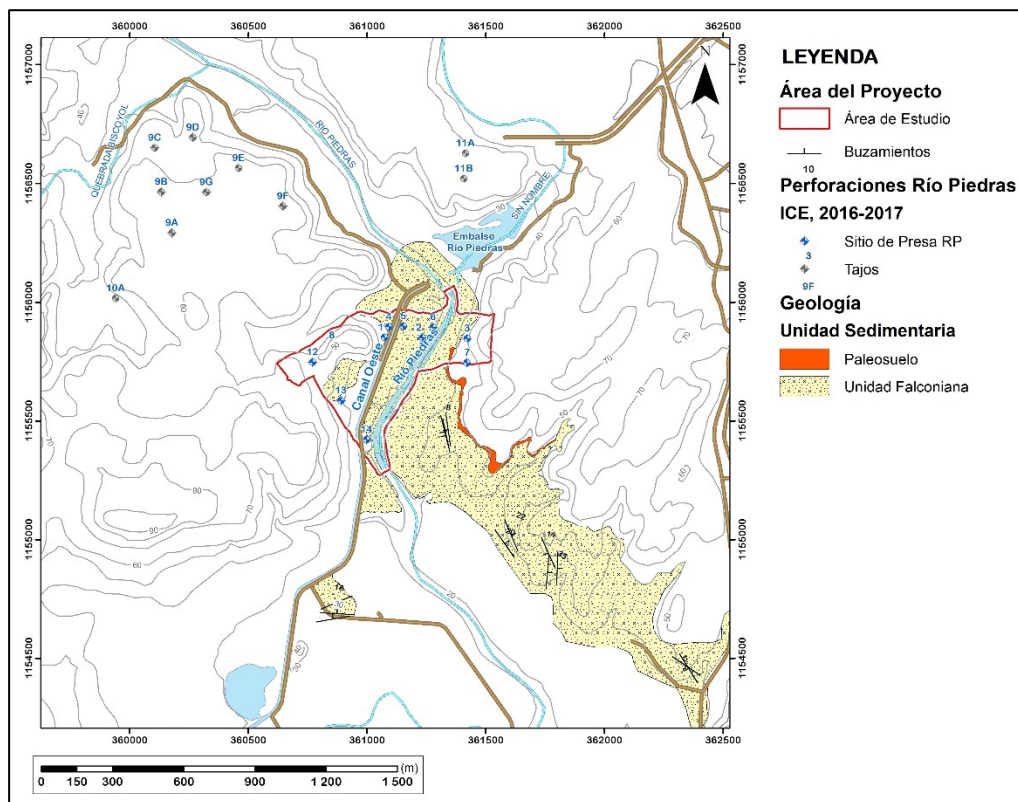


Figura 38. Área mapeada de la unidad sedimentaria Falconiana y el paleosuelo (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)

Esta capa fue inicialmente cartografiada por el ICE (2018), y verificada en campo. Presenta una coloración café-rojizo a café oscuro y café-violáceo, asociándose a

un nivel de suelos poco desarrollados hacia el techo de la unidad sedimentaria profunda (Falconiana), por lo que se incluye dentro de la misma. Está constituida por materiales alterados con granulometrías de arcillas y limos compactos y disgregables.

El contacto superior con la unidad volcanoclástica Rama de Nance es de tipo neto e irregular (Figura 39), mientras que el contacto inferior con las capas de la unidad sedimentaria Falconiana es de tipo transicional. Los espesores visibles de esta capa varían de 0,20 a 2,0 m. En las perforaciones de Río Piedras esta capa se describe en la perforación 7, entre los 9,5 a 11,6 m de profundidad, por lo que presenta un espesor de 2,10 m como máximo.

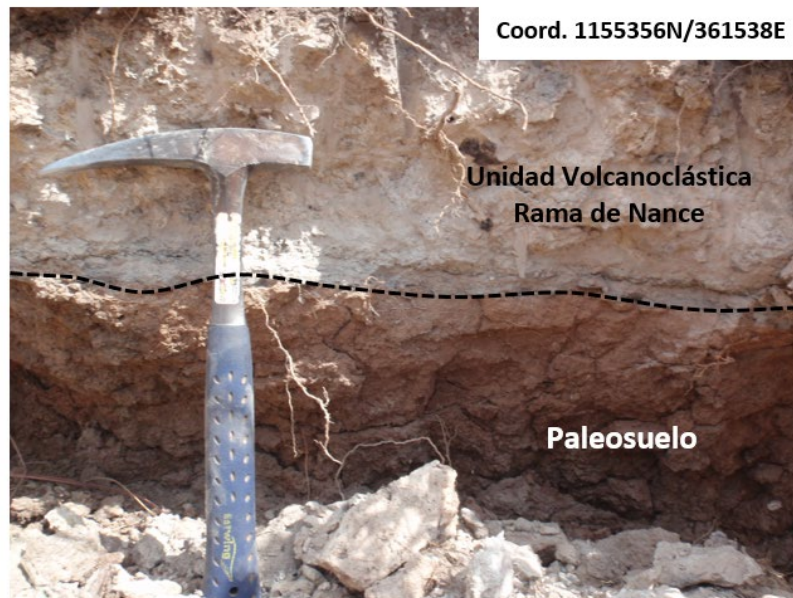


Figura 39. Contacto neto e irregular entre la capa de paleosuelo y la unidad volcanoclástica Rama de Nance.

D- Depósitos Recientes (Areniscas finas-lodolitas)

Los depósitos recientes consisten en materiales depositados por la dinámica actual de los ríos, los cuales se generan durante los periodos de las estaciones lluviosa y seca. Estos depósitos abarcan un área de 1,4 km² dentro de la zona mapeada (Figura 40), y se muestran en las secciones laterales de Río Piedras, así como en zonas topográficamente planas y abiertas, las cuales corresponden a el sector Sur de la zona de mapeo, en donde pueden alcanzar espesores máximos de 15 m (Figura 30)

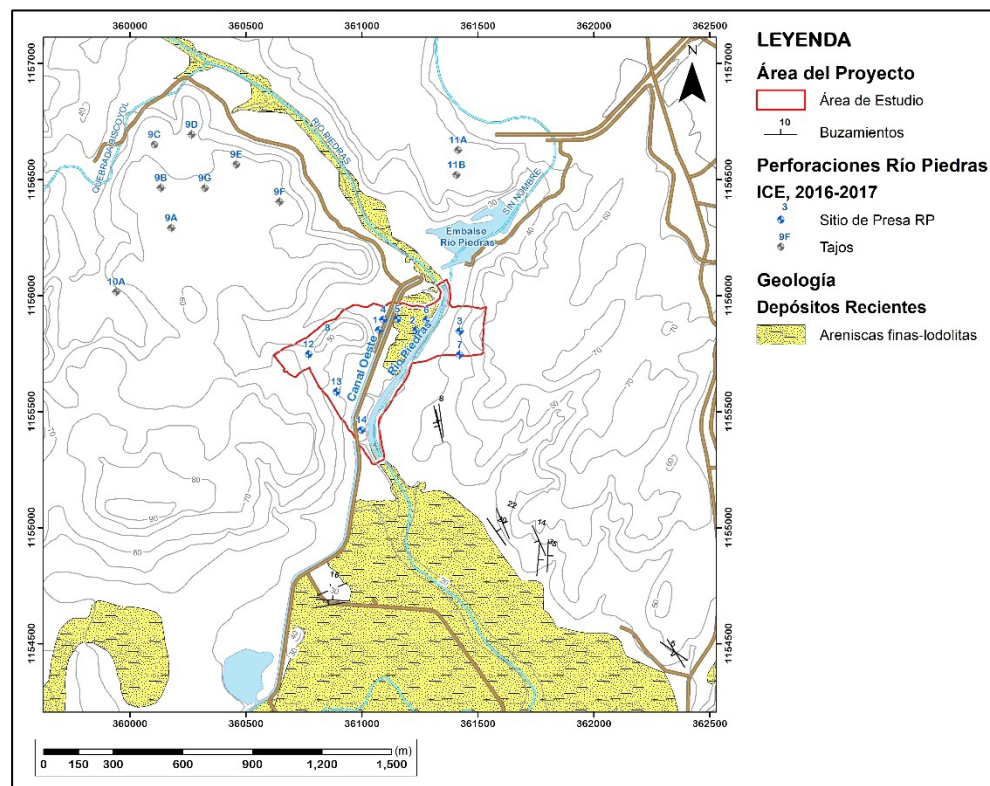


Figura 40. Área mapeada de los depósitos recientes (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)

Litológicamente se asocian a capas de arenas medias-finas a limos bien seleccionados, superficiales y de colores muy variados, desde arenas blancas a

limos negros, siendo los tonos cafés-grisáceos los más representativos de este depósito. En el sitio de Río Piedras, se pueden observar capas superficiales con granulometrías de limos y arenas finas de color café grisáceo, las cuales se muestran secas y fácilmente disgregables, con materia vegetal poco o bien desarrollada, y espesores visibles desde los 0,5 a 2,0 m (Figura 41).



Figura 41. Depósitos recientes sobre margen derecha de río Piedras y localizados a lo largo de una quebrada estacional.

En las perforaciones ubicadas en el área de estudio de Río Piedras, estos depósitos se describen como las capas más someras asociadas a suelos limosos color café con desarrollo de cobertura vegetal y bloques esporádicos, cuyos espesores registrados varían entre los 0,45 a 1,40 m.

El potencial hidrogeológico de estos depósitos es escaso debido a las granulometrías predominantemente finas que lo caracterizan, así como el poco espesor registrado en el área de estudio.

7.2.2 Unidades Volcanoclásticas e Ígneas

A- Unidad Volcanoclástica Rama de Nance (Tobas blancas brechosas)

Esta unidad se localiza bordeando las laderas en el sector este del área de mapeo, hacia ambos márgenes del río Piedras y del Embalse en el sector norte-noroeste y hacia el suroeste, abarcando un área cartografiada total de aproximadamente 2,14 km² dentro de la zona de mapeo (Figura 42).

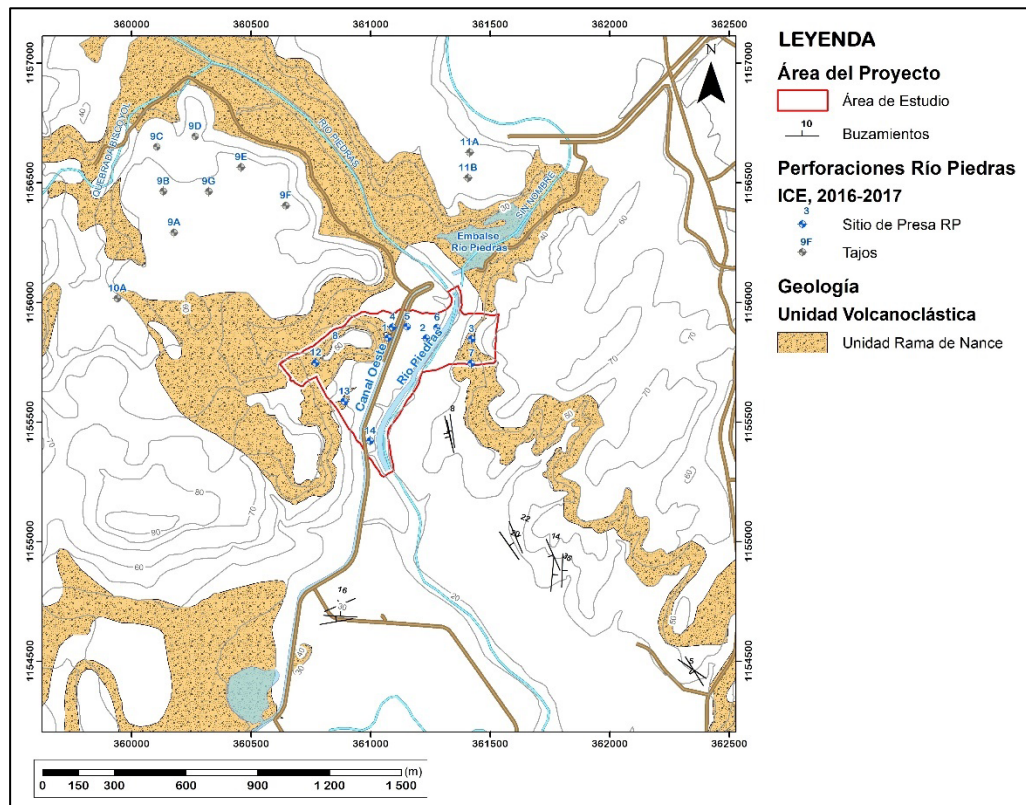


Figura 42. Área mapeada de la unidad volcanoclástica Rama de Nance (Tomado y modificado de Barrantes, 2018).

Estratigráficamente se ubica por debajo de la unidad volcanoclástica Pan de Azúcar y por encima de la unidad sedimentaria profunda Falconiana, el contacto tanto superior como inferior es de tipo neto ondulado e irregular (Figura 37 y 45), cerca del contacto inferior con el paleosuelo de la unidad sedimentaria

Falconiana, se observa un nivel de compactación ($\approx 3-5$ cm) de materiales posiblemente vidriosos o escoriáceos, que presentan bandeamientos milimétricos planos paralelos al contacto.

En los afloramientos asociados a esta unidad se muestran espesores visibles máximos de entre 5 a 16 m, particularmente hacia el sector norte en la zona del embalse de río Piedras, en donde se observan los cortes verticales realizados en esta unidad, posiblemente durante la construcción de la presa actual. Barrantes (2018), indica que en la perforación 9A, localizada hacia el noroeste del área de estudio, se reportaron espesores máximos de 23 m.

Se asocia a depósitos de tobas e ignimbritas masivas y poco soladas de color blanco con tonalidades rosado a grisáceo, y café oscuro cuando se encuentra meteorizado (Figura 43C). La matriz de este depósito es de cenizas medias a finas con alta densidad de fragmentos de pómez (50-60%), escorias (≈ 10 %) y en menor cantidad líticos (≤ 2 %); tanto los fragmentos de pómez como de escorias presentan formas angulares e irregulares en una relación promedio de 1:2 de ancho y largo (Figura 43A-B), sin indicios de compactación o aplastamiento dentro del depósito.

Los tamaños de las longitudes de las escorias y la pómez son muy variados, desde 1 a 3 mm a 30 a 40 cm en las pómez, hasta un máximo de 60 cm en las escorias (Barrantes, 2018).

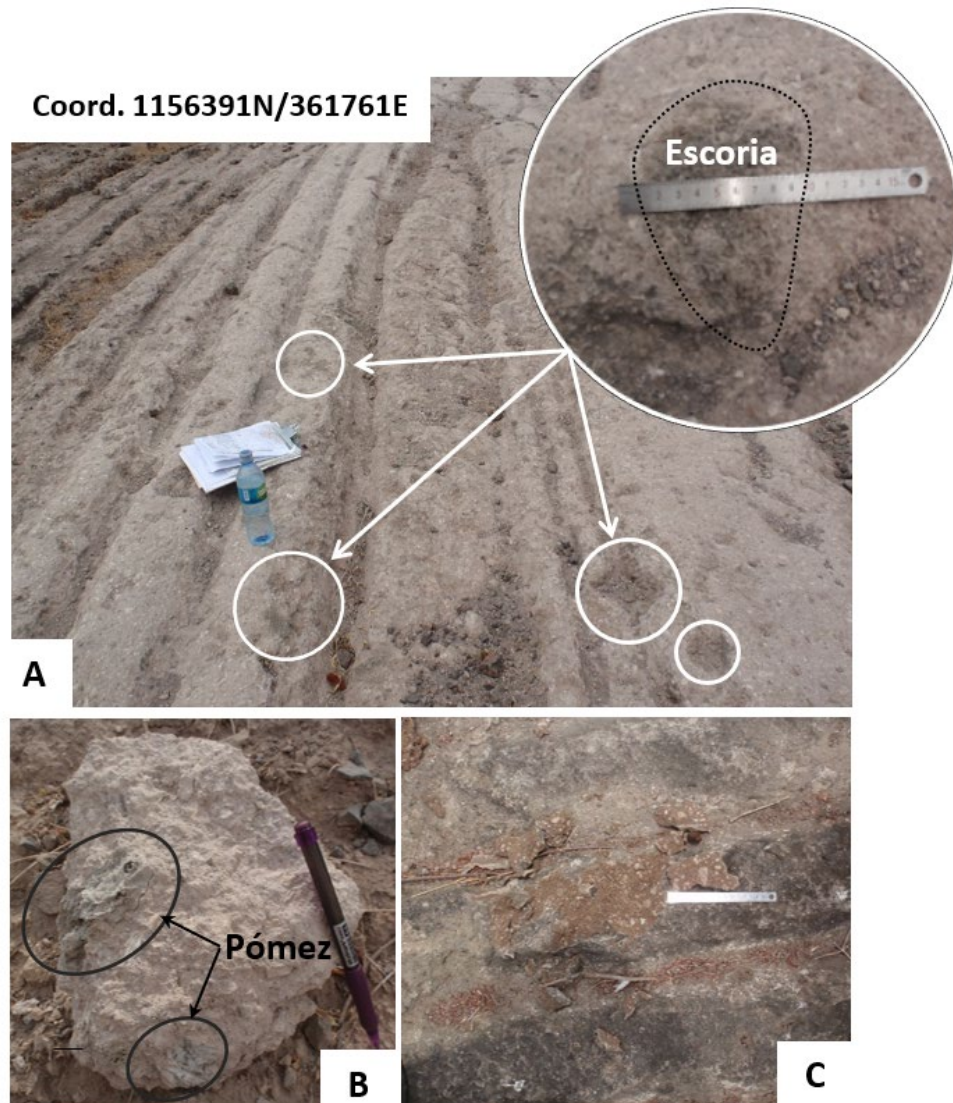


Figura 43. A) Afloramiento de la unidad Rama de Nance sobre el camino hacia el embalse río Piedras, se muestra el tamaños centimétricos de las escorias B) Bloque con detalle de las pómez de tamaños centimétricos C) Afloramiento meteorizados de la unidad Rama de Nance, con coloración café oscuro.

En las perforaciones de río Piedras dentro del área de estudio, esta unidad se describe en las perforaciones 3 y 7 de la margen izquierda del Río Piedras, a partir de los 0,5 a 0,8 m y hasta los 9,5 a 10,45 m de profundidad; hacia la margen

derecha de río Piedras, se describe en las perforaciones 8, 12 y 13, desde los 0,5 a 2,9 m y hasta los 12,30 a 23,9 m de profundidad. El mayor espesor asociado para esta unidad en el área de estudio se ubica hacia la margen derecha en la perforación 8, con 21 m reportados.

Por los aforamientos y los espesores registrados, esta unidad presenta una forma general desde tabular continua en el sector noroeste-norte a lenticular con tendencia a acuñarse hacia el sector Sureste de la zona de mapeo.

El potencial hidrogeológico de esta unidad es muy escaso en el área de estudio, debido a la granulometría fina que la caracteriza y la poca o escasa fracturación del depósito, sin embargo, se podría inferir un nivel colgado asociado a la misma, a partir de los registros de las perforaciones 3, 7 y 8, en las que se muestra un primer nivel estático reportado en el tramo de perforación que corresponde a esta unidad.

B- Unidad Volcanoclástica Pan de Azúcar (Ignimbritas grises con fiammes)

Esta unidad se localiza predominantemente hacia el sector norte-noreste, extendiéndose a lo largo de las partes altas de los cerros y las lomas, así como en forma de parches en los sectores topográficamente altos hacia el noroeste y suroeste, abarcando un área cartografiable total de aproximadamente 3,3 km² dentro del área de mapeo (Figura 44).

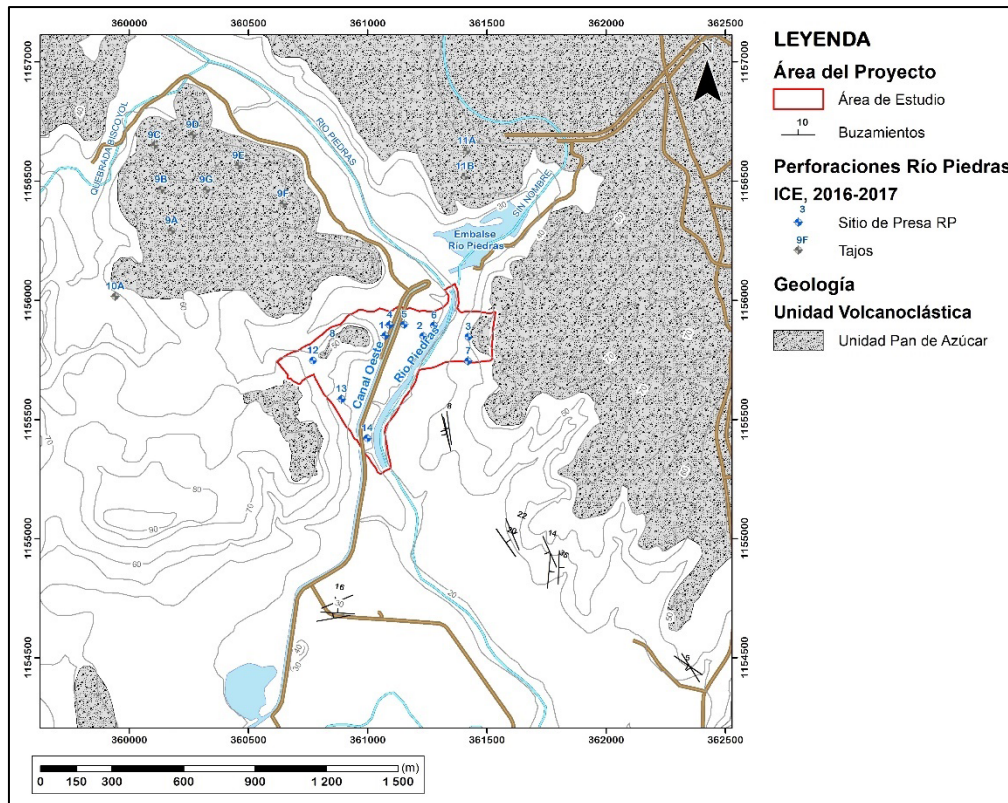


Figura 44. Área mapeada de la unidad volcanoclástica Pan de Azúcar (Tomado y modificado de Barrantes, 2018).

Estratigráficamente esta unidad se localiza por encima de la unidad volcanoclástica Rama de Nance y por debajo de los depósitos recientes, el contacto inferior con la unidad Rama de Nance es de tipo neto e irregular, por lo que se considera esta unidad como las rocas más superiores en la secuencia geológica local dentro del área de mapeo (Figura 45). Barrantes (2018), define tres unidades volcanoclásticas (Río Colorado, Cañas y Montenegro) y dos unidades sedimentarias (Bejuquillos y Veraneras) por encima de esta unidad Pan de Azúcar, siendo las unidades Bejuquillo y Río Colorado, las inmediatamente superiores en la secuencia estratigráfica con la unidad Pan de Azúcar. Estas unidades sobreyacentes y descritas por Barrantes (2018), se localizan muy al norte del área de mapeo y no fueron ubicadas dentro de la misma.

Los afloramientos asociados a esta unidad Pan de Azúcar, se localizan usualmente en las partes altas de los cerros en forma de agrupaciones de bloques métricos, muy soldados y angulares (Figura 45A), con espesores estimados entre los 1,5 a 4,0 m. Por las características de los afloramientos, esta unidad presenta una forma desde tabular hacia el sector norte-noreste, a lentes segmentados poco continuos hacia el sector oeste del área de mapeo.

Litológicamente esta unidad se asocia a depósitos de ignimbritas muy soldadas, vidriosas de color gris oscuro a negro con fragmentos de vidrio volcánico y escorias aplastadas muy bien desarrolladas (fiammes), de longitudes centimétricas a decimétricas (Figura 45A), dentro del depósito se identifican pómez de tamaños milimétricos de 2 a 10 mm (10%) y escasos líticos (< 2%). Hacia la base del depósito y en el contacto inferior con la unidad Rama de Nance, se muestra poco soldada y más alterada, por lo que los fragmentos de escorias y vidrio muestran formas regulares con escasa o ausente formación de fiammes (Figura 45B).

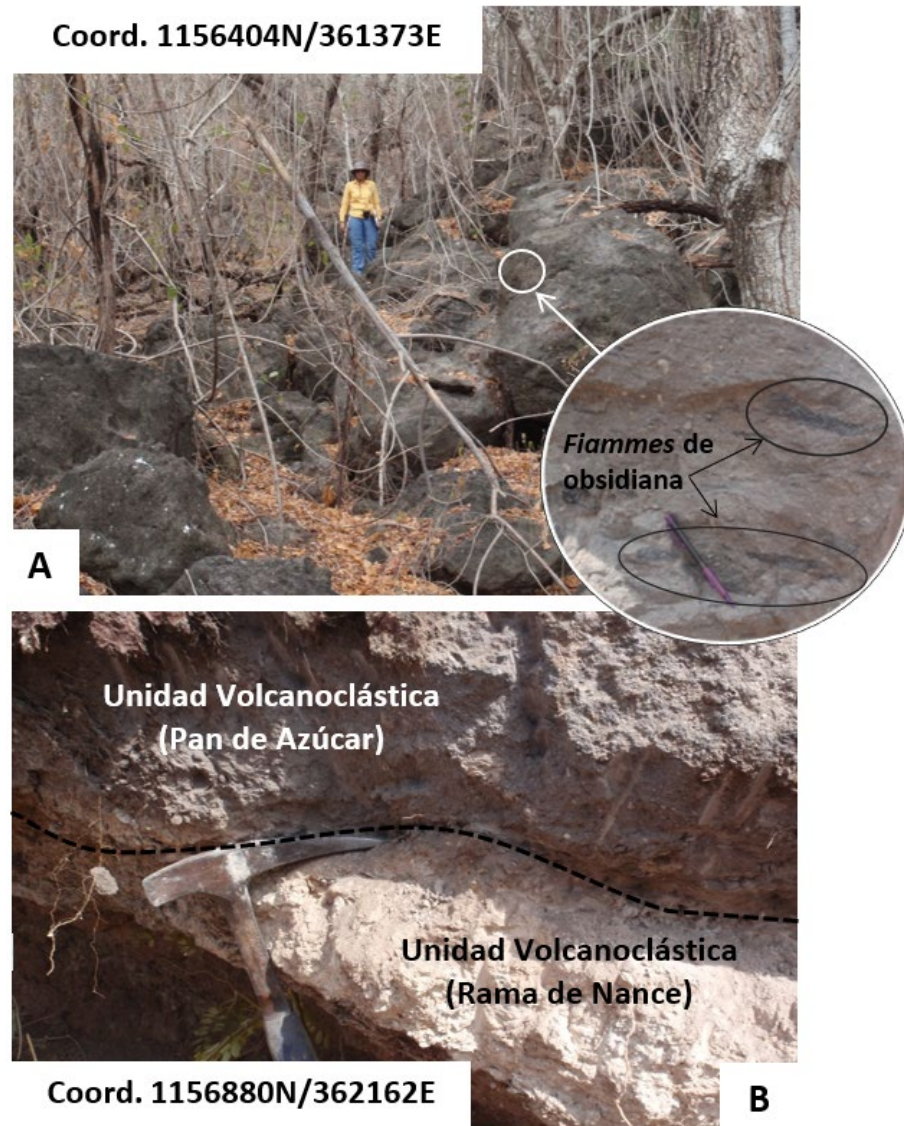


Figura 45. A) Afloramiento blocoso ubicado en la parte alta de las lomas en el sector de la margen derecha del Embalse de río Piedras, corresponden a bloques métricos de ignimbritas muy soldadas con fiammes alargados B) Contacto inferior de tipo neto y ondulado entre la unidad Pan de Azúcar y la unidad Rama de Nance.

En las perforaciones del área de estudio de Río Piedras, esta unidad se describe únicamente en la perforación 8, a partir de los 0,65 m y hasta los 2,9 m, por lo que

presenta un espesor de 2,2 m como máximo. En las perforaciones de los tajos (9A-G), ubicadas al noroeste del área de estudio, esta unidad se registra en todas las descripciones litológicas, desde la superficie o a partir de los 0,70 m, y hasta los 3,65 a 7,65 m de profundidad, con espesores asociados desde los 4,9 m en la perforación 9A, a valores de 5,8 a 7,35 m como máximo, en las perforaciones 9B y 9G, respectivamente (ICE, 2018).

El potencial hidrogeológico de esta unidad en el área de estudio es nulo, debido a la poca continuidad lateral del depósito, el cual se muestra en este sector en forma de bloques esparcidos en las partes altas de las lomas, sin embargo, hacia el sector noroeste en donde se registra en las perforaciones de los tajos, como un depósito continuo, soldado y fracturado, podría eventualmente generar un nivel colgado superficial.

C- Unidad Ígnea Agua Fría (Lavas andesíticas)

Esta unidad es descrita por Denyer et al. (2019) como Lavas Pelón de la Bajura, en donde la define como cuerpo lávicos e hipoabisales de tipo afaníticos porfiríticos que incluye rocas desde basálticas a dacíticas y latitas.

En el área de mapeo, esta unidad se localiza predominantemente hacia el sector Oeste y Suroeste, dentro del área de estudio se muestra lateral al Canal Oeste como una franja a lo largo de la margen derecha del mismo, extendiéndose hacia el Suroeste para luego proyectarse hacia el oeste del área de mapeo, cubriendo un área cartografiada total de 1,3 km² (Figura 46).

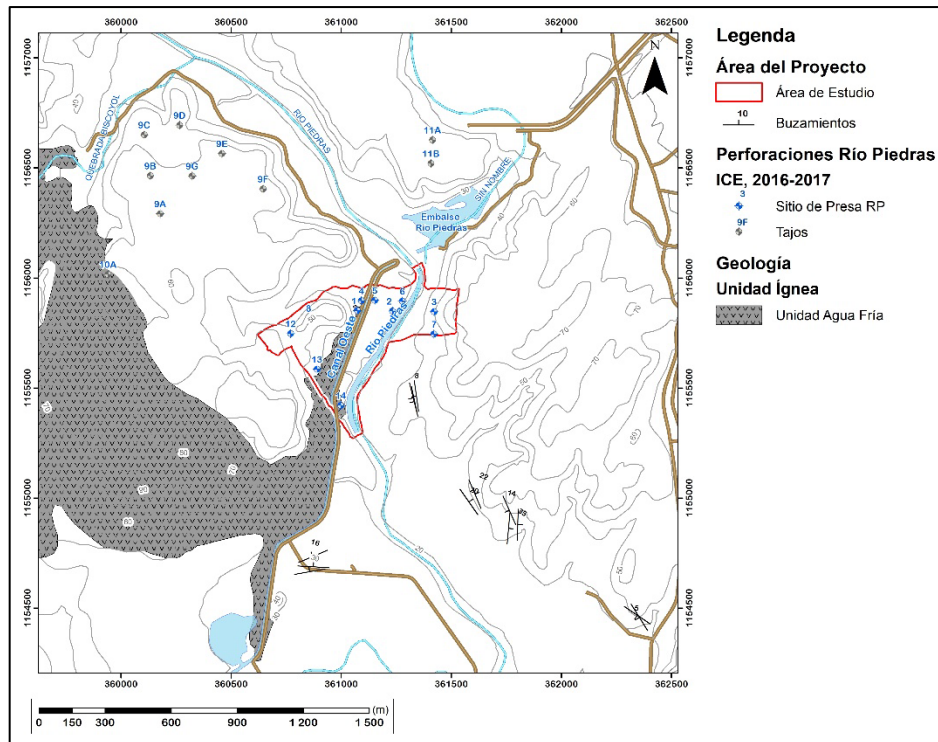


Figura 46. Área mapeada de la unidad ígnea Agua Fría (Tomado y modificado de Barrantes, 2018)

Esta unidad se ubica estratigráficamente intruyendo los sedimentos de la unidad sedimentaria Falconiana, y sobre el contacto superior con la unidad Rama de Nance. En todos los registros de las perforaciones realizadas en el área de estudio, se encuentra presente, siendo perforada de forma penetrante tanto a través del contacto superior como del inferior, a excepción de la perforación 8, en donde el contacto inferior no fue localizado.

En las perforaciones registra la formación de brechas peperíticas, hacia los contactos superior o inferior o en ambos, el mayor espesor descrito de estas brechas se muestra en la perforación 14, ubicada hacia el Sur del área de estudio, en donde se describen 8 m de espesor registrados en los primeros metros de perforación.

Los espesores visibles asociados a esta unidad a partir de los afloramientos son de 1,5 a 4,0 m, mientras que, en las perforaciones de Río Piedras, los espesores mínimos y máximos registrados corresponden a los 6,1 m en la perforación 5 y a 30,8 m en la perforación 1.

En general esta unidad se asocia a flujos de lavas andesíticas a dacíticas posiblemente fisurales, algunos de los cuales generaron coladas e intrusiones hipoabisales que se proyectaron lateralmente formando *sills*, los cuales intruyeron sedimentos blandos, mezclándose con los mismos y generando las brechas peperíticas tanto basales como superiores.

Estos flujos en apariencia lávicos, presenta texturas muy variadas, hacia el oeste del área de mapeo, se muestran afloramientos con una intensa fracturación de lajas subparalelas (Figura 47A) y bloques afaníticos con texturas de flujo en forma de bandeamientos rojizos y negros (Figura 47B).

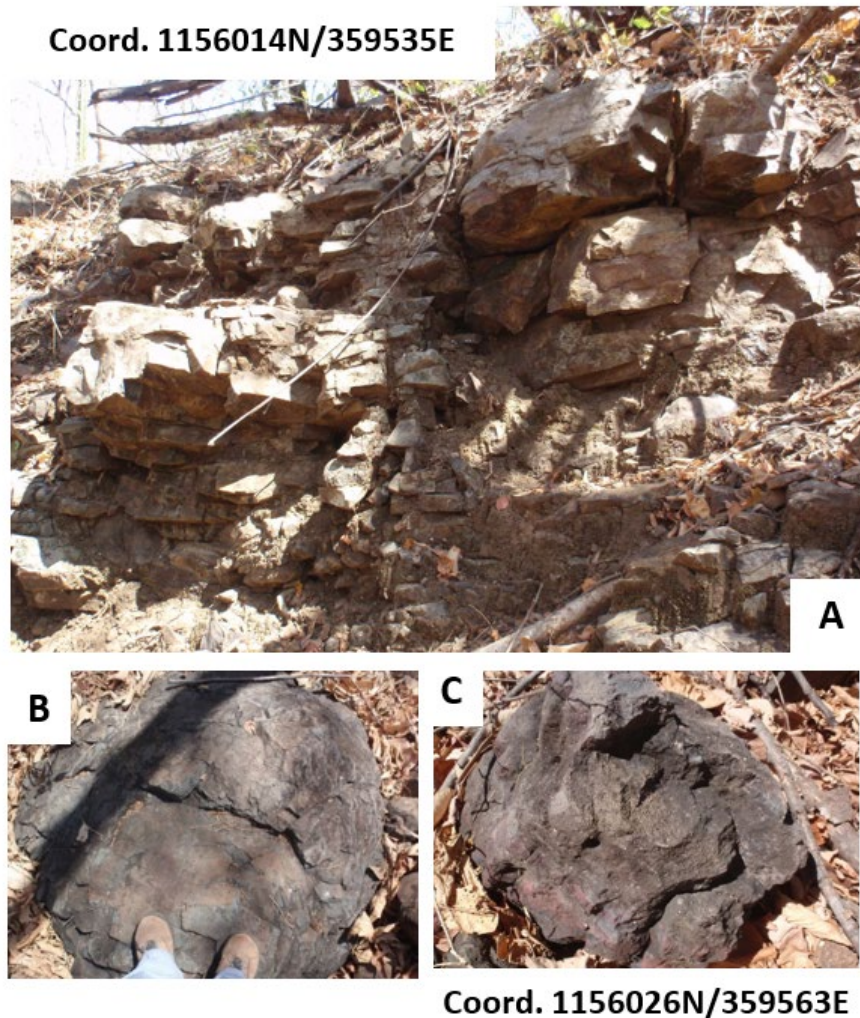


Figura 47. A) Afloramiento de lavas andesíticas densamente lajeadas, B) bloques masivos afaníticos C) con estructuras de bandeamiento rojizo.

Mientras que, en los registros de las perforaciones de Río Piedras y en los afloramientos cercanos al Canal Oeste, las lavas presentan texturas vesiculares bien desarrolladas (Figura 48A), alargadas y orientadas, algunas presentan rellenos de minerales secundarios (vacuolas) como zeolitas las cuales han precipitado en formas botroidales (Figura 48B) así como pátinas de minerales con tonalidades verdes (Figura 48C).

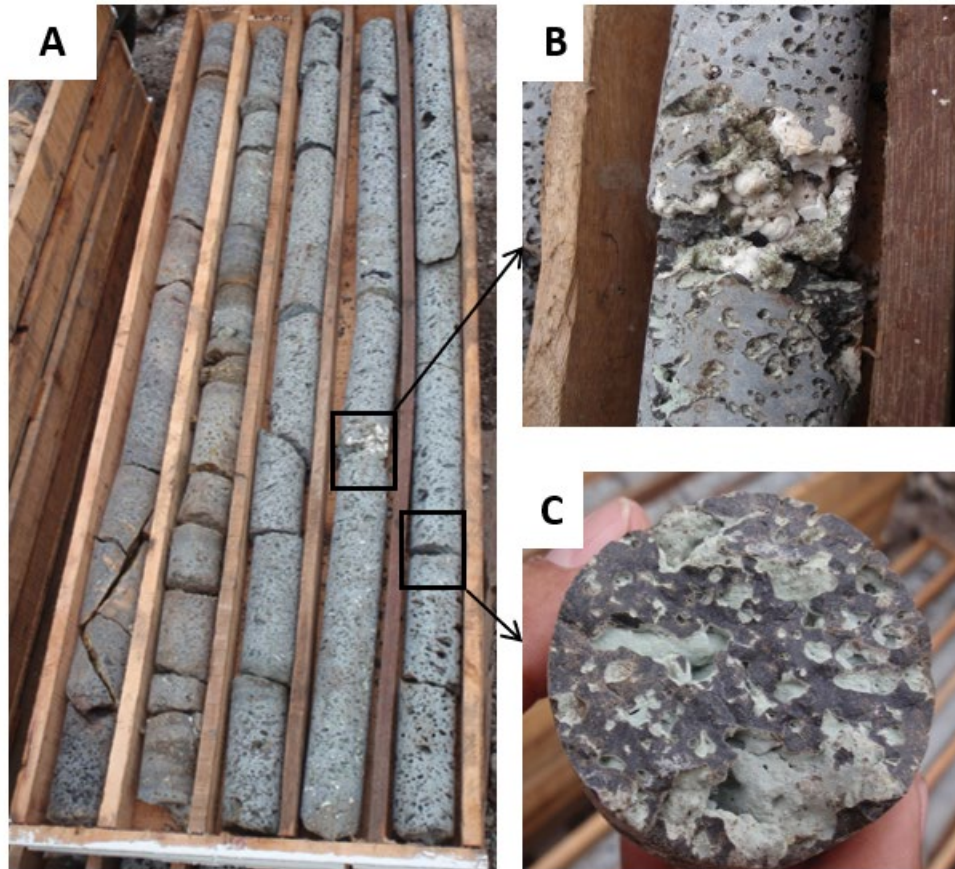


Figura 48. A) Lavas con textura vesicular densa en perforación 3, tramo de 27 a 30 m de profundidad, B) detalle de relleno de zeolitas en forma botroidal y C) vesículas con patinas de minerales secundarios color verde.

Hacia el oeste del área de estudio, sobre la Quebrada Biscoyol (Figura 49AB), así como en la mayoría de los registros de las perforaciones de Río Piedras, esta unidad se muestra la formación de brechas peperíticas (Figura 49C).

Estas brechas peperíticas usualmente monomíticas, presenta bloques angulares andesíticos de tamaños centimétricos (5-13 cm) a decimétricos (15-40 cm). Estos bloques sanos y masivos presentan un contacto predominantemente puntual, con

patinas de hierro y bordes de alteración meteórica. La matriz que une los bloques está compuesta por una arenisca fina tobácea de color blanco, fácilmente disgregable.



Figura 49. A) Afloramiento de brecha peperítica sobre la Quebrada Biscoyol, B) bloque sano de andesita tamaño 10x14 cm, C) Brecha peperítica basal en perforación 3, tramo de 43 a 44 m de profundidad, se observa un borde de alteración café claro alrededor del bloque que flota en sedimentos de areniscas tobáceas finas.

A partir de los registros de las perforaciones del área de estudio, se puede establecer un orden textural de la Unidad emplazada como un intrusivo hipoabisal, desde el techo y hacia la base se muestran brechas peperíticas seguidas de un nivel con textura vesicular densa, la cual tiende a reducirse hasta alcanzar un núcleo masivo y usualmente fracturado, posteriormente se vuelve a generar un nivel vesicular menos denso y o brechoso hacia la base del contacto inferior. Este orden textural no se mantiene en todas las perforaciones, ya que en algunas no se registran niveles masivos centrales (perforaciones 14 y 5), o brechosos hacia los contactos superior o inferior (perforaciones 5, 8 y 12), pero en términos generales la descripción textural coincide con cuerpos intrusivos superficiales enfriados rápidamente.

El potencial hidrogeológico de esta unidad es alto en el área de estudio, ya que presenta continuidad lateral, zonas con alta fracturación e incremento de los niveles estáticos registrados durante el avance de la perforación a través de esta, particularmente en las secciones descritas como flujos masivos fracturados y flujo vesiculares fracturados.

7.3 Marco Tectónico Regional y Local

Regionalmente Costa Rica se ubica sobre la placa del Caribe bajo la cual se subduce la placa del Coco a una razón de 8 mm/año (Lafemina et al. 2009), la zona de subducción se localiza cerca de 60 a 70 km de forma paralela a la línea costa formando la Fosa Mesoamericana. El área de estudio se localiza en el bloque tectónico regional Noroeste que forma el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (Montero 2001, Linkimer, 2003), la Fosa Mesoamericana y las Zonas de Falla del Arco Volcánico, específicamente en la cuenca del antearco volcánico de la Cordillera Volcánica de Guanacaste (Figura 50A).

En el bloque tectónico existen fallas regionales dextrales de rumbo Norte-Sur, las cuales se proyectan desde la Península de Nicoya hasta la zona del antearco y arco volcánico (Denyer et al. 2019), estas fallas son producto del desplazamiento traslacional al

noroeste del bloque tectónico (Lafemina et al. 2009, Montero et al. 2017, Montero & Denyer, 2011).

Denyer et al. (2019), establece diez bloques tectónicos dentro del sector noroeste de Costa Rica (Figura 50), divididos de acuerdo con la historia tectónica que predomina en cada uno. El quinto bloque tectónico al que relaciona con un basculamiento nor-noreste del Plioceno terminal al Pleistoceno, incluye los sistemas de fallas regionales que afectan parte de la zona de estudio a pesar de no encontrarse incluida dentro de este. Este bloque se encuentra limitado al este por la falla Bagaces Oeste y parte la traza sur de la falla Bagaces Este y Carmona Oeste, hacia el oeste por la falla Salto y al suroeste por el sistema de fallas inversas de Loma de Barbudal, las cuales lo extiende alargándolo de forma paralela a la margen izquierda del Río Tempisque (Figura 50B). Este bloque tectónico según Denyer et al. (2019), responde a un basculamiento norte-noreste que permite la formación de las fallas inversas de Lomas de Barbudal y la formación de pliegues como Río Piedras, Granadilla y Río Potrero.

El bloque tectónico VIII en el que se encuentra propiamente la zona de estudio, corresponde según Denyer et al. (2019), a una zona que se caracteriza por no presentar evidencias de una afectación del basculamiento del Plioceno terminal al Pleistoceno a diferencia del bloque V. Este bloque presenta sistemas de fallas dextrales con orientación norte-sur como la falla Palmira, y sistemas de fallas sinestrales con orientación noreste como las fallas Villa Vieja, Estanque y Salitral, y algunas fallas inversas con orientación casi este-oeste como las fallas Torno y Horcones (Figura 50B).

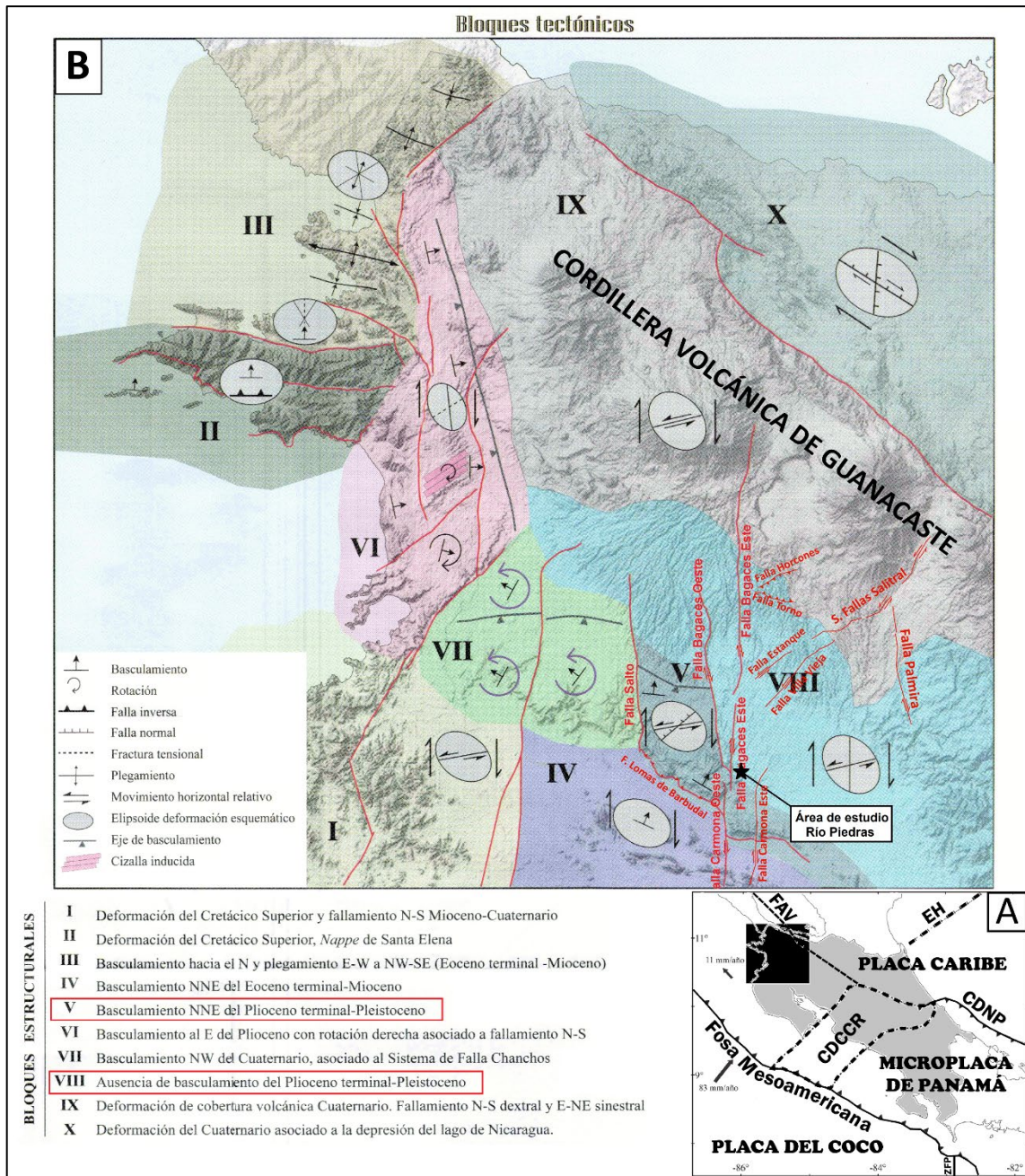


Figura 50. A) Mapa tectónico simplificado de Costa Rica, en el cuadro negro la zona de los bloques tectónicos propuestos por Denyer et al. (2019), y las principales estructuras tectónicas regionales como lo son: Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), Escarpe de Hess (EH), Fallas del Arco Volcánico (FAV), Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), (Tomado y modificado de Arroyo et al. 2017). B) Mapa de bloques tectónicos propuestos por Denyer et al. (2019), en donde se muestra la ubicación del

área de estudio cerca de la Falla Bagaces Este, y entre los límites de los bloques tectónicos V y VIII (Tomado y modificado de Denyer et al. 2019).

El área de estudio se encuentra dentro de varias fallas regionales con movimiento dextral (Figura 51), como lo son la falla Carmona Oeste, Bagaces Oeste y Bagaces Este (Denyer et al. 2019) ubicadas la oeste del área de estudio, y la falla Montenegro (ICE, 2016b) y Carmona Este ubicada al este, así como varios sistemas de fallas de movimiento normal propuestas por ICE (2016b) y Barrantes (2018) orientadas en ángulos cercanos a los 45° entre estos sistemas dextrales. De acuerdo con las estructuras del elipsoide de deformación, para un sistema de esfuerzos dextral formado por el bloque de las fallas Montenegro y Carmona Oeste y Bagaces Oeste-Este, las fallas normales se alinean de forma perpendicular a los esfuerzos tensionales menores (σ_3), en correspondencia con este criterio se ajustan las fallas normales propuestas por ICE (2016b) y Barrantes (2018) como Quebrada Pital, Santa Isabel, Loma Pretil, Sitio Matapalo, Papaturre y Lora (Figura 51), mientras que las falla inversas se alinean de forma perpendicular a los esfuerzos compresivos mayores (σ_1) como son las fallas Loma de Barbudal y la F5. Los ejes de los pliegues estarían también orientados de igual manera a dichos esfuerzos, siendo coincidente el eje del pliegue anticlinal paralelo al sinclinal de Granadilla, ambos propuestos por Denyer et al. (2019). Aunque el eje del sinclinal Granadilla se alinea a las estructuras tectónicas de estos sistemas dextrales, el mismo se ubica fuera del sistema, por lo que es posible que corresponda más a los esfuerzos asociados al Bloque V constituido por las Fallas dextrales Bagaces Oeste y El Salto.

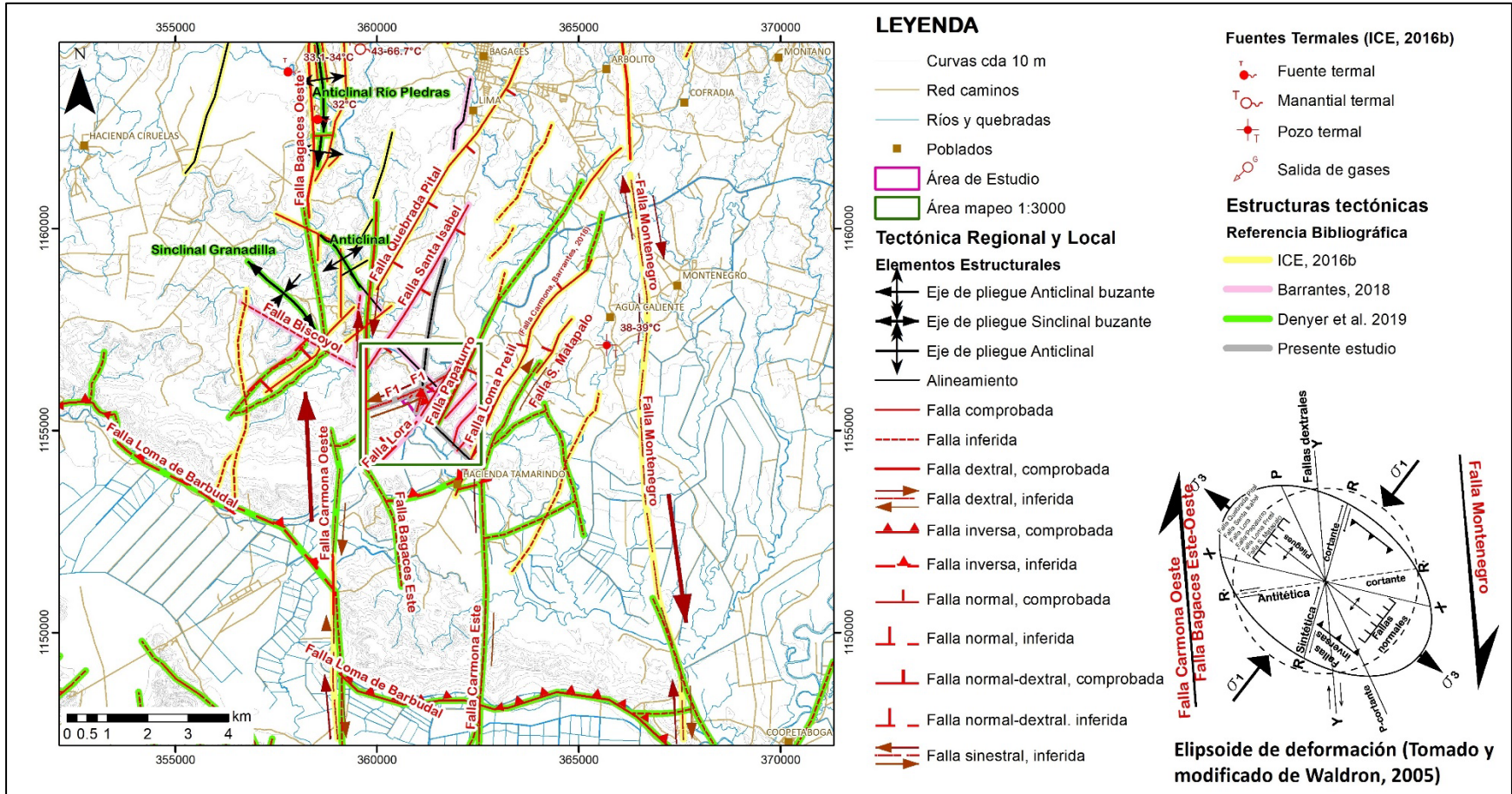


Figura 51. Sistemas de fallas regionales y locales que afectan el sitio de estudio, se muestra el detalle de la referencia bibliográfica recopilatoria de las estructuras tectónicas presentes.

A continuación, se mencionan las fallas regionales más importantes cercana al área de estudio:

7.3.1 Fallas Regionales

A- Sistema de Fallas Carmona-Bagaces

Este sistema de fallas predominantemente dextrales, fue renombrada por Denyer et al (2019), al unificar las trazas de la falla Carmona de rumbo norte-sur ubicada en la península de Nicoya al sur del río Tempisque y descrita por Montero & Denyer (2011), con la falla Bagaces de rumbo norte-noreste a noroeste localizada hacia el sector norte del Río Tempisque y descrita por Montero & Alvarado (1988).

La falla Bagaces se ubica 3 km al Oeste de la ciudad de Bagaces, presenta una longitud de 40 km de extensión y se compone de tres segmentos: Bagaces Oeste, Bagaces Central y Bagaces Este (Denyer et al. 2019), los cuales son paralelos entre sí con una tendencia curvilínea en el último segmento (Montero & Alvarado, 1988). Particularmente el segmento Bagaces Este, es el más cercano al sector este del sitio de estudio (1 km aprox.) y corresponde a la falla regional más importante (Figura 50).

La falla Carmona inicia en la península de Nicoya a lo largo de una única traza de falla, y se extiende hacia la margen izquierda del río Tempisque en dos segmentos paralelos denominados Carmona Este, con rumbo N5°E, y Carmona Oeste, con un rumbo N5°W con 78° al noreste (Denyer et al. 2019), el límite del extremo Norte de ambos segmentos corresponde con el extremo sur del área de mapeo.

B- Falla Montenegro

Esta falla de movimiento relativo dextral con rumbo norte-sur es descrita por ICE (2016b), y se localiza cerca de 5 km al este del área de estudio (Figura 50). En este sector se define como una falla inferida cuyo trazo comprobado se ubica más hacia el norte. Según ICE (2016b), esta falla se compone de dos segmentos, el segmento norte presenta evidencias morfológicas las cuales se mantienen desde el inicio de la traza de falla en el

sector sur de la Caldera de Guayabo y hasta el suroeste del poblado de Cofradía. El segmento sur, el cual es inferido debido a la poca presencia de estructuras morfológicas, inicia al suroeste del poblado de Cofradía, extendiéndose hasta el costado este de la Fila Catalina.

C- Falla Lomas de Barbudal

Esta falla se localiza al sur y suroeste fuera del área de mapeo, su traza inferida más cercana se ubica aproximadamente a 2,6 km del extremo suroeste del área de estudio (Figura 50). Fue sugerida inicialmente por Denyer et al. (2003) y Denyer & Alvarado (2007), como una falla de movimiento relativo inverso, cuya traza se ubica en la base de las laderas al suroeste y sur de las Lomas de Barbudal y los Cerros Gordo-Nambiral, posteriormente Denyer et al. (2014), la define como una falla inversa con una componente sinistral, ya que establece varios desplazamientos en la segmentación y la continuidad litológica de la estratigrafía de la lomas y filas en donde se ubica. Según Denyer et al. (2019), esta falla bascula hacia el norte y noreste a las unidades volcánicas ígneas, como los son las Dacitas Carbonal y Lavas Pelón de la Bajura (unidad ígnea Río Frío).

D- Sistema de Fallas Pital

Barrantes (2018), define que existe un sistema de fallas de poca extensión y movimientos relativos de tipo normal, asociados a los esfuerzos de la falla Bagaces, en este sistema se incluyen las fallas:

- Falla Quebrada Pital: Esta falla se ubica en el extremo norte fuera del área de mapeo. En su traza al suroeste se localiza a una distancia de 2,7 km del área de estudio (Figura 50). ICE (2016b) y Barrantes (2018), describen esta falla con una orientación de la traza de noreste-suroeste y una longitud de 13,7 km, con ángulos de buzamiento del plano de falla asociados que varían de 50° a 89° al

sureste, siendo la mediana 86° . El desplazamiento según Barrantes (2018) es relativo normal y es determinado por criterios morfoestructurales de escarpe de falla.

- Falla Santa Isabel: esta falla se ubica al noroeste del área de mapeo en un segmento de traza sobre una sección de la Quebrada Biscoyol, se localiza a una distancia de 1,3 km al área de estudio (Figura 51). ICE (2016b) y Barrantes (2018), describen esta falla con una orientación de la traza noreste-suroeste y una longitud de 7,5 km, los ángulos de buzamientos asociados al plano de falla varían de 70° a 78° al sureste. El movimiento relativo asociado a esta falla es de tipo normal es inferido por Barrantes (2018) de acuerdo con el control estratigráfico de la Unidades mapeadas.
- Falla Papaturre: esta falla se ubica dentro del área de mapeo hacia el sector este, en su traza más cercana al área de estudio se localiza a una distancia aproximada de 300 m (Figura 51). Barrantes (2018), describe esta falla con una traza de rumbo noreste a suroeste y una longitud de 4,2 km, el movimiento inferido es de tipo normal con ángulos de buzamientos del plano al sureste que varían de 75° a 85° .
- Falla Lora: Barrantes (2018), la describe como una falla con una traza de rumbo noreste-suroeste y una longitud de 2,5 km, el movimiento inferido es de tipo normal y el buzamiento del plano al noroeste presenta ángulos que varían de 37° a 90° , siendo la mediana 80° . Esta falla en particular es de mayor importancia pues se localiza sobre la margen izquierda de río Piedras atravesando longitudinalmente el área de estudio (Figura 51), el plano de falla buzante hacia el noroeste genera entre el cauce de río Piedras y el canal Oeste una zona de graven con la falla propuesta F4 (Figura 51).
- Falla Loma Pretil (Falla Carmona de Barrantes, 2018): esta falla se ubica hacia el sureste dentro del área de mapeo y en su traza más cercana se localiza a una distancia de 1,5 km del área de estudio (Figura 51). ICE (2016b), define esta falla

con una dirección de traza de falla inicialmente norte-noreste a sur-suroeste, para posteriormente orientarse noreste-suroeste, con una longitud de 5,6 km y un ángulo de buzamiento vertical. Barrantes (2018), determina que la zona de falla ubicada en el Tajo Cortez se asocia a la falla que nombra Carmona y coincide con la ubicación y rumbo de la Falla Loma Pretil. En el tajo Cortez las fallas en las que se puede evidenciar algún tipo de desplazamiento corresponden todas a movimientos relativos de tipo normal, los ángulos de buzamiento asociados a estas fallas varían de 50° a 89° al noreste, siendo la mediana 75°.

- Falla Biscoyol: esta falla se ubica hacia el oeste fuera del área de mapeo, en su traza más cercana se localiza a una distancia de 1,4 km del área de estudio (Figura 50). Barrantes (2018) define esta falla como inferida a partir de criterios geomorfológicos como el alineamiento de la Quebrada Biscoyol, y una zona de fracturas asociadas. El rumbo propuesto de la traza es sureste, con una longitud de 3 km, y sin evidencias de un movimiento asociado, las fracturas asociadas a la zona de falla presentan buzamientos de entre los 52° a 89° predominantemente al suroeste (Barrantes, 2018).

7.3.2 Fallas Locales

La siguiente lista de fallas numeradas del F1 al F5, son aquellas fallas inferidas o comprobadas en el área de estudio (Figura 52), también debe incluirse la falla Lora descrita anteriormente dentro del Sistema de fallas Pital, que atraviesa longitudinalmente el área de estudio a lo largo de río Piedras.

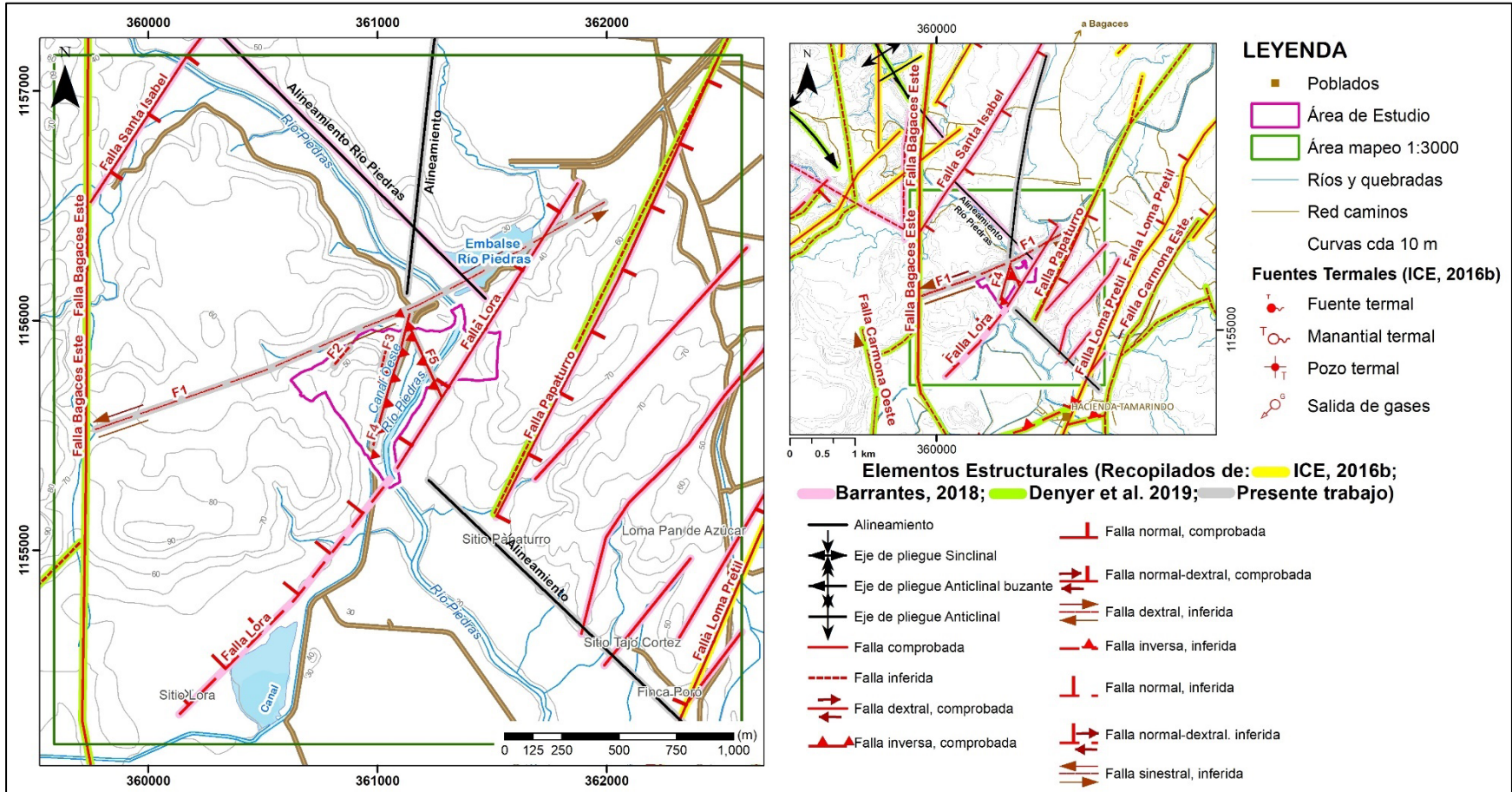


Figura 52. Mapa de estructuras tectónicas dentro del área de mapeo y en el sitio de estudio.

- Falla F1: esta falla inferida se le asocia un posible movimiento de tipo siniestral a partir de los criterios del elipsoide de deformación (Figura 50), así como aspectos geomorfológicos tales como:
 - o La alineación presentada entre los cerros y lomas de la margen derecha del canal Oeste.
 - o La simetría de los drenajes hacia ambas márgenes de río Piedras, y
 - o La curvatura que presenta el cauce del río Piedras en este sector y la linealidad del drenaje previo al Embalse actual en una foto histórica n° 798 y 799 (IGN, 1952).

A esta falla se le asocia una longitud de 2,4 km, con una traza que inicia desde el sector noreste del embalse actual, atravesando el río Piedras y extendiéndose a lo largo de la depresión entre las lomas ubicadas en la margen derecha del canal Oeste.

- Falla F2 y F3: estas fallas son inferidas a partir de las anomalías propuestas en perfil geofísico 1 (Figura 57), limitan lateralmente la unidad ígnea Agua Fría, y se asocian mayormente a zonas de fracturas por las que posiblemente ascendió dicha unidad.
- Falla F4: esta falla es comprobada en la perforación 5, en la zona de falla descrita entre los 57,75 a 62,55 m de profundidad (Figura 53) y en las anomalías propuestas de los perfiles geofísicos 1 y 2 (Figura 57 y 58).



Figura 53. A) Perforación 5 tramo 61,50 a 67,10 m, zona de falla color verde intenso asociada a la Falla F5, B) detalle de planos con espejos de falla transversal al núcleo.

A esta falla se le infiere un movimiento inverso ya que muestra un levantamiento del contacto inferior de la unidad ígnea Agua Fría con la unidad sedimentaria Falconiana, de aproximadamente 10 m en relación con la profundidad registrada en dicho contacto para las perforaciones circundantes (1, 2, 4 y 6). Es posible que presente también un movimiento de rumbo asociado, pues tiende a reducir significativamente el espesor de la unidad ígnea Agua Fría, en una relación de tres a cinco veces en comparación con el espesor registrado en las perforaciones 1, 2, 4 y 6.

Esta falla se orienta de forma paralela a la margen derecha del canal Oeste, extendiéndose desde el noreste en el cruce con la falla F1 hacia el suroeste, a lo largo de 600 m de longitud, con buzamiento del plano estimado de 80° al sureste, desplazando la unidad sedimentaria Falconiana y la unidad ígnea Agua Fría.

- Falla F5: esta falla es comprobada en la perforación 5, en la zona se falla descrita entre los 32,60 a 34,25 m de profundidad, así como en las anomalías propuestas en los perfiles geofísicos 1, 2 y 4 (Figuras 57, 58 y 59). La traza de esta falla se extiende desde el noroeste cerca del cruce con la falla F4, a lo largo de 375 m hasta cruzar el río Piedras y finaliza en el sureste en trazo de la falla Lora. El movimiento de esta falla se asume inversa debido a que junto con la falla F4 forman una cuña compresiva que levantan el contacto inferior de la unidad ígnea y reducen el espesor de esta, el ángulo de buzamiento del plano estimado para esta falla es de 65° al suroeste.
- Falla Lora: propuesta por Barrantes (2018) y mencionada anteriormente, es reubicada en el presente trabajo, desplazándola de forma paralela a su ubicación actual a lo largo de una distancia de 90 a 100 m hacia el sureste, esto se determina partir de las zonas de anomalías existentes en los perfiles geofísicos 1 y 11 (Figuras 57 y 61)

7.3.3 Alineamientos

Barrantes (2018), define dos alineamientos con rumbo noroeste a sureste ubicados a lo largo del cauce en dos segmentos del río Piedras. El alineamiento más significativo y cercano el área de estudio es denominado Río Piedras, y se ubica aguas arriba desde el borde sureste del embalse actual, con rumbo noroeste-sureste a lo largo de 1,68 km y de forma paralela a la margen izquierda del río Piedras (Figura 52).

A continuación, se definen dos alineamientos: Norte-Sur y Papaturre, basados en análisis de fotos históricas (Figura 54)

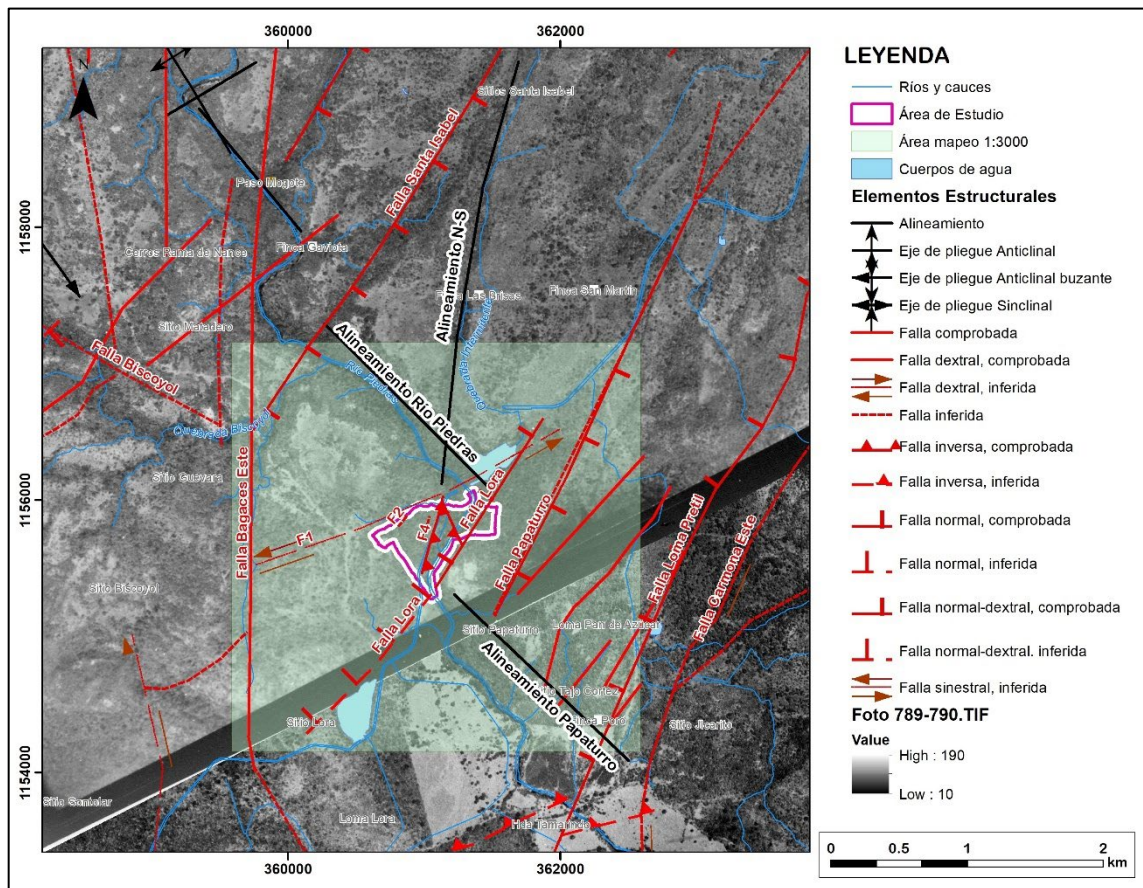


Figura 54. Estructuras tectónicas y alineamientos propuestos en el sitio de estudio y en el área de mapeo, a partir de las fotos históricas n°798 y 799 (IGN, 1952).

- Alineamiento Papaturre: Se define a partir de criterios geomorfológicos vistos en las fotos históricas n° 790 y 789 (IGN, 1952), localizándose hacia el suroeste fuera del área de estudio y hacia aguas abajo del río Piedras. Inicia en el noroeste cerca del sitio Papaturre, extendiéndose a lo largo de 1,8 km de forma paralela a la margen izquierda del río Piedras, hasta cruzar la falla Loma Pretill en el sureste. Este alineamiento pareciera ser una proyección de la Falla Biscoyol ubicada hacia el extremo noroeste por Barrantes (2018).

- Alineamiento norte-sur (N-S): se localiza hacia el norte del área de estudio, a una distancia aproximada de 150 m. Inicia en el norte cerca de la traza de la falla Santa Isabel, extendiéndose a lo largo de 3,15 km y de forma paralela a una quebrada intermitente, hasta cruzar el Alineamiento Río Piedras y el cauce de río Piedras en su extremo sur. Se define a partir de los análisis geomorfológicos de las fotos históricas n°798 y 799 (IGN, 1952). Por la orientación de este alineamiento, parece corresponder con la dirección de la traza de falla F4, por lo que se podría asociar a una posible extensión de esta (Figura 54).

VIII. GEOFÍSICA

Los perfiles geofísicos realizados por el ICE (2018), para el proyecto Río Piedras comprenden varios métodos: sísmicos, eléctricos y electromagnéticos. Se analizaron los perfiles realizados con los métodos eléctricos y electromagnéticos, y a partir de las cuales se retomaron los datos originales y se reprocesaron utilizando los softwares IPIS2Win, Res2Dinv y WinGlink, con el fin de establecer uniformidad en los diferentes modelos geoelectrónicos para su adecuada correlación litológica, y definir zonas de anomalías comunes entre perfiles, que podrían estar asociadas a las trazas de fallas propuestas.

En total se analizaron 10 perfiles de SEV, 5 perfiles de ERT y 2 perfiles de TDEM, a partir de los cuales se muestran los 6 más representativos para el modelo geológico propuesto.

En la tabla 12, se muestran los perfiles realizados por del ICE (2018), con los métodos geofísicos asociados a cada uno y los perfiles escogidos para el presente trabajo.

Tabla 12. Perfiles de la geofísica realizada por el ICE (2018) con los métodos asociados, los equipos utilizados y las coordenadas de inicio y fin.

Nombre del perfil geofísico	Equipos Utilizados			Utilizados en el presente trabajo	Estación de Inicio y final	Coordenadas CRTM05	
	Syscal Pro	Phoenix V8-T3				Latitud N	Longitud E
		Método geofísico					
	SEV	ERT	TDEM				
Perfil 1	✓	✓		✓	P1.0+000	1155857,3	360819,8
					P1.0+700	1155843,0	361519,7
Perfil 2	✓			✓	P2.0+000	1155896,4	361020,5
					P2.0+350	1155896,4	361370,5
Perfil 3	✓	✓			P3.0+000	1155695,4	361420,1
					P3.0+300	1155995,3	361431,0
Perfil 4	✓	✓		✓	P4.0+000	1155615,8	361061,3
					P4.0+300	1155857,0	361239,9
Perfil 5	✓	✓			P5.0+000	1155477,3	360913,5
					P5.0+600	1156026,9	361154,5
Perfil 6	✓				P6.0+000	1155909,9	360829,7
					P6.0+340	1155610,3	360968,1
Perfil 7	✓	✓		✓	P7.0+000	1155830,6	360713,0

Perfil 8	✓			P7.0+530	1155399,4	361021,1
				P8.0+000	1155667,1	360658,7
				P8.0+350	1155874,5	360940,7
Perfil 9	✓			P9.0+000	1155558,2	360845,4
				P9.0+100	1155616,6	360926,5
Perfil 10	✓			P10.0+000	1155372,0	360998,3
				P10.0+100	1155471,9	361003,6
Perfil 11		✓	✓	P11.0+000	1155842,1	360945,9
				P11.0+630	1155837,1	361575,8
Perfil 12		✓	✓	P12.0+000	1155666,0	360972,0
				P12.0+390	1155941,0	361248,9

Los rangos de resistividad definidos y homologados para las diferentes litologías, según las descripciones presentes en las perforaciones y los valores de resistividad concordantes a la profundidad de estas, se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Rangos de resistividad asociados a las diferentes unidades litológicas propuestas.

Rango de Resistividad (Ohm*m)	METODOS GEOFÍSICOS			CORRELACIÓN LITOLÓGICA
	Escala de color asociada a los rangos de resistividad de cada uno			
	SEV	ERT	TDEM	
100-300				Unidad Ígnea: lavas vesiculares, fracturadas y masivas, brechas peperíticas
>100				Unidad Volcanoclástica: ignimbritas moderadamente a bien soldadas, tobetas soldadas
20-90				Unidad Sedimentaria Superior: arenas medias a finas poco cementadas y disgregables
1-30				Unidad Sedimentaria Profunda: areniscas finas a medias y gujarrosas
1-20				

En las unidades sedimentarias van a predominar los rangos de resistividad bajo (1-30 Ohm*m), debido a la granulometría del depósito y la poca cementación de las capas, mientras que en las unidades volcanoclásticas e ígneas predominan las resistividades intermedias (20-90 Ohm*m) cuando se muestran poco soldadas o como brecha peperíticas, y las resistividades altas (> 100 Ohm*m) cuando se presentan como zonas o núcleos sanos masivos y bien soldados.

8.1 Sondeos eléctricos verticales (SEV)

Se analizaron 10 perfiles geofísicos realizados con el equipo Syscal Pro, utilizando el método de SEV en la configuración Schlumberger. Se utiliza el software IPI2Win para la interpretación de las curvas SEV y la elaboración de los modelos, el mismo se calibra mediante las perforaciones 2 y 3 para el perfil 1, con las perforaciones 4, 5 y 6 para el perfil 2, la perforación 2 para el perfil 4, y las perforaciones 12, 13 y 14 para el perfil 7, los modelos de capas realizados con el software presentan valores de RMS de <1% a 15% como máximo.

En la figura 55, se muestra el ejemplo de calibración realizada para el sondeo 0+600 del perfil 1, con la perforación 3 simplificada la capa la guía para adecuar las capas sobreyacentes, corresponde a las lavas, correlacionadas a los valores de resistividad altos de 168 Ohm*m y espesores de 18 m, las cuales se ubican entre los 23 a 44 m de profundidad. Los valores bajos e intermedios de 2 a 12 Ohm*m se correlacionan con el sedimentario profundo y somero ubicado por encima de las lavas, y los valores intermedios de 60 Ohm*m, a los depósitos volcanoclásticos, en ambos casos aplican los espesores y los rangos de profundidad registrados en la perforación, el ajuste final presenta un error RMS de 7,1%.

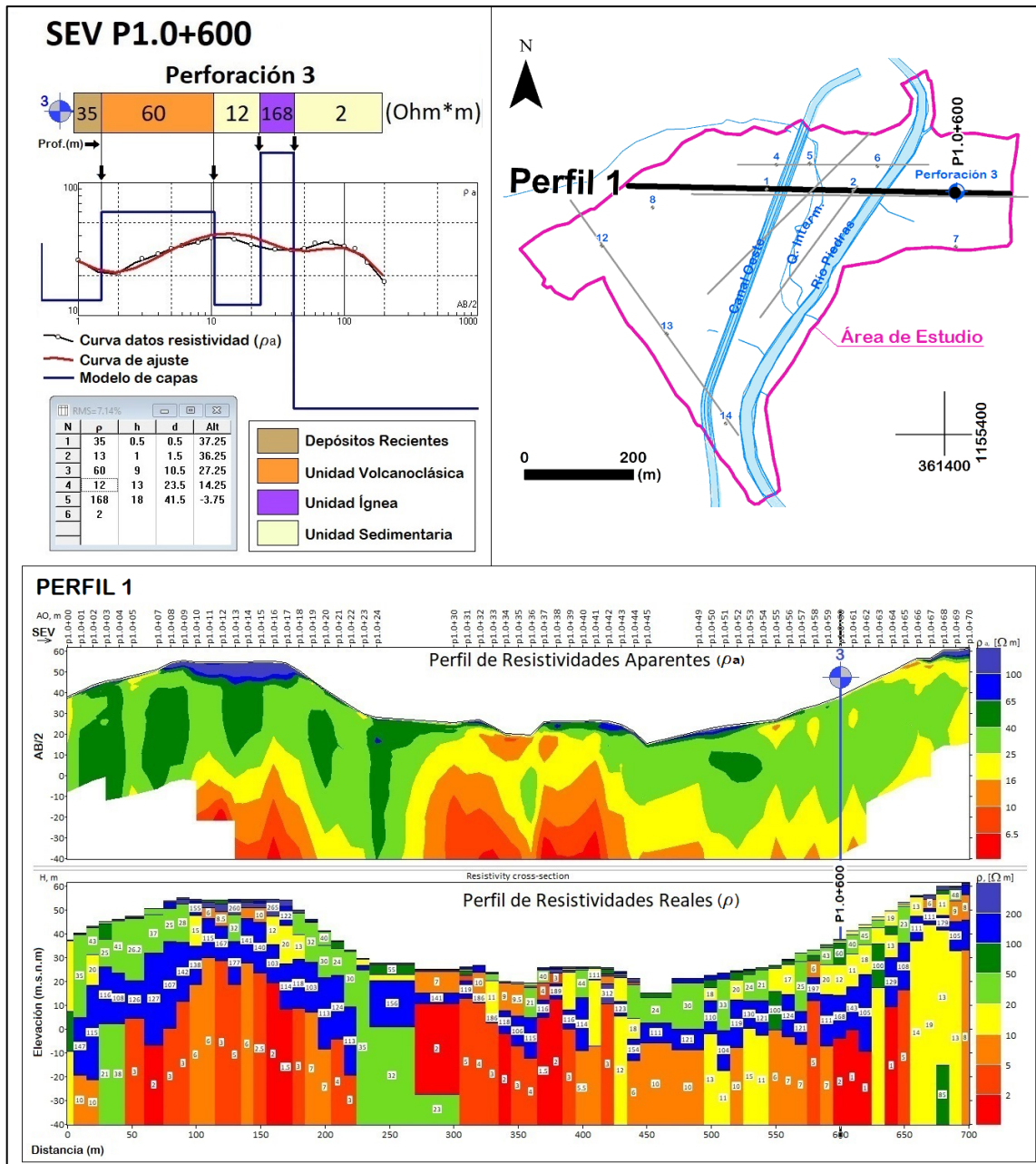


Figura 55. Calibración del sondeo SEV P1.0+600 con la perforación 3, ubicada en el estacionamiento 0+600 del perfil geofísico 1.

Estos perfiles SEV están constituidos por un mínimo de 11 sondeos hasta un máximo de 62, los cuales están nombrados de acuerdo con los estacionamientos que conforman cada perfil, cada sondeo es integrado por 18 a 22 datos que forman las curvas de

resistividad. Los sondeos se encuentran distanciados entre 10 hasta 20 m entre sí, las longitudes y la profundidad de investigación mínima y máxima en cada uno se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de los perfiles geofísicos realizados con el método SEV

Nombre del Perfil	Método geofísico SEV			Prof. Investigación (m)	Perfiles utilizados
	Aberturas de Electrodo AB/2	Long. (m)	Cantidad SEV por perfil		
Perfil 1 (P-1)	mín=120 máx=300	700	62	60-150	✓
Perfil 2 (P-2)	mín=120 máx=250	350	31	60-125	✓
Perfil 3 (P-3)	mín=120 máx=250	300	31	60-125	
Perfil 4 (P-4)	mín=120 máx=250	300	31	60-125	✓
Perfil 5 (P-5)	mín=120 máx=200	600	45	60-100	
Perfil 6 (P-6)	mín=120 máx=150	340	35	60-75	
Perfil 7 (P-7)	máx=150	530	50	75	✓
Perfil 8 (P-8)	máx=150	350	36	75	
Perfil 9 (P-9)	máx=150	100	11	75	
Perfil 10 (P-10)	máx=150	100	11	75	

A partir del análisis de los perfiles, se determina que los perfiles 1, 2, 4 y 7, corresponden como los más representativos del modelo geológico propuesto y, por lo tanto, son los que se reinterpretan a detalle.

8.2 Tomografías eléctricas (ERT)

Sobre la misma línea de los perfiles SEV, se realizaron 5 perfiles de ERT utilizando el equipo Phoenix V8-TxII, y la configuración Dipolo-Dipolo. Los modelos de resistividad eléctrica obtenidos se realizaron con el software Res2dinv, dichos modelos presentan

errores RMS asociados desde 10 a 27% como máximo. Los electrodos (*spots*) alineados a lo largo de los perfiles se encuentran separados cada 20 m entre sí, la frecuencia de muestreo es de 5 Hz y los tiempos para la adquisición de 3 valores de resistividad, es de 5 min en total.

Las líneas de resistividad obtenidas están compuestas por 6 a 14 datos de resistividad como máximo, dichas líneas se agrupan en un único archivo, el cual se ordenan de acuerdo con la secuencia de adquisición de los valores, ya sean superficiales o profundos asociados a una misma línea (Figura 56), para posteriormente importarse al software, y generar el modelo de inversión final de los datos.

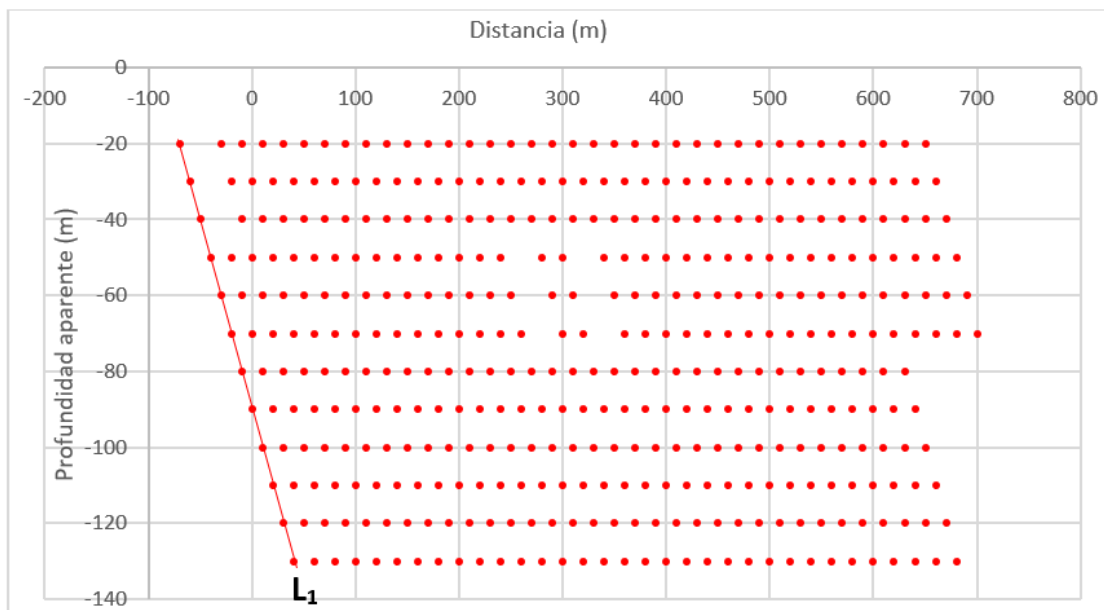


Figura 56. Líneas agrupadas con los datos de resistividad (puntos rojos) que integran el perfil 1

En la tabla 15 se muestran las principales características de los perfiles realizados con el método ERT.

Tabla 15. Parámetros de los perfiles geofísicos realizados con el método ERT

Nombre del Perfil	Método geofísico ERT				Perfiles utilizados
	Cantidad de líneas por perfil	Long. (m)	Prof. Investigación (m)	% RMS modelos	
Perfil 1 (P-1)	37	720	60	27,2	✓
Perfil 3 (P-3)	14	260	60	16,3	
Perfil 4 (P-4)	14	260	60	22,6	✓
Perfil 5 (P-5)	26	500	60	19,3	
Perfil 7 (P-7)	25	480	60	10,1	✓

Los perfiles 1, 4 y 7 seleccionados presentan sus homólogos en los perfiles SEV, lo que permite determinar la veracidad del modelo geológico mediante la confirmación de capas y estructuras geofísicas afines.

8.3 Método electromagnético en dominio del tiempo (TDEM)

Se realizaron dos perfiles electromagnéticos nombrados 11 y 12, los mismo tienen orientaciones diferente a los perfiles SEV y ERT, ya que los lazos para los sondeos deben ajustarse en la medida de lo posible a sectores o zonas planas para evitar desnivelación del cableado que afecte la simetría en la inyección de corriente de forma perpendicular al terreno. Los sondeos TDEM_1 y TDEM_4 se ubicaron en las partes altas de las lomas hacia ambas márgenes del Río Piedras y coincide con la orientación del sitio de Presa, y los otros tres sondeos TDEM_2, TDEM_3 y TDEM_5, en las zonas bajas entre el Río Piedras y el Canal Oeste (Figura 10). Los sondeos se realizaron en el centro de los lazos cuadrados de 100x100 m de área, con dos rangos de frecuencia de muestreo de 5 Hz y 30 Hz, en un periodo de lectura de 15 a 20 min.

Cada perfil de TDEM, está conformado por 4 sondeos (tabla 16), los cuales se comparten entre perfiles, los sondeos están compuestos de 40 datos apilados, la mitad de los cuales se reparten en cada una de las dos frecuencias de muestreo.

Tabla 16. Parámetros de los perfiles geofísicos realizados con el método TDEM

Nombre del Perfil	Método geofísico TDEM			Coordenadas CRTM05		Perfiles utilizados
	Sondeos TDEM	Long. (m)	Prof. (m)	Latitud N	Longitud E	
Perfil 11 (P-11)	TDEM_4	630	350	1155841	360954	✓
	TDEM_3			1155762	361139	
	TDEM_2			1155955	361224	
	TDEM_1			1155838	361569	
Perfil 12 (P-12)	TDEM_5	390	350	1155670	360976	✓
	TDEM_4			1155841	360954	
	TDEM_3			1155762	361139	
	TDEM_2			1155955	361224	

Las curvas de los sondeos de TDEM, se ordenan y revisan con el software de edición TblEdit y TemPro de la casa Instrumental Phoenix, previo al procesamiento con el software, para posteriormente realizarles la corrección de tiempos e interpretarse mediante un modelo de capas en el software WinGlink (Figura 57), los modelos obtenidos tienen un rango de error RMS de 0,2 a 1,2%.

Ambos perfiles 11 y 12, se utilizan para complementar la información en profundidad de la unidad sedimentaria basal, así como las estructuras propuestas.

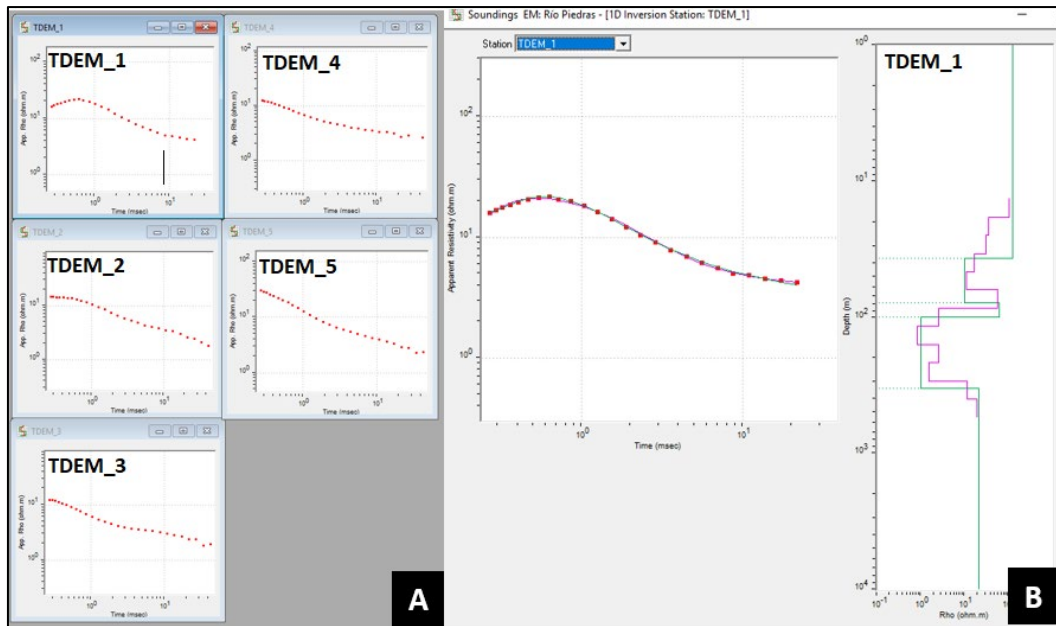


Figura 57. Sondeos de TDEM que conforman los perfiles 11 y 12. A) Los 5 sondeos TDEM con tendencias a reducir la resistividad en profundidad B) Procesamiento con el software WinGlink e interpretación del sondeo TDEM_1 con las curvas sintética (línea rosada) y manual (línea verde).

8.4 Discusión e integración de métodos geofísicos

- Perfil 1 SEV-ERT:

Se ubica a lo largo del eje de presa de Río Piedras, presenta una orientación este a oeste y una longitud de 700 m en el perfil SEV y a 770 m en el perfil ERT, cruza las perforaciones 1, 2 y 3 en los estacionamientos 0+260, 0+410 y 0+600, respectivamente.

Este perfil en las metodologías de SEV y ERT, comparten similitudes en la disposición de las zonas de anomalías asociadas a las fallas F2, F3, F4 y F5, y la ubicación desplazada de la falla Lora a 20 o 30 m de la perforación 3. Las anomalías F2 y F3, se muestran por debajo de los 30 a 10 m de profundidad respectivamente, limitando la continuidad lateral de la unidad ígnea y proyectándose en profundidad de forma subvertical hasta la elevación -40 m.s.n.m. Las anomalías asociadas a las fallas F4 y F5, forman en ambos perfiles SEV y ERT, una cuña de planos opuestos, claramente visible en el comportamiento de los rangos de resistividad de los perfiles de iso-resistividad aparente de los SEV y en el perfil de ERT (Figura 58). Ambas anomalías se proyectan hacia la unidad sedimentaria profunda, limitando y desplazando la continuidad lateral de la capa ígnea de alta resistividad, y levantando el techo del basamento local asociado a la unidad sedimentaria profunda, tal y como se muestran también en la perforación 5.

A partir de los rangos de resistividad establecidos y a los cruces de los perfiles con las perforaciones, 1, 2 y 3 en el perfil 1, se establece una muy buena correlación entre el modelo del perfil ERT con los contactos litológicos reales, a diferencia del modelo SEV, en donde se dificulta ajustar los valores de las unidades mayormente diferenciables como lo son la sedimentaria y la ígnea, con los rangos de resistividad obtenidos mediante las curvas. La mayor diferencia entre los modelos se muestra entre los estacionamientos iniciales desde 0+040 a 0+200, y por debajo de los 30 m de profundidad aproximadamente, en donde la unidad ígnea en el modelo ERT, se proyecta por debajo de la loma con resistividades asociadas a valores $> 50 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, y hasta la profundidad

máxima de investigación cerca de la elevación -40 m.s.n.m, siendo limitada lateralmente por las zonas de anomalías F2 y F3. Por el contrario, en el modelo SEV interpretado, las curvas tienden a decrecer a lo largo de todo este trayecto y en la medida que las lecturas profundizan a partir de valores de 80 a 100 AB/2, por lo que muestra una unidad ígnea cuyo techo coincide con el modelo ERT, pero hacia el contacto inferior se encuentra limitada por una capa muy bajo-resistiva localizada a partir de los 20 a 40 m de profundidad, la cual presenta una forma curva con tendencia a incrementar el espesor hacia la sección central de la loma.

Es posible que esta diferencia se deba principalmente al proceso de adquisición de datos, siendo el SEV valores puntuales adquiridos cada 10 a 20 m de AB/2, modelados en un proceso de inversión 1D, mientras que el ERT consiste en un barrido lateral continuo con un proceso de inversión en 2D, mucho más sensible a los cambios laterales y por lo tanto más consistentes con los contactos litológicos de las perforaciones.

En ambos modelos la unidad ígnea presenta resistividades con dos rangos de resistividad diferenciables, un primer rango con resistividades intermedias de 50 a 90 Ohm*m, posiblemente asociados a roca ígnea fracturada y saturada, y el segundo rango de resistividad con valores de 100 a 250 Ohm*m, asociados a zonas o núcleos sanos dentro de la unidad. Esta unidad ígnea se localiza por debajo de los 10 a 15 m de profundidad y presenta una forma lenticular que tiende a adelgazarse hasta acuíñarse hacia la sección central del perfil, entre el canal Oeste y el río Piedras. Hacia la margen derecha sobre la loma, esta unidad ígnea, se muestra de forma más predominante y profunda (Figura 62), mientras que hacia la margen izquierda se muestra de forma tabular continua y paralela a la superficie (Figura 58).

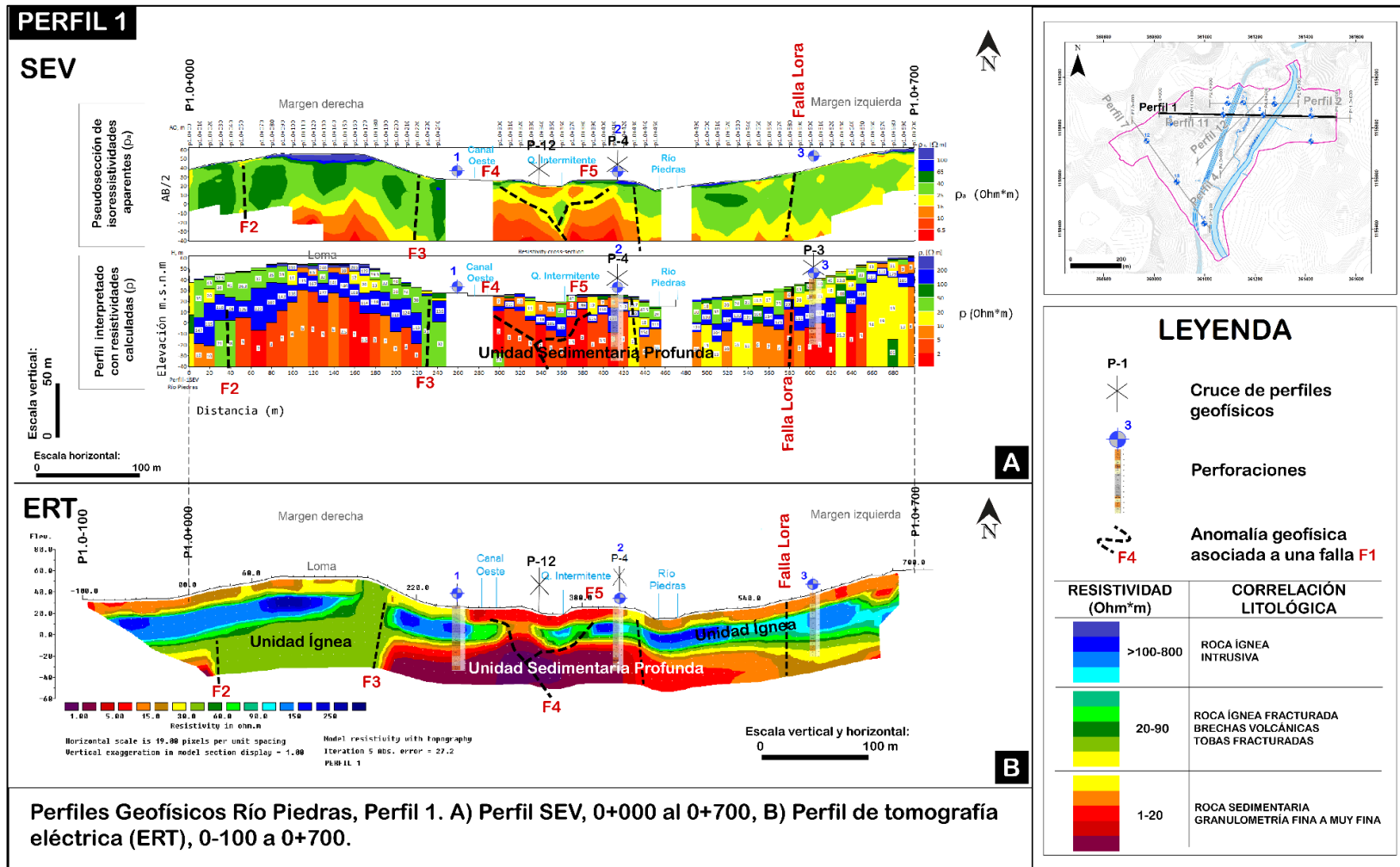


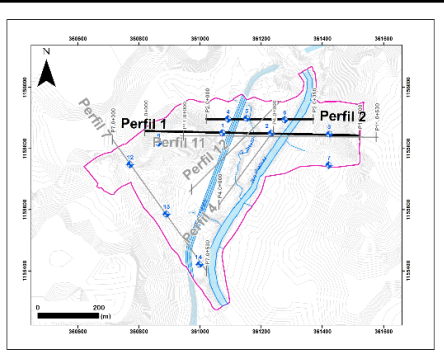
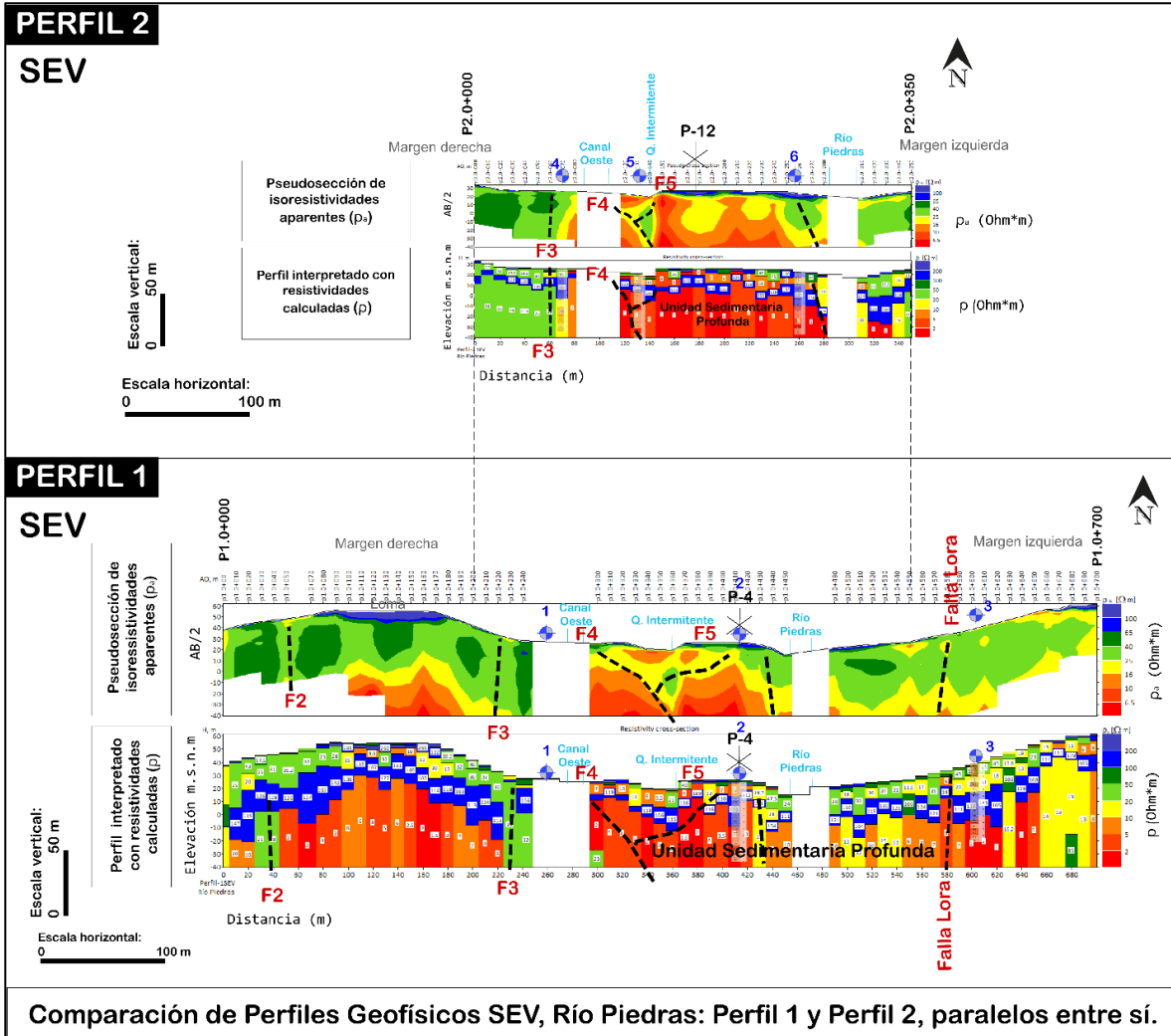
Figura 58. Perfil Geofísico 1 A) realizado con el método SEV y B) realizado con el método ERT.

- Perfil 1 y 2 SEV:

El perfil 1 se ubica a lo largo del eje de presa de Río Piedras, mientras que el perfil 2 se localiza de forma paralela y aguas arriba del mismo, a una distancia de 50 m. Ambos perfiles presentan una orientación este a oeste y una longitud de 700 m para el perfil 1 y 350 m para el perfil 2, este último se localiza semi-centrado entre el río Piedras y el canal Oeste. El perfil 2 cruza las perforaciones 4, 5 y 6 en los estacionamientos 0+070, 0+130 y 0+255, respectivamente.

Al comparar los perfiles 1 y 2, realizados con el método SEV (Figura 59), las anomalías comunes a ambos corresponden a las F3, F4 y F5. La primera anomalía (F3) se muestra en el perfil 2 (Figura 59), limitando lateralmente la capa profunda asociada a la unidad ígnea, la cual presenta resistividades intermedias de 25 a 45 Ohm*m y se localiza predominantemente hacia la margen derecha del canal Oeste, al igual que en el perfil 1. Las anomalías F4 y F5, asociadas a la cuña compresiva, se replican en el perfil 2, particularmente en el perfil de iso-resistividades aparentes, en el cual se observa una evidente segmentación de los rangos resistivos bajo la perforación 5 y la quebrada intermitente. Hacia el sector entre el río Piedras y el canal Oeste, la predominancia de las resistividades bajas (1-10 Ohm*m) en profundidad a partir de los 5 a 20 m de profundidad aproximadamente, son asociadas a la unidad sedimentaria profunda, mientras que las resistividades altas (> 100 Ohm*m) asociadas a la unidad ígnea, se muestran poco continua y segmentadas en este sector.

En el perfil 2, hacia la perforación 6, en el estacionamiento 0+260 y por debajo de los 10 m de profundidad, se muestra una zona de anomalía no asociada a una estructura tectónica propuesta, sin embargo, se muestra limitando en profundidad la continuidad de las capas resistivas asociadas a las unidades ígnea y sedimentaria profunda. Esta anomalía es evidente en ambos perfiles iso-resistivos, así como en el desplazamiento de las capas propuestas en el modelo interpretado para ambos perfiles.



LEYENDA

- P-1 **Cruce de perfiles geofísicos**
- Perforaciones**
- F4 **Anomalia geofísica asociada a una falla F1**

RESISTIVIDAD (Ohm*m)	CORRELACIÓN LITOLÓGICA
	>100-800 ROCA ÍGNEA INTRUSIVA
	20-90 ROCA ÍGNEA FRACTURADA BRECHAS VOLCÁNICAS TOBAS FRACTURADAS
	1-20 ROCA SEDIMENTARIA GRANULOMETRÍA FINA A MUY FINA

Figura 59. Comparación de perfiles geofísicos 2 y 1 realizados con el método SEV.

- Perfil 4 SEV-ERT:

Este perfil se ubica a lo largo de la margen derecha del río Piedras y longitudinalmente a la sección entre el río y el canal Oeste, presenta una orientación suroeste al noreste y una longitud de 300 m en el perfil SEV y a 360 m en el perfil ERT, cruza la perforación 2 en el estacionamiento 0+290.

Las anomalías afines en ambos métodos SEV y ERT para este perfil 4 (figura 60), corresponden a la F5, que se muestra más evidente en el perfil ERT (Figura 60A), esta se ubica a partir de los 20 m de profundidad y presenta una forma curva que parece levantar las resistividades bajas asociadas a la unidad sedimentaria profunda. La otra anomalía común a ambos métodos corresponde a la que se ubica por debajo de la quebrada intermitente en el estacionamiento 0+090, esta anomalía coincide con la depresión que forma la quebrada y parece no proyectarse hacia la unidad sedimentaria profunda, siendo visible desde la superficie y hasta los 15 m de profundidad. En el perfil con el método ERT (Figura 60B), se muestra una segunda anomalía que coincide igualmente con una quebrada intermitente en el estacionamiento 0-050, la cual en apariencia tiende a desplazar tanto la unidad ígnea como sedimentaria, sin embargo, por presentarse en una zona de lidero del perfil no se tienen los datos suficientes que permitan establecer claramente la profundidad a la cual podría proyectarse.

Las capas bajo resistivas y profundas, asociadas a la unidad sedimentaria profunda, muestran en el modelo ERT, una curvatura cerca de la anomalía F5, esta deformación interna de las resistividades corresponden particularmente a una capa central muy bajo resistiva ($\approx 2 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$), la cual se proyecta hacia el Suroeste hasta el perfil 7 (Figura 61) donde se muestra como una zona de resistividades concéntricas profundas ligeramente alargadas. Lo que podría inferirse como un plegamiento de la unidad sedimentaria profunda, cuyo eje de pliegue podría presentar una orientación suroeste-noreste y estar limitado a la zona entre el río Piedras y el canal Oeste. Esta estructura se infiere por la

ondulación del techo de la unidad sedimentaria en el modelo SEV, y también por la curvatura de los valores de resistividad en los perfiles 11 y 12 de método TDEM (Figura 62), visibles hacia la sección cerca del canal Oeste y la quebrada intermitente, en donde se muestra un levantamiento del basamento en este sector.

La unidad ígnea asociada a resistividades moderadas de 20 a 50 Ohm*m en el modelo ERT y > 100 Ohm*m en el modelo SEV, muestra en general un comportamiento ondulante y segmentado. En el modelo ERT se presenta como lentes alargados con espesores de 10 a 25 m, localizados por debajo de 8 a 18 m de profundidad, y bajo una unidad sedimentaria superior asociada a valores de resistividad de 15 a 20 Ohm*m.

Mientras que en el modelo SEV, esta unidad se muestra más continua y ondulante, con valores de resistividad altos > 100 Ohm*m, que tiende a incrementar el espesor a medida que avanza a lo largo del perfil, inicialmente desde los 2,5 m bajo en el estacionamiento 0+000, hasta los 15 m cerca de la perforación 2

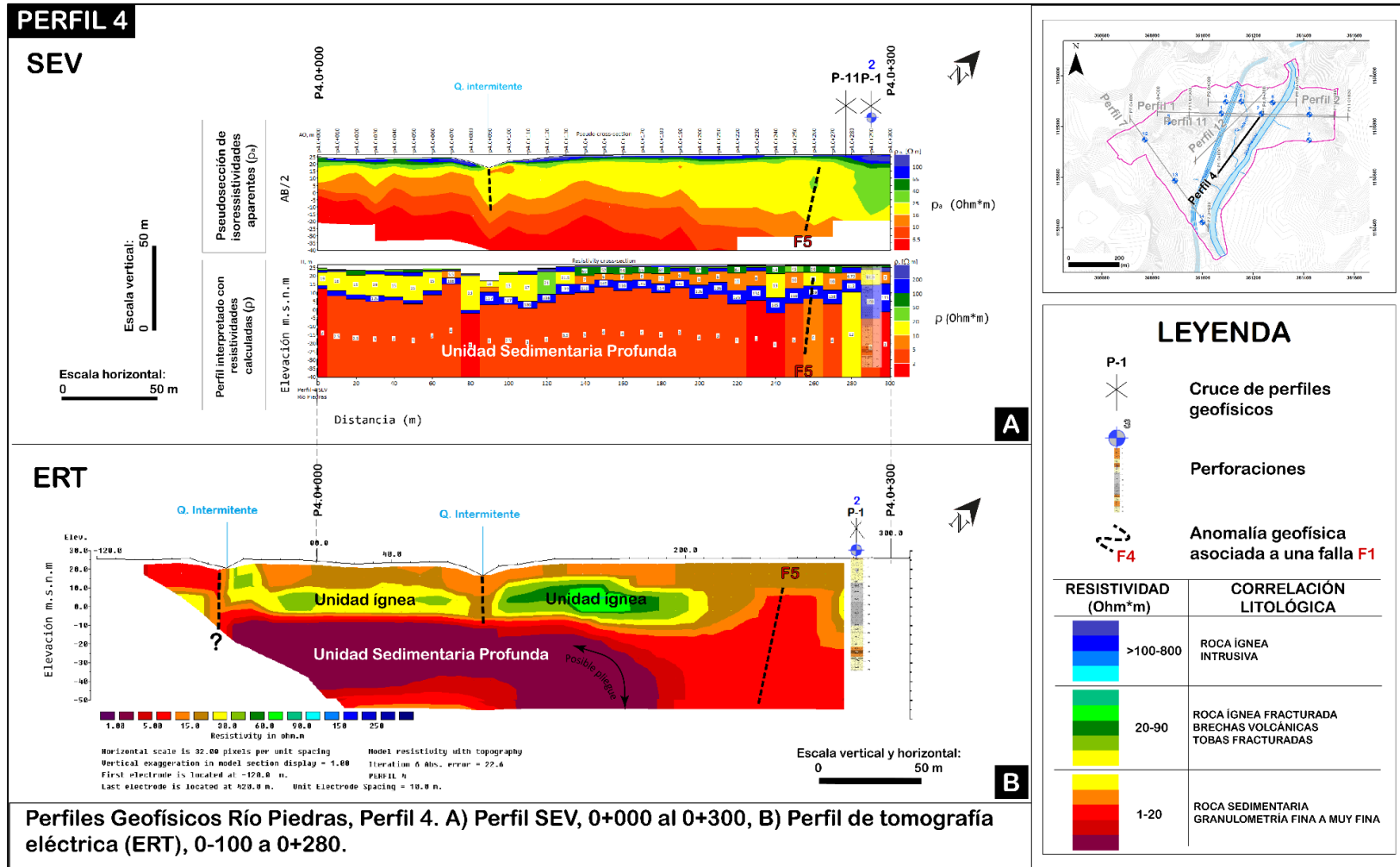


Figura 60. Perfil Geofísico 4. A) realizado con el método SEV y B) realizado con el método ERT.

- Perfil 7 SEV-ERT:

Este perfil presenta una orientación noreste al sureste y una longitud de 530 m en ambos métodos, cruza las perforaciones 12, 13 y 14, en los estacionamientos 0+101, 0+302 y 0+500, respectivamente.

La anomalía F4 se muestra únicamente en el perfil del método ERT (Figura 60B), ya que en el perfil SEV (Figura 61A), el segmento que coincidía con la ubicación de dicha anomalía no tiene los sondeos correspondientes. Esta anomalía ubicada cerca del canal Oeste, se muestra limitando principalmente la unidad ígnea asociada a valores de resistividad moderados y altos.

La unidad sedimentaria profunda con resistividades asociadas de 2 a 10 Ohm*m, se muestra a partir de los 15 a 20 m de profundidad por debajo de la unidad ígnea asociada a valores alto-resistivos, en un contacto superior de tipo ondulante. A lo largo del perfil ERT (Figura 61B) y desde la sección media a final, se muestra para esta unidad sedimentaria profunda, una reducción en los rangos de resistividad de forma progresiva hacia el río Piedras. Este cambio de rangos resistivos se asocia con la estructura de pliegue inferida en el perfil 4 (Figura 60B), la cual en este perfil 7 debe cruzarse de forma transversal.

La unidad ígnea con valores asociados de 20 a 300 Ohm*m, se ubica en ambos modelos a partir de 5 a 20 m de profundidad. En el modelo SEV (Figura 61A), se muestra de forma ondulante con espesores de 10 a 20 m, sin embargo, a partir de la perforación 13 y hacia el sector del canal Oeste, dicho espesor tiende a reducirse a escasos 5 a 2 m. En el modelo ERT, (Figura 61B) esta unidad se muestra continua e irregular, con espesores asociados de 10 a 15 m. Los rangos de resistividad en este modelo presentan lentes alargados altos resistivos, que se asocian a bloques sanos dentro del depósito. El contacto superior e inferior, con las unidades volcanoclástica y sedimentaria respectivamente, es de tipo ondulante e irregular.

Al igual que en el modelo SEV, esta unidad tiende a reducir el espesor conforme se acerca a la parte del canal Oeste. Las perforaciones ubicadas a lo largo del perfil muestran congruencia con los contactos y valores resistivo en ambos modelos, sin embargo, particularmente la perforación 14 en el modelo ERT, no muestra coincidencia con los rangos de resistividad asociados a las litologías.

- Perfil 11 y 12 TDEM:

El perfil 11 se ubica de forma paralela al perfil 1, cerca de 10 m hacia el sur.

Presenta una orientación Este a Oeste y una longitud de 630 m, cruza cerca de las perforaciones 1, 2 y 3, en los estacionamientos 0+127, 0+287 y 0+476, respectivamente. El perfil 12, se ubica de forma transversal al canal Oeste, con una orientación suroeste al noreste, presenta una longitud de 390 m. Ambos perfiles se orientaron de manera que integren la mayor cantidad de sondeos de TDEM.

Estos perfiles muestran en profundidad el comportamiento de la capa más basal del área, la cual por los rangos de resistividad bajos (1-10 Ohm*m), corresponde a la unidad sedimentaria profunda localizada desde la superficie y hasta los 250 m de profundidad. Esta unidad sedimentaria presenta una forma continua y ondulante, limitada lateralmente y en profundidad por la Falla Lora, a partir de la cual tiende a bascularse (Perfil 11), incrementando el espesor de las primeras capas hacia la margen izquierda de Río Piedras. Por su parte hacia la margen derecha, este basculamiento asimétrico levanta la unidad basal plegando las capas más superficiales y generando las zonas de anomalías F4 y F5 (Figura 62). Ambas anomalías coinciden con el incremento del espesor basamento en este sector de la margen izquierda entre el canal Oeste y la quebrada.

La unidad ígnea asociada a valores de resistividad > 100 Ohm*m, se muestra predominantemente hacia la margen izquierda, sobre el sector de la loma y hacia la margen derecha del canal Oeste, proyectando por debajo de los 50 a 75 m de

profundidad. Esta unidad se encuentra limitada por la anomalía F3, que al parecer tiende a incrementar su espesor en superficie, pero que deforma la unidad sedimentaria profunda.

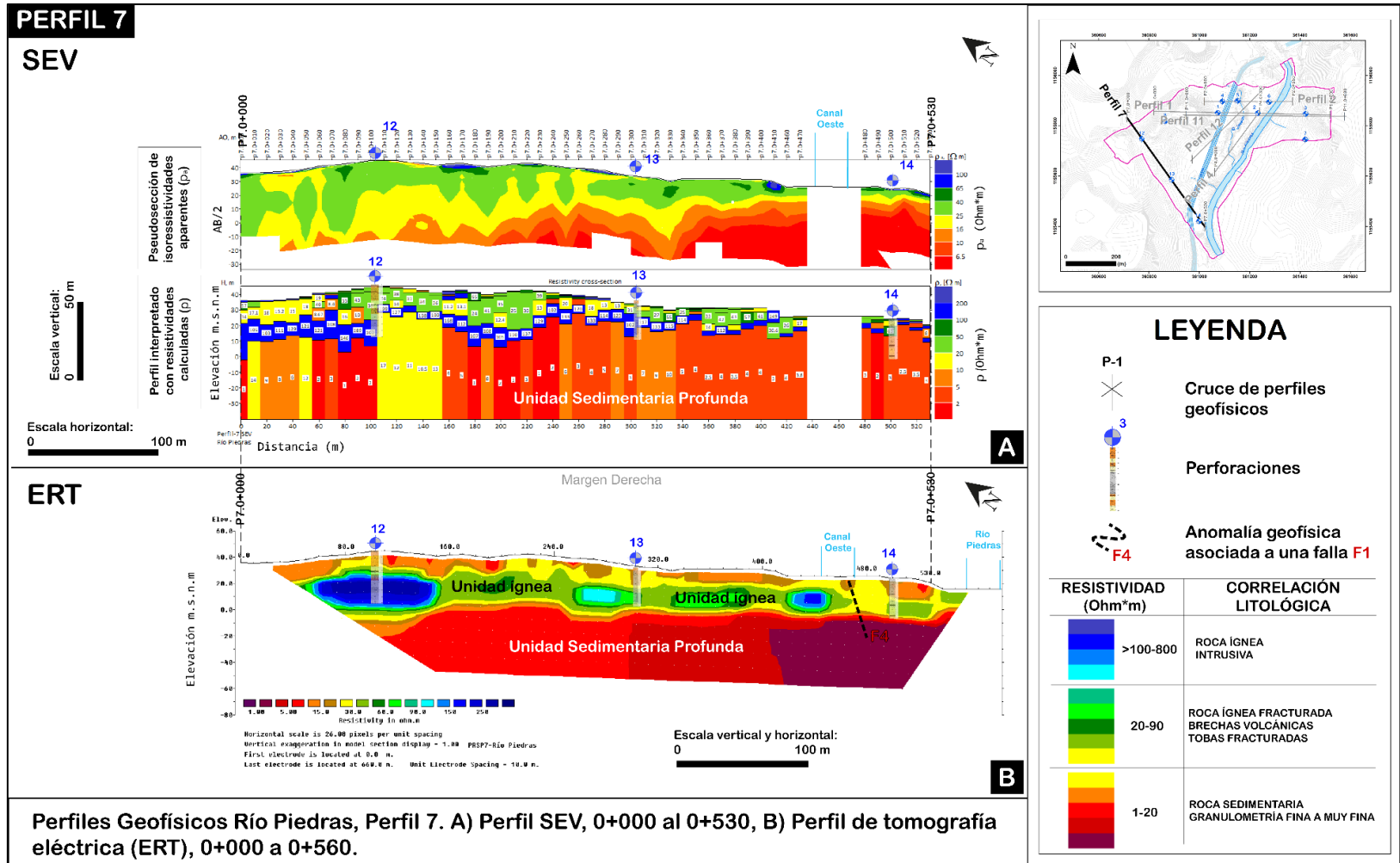


Figura 61. Perfil Geofísico 7 A) realizado con el método SEV y B) realizado con el método ERT.

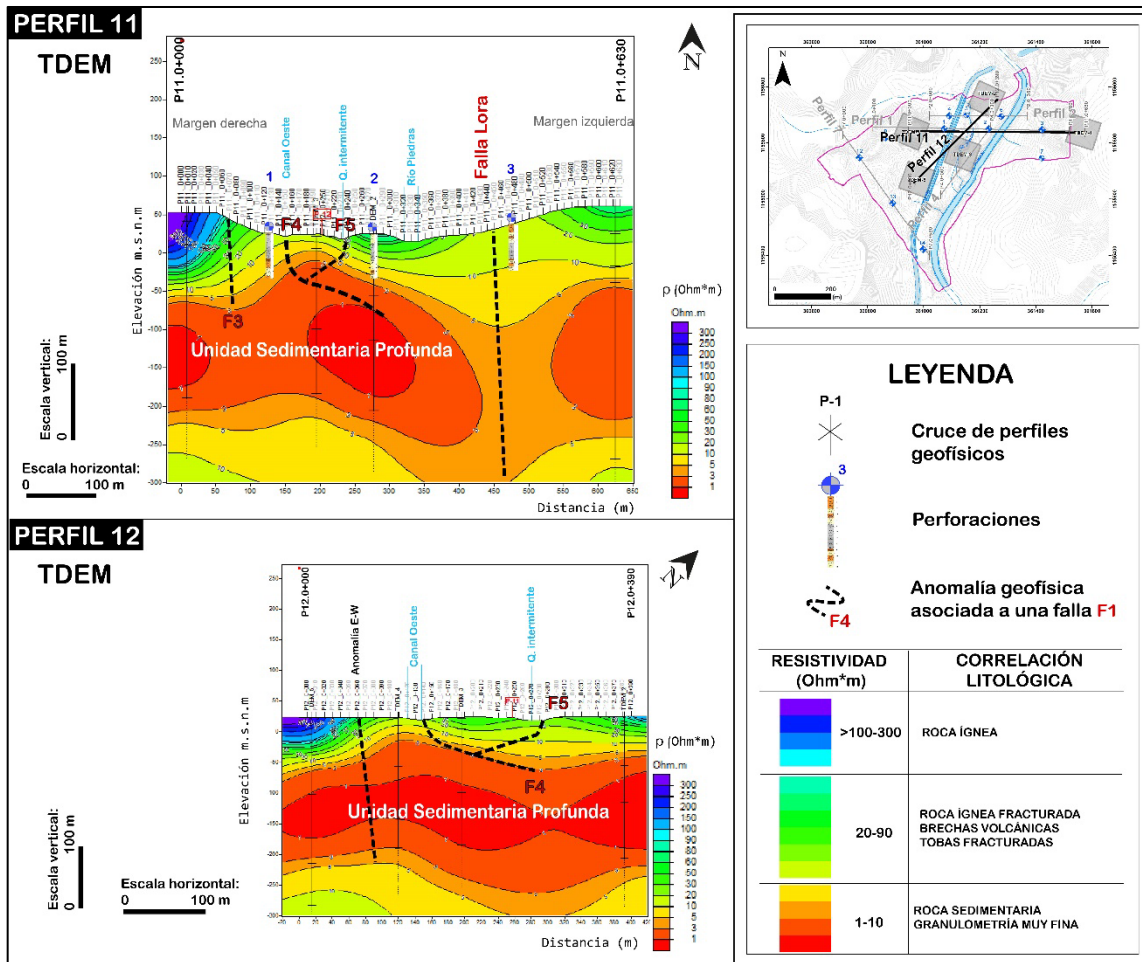


Figura 62. Perfiles 11 y 12 realizados con el método de TDEM.

IX. HIDROGEOLOGÍA

9.1 Hidrogeología Regional

SENARA (2008), definió el acuífero Bagaces subdividiendo en tres unidades hidrogeológicas.

9.1.1 Acuífero Bagaces (Formación Bagaces)

El acuífero Bagaces se asocia a la formación Bagaces, y se encuentra constituido principalmente por tres unidades hidrogeológicas: (SENARA, 2008)

1. Bagaces Superior: está compuesta por tobas rosadas y con grietas y fisuras rellenas, y tobas café claro con fragmentos líticos bien cementados, posee una escasa permeabilidad, su espesor promedio es de 30 m y sus caudales de hasta 3,78 l/s. Según ONU (1975), este miembro permite un movimiento lento de las aguas subterráneas, debido a su granulometría y textura poco permeable.
2. Bagaces medio: se asocia a tobas café oscuras soldadas, ignimbritas muy vídriosas, lavas vesiculares y porosas, presenta buena permeabilidad, y constituye la zona de mayor producción. Muestra un espesor promedio de 200 m, los pozos que captan esta secuencia estratigráfica pueden producir caudales de hasta 189 l/s. Presenta permeabilidad secundaria debido a las grietas de enfriamiento y fracturas. La brecha lávica y la lava vesicular en este miembro constituyen óptimos horizontes productores.
3. Bagaces Inferior: constituida por lavas columnares de color gris, materiales limo-arcillosos y gravas, con moderada a baja permeabilidad, no hay caudales estimados para esta unidad. El miembro Inferior no se encuentra litificado por lo que muestra una baja permeabilidad, en algunos sectores puede tener conexión hidráulica con los aluviones del valle del tempisque (ONU, 1975).

La dirección general de flujo regional en el acuífero Bagaces es de NE a SO, para descargarse hacia el Río Tempisque principalmente y al acuífero aluvional en las subcuencas de los ríos Tempisquito, Ahogados, Colorado, Liberia, Quebrada Arena, El Salto, Piedras, Paso Ancho, San Jerónimo, Tenorio y Cañas (SENARA, 2006).

La recarga de este acuífero se da por infiltración directa de la lluvia por percolación vertical del acuífero de la Formación Liberia y en su frontera NE, por flujo lateral de aguas recargadas a través de las formaciones volcánicas del Grupo Aguacate y del volcánico reciente que conforma los edificios volcánicos de la Cordillera (SENARA, 2006).

Según Morera (2000), los depósitos piroclásticos, lavas y aluviones cuaternarios constituyen el potencial acuífero más importante. La permeabilidad de las tobas en general es muy reducida, pero la circulación de agua a través de la porosidad secundaria en las grietas, fractura y zonas de contacto entre los diferentes depósitos es suficiente para constituir el acuífero Bagaces. Las transmisividades determinadas rondan como máximo 5 000 m²/d y en promedio 1 200 m²/d, un caudal de extracción para ese momento de 295 l/s.

Para Vargas (2002), el acuífero Bagaces presenta un alto potencial hídrico, debido a las grandes diferencias en la capacidad específica (2 a 6,6 l/s/m) y transmisividad, (745 y 2800 m²/d). Esta formación comprende un área de alrededor de 1300 km², sobre el cual se ubican las ciudades de Liberia, Bagaces, Cañas y La Cruz. El acuífero es explotado principalmente por medio de pozos, los cuales se destinan a usos de abastecimiento público, riego y agropecuario principalmente (Vargas 2002).

9.1.2 Vulnerabilidad

SENARA (2000) generó a partir de su base de datos, un mapa de vulnerabilidad para los acuíferos de Bagaces y Liberia.

Las áreas clasificadas como alta a moderada vulnerabilidad se restringen a las principales zonas poblacionales localizadas a lo largo de la ruta principal; dichas áreas son bastante limitadas y puntuales, supeditadas a los datos disponibles, por lo que no trascienden a las cercanías del área de estudio (Figura 63).

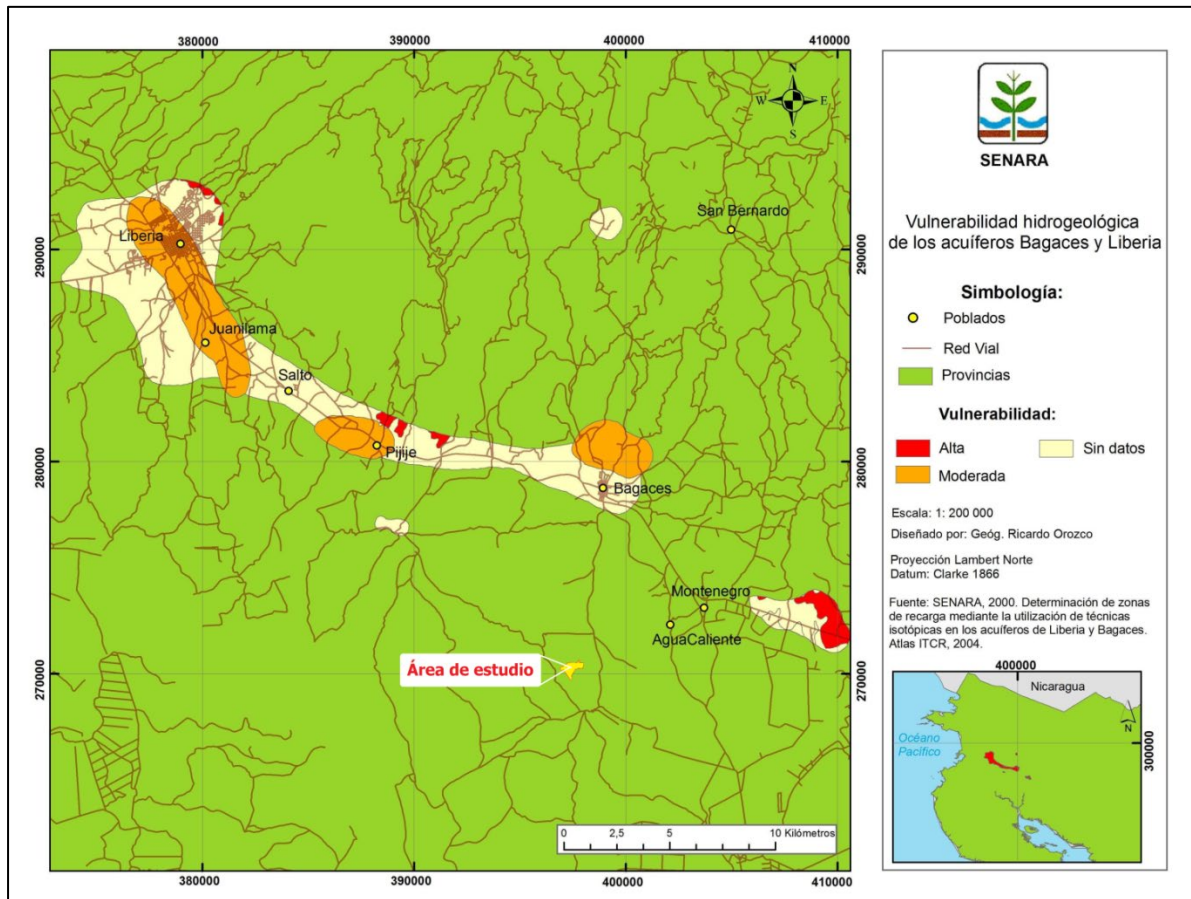


Figura 63. Mapa de vulnerabilidad para los acuíferos de Bagaces y Liberia. Tomado y modificado de SENARA (2000)

9.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO LOCAL

9.2.1 Inventario de pozos

A partir de la base de datos de pozos de Senara, se recopilaron 17 pozos en un radio cercano a los 5 km del área de estudio (Figura 64), de los cuales 6 presentan descripción litológica (TE-57, TE-58, TE-79, TE-80, CS-153 y CS-106) y 7 presentan análisis químicos (TE-57, TE-67, TE-61, TE-62, TE-51, TE-50 y CS-53), siendo únicamente el pozo TE-57, el que comparte ambos parámetros.

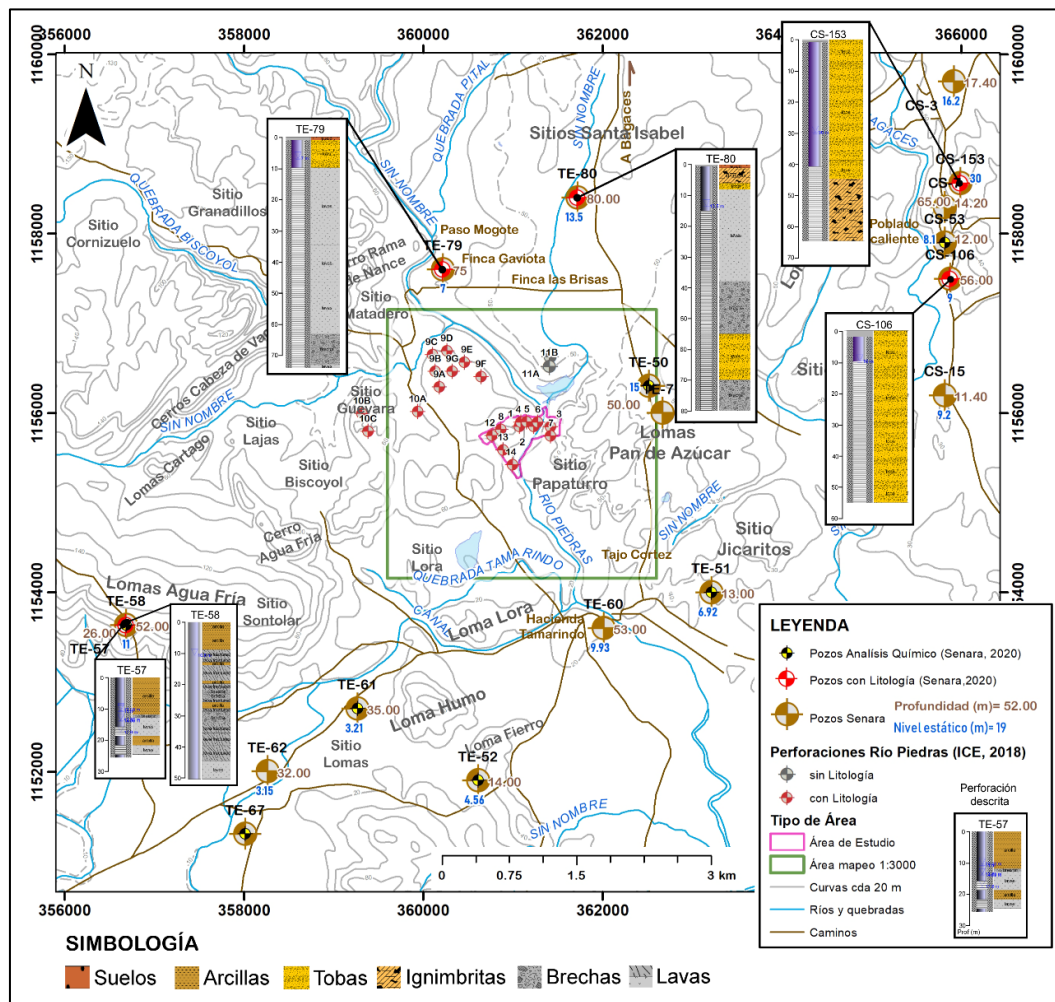


Figura 64. Ubicación y características de las perforaciones más cercanas al área de estudio.

El 65% de los pozos recopilados se reportan para uso doméstico y corresponden a pozos de bajo caudal 0,5 l/s (Figura 65), el restante 30% se distribuyen entre las actividades agropecuarias de la zona en donde se utiliza el agua para riego básicamente de parcelas y para abrevadero de animales. Los caudales reportados para este tipo de actividad varían desde los 2 a 5,6 l/s. El 6% se utiliza para el abastecimiento de la comunidad de Bagatzí (pozo TE-61), con un caudal reportado de 9,5 l/s.

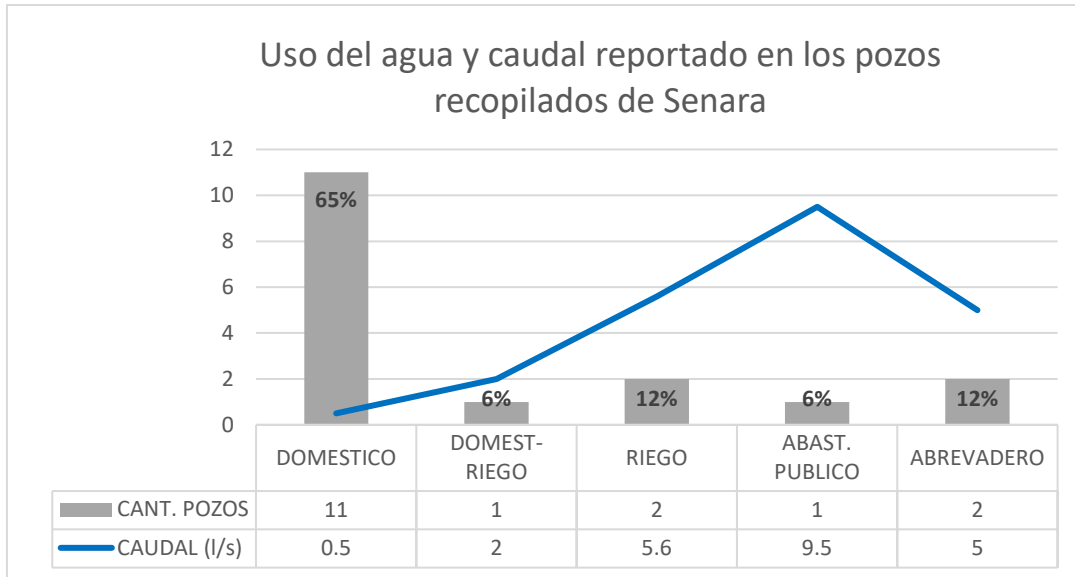


Figura 65. Gráfico de distribución de los pozos con relación al uso del agua y caudal reportado en los 17 pozos de Senara.

Con base en las descripciones de los 6 pozos con registro litológico (Tabla 17), se determina que, los pozos TE-57 y TE-58 localizados en las lomas Agua Fría (Figura 64), se ubican en la unidad ígnea Agua Fría (Lavas el Pelón de la Bajura) en una alternancia de flujos de lavas y brechas con matriz arcillosa rojiza a café, las cuales se reportan hasta una profundidad máxima de 26 y 52 m respectivamente. El nivel captado en el pozo TE-57 se ubica por debajo de los 15 m y hasta los 25 m de profundidad, en dos tramos de rejillas establecidos entre los 16,5 a 19 m y 23 a 26 m. Este nivel corresponde con el acuífero en lavas fracturadas, cuyo nivel piezométrico se ubica por encima de los 25,7 m

del nivel piezométrico más alto reportado en las perforaciones de Río Piedras para esta misma unidad hidrogeológica.

Las perforaciones TE-79 y TE-80, son las más cercanas al sitio de estudio, y se localizan a una distancia de 2 a 2,5 km hacia el noroeste y norte. La perforación TE-79 ubicada en la margen izquierda de río Piedras en la Finca Gaviota (Figura 64), presenta una profundidad de 75 m, y abarca las unidades Rama de Nance y Agua Fría, en esta última el nivel piezométrico captado corresponde con el acuífero en lavas fracturadas, el cual se encuentra a partir de los 10 m de profundidad y hasta la máxima profundidad de perforación registrada. Este nivel piezométrico se proyecta en una diferencia de -2,2 m del nivel piezométrico más alto reportado para esta misma unidad hidrogeológica en las perforaciones de Río Piedras. La perforación TE-80 al igual que la TE-79, presenta una profundidad perforada importante de 80 m. La perforación TE-80, localizada cerca del Sitio Santa Isabel atraviesa todas las unidades geológicas del área de estudio, desde las ignimbritas y tobas de las unidades Pan de Azúcar y Rama de Nance, hasta la unida ígnea Agua Fría. En esta perforación en particular, la descripción litológica reportada a partir de los 44 m de profundidad como tobas blancas y brechas rojizas ubicadas por debajo de las lavas (unidad Agua Fría), se puede relacionar con la unidad sedimentaria Falconiana, presente en el área de estudio.

Las unidades hidrogeológicas captadas en esta perforación se ubican a partir 15 m y hasta los 80 m de profundidad. Todo este tramo de rejilla corresponde con el acuífero en las lavas fracturadas y el sedimentario profundo. Los niveles piezométricos comparables con las unidades hidrogeológicas de Río Piedras son los acuíferos en las lavas fracturadas y en el sedimentario profundo, sin embargo, como hay mezcla de niveles, no se puede establecer una proyección piezométrica confiable con los niveles reportados para ambas unidades en las perforaciones de Río Piedras.

Las perforaciones CS-106 y CS-153, localizadas en el poblado de Agua Caliente (Figura 64), se ubican en unidades volcanoclásticas diferentes a las mapeadas en el sitio de estudio, que según Denyer et al. (2019) corresponden con la unidad de Tobas Montenegro, por lo que los acuíferos existentes no se pueden relacionar a las unidades hidrogeológicas de interés.

Estas perforaciones con registros litológicos son utilizadas en su mayoría para consumo humano en el caso de las TE-57, TE-58, CS-106 y CS-153, y para uso pecuario o abrevaderos en el caso de la TE-79 y TE-80.

Tabla 17. Resumen de las 6 perforaciones con descripción litológica cercanas al sitio de estudio, recopiladas de la base de datos de Senara.

Cód.	CRTM05		Prof. (m)	Elevación m.s.n.m	NE (m)	ND (m)	Descripción Litológica	UNIDAD GEOL.	UNIDAD HIDROGEO.
	Latitud N	Longitud E							
① TE-57	1153637,13	356684,47	26	63,4	13	15	Arcillas 0-13 m Lavas 13-19 m Arcillas 19-22 m Lavas 22-25 m	Unidad ígnea Agua Fría	Acuífero en lavas fracturadas
② TE-58	1153637,13	356684,47	52	114	10,8	NR	Arcilla 0-3 m Arcilla arenosa café 3-9 m Lava fracturada 9-12 m Lava fracturada con arcilla café 12-13 m Arcilla 13-14 m Lava fracturada 14-19 m Arcilla 19-20 m Lava fracturada 20-22 m Brecha con arcilla roja 22-23 m Brecha 23-25 m Lava fracturada 25-26 m Arcilla 26-28 m Lava fracturada 28-29 m Brecha morada 29-33 m Lava fracturada negras 33-36 m Lava fracturada 36-40 m Lava fracturada 40-45 m Lava fracturada negras 45-51 m	Unidad ígnea Agua Fría	Acuífero en lavas fracturadas

NE= Nivel Estático, ND= Nivel Dinámico, NR= No Reportado

Cód.	CRTM05		Prof. (m)	Elevación m.s.n.m	NE (m)	ND (m)	Descripción Litológica	UNIDAD GEOL.	UNIDAD HIDROGEO.
	Latitud N	Longitud E							
③ TE-79	1157604,15	360219,28	75	32,5	7	10	Suelo 0-1m	Suelos	
							Toba blanca 1-10 m	Unidad volcanoclástica Rama de Nance	
							Lavas fracturadas 10-35 m		
							Lavas 35-47 m		
							Brecha 47-64 m Brecha roja 64-74 m Lavas 74-75 m	Unidad ígnea Agua Fría	Acuífero en lavas fracturadas
④ TE-80	1158402,70	361720,38	80	56,2	13,5	15	Suelo 0-1	Suelos	
							Ignimbritas 1-6 m	Unidad volcanoclástica Pan de Azúcar	
							Toba blanca 6-8 m	Unidad volcanoclástica Rama de Nance	
							Lavas 8-38 m		
							Lavas brechosas 38-55 *Toba blanca 55-70 m *Brecha roja 70-80 m	Unidad ígnea Agua Fría *Unidad sedimentaria inferior Falconiana (?)	Acuífero en lavas fracturadas Acuífero en sedimentario inferior (?)
⑤ CS- 153	1158565,9	365994,26	65	50,6	30	38, 8	Toba gris 0-8 m	Unidad volcanoclástica ?	Acuífero en toba lítica fracturada
							Toba blanca 8-39 m		
							Toba lítica 39-45 m		
							Ignimbritas 45-65 m		

6 CS- 106	1157498,15	365880,11	56	32,1	10	NR	Toba café 0-14 m	Unidad volcanoclástica ?	Acuífero en tobas
							Toba gris 14-30 m		
							Toba roja 30-42 m		
							Toba gris 42-50 m		
							Toba gris-brecha 50-56 m		

NE= Nivel Estático, ND= Nivel Dinámico, NR= No Reportado

En los datos recopilados de los registros de las perforaciones de Senara, las perforaciones TE-57 y TE-61 localizadas al Suroeste del sitio de estudio, muestran algunos parámetros hidráulicos (Tabla 18), que podrían utilizarse como referencia para las unidades hidrogeológicas propuestas en Río Piedras. La perforación TE-61 no presenta registro litológico reportado, sin embargo, se ubica en la zona de llanura en el Sitio Lomas (Figura 63), lo que podría relacionarla a un acuífero sedimentario posiblemente aluvial.

Tabla 18. Parámetros hidráulicos recopilados para las perforaciones TE-57 y TE-61.

Cod.	Prof. (m)	Q (l/s)	T (m ² /d)	s (m)	S	K (cm/s)	NE (m)	Unidades Hidrogeológicas
TE-57	26	2-3	103,7 316,27	1,13	10 ⁻⁴ (?)	2,0x10 ⁻²	13	Acuífero en lavas
TE-61	35	5-9,5	57-98	10	10 ⁻³ (?)		3,21	Acuífero sedimentario (?)

Q= Caudal

T= Transmisividad

s= Abatimiento

S= Almacenamiento

K= Conductividad hidráulica

NE= Nivel Estático

?= valor inferido

En los años 2016 y 2017, se realizaron cerca de 25 perforaciones relacionadas al Proyecto Paacume sobre el Río Piedras, 11 de las cuales se ubican en el sitio de estudio propiamente que corresponde a las obras de la Presa, y 14 en los sitios de tajos (Tabla 19). Las perforaciones realizadas en los sitios de tajo son de control litológico para la estimación de volúmenes de materiales, por lo que presentan usualmente poca profundidad (6 a 24 m) y no se reporta la medición de niveles estáticos (ICE, 2018).

Tabla 19. Perforaciones reportadas por el ICE (2018) para el proyecto Paacume

Cant.	Cód.	Cód. ICE	CRTM05		Elevación (m)	Prof. (m)	NE (m)	Sitios Obras
			Latitud N	Longitud E				
1	1	ERP-PER-01	1155851,15	361073,50	27,10	60,00	2,42	P
2	2	ERP-PER-02	1155849,99	361232,72	26,80	60,20	6,80	P
3	3	ERP-PER-03	1155846,64	361422,23	39,35	60,00	18,50	P
4	4	ERP-PER-04	1155896,41	361091,72	26,46	60,00	6,50	P
5	5	ERP-PER-05	1155898,30	361152,75	22,11	67,50	3,15	P
6	6	ERP-PER-06	1155894,04	361277,26	26,68	60,00	7,35	P
7	7	ERP-PER-07	1155745,20	361420,88	36,45	38,50	18,40	P
8	8	ERP-PER-08	1155817,51	360864,24	52,05	51,20	25,65	P
9	12	ERP-PER-12	1155747,23	360771,00	45,20	40,00	19,60	P
10	13	ERP-PER-13	1155585,33	360890,02	33,66	30,00	4,60	P
11	14	ERP-PER-14	1155420,41	360998,55	25,71	30,00	6,47	P
12	9A	ERP-PER-9A	1156291,18	360178,31	55,22	60,00	NR	T
13	9B	ERP-PER-9B	1156464,21	360133,06	52,93	8,00	NR	T
14	PE	ERP-PER-9E	1156565,31	360458,44	53,25	6,10	NR	T
15	9F	ERP-PER-9F	1156404,45	360645,54	52,62	6,50	NR	T
16	9G	ERP-PER-9G	1156463,79	360322,94	52,84	8,50	NR	T
17	10A	ERP-PER-10A	1156016,54	359941,14	39,89	40,00	12,45	T
18	10B	ERP-PER-10B	1155994,17	359317,80	82,17	24,00	NR	T
19	10C	ERP-PER-10C	1155794,60	359384,85	74,32	20,00	NR	T
20	11A	ERP-PER-11A	1156626,49	361414,82	52,28	9,45	NR	T
21	11B	ERP-PER-11B	1156520,01	361407,97	52,69	6,50	NR	T
22	15B	ERP-PER-15B	1149285,81	358848,70	68,37	?	?	T
23	15C	ERP-PER-15C	1149432,62	358875,82	52,17	?	?	T
24	9C	ERP-PER-9C	1156650,43	360106,02	48,50	8,00	NR	T
25	9D	ERP-PER-9D	1156693,94	360266,63	52,10	10,00	NR	T

NE= Nivel Estático P=Presas
 NR= No reportado T=Tajo

Particularmente las perforaciones 9A y 10A, presentan profundidades de entre 60 y 40 m, y atraviesan los principales contactos de las unidades geológicas mapeadas. En el caso de la perforación 9A, atraviesa a la unidad volcánoclastica Pan de Azúcar (0-5 m), a la unidad volcánoclastica Rama de Nance (5-12,75 m) y a la unidad sedimentaria profunda Falconiana (12,75-60 m). Mientras que, la perforación 10A comprende únicamente la

unidad ígnea Agua Fría desde los 1,35 m hasta los 30 m de profundidad, reportándose en este pozo un único nivel a los 12,5 m, el cual corresponde con el acuífero en las lavas fracturadas.

Las perforaciones en el sitio de Presa propias del área de estudio (Figura 66) presentan profundidades desde los 40 a 60 m, y atraviesan las principales unidades geológicas Agua Fría y Falconiana, así como las unidades volcanoclásticas más someras que son Pan de Azúcar y Rama de Nance. En total se establecieron 19 piezómetros, nombrados por el número de la perforación, seguido del consecutivo numeral asociado a la cantidad de piezómetros en cada una, cuyo orden está dado a partir del piezómetro de mayor diámetro y profundidad (Figura 66). De los 19 piezómetros, 17 se encuentran en óptimas condiciones para el monitoreo de niveles, sin embargo, los piezómetros 5.2 y 6.2 no se utilizaron ya que el primero corresponde a una tubería ciega y el segundo se encontraba obstruido.

Los piezómetros completamente penetrantes al acuífero en las lavas corresponden al 2.2, 3.2, 6.2, 8 y 7, los cuales se ubican hacia ambos márgenes de río Piedras y en la sección central entre el río y el canal Oeste. Las rejillas en estos piezómetros se ubican a partir de los 12 a 23 m y hasta los 29 m de profundidad, en el contacto inferior con el sedimentario inferior. Los piezómetros 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 y 6.1, son penetrantes al acuífero sedimentario inferior, estos piezómetros se agrupan hacia el sector norte del área entre el canal Oeste y la margen derecha del río Piedras. Las rejillas asociadas a dichos piezómetros se localizan a partir de los 42 a 51 m de profundidad extendiéndose hasta la máxima profundidad perforada.

El piezómetro 6.3 localizado cerca de la margen derecha del río Piedras (Figura 65), es el único que comprende el acuífero sedimentario superior. La rejilla de dicho piezómetro se ubica desde los 5 a 10 m de profundidad. Finalmente, los piezómetros 1.2, 4.2, 5.3, 13 y 14 presentan rejillas que comparten litologías tanto del acuífero en las lavas

fracturadas como del sedimentario inferior, particularmente el piezómetro 12, comparte rejilla entre el sedimentario superior y la lava fracturada, desde los 12 m hasta los 38 m de profundidad.

La descripción litológica detallada de cada perforación, así como el armado de los piezómetros se muestra en el Anexo 14.1. Algunos diámetros de los piezómetros se han corregido de acuerdo con los diámetros observados en campo, los cuales no coinciden con los descritos en los registros originales.

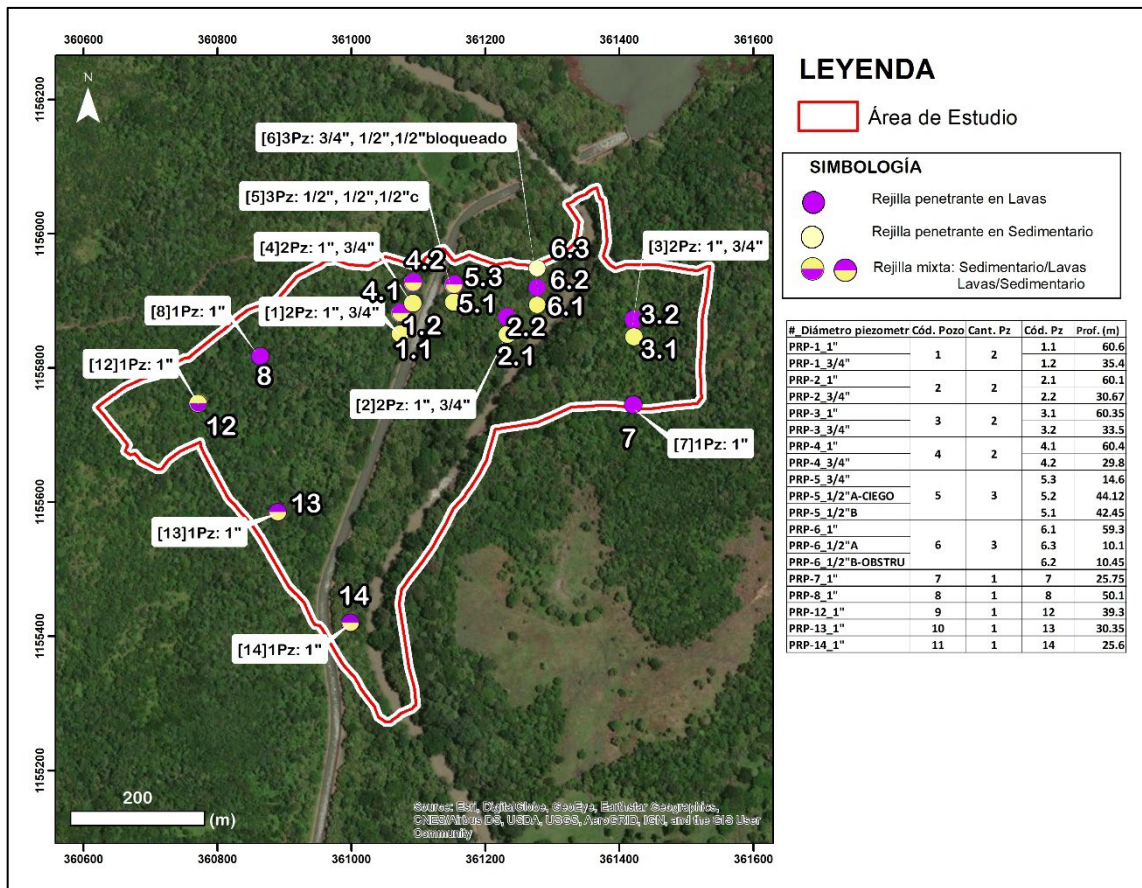


Figura 66. Distribución y tipo de litología asociada a cada una de las rejillas de las perforaciones en el área de estudio. En el cuadro blanco se indica el número de perforación en paréntesis [1] y la cantidad de piezómetros (#Pz) así como los diámetros de las tuberías en pulgadas 1", 1/2", 3/4" para cada piezómetro por perforación.

9.2.2 Análisis hidrogeoquímico de pozos recopilados en los alrededores del área de estudio

A continuación, se realiza un breve análisis de datos hidrogeoquímicos realizados entre los años 1976 a 1984, por el laboratorio de aguas del Servicio Nacional de Acueducto y Alcantarillado, de 7 pozos de la base de datos de Senara, los cuales corresponden con los códigos: TE-50, TE-51, TE-52, TE-61, TE-67 y CS-53 (Tabla 20).

Tabla 20. Datos físicos-químicos de las aguas de las perforaciones recopiladas en la base de datos de Senara 1976-1985

Cód.	Año	Dureza	T°C	pH	Medidas del Laboratorio (mg/l)						
					HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SiO ₂
TE-50	1976	82	29	7,00	132,9	0,23	12,00	34,60	14,40	8,80	100,0
TE-51	1976	57	30	7,00	103,6	0,35	2,30	22,10	5,80	13,20	100,0
TE-52	1976	430	30	7,50	409,6	0,39	16,10	163,20	38,40	108,00	80,0
TE-57	1985	141	28.5	6,55	196,0	0,17	9,00	6,00	12,00	36,00	105,0
TE-61	1985	195	NR	6,85	294,0	0,20	29,00	4,00	16,00	53,00	78,0
TE-67	1984	407	NR	7,40	1183,0	0,32	101,10	24,10	52,00	72,40	89,0
CS-53	1976	165	30	6,50	180	0,50	12,40	3,80	19,20	34,00	50,0

NR= No Reportada

DECRETO 38924-S (La Gaceta N°170, 2015)

Mayor al Valor Alerta (VA) ■

Mayor al Valor Máximo Admisible (VMA) ■

Estos análisis se encuentran inscritos en los registros de las perforaciones más cercanas localizadas hacia el suroeste, sureste y noreste, fuera del área de estudio. A partir de los valores de iones mayoritarios reportados en los análisis químicos, se realizaron diagramas de Stiff para mostrar la tendencia de las concentraciones en cada muestra (Figura 67).

De las siete perforaciones, sólo la TE-57, presenta registro litológico descrito, en las restantes seis se asumen las litologías al sobreponerlas al mapa geológico de la Hoja Tempisque y Cañas 1:50.000 de Denyer et. al (2019), en relación con las profundidades perforadas descritas en los reportes (Figura 67).

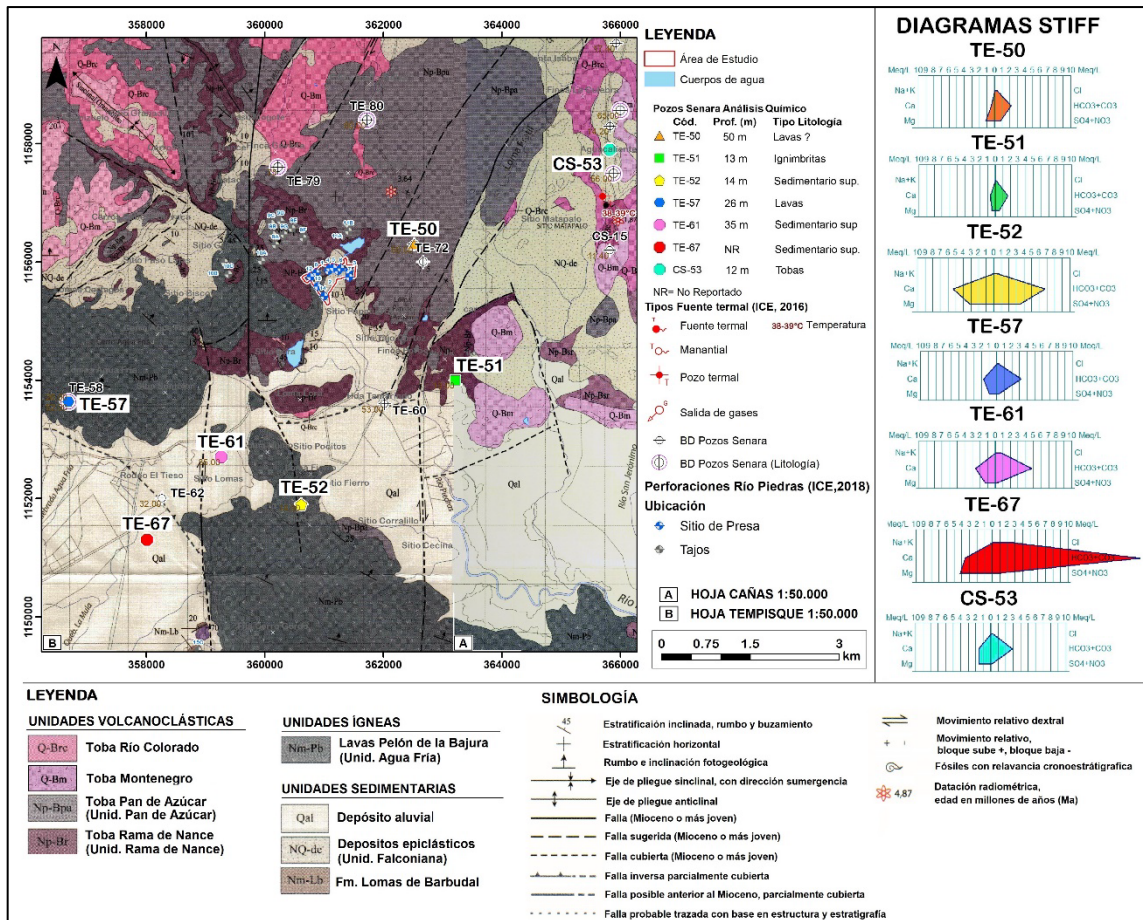


Figura 67. Diagramas de Stiff y distribución de los 7 pozos con análisis químico de aguas en las hojas geológicas Tempisque y Cañas 1:50.000 (Tomado y Modificado de Denyer et. al 2019).

El agua subterránea circula a lo largo de sistemas hidrogeológicos locales y regionales (Freeze & Cherry, 1979), incrementando los sólidos totales (TDS) e iones disueltos (Tóth, 1980). Mediante la secuencia de evolución química de las aguas (Chevotarev, 1955), se establece que las aguas subterráneas tienden a evolucionar químicamente a la composición del agua de mar, esto se da en la medida de que exista un mayor tránsito del flujo subterráneo a lo largo del sistema durante un periodo mayor. Siendo los muestreos de estos pozos muy cercanos entre sí, y muy superficiales, es posible que los

flujos locales sean más predominantes en relación con la concentración de los iones disueltos en el agua.

Las aguas de las muestras TE-52 y TE-67, se clasifican como aguas duras superando los valores máximos admisibles de 400 mg/l (La Gaceta N°170, 2015) y presentando altas concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} (Tabla 20), siendo el valor del Ca^{2+} de la muestra TE-52 superior al valor máximo admisible de 100 mg/l y el valor de la concentración del Mg^{2+} de la muestra TE-67, igualmente superior al máximo admisible (>50 mg/l). Para ambas muestras los valores de concentración de HCO_3 son superiores a los 400 mg/l. Estos pozos se localizan hacia el sur-suroeste a ambos lados de la Fila Cerro Gordo, muy cerca de zonas de falla importantes como la Falla Lomas de Barbudal y la Falla Bagaces Este.

Las muestras con valores de alerta de Cl^- superiores a los 25 mg/l, son las TE-61 y TE-67, ambas se encuentran muy cercanas entre sí y alineadas al valle que forman las lomas Agua Fría y la Fila Cerro Gordo. Con relación al anión SO_4^{2-} las muestras TE-50, TE-51, TE-52 y TE-67, se encuentran con valores de alerta > 25 mg/l, particularmente la muestra TE-52 presenta valores muy altos > 100 mg/l. Todos estos pozos se encuentran alineados a una franja de sistemas de fallas con tendencia noreste a suroeste.

De acuerdo la tendencia de los iones de los diagramas de Stiff (Figura 67), todas las muestras de agua presentan una concentración mayor del anión HCO_3^- y cantidades significativas de cationes Ca^{+2} y Mg^{+2} , clasificándolas en primera instancia como aguas posiblemente bicarbonatadas cálcico-magnésicas, estas aguas generalmente se asocian a acuíferos vinculados (mayoritariamente) a sistemas superficiales con aportes atmosféricos directos (Freeze & Cherry, 1979).

Las muestras TE-50, TE-67, TE-52, TE-57, TE-61, presentan altas concentraciones de Mg^{2+} y Ca^{2+} , siendo las muestras TE-51 y CS-53, las que presentan una relación más proporcional con respecto a la concentración de ambos cationes. Estas últimas muestras corresponden a los pozos ubicados hacia el sector noreste cerca del poblado de

Aguacaliente (Figura 68), los cuales se alinean a lo largo de sistemas de fallas con tendencias noroeste-sureste, y a la fuente termal mapeada por ICE (2016b).

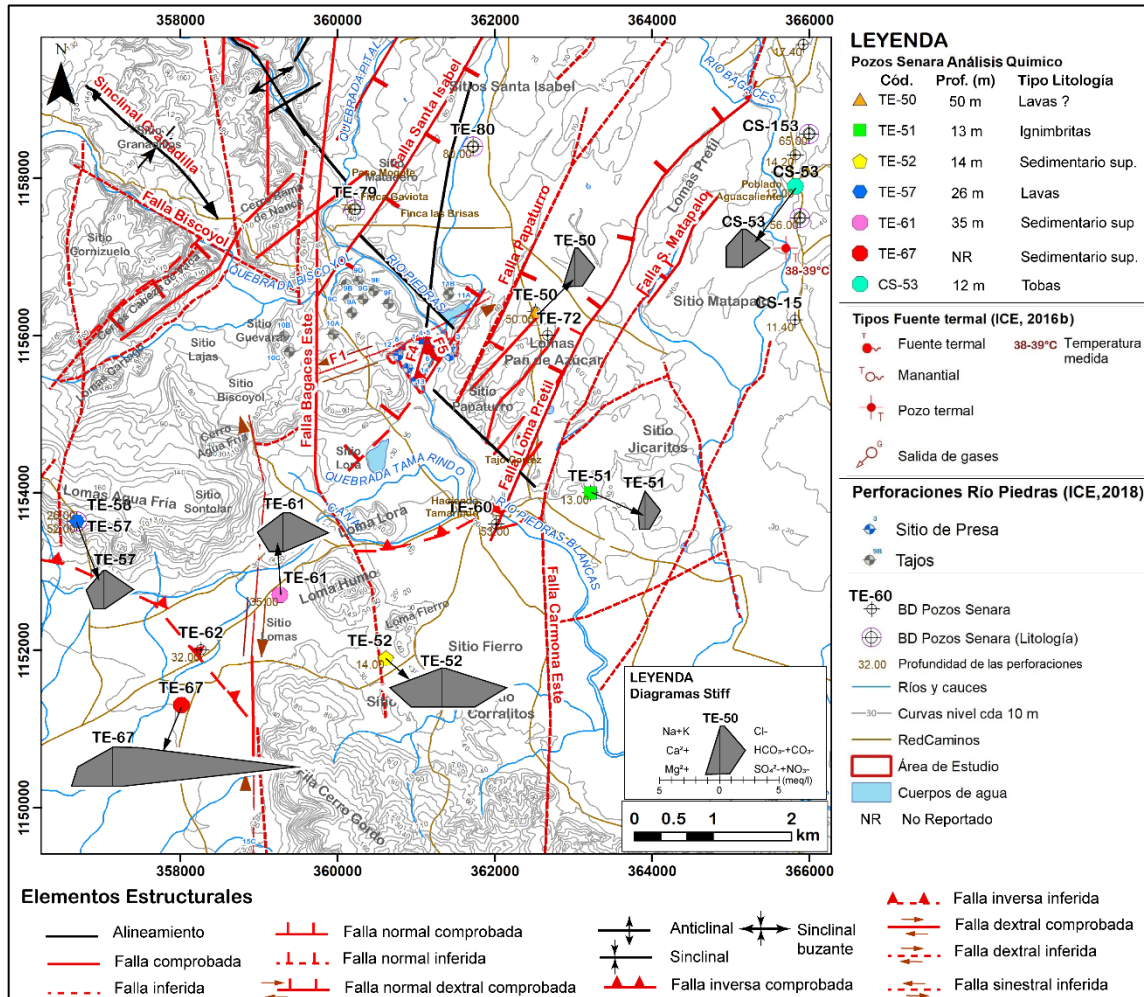


Figura 68. Ubicación de los pozos con análisis químicos y fuentes termales en relación con los elementos estructurales presentes en la zona.

Las altas concentraciones de SiO, Mg²⁺ y Ca²⁺ de las muestras TE-50, TE-51 y TE-57, se asocian a un posible aporte de minerales propios de las rocas volcánicas, ya que estas

muestras se ubican en las unidades volcanoclásticas e ígneas, en los sectores de las lomas Agua Fría y Pan de Azúcar (Figura 67).

En la muestra del pozo TE-67, localizado hacia el extremo sureste en la zona de llanura, presentan una muy alta concentración de carbonatos a diferencia del resto de muestras (Figura 67), este incremento anómalo de carbonatos podría asociarse a la cercanía con las formaciones calcáreas de Barrahonda y el Miembro Zapotal, mapeadas por Denyer et al. (2019) para esta zona (Figura 67).

La alta concentración de los aniones de HCO_3^- , SO_4^{2-} y en mayor medida el anión Cl^- , para la muestra TE-67, evaluando las concentraciones de los tres iones de manera integral, podría asociarse a dos posibles causas, la primera asociada a aguas pertenecientes a un ciclo hidrogeológico profundo y lento (Freeze & Cherry, 1979) que permite la interacción del agua con minerales altamente solubles, lo que genera un enriquecimiento del anión Cl^- . La otra causa es asociada a la cercanía del sitio de muestreo con la línea de costa, lo que implica la presencia de intrusión salina, sin embargo, al no tener la concentración de Na^+ en el análisis, no se podría establecer en firme esta presunción.

Particularmente, las muestras TE-50, TE-51 y TE-52, presentan una subagrupación con una tendencia hidrogeoquímica caracterizada por un incremento de las concentraciones relativas de aniones de SO_4^{2-} (Figura 69).

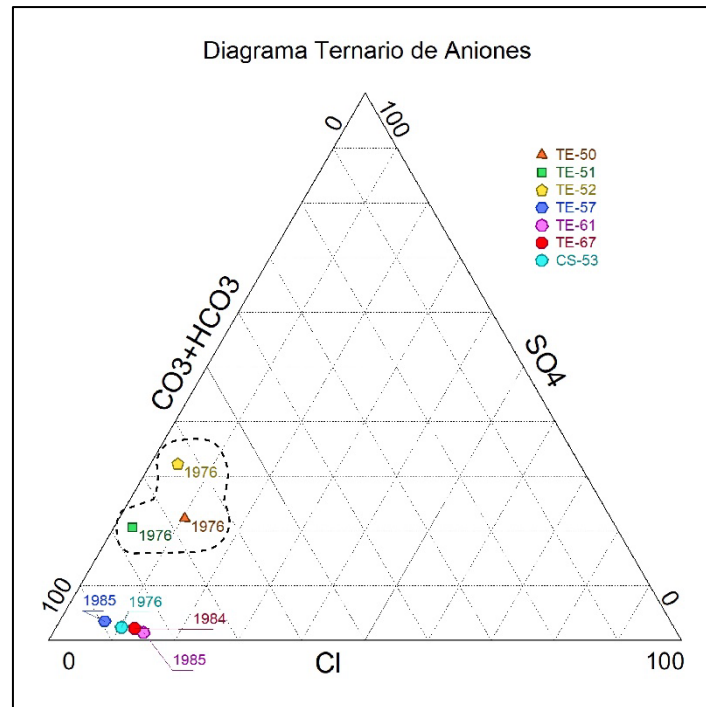


Figura 69. Diagrama ternario de la distribución de las concentraciones de aniones mayores para los análisis químicos de aguas en los 7 pozos recopilados.

Esto podría asociarse con una mayor evolución hidrogeoquímica, ligada a un sistema hidrogeológico intermedio a profundo (Freeze & Cherry ,1979) o bien a aportes de fuentes termales existentes (ICE, 2016b) asociados a los sistemas de fallas regionales (Figura 68).

El enriquecimiento de iones, en las muestras TE-52, TE-61 y TE-67 ubicadas al suroeste de área de estudio (Figura 68), podría deberse a el uso del suelo en este sector, donde predominan los sembradíos, ya que según Custodio & Llamas (1996), la infiltración del agua en zonas de regadío presentan diferencias importantes en relación a la recarga natural por agua de lluvia, pues el agua utilizada para riego proviene de diversos orígenes, si a esto se le suma el uso de abonos orgánicos, estas zonas bajas presentan

una fuente importante de sales solubles que tienden a enriquecer los acuíferos más superficiales y por lo tanto incrementar los iones disueltos.

La muestra TE-50, siendo la más cercana al área de estudio, presenta una tendencia a incrementar la concentración de iones SO_4^{2-} y Cl^- (Figura 69) lo que podría asociarse con un aporte geotermal cercano, posiblemente asociado al sistema de fallas normales orientadas al noreste-sureste, como lo son la Falla Loma Pretil y la Falla Papaturre. Estas fallas, se alinean de forma paralela a una serie de fallas inferidas, localizadas hacia el sureste (Figura 68), las cuales se proyectan hacia el pozo termal (38-39°) ubicado al sur del poblado de Aguacaliente.

Según Segura et. al (1998), la presencia de aguas blandas agresivas o de aguas ácidas, tienen consecuencias desfavorables para el concreto, ya que reaccionan disolviendo los componentes calcáreos generando cavidades, así como precipitando sales corrosivas, por lo que incorporar muestreos para análisis químicos de las aguas subterráneas en el área de estudio, es importante para caracterizarlas y determina la afectación al concreto asociado a la cortina de inyección.

9.2.3 Red de monitoreo

Se realizaron mediciones durante los meses de noviembre, enero, marzo y junio de los años 2020 y 2021, de niveles estáticos en todos los piezómetros existentes en el área (Figura 70).

Las variaciones mínimas en los niveles se asocian a los piezómetros más profundos, que corresponden con el acuífero fracturado en las lavas o bien al acuífero en el sedimentario inferior. Particularmente los niveles más fluctuantes corresponden a las rejillas más superficiales que se localizan en los piezómetros ubicados hacia el norte del área y en la parte baja entre el río Piedras y el canal Oeste, en donde también la unidad ígnea asociada al acuífero en las lavas se muestra más superficial. Estos cambios en los niveles superficiales indican una influencia directa del río Piedras y de aportes estacionales al acuífero en las lavas y al sedimentario superior, en este sector.

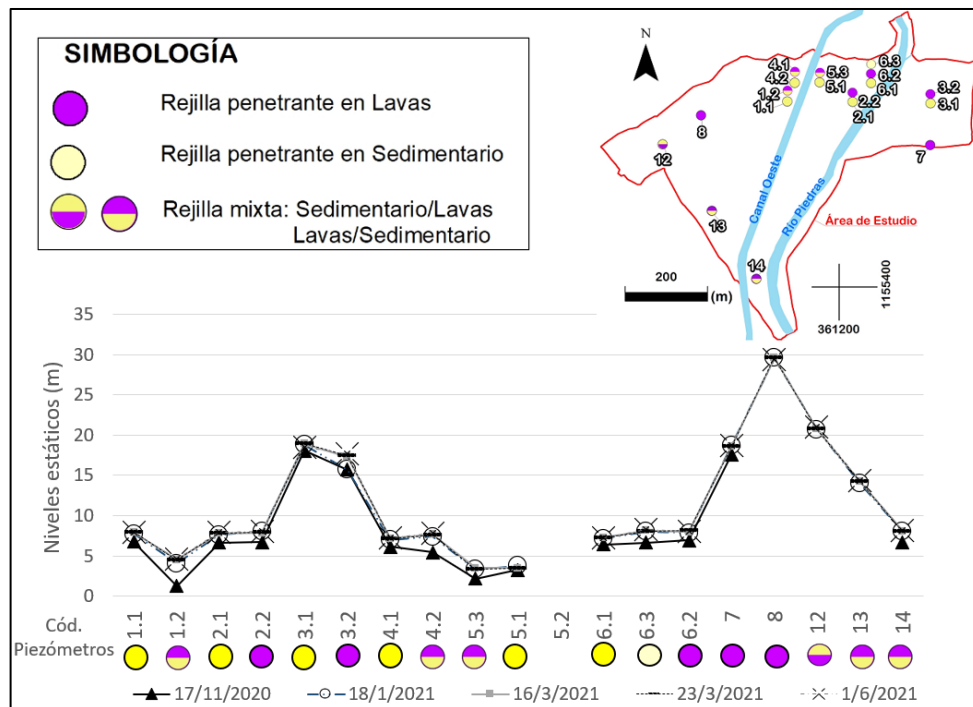


Figura 70. Medición de niveles estáticos en los piezómetros dentro del área de estudio.

Los piezómetros ubicados hacia el sur y oeste del área de estudio, como lo son 8, 12, 13 y 14, presentan muy pocas variaciones en los niveles reportados, con diferencias máximas entre las mediciones de escasos 4 a 20 cm, lo que indica que se han mantenido prácticamente estáticos en un periodo de seis meses entre la primera y la última medición. Esto podría indicar que estos piezómetros están predominantemente influenciados por el acuífero sedimentario inferior (Figura 70).

Adicional a la medición puntual de niveles, se instalaron *diver (data logger)* en 6 piezómetros dentro del área de estudio (Figura 71), con fechas de inicio y fin desde el 21/01/2021 al 02/06/2021 y periodos de adquisición de datos cada 2 horas. En total se obtuvieron 1500 a 1600 datos de mediciones de niveles de agua y temperatura.

Los *diver* se instalaron cuatro en margen derecha, dos ubicados hacia la zona de las lomas (12, 8), dos ubicados en la parte baja entre el río Piedras y el canal (2.1 y 6.1) y dos en la margen izquierda del río (3.1 y 7).

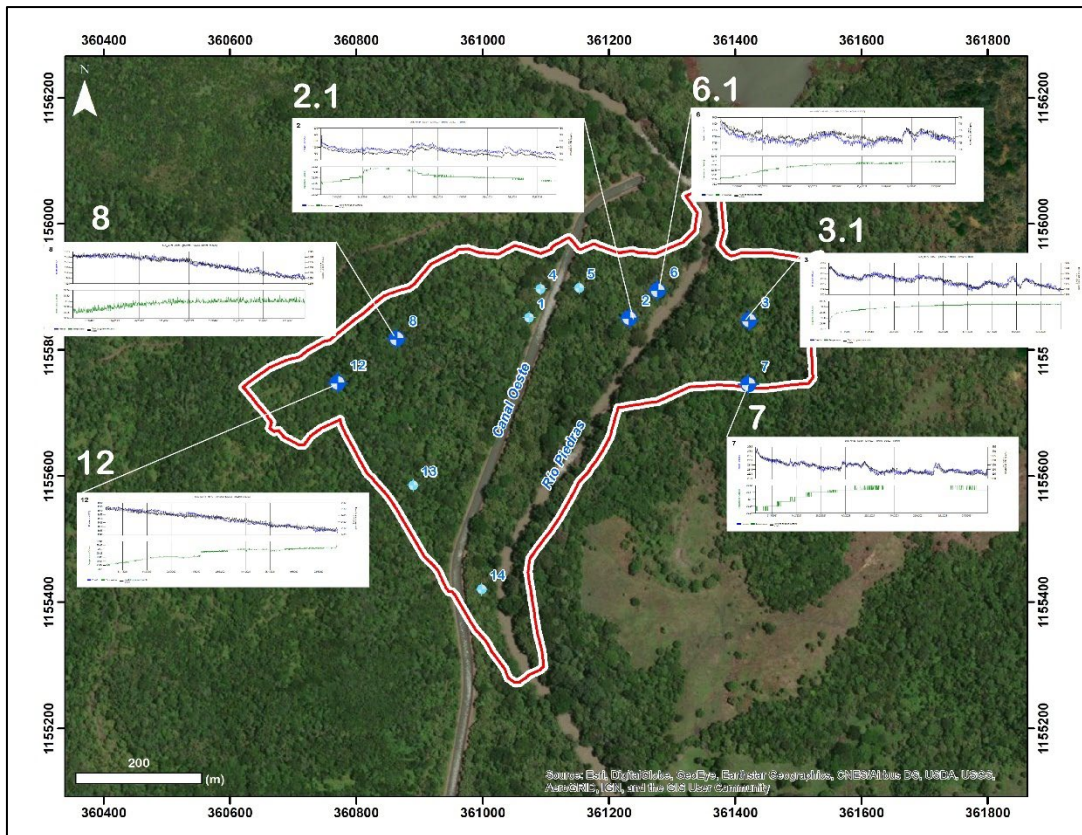


Figura 71. Ubicación de los *diver* en los piezómetros localizados hacia ambas márgenes del río en la zona baja entre el canal Oeste y el Río Piedras

Todos los *diver* se ubican en los piezómetros con rejillas más profundas de cada pozo monitoreado. En los más profundos la rejilla se ubican a partir de los 42 a 35 m hasta los 51 a 60 m de profundidad, y corresponden a los piezómetros 8, 2.1, 6.1 y 3.1; los más someros se localizan a partir de los 12 a 17 m hasta los 36 y 37 m de profundidad y corresponde con los piezómetros 7 y 12.

A partir del análisis de los datos de los niveles y temperatura obtenidos con los *diver* (Figura 72), se determina que los piezómetros 8 y 12 de la margen derecha y sobre la loma, tienen un comportamiento con tendencia lineal rectilínea y continua en el descenso de los niveles estáticos conforme se avanza hacia la época seca, la pendiente de la línea de ajuste para los niveles de ambos piezómetros es de $2,0 \times 10^{-3}$ y la diferencia

entre los niveles mínimos y máximos para ambos piezómetros es de 0,26 y 0,38 m, respectivamente. Esta similitud en la simetría de los niveles indica que ambos piezómetros reflejan el mismo aporte al acuífero, en este caso el acuífero fracturado en lavas, aun cuando el piezómetro 12 presenta una rejilla mixta compartida entre las litologías de un sedimentario superior y las lavas del acuífero fracturado.

Los niveles de los piezómetros 6.1 y 2.1, de la sección central entre el río y el canal, así como en el 3.1 y 7 de la margen izquierda, muestran fluctuaciones más erráticas y ondulantes en los niveles, las cuales se muestran a lo largo de una tendencia lineal (Figura 72). En el caso de los piezómetros penetrantes en el acuífero sedimentario como el 2.1, 6.1 y 3.1, esta tendencia es muy horizontal con pendientes del orden de 10^{-5} y las mayores fluctuaciones se observan entre los meses de abril y mayo, que corresponde con el periodo transicional entre la época seca a la lluviosa. Las mayores diferencias entre las mediciones mínimas y máximas para estos piezómetros son de 0,29, 0,19 y 0,25 m, respectivamente.

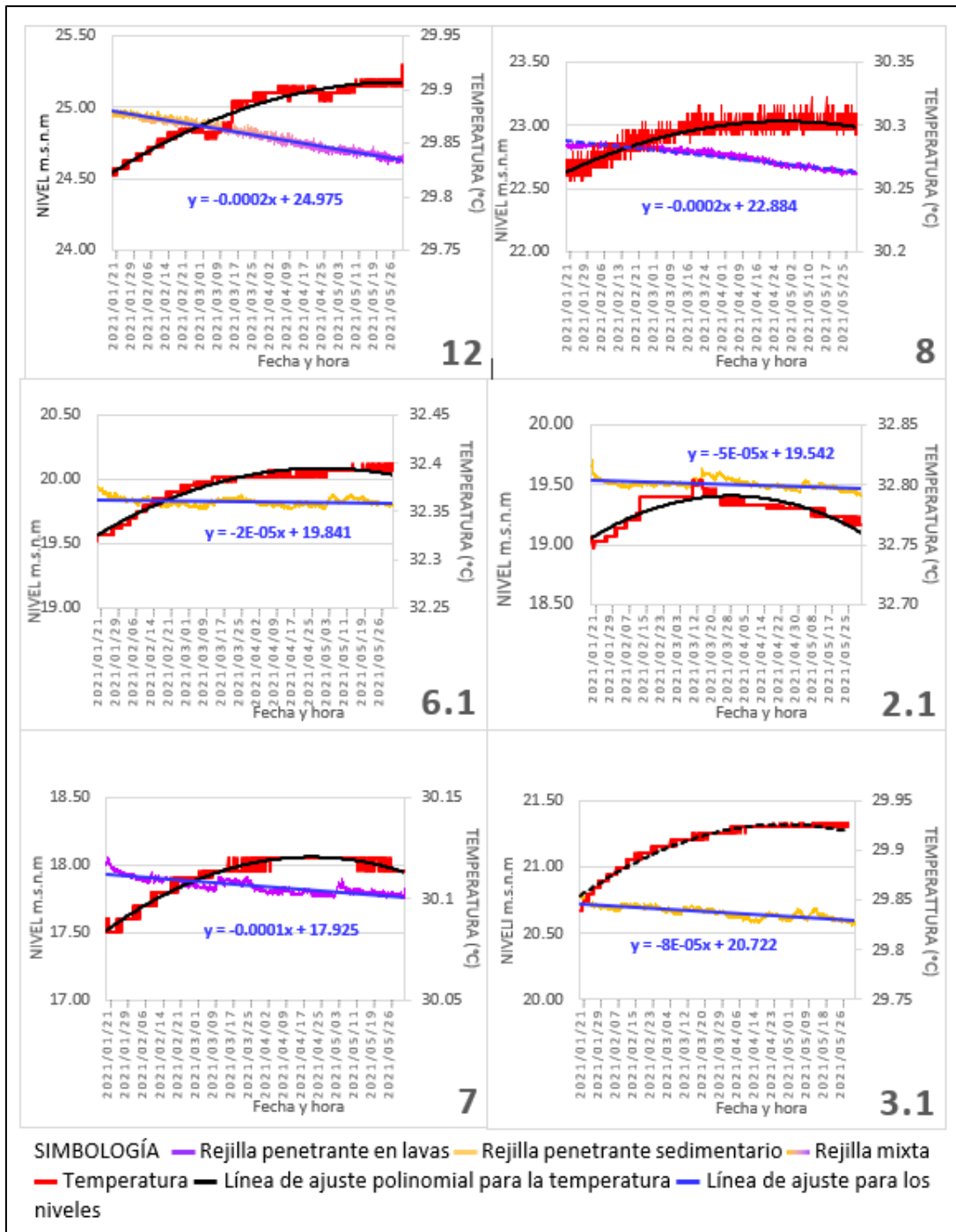


Figura 72. Gráfico de niveles y temperatura obtenidos con *diver* para los piezómetros de margen derecha 12 y 8, sección media entre canal y el río 6.1 y 2.1, y la margen izquierda 7 y 3.1.

El piezómetro 7 de la margen izquierda, muestra una pendiente de descenso en la línea de tendencia de los niveles, de igual orden de magnitud que los piezómetros homólogos de la margen derecha 8 y 12, todos penetrantes en el acuífero en lavas fracturadas, a diferencia de los piezómetros 8 y 12, este piezómetro 7, no presenta una tendencia rectilínea, sino que muestra fluctuaciones en los niveles, los cuales se replican de forma simétrica en los piezómetros 2.1, 3.1 y 6.1, particularmente con el piezómetro 2.1, en donde se muestran un reflejo en la variación de los niveles que se replica en diferentes periodos específicamente para ambos piezómetros (Figura 73). Esto indica que posiblemente el acuífero en lavas fracturadas tiene un aporte lateral en ambas márgenes de fuentes y direcciones diferentes, que posiblemente confluyen hacia la sección norte del Río Piedras. En el caso de los piezómetros ubicados en la margen derecha (8 y 12), la recarga al acuífero en las lavas podría provenir de las partes altas ubicadas al suroeste, como lo son las lomas y cerros Agua Fría, por el contrario, el aporte al acuífero desde la margen izquierda podría provenir desde el noreste-este.

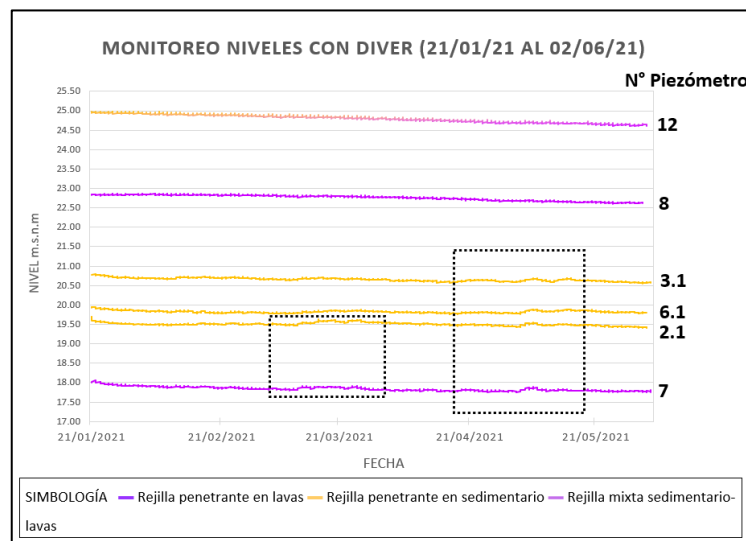


Figura 73. Comparación de niveles para los diferentes piezómetros monitoreados

En general, los piezómetros de la margen derecha tienen un comportamiento diferente al grupo de piezómetros ubicados en la parte baja entre el río Piedras y el canal Oeste y la margen izquierda, ya que, por la tendencia y comportamiento de los niveles, parecieran presentar aportes laterales diferente.

La temperatura asociada a los niveles medidos presenta valores progresivamente altos que incremente en un rango de 1 a 2°C, en pares de piezómetros alineados ya sea hacia ambas márgenes o bien en áreas comunes, las temperaturas más bajas de 29,7 °C a 29,9 °C se muestran en los piezómetros 12 y 3.1, las intermedias de 30,1 a 30,3 °C en los piezómetros 7 y 8, y las temperaturas más altas de 32,3 a 32,7 °C en los piezómetros 2.1 y 6.1. Estos últimos piezómetros se encuentran muy cercano entre sí y alineados en dirección noreste a suroeste, orientación similar a la Falla Lora.

En la tabla 21, se muestra la clasificación de Schoeller (1962), que determina cuales temperaturas corresponden a fuentes termales a partir de la relación entre la temperatura medida en los piezómetros (t) y la temperatura promedio anual de una zona (t_m), que en el caso de Bagaces corresponde a 28°C (Figura 6).

Tabla 21. Clasificación de las aguas subterráneas según Schoeller (1962) para los valores de temperatura reportados

Relación t y t_m	Clasificación
Si $t > t_m + 4^\circ\text{C}$	Aguas hipertermas o termales
Si $t_m \leq t \leq t_m + 4^\circ\text{C}$	Aguas ortotermas o normales
Si $t < t_m$	Aguas hipotermas o frías

A partir de esta clasificación, se define que las temperaturas de los piezómetros 12, 8, 3.1 y 7, corresponden a aguas normales, mientras que los piezómetros 2.1 y 6.1, a aguas ligeramente termales (Tabla 22).

Tabla 22. Clasificación de Schoeller (1962) para las aguas en el área de estudio a partir de los datos de temperatura.

Piezómetro	Temperatura medida <i>Diver</i>			Clasificación Schoeller (1962) $t_m+4^{\circ}\text{C}=32^{\circ}\text{C}$	Gradiente geotérmico ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)
	$T_{\text{mín}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{máx}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{prom}} (^{\circ}\text{C})$		
8	30,26	30,32	30,30	normal	NR
12	29,82	29,92	29,89	normal	NR
2.1	32,74	32,82	32,78	termal	0,09
6.1	32,32	32,40	32,39	termal	0,06
7	30,08	30,12	30,11	normal	NR
3.1	29,74	29,93	29,90	normal	NR

NR= No Reporta, ■ Piezómetro en lavas, ■ Piezómetro en sedimentario, □ Piezómetro mixto.

Para las aguas termales de los piezómetros 2.1 y 6.1, se estima un gradiente geotérmico (Gt), partir de la relación (Beardsmore & Cull, 2001):

$$Gt = \frac{t - T_0}{Z_m}$$

Siendo:

t = temperatura medida dentro del pozo ($^{\circ}\text{C}$)

Z_m = Profundidad de medición de la temperatura t (m)

T_0 = temperatura de la capa más superficial ($^{\circ}\text{C}$), a partir de la temperatura promedio anual (28°C), según la relación:

$$T_0 = t_m + 3 = 31^{\circ}\text{C}$$

El gradiente geotérmico presenta en general valores del orden de $0,01$ a $0,15^{\circ}\text{C}/\text{m}$, los valores altos de $0,15$ corresponden a zonas con actividad volcánica (Beardsmore & Cull, 2001). En el caso de los piezómetros 2.1 y 6.1, los valores reportados son de $0,09^{\circ}\text{C}/\text{m}$, y de $0,06^{\circ}\text{C}/\text{m}$, respectivamente, lo que indican un aporte geotérmico proveniente de una fuente lejana, esto se comprueba también con los análisis hidrogeoquímicos,

particularmente de la muestra más cercana al sitio de estudio, la TE-50, que presenta un posible aporte termal.

9.2.4 Aforos

Se realizaron dos aforos en dos secciones transversales al Río Piedras, ambos con fecha del 17/03/2021. Las lecturas se realizaron con un correntómetro de hélice modelo FP111 de la marca *Global Water*, con un rango de lectura de 0,1 a 6,1 m/s, y una precisión de 0,1 m/s.

El primer aforo se ubica cerca de 50 m aguas arriba del sitio de estudio, entre el canal Oeste y el Embalse Río Piedras, a lo largo de una sección de 15,4 m de longitud. El segundo aforo se ubica 3,0 km aguas abajo del área de estudio cerca del puente en el cruce del poblado Falconiana (Hda. Tamarindo), y en una sección de 19,80 m de longitud (Figura 74). Este segundo aforo se ubica lejos del área de estudio, debido a que las secciones más cercanas no cuentan con las condiciones adecuadas para aforar, en relación con la accesibilidad y seguridad, tanto del equipo como del personal.

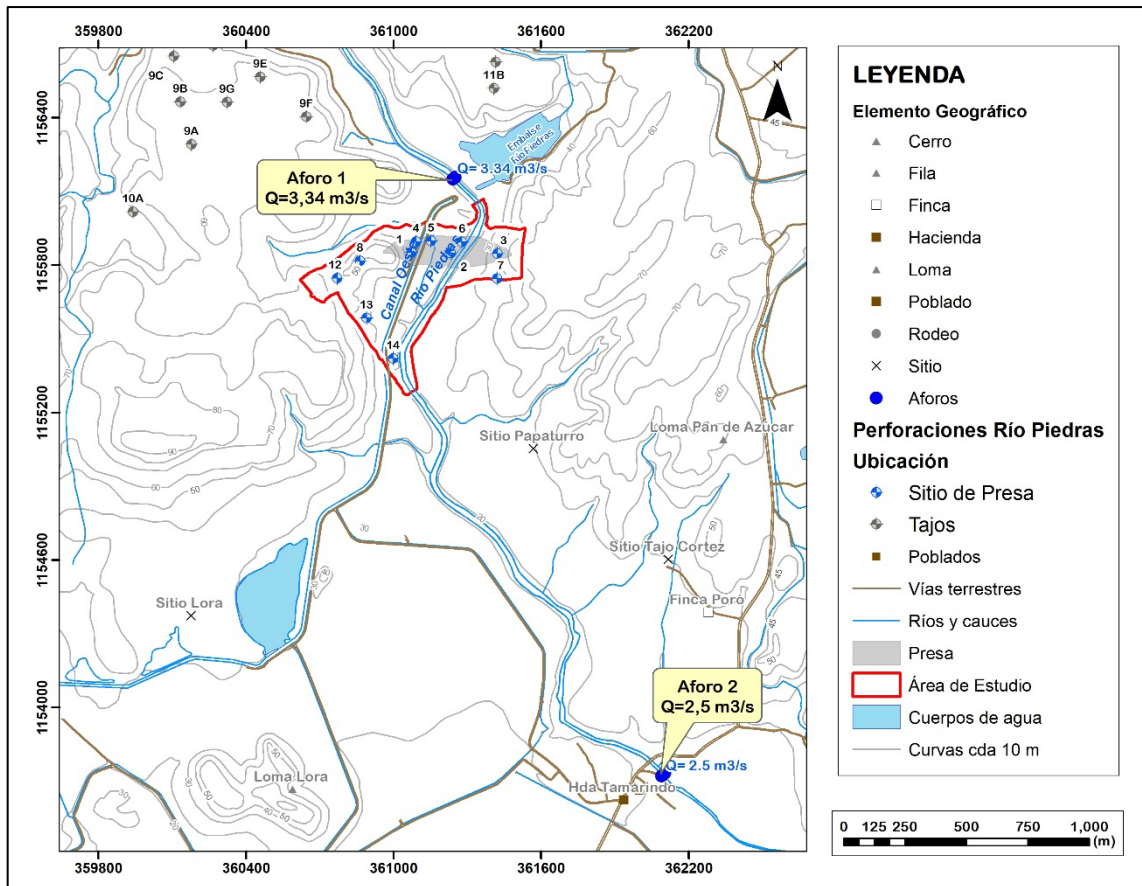


Figura 74. Ubicación de los foros realizados en dos secciones del río Piedras.

En cada sitio de aforo se realizaron dos lecturas la primera desde la margen izquierda a la derecha y viceversa para verificar los datos obtenidos, segmentado cada sección en distancias de 1 m con lecturas una o dos lecturas a 20%, 60% y/o 80% de la profundidad.

En la tabla 23 se muestran los caudales obtenidos para cada barrido realizado en ambas secciones, a partir de las cuales se estimar el gradiente del río de $3,26 \times 10^{-3}$ a partir de una diferencia de elevación de 8,41 m y una distancia lineal entre aforos de 2,58 km.

Tabla 23. Parámetros de los aforos realizados en dos secciones del río Piedras

N° Aforo	CRTM05		Elevación (m)	Profundidad máx. espejo agua (m)	Caudal Q (m ³ /s)
	Latitud N	Longitud E			
Af-1A	1156151,0	361242,8	34,25	0,86-0,87	3,47
Af-1B					3,20
Af-2A	1153721,0	362090,9	25,84	0,53-0,54	2,37
Af-2B					2,62

En la figura 75, se muestran los perfiles de flujo asociados al caudal medio de cada sección transversal, en donde se muestran las zonas con mayor flujo de agua, tanto para el aforo 1 como para el aforo 2. En el aforo 2, se muestra un perfil del cauce muy irregular debido a que durante la época de seca en la que se aforo esta sección, existían bancos de arena a lo largo del cauce de poca profundidad.

El mayor caudal en el aforo 1 en relación con el aforo 2, indica que existen pérdidas del flujo a lo largo del río, ya sea por aportes laterales del río a los acuíferos o por la evaporación. El sitio de aforo 1, se localiza muy cercano al Embalse actual, lo que posiblemente indica la existencia de un aporte lateral del Embalse al río Piedras en este sector, lo que podría verse reflejado en parte del caudal obtenido, sin embargo, a falta de mayor cantidad mediciones tanto a lo largo del río como de forma periódica, se desconoce en cuales segmentos del río, éste puede ser influente o efluente a los acuíferos del sitio de estudio.

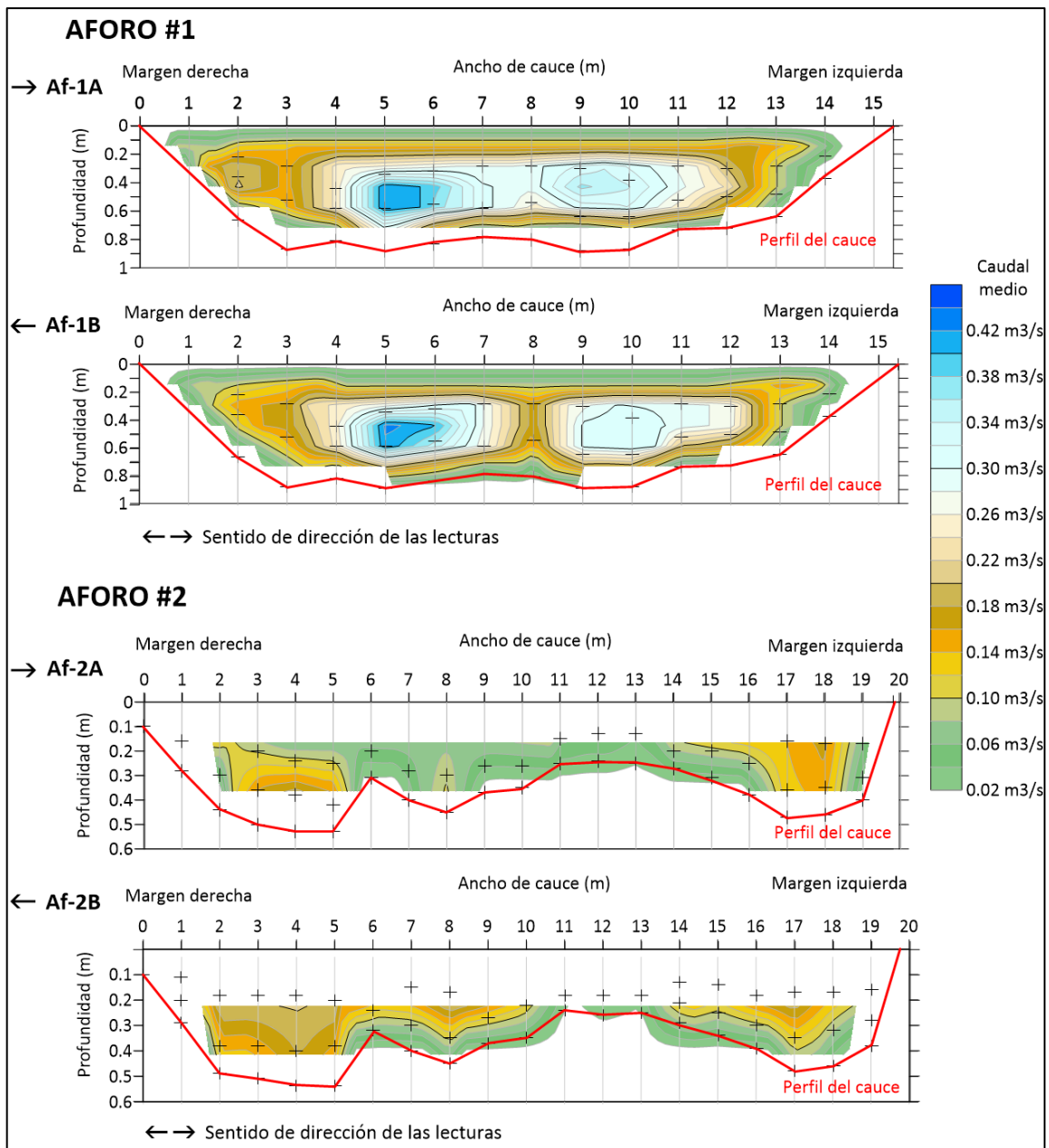


Figura 75. Perfiles de flujo de los dos aforos realizados en el río Piedras.

9.2.5 Flujo del agua subterránea

Las equipotenciales se realizaron a partir de los niveles piezométricos calibrados a los techos de los dos acuíferos más representativo en el área de estudio, como lo son el acuífero en lavas fracturadas ubicado en un nivel somero a intermedio y el acuífero en el sedimentario inferior, ubicado por debajo del anterior. El software utilizado para la integración de datos es el Surfer 19, se utilizaron varios métodos de interpolación entre los que se encuentran: *Inverse Distance to Power*, *Kriging*, *Minimum Curvature*, *Natural Neighbor*, *Radial Basis Function* y *Triangulation with Linear Interpolation*, para determinar cuál presenta un mejor ajuste en relación con las equipotenciales realizadas de forma manual, a partir de los cuales se establece que el interpolador utilizado es el *Radial Basis Function* (FBR). Este interpolador es igualmente utilizado por Mejía (2009), Cataña & Belete (2014) y Kresic (2006), los cuales realizaron análisis estadísticos y matemáticos de este interpolador aplicados de curvas de nivel y datos de equipotenciales, con resultados congruentes a los modelos preestablecidos.

La red de flujo para el acuífero en las lavas (Figura 76) se divide en dos bloques a partir del comportamiento de las equipotenciales obtenidas en las mediciones realizadas en los piezómetros penetrantes en la unidad ígnea y a las estructuras tectónicas propuestas. El primer bloque se ubica hacia el sector oeste-centro del área de estudio, entre la margen derecha del canal Oeste y la margen derecha del río Piedras. La red de este bloque se construyó a partir de los datos obtenidos en los piezómetros 12, 8, 13, 6.2 y 2.2; en este sector el flujo presenta una dirección desde el oeste hacia el este-sureste y un gradiente hidráulico (i) de 0,02, hacia la sección central del área. Cuando las isopiezas atraviesan el bloque de fallas inversas F4 y F5, el gradiente hidráulico se reduce a 0,010, en este sector el flujo casi horizontal presenta dos direcciones que aparentan confluir hacia el río Piedras, una hacia el Noreste hacia la falla F5, y otra hacia el sureste hacia el río. El segundo bloque corresponde al sector noreste-este del área de estudio, entre la margen izquierda del río Piedras y la Falla F5, se construyó a partir de los piezómetros

3.2, 7, 2.2 y 6.2, en este sector el flujo subterráneo presenta una dirección desde el noreste hacia el suroeste-sur y un gradiente hidráulico de 0,024, el cual tiende a confluir hacia el río de forma paralela, para posteriormente proyectarse hacia el sur.

En ambos bloques de equipotenciales el sector norte del área y hacia los piezómetros 6.2 y 2.1, el flujo tiende a inclinarse hacia el norte, esto podría asociarse a la estructura al basculamiento del bloque tectónico noreste compuesto por la falla Lora y la F5.

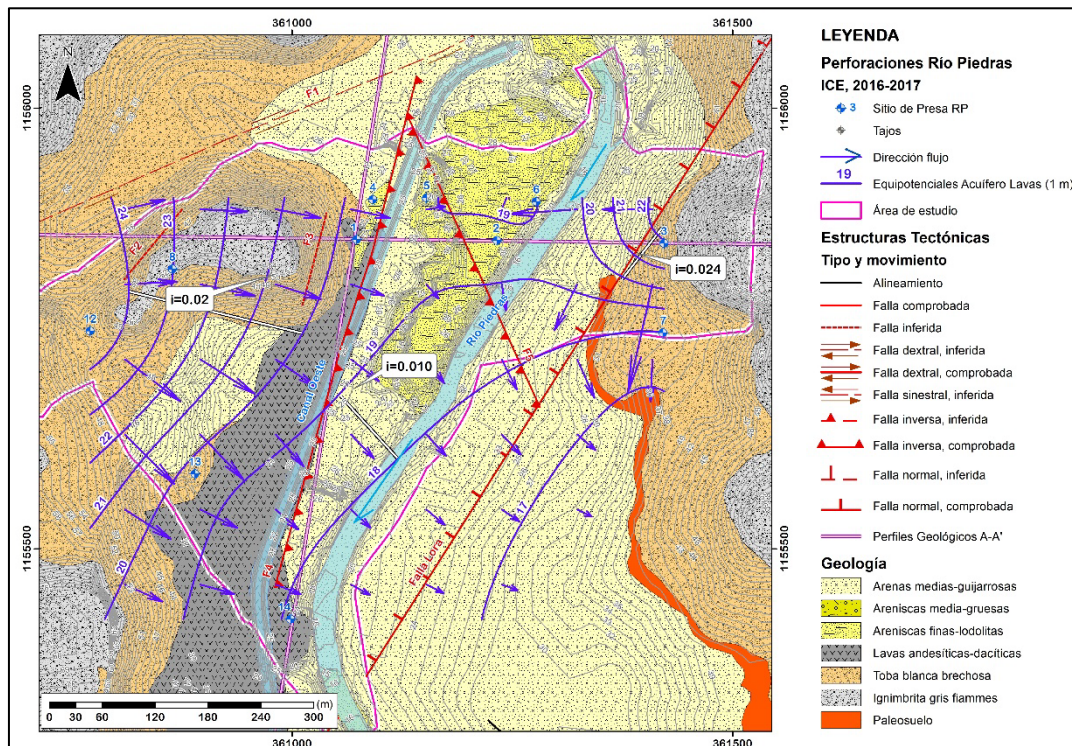


Figura 76. Red de flujo para el acuífero en lavas fracturadas.

La red de flujo en el acuífero sedimentario inferior (Figura 77), al igual que en el acuífero superior de las lavas, tiende a confluir desde ambas márgenes del río Piedras hacia el sector central del área de estudio, entre las fallas F4 y F5, para posteriormente proyectarse al suroeste. Esta red de flujo presenta una tendencia más uniforme en los niveles piezométricos, por lo que permite elaborar una red más continua en el área de estudio. Las equipotenciales se construyeron a partir de los datos provenientes de

mediciones realizadas en los piezómetros 1.1, 2.1, 4.1, 5.1, 6.1, y 14; este último piezómetro está compuesto por una única rejilla mixta, la cual abarca parte de la unidad ígnea y de la unidad sedimentaria profunda. La mayor parte de la rejilla de este piezómetro 14, se localiza en la unidad sedimentaria profunda y corresponde al 70% de la longitud total, el restante del 30% de la rejilla comprende litologías ígneas asociadas a brechas peperíticas y lavas fracturadas. Las lavas fracturadas asociadas al acuífero superior presentan un espesor de 3 m, el cual es equivalente al 12% de la longitud de la rejilla, por lo que, se determina que el nivel piezométrico reportado en este pozo se encuentra mayormente influenciado por el acuífero sedimentario inferior y no por el acuífero ígneo. Este piezómetro presenta un confinamiento estimado de 1 m, obtenido a partir de los niveles estáticos registrados durante el proceso de perforación, por lo que el mismo debe de ser considerado para obtener el nivel real del acuífero en las lavas fracturadas y en el sedimentario inferior.

Los gradientes hidráulicos predominantes para esta red de flujo son de 0,010. Estos valores predominan en la margen izquierda y hacia el sector central y sureste del área de estudio (Figura 77), mientras que hacia la margen derecha cerca de los piezómetros 1.1, 4.1 y 5.1, el valor del gradiente se reduce significativamente a $8,54 \times 10^{-3}$. Las zonas de falla F4 y F5, deforman las líneas haciendo que las direcciones de flujo converjan hacia este sector, debido a la cuña compresiva que levanta parte del sedimentario cizallándolo y genera zonas de fallas impermeables que confinan el techo del acuífero por debajo del nivel original.

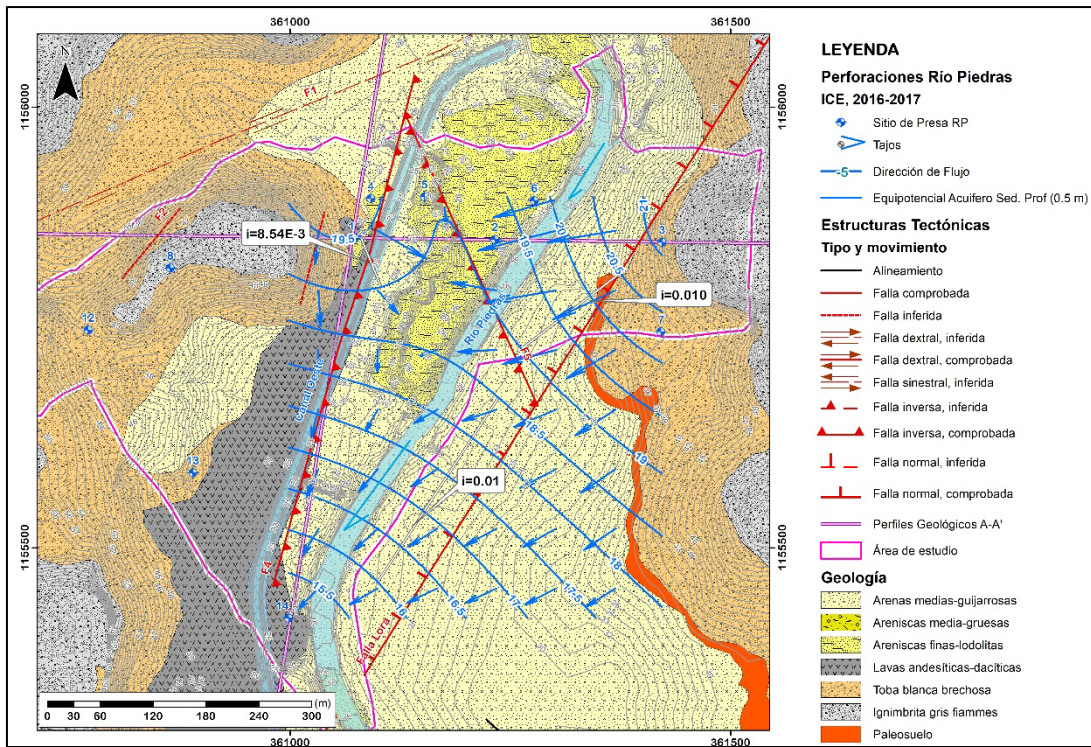


Figura 77. Red de flujo para el acuífero en el sedimentario inferior.

9.2.6 Unidades Hidrogeológicas

A continuación, se describen las principales unidades hidrogeológicas definidas para el área de estudio y representadas en la figura 78. En el siguiente apartado 9.2.7 se detallan los parámetros hidráulicos asociados los tres acuíferos principales (acuífero b, c y d), así como a los diferentes ensayos realizados para la estimación de estos.

A- Acuíferos en Tobas (Acuífero a) y en Sedimentos superiores (Acuífero b)

Esta unidad se sugiere a partir del incremento en los niveles estáticos reportados en los avances de las perforaciones, en los tramos asociados a estas litologías. Esta unidad de tobas no tiene piezómetros asignados para determinar que se

trate de un acuífero claramente establecido y no de una zona vadosa estacional, a pesar de esto se menciona con el fin de proveer información en caso de que en futuras investigaciones se establezca la existencia del mismo.

El acuífero en tobas (acuífero a), presenta niveles reportados en las perforaciones 3, 7 y 8, entre los meses de marzo y julio, con valores de 7,4 a 9,6 m de profundidad, los cuales se asocian a los niveles litológicos tobáceos de la unidad volcanoclástica Rama de Nance. Este posible acuífero colgado presenta espesores estimados de 3 a 7 m, los cuales se localizan hacia los niveles medio e inferior de la unidad litológica, la misma presenta espesores litológicos entre los 8,7 a 21 m, para estas tres perforaciones. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos de los ensayos de *Lugeon*, y asociadas a esta unidad son de $4,68 \times 10^{-4}$ a $2,72 \times 10^{-4}$ cm/s en la perforación 8, y $1,30 \times 10^{-5}$ cm/s en la perforación 12.

B- Acuífero en Sedimentos superiores (Acuífero b)

El acuífero en sedimentos superiores (acuífero b), se presenta en los niveles reportados para las perforaciones 2, 5, y 6, entre los meses de enero, y mayo, con valores de 3,9 a 6,3 m de profundidad. Se localiza en las capas sedimentarias superiores asociadas a la unidad sedimentaria Falconiana. Estas capas son descritas como arenas y areniscas medias masivas y laminadas poco o moderadamente consolidadas, usualmente localizados en los primeros 1 a 23 m de profundidad, ubicadas por encima de la unidad ígnea Agua Fría, y de forma predominante hacia sector entre el río Piedras y el canal Oeste. Los niveles asociados para este acuífero libre, en el piezómetro 6.3 varían de 6,95 a 8,18 m y el espesor saturado estimado para esta unidad hidrogeológica es de 2 a 6 m, hacia los niveles inferiores cerca del contacto inferior con la unidad Agua Fría. Este acuífero se localiza en la sección topográficamente más baja dentro del área de estudio, entre el río Piedras y el canal Oeste, por lo que es posible, que exista

alguna comunicación lateral con el río y el canal (figura 78). Se estima un confinamiento hidráulico libre, debido a la superficialidad del nivel piezométrico asociado y la variabilidad estacionaria del mismo. Este acuífero presenta un sólo piezómetro reportado (6.3) en esta unidad, por lo que no fue posible realizar una red de flujo asociada.

C- Unidad hidrogeológica en lavas fracturadas (Acuífero c)

Se localiza en la unidad ígnea Agua Fría la cual se describe como flujos posiblemente lávicos de tipo afaníticos con núcleos o centros masivos y fracturados, los cuales presentan gradaciones de textura vesicular predominantemente desarrolladas hacia el techo de la unidad. Hacia ambos contactos esta unidad geológica presenta la formación de brechas peperíticas, siendo las brechas superiores las mayormente desarrolladas y espesas.

Este acuífero fracturado se asocia litológicamente tanto al techo como a la base de los niveles masivos fracturados más centrales de la unidad ígnea, así como a algunos niveles vesiculares fracturados (perforaciones 5 y 14), las capas confinantes del acuífero se relacionan a las brechas peperíticas con bloques sanos y matriz limo-arcillosa, así como a las zonas vesiculares masivas superiores e inferiores al acuífero y predominantes en las perforaciones 13, 12, 8, 1, 4, 6, 2, 3 y 7. El espesor asociado a esta unidad hidrogeológica varía de escasos 3 m en la perforación 5, a 9 m como máximo en la perforación 13, los niveles piezométricos reportados varían desde los 8,0 m en el piezómetro 6.2, a 20,7 en el piezómetro 12.

El grado de confinamiento hidráulico estimado para este acuífero es semiconfinado (Tabla 6), debido al valor inferido del coeficiente de almacenamiento del orden de 10^{-4} obtenido en los registros para la perforación

TE-57 y asociado a esta misma unidad hidrogeológica (Tabla 18), así como a la diferencia potenciométrica entre los niveles muestreados y la profundidad del techo del acuífero, ya que en algunos sectores se muestra confinado (norte-noroeste) por las capas sedimentarias superiores y los depósitos tobáceos, en otros se muestra libre (sur-suroeste) en donde las lavas afloran en la superficie. El mayor grado de confinamiento observado para esta unidad, es hacia el sector norte-noroeste del área de estudio, en los piezómetros 2.1 y 6.2, los cuales muestran diferencias de 16,5 a 18,3 m por encima del nivel de techo, en el sector este el confinamiento se reduce en los piezómetros 3.2 y 7, con diferencias de 8,0 a 9,4 m; y hacia el sector sur-suroeste presenta un confinamiento con tendencia a un acuífero libre, en los piezómetros 13 y 14 con diferencias de 1,3 a 0,31 m entre el contacto del techo y los niveles muestreados.

La profundidad mínima del techo de la unidad se reporta en la perforación 6 con elevaciones de 0,68 m.b.n.m y la máxima elevación de 17,7 m.s.n.m. se muestra en la perforación 12, siendo el promedio general entre los 2,5 a 16 m.s.n.m.

La dirección predominante del flujo subterráneo en este acuífero es sur-sureste (Figura 77), con un gradiente hidráulico promedio de 0,018. Inicialmente el flujo proviene de forma lateral desde ambas márgenes del río Piedras, en la margen derecha se proyecta desde el extremo oeste del área de estudio hacia el Sureste, y en la margen izquierda desde el extremo noreste hacia el sur-sureste, por lo que la recarga del acuífero se asume que proviene desde dos aportes distintos localizados hacia los extremos laterales opuestos, un recarga proveniente desde el oeste y la otra desde el noreste, así también se evidencia en el comportamiento de los niveles obtenidos con los *diver*, en donde las fluctuaciones de los niveles para los piezómetros 8 y 12 de la margen derecha, son constantes y linealmente descendentes entre sí, mientras que en los piezómetros 3.1 y 7 de la margen

izquierda, los niveles presenta aportes que evidencia incrementos específicos y periódicos bien definidos en varias secciones del registro.

D- Unidad hidrogeológica en Sedimentos inferior (Acuífero d)

Se localiza en la unidad sedimentaria Falconiana, la cual se describe de forma general como depósitos de areniscas medias guijarrosas masivas a laminadas con diferentes grados de consolidación, el cual presenta facies interdigitadas de tobos finas masivas y laminadas, que se reinterpretan como lodolitas y areniscas finas con aportes volcánoclasticos.

La unidad hidrogeológica se define en las zonas asociadas a las litologías de areniscas guijarrosas medias, poco o moderadamente consolidadas, así como en las capas completamente inconsolidadas, mientras que la litología descrita como tobos laminadas o masivas y capas de diatomitas, que se asocian a acuitardos o capas poco permeables y confinantes, en el caso de que se ubique por encima del acuífero. En algunos sectores se muestran pequeños lentes confinados de 2 a 4 m de espesor, ubicados por debajo de la unidad geológica ígnea y asociados a esta unidad hidrogeológica. Los cuales se definieron a partir de los registros de los niveles estáticos reportados en los avances de las perforaciones, sin embargo, el mayor potencial hidrogeológico de este acuífero se define hacia los niveles más profundos, donde se muestra generalmente limitado por espesas capas de acuitados.

A esta unidad se le asocia una porosidad primaria relacionada a la poca cementación de los granos que tiende a la incrementar la permeabilidad del depósito, la cual se confinan por debajo de los depósitos de brechas peperíticas y flujos vesiculares masivos asociados a la unidad ígnea superior, y las facies finas del depósito que la sobreyacen en las perforaciones 4, 1, y 3.

El grado de confinamiento hidráulico asociado a este acuífero corresponde a confinado, debido a las altas diferencias potenciométricas establecidas a partir de los niveles reportados, en comparación con la ubicación del techo del acuífero, el cual muestra un grado de confinamiento mayor hacia el sector norte del área de estudio, en los piezómetros 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 y 6.1, con valores desde 27,7 a 44,5 m por encima del techo del acuífero, mientras que hacia el sector sur en el piezómetro 14, el confinamiento disminuye a 1,4 m por encima del techo del acuífero, lo que ubica el techo en un rango de elevación promedio entre los 13 m.s.n.m a -20,0 m.s.n.m.

El espesor máximo estimado para esta unidad es de 80 m y se determina a partir del perfil 11 de TDEM (Figura 62) bajo la perforación 3 y hasta proyección de las resistividades de 5 Ohm*m, el espesor mínimo de 10 m, se define a partir de la zona confinada entre dos acuitados en la perforación 1 (Figura 78).

Los niveles promedio para esta unidad varían de 6 a 8 m, siendo el más profundo de 18,8 m reportado en el piezómetro 3.

De acuerdo con la red de flujo, la dirección del agua subterránea preferencial para la unidad es Suroeste en un gradiente hidráulico de 0,010, esta dirección se muestra de manera opuesta a la inclinación del techo de la unidad sedimentaria profunda (Figura 78). Pero acorde con las direcciones de buzamientos reportadas para esta unidad geológica de S76W/10° y S58W/8° en el sitio más cercano al área de estudio (Tabla 11, Figura 35). Esta inclinación del techo del sedimentario en contraposición a la dirección del flujo, se debe posiblemente a que el peso litoestático de la unidad ígnea incrementa la presión del agua confinada en los poros que rodea los granos en las capas poco cementadas, lo que permite al agua fluir lateralmente hacia una dirección de menor presión, que en este caso corresponde de igual manera a las zonas de menor espesor de la unidad ígnea

sobreyacente, la cual se tiende a reducirse hacia el Sur-Suroeste a Sureste del área de estudio.

En la tabla 24, se muestra el resumen de las principales características de las unidades hidrogeológicas descritas.

Tabla 24. Resumen de las principales características hidrogeológicas de los acuíferos descritos en el área de estudio

Unidad Hidrogeológica	Espesor (m) mín.-máx.	Grado confinamiento Hidráulico	Cota de Profundidad techo acuífero msnm	Unidad Geológica
Acuífero a	3-7	Colgado?	28 a 43	Unid. Volcanoclástica Rama de Nance
Acuífero b	2-6	Libre	18 a 22	Unid. Sedimentaria Falconiana (superior)
Acuífero c	3-9	Semiconfinado	2,5 a 16	Unid. Ígnea Agua Fría
Acuífero d	10-80	Confinado	-20 a 13	Unid. Sedimentaria Falconiana (inferior)

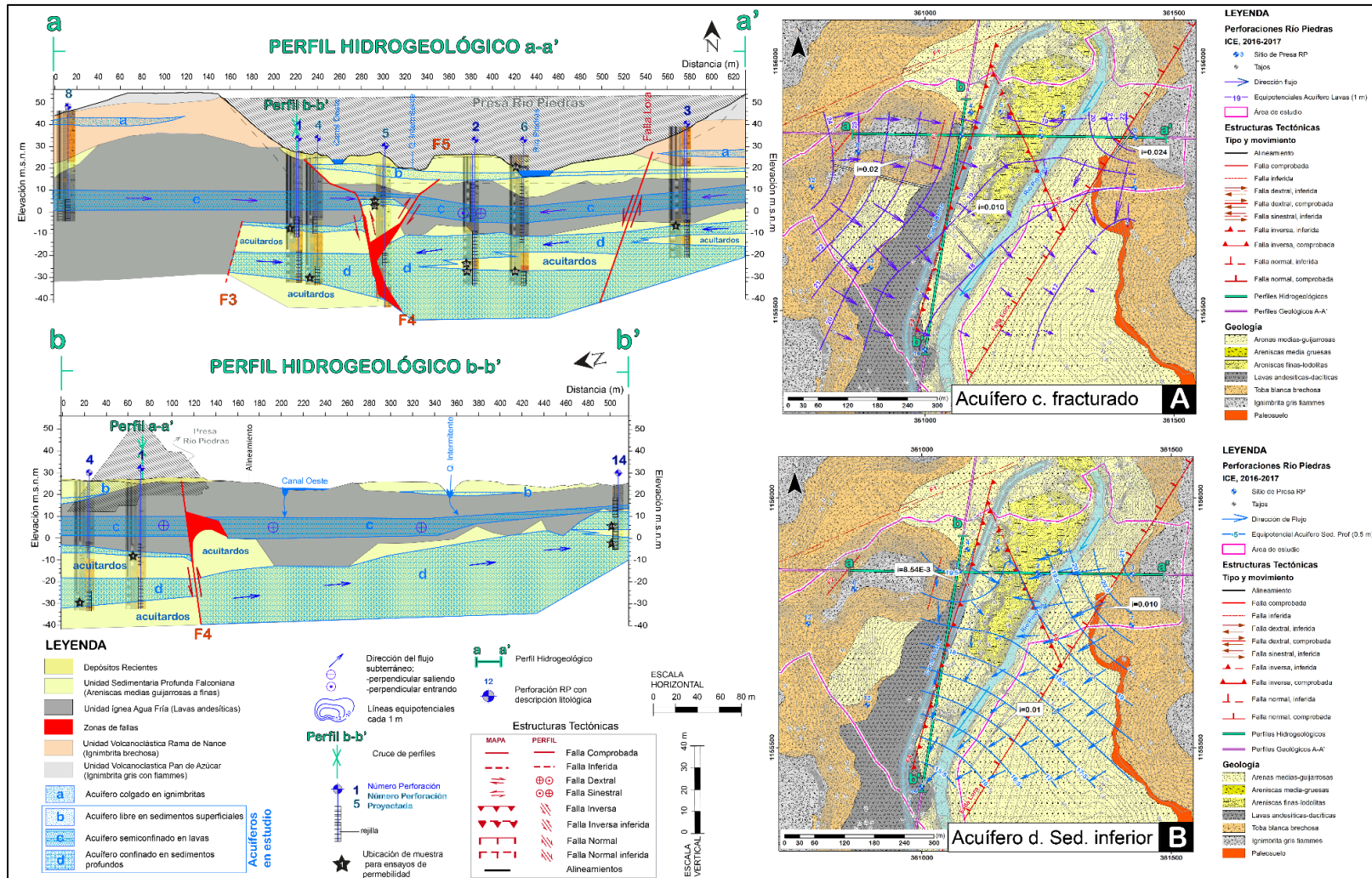


Figura 78. Modelo Hidrogeológico conceptual del área de estudio. A) Equipotenciales en acuífero en lavas fracturadas, acuífero c. B) Equipotenciales en acuífero en sedimentario inferior, acuífero d.

9.2.7 Parámetros Hidráulicos de los Acuíferos

Los parámetros hidráulicos de: conductividad hidráulica (K), porosidad efectiva (m_e), y transmisividad (T), se determinaron para los acuíferos en sedimentos superiores (Acuífero b), en lavas fracturadas (Acuífero c) y en el sedimentario inferior (Acuífero d). El principal parámetro con mayor número de ensayos realizados para estimar su valor, corresponde con la conductividad hidráulica (K), en particular para el acuífero sedimentario inferior poco consolidado, a partir del cual se desarrollaron la gran mayoría de los ensayos relacionados a la granulometría, así como a la permeabilidad asociada a la carga constante.

En la tabla 25, se resumen las cantidades de ensayos realizados en muestras de núcleos asociadas al acuífero sedimentario, y aquellos realizados en los piezómetros del área de estudio, de acuerdo con cada uno de los acuíferos de interés.

Tabla 25. Resumen de los ensayos realizado en muestras de núcleos y en los piezómetros del área de estudio, para la estimación de la conductividad hidráulica (K)

Tipo de análisis	Ensayo para la determinación de K	Unidad Hidrogeológicas (Cantidad de ensayos)		
		Acuífero en sedimentario Sup. (Acuífero b)	Acuífero en lava fracturadas (Acuífero c)	Acuífero en sedimentario Prof. (Acuífero d)
Ensayo en laboratorio con muestras de núcleos	A- Análisis textural	3		11
	B- Análisis de fragmentación de arenas	2		7
	C- Ensayos Granulométricos	2		7
	D- Permeámetro de carga contante	6		24
Ensayos <i>in situ</i> en piezómetros	E- Ensayo <i>Slug Test</i>	-	7 (+10 en rejillas mixtas)	19
	F- Ensayo <i>Lugeon</i> (ICE, 2018)	4	11 (+8 en rejilla mixta)	17

Las 14 muestras de núcleo ensayadas, se toman de los tramos perforados en el acuífero sedimentario que corresponden con la rejilla del armado de los piezómetros. Aquellos tramos que no fueron incorporados como muestras en la lista, se debe a que la muestra no existe en la caja de registro, o bien a que se encuentra muy cementadas para poder realizar este tipo de ensayos exclusivos de muestras inconsolidadas. Las muestras ensayadas se etiquetan de acuerdo con el número de la perforación, y a la cantidad de muestras por perforación. En la tabla 26, se presentan todas las muestras obtenidas y los tramos de las perforaciones a las que corresponden, los ensayos que se repitan en todas las muestras, corresponden a aquellas muestras cuya granulometría corresponde predominantemente a arenas, a partir del cual se aplican los otros tipos de ensayos.

Tabla 26. Cantidad de muestras analizadas y los diferentes tipos de ensayos realizados para el Acuífero d en el Sedimentario inferior.

N° Perforación	ID_Muestra	Profundidad del tramo muestreado (m)	Análisis textural	Análisis de fragmentación de arenas	Ensayos Granulométricos	Permeámetro de carga contante
1	1.1	33,83-37,30	✓	✓	✓	✓
	1.2	33,83-37,30	✓			
2	2A	49,20-51,00	✓			
	2B	53,00-54,00	✓			✓
3	3	45,00-45,82	✓	✓	✓	✓
4	4	56,25-56,66	✓	✓	✓	✓
5	5A	16,55-17,57	✓	✓	✓	✓
	5B	19,00-19,70	✓	✓	✓	✓
6	6A1*	5,00-6,00	✓	✓	✓	✓
	6A2*	5,00-6,00	✓			
	6B	53,00-54,00	✓			
12	12*	15,46-16,21	✓	✓	✓	✓
14	14A	19,00-20,00	✓	✓	✓	✓
	14B	27,00-27,79	✓	✓	✓	✓
Total muestras			14	9	9	10

*6A1,6A2 y 12 pertenecen al tramo del acuífero b.

9.2.7.1 Conductividad Hidráulica (K)

A- Ensayo Texturales

En una primera etapa de análisis se realizaron ensayos para determinar la clasificación textural de las catorce muestras, esto ensayos se realizaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). A partir de lo resultados y de acuerdo con la clasificación del *U.S. Department of Agriculture* (USDA), determina que tres de las muestras corresponde con granulometrías de materiales finos (Figura 79), las muestras 6B y 2A, se clasifican como arcillas, y la muestra 2B se encuentra en el límite de siendo la clasificación final de franco arcilloso.

La muestra 2A corresponde con sección media de la rejilla del piezómetro 2.1 y se asocia a la litología de tobas lodosas laminadas, mientras que la muestra 6B corresponde con sección superior de la rejilla del piezómetro 6.1, asociada a areniscas guijarrosas masivas localizadas en un contacto inferior con una zona de falla, que posiblemente las tiene a cizallarla y alterarla. Finalmente, la muestra 2B, corresponde igualmente que la muestra 2A, con la sección media inferior de rejilla del piezómetro 2.1 y se asocia a la litología descrita como arenas medias masivas, ubicadas por debajo de la litología de la muestra 2A, por lo que se asume que existe un aporte de la litología subyacente a esta muestra 2B, que tiende a reducir la granulometría.

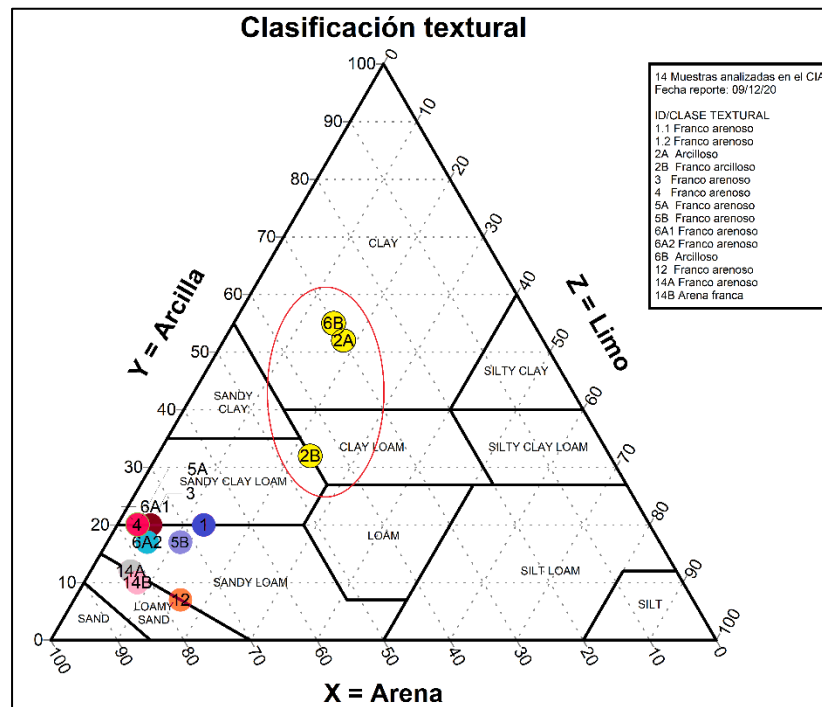


Figura 79. Clasificación textural de las muestras de núcleos obtenidas de los registros de perforación de los pozos del área de estudio (Clasificación USDA)

Las once muestras restantes se clasifican como materiales franco-arenosos (Tabla 27), en términos granulométrico corresponden a materiales arena limosos y

predominantemente areno arcilloso. En la tabla 27 y la figura 80, se muestran los porcentajes asociados a cada ensayo. Las muestras franco-arenosas presentan entre el 67 al 82% de la granulometría total asociada a arenas, el segundo grupo más dominante posterior a las arenas, son las arcillas con valores de 10 a 20 % para 7 de las once muestras, y finalmente las cuatro muestras restantes (12, 1.1, 1.2 y 5B), son predominantemente limosas con valores de 11 a 16% de la granulometría total.

Las muestras 6A1, 6A2 y 12, asociadas al acuífero superior b, se clasifican como franco arenosas, al igual que las restantes ocho muestras asociadas al acuífero inferior d.

Tabla 27. Distribución de los porcentajes granulométricos asociados las muestras ensayadas

N°	ID_Muestra	%			Clase Textural
		ARENA	LIMO	ARCILLA	
1)	1.1	67	13	20	FRANCO ARENOSO
2)	1.2	67	13	20	FRANCO ARENOSO
3)	2A	30	18	52	ARCILLOSO
4)	2B	45	23	32	FRANCO ARCILLOSO
5)	3	75	5	20	FRANCO ARENOSO
6)	4	77	3	20	FRANCO ARENOSO
7)	5A	77	3	20	FRANCO ARENOSO
8)	5B	72	11	17	FRANCO ARENOSO
9)	6A1*	77	3	20	FRANCO ARENOSO
10)	6A2*	77	6	17	FRANCO ARENOSO
11)	6B	30	15	55	ARCILLOSO
12)	12*	77	16	7	FRANCO ARENOSO
13)	14A	82	6	12	FRANCO ARENOSO
14)	14B	82	8	10	ARENA FRANCA

*Muestras del acuífero b

En general se muestra una predominancia de granulometrías de arenas en once de las catorce muestras (Figura 80), a partir de las cuales se determina que más del 60% de las mismas presentan tendencias arcillosas, y el restante 40% con tendencia limosas, por lo que es posible determinar que la permeabilidad de los materiales inconsolidados va a depender de la fracción granulométrica de arenas asociada, en contraposición con las fracciones finas de limos y arcillas que tiende a reducir la permeabilidad de las capas.

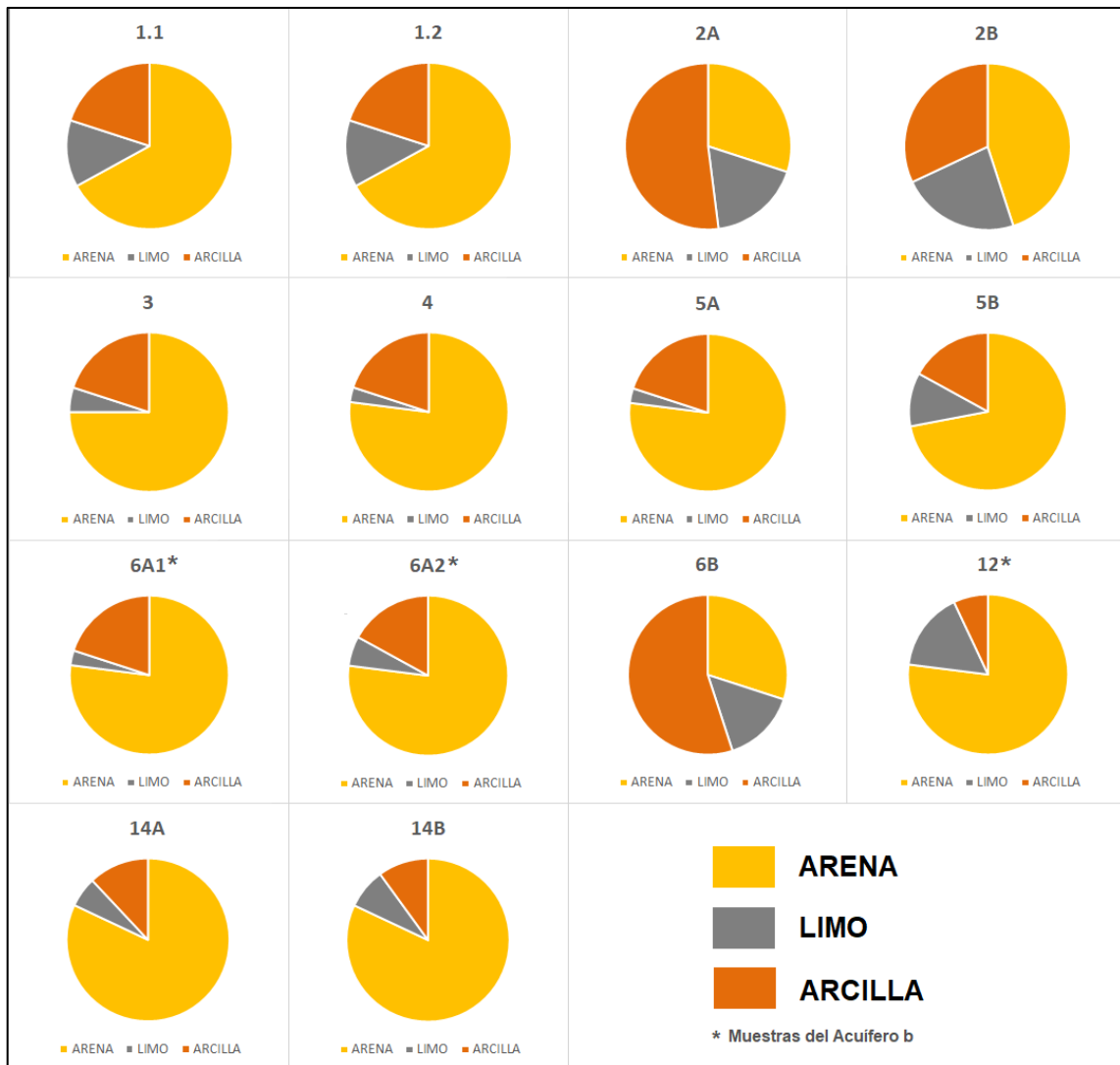


Figura 80. Gráfico circular de la distribución porcentual de las partículas en las catorce muestras.

B- Análisis del fraccionamiento de arenas

Estos ensayos se realizaron igualmente en el Centro de Investigaciones Agronómica (CIA), corresponden a un análisis más detallado que clasifica en subdivisiones porcentuales los tamaños de arenas asociados a nueve muestras de las once previamente identificadas. Para estos ensayos se integran las muestras 1.1 y 1.2, como 1, y las muestras 6A1 y 6A2, como 6A, pues presentan valores porcentuales iguales o muy similares en los resultados de los ensayos texturales.

De acuerdo con la clasificación los suelos (Tabla 28) se separan las arenas en cinco fracciones de acuerdo con el porcentaje de la granulometría asociada a cada diámetro.

Tabla 28. Tabla de clasificación de suelos utilizada en la CIA (Basada en la clasificación de la USDA, modificado para el límite inferior de las arenas de 0,05 a 0,063)

Fracción	Diámetros mm
Arena muy gruesa	2,0-1,0
Arena gruesa	>1,0-0,5
Arena media	>0,5-0,25
Arena fina	>0,25-0,125
Arena muy fina	>0,125-0,063
Limo	>0,063-0,002
Arcilla	<0,002

A partir de los análisis de fraccionamiento de las arenas se determina que (Figura 81), existen de una a cuatro clases modales de granulometrías para las arenas, siendo predominantes en las muestras 4, 5A, 5B, 6A y 14A, las granulometrías de cuatro clases que involucran las arenas gruesas, medias y finas, la muestra 3 presentan dos clases predominantes desde arenas gruesas a media. La muestra 1, presenta tres clases mayoritarias que involucran arenas gruesas a finas, y finalmente la muestra 12, una clase predominante hacia las arenas finas, con un valor asociados de 57% de la fracción de arenas asociado a esta granulometría.

En general, las muestras presentan porcentajes granulométricos que indican que las arenas se encuentran bien gradadas en tres a cuatro subdivisiones, siendo las más predominantes la arenas gruesas y medias, lo que podría indicar una buena permeabilidad del acuífero en las litologías correlacionadas con arenas descritas como medias y guijarrosas, en los registros de las perforaciones tanto para el acuífero superior b (6A, 12) como el acuífero inferior d (1, 3, 4, 5A, 5B, 14A, 14B).

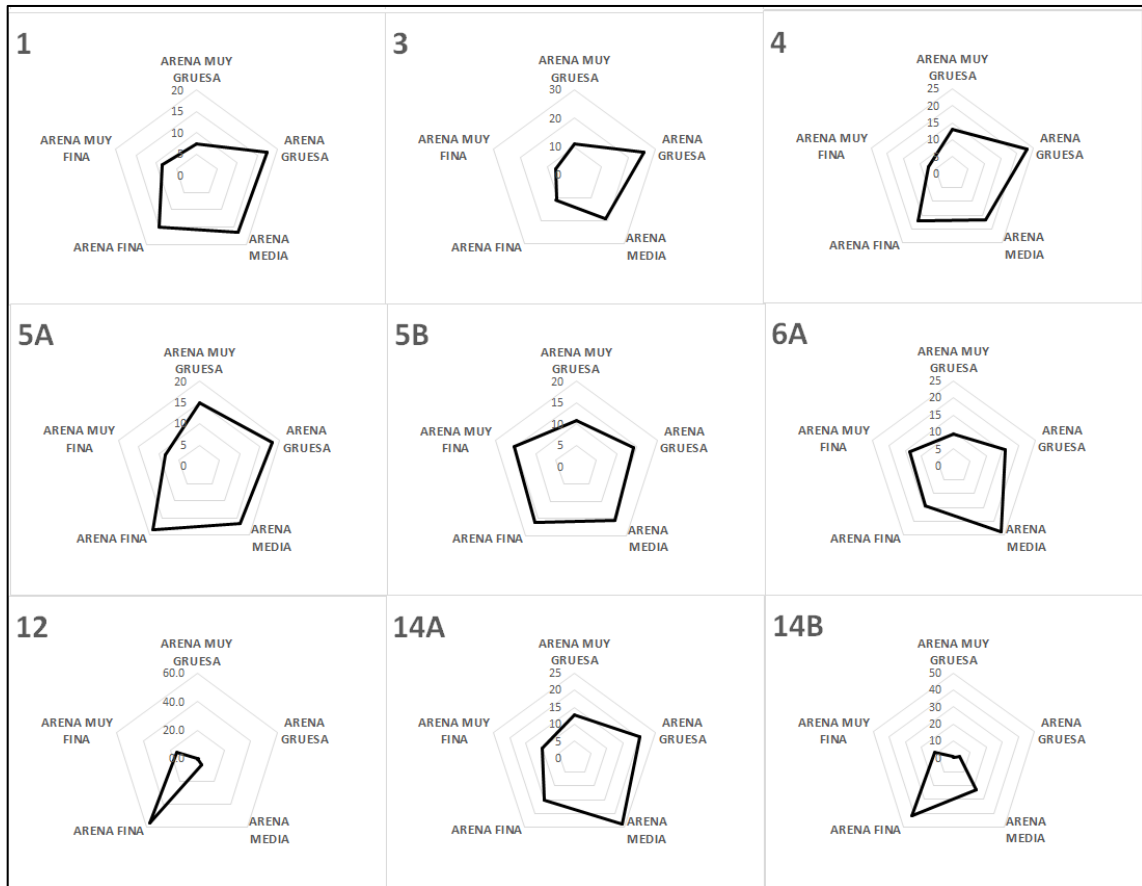


Figura 81. Gráficos radiales de la distribución porcentual para la clasificación de la fracción de arenas en las nueve muestras analizadas, las muestras 6A y 12 corresponden al acuífero superior b, las restantes muestras al acuífero inferior d.

C- Análisis granulométricos

Se realizaron análisis granulométricos realizados en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanname), para las 9 muestras anteriormente descritas en los ensayos de fraccionamiento de arenas.

A partir de los ensayos de pesos y tamizajes de las muestras para la fracción de arenas y el uso del hidrómetro para la fracción de limos y arcillas, se realizan las curvas granulométricas en donde se muestra la distribución porcentual del total de la muestra en función de los diámetros granulométricos que se retienen en cada tamiz.

La clasificación de las muestras (Figura 82) se realiza con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (*Unified Soil Classification System, USCS*)

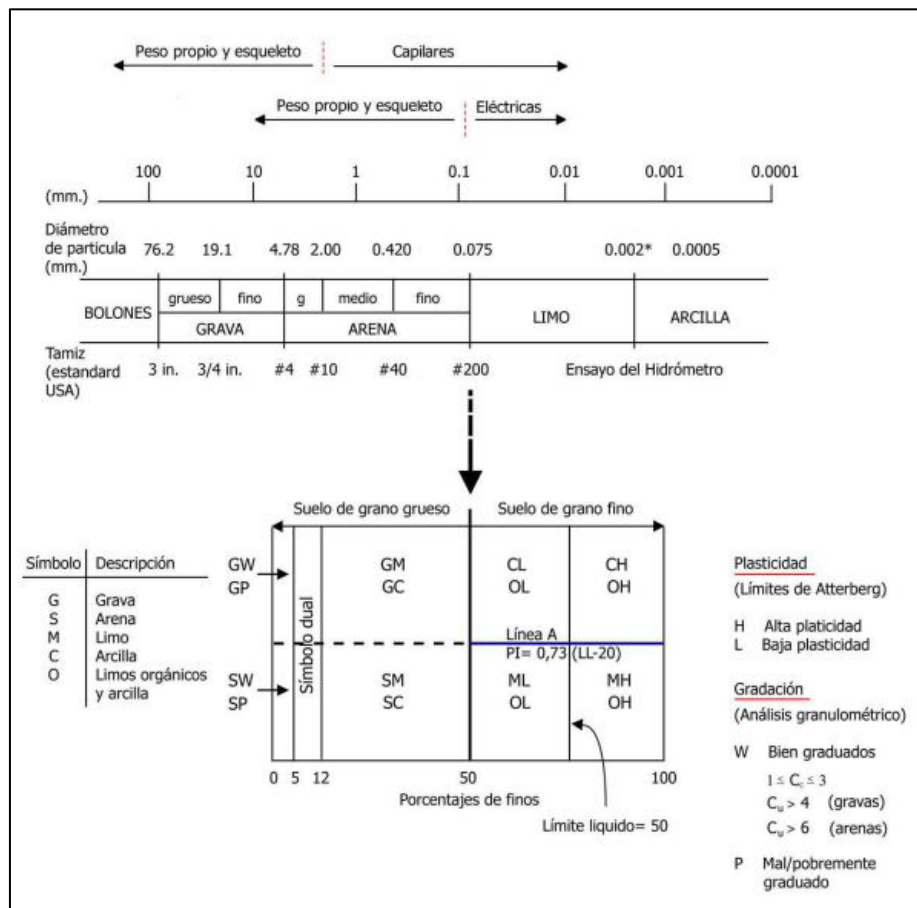


Figura 82. Clasificación USCS simplificada (Tomado de Santamaria & Narsilio, 2017)

A partir de las curvas granulométricas de las muestras (Figura 83), se determinan los valores del tamaño de los diámetros asociados a D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{50} y D_{60} , para la estimación de las relaciones del tamaño de grano con la conductividad hidráulica (K) y los coeficientes de uniformidad y de curvatura de los gráficos.

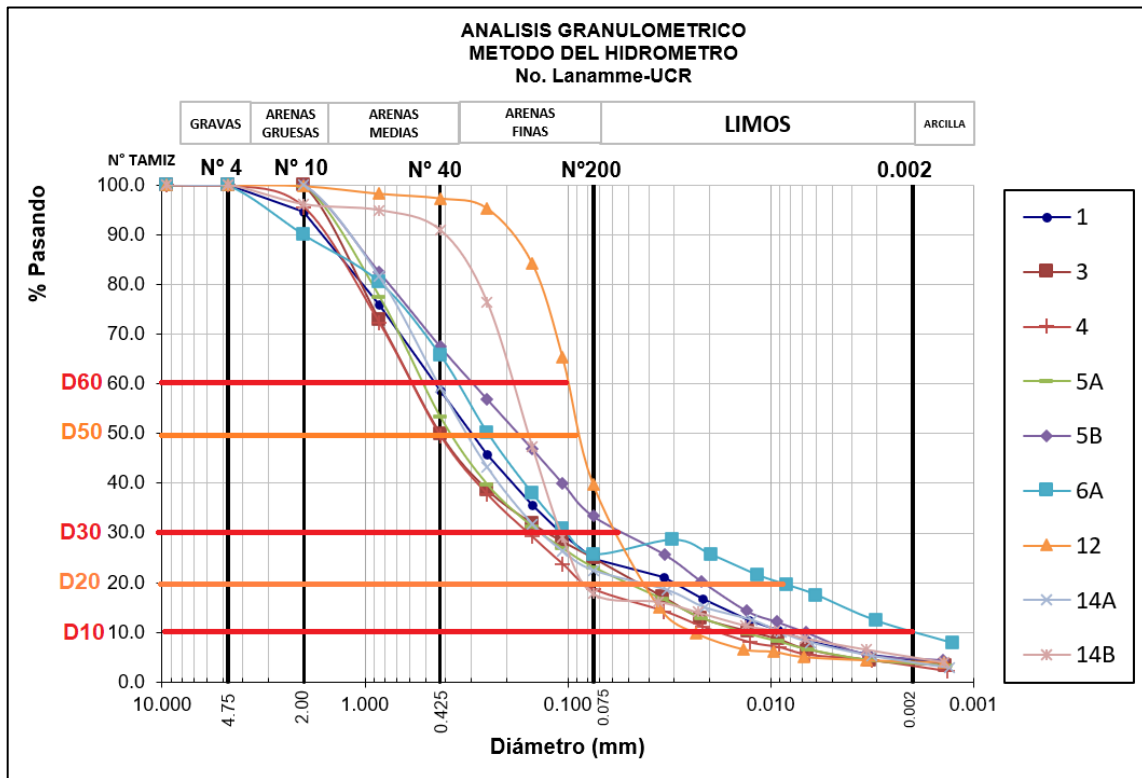


Figura 83. Curvas granulométricas de las nueve muestras ensayadas, la 6A y 12 corresponden al acuífero b, las restantes al acuífero inferior b.

Los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c) descritos por Hazen (1911: en Badillo & Rodríguez, 2014), se definen por la relación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Los valores de estas relaciones definen la uniformidad de los granos que conforman la muestra de acuerdo con los valores obtenidos de C_u y C_c (González de Vallejo, et al, 2002; Badillo & Rodríguez, 2014):

Relación	Tipo
$C_u < 5$	Suelo Uniforme
$5 \leq C_u \leq 20$	Poco uniforme
$C_u > 20$	Bien gradado
$C_u > 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$ en Gravas	Bien gradado
$C_u > 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$ en Arenas	

Para las muestras analizadas, se determina que el 50% es mayor al diámetro de la malla n°200 y más del 12% se queda retenido, siendo la fracción de limos > arcillas, se clasifica como depósitos areno-limoso (SM), en su mayoría bien gradados a excepción de la muestra 12.

En la tabla 29, se muestran los valores obtenidos para los tamaños del 10% al 60%, así como los coeficientes de uniformidad y curvatura de cada muestra.

Tabla 29. Coeficientes de uniformidad (C_u), coeficiente de curvatura (C_c) y valores del tamaño del grano asociados a la cantidad porcentual de muestra para el 10%, 20%, 30%, 50% y 60%

ID Muestra	Gravedad Especifica de Suelos ASTM D- 854		C_u	C_c	D_{10} (mm)	D_{20} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)
	G_T	G_s							
	1	2,497							
3	2,546	2,544	46,5	2,2	0,0123	0,045	0,124	0,424	0,574
4	2,596	2,594	32,6	2,35	0,0179	0,082	0,156	0,43	0,582
5A	2,559	2,557	38,34	2,65	0,0134	0,051	0,135	0,373	0,513
5B	2,42	2,419	43,86	1,41	0,0660	0,021	0,052	0,175	0,291
6A*	2,642	2,64	180,9	14,74	0,0019	0,009	0,099	0,247	0,348
12*	2,43	2,428	4,17	1,34	0,0236	0,041	0,055	0,086	0,098
14A	2,605	2,603	48,85	4,59	0,0089	0,044	0,133	0,313	0,435
14B	2,41	2,408	21,36	7,11	0,0088	0,080	0,107	0,157	0,187

*6A y la 12 pertenece al acuífero b.

A partir de los datos obtenido con la tabla 29, y las relaciones establecidas en las ecuaciones de la tabla 30, se obtienen los valores de conductividad hidráulica (K) para los sedimentos asociados al acuífero d, a pesar de que existen más de 20 relaciones empíricas para la estimación de K mediante el tamaño del grano en acuíferos inconsolidados (Kosenow, 2002), se utilizan las cuatro más representativas, las cuales se detallan en la tabla 30, para los análisis en cuestión.

Tabla 30. Ecuaciones que relacionan los tamaños de los granos con la conductividad hidráulica (K)

Autores	Relación K	Parámetros												
<p>① Hanzen, 1911 (En Fetter, 2017)</p>	$K=C*d_{10}^2$	<p>D_{10}=tamaño del grano efectivo que pasa el 10% C= coeficiente basado en el sorteo del tamaño del grano:</p>												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="808 443 1240 474">Descripción</th> <th data-bbox="1240 443 1370 474">C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="808 478 1240 548">Arenas muy finas pobremente sorteadas</td> <td data-bbox="1240 478 1370 548">40-80</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 552 1240 621">Arenas finas con presencia de finos</td> <td data-bbox="1240 552 1370 621">40-80</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 625 1240 657">Arenas medias bien sorteadas</td> <td data-bbox="1240 625 1370 657">80-120</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 661 1240 730">Arenas gruesas pobremente sorteadas</td> <td data-bbox="1240 661 1370 730">80-120</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 735 1240 804">Arenas gruesas, bien sorteada y limpias</td> <td data-bbox="1240 735 1370 804">120-150</td> </tr> </tbody> </table>	Descripción	C	Arenas muy finas pobremente sorteadas	40-80	Arenas finas con presencia de finos	40-80	Arenas medias bien sorteadas	80-120	Arenas gruesas pobremente sorteadas	80-120	Arenas gruesas, bien sorteada y limpias	120-150
Descripción	C													
Arenas muy finas pobremente sorteadas	40-80													
Arenas finas con presencia de finos	40-80													
Arenas medias bien sorteadas	80-120													
Arenas gruesas pobremente sorteadas	80-120													
Arenas gruesas, bien sorteada y limpias	120-150													
<p>② Shepherd, 1989 (En Fetter, 2017)</p>	$K= C_F*d_{50}^j$	<p>C_F= Factor de forma 100 a 40000 D_{50}= tamaño medio del grano al 50% J= exponente valores de 1.5 a 2.0</p>												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="808 989 1036 1020">Relación</th> <th data-bbox="1036 989 1370 1020">Madurez textural Sed.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="808 1024 1036 1056">$K= 100*d^{1.5}$</td> <td data-bbox="1036 1024 1370 1056">Sed. consolidados</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 1060 1036 1092">$K= 450*d^{1.65}$</td> <td data-bbox="1036 1060 1370 1092">Depósitos de canales</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 1096 1036 1127">$K=1600*d^{1.75}$</td> <td data-bbox="1036 1096 1370 1127">Depósitos de playa</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 1131 1036 1163">$K=5000*d^{1.85}$</td> <td data-bbox="1036 1131 1370 1163">Depósitos de dunas</td> </tr> <tr> <td data-bbox="808 1167 1036 1199">$K=40000*d^2$</td> <td data-bbox="1036 1167 1370 1199">Esferas de vidrio</td> </tr> </tbody> </table>	Relación	Madurez textural Sed.	$K= 100*d^{1.5}$	Sed. consolidados	$K= 450*d^{1.65}$	Depósitos de canales	$K=1600*d^{1.75}$	Depósitos de playa	$K=5000*d^{1.85}$	Depósitos de dunas	$K=40000*d^2$	Esferas de vidrio
Relación	Madurez textural Sed.													
$K= 100*d^{1.5}$	Sed. consolidados													
$K= 450*d^{1.65}$	Depósitos de canales													
$K=1600*d^{1.75}$	Depósitos de playa													
$K=5000*d^{1.85}$	Depósitos de dunas													
$K=40000*d^2$	Esferas de vidrio													
<p>③ US Bureau of Reclamation, USBR (En Kasenow, 2002)</p>	$K=311*d_{20}^{2.3}$	<p>D_{20}= tamaño del grano efectivo que pasa el 20%</p>												
<p>④ Kozeny-Carman (En Barahona et al. 2011)</p>	$K_{GS}=\frac{g}{v} C_f (m) d_{10}^2$	<p>g= gravedad (980 cm/s) v= viscosidad cinemática del fluido (Tabla apéndice pág. 132, Fetter,2017) $C_f= 8.3 \times 10^{-3}$ m= porosidad C_u= coeficiente de uniformidad D_{10}=tamaño del grano efectivo que pasa el 10%</p>												
		$f(m)= [m^3/(1-m)^2]$												
		$m= 0.255(1+0.83^{C_u})$												

Los resultados de las conductividades hidráulicas indican que los valores de K, determinados a partir del tamaño del grano se muestran más cercanos entre sí en la muestra 12, con diferencias de un orden de magnitud entre los valores mínimo y máximo obtenidos de $2,5 \times 10^{-4}$ y $2,82 \times 10^{-3}$ cm/s (Tabla 31). Esta muestra presenta una fracción de arenas unimodal asociada a arenas finas y clasificada también como arenas limosas uniformemente distribuidas, lo contrario ocurre en la muestra 6A, que presenta valores de K con las mayores diferencias cerca de cuatro órdenes de magnitud entre los valores de $2,89 \times 10^{-6}$ a $1,61 \times 10^{-2}$ cm/s. Esta muestra presenta un fraccionamiento de arenas polimodal y una relación $Cu \gg 6$, que indica que son arenas muy gradadas. Por lo que se determina que entre más uniforme sea la granulometría de las muestras, los valores de K son más precisos entre sí, y entre más gradada los valores tiende a distanciarse significativamente en varios ordenes de magnitud.

Tabla 31. Valores de K para las relaciones de tamaño de grano D10, D20 y D50, según los diferentes autores.

ID Muestra	① Hazen 1911		② Shepherd 1989		③ USBR	④ Kozeny- Carman	Media Geom. (MG)
	$K=C*D_{10}^2$ C=40 (cm/s)	$K=C*D_{10}^2$ C=80 (cm/s)	Sedimentos consolidados $K=100*D_{50}^{1.5}$ (cm/s)	Depósitos de canales $K=450*D_{50}^{1.65}$ (cm/s)	$K=311*D_{20}^{2.3}$ (cm/s)	$KGS=$ $g/v*Cf*(m)$ D_{10}^2 (cm/s)	
1	3,24E-05	6,48E-05	5,80E-03	2,18E-02	4,90E-04	7,79E-05	4,65E-04
3	6,76E-05	1,35E-04	9,26E-03	3,65E-02	1,24E-03	1,88E-04	9,47E-04
4	1,44E-04	2,89E-04	9,95E-03	3,94E-02	4,95E-03	5,63E-04	1,89E-03
5A	9,00E-05	1,80E-04	7,94E-03	3,08E-02	1,66E-03	3,34E-04	1,14E-03
5B	1,69E-05	3,38E-05	2,47E-03	8,53E-03	2,16E-04	4,70E-05	2,23E-04
6A*	1,44E-06	2,89E-06	4,41E-03	1,61E-02	3,07E-05	1,10E-06	4,65E-05
12*	2,50E-04	5,00E-04	9,05E-04	2,82E-03	1,00E-03	2,62E-03	9,72E-04
14A	3,24E-05	6,48E-05	6,39E-03	2,42E-02	1,18E-03	7,97E-05	5,59E-04
14B	2,56E-05	5,12E-05	2,36E-03	8,12E-03	4,68E-03	1,41E-04	5,05E-04
						MG _{total}	6,69E-04

*6A y 12 pertenecen al acuífero b por lo que no se usa en el cálculo de la media geométrica final (MG_{total}).

Particularmente, en las muestras 6A y 12 del acuífero b, la metodología de Kozeny-Carman, tiende a subestimar (6A) y sobreestimar (12) el valor de K, en referencia la

metodología de Hanzen , en ambas relaciones se utiliza el diámetro D_{10} como parámetro variable del cálculo, sin embargo, en Kozeny-Carman el valor de C_u , está influenciando significativamente el valor final de K , o sea una muestra muy uniforme o muy gradada como lo son los valores extremos de las muestras 6A y 12, afectan el resultado en esta relación haciéndola poco precisa (Figura 84).

En general, el resto de las muestras analizadas para el acuífero d (1, 3, 4, 5A, 5B, 14A y 14B) presentan de acuerdo con la figura 84, rangos escalonados y claramente divididos para los valores K según el valor de tamaño de grano utilizado, siendo las metodologías de Hanzen y Kozeny-Carman con D_{10} , las que muestran los valores con menor orden de magnitud de 10^{-5} a 10^{-4} , seguidas de la metodología USBR con D_{20} , las que muestran órdenes de magnitud intermedios de 10^{-4} a 10^{-3} , y finalmente la metodología de Sheperd con D_{50} , los valores de mayor ordenes de magnitud asociados de 10^{-3} a 10^{-2} .

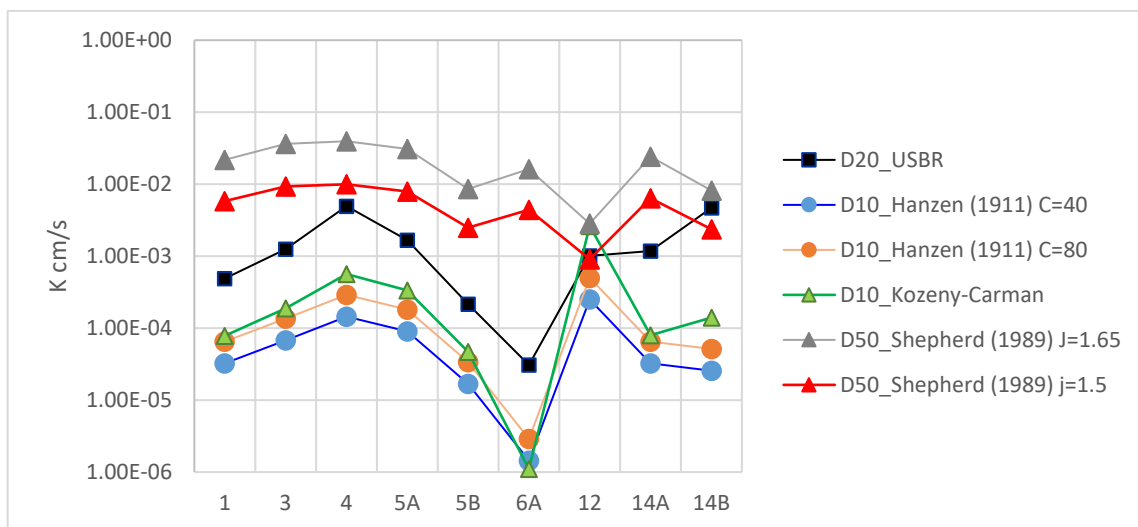


Figura 84. Gráfico de valores de K , con las cuatro ecuaciones asociadas al tamaño del grano D_{10} , D_{20} y D_{50} , para las muestras asociadas al acuífero en el sedimentario inferior (Acuífero d).

Esta segmentación tan marcada en los valores de K para las diferentes metodologías se debe a la condición tetramodal en el fraccionamiento de arenas y los altos valores de Cu, que igualmente indican que son muestras con gradaciones importantes, lo que incrementa las diferencias de tamaño del grano en los cortes porcentuales D_{10} , D_{20} y D_{50} . Las medias geométricas de cada variación granulométrica indican que los valores de K máximos registrado corresponden efectivamente a la metodología de Sheperd (1989) asociada a depósitos de canales con $K_{6A} = 1,61 \times 10^{-2}$ cm/s, y el valor mínimo se asocia a la metodología de Hanzen (1911) con el factor de forma ($C=40$) y un valor final de $K_{6A} = 1,44 \times 10^{-6}$ cm/s. Al utilizar la media geométrica estadística total de las estas medias geométricas de cada muestra, se obtiene el valor de $6,69 \times 10^{-4}$ cm/s, valor que se le asigna al acuífero sedimentario inferior (acuífero d), a partir de estos ensayos granulométricos.

En relación con la muestra 6A y 12, pertenecientes al acuífero b se estima un valor de K obtenido de la mediana de los valores de $K_{6A} = 4,65 \times 10^{-5}$ y $K_{12} = 9,72 \times 10^{-4}$ cm/s, por lo que el valor de K para el acuífero es de $5,09 \times 10^{-4}$ cm/s.

D- Ensayos con el Permeámetro de carga constante

Los ensayos de carga constante se realizaron en el laboratorio de Hidrogeología de la Escuela Centroamericana de Geología, utilizando un permeámetro modelo HM-891 de la casa instrumental Gilson Compay, Inc.

Las muestras se incorporan y compactan dentro del tubo cilíndrico, el cual tiene dos piedras porosas cilíndricas que contienen la muestra en ambos extremos, la piedra superior se sujeta a un resorte que la presiona hacia la muestra, el flujo de agua baja por gravedad en una carga hidráulica (dh) y atraviesa la longitud de la muestra (dL) hasta

saturarla, las lecturas del volumen (V) se toman entre 5 a 8 minutos después de que se establezca un flujo constante a través de la muestra.

La variable fija durante en el ensayo corresponde con el área transversal ($A=\pi*r^2$) del permeámetro, las variables aleatorias para determinar los valores de K están dadas por (Fetter, 2014):

$$Q = -KiA \quad \text{Donde} \quad Q = \frac{V}{dt} \quad i = \frac{dh}{dL}$$

$$\text{Sutituyendo} \quad \frac{V}{dt} = -K \frac{dh}{dL} A \quad \text{Despejando} \quad K = \frac{dL}{dh} \frac{V}{A dt}$$

Donde:

dh= altura de la carga de agua a la salida de la base del permeámetro

dL= altura de la muestra en el permeámetro

V/t= el volumen de agua obtenido en el tiempo transcurrido

Se realizaron tres ensayos por muestra, escogiendo como valor final el valor de la mediana, y se midieron las temperaturas del fluido antes de la prueba y después de la prueba (T1, T2) las cuales variaron entre 0,5 a 1 °C como máximo, a partir de las cuales se estima la densidad el agua (ρ) y la viscosidad cinemática(μ), para obtener la viscosidad del fluido, y hacer un estimado de la permeabilidad intrínseca (k_i) según la relación (Fetter, 2014):

$$K = k_i \left(\frac{\rho g}{\mu} \right)$$

Donde:

k_i = permeabilidad intrínseca

G= gravedad en 980,6 cm/s

μ = viscosidad cinemática (Tabla apéndice pág. 132, Fetter,2017)

ρ = densidad el agua (Tabla apéndice pág. 132, Fetter,2017)

En la tabla 32, se muestran los resultados de los valores de K, para las diez muestras analizadas, se incluyó la muestra 2B asociada a materiales franco arcilloso como parámetro de referencia de las conductividades hidráulicas asociada a las litologías de tobetas lodosas correlacionadas a acuitados.

Tabla 32. Resultados de los valores de K, para las pruebas de carga constante.

ID Muestra	Clasificación Textural	K (cm/s)	Permeabilidad intrínseca T1 (cm/s)	Permeabilidad intrínseca T2 (cm/s)
1	FRANCO ARENOSO	1,89E-03	1,8748E-08	1,8748E-08
3	FRANCO ARENOSO	6,08E-05	5,9824E-10	5,9824E-10
4	FRANCO ARENOSO	3,64E-04	3,5309E-09	3,5309E-09
2B	FRANCO ARCILLOSO	3,33E-06*	NR	NR
5A	FRANCO ARENOSO	3,61E-04	3,6152E-09	3,5309E-09
5B	FRANCO ARENOSO	3,34E-05	3,3294E-10	3,2511E-10
6A**	FRANCO ARENOSO	1,11E-03	1,1078E-08	1,1212E-08
12**	FRANCO ARENOSO	1,15E-03	1,1353E-08	1,1219E-08
14A	FRANCO ARENOSO	1,41E-04	1,3968E-09	1,3803E-09
14B	ARENA FRANCA	1,73E-03	1,7383E-08	1,718E-08
<i>Media geométrica</i>		1,59E-04		

*No se incluye el valor de K de la muestra 2B, para el cálculo de la media geométrica, por ser una muestra no representativa de la granulometría permeable asociada al acuífero d.

**No se incluye la muestra 6A y 12, al cálculo de la media final, por pertenecer al acuífero b.

A partir de los resultados de los valores de K, se determina que el orden de magnitud para las muestras es de 10^{-5} a 10^{-3} , consistentes con los valores de conductividad reportados en Fetter (2014) para las arenas finas a limosa. Un 45% de las muestras (1, 6A, 12 y 14B) presentan conductividades del orden de 10^{-3} , el 35% (4, 5A, 14A) presenta un orden de magnitud de 10^{-4} y un 20% (3, 5B) el orden de magnitud de 10^{-5} .

Para el acuífero b, se determina un valor promedio entre las muestras 6A y 12, de $K=1,13 \times 10^{-3}$ cm/s. La media geométrica de los valores de K para el acuífero inferior d, obtenidos para este ensayo es de $1,59 \times 10^{-4}$ cm/s, para estos datos tanto el promedio como la mediana presentan ordenes de magnitud de 10^{-4} , por lo que el valor de la media se establece como valor de K asociado a esta unidad.

E- Ensayos *Slug Test*

Se realizaron 30 ensayos de *slug test* en total, y entre 1 a 3 ensayos por cada uno de los 16 piezómetros del área de estudio, para el cálculo de K se utiliza la relación de Hvorslev (Fetter, 2014) que se aplica siempre y cuando la relación entre la longitud del piezómetro y el radio de perforación sea $L/r > 8$, esta metodología se aplica según Fetter (2014) para acuíferos libre, sin embargo, la formulación original esta igualmente establecida para acuíferos confinados (Sánchez, 2017). Hvorslev utiliza parámetros de la geometría del armado del pozo, como lo son la longitud de la zona filtrante usualmente es la rejilla o rejilla+grava (L), el radio externo perforado (R), el radio del piezómetro (r) y es el tiempo definido del abatimiento del pozo al 63% de caída de carga ($t_{0,37}$) en la relación h/h_0 , según la ecuación (Fetter, 2014):

$$K = \frac{r^2 \ln \left(\frac{L}{R} \right)}{2Lt_{0,37}}$$

Los piezómetros del área de estudio presentan diámetros de $\frac{1}{2}$ " , $\frac{3}{4}$ " y 1", el diámetro de perforación es NQ (7,57 cm), y las longitudes de los piezómetros varían desde 21 m hasta los 60 m de profundidad.

En la tabla 33, se muestran los valores de K, para los piezómetros cuyas rejillas se encuentran en las lavas fracturadas (Acuífero c), en los sedimentos profundos (Acuífero d) y en las rejillas mixtas.

Los valores de las medianas asignados a cada acuífero se determinan mediante la mediana de los grupos de datos, para el acuífero c el valor de K asignado es $1,79 \times 10^{-5}$ cm/s y los valores para el acuífero d inferior son de $3,58 \times 10^{-5}$ cm/s, ambos valores presentan igual orden de magnitud, sin embargo, de acuerdo a la literatura los rangos de K en ambos acuíferos son consistentes con los reportados, tanto en roca ígnea fracturada como en acuíferos sedimentarios inconsolidados (Fetter, 2014; Smith & Weathcraft, 1993, Freeze & Cherry, 1979).

Los valores de K, en el acuífero fracturado son ligeramente inferiores a los obtenidos en el sedimentario inferior, y a pesar de que se encuentra entre los rangos de rocas ígneas fracturadas (Smith & Weathcraft, 1993). Es evidente que son valores con ordenes magnitud bajos comparativamente con los acuíferos fracturados (Sanders, 1998), por lo que es posible que estos valores obtenidos en los ensayos *slug test*, estén siendo afectados por el parámetro asociado a la longitud de la zona filtrante (L), ya que en la mayoría de los piezómetros la rejilla comprende la totalidad de la litología asociada a las lavas, y no al espesor efectivo del acuífero. A partir del modelo hidrogeológico se determina que este acuífero ígneo presenta espesores muy escasos 3 a 9 m como máximo, y que el empaque de grava en los pozos de un solo piezómetro, comprenden la totalidad de la perforación. Según la teoría (Fetter, 2014; Weigh, 2008), la longitud del empaque de grava debe considerarse como parte de la zona filtrante (L), este parámetro en la relación de Hvorlev corresponde a una variable en el denominador de la relación, por lo que tiende a influenciar en al menos un orden de magnitud los valores finales obtenido para K.

En relación con la rejilla mixtas (Tabla 33), en donde los ensayo debería reflejar resultados mayormente influenciados por el acuífero más predominante y permeable a lo largo de la rejilla, se muestra que los valores para el acuífero b, son de $1,04 \times 10^{-6}$ cm/s, en el acuífero c los valores son de $1,57 \times 10^{-5}$ a $1,93 \times 10^{-6}$ cm/s, y para el acuífero d los

valores asociados son de $1,60 \times 10^{-5}$ a $4,47 \times 10^{-6}$ cm/s, por lo que se no muestra una diferencia importante en la variación que indique una predominancia de rangos hacia uno u otro acuífero, al igual que los ensayos específicos de cada acuífero.

En la figura 85, se muestra la distribución de las conductividades hidráulicas de los dos acuíferos c y d, en los ensayos *Slug test*. En el acuífero c, los valores de K tiende a incrementar hacia la perforación 2, mientras que en el acuífero d, los mayores valores se localizan de forma lateral hacia las perforaciones 1 y 3.

Tabla 33. Valores de K de Hvorslev para los acuíferos c y d, rejilla mixta.

Acuífero en lavas fracturadas (Acuífero c)			Acuífero en sedimentario inferior (Acuífero d)				Rejilla mixta			
N° Piezómetro	K (cm/s)	Media Geométrica	N° Piezómetro	K (cm/s)	Medición K <i>Diver</i>	Media Geométrica	N° Piezómetro	K (cm/s)	Medición K <i>Diver</i>	Media Geométrica
2.2	4,73E-05	8,12E-05	1.1	1,66E-05	1.53E-04	6,28E-05	1.2 ③	2,28E-07*		
	3,39E-04			1,98E-05				3,42E-07*		
3.2	3,35E-05	2,54E-06	2.1	4,29E-04		4,08E-05	4.2 ③	4,47E-06		4,47E-06
	2,71E-06			4,61E-05				5.3 ②		1,57E-05
7	2,39E-06		3.1	6,86E-05	3.39E-05	8,75E-05	6.3 ①	1,56E-06		1,04E-06
8	3,32E-05	3,32E-05		2,15E-05				4.71E-05		
	1,04E-06	1,04E-06	4.1	3,40E-05		1,54E-05	12 ②	1,21E-06	2,09E-06	1,93E-06
	Mediana 1.79E-05			2,47E-05				5.1		
				1,48E-06		2,35E-05	14 ③	3,65E-05	2,56E-05	1,60E-05
				2,88E-05		3,08E-05		9,52E-06		
			6.1	3,79E-05						
				2,68E-05						
					Mediana 3.58E-05					

- ① Predominancia Acuífero b: Sedimentario superior
 ② Predominancia Acuífero c: Lavas fracturadas
 ③ Predominancia Acuífero d: Sedimentario inferior

*Los valores con órdenes de magnitud de 10^{-7} , no se toman en consideración para el cálculo final de las medias geométricas, ya que se consideran valores K no representativos del acuífero.

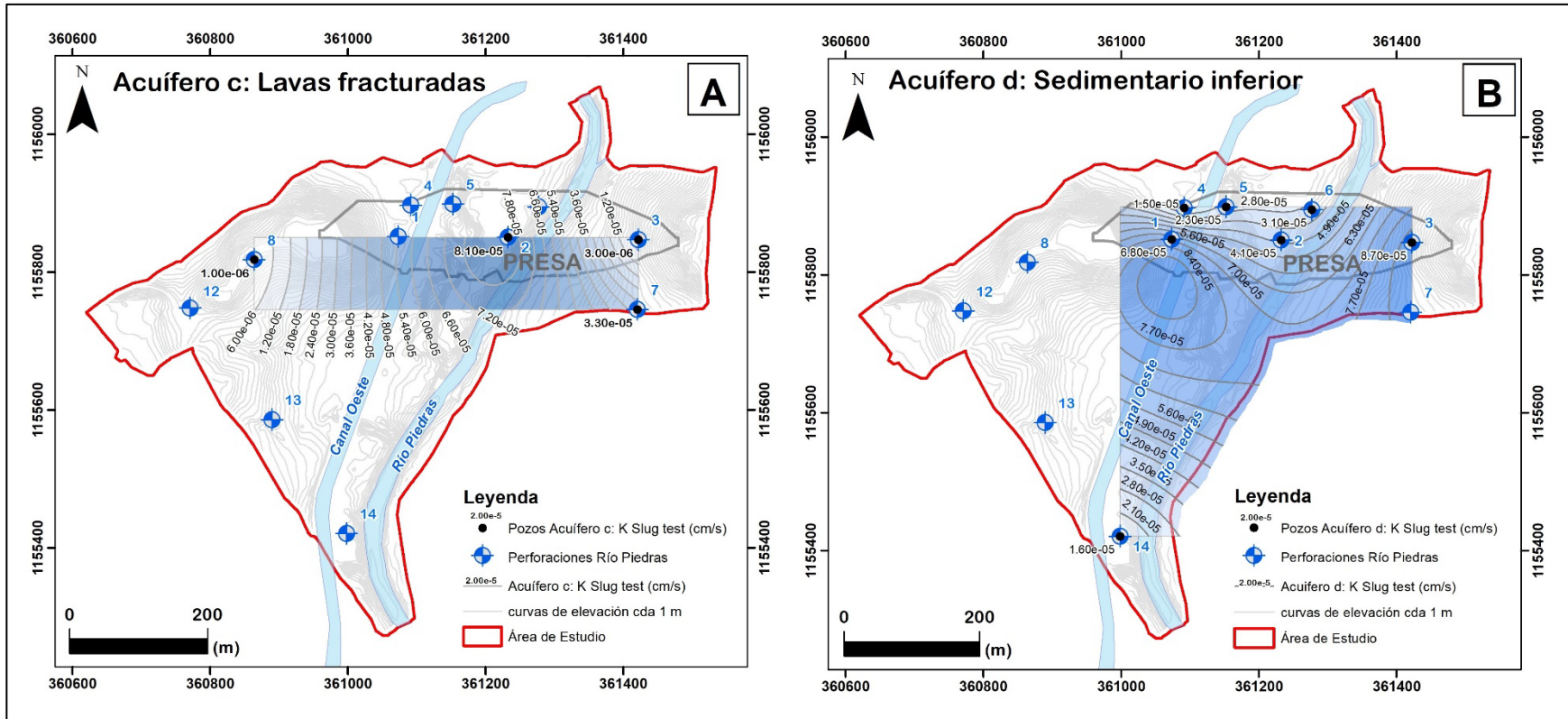


Figura 85. Distribución de las conductividades hidráulicas obtenidas con los ensayos de *Slug test* para A) el acuífero c fracturado y B) el acuífero d sedimentario inferior.

F- Ensayos de *Lugeon*

El ICE (2018), realizó varios ensayos de *Lugeon* a lo largo de las perforaciones del área de estudio, los datos obtenidos con los ensayos permiten realizar una estimación de la permeabilidad de las litologías en un rango de unidades de *Lugeon* (UL) y por lo tanto asociarlo a valores de conductividad hidráulica (K) de los acuíferos, en la tabla 34 se muestran los valores de las unidades de *Lugeon* y los valores de K asociados según Quiñones-Rozo (2010).

Tabla 34. Condiciones del macizo rocoso asociada a los diferentes valores de *Lugeon* (Quiñones-Rozo, 2010)

Rango de la Unidades de <i>Lugeon</i> (UL)	Clasificación permeabilidad	Rangos de la conductividad hidráulica K (cm/s)	Condición de las discontinuidades del macizo rocoso	Precisión del reporte UL
< 1	Muy baja	$<1 \times 10^{-5}$	Muy apretadas	<1
1-5	Baja	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Apretadas	± 0
5-15	Moderada	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	Pocas parcialmente abiertas	± 1
15-50	Media	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Algunas abiertas	± 5
50-100	Alta	$6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Muchas abiertas	± 10
>100	Muy alta	$>1 \times 10^{-3}$	Abiertas muy juntas o vacíos	> 100

Los ensayos se realizan en tramo de 3 m de longitud, con intervalos de 10 min por cada una de las cinco etapas del ensayo, en total se incrementa y decrece la presión del agua hacia las paredes de la perforación en rangos de magnitudes de 0,5, 0,75 y P máx. y viceversa.

Houlsby (1976) propone que las conductividades hidráulicas deben seleccionarse basándose en el comportamiento de los diferentes valores de *Lugeon* para cada rango de presión utilizados en las cinco etapas del ensayo, de ahí se determinan los diferentes regímenes de flujo: dilación, laminar, lavado, obturación o cierre y turbulento, a partir del cual se debe establecer el valor de *Lugeon* final.

El acuífero c, presenta valores de K entre dos órdenes de magnitud que varía de 10^{-5} a 10^{-4} y los valores de las unidades de *Lugeon* (UL) muy variables considerados desde baja, moderada y alta permeabilidad. Los valores de las presiones efectivas para estos ensayos se mantuvieron en menos de 5 kg/cm^2 y el régimen de flujo predominante es el lavado (Tabla 35).

Tabla 35. Valores de *Lugeon* asociados al acuífero sedimentario superior

Acuífero en sedimentario superior (Acuífero b)					
Perforación	Prof. Tramo ensayado (m)	K (cm/s)	UL	Presión efectiva kg/cm^2	Régimen de Flujo
3	18-20	1,25E-05	1,2	2,22	LV
6	6,5-11	2,24E-05	1,8	1,45	LV
8	25-30	1,91E-04	14,8	4,92	LM
12	15-20	7,70E-04	<59,5	3,0	OB
Media geométrica		8,01E-05			

LV=Lavado, LM= Laminación OB=Obturación

Este acuífero superior b, debido a la variabilidad de los valores de las UL y al régimen de flujo, indica que presenta diferentes condiciones de permeabilidad, asociadas predominantemente a capas poco cementadas, las cuales con bajas presiones presentan lavado de granos y finos.

En la tabla 36, se muestran los resultados de los valores de *Lugeon* y las conductividades hidráulicas (K) asociadas a cada régimen de flujo para los acuíferos c y d, la presión máxima alcanzada es de $8,26 \text{ kg/cm}^2$ en un régimen turbulento para el acuífero sedimentario y la mínima es de $1,4 \text{ kg/cm}^2$ para un régimen de lavado en el acuífero en lavas fracturadas.

En el acuífero c en lavas fracturadas predominan los regímenes de lavado, dilatación y laminar, siendo el lavado de fracturas el más representativo, con las presiones efectivas

moderadamente bajas y estables entre los 3,2 a 4,5 kg/cm², y un valor de la media geométrica de la conductividad hidráulica (K) de 8,85x10⁻⁵ cm/s (Figura 86). El régimen laminar, que podría considerarse como el más representativo de las condiciones hidráulicas naturales del flujo subterráneo, presenta presiones efectivas extremas que fluctúan desde 2,6 a 5,8 kg/cm² y una media de K de 1,27 x10⁻⁴ (Figura 86). Los rangos de valores de *Lugeon* (UL) predominantes para este acuífero, muestran que la mayoría de las discontinuidades o fracturas se caracterizan por ser apretadas y pocas parcialmente abiertas, lo que indica una permeabilidad baja a moderada, esto es consecuente con los resultados de la media total de K de 8,75x10⁻⁵ y la media geométrica de K asociadas al régimen de lavado, pero no así al régimen laminar.

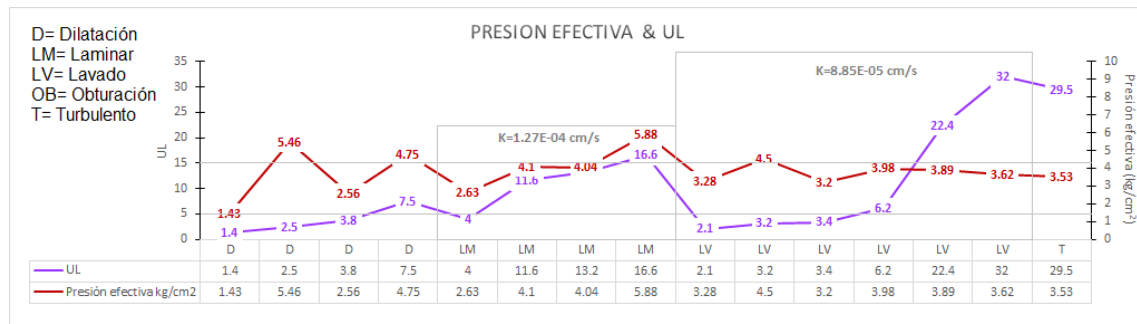


Figura 86. Gráfico de valores de unidades de *Lugeon* (UL) y presiones efectivas asociadas a lavas fracturadas (Acuífero c).

En el acuífero d sedimentario inferior predominan los regímenes de flujo opuestos: laminar y turbulento. En el caso del flujo laminar presenta presiones efectivas extremas que varían desde 1,5 a 7,8 kg/cm², y una mediana de K de 8,92x10⁻⁵ cm/s (Figura 87), el flujo turbulento presenta igualmente altos valores de presión efectiva que varían desde 2,71 a 8,26 kg/cm², y una media de K de 4,64x10⁻⁴ cm/s (Figura 87). De acuerdo con los rangos predominantes de las UL para este acuífero, presenta discontinuidades o espacios permeables entre apretados y moderadamente abiertos, asociado a una permeabilidad baja a media, estas características de baja permeabilidad se asocian a capas o facies litológicas limosas y arcillosas así como estratos más cementados que reducen la

porosidad, mientras que la permeabilidad media se asocia a las capas poco consolidadas de arenas gruesas a medias que igualmente presenta un porcentaje de limos que le confieren una porosidad media.

En general la presiones para los ensayos realizados en este acuífero son muy variables y más altas que en el acuífero superior c, en el caso de los valores de UL, las fluctuaciones mayores se dan el régimen turbulento y los valores más estables se dan en el régimen de dilatación, laminar y lavado, el valor de la media total asociada a este acuífero es de $2,01 \times 10^{-4}$ cm/s.

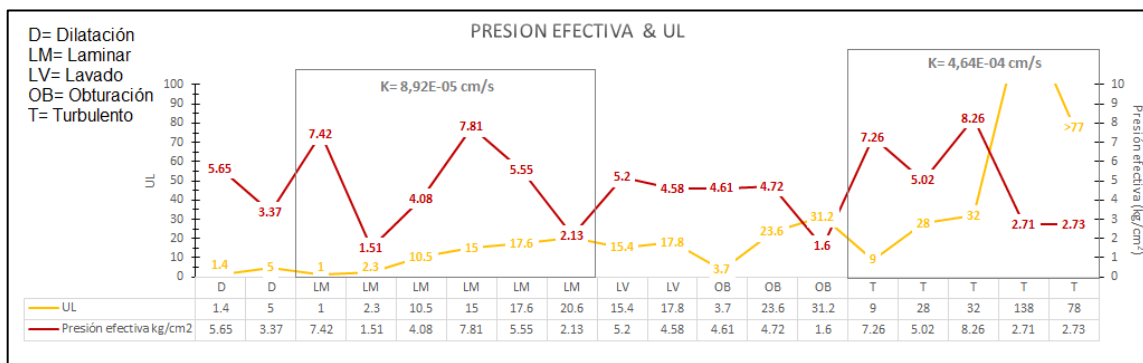


Figura 87. Gráfico de valores de unidades de *Lugeon* (UL) y presiones efectivas asociadas a el acuífero sedimentario inferior (Acuífero d).

Si se utilizan los valores de los regímenes laminares como valores finales de K para caracterizar ambos acuíferos, tendrían valores que no se ajustan a los criterios de permeabilidad y condición de las discontinuidades asociados a los rangos predominantes de *Lugeon*, ya que se muestra una diferencia opuesta entre los órdenes de magnitud de K total en comparación con los valores de K del flujo laminar (Tabla 36).

En la figura 88, se muestra la distribución de los valores de K para los acuíferos c y d. En el acuífero c, los mayores valores de K tienden a proyectarse hacia las perforaciones 13, 6 y 7, mientras que en el acuífero d, se muestran hacia la perforación 6.

Tabla 36. Valores de K de *Lugeon* para los acuíferos c y d.

Acuífero en lavas fracturadas (Acuífero c)					Acuífero en sedimentario inferior (Acuífero d)				
Piezómetro	K (cm/s)	UL	Presión efectiva kg/cm ²	Régimen de Flujo	Piezómetro	K (cm/s)	UL	Presión efectiva kg/cm ²	Régimen de Flujo
3.2	3,33E-05	2,5	5,46	D	3.1	1,73E-05	1,4	5,65	D
2.2	4,90E-05	3,8	2,56	D	5.1	6,16E-04	5	3,37	D
12	9,75E-05	7,5	4,75	D	1.1	1,94E-04	15	7,81	LM
14	1,75E-05	1,4	1,43	D	7	1,06E-05	1	7,42	LM
8	2,00E-04	16,6	5,88	LM	2.1	1,41E-04	10,5	4,08	LM
6.2	1,69E-04	13,2	4,04	LM	5.3	2,57E-04	20,6	2,13	LM
5.3	5,18E-05	4	2,63	LM	6.3	3,02E-05	2,3	1,51	LM
7	1,50E-04	11,6	4,1	LM	3.1	2,24E-04	17,6	5,55	LM
2.2	4,37E-05	3,4	3,2	LV	1.1	1,99E-04	15,4	5,2	LV
3.2	8,07E-05	6,2	3,98	LV	2.1	2,30E-03	17,8	4,58	LV
4.2	2,77E-05	2,1	3,28	LV	5.1	1,16E-04	9	7,26	T
6.2	4,14E-04	32	3,62	LV	5.1	4,14E-04	32	8,26	T
7	2,90E-04	22,4	3,89	LV	6.1	9,25E-04	>77,1	2,73	T
12	4,10E-05	3,2	4,5	LV	6.1	1,44E-03	>137	2,71	T
13	3,82E-04	29,5	3,53	T	13	3,6E-04	28	5,02	T
Media geo LM	1,27E-04				4.1	2,8E-04	23,6	4,72	OB
Media geo total	8,75E-05				14	4,03E-04	31,2	1,6	OB
					2.1	4,56E-05	3,7	4,61	OB
D= Dilatación	LV= Lavado	T= Turbulento			Media geo LM	9,92E-05			
LM= Laminar	OB= Obturación				Media geo total	2,01E-04			

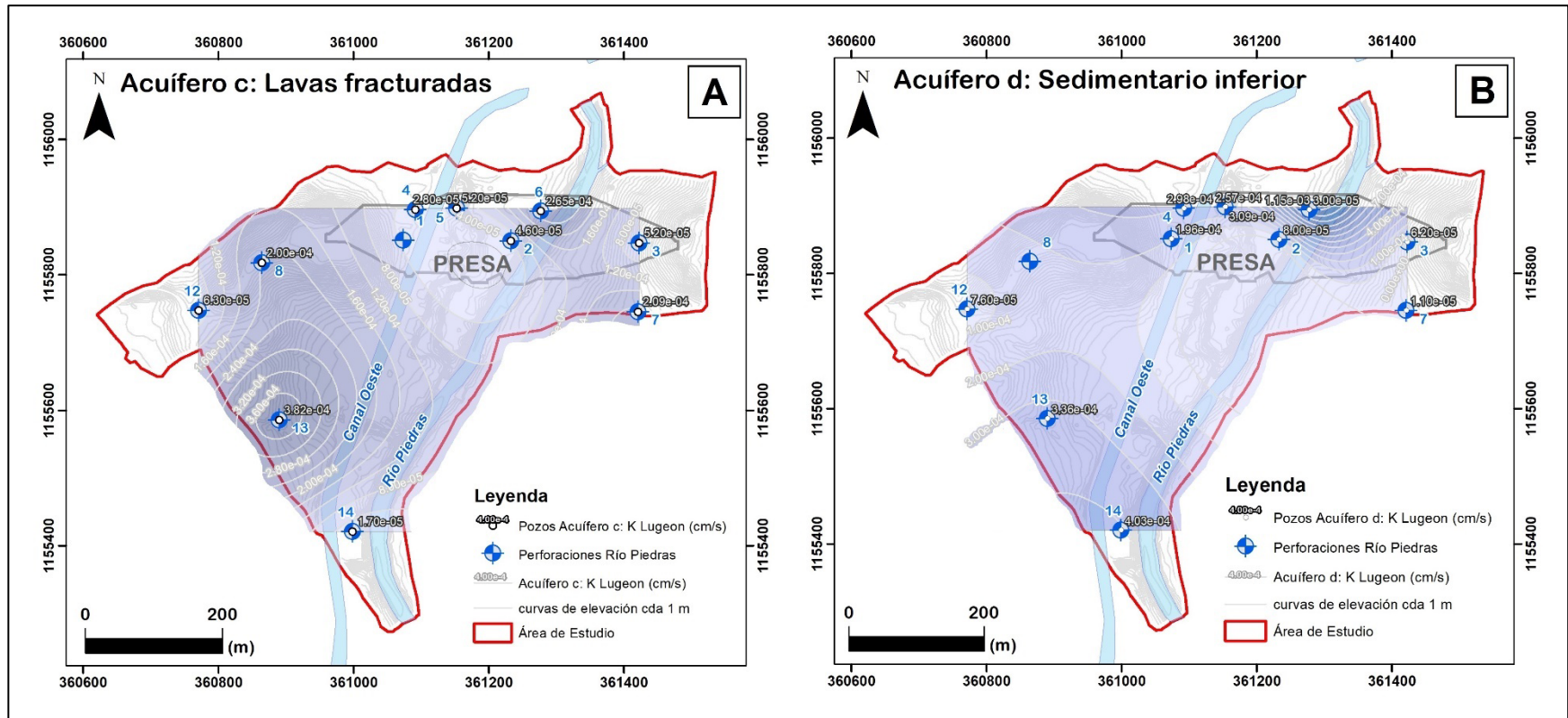


Figura 88. Distribución de las conductividades hidráulicas obtenidas con los ensayos de *Lugeon* para A) el acuífero c fracturado y B) el acuífero d sedimentario inferior.

9.2.7.2 Valores finales de la conductividad hidráulica (K)

A partir de los ensayos realizados se determinan valores finales de K, asociados a las medias geométricas de los ensayos y a las medianas finales de dichos valores, en la tabla 37, se muestran el resumen de los valores de K para los acuíferos b, c y d.

Tabla 37. Resumen de los valores de K por cada ensayo realizado y para cada acuífero en estudio.

Ensayos utilizados para el cálculo de K	Acuífero sedimentario superior (Acuífero b)	Acuífero lavas fracturadas (Acuífero c)	Acuífero sedimentario inferior (Acuífero d)
K Slug test (cm/s)	-	$1,79 \times 10^{-5}$	$3,58 \times 10^{-5}$
K <i>Lugeon</i> (cm/s)	$8,01 \times 10^{-5}$	$8,75 \times 10^{-5}$	$1,93 \times 10^{-4}$
K Carga Constante (cm/s)	$1,13 \times 10^{-3}$		$1,98 \times 10^{-4}$
K Ensayos Granulométricos (cm/s)	$5,09 \times 10^{-4}$		$6,69 \times 10^{-4}$
<i>Media geométrica</i>	$3,59 \times 10^{-4}$	$3,95 \times 10^{-5}$	$1,74 \times 10^{-4}$
<i>Mediana</i>	$5,09 \times 10^{-4}$	$5,27 \times 10^{-5}$	$1,95 \times 10^{-4}$
<i>Promedio</i>	$5,73 \times 10^{-4}$	$5,27 \times 10^{-5}$	$2,74 \times 10^{-4}$

Los valores de K asociados al acuífero c, son menores que los asociados a los acuíferos sedimentarios superior e inferior, esto indica que, aunque se trate de un acuífero fracturado, es probable que la porosidad efectiva asociada a las fracturas este siendo afectada por el cierre y el relleno de estas, tal y como lo demuestran el comportamiento de los valores de *Lugeon* y la descripción litológica de los núcleos.

Los acuíferos b y d, muestran un orden de magnitud predominante de 10^{-4} , ambos acuíferos sedimentarios presentan una porosidad asociada al tamaño granulométrico de la fracción de arenas y una consolidación de facies arenosas dentro del mismo, por lo que los valores de $K_b=3,59 \times 10^{-4}$ a $K_d=1,74 \times 10^{-4}$ cm/s, son valores de K razonables para este tipo de unidad hidrogeológica sedimentaria.

Para efectos de facilitar el cálculo de la transmisividad, se utilizan los valores de K asociados a la mediana del acuífero c de $5,27 \times 10^{-5}$ cm/s, y la media geométrica para el acuífero b de $3,59 \times 10^{-4}$ cm/s y de $1,74 \times 10^{-4}$ cm/s para el acuífero d.

9.2.7.3 Porosidad efectiva (n_e)

La porosidad efectiva también denominada por algunos autores como *specific yield* (Kresic, 2006; Sánchez, 2017), se utiliza como parámetros equivalentes para acuíferos granulares inconsolidados, aunque por definición no son lo mismo (Weight, 2008).

Johnson (1967: En Fetter, 2014) relaciona el análisis textural con la porosidad efectiva (Figura 89), a partir de la cual se relacionan los resultados texturales de las 14 muestras analizadas del acuífero sedimentario inferior.

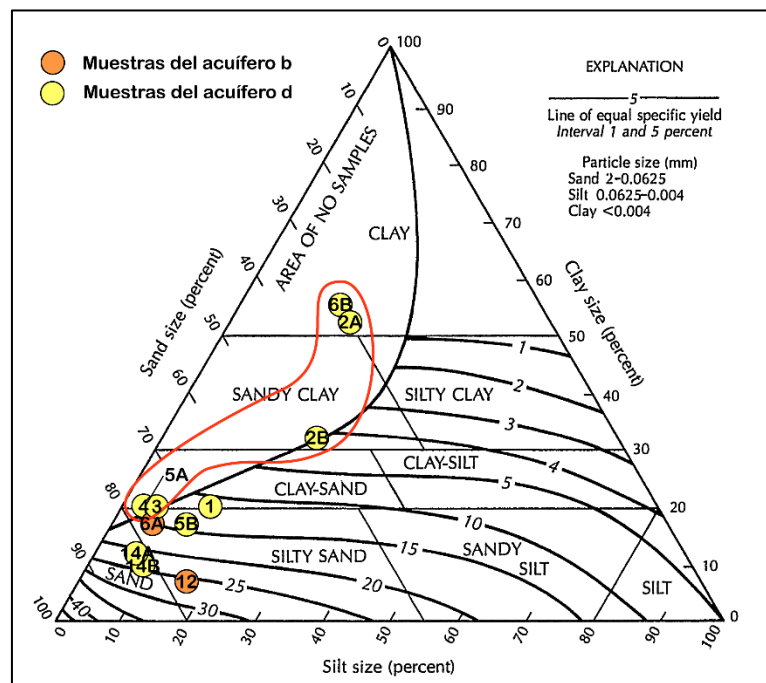


Figura 89. Triángulo que relaciona la clasificación textural de sedimentos inconsolidados y la porosidad efectiva (n_e) (Tomado y modificado de Fetter, 2014)

Las muestras 6B, 2A, 2B, 3, 4, y 5A, se ubican cerca o fuera de los límites aplicables de la relación, los cuales no presentan una porosidad efectiva asociada, mientras que las muestras 1, 5B y 6A, presenta valores de porosidad efectiva asociada de 12 a 15% (Tabla 38), ya que presenta una fracción de arcillas y limos del 23%, para las muestras 12, 14A y 14B, la porosidad efectiva incrementa de 21 a 26% y la fracción de finos para estas muestras se localiza entre los 18 a 23%, siendo predominantes las arenas y los limos más que las arcillas (Tabla 38).

Tabla 38. Valores de la porosidad efectiva determinada a partir de los ensayos texturales de las muestras franco-arenosas perteneciente al acuífero b y d, con el diagrama ternario de Johnson (1967)

ID_Muestra	Porosidad efectiva n_e (%)	%		
		Arenas	Limos	Arcillas
1	12	67	13	20
5B	14	72	11	17
6A	15	77	6	17
12	26	77	16	7
14A	21	82	6	12
14B	22	82	8	10

Siendo las muestras 6A y 12, asociadas al acuífero superior “b”, el cual se considera con un grado de confinamiento hidráulico libre, se puede estimar el almacenamiento (S) como el valor obtenido de la porosidad efectiva (González de Vallejo, 2002), por lo que el valor de S, para este acuífero es de $1,5 \times 10^{-1}$ a $2,6 \times 10^{-1}$.

9.2.7.4 Transmisividad (T)

La transmisividad se define como la relación directa entre la conductividad hidráulica (K) y el espesor (b) estimado del acuífero, según Fetter (2014):

$$T = K * b$$

Para los acuíferos en estudio, se establecen los valores de transmisividad de 0,6 a 1,7 m²/d para el acuífero b, de 0,1 a 0,4 m²/d para el acuífero c, y de 1,52 a 12,17 m²/d, para el acuífero d (Tabla 39)

Tabla 39. Valores de transmisividad (T) asociada a los acuíferos c y d.

Unidad Hidrogeológica	Espesor min-máx (m)	K (cm/s)	T (m ² /d)
Acuífero Sedimentario superior (Acuífero d)	2	3,59x10 ⁻⁴	0,6
	6		1,8
Acuífero Lavas fracturadas (Acuífero c)	3	5,27x10 ⁻⁵	0,14
	9		0,41
Acuífero Sedimentario inferior (Acuífero d)	10	1,76x10 ⁻⁴	1,52
	80		12,17

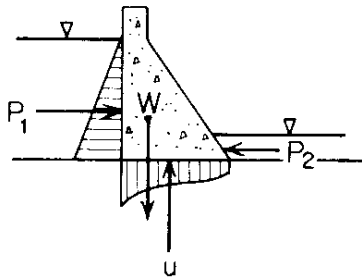
X. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL BAJO LA PRESA

El diseño de la Presa del Proyecto Embalse Río Piedras se define, de acuerdo con los criterios geológicos, geotécnicos y estructurales, como una presa de tipo enrocado con cara de concreto, con una altura de 40 m, una longitud de la cresta de 485 m y un volumen de agua a embalsar cercano a los 71 Hm³ (ICE, 2018).

Las principales fuerzas que rigen el diseño de la estructura de la presa se componen de dos tipos de cargas, las estáticas y las dinámicas, las cuales son numeradas en la Tabla 40, y a partir de estas se realizan estudios detallados que permitan evaluar las consideraciones de diseño para cada presa en particular.

Tabla 40. Esquema de las principales fuerzas que actúan en el diseño de las Presas (Tomado de Freeze & Cherry, 1979; Segura, et al. 1998)

Fuerzas actuantes en el diseño de una Presa (→):	A- Cargas estáticas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Peso propio de la estructura (W) 2. Empuje hidrostático (P1) de la columna de agua o carga de agua 3. Subpresiones (u) 4. Fuerzas por cambios de temperatura del concreto 5. Fuerzas por cambios de temperatura del agua (heladas) 6. Empuje de los sedimentos
	B- Cargas dinámicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sismos, por tectonismo o inducidos (SIE) 2. Subpresiones (u) generadas por avenidas máximas 3. Carga hidrostática o de empuje en el paramento aguas abajo (P2) 4. Empuje lateral por oleaje (viento, deslizamientos, sismos)



Para el análisis de estabilidad de las presas, estas fuerzas (P1, P2, y W) deben estar en equilibrio para evitar fallos en la estructura. Las subpresiones (u) están más relacionadas a las fuerzas hidráulicas que actúan en el plano del contacto entre la fundación y la

estructura, y se trasmite a través de los poros y fracturas tanto de las unidades geológicas de fundación como de los materiales constructivos de la presa (Segura, et al. 1998).

Las subpresiones más significativas se generan por la carga hidrostática del embalse, la cual genera una red de flujo que atraviesa los materiales semipermeables de la fundación, y en el caso de las presas de enrocado, parte de ese flujo atraviesa una zona de la presa para ser recolectada por los drenajes (drenes) internos verticales y basales, los cuales evacuan constantemente el flujo de la estructura.

La distribución de las cargas hidráulicas en la red de flujo bajo la presa, dependen de la conductividad hidráulica (K) de las diferentes unidades geológicas e hidrogeológicas presentes (Figura 90). En unidades muy permeables se requiere la construcción de cortinas de inyección o pantallas de impermeabilización, para retardar las líneas de flujo bajo la presa, en caso contrario, en unidades muy poco permeables se utilizan sistemas de drenajes para reducir la subpresión ejercida hacia la presa, de manera tal que las presiones de poro se equilibren (Segura, et al. 1998).

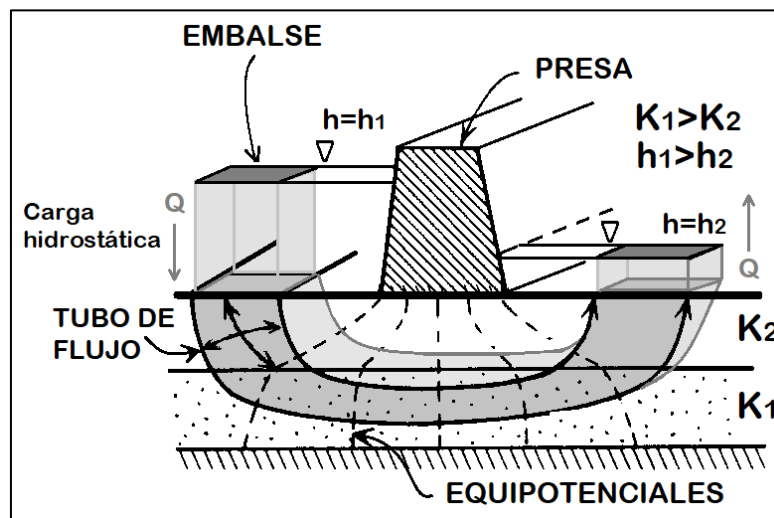


Figura 90. Esquema de la red de flujo que atraviesa por debajo de la presa y tiende a deformarse de acuerdo con las variaciones de las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (Tomado y modificado de Freeze & Cheery, 1979)

En el caso de la Presa de Río Piedras, el modelo hidrogeológico propuesto define que bajo la cota de 12 m.s.n.m a 24 m.s.n.m, que corresponden a los niveles de cimentación de la presa (ICE, 2018), existen tres unidades hidrogeológicas denominadas Acuífero b, c y d (Figura 91).

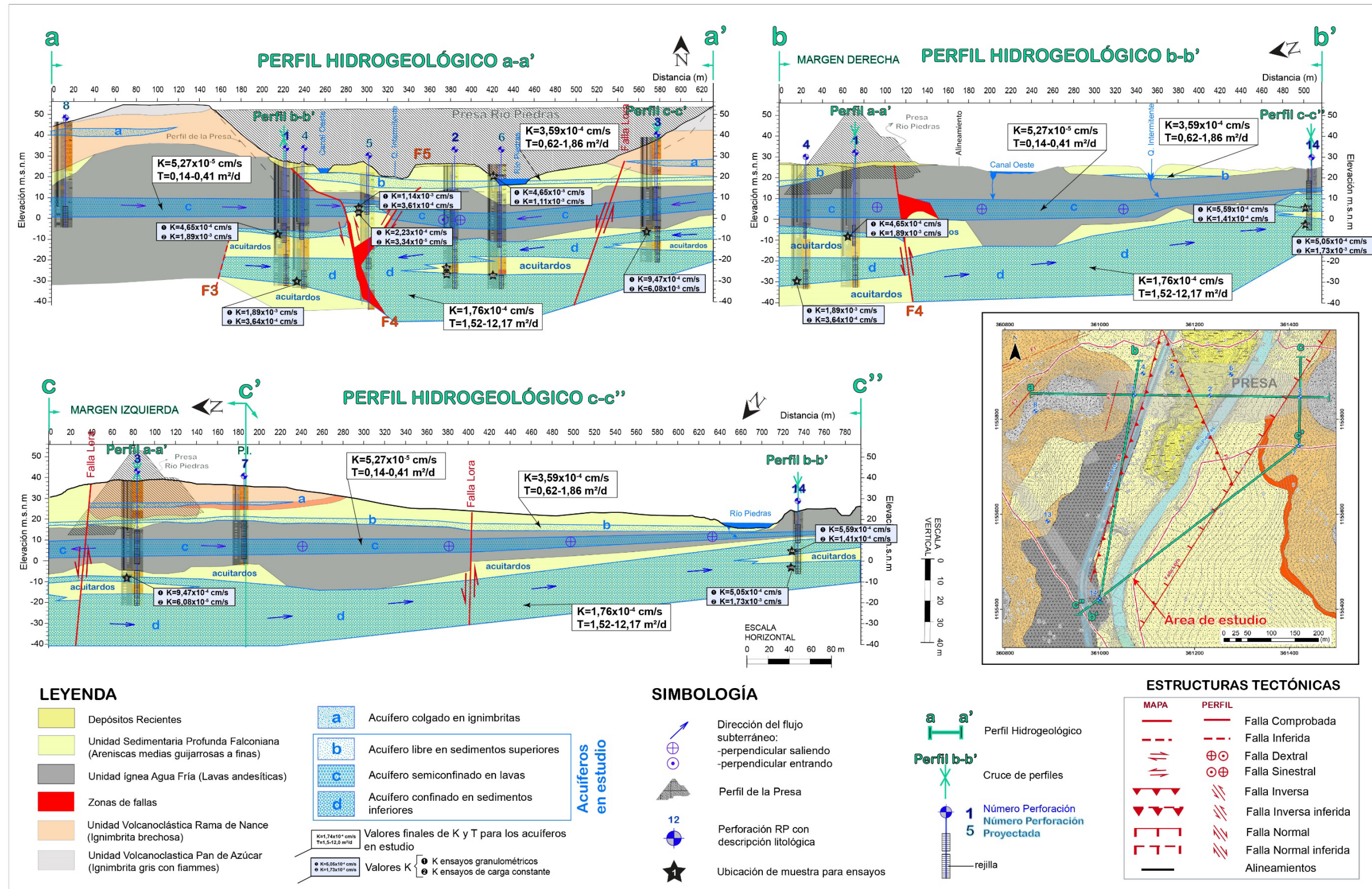


Figura 91. Modelo hidrogeológico conceptual bajo la Presa del Embalse Río Piedras.

El acuífero libre b, se localizaría escasamente en algunos sectores bajo la fundación de la presa, ya que gran parte de la unidad sedimentaria superior que lo contiene sería removida durante el proceso de construcción, sin embargo, algunas áreas de esta unidad pueden que se mantengan en especial hacia la sección central y la margen derecha, donde se muestra más profunda y espesa (Figura 91). Este acuífero sedimentario de poco espesor (2 a 6 m) cuyo techo se ubica entre las cotas de 17 a 22 m.s.n.m. presenta valores de conductividad hidráulica de $3,59 \times 10^{-4}$ cm/s y transmisividad de 0,62 a 1,86 m²/d. Se extiende desde la sección central y hacia el este-sureste a lo largo del área de estudio, siendo limitada lateralmente por la unidad ígnea Agua Fría, que tiende a somerizarse hacia el sector suroeste. Las capas inconsolidadas de esta unidad presentan valores de K muy variables con órdenes de magnitud de 10^{-5} a 10^{-3} en los análisis granulométricos y de carga constante, lo que indica una variabilidad de la permeabilidad asociada a los cambios granulométricos de la unidad. Los valores de las unidades de *Lugeon* (UL) estimadas para esta capa son igualmente variables, desde los 1,2 a > 59,5 UL, caracterizándose como zonas con permeabilidades bajas a medias con un régimen de flujo predominante de tipo lavado para las bajas permeabilidades y obturación para el mayor valor de *Lugeon*. Por lo que, de existir zonas o parches remanentes de esta unidad bajo la presa, se debe determinar si presentan capas poco cementadas por donde pueda generarse filtraciones debido al lavado de los materiales y posibles socavaciones.

El acuífero semiconfinado c, es sobre el que se ubicaría gran parte del área de fundación de la presa, ya que el techo del acuífero se localiza entre las cotas de 10 a 16 m.s.n.m. pudiendo localizarse desde los 3 m.s.n.m (Figura 91). Se asocia a lavas fracturadas con valores de conductividad hidráulica de $5,27 \times 10^{-5}$ cm/s y transmisividades de 0,14 a 0,41 m²/d. Estos valores considerados de moderada a baja transmisividad se relacionan directamente al escaso espesor de esta unidad (3-9 m) y las condiciones de permeabilidad secundaria de macizos poco fracturados con fracturas parcialmente abiertas y rellenas de minerales secundarios. La red de flujo en esta unidad presenta

gradientes hidráulicos de 0,02 a 0,01 que convergen desde ambos márgenes hacia la sección central de la fundación de la presa, para posteriormente orientarse al sureste. Este acuífero tiende a reducir el espesor hacia el sector sureste del área de estudio, y a somerizarse hacia el sector oeste-suroeste, por lo que la carga hidrostática del embalse podría verse reflejada de forma directa en el acuífero, al incrementar abruptamente los niveles piezométricos hacia los sectores más someros de la unidad, en donde se comporta como un acuífero libre. Al ser un acuífero de moderada permeabilidad, localizado de manera inmediata inferior a la fundación de la presa, va a verse influenciado directamente por la presión hidrostática del embalse, generando un incremento en la presión intersticial y por lo tanto en la red de flujo bajo la presa, pero que eventualmente durante la etapa de llenado del embalse debe monitorearse. La recarga lateral de este acuífero proviene de acuerdo con la dirección del flujo, desde las zonas topográficamente más altas, en la margen derecha desde el oeste y en la margen izquierda desde el noreste, la cual podría verse afectada por el aporte de la carga hidráulica del embalse, filtrándose de forma preferencial desde el norte hacia el sur de la margen derecha, de acuerdo con los valores de las unidades de *Lugeon* de 16,6 y 29,5 UL en las perforaciones 8 y 13. Estos valores de UL para el acuífero c, se caracterizan por ser permeabilidades medias. En la margen izquierda y parte de la derecha hacia la sección media del valle aluvial, el flujo preferencial desde el embalse tendría una orientación norte al sureste, de acuerdo con los valores de las unidades de *Lugeon* de 13,2 a 32 UL en la perforación 6 asociada a una permeabilidad media; 2,5 a 6,2 UL en la perforación 3, asociada a una permeabilidad baja a moderada, y de 22,4 UL en la perforación 7, asociada a una permeabilidad media.

En el área cercana a la perforación 5 y entre la cuña tectónica que forman las fallas F4 y F5, las líneas de flujo generadas por la carga hidráulica del embalse podrían verse visiblemente deformadas por la reducción abrupta del espesor de acuífero c, y la

presencia de zonas de fallas de baja permeabilidad que se comportarían como barreras negativas (impermeables) al movimiento del agua.

El acuífero confinado d, se localiza muy por debajo del acuífero C, fluctuando entre las cotas de 4 m.s.n.m y -13 m.s.n.m. Presenta valores de K de $1,76 \times 10^{-4}$ cm/s, y transmisividades de 1,52 a 12,17 m²/d. Esta unidad hidrogeológica se asocia a areniscas medias guijarrosas y sedimentos inconsolidados areno-limosos (franco arenoso) con porosidades efectivas de 12 al 22%, y espesores de 10 a 80 m. Corresponde con el acuífero más espeso localizado por debajo de la presa, con una permeabilidad moderada y un alto grado de confinamiento hidráulico, particularmente hacia el sector noroeste del área de estudio, en donde la elevación de los niveles piezométricos puede alcanzar los 27 a 44 m por encima del techo del acuífero. La red de flujo asociada a este acuífero, al igual que la del acuífero c, converge desde ambas márgenes hacia la sección media de la presa en donde tiende a orientarse al suroeste. Los gradientes hidráulicos para esta unidad varían de 0,01 a 0,008, por lo que el flujo tiene una tendencia casi horizontal. La influencia de la carga hidráulica del embalse hacia este acuífero por aportes laterales o verticales es posible que se vea reflejada de forma paulatina y lenta, a menos que existan alguna condición de fracturación o de exposición del acuífero en las laderas del embalse, que propicie la comunicación hidráulica inmediata.

La recarga lateral de este acuífero, de acuerdo con la dirección del flujo, proviene desde las zonas topográficamente más altas, en la margen izquierda desde el noroeste y en la margen derecha desde el noreste. Esta recarga podría verse modificada por el aporte de la infiltración de agua desde el embalse en los sectores oeste y este, en donde los valores de *Lugeon* y los valores de K de slug test, presenta las mayores permeabilidades para este acuífero.

Los valores de K obtenidos por análisis granulométricos y carga constante muestran ordenes de magnitud de 10^{-3} a 10^{-4} , y regímenes de flujo predominantes de tipo laminar

y turbulento, lo que indica que las permeabilidades del acuífero están asociadas a la poca cementación de las capas granulares asociadas a depósitos de areno limosos, algunas de las cuales tienden a localizarse en el contacto inferior de la unidad ígnea. Particularmente en la perforación 5 (figura 91), en donde la unidad ígnea reduce significativamente el espesor, se localizan entre los 16 a 20 m de profundidad y bajo el contacto inferior las muestras 5A y 5B, con valores de K desde $1,14 \times 10^{-3}$ a $3,34 \times 10^{-5}$ cm/s, a su vez en este tramo se presenta un valor de unidad de *Lugeon* de 20,6 asociado a una permeabilidad media, lo que indica que es una zona permeable que podría generar una potencial filtración por parte del flujo de agua desde el embalse, y por lo tanto propiciar un socavamiento importante.

Hacia la sección media de la presa en la perforación 5 y entre la cuña tectónica formada por las fallas F4 y F5, se puede generar una barrera negativa en la red de flujo más profunda, debido a la zona de falla F4.

XI. CONCLUSIONES

- Las diferentes litologías propuestas por Barrantes (2018), se corroboraron en el mapeo realizado a escala 1:3000, en donde se confirma que la secuencia en las unidades litológicas corresponde a Unidades volcanoclásticas superiores como lo son las Unidades Pan de Azúcar y Rama de Nance. Las mismas están separadas por una pequeña Unidad sedimentaria muy local como lo es la Unidad Biscoyol, por debajo de estas unidades predominan la Unidad Sedimentaria Falconiana la cual se encuentra intruida y limitada muy superficialmente por la Unidad ígnea Agua Fría.
- En el área de estudio las estructuras tectónicas más importantes son la Falla Lora de movimiento relativo normal y la Falla F5 de componente relativo inverso. Entre ambas estructuras parece formarse un semi-graben basculado hacia el Río Piedras, dentro del cual se ubica la falla F5, que conforma un bloque acuñado y segmentado de forma transversal a las dos fallas anteriores, esta cuña compresiva que forman las fallas F5 y F4, parece levantarse hacia el Norte-Noreste.
- En el área de estudio predominan las Unidades geológicas Falconiana y Agua Fría. A partir de la medición de niveles piezométricos y de los registros llevados en los avances de las perforaciones, se establecieron cuatro unidades Hidrogeológicas, denominadas Acuífero a: en tobas asociados a la Unidad Rama de Nance, el Acuífero b: en el sedimentario superior asociado a la Unidad Falconiana, Acuífero c: en lavas fracturadas asociado a la Unidad Agua Fría y el Acuífero d: en sedimentario inferior asociado a la Unidad Falconiana.
- Las unidades hidrogeológicas más importantes son los acuíferos b, c y d, ya que corresponden a las unidades bajo las cuales se cimentaría la Presa del Proyecto Río Piedras. Estas unidades hidrogeológicas en depósitos sedimentarios

superiores (Acuífero b), lavas fracturadas (Acuífero c) y en depósitos sedimentarios inferiores (Acuífero d), se definen con un grado de confinamiento hidráulico de libre, semiconfinado y confinado, respectivamente por los valores de las cargas hidráulicas presentada en los niveles piezométricos.

- El acuífero b con espesores estimados de 2 a 6 m, presenta a partir de los ensayos de *Lugeon* y los análisis granulométricos valores de $K = 3,59 \times 10^{-4}$ cm/s, y una transmisividad de 0,62 a 1,86 m²/d.
- Debido a que el acuífero b, no tiene una red de piezómetros penetrantes a la unidad, no fue posible realizar una red de flujo asociada.
- El acuífero c, en lavas fracturadas con un espesor de 3 a 9 m, presenta de acuerdo con los resultados de los ensayos de *Lugeon*, fracturas estrechas y pobremente desarrolladas, lo que la caracteriza como una unidad de baja a moderada permeabilidad, lo cual es congruente con los valores de la conductividad hidráulica media obtenida de $K = 5,27 \times 10^{-5}$ cm/s, y una transmisividad asociada de 0,1 a 0,4 m²/d.
- La red de flujo asociada al acuífero c, presenta un gradiente hidráulico bajo de 0,02 y una dirección de flujo proveniente desde ambas lomas ubicadas en ambos márgenes de Río Piedras, las cuales confluyen hacia la cuña tectónica que forman las fallas F4 y F5 en la zona baja, donde se orientan hacia el sureste.
- El acuífero d, en el sedimentario inferior con espesores de 10 a 80 m, presenta granulometrías areno-limosas o franco arenosas muy gradadas. La facies limosas o arcillosas del depósito se asocian con acuitados con valores de K de 10^{-6} cm/s, mientras que las facies arenosas y poco o consolidadas, de mayor permeabilidad con valores medios de $K = 1,78 \times 10^{-4}$ cm/s, y una transmisividad asociada de 1,5 a 12,3 m²/d.
- La red de flujo para el acuífero d, presenta un gradiente hidráulico bajo de 0,01 y una dirección de flujo igualmente proveniente desde ambos márgenes que

confluyen hacia la cuña tectónica la cual deforma las curvas piezométricas, para finalmente orientarse al suroeste.

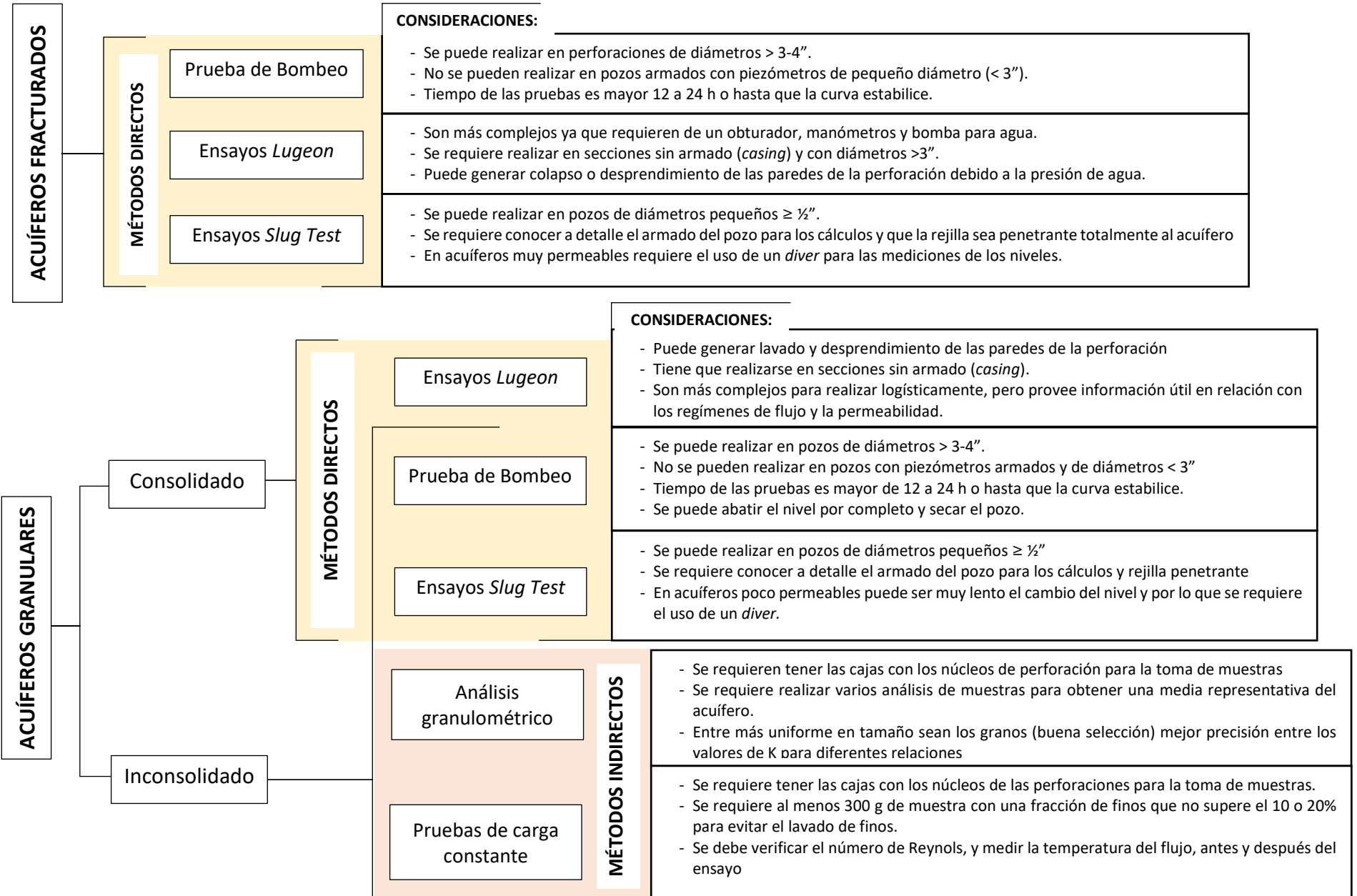
- Los valores reportados de T y K para el pozo TE-57, localizado cerca de 4 km al suroeste del área de estudio y asociado al acuífero c, son muy superiores a los obtenidos para esta misma unidad en los ensayos realizados, lo que sugiere que la unidad hidrogeológica fracturada (acuífero c) presenta mejores condiciones de fracturamiento en este sector, lo que potencia la conductividad hidráulica y la transmisividad.
- Las recargas para ambos acuíferos c y d, parecen provenir desde el este-noreste y oeste-noroeste. El flujo proveniente del noreste presenta una ligera tendencia geotermal asociado a las temperaturas reportadas en los *diver* para los piezómetros profundos (6.1 y 2.1) y ubicados en el sedimentario inferior, así como la tendencia a enriquecerse de cloruros en el análisis hidrogeoquímico del pozo TE-50, y las manifestaciones termales ubicadas cerca del pueblo de Aguacaliente, ambos localizado igualmente hacia el noreste del área de estudio.
- A partir de los ensayos granulométricos para las muestras inconsolidadas del acuífero d, se determina que, las relaciones de Sheperd (1989) y USBR con el tamaño del grano al 50% y 20% respectivamente, tienden a sobreestimar los valores de K, mientras que los ensayos con las relaciones de Hanzen (1911) y Kozeny-Carman utilizando el tamaño al 10% de la muestra, presenta valores con órdenes de magnitud muy similares a los ensayos de carga constante, slug test y *Lugeon*.
- Particularmente la muestra 12 asociada al acuífero b, es la única granulométricamente uniforme, presenta valores de K con órdenes de magnitud similares y muy cercanos entre sí, tal es el caso de los valores de la relación de Shepherd (1989) para sedimentos consolidados, los cuales son equivalentes a los estimados con Hanzen (1911), sin embargo, los valores que tienden a sobrestimar

el valor de K en un orden de magnitud superior son los de las relaciones de Kozeny-Carman y Shepherd (1989) asociada a los depósitos de canales.

- En los análisis de las relaciones granulométricas para la obtención de K, se determina que la relación de Hazen (1911) es la más adecuada a utilizar cuando el coeficiente de uniformidad (C_u) presentan valores entre los 20 a 50, mientras que para valores de $C_u > 100$, la relación de USBR (En Kosenow, 2002), se ajusta mejor a los valores de K obtenidos con los métodos directos.
- Los ensayos *Slugs test* presentan rangos de magnitud similares en ambos acuíferos c y d, siendo los valores del acuífero d inferior $K = 3,58 \times 10^{-5}$ cm/s, superiores al acuífero c fracturado de $K = 1,79 \times 10^{-5}$ cm/s.
- De acuerdo con la distribución de los valores de K de los ensayos *Slug test*, los mayores valores reportados para el acuífero c tienden a incrementar hacia la perforación 2, mientras que en el acuífero d se muestran hacia las perforaciones 1 y 3.
- Los valores de K asociados a los ensayos de *Lugeon* tiene diferencias bien marcadas entre ambos acuíferos b, c y d, sin embargo, siempre se mantiene que el acuífero inferior d con un orden de magnitud superior de $K = 2,01 \times 10^{-4}$ cm/s, con respecto a los acuíferos b y c, cuyos valores son $8,01 \times 10^{-5}$ y $8,75 \times 10^{-5}$ cm/s, respectivamente.
- A partir de la distribución de los valores de K obtenidos de los ensayos de *Lugeon*, se muestra que los mayores valores reportados tanto para el acuífero c como el d, tienden a incrementar hacia la perforación 6.
- El acuífero c fracturado, es la unidad hidrogeológica más significativa que se encuentra bajo la cimentación de la presa, y se caracteriza por una permeabilidad moderada, baja transmisividad y escaso espesor, particularmente hacia la sección media y longitudinal de la presa, entre las fallas F4 y F5.

- El acuífero sedimentario d, corresponde a la unidad hidrogeológica más permeable localizada por debajo de la presa, particularmente en las facies poco cementadas localizadas por bajo la unidad ígnea, las cuales son propensas a la erosión y socavamiento por el incremento del flujo proveniente del embalse.
- A continuación, se hace un esquema general en la tabla 41, de las diferentes metodologías propuestas para la obtención de K, según las características de los acuíferos y las consideraciones a tomar en el uso de cada una de ellas.

Tabla 41. Esquema de aplicación general de varias metodologías y las consideraciones asociadas de acuerdo con el tipo de acuífero.



XII. RECOMENDACIONES

- Realizar una campaña de aforos más continua y periódicas a lo largo del Río Piedras, para establecer la efluencia o influencia de los acuíferos a lo largo del mismo.
- Para completar el modelo hidrogeológico hacia el sector sureste y sobre la margen izquierda del río, es recomendable realizar una perforación que penetre ambos acuíferos y permita determinar mediante pruebas de bombeo los valores de K, de forma directa para ambos acuíferos.
- El monitoreo periódico de niveles en los piezómetros es necesario para establecer o evidenciar patrones climáticos y como línea base de referencia previo a la etapa de construcción de la presa y llenado del embalse.
- En el caso de que se diseñe una cortina de inyección, se recomienda realizar al menos un análisis químico de las aguas subterráneas de cada uno de los acuíferos, para determinar la agresividad de estas sobre el cemento.
- La zona de especial cuidado durante la etapa constructiva corresponde a la cuña tectónica formada por las fallas F4 y F5, ya que se encuentran ubicadas bajo la presa y tienden a reducir significativamente el espesor de la unidad geológica ígnea a 6 m (perforación 5), siendo esta unidad el basamento de fundación de la presa.

XIII. REFERENCIAS

- Abanto, A, W. I., (2018). Modelo de permeabilidad mediante el sistema swips en perforaciones orientadas en el Proyecto Cañariaco, Cañaris, Ferreñafe, Lambayeque (Tesis Gdo.). Univ. Nac. de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Alfonso, L.P.S., (1971). Exploración Geofísica en ingeniería civil. (Inf. Tec.). Intituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica.
- Alvarado, G.E., & Gans, P. B., (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. -Rev. Geológica de Amér. Central, (46), 7-122.
- Alvarado, G.E., & Soto, D. (2012). Peperitas en Costa Rica. Rev. Geológica Amér. Central, (47), 55-68. DOI: 10.15517/rgac.v0i47.6486
- Ambronn, R., & Cobb., M.C. (1928). Elements of Geophysics. New York, E.U. Ed. McGrahm-Hill.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W. (1992). Applied groundwater modelling simulation of flow and advective transport. San Diego, California, E.U. Ed. Academic Press.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R.J., (2015). Basic Mathematics and the Computer Code Applied Groundwater Modeling. Elsevier Inc, New York, E.u. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091638-5.00003-1>
- Angelone, S. Garbay, M. & Cauhapé. (2006). Permeabilidad de suelos, Geología y Geotécnia. Univ. Nacional del Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ing. y Agrimensura, Rosario Argentina.
- Allud, L.A., Boucherot, E., & Garner, L. (1965). Utilisation de l'électronique dans l'enregistrement et évaluation des digraphies. Bull. A.F.T.P. (1): 172.

- Arévalo H. D. (2005). Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero Opicoquezaltepeque, a través de datos geofísicos, pozos y análisis hidrogeoquímicos. El Salvador, Centro América. (Tesis MSc). Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Arias, S. M., (1999). Les methodes de sondages electriques et electromagnetiques: exemples d'application en hydrogéologie: rapport de fin de stage. (Tesis MSc) Univ. Pierre et Marie Curie, Paris.
- Arias, S. M., (2000). Informe de prospección Geoeléctrica. (Inf. Tec.) Univ. de Costa Rica, Esc. de Geología San José, Costa Rica.
- Arias, S. M. (2001a). Aplicación de técnicas geofísicas en el estudio de acuíferos costeros de Costa Rica. I Jornadas Iberoamericanas sobre enfoques integrados de la problemática del agua. Escuela Centroamericana de Geología, San José, Costa Rica.
- Arias, S. M. (2001b). Evaluación geofísica en Tamarindo, Costa Rica (Inf. Tec.) SENARA, San José, Costa Rica.
- Arias, S. M. (2002^a) La prospección geoeléctrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. Rev. Geol. de Am. Central San José, Costa Rica (27), 21-26.
- Arias, S. M. (2002b) Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica. Rev. Geol. de Am. Central San José, Costa Rica (27),11-20.
- Arias, S. M. (2002c) Evaluación geofísica en Sámara, Costa Rica (Inf. Tec.). Proyecto del Acueducto de Sámara.-SENARA, San José, Costa Rica.

- Arias, S. M. (2007^a) La primera experiencia en la aplicación de los métodos electromagnéticos en acuíferos costeros de Costa Rica: El caso Tamarindo, Guanacaste.- Bol. Geol. y Minero, Madrid, España (118), 51-62.
- Arias, S. M. (2007b) Modelización directa y comparación de los principales dispositivos geoelectricos. Rev. Ciencia y Tecnología, San José, Costa Rica, (25), 7-23.
- Arroyo, M., Godínez, K., y Linkimer, L. (2017) Completitud del catálogo de la Red Sismológica Nacional de Costa Rica durante 1975-2014. *Boletín de Geología*, 39(3): 87-98 doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v39n3-2017006>
- ASTM D2434-19. (2019) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). Bull. Soil and Rock, ASTM, 04.08 (I), D420 – D5876
- Astier, J.L. (1975) Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Madrid, España, Ed Paraninfo.
- Attwa M., Günther T., Grinat M., & Binot F. (2011) Evaluation of DC, FDEM and IP resistivity methods for imaging perched saltwater and a shallow channel within coastal tidal flat sediments. *Journal of Applied Geophysics*. (75), 656–670. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.002
- Auge, M., (2008). Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea, Material Didáctico. Buenos Aires, Argentina Univ. de Buenos Aires. Recuperado de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>
- Badillo J. & E; Rodríguez, R. A. (1989). Mecánica de Suelos, Flujo de Agua en Suelos Tomo III. México D.F., Ed. Limusa.
- Barahona, P. M., Riva, M., Sánchez-Vila, X., Vasquez-Sune, E., & Guadagnini, A., (2011). Quantitative comparison of impeller-flowmeter and particle-size-distribution techniques for the characterization of hydraulic conductivity variability. *Hydrogeology Journal* 19(3):603-612. doi: 10.1007/s10040-011-0706-5

- Barrantes, S.G., (2018). Modelo volcano-sedimentario e historia geológica del sector noreste de Lomas Barbudal (Guanacaste, Costa Rica). (Tesis Lic). Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Beardmore, G. & Cull, P., (2001). Crustal Heat Flow, A guide to measurement and modelling, Ed. Cambridge University
- Bennet G.D., & Patten, E.P. (1960). Borehole geophysical methods for analyzing specific capacity of multiaquifer wells. - Bull. U.S.Geological.Survey. (1536), 1-26.
- Betancur, T., Mejia, O., & Palacio, C. (2009). Modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño: un sistema acuífero tropical. Rev. Facultad de Ingeniería Univ. de Antioquia, Medellín, Colombia (48), 107-118.
- Bredehoeft. J., (2005). "The conceptual model problem — surprise". -J. Hydrogeol. (13), 37-46.
- Bohnenberger, O. H., (1968). Un reconocimiento fotogeológico de Guanacaste. (Inf. Int.) Org. Nac. Unidas, San José, Costa Rica.
- Bodmer, R., Ward, S.H., Morison, H.F. (1968) On induced electrical polarisation and groundwater. -Bull. Geophysics (23), 5.
- Burger, R.H., Sheehan, A.F., & Craig, H.J. (2006). Introduction to Applied Geophysics. New York, U.S.Ed. W.W Norton & Compañy Inc.
- Cantos, F. J. (1974). Tratado de Geofísica Aplicada, 2da Ed. Madrid, España, Ed. Litoprint
- Calvo, C. (1990). Geologic map of Alto Tempisque área. Mapa escala 1:25000. Gerencia de Producción Primaria, Refinadora Costarricense de Petróleo, San José, Costa Rica.

- Calvo P. (2002) Subsistencia por abatimiento de niveles piezométricos en el área del cuenco vertedor del Proyecto Hidroeléctrico Angostura. Turrialba, Costa Rica. (Tesis MSc.) Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Calaña, A, A. & Belete, F, o. (2014). Análisis de la precisión de los interpoladores del Surfer en la modelación de relieves con pendientes abruptas. Rev. Minería y Geología 30 (4) 89-103.
- Castro C, L. (2010). Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a partir de métodos geofísicos y determinación del potencial hídrico en el acuífero aluvial Naranjito, Quepos, Puntarenas (Tesis MSc). Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Cauas, D. (2015): Investigación de las variables, enfoque y tipo de investigación. (Tesis PhD). Univ. Nac. De Colombia, Bogotá, Colombia.
- Chaves, M. (2016) Estimación de los efectos en el caudal y el nivel del agua subterránea por la excavación de los túneles de desvío Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, Siquirres, Limón. Costa Rica (Tesis MSc.)
- Chaves, C., Vargas, A. & Chávez, J., (2001) Caracterización hidrogeológica del sitio de presa del proyecto hidroeléctrico Pirrís. Rev. Tecnología ICE. 11 (1), 73-82.
- Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M. (2009). Métodos eletromagnéticos de polarización inducida. Cátedra de geofísica aplicada. Univ. Nacional de Patagonia San Juan Bosco, Chuvut, Argentina. <http://www.unp.edu.ar>
- Chebotarev, I. (1955). Metamorphism of Natural Waters in the Crust of Weathering. Geochimica et Cosmochimica Acta, 8, 22-32. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90015-6)

- Chiesa, S., Corella, M., Mora, O., & Alvarado, G.E. (1994). Contribution to petrological and stratigraphical understanding of the Cordillera de Guanacaste lava flows, Costa Rica. *Rev. Geol. De Am. Central* (17), 14-43.
- Comunicado de Prensa (04 abril de 2022). AGUA PARA GUANACASTE: SETENA DA VIABILIDAD AMBIENTAL PARA PROYECTO PAACUME. Presidencia de la República de Costa Rica. Recuperado de <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2021/08/agua-para-guanacaste-setena-da-viabilidad-ambiental-para-proyecto-paacume/>
- Córdoba., D.F., Meffe, R., Martínez, H. M. (2012). Metodología para el desarrollo de un modelo hidrogeológico mediante herramientas de Información Geográfica. Madrid, España, Centro de Investigaciones en Recursos Hídricos-CIDERH.
- Cosenza M, A., & Arias, S. M. (2006). La equivalencia y supresión en la resolución del problema inverso en geoelectrónica: aplicación en Santa Lucía Cotzumalguapa, Guatemala. *Rev. Geol. de Am. Central*, (34-35), 99-108.
- Custodio, E., & Llamas, R. (1996). Hidrología subterránea, Tomo I. Barcelona, España, Ed. Omega.
- Dengo, G. (1962). Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. -Petrologic studies, Vol. in honor of A.F. Buddington, *Geol. Soc. Am. (SN)*, 133-161.
- Denyer, P., Montero, W & Alvarado, G. (2003). Atlas tectónico de Costa Rica. San José, Costa Rica, Ed. Univ. de Costa Rica.
- Denyer, P & Alvarado, G. (2007). Mapa Geológico de Costa Rica escala 1: 400.000. San José, Costa Rica, Ed. Librería Francesa.
- Denyer, P., Aguilar, T., & Montero, W. (2014). Cartografía Geológica de la Península de Nicoya. San José, Costa Rica, Ed. Univ. de Costa Rica.

- Denyer, P., Aguilar, T., Alvarado, G., Gazel, E., Lüke, O., Madrigal, P., Montero, W., Pérez, W., Solano, J., Vargas, C., Chavarría, M., Herrera, P., Soto, G., Barrantes, G., Vega, E., Taylor, W., Pérez, K., & Barrantes, M. (2019): *Perspectiva Geológica del Noroeste de Costa Rica: historia, evolución y cartografía*. San José, Costa Rica, Ed. Univ. de Costa Rica.
- Desio, A. (1949). *Geologia applicata all'ingegneria*. Milán, Italia, Ed Ulrico Hoepli.
- D'Souza. R. (2006). *Dams, "development" and International Law. Research partnership 2006-2009 on water law sponsored by the Swiss National Science Foundation (SNF)*. Delhi, India.
- Enemarka T., Peeters L., a, Mallantsa & D., Batelaan, O. (2019) Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology* 569 (2019) 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.007>
- Fetter C.W. (2014). *Applied Hydrogeology*, 4^{ta} Edition. Edimburgo, Escocia, Ed. Pearson.
- Flores, K. (2003). *Propuesta tectonoestratigráfica de la región septentrional del Golfo de Nicoya (Tesis Lic.)*. Univ. de Costa Rica, san José, Costa Rica.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. New Jersey, U.S. Ed. Prentice-Hall.
- Fuentes, C. W.C. (2014). *Evaluación de la validez de los resultados de los ensayos Lugeon en un macizo rocoso fracturado, por medio de un enfoque tensorial de la conductividad hidráulica (Tesis MSc)* Univ. de Colombia, Medellin, Colombia.
- Gandolfo, B. O., & Gallas, F. J.D. (2007). O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade, *Rev. Bras. Geof.* Vol. 30 (3): 228-235. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2007000300001>
- Geotecniafacil. (2019). Blog Consulta. Recuperado de <http://geotecniafacil.com/ensayo-lugeon/>

- Gómez, E. (2002). Imágenes electromagnéticas del interior de la Tierra: Parte VI. Rev. GEOS. Unión Geofísica Mexicana 22(3), 259-261.
- González de Vallejo, Ferrer, M. Orduño, L. & Oteo C. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid, España, Ed. Pearson.
- Griffiths D.H.& King, R.F. (1981). Applied geophysics for geologist and engineers, 2da Edición. Oxford, United Kingdom Ed. Pergamon
- Herrera, J., & Vargas, A. (2012). Geología de Bahía Culebra, Guanacaste, Costa Rica. -Rev. Biológica Tropical 60(2), 213-223.
- Hossin, A. (1969). Interpretation des diagraphies en zones carbonatées et évaporitiques. Bull. A.F.T.P. (173).
- Houlsby, A. (1976). Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test. Q. J. Eng. Geol. 9, 303-313.
- Hubbard S.S., & Linde, N. (2011). Hydrogeophysics. -430 pp. Ed. Elsevier, New York
- IGC. (2011). Tomografía Eléctrica. (Notas de Grado) Cataluña, España, Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- IGN, (1952). Proyecto misión petrolera. Foto n° 798, rollo 97, número de línea 30, n° sobre 22, escala 1:20 000. GNSS
- ICE, (2016a). Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica y Refracción Sísmica para los sitios de Presa, Vertedero y Casa de Máquinas, Embalse de Río Piedras, Bagaces, Guanacaste (Inf. Téc.). Área de Geofísica, Ingeniería y Construcción IC, San José Costa Rica.
- ICE, (2016b). Estudio Sismológico, Tectónico y de Amenaza Sísmica: Embalse Río Piedras (Inf. Téc.). Área de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica, Ingeniería y Construcción IC, San José Costa Rica.

- ICE, (2018). Informe de Diseño Planos y Especificaciones del Proyecto: PAACUME Río Tempisque (Inf. Téc.). Ingeniería y Construcción IC, San José Costa Rica
- INDER. (2015). Informe de Caracterización Básica Territorio Abangares-Cañas-Bagaces-Tilarán (Inf. Téc.). Direcc. Cañas, San José, Región Chorotega.
- Jiménez, J. (2002). Diagnóstico de los recursos hídricos subterráneos de la península de Nicoya (Inf. Téc). - SENARA, San José, Costa Rica.
- Jaccard, S & Münster, M. (2000). Etude geologique des calcaires de la région du bassin du Tempisque, Guanacaste Costa Rica (Tesis Diplomado). Université de Laussann, Lausanne, Suiza.
- Jones, P.H., & Skibitzke, H.E. (1956). Subsurface geophysical method in ground-water hidrology. Bull, Advances in geophysics (3), 241-300
[https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60391-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60391-X)
- Kasenow, M. (2002) Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis. Journal of Water Resource and Protection(2)1, 399-410
<https://doi.org/10.1111/gwat.12078>
- Keys, W.S. (1967). Well-logging in ground-water hidrology. VIII Annual Symposium.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1968.tb01630.x>
- Kirsch, R. (2010). Groundwater Geophysics, 2da Edición. Berlín, Alemania Ed. Springer.
- Kresic, N. (2006). Hydrogeology and Groundwater modeling, 2da Ed. Florida, US. Ed. Taylor and Francis Group
- Krivochieva S., & Chouteau M. (2003). Integrating TDEM and MT methods for characterization and delineation of the Santa Catarina aquifer (Chalco Sub-Basin, Mexico). Journal of Applied Geophysics (52), 23– 43.

Lafemina, P., Dixon, T.H., Gover, R., Norabuena, E., Turner, H., Saballos, A., Mattioli, G., Protti, M. (2009) Fore-arc motion and Coco Rige collision in Central America Journal AGU 10(5) <https://doi.org/10.1029/2008GC002181>

La Gaceta N°156. (13 de agosto del 2008). Declaratoria de interés público y conveniencia nacional el proyecto presa-embalse regulatorio del canal del oeste del distrito de riego arenal-tempisque, denominado también embalse piedras Decreto N° 34678-MP-MINAE-MAG. -Diario Oficial La Gaceta, (156), 6 -10.

La Gaceta N°170 (1 septiembre del 2015). Reglamento para la Calidad del Agua Potable, Ministerio de Salud, Decreto 38924-S, Diario Oficial La Gaceta (69), 1-69.

La Gaceta N°184 (22 de setiembre del 2015) Declara de interés público el Programa Integral para el Abastecimiento de Agua para Guanacaste (Pacífico Norte) conocido como PIAAG. Decreto N° 39145-MP-MIDEPLAN-MINAE-MAG- Diario Oficial La Gaceta (184), 2-15.

La Gaceta N°218 (12 de noviembre del 2014). La Constitución de la Comisión de Alto Nivel Para La Ejecución Del Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (Pacífico Norte) DECRETOS N° 38665-MP-MIDEPLAN-MINAE-MAG. - Diario Oficial La Gaceta (218), 1-4.

Langston, G. (2009). A hydrological Characterization of a Proglacial Moraine (Tesis M.Sc). University of Calgary, Alberta Canadá, Canadá.

Limentov, P., & Kónonov, Vm., (1982). Metodología de las investigaciones hidrogeológicas. Moscú, Rusia, Ed. Mir.

Linkimer, L., (2003). Neotectónica del extremo oriental del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. (Tesis Lic) niv. de Costa Rica, San José, Costa Rica.

- Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., & Wilkinson P.B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. - *Journal of Applied Geophysics* (95), 135-156.
- Madrigal, C. (2004) Modelo conceptual hidrogeológico de la sección de acuíferos ubicados bajo el sitio de la casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Peñas Blancas, Costa Rica. (Tesis MSc.) Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Malavassi, O. E. (2014). Atlas de Costa Rica, base de datos digital y cartográfica, última edición 2016 [CD-ROM]. Cartago, Esc. de Ingeniería Forestal (EIF), y el Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Manual Aquifer Test 9.0. (2016). Waterloo Hydrogeologic.- https://www.waterloohydrogeologic.com/help/aquifertest/index.html?exercise_14_slug_test_analysis_binkhorst_and_robbins.htm
- Mejía, D. F. (2009). Identificación de parámetros en acuíferos por interpolación con funciones de base radial y el método del Sistema Diferencial. (Tesis Msc) Centro de investigación en matemáticas, CIMAT, Guanajuato México.
- Meju Max A., Denton P., & Fenning P. (2002). Surface NMR sounding and inversion to detect groundwater in key aquifers in England: comparisons with VES–TEM methods. - *Journal of Applied Geophysics* (50), 95– 111.
- McClymont A. F., Roy J. W., Hayashi Mi., Bentley L. R., Maurer H., Langston. G. (2011). Investigating groundwater flow paths within proglacial moraine using multiple geophysical methods. -*Journal of Hydrology* (399), 57–69.
- McNeill, J.D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number (Nota Tec). Ontario, Canada, Society of Exploration Geophysicists Geonics Limited.

- Montero, W (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Rev. Geol. de Am. Central*, (24) 29-56.
- Montero, W. & Alvarado, G. (1988). Los terremotos de Bagaces de 1935 y 1941: Neotectonismo transversal a la Cordillera volcánica de Guanacaste Costa Rica. *Rev. Ciec y Tec.* 12 (1-2) 69-87.
- Montero, W & Denyer, P. (2011). Fallamiento neotectónico de la península de Nicoya y su relación con el escape tectónico del antearco centroamericano. *Rev. Geol. de Am. Central*, (45) 9-52 DOI 10.15517/RGAC.V0I45.1906
- Montero, W., Lewis, J. C. & Araya, M. C. (2017). The Guanacaste Volcanic Arc Sliver of Northwester Costa Rica. *Scientific Reports*, SP 1797, VI (7) . DOI: 10.1038/s41598-017-01593-8
- Morera, S. (2000). Determinación de zonas de recarga mediante la utilización de técnicas isotópicas en los acuíferos de Liberia y Bagaces. (Inf. Téc.). SENARA, San José, Costa Rica.
- Morley, L.W. (1970). Mining and Groundwater Geophysics. *Geological Survey of Canada* (51), 995-1005. <https://doi.org/10.1190/1.1442158>
- Neuendorf, K.E., Mehl, J.P., & Jackson, J.A. (2011). *Glossary of Geology*, 5ta edition. Virginia, U.S. Ed. The American Geoscience Institute.
- ONU, (1975). Investigaciones de aguas subterráneas en zonas seleccionadas de Costa Rica. Programa de Naciones Unidad para el Desarrollo, Nueva York, U.S. Ed. ONU.
- Ordóñez, J. (2011). Cartilla Técnica Agua Subterránea-Acuíferos. Global Water Partnership, South Am. Soc. Geog. de Lima, Lima Perú.
- Parasnis, D.S. (1979). *Principles of Applied Geophysics*, 3er. New York, U.S. Ed. Chapman & Hall.

- Parasnis, D.S. (1986). Principles of Applied Geophysics. New York, U.S. Ed. Chapman & Hall.
- Protti, Q, R. (1981). Geología y geofísica con fines hidrogeológicos en la planicie costera Jícaral-Santa Rita, Península de Nicoya (Tesis Lic.) Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Portal web Senara. (21/04/2022). Proyecto Paacume: estudio de Factibilidad, las cuatro componentes Recuperado de <http://www.senara.or.cr/proyectos/paacume/componentes.aspx>
- Quesada, M. A. (1989). Estudio geológico y geofísico del campo geotérmico Las Pailas, Parque Nacional Rincón de La Vieja, Guanacaste, Costa Rica (Tesis Lic.) Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Quiñones-Rozo, C. (2010). Lugeon test interpretation, revisited. En: Proceedings of the 30th annual USSD conference, Sacramento, California. Actas I: 405–414 pp.
- Resolución N° 1226-2021-SETENA (2021). PROYECTO ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA CUENCA MEDIA DEL RÍO TEMPISQUE Y COMUNIDADES COSTERAS (PAACUME) EXPEDIENTE ADMINISTRATIVO No D1-21601-2017 -SETENA.-30 pp. Secretaría Técnica Ambiental, SETENA, San José, Costa Rica.
- Sanders, L. (2008). A manual of field Hydrogeology. Ed. Prentice Hal, New Jersey, US.
- Sánchez, F. J. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. (Compilación de apuntes) Salamanca, España, Univ. de Salamanca.
- Saénz, S. L.F. (1985). Estudio geofísico para la factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Angostura. (Tesis Lic.) Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica

- Santamaría, J. C & Narsilio, A.G (2008). Clasificación de Suelos: Fundamento Físico, Prácticas actuales y recomendaciones. Conferencia 50 Aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia "Estado de la Práctica".-19 pp. Caracas, Venezuela.
- Segura, B. R., Avilés, C. F., Laporte, P. M & Bolaños, S. M. (1998). PRESAS: Guía práctica de diseño.-299 pp. Cartago, Costa Rica: Ed. Tecnológica de Costa Rica,.
- SENARA. (2000). Mapa de Vulnerabilidad Hidrogeológica de los acuíferos Bagaces y Liberia escala 1:200.000.- Base de datos SENARA, San José.
- SENARA. (2008). Plan de Abastecimiento de Agua para Guanacaste: Informe general de los mantos acuíferos en Guanacaste. -19 pp. SENARA, San José [Inf. Téc.]
- SENARA. (2006). Plan de Abastecimiento de Agua para Guanacaste: Informe general de los mantos acuíferos en Guanacaste. -19 pp. SENARA, San José [Inf. Téc.]
- Serralde, O. D. (2011). Caracterización electromagnética, una aplicación de la geofísica somera, Templo del Sol, Sogamoso (Boyacá). (Tesis MSc), Univ. Nacional de Colombia, Bogotá Colombia.
- Schlumberger. (2008). Oilfield Glossary.
<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/i/ip.aspx>
- Schneider, H.J. (1982). The In-situ Permeability Test In Jointed Rock - Problems And Interpretation. ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics, ISRM-IS-1982-014.
- Schöeller, H. (1962). Les eaux souterraines. Ed. Masson et Cie, Paris, Francia 642 p.
- Sheriff, R. E. (2006). Encyclopedic dictionary of applied geophysics, 4ta Edición. Ed. Society Explor. Geophysics SEG Library.
<http://dx.doi.org/10.1190/1.9781560802969>

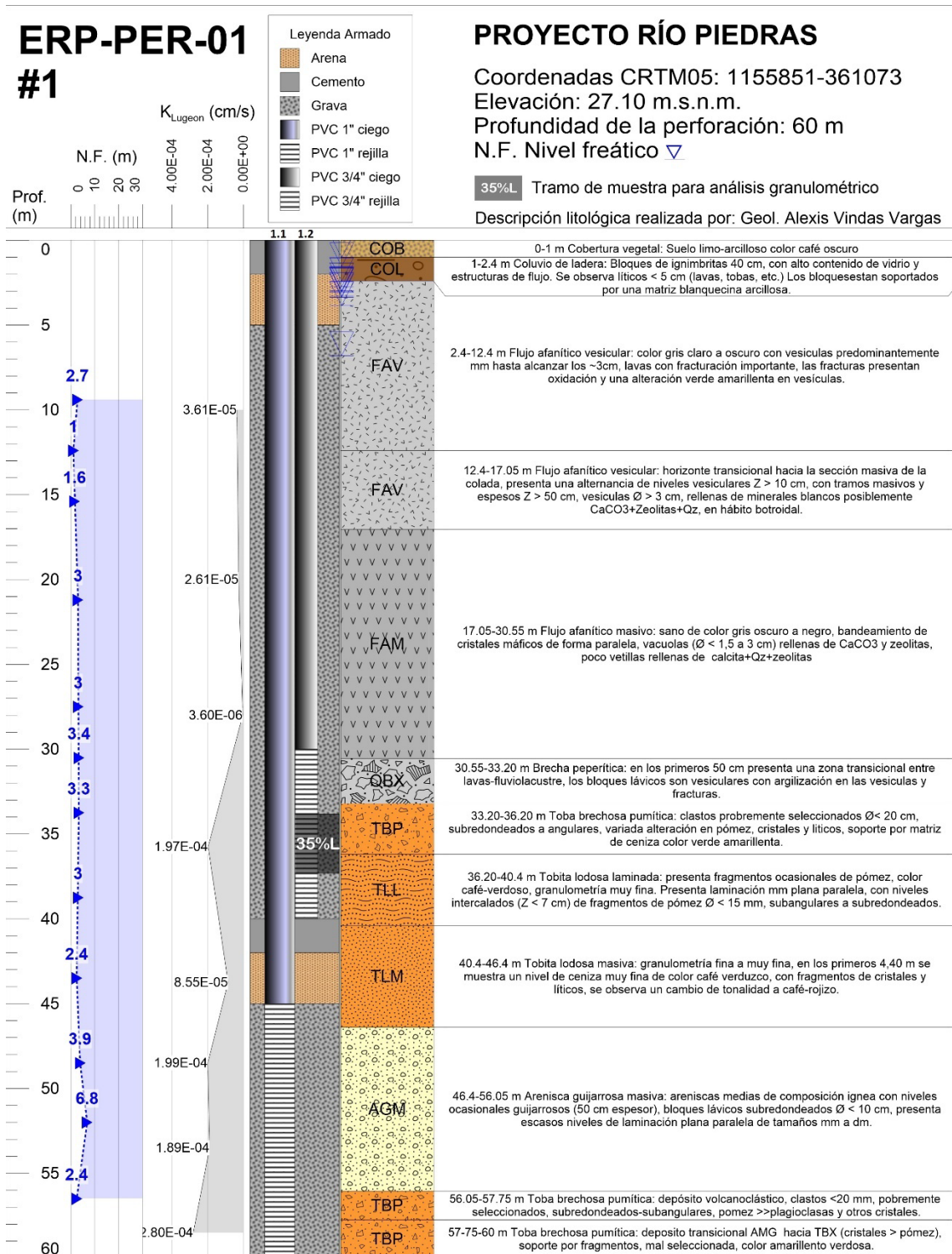
- Smith, L & Weathcraft, S. (1993). Groundwater Flow, Cap VI. En: Handbook Hydrology. US, Ed. McGraw Hill.
- Suarez, M.J. (2014). Evaluación Hidrogeológica del Relleno Sanitario Rio Azul (Tesis MSc). Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Sultan Araffa S. A., Sabet H. S., Gaweish W. R. (2015). Integrated geophysical interpretation for delineating the structural elements and groundwater aquifers at central part of Sinai Peninsula, Egypt. -Journal of African Earth Sciences (105), 93–106.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E. (1976). Applied Geophysics, 2da Edition. New York, U.S. Ed. Cambridge.
- Toda Corp. (2016). TDEM método de exploración: túnel de Nagasaki Izuhara.- http://www.toda.co.jp/tech/infra/infra_14.html
- Todd, D. K. (1959). Ground water hydrology. - Journal Royal Meteorological Society, (87), 336.
- Tóth, J. (1980). Cross-formational gravity-flow of groundwater: A mechanism of the transport and accumulation of petroleum (the generalized hydraulic theory of petroleum migration). In *Problems of Petroleum Migration*. AAPG Studies in Geology, American Association of Petroleum Geologist (10), 121-167.
- Tournon, J. (1984). Magmatisme du Mesozoique a l'actual en America Centrale: L'exemple Costa Rica, des aphiolites aux andesites. (Tesis Ph.D). Univ. Pierre y Marie Curie, Isla de Francia, Francia
- Udías, A., & Mezcuca., J. (1997). Fundamentos de Geofísica. Madrid, España, Ed Alianza

- Urrutia G, L., & Arias, S.M. (2006). Hidrogeología de la cuenca del Río San Antonio, El Salvador: aplicación al modelo conceptual y vulnerabilidad intrínseca. *Rev. Geol. de Am. Central*, (34-35), 121-129.
- Vargas, A. (2002). Diagnóstico de los recursos hídricos subterráneos en la zona Guanacaste Norte. (Inf. Tec.). SENARA, San José, Costa Rica.
- Vargas, A. (2003) Estimación de caudales de bombeo y abatimientos en el acuífero inferior del PH Angostura por métodos numéricos. *Rev. Tecnología en Marcha*, 16(3), 116-128
- Vargas, A. (2016) Influencia del sismo de Golfito del 30 de julio de 2002 (Mw 6,2) sobre una prueba de bombeo en el acuífero confinado del sitio de presa del P.H. Pirrís, Costa Rica. *Rev. Geol. De Am. Central*, (54), 143-153. DOI: 10.15517/rgac.v54i0.21151
- Vargas A, & Cervantes, F. (2000) Caracterización de acuíferos en el área de la presa del proyecto hidroeléctrico Angostura, Turrialba, Costa Rica. *Rev. Geológica de Am Central* (23): 65-76. DOI 10.15517/RGAC.V0I23.8581
- Vargas, A. & Fernández, J.F., (2002) Aspectos hidrogeológicos en el sitio del embalse Cipreses, P.H. Cariblanco y aplicación de trazadores en agua subterránea. *Rev. Geológica de Amér. Central*, (27), 133-142.
- Van Dam, J.C., & Meulenkaamp, J.J. (1967). Some results of the geoelectrical resistivity method in groundwater investigation in the Netherlands, *Bull. Geophys Prosp.* (15), 92-115.
- Voss, C. (2005). "The future of hydrogeology". *J. Hydrogeol.* (13), 1-6.
- Waldron, J., (2005). Extensional fault arrays in strike-slip and transtension. *Journal of Structural Geology* (27) 23-34 doi:10.1016/j.jsg.2004.06.015

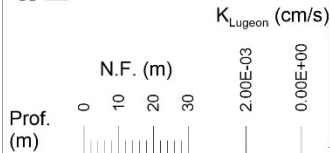
- Weight, W.S. (2008). Hydrogeology Field Manual. New York, U.S. Ed. Mc Graw-Hill
- Yogeshwar P., Tezkan B., Israil M., & Candansayar M.E., (2012). Groundwater contamination in the Roorkee area, India: 2D joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. J. of Applied Geophysics (76), 127-135.
- Zohdy, A.A. (1969). The use Schlumberger and equatorial sounding in groundwater investigation near, El Paso Texas. Bull. Geophysics (24), 5.
- Zuñiga, M. H. (2006). Caracterización hidrogeológica del acuífero Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica (Tesis MSc). Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica

XIV. ANEXOS

14.1 Registro de las Perforaciones modificados de ICE (2018)



ERP-PER-02 #2



- Legenda Armado**
- Arena
 - Cemento
 - Grava
 - PVC 1" ciego
 - PVC 1" rejilla
 - PVC 3/4" ciego
 - PVC 3/4" rejilla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155849-361232

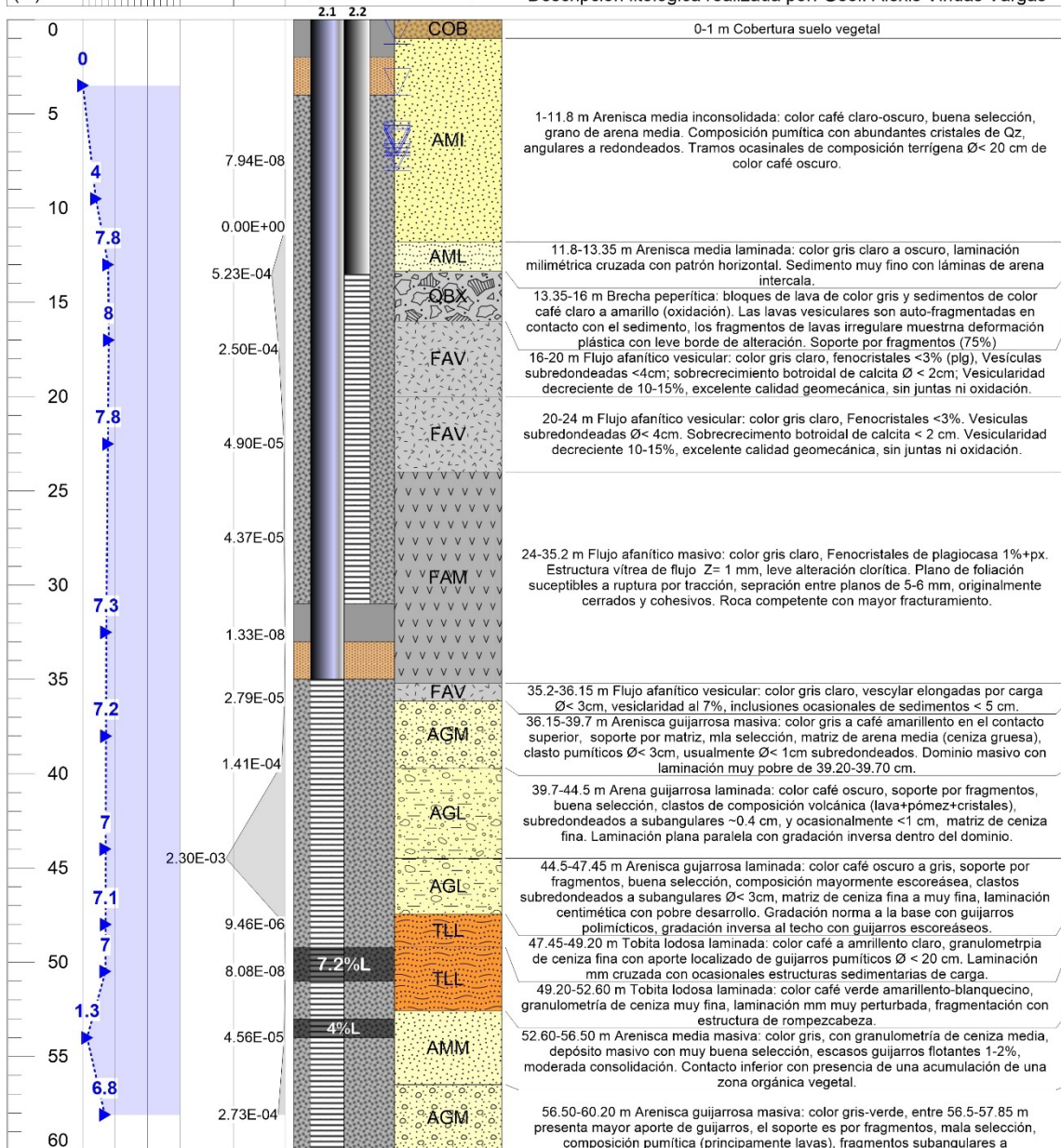
Elevación: 26.80 m.s.n.m.

Profundidad de la perforación: 60 m

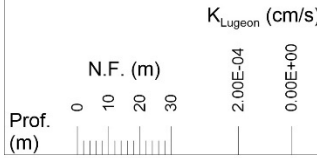
N.F. Nivel freático ▽

7.2%L Tramo de muestra para análisis granulométrico

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-03 #3



- Legenda Armado**
- Arena
 - Cemento
 - Grava
 - PVC 1" ciego
 - PVC 1" rejilla
 - PVC 3/4" ciego
 - PVC 3/4" rejilla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155846-361422

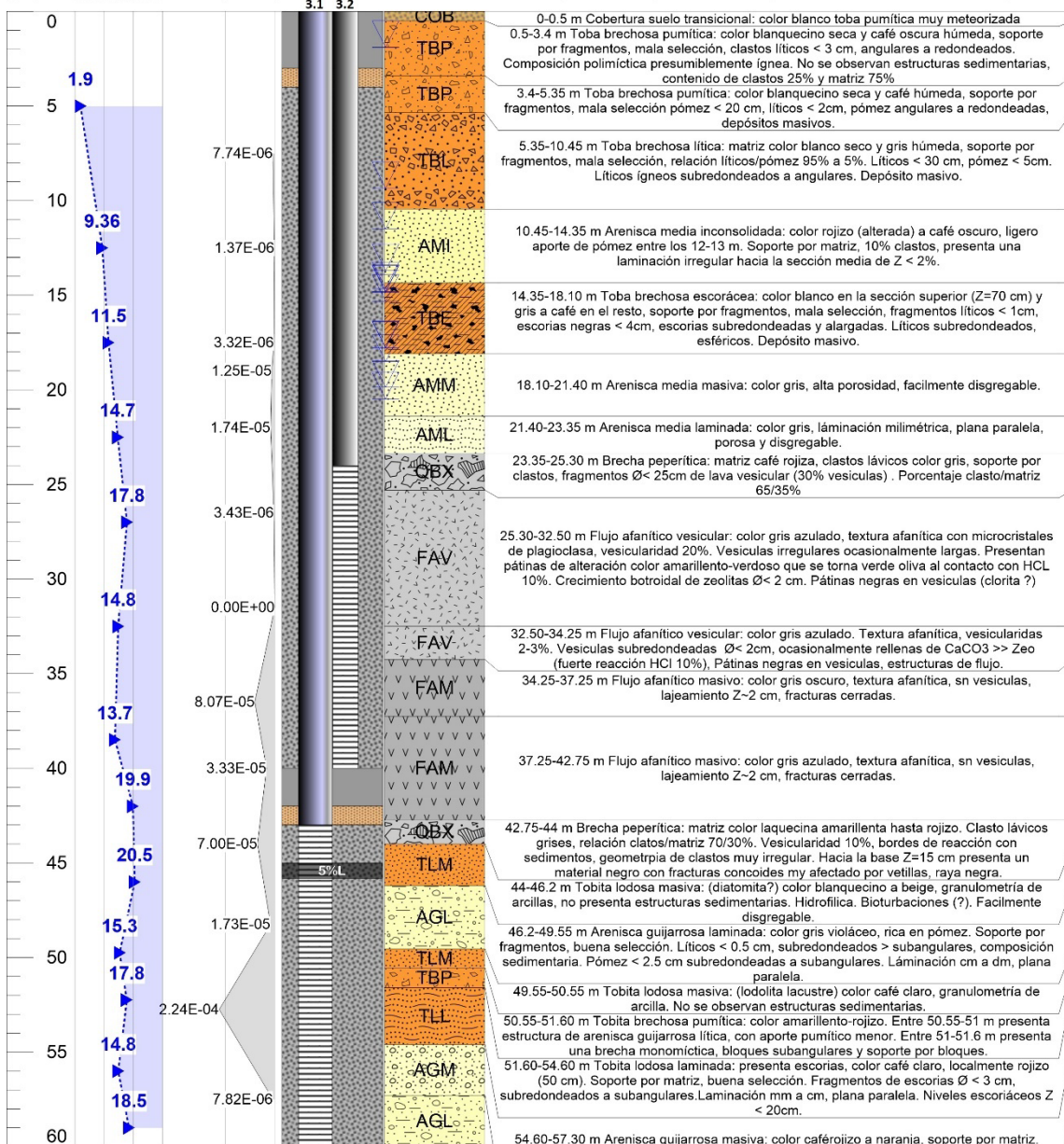
Elevación: 39.35 m.s.n.m.

Profundidad de la perforación: 60 m

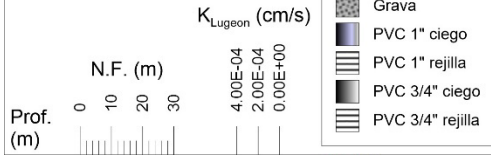
N.F. Nivel freático

5%L Tramo de muestra para análisis granulométrico

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-04 #4



- Legenda Armado**
- Arena
 - Cemento
 - Grava
 - PVC 1" ciego
 - PVC 1" rejilla
 - PVC 3/4" ciego
 - PVC 3/4" rejilla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155896-361091

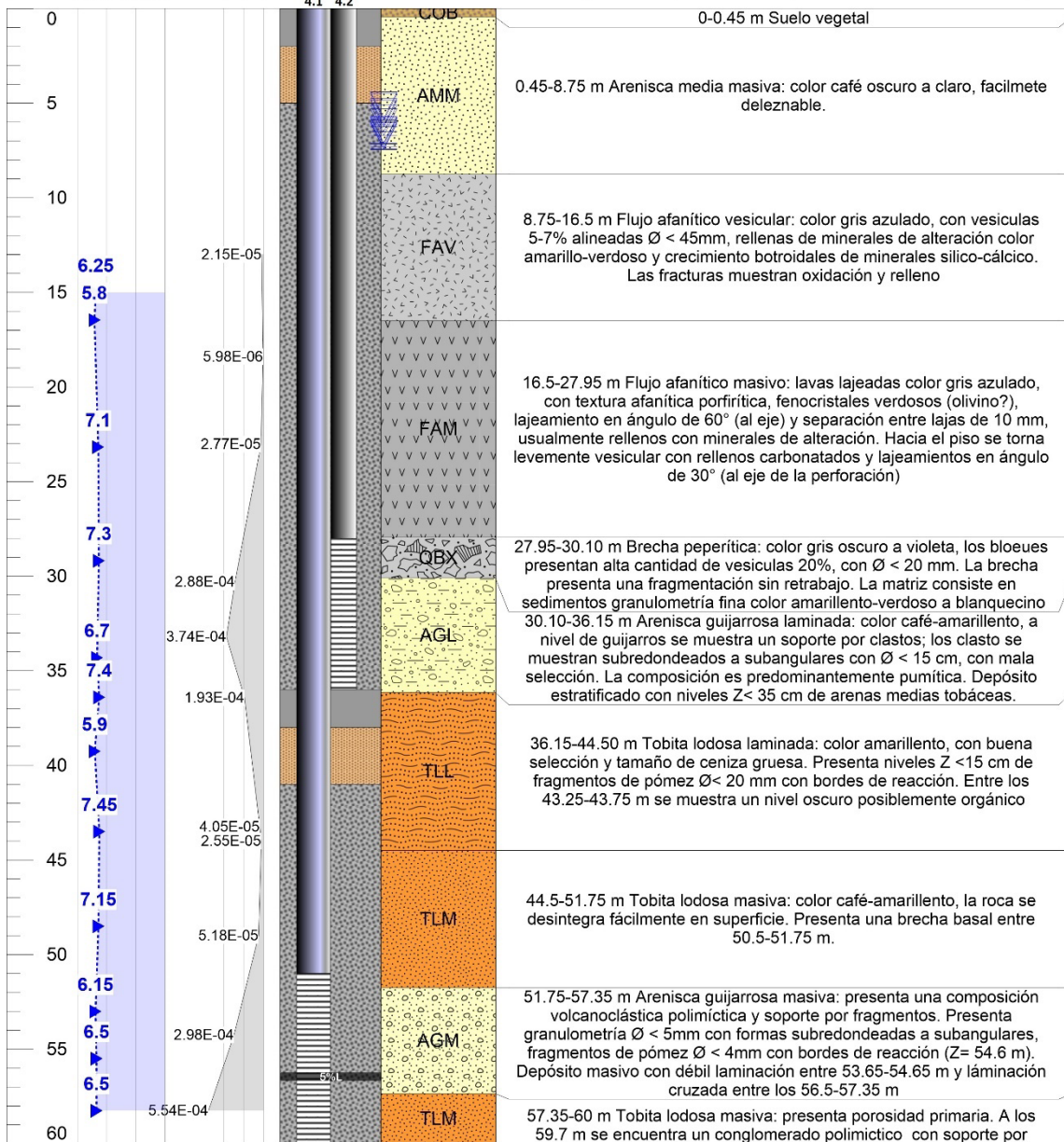
Elevación: 26.46 m.s.n.m.

Profundidad de la perforación: 60 m

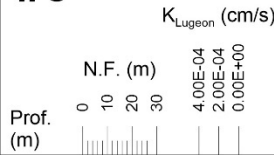
N.F. Nivel freático ▽

5%L Tramo de muestra para análisis granulométrico

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-05 #5



- Legenda Armado**
- Arena
 - Cemento
 - Descubierta
 - Grava
 - PVC 1/2" ciego
 - PVC 1/2" rejilla
 - Zona Falla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155898-361152

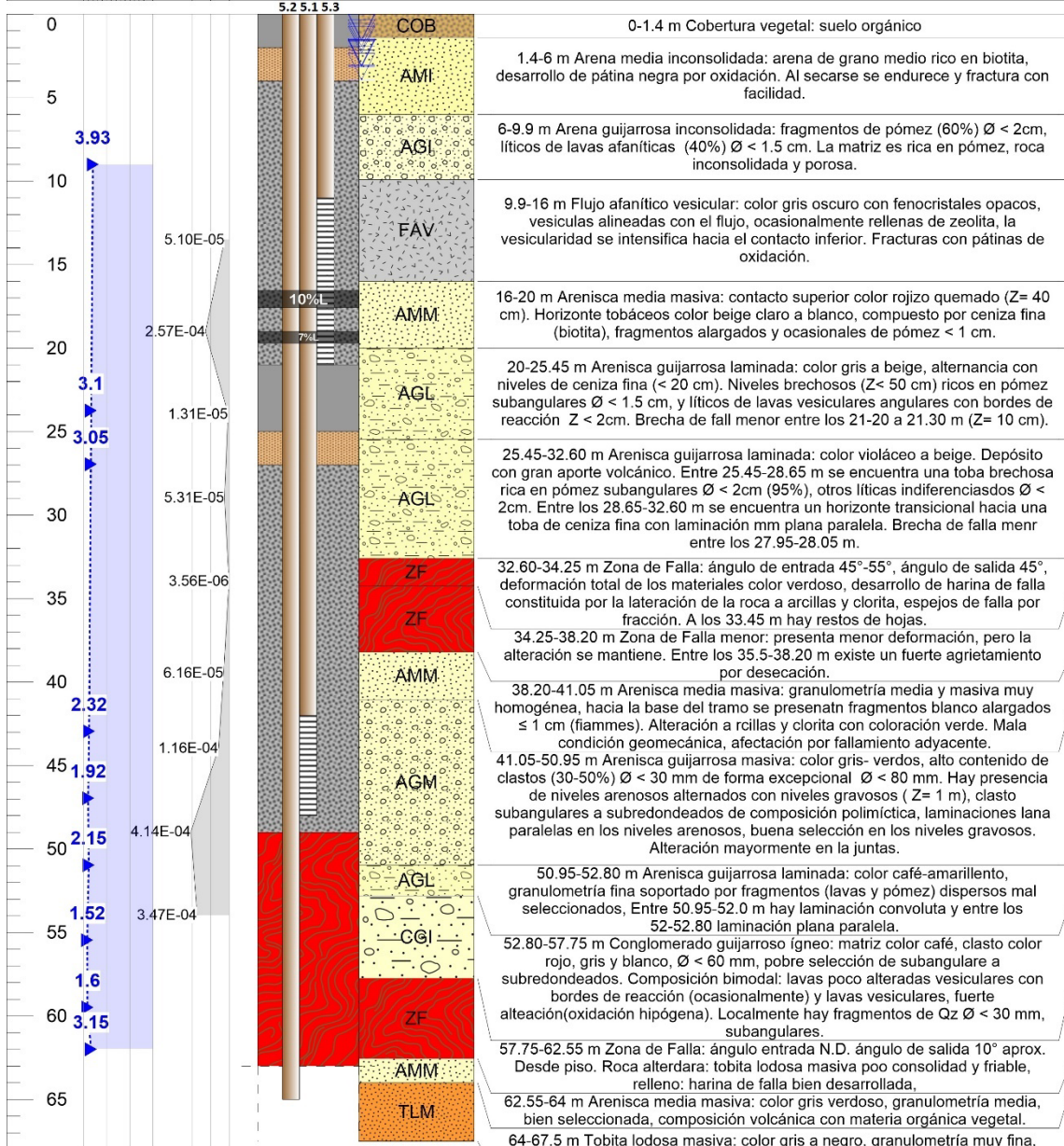
Elevación: 22.11 m.s.n.m.

Profundidad de la perforación: 67.5 m

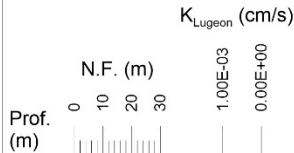
N.F. Nivel freático

10%L Tramo de muestra para análisis granulométrico

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-06 #6



- Legenda Armado**
- Arena
 - Cemento
 - Grava
 - PVC 1/2" ciego
 - PVC 1/2" rejilla
 - PVC 3/4" ciego
 - PVC 3/4" rejilla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155894-361277

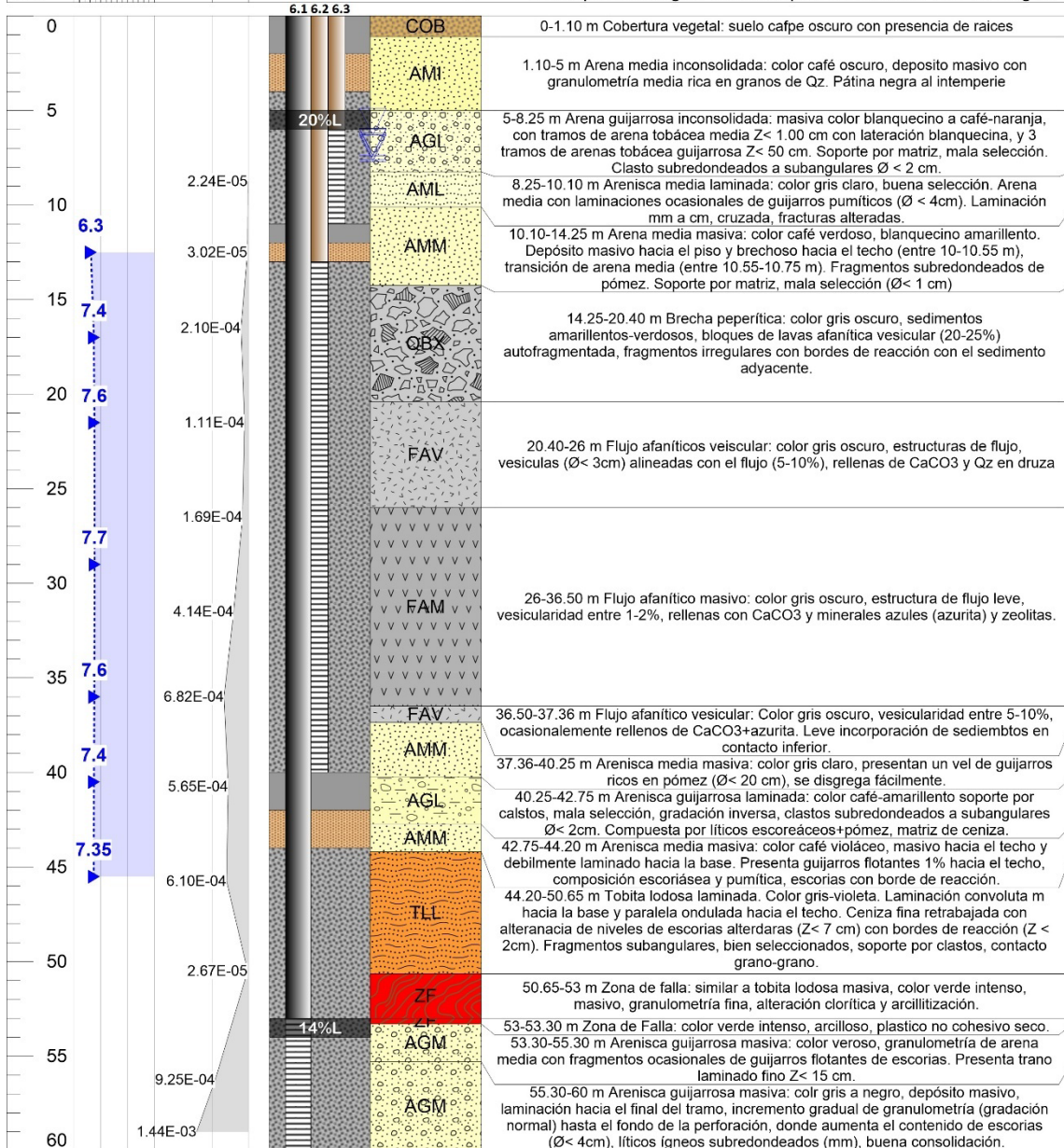
Elevación: 26.68 m.s.n.m.

Profundidad de la perforación: 60 m

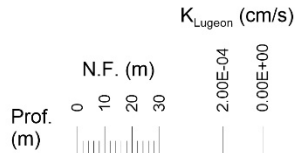
N.F. Nivel freático

20%L Tramo de muestra para análisis granulométrico

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-07 #7



- Legenda Armado
- Arena
 - Cemento
 - Grava
 - PVC 1" ciego
 - PVC 1" rejilla
 - PVC 3/4" ciego
 - PVC 3/4" rejilla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

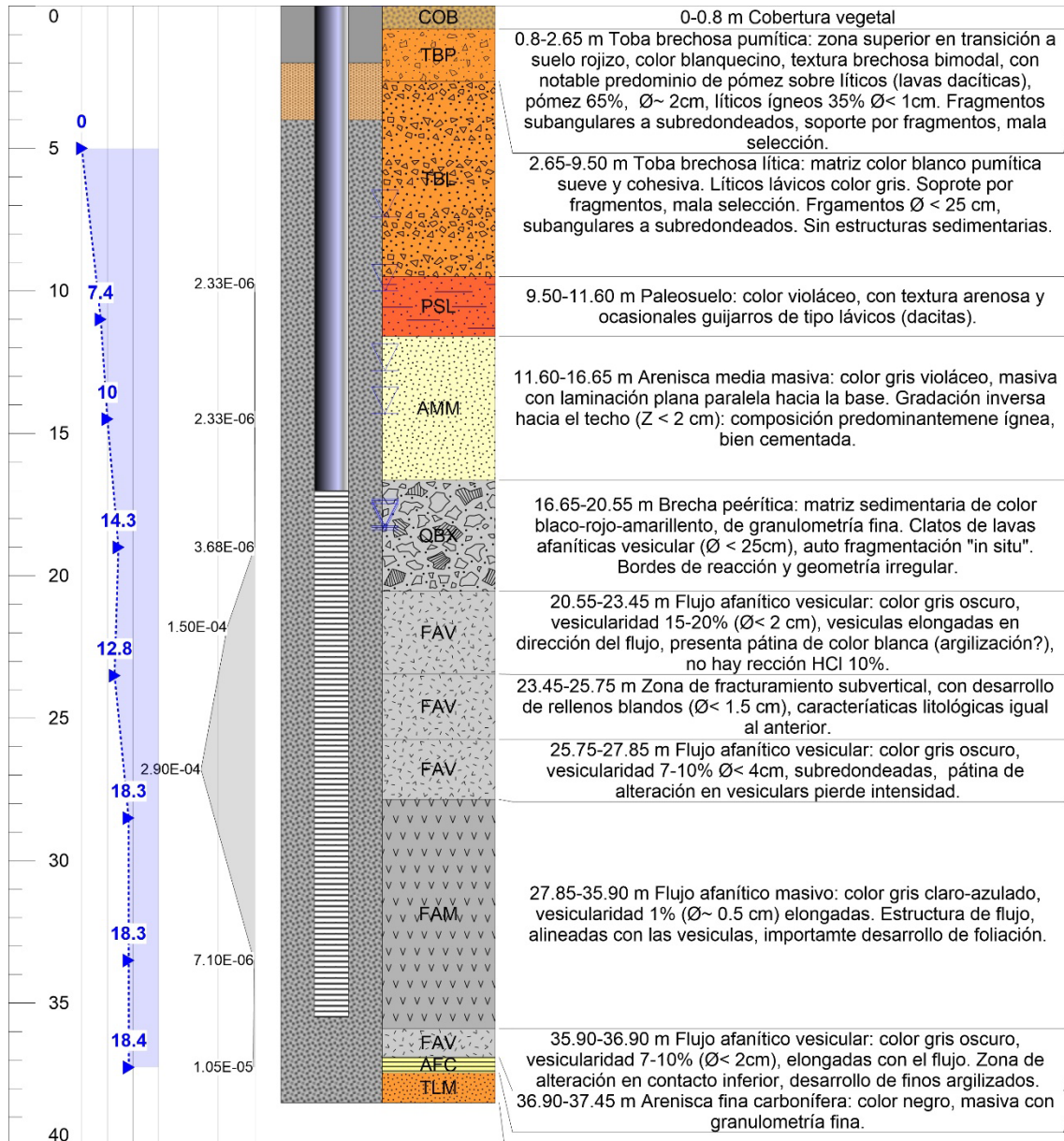
Coordenadas CRTM05: 1155745-361420

Elevación: 36.45 m.s.n.m.

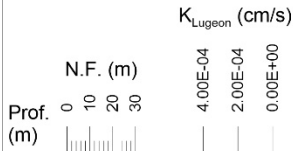
Profundidad de la perforación: 38.50 m

N.F. Nivel freático

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-08 #8



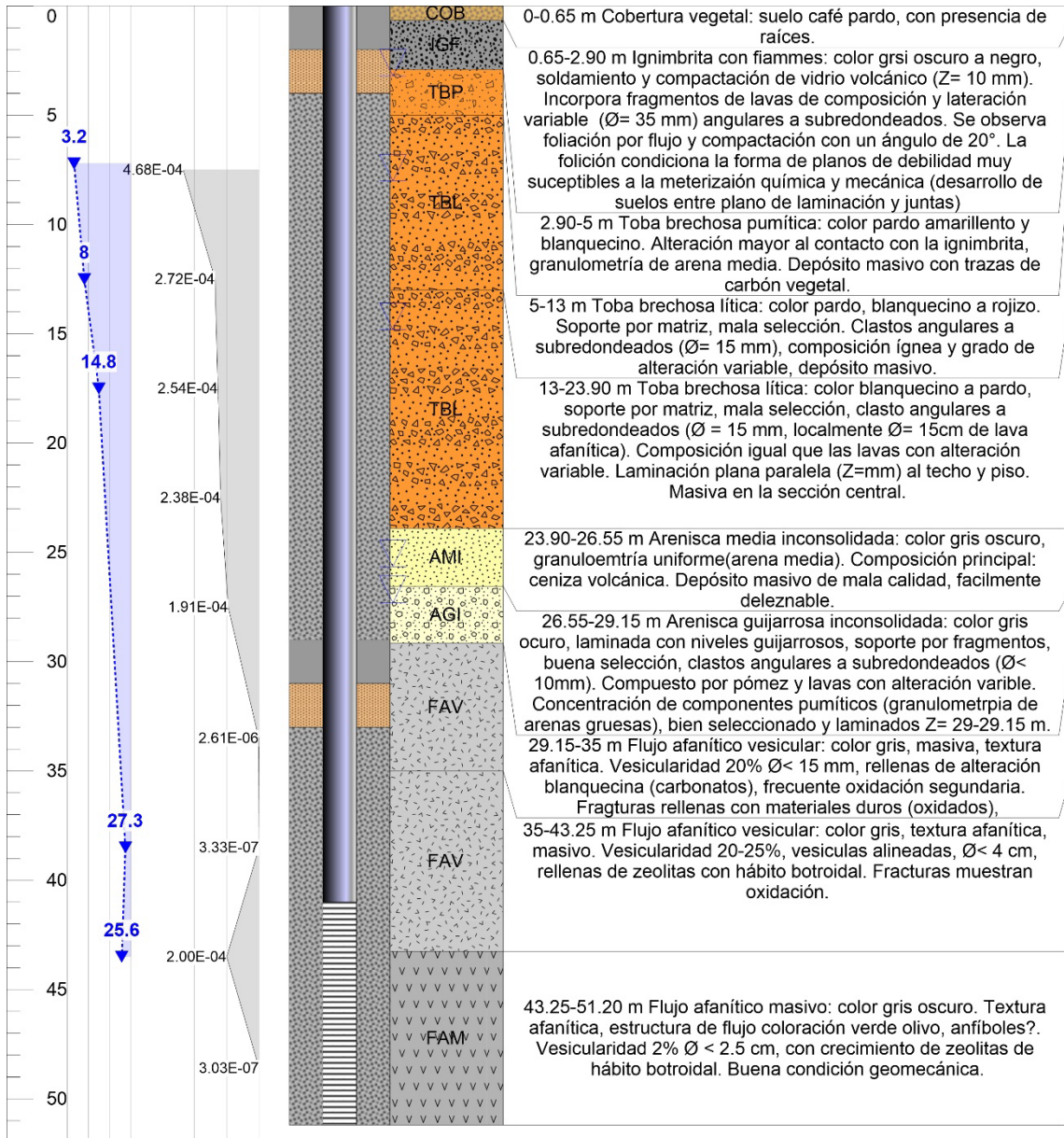
Legenda Armado

- Arenas
- Cemento
- Grava
- PVC 1" ciego
- PVC 1" rejilla
- PVC 3/4" ciego
- PVC 3/4" rejilla

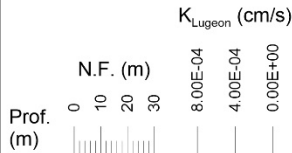
PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155817-360864
Elevación: 52.05 m.s.n.m.
Profundidad de la perforación: 51.20 m
N.F. Nivel freático ∇

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-12 #12



- Legenda Armado
- Arena
 - Cemento
 - Grava
 - PVC 1" ciego
 - PVC 1" rejilla
 - PVC 3/4" ciego
 - PVC 3/4" rejilla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155747-360771

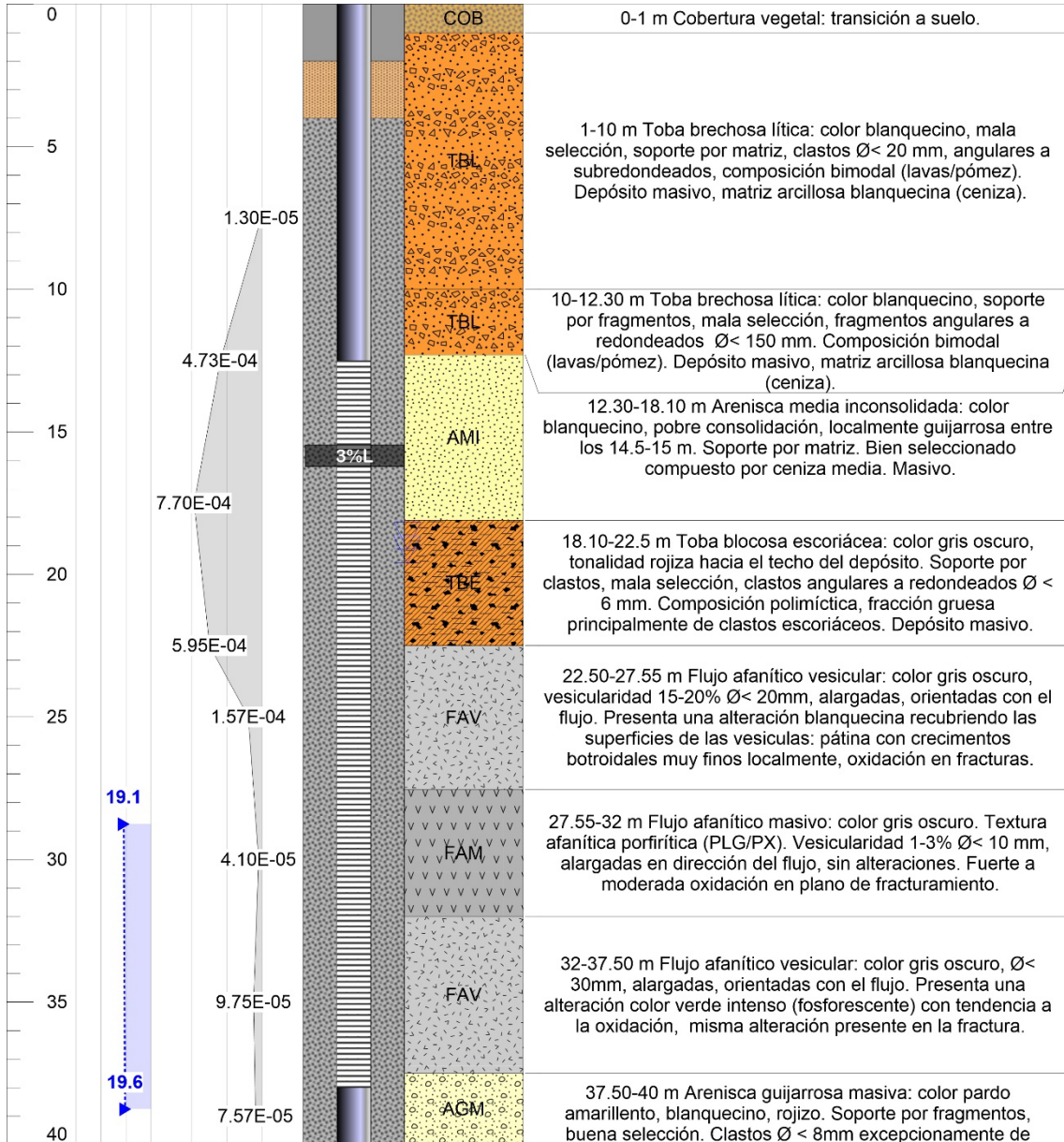
Elevación: 45.20 m.s.n.m.

Profundidad de la perforación: 40 m

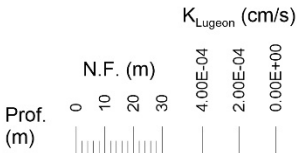
N.F. Nivel freático ▽

3%L Tramo de muestra para análisis granulométrico

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-13 #13



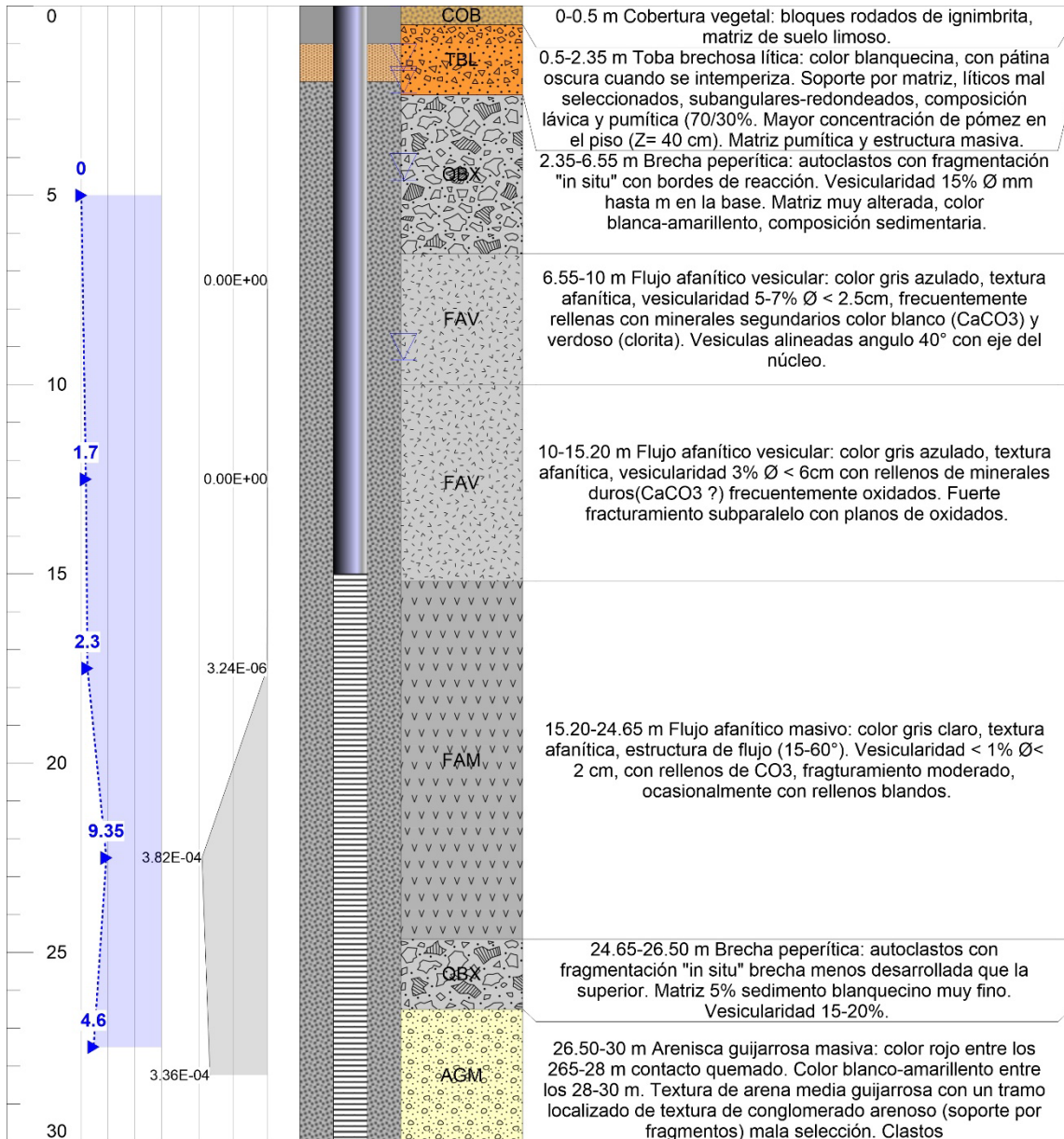
Legenda Armado

- Arena
- Cemento
- Grava
- PVC 1" ciego
- PVC 1" rejilla
- PVC 3/4" ciego
- PVC 3/4" rejilla

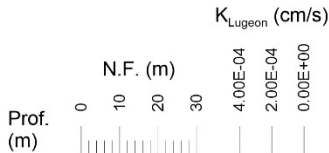
PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155585-360980
 Elevación: 33.66 m.s.n.m.
 Profundidad de la perforación: 30 m
 N.F. Nivel freático

Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



ERP-PER-14 #14

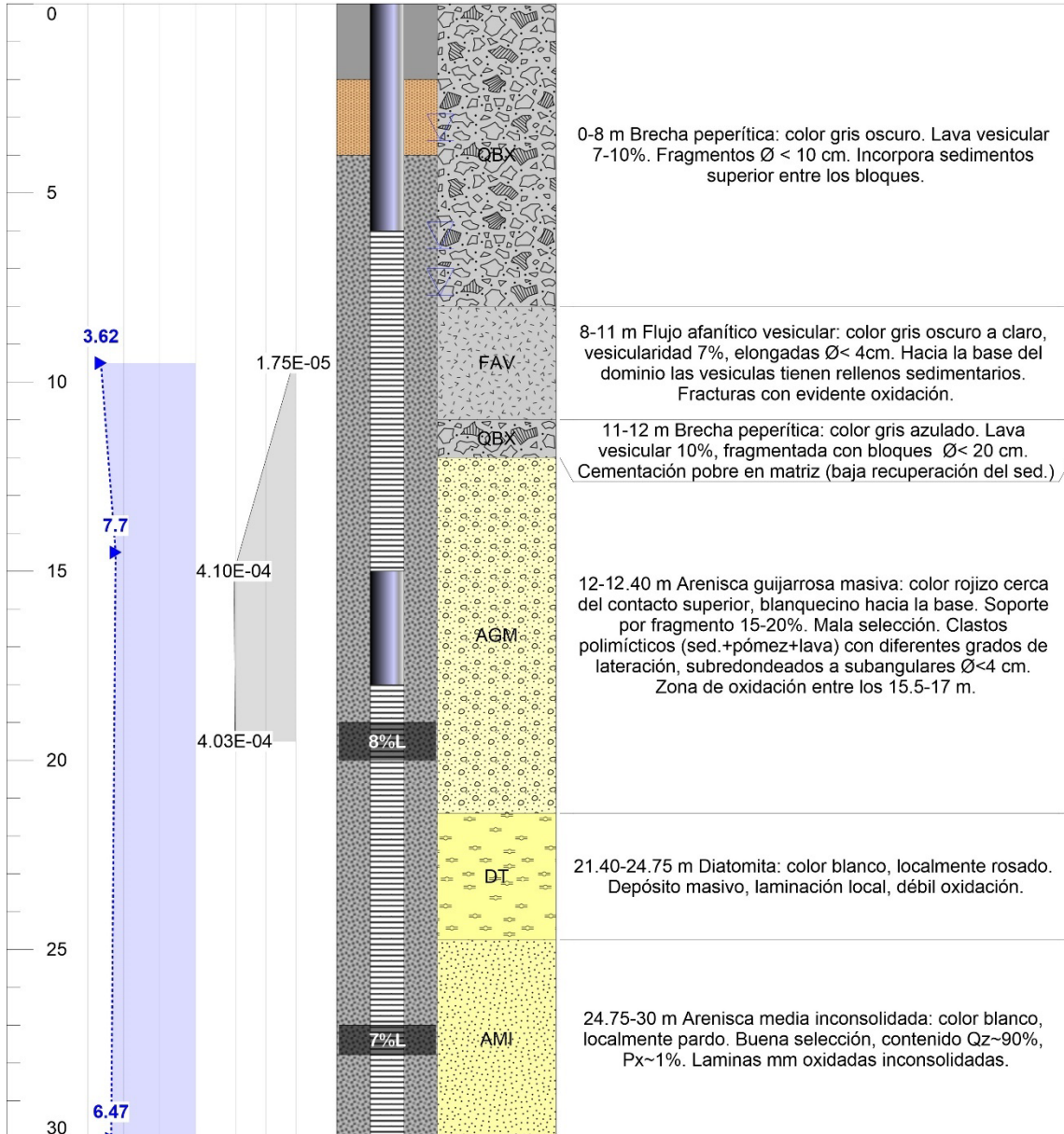


- Legenda Armado
- Arena
 - Cemento
 - Grava
 - PVC 1" ciego
 - PVC 1" rejilla
 - PVC 3/4" ciego
 - PVC 3/4" rejilla

PROYECTO RÍO PIEDRAS

Coordenadas CRTM05: 1155420-360998
 Elevación: 25.71 m.s.n.m.
 Profundidad de la perforación: 30 m
 N.F. Nivel freático ∇

8%L Tramo de muestra para análisis granulométrico
 Descripción litológica realizada por: Geol. Alexis Vindas Vargas



TE-57

Coordenadas: 1153637,13N/356684,46E
 Elevación: 63,4 m
 Profundidad: 26 m
 Caudal: 0,5 l/s
 NE: 13 m ND: 15 m

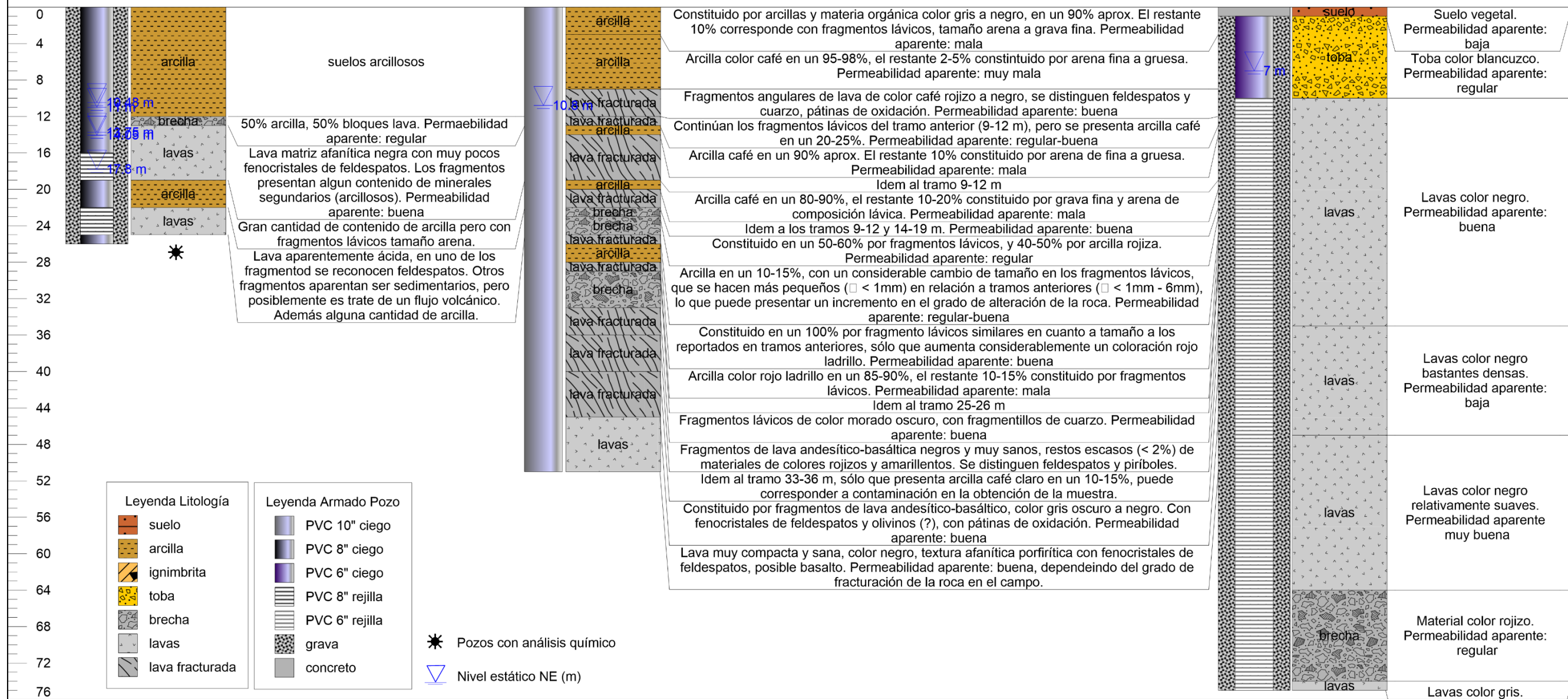
Prof. (m) Uso: doméstico, Año: 1984

TE-58

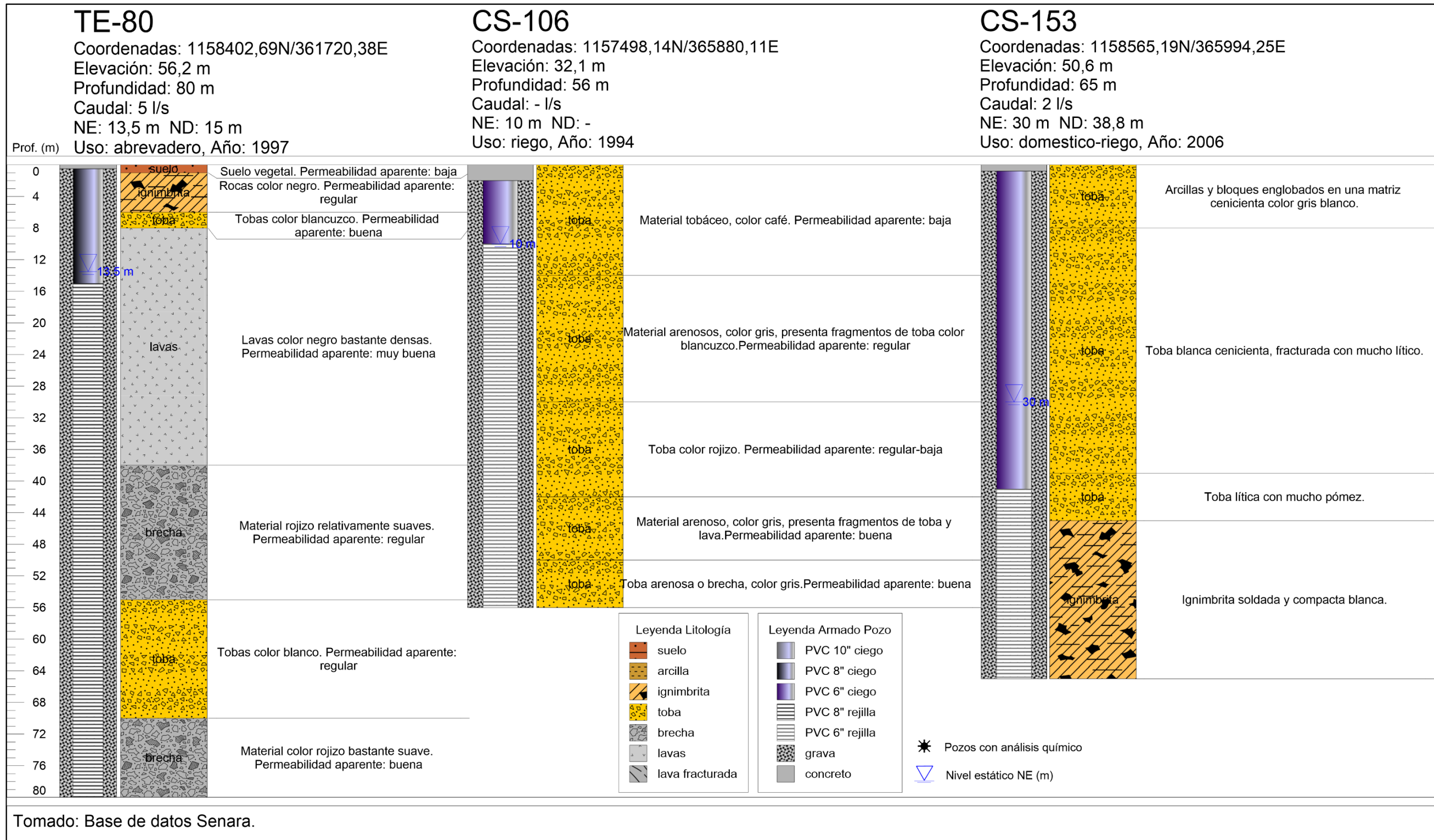
Coordenadas: 1153637,13N/356684,46E
 Elevación: 114 m
 Profundidad: 52 m
 Caudal: 0,5 l/s
 NE: 10,8 m ND: -
 Uso: doméstico, Año: 1984

TE-79

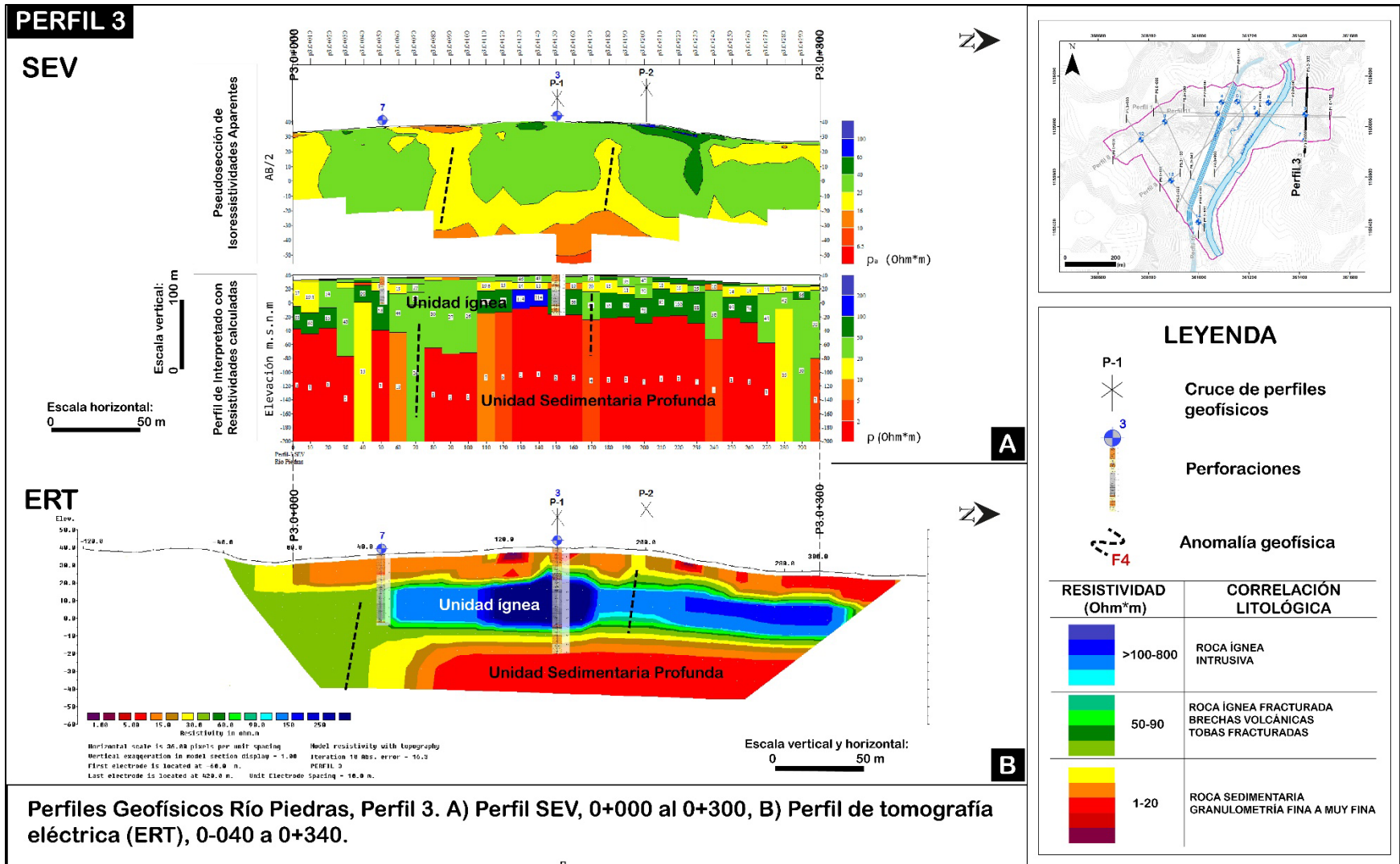
Coordenadas: 1157604,14N/360219,27E
 Elevación: 32,5 m
 Profundidad: 75 m
 Caudal: 5 l/s
 NE: 7 m ND: 10 m
 Uso: abrevadero, Año: -

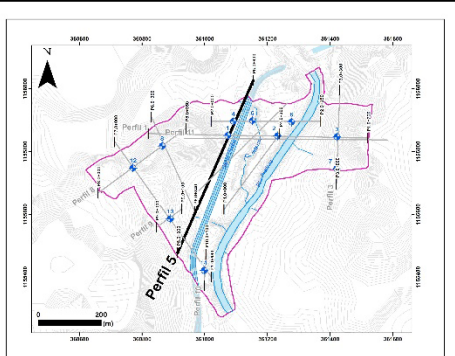
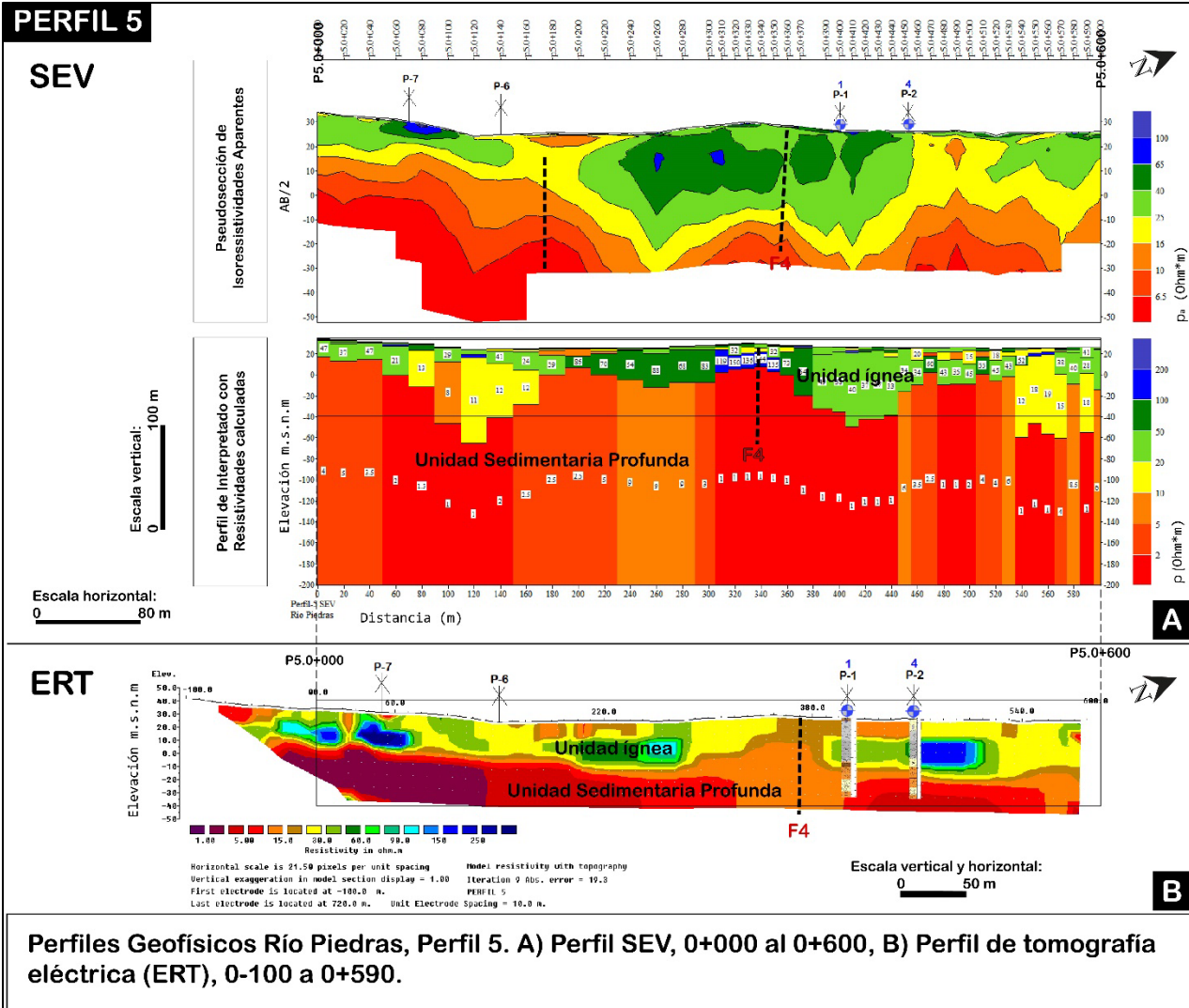


Tomado: Base de datos Senara.



14.2 Perfiles geofísicos



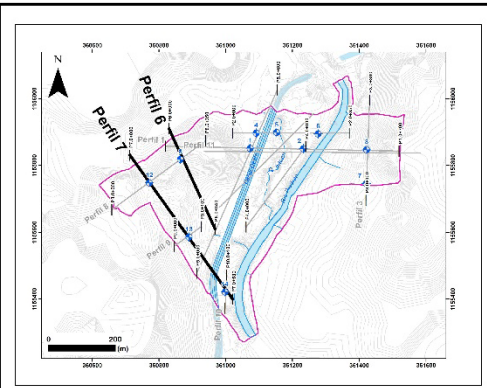
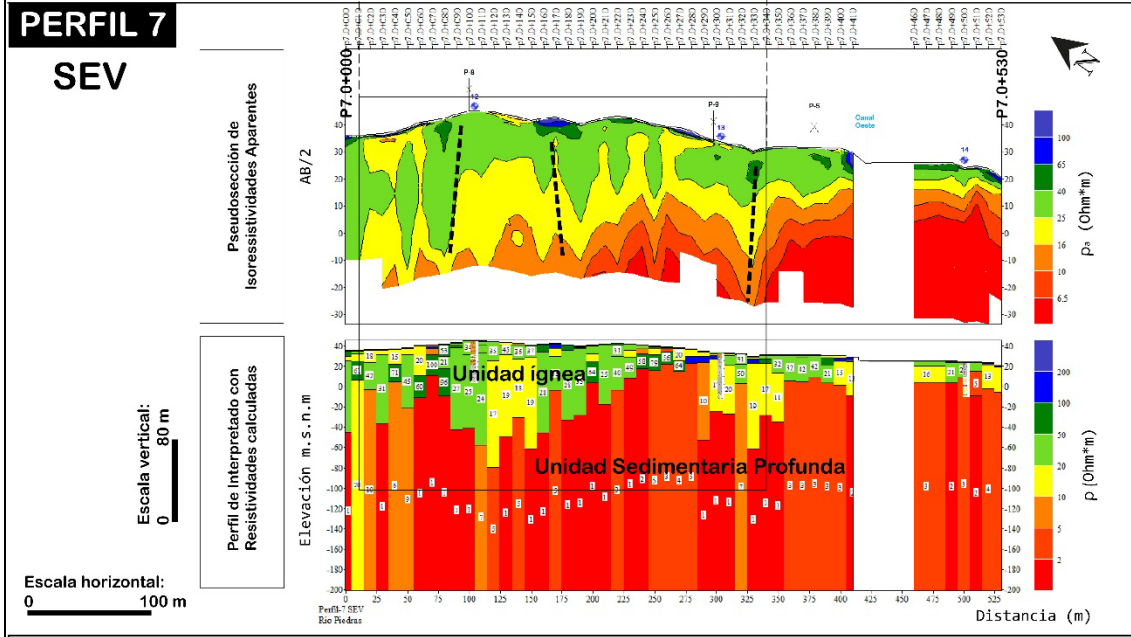
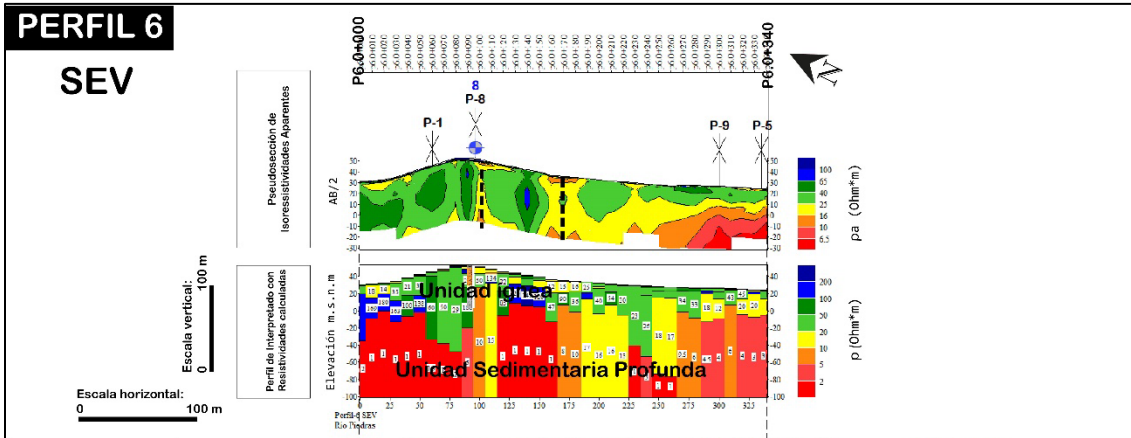


LEYENDA

- P-1: Cruce de perfiles geofísicos
- 3: Perforaciones
- F4: Anomalia geofísica

RESISTIVIDAD (Ohm·m)	CORRELACIÓN LITOLÓGICA
>100-800	ROCA ÍGNEA INTRUSIVA
50-90	ROCA ÍGNEA FRACTURADA BRECHAS VOLCÁNICAS TOBAS FRACTURADAS
1-20	ROCA SEDIMENTARIA GRANULOMETRÍA FINA A MUY FINA

Perfiles Geofísicos Río Piedras, Perfil 5. A) Perfil SEV, 0+000 al 0+600, B) Perfil de tomografía eléctrica (ERT), 0-100 a 0+590.



LEYENDA

P-1

13

F4

Cruce de perfiles geofísicos

Perforaciones

Anomalia geofísica

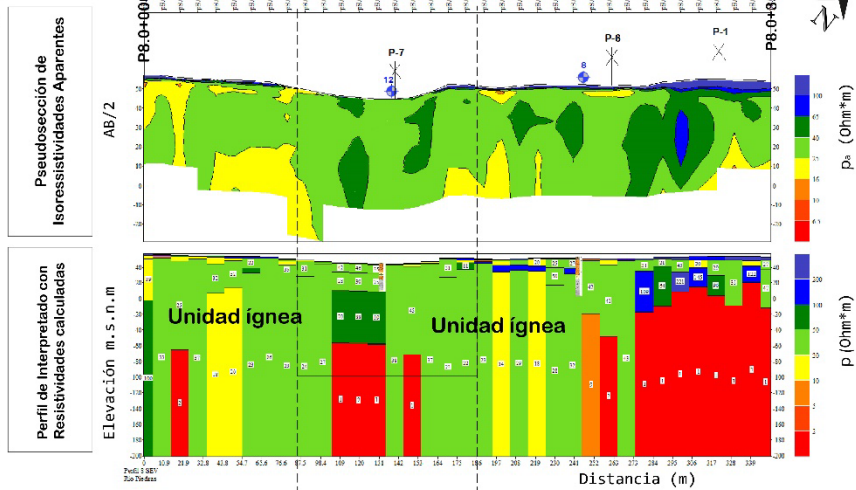
RESISTIVIDAD (Ohm*m)	CORRELACIÓN LITOLÓGICA
>100-800	ROCA ÍGNEA INTRUSIVA
50-90	ROCA ÍGNEA FRACTURADA BRECHAS VOLCÁNICAS TOBAS FRACTURADAS
1-20	ROCA SEDIMENTARIA GRANULOMETRÍA FINA A MUY FINA

Comparación de Perfiles Geofísicos SEV, Río Piedras: Perfil 6 y Perfil 7.

PERFIL 8

SEV

Escala horizontal: 0 50 m
Escala vertical: 0 100 m

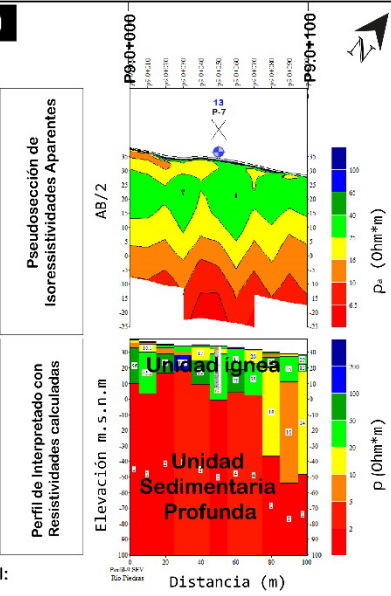


Comparación de Perfiles Geofísicos SEV, Río Piedras: Perfil 8, Perfil 9 y Perfil 10. Perfiles 8 y 9 son paralelos entre si.

PERFIL 9

SEV

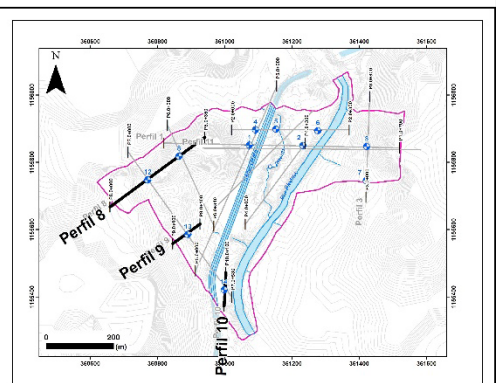
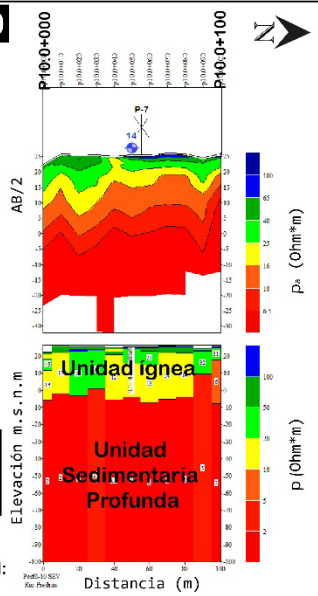
Escala horizontal: 0 50 m
Escala vertical: 0 50 m



PERFIL 10

SEV

Escala horizontal: 0 50 m
Escala vertical: 0 50 m




LEYENDA


- P-1 Cruce de perfiles geofísicos
- 13 Perforaciones
- F4 Anomalia geofísica

RESISTIVIDAD ($\Omega\cdot m$)	CORRELACIÓN LITOLÓGICA
	ROCA ÍGNEA INTRUSIVA
	ROCA ÍGNEA FRACTURADA BRECHAS VOLCÁNICAS TOBAS FRACTURADAS
	ROCA SEDIMENTARIA GRANULOMETRÍA FINA A MUY FINA

14.3 Tabla de resultados del análisis de fraccionamiento de arenas, CIA-UCR.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS
LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES
REPORTE DE ENSAYO




N° DE REPORTE: 76162

USUARIO: MAUREEN BONILLA HIDALGO
 SUBCIENTE: TESIS DE MAESTRIA
 RESPONSABLE: MAUREEN BONILLA HIDALGO
 CORREO:
 TELÉFONO:

PROVINCIA: GUANACASTE
 CANTÓN: BAGACES
 LOCALIDAD: BAGACES
 CULTIVO: ROCAS TRITURADAS

ANÁLISIS:
 FECHA RECEPCIÓN:
 EMISIÓN DE REPORTE:
 N° DE MUESTRAS TOTAL:
 PÁGINA:

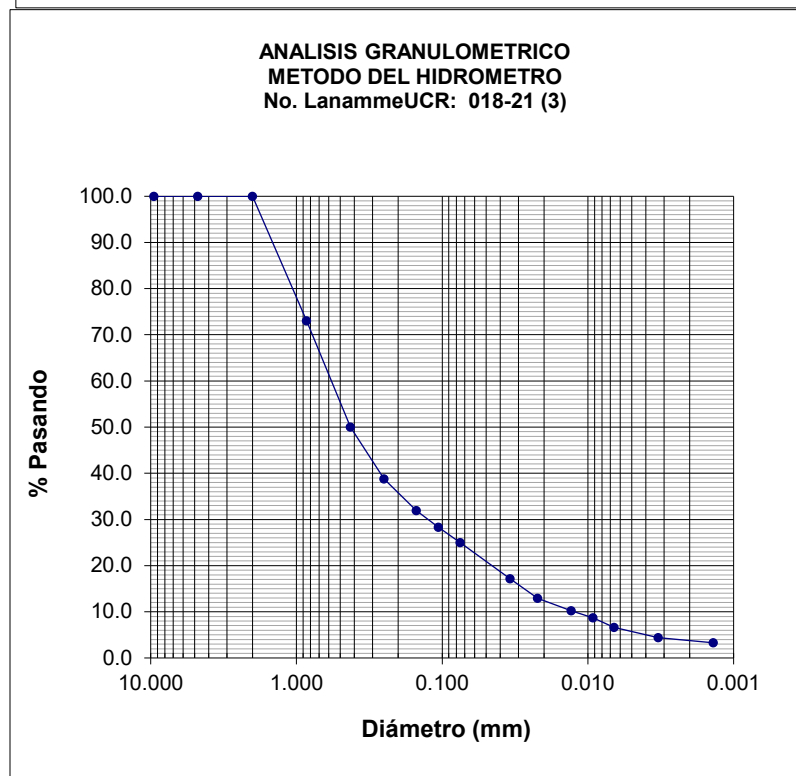
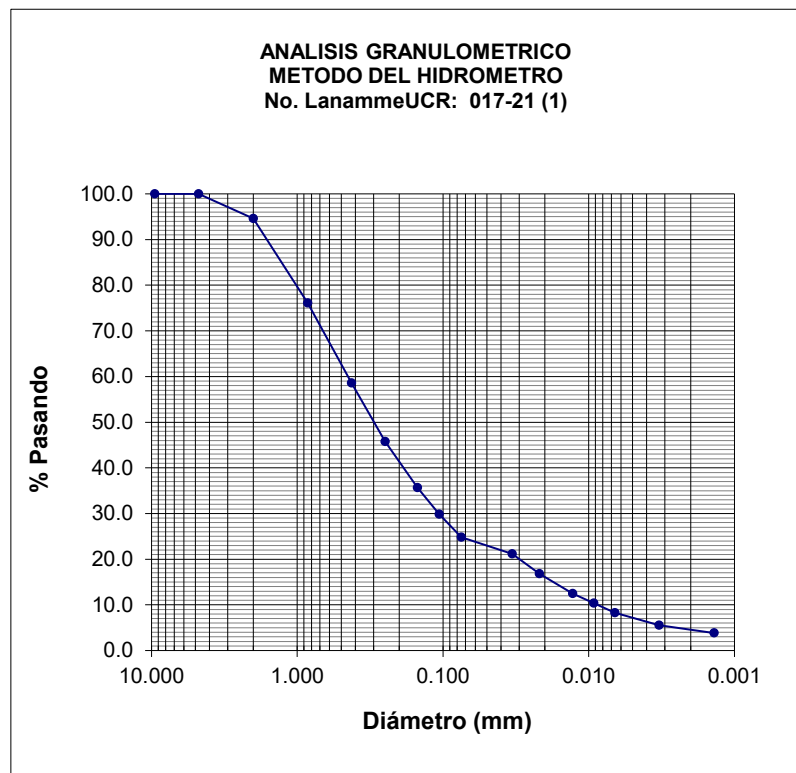
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN SUELOS							
ID USUARIO	ID LAB	ID USUARIO	%				
			1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
REF RN - 20 - 1336 - 1.2	RN-20-00005	1.2	8	18	17	15	9
REF RN - 20 - 1341 - 3	RN-20-00006	3	11	26	19	11	7
REF RN - 20 - 1342 - 4	RN-20-00007	4	13	23	17	17	7
REF RN - 20 - 1343 - 5A	RN-20-00008	5A	15	18	17	19	9
REF RN - 20 - 1344 - 5B	RN-20-00009	5B	11	14	16	16	15
REF RN - 20 - 1345 y RN - 20 - 1346 - 6	RN-20-00010	6A	10	16	24	14	14
REF RN - 20 - 1348 - 12	RN-20-00011	12	0.0	0.3	5	57	15
REF RN - 20 - 1349 - 14A	RN-20-00012	14A	13	20	24	15	10
REF RN - 20 - 1350 - 14B	RN-20-00013	14B	1	4	23	42	12

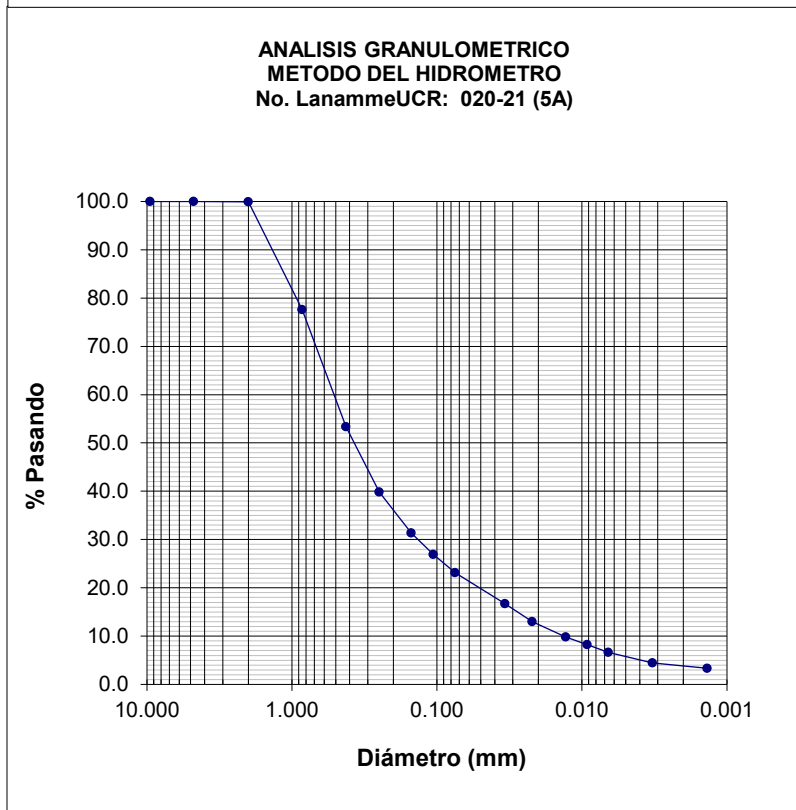
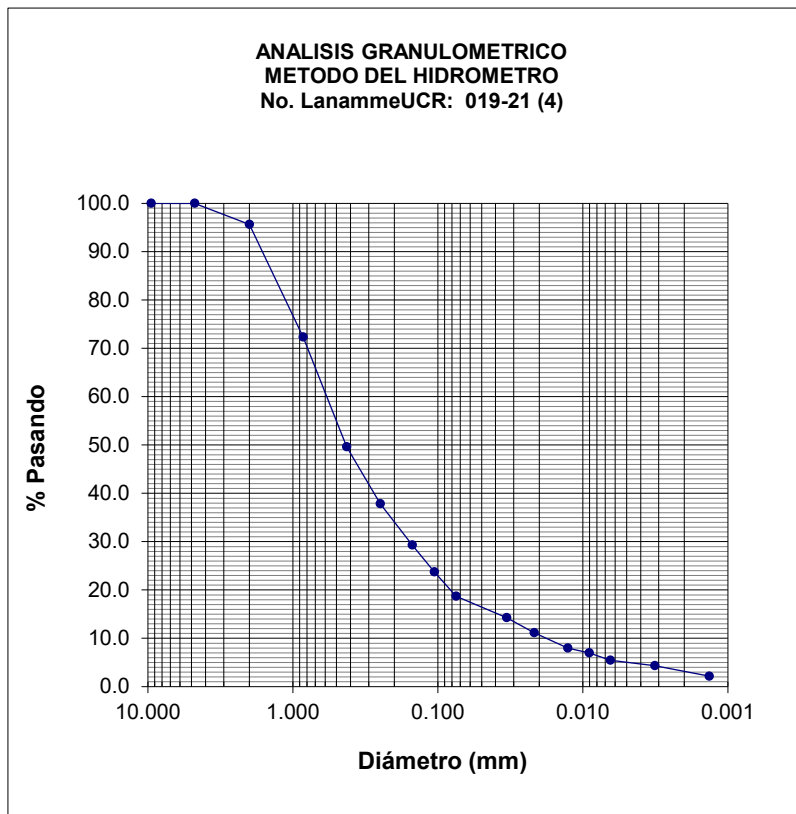


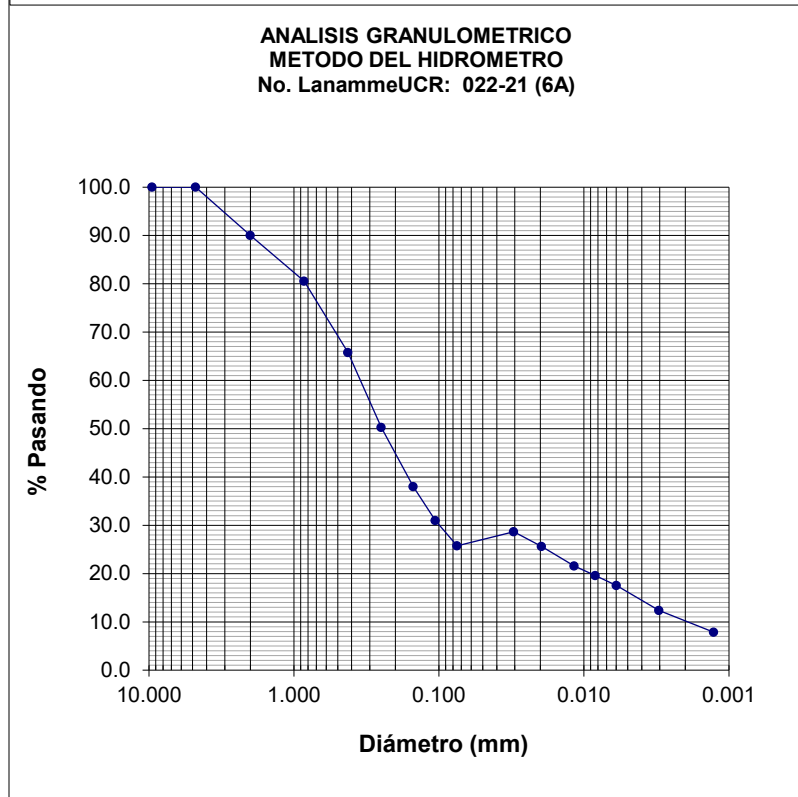
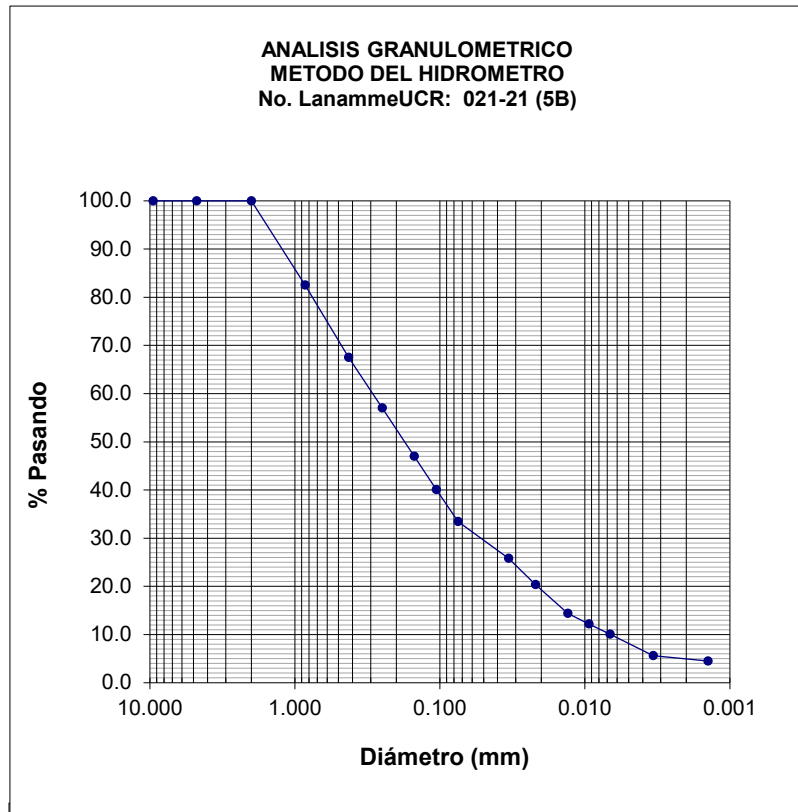
Ing. Agr. Rafael Mata Chinchilla M.Sc.
COORDINADOR DEL LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES

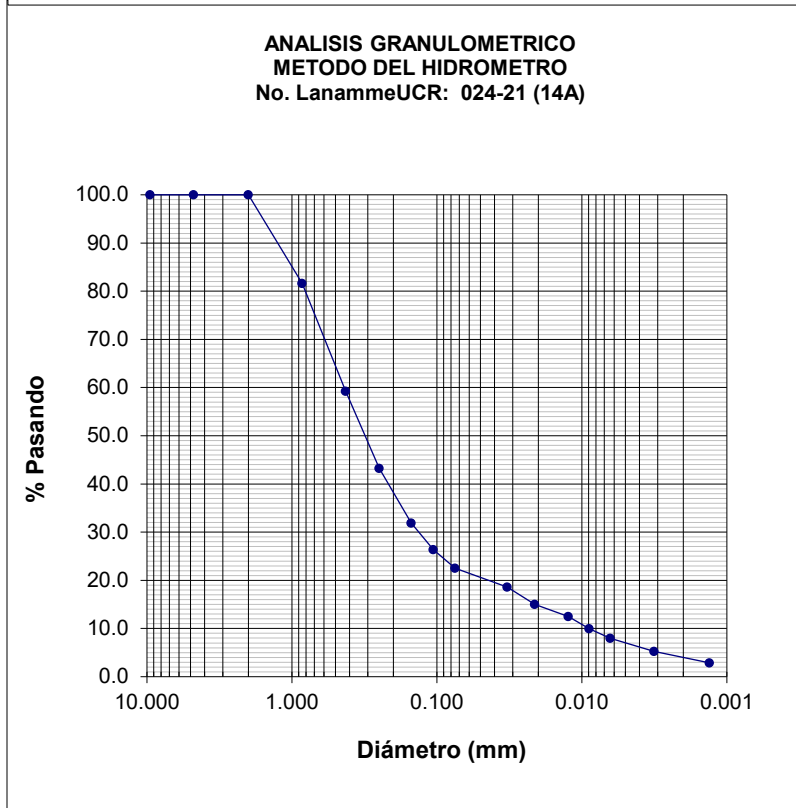
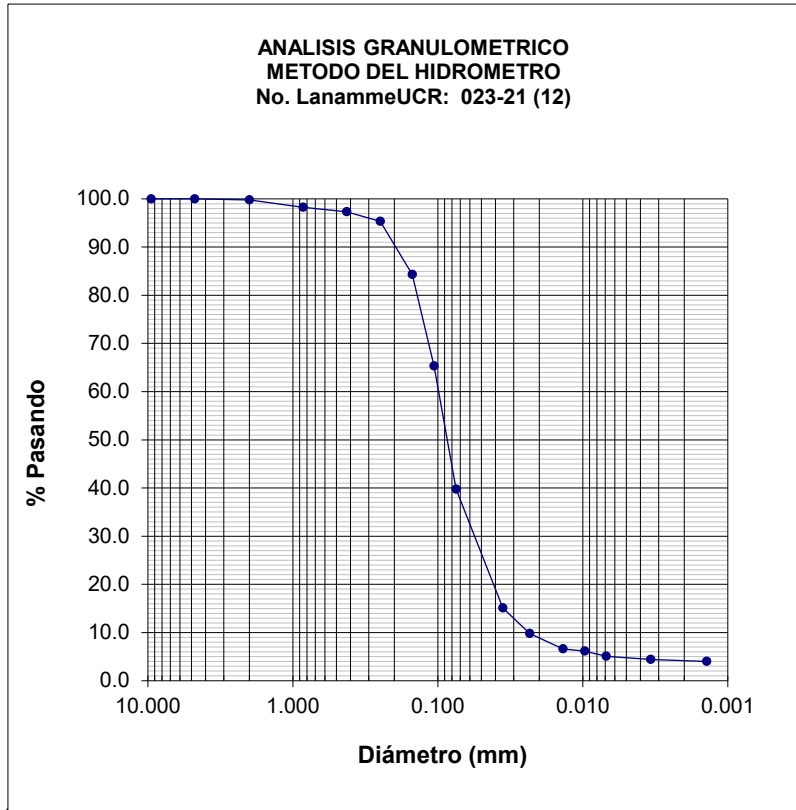
1. Resultados expresados como porcentajes. 2. El muestreo es responsabilidad del usuario. 3. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 4. El tiempo de custodia es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 5. El Reporte de Ensayo válido es el original, firmado y sellado. Cuando el usuario solicita el envío de reporte por correo electrónico o fax, libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

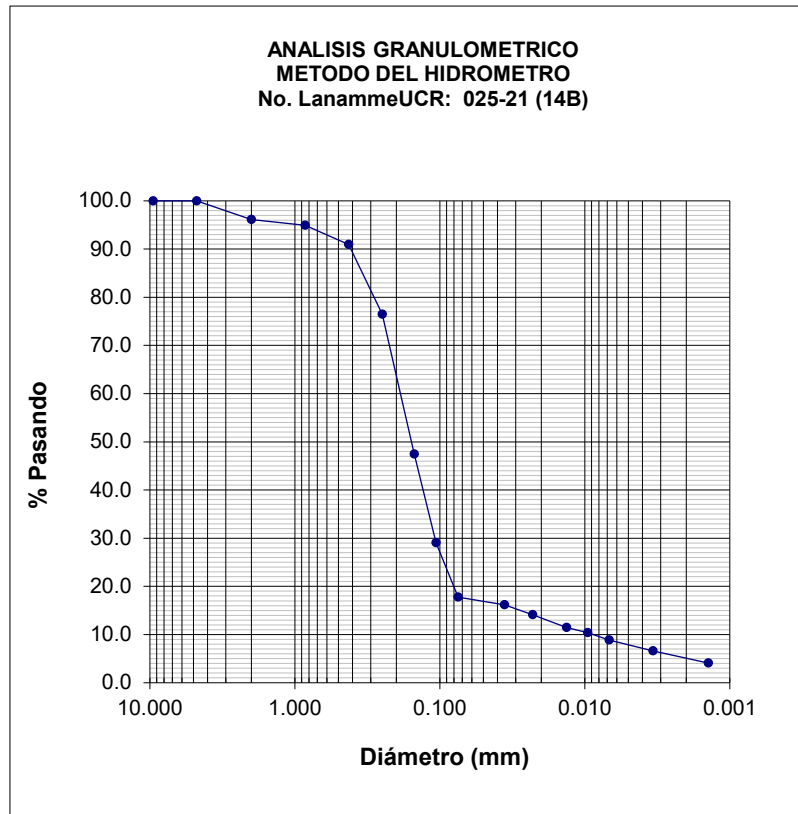
14.4 Gráficos Granulométricos con método del hidrómetro, Lanamme-UCR











14.5 Gráficos de los ensayos Slug Test realizados en cada piezómetro de Río Piedras.

