

REPUBLICA DE PANAMA

GRAN AMANECER, S. A.

**INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA E HIDROLÓGICA
CON FINES DE VALORACIÓN DE AFLORAMIENTOS
SUPERFICIALES DE AGUAS**

PROYECTO SENDEROS DEL CHAGRES



HIDROGEO SERVICIOS CONSULTORES, S. A.

**PREPARADO POR: MSc. GEOL. RONELDO ARJONA
(LICENCIA PROF. No. 2011-185-001)**

RONELDO A. ARJONA ESTRADA
LICENCIADO EN GEOLOGIA
LICENCIA N.º 2011-185-001

FIRMA
Ley 15 del 26 de Enero de 1959
Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura

ABRIL, 2022

ÍNDICE

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. LOCALIZACIÓN	2
3. CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS	2
3.1 CLIMA	2
3.2 PRECIPITACIÓN	3
3.3 GEOMORFOLOGÍA Y EROSIÓN	4
3.4 MARCO GEOLÓGICO	5
3.5 RECURSOS HÍDRICOS DISPONIBLES	6
3.5.1 Fuentes superficiales	6
3.5.2 Fuentes subterráneas	8
4. INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA	9
4.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	9
4.2 CARACTERÍSTICAS DE EJECUCIÓN	10
4.3 RESULTADOS DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA	13
4.3.1. Respuesta geoeléctrica del medio investigado	13
4.3.2. Descripción de las capas litológicas detectadas con geofísica	13
4.3.3. Detalle de interpretación de los SEV realizados	15
4.3.4. Breves antecedentes de la geología histórica del área	16
4.3.5. Análisis del bloque modelo generado	17
5. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	20
5.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS PUNTOS INVESTIGADOS	20
5.2. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LOS MANANTIALES	22
5.2.1. Introducción	22
5.2.2. Diferentes tipos de manantiales	22
5.2.3. Criterios de clasificación de los manantiales	24
5.2.4. Causas de la fluctuación del caudal de los manantiales	25
6. CONCLUSIONES	27
ANEXO	29

INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA E HIDROLÓGICA

CON FINES DE VALORACIÓN DE AFLORAMIENTOS SUPERFICIALES DE AGUAS EN EL PROYECTO SENDEROS DEL CHAGRES

1. INTRODUCCIÓN

La Empresa Propietaria Gran Amanecer, S. A. ha solicitado la preparación de la presente Investigación Geofísica e Hidrológica con fines de valoración y debida clasificación de tres afloramientos superficiales de agua (manantiales) para juzgar su papel en la eventual protección de reservas forestales en el proyecto Senderos del Chagres, ubicado en el Corregimiento de Chilibre, Distrito Capital, República de Panamá.

La presente investigación está orientada a valorar en justa medida la clasificación técnica de las manifestaciones de agua señaladas, manteniendo en todo momento criterios de protección ambiental en favor del entorno y la sociedad a la cual servimos.

El Proyecto lo representa un Desarrollo Urbanístico con viviendas unifamiliares, dotadas de todos los servicios públicos con enfoque de interés social. Las edificaciones a su vez cumplirán con las especificaciones técnicas de construcción y los diferentes códigos de uso permitido para viviendas unifamiliares, que incluyen áreas comerciales, servicio institucional urbano entre otras facilidades. Se tiene como principal objetivo del equipo de diseño de las obras propuestas, el mejoramiento de la calidad de vida de los futuros beneficiarios, estimulando con facilidades de adquisición su desarrollo económico y social.

En la ejecución de la investigación se han implementado técnicas avanzadas de cateo del subsuelo como lo son los métodos geofísicos por el método de resistividad eléctrica, con invaluables beneficios por su calidad de método no invasivo, que mantiene inalterado el medio ambiente. La correcta identificación del punto de nacimiento de los cursos superficiales de agua es un tema de relevancia nacional e internacional y se tienen criterios definidos para valorarlos en justa medida, en la comunidad científico-técnica.

2. LOCALIZACIÓN

El Proyecto se localiza en la Provincia de Panamá, Distrito de Panamá en el Corregimiento de Chilibre. Concretamente, su vía de acceso es por la Carretera Transístmica, entrando por la Urbanización Ciudad Bolívar, a mano derecha con la cual colinda. (Figura 1).



*Figura 1. Localización Regional del Proyecto.
Fuente: Mapa Físico de la República de Panamá, Atlas Nacional, 2007.*

3. CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS

3.1. CLIMA

El clima del área de interés, en términos generales, está determinado por la localización geográfica, la altura sobre el nivel del mar, el relieve y la extensión territorial. Para la clasificación climática se utilizó el sistema del climatológico alemán W. Köppen, teniendo en cuenta las características pluviométricas y térmicas del área de influencia (Figura 2).

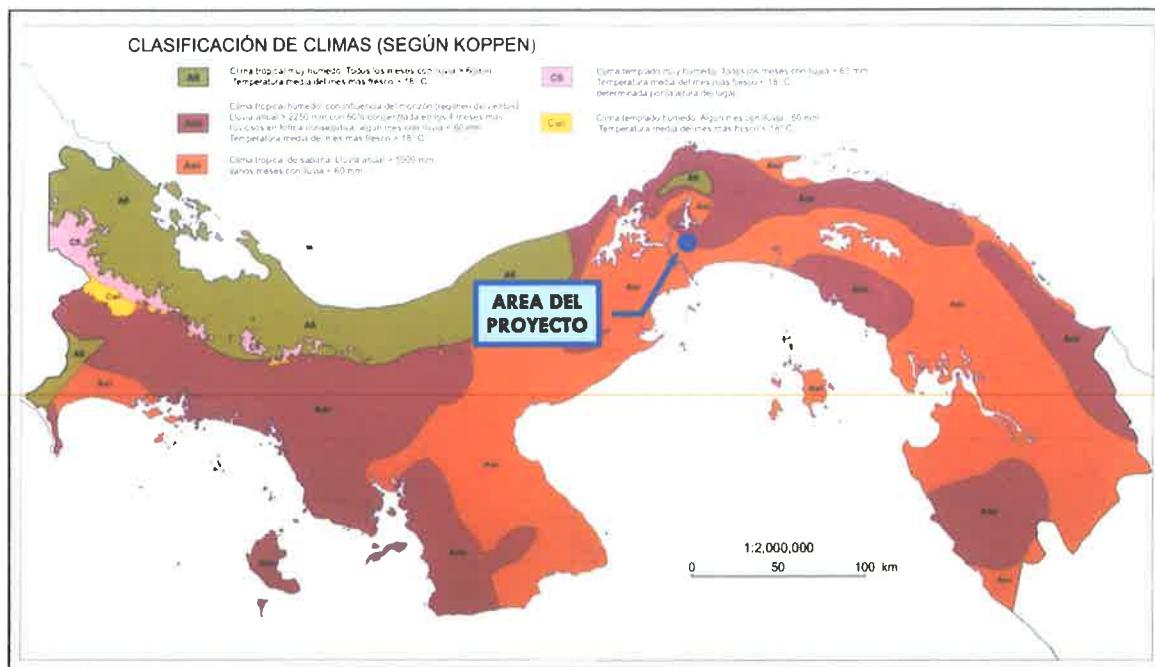


Figura 2. Clasificación de Climas (según Köppen).
Fuente: Mapa 11.3, Atlas Nacional de la República de Panamá, 2007.

Según esta clasificación, regionalmente tenemos el *clima tropical de sabana (Aw)*, con las siguientes características: *Precipitación anual menor que 2,500 mm, estación seca prolongada (meses con lluvia menor de 60 mm) en el invierno del hemisferio norte; temperatura media del mes más fresco mayor que 18°C, diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y el mes más fresco menor de 5°C*.

Este tipo de clima, como norma general en nuestro país, a nivel general es el propio de tierras bajas afectadas por la deforestación y dedicadas a potreros, áreas pobladas y agricultura de subsistencia.

3.2. PRECIPITACIÓN

El régimen anual de precipitación, característico del área evaluada, es de tipo monomodal, con un período seco de 5 meses de diciembre a abril, acentuado de febrero a marzo y un período lluvioso de 7 meses, de mayo a noviembre, siendo mayores las lluvias en octubre (Figura 3)

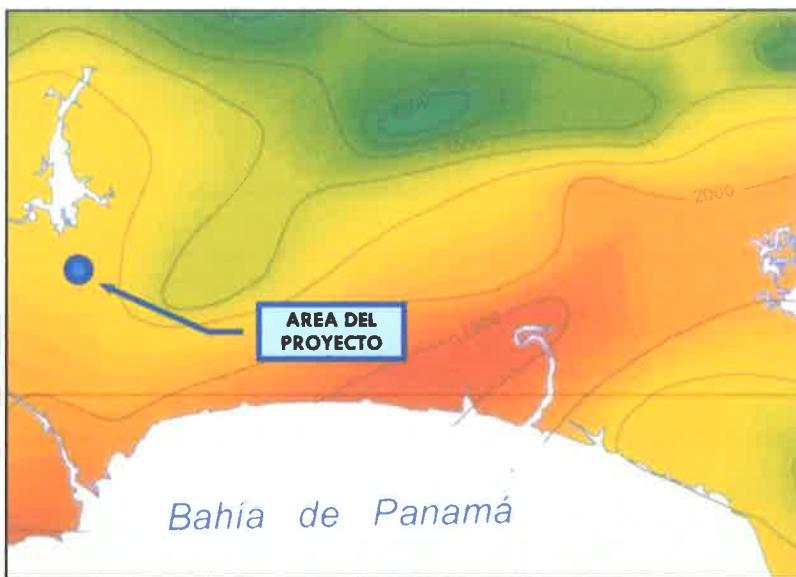


Figura 3. Precipitación Media Anual en milímetros del área del Proyecto.
Fuente: Mapa 9.1, Atlas Nacional de la República de Panamá, 2007.

Este período, en términos generales, se caracteriza por los máximos de precipitaciones coincidentes con el paso de la ITCZ (Zona de Convergencia Intertropical) en dirección al norte (junio) y en sentido meridional (octubre) en su desplazamiento, siguiendo la trayectoria de la declinación anual del sol. Para nuestro caso concreto, la precipitación en la zona de estudio es aproximadamente de 2,500 mm por año.

3.3. GEOMORFOLOGÍA Y EROSIÓN

El área investigada morfoestructuralmente está representada por la unidad geomorfológica denominada como *Regiones de Cerros bajos y Colinas* (Figura 4). En el contexto estructural corresponde a litología de rocas sedimentarias y deposiciones volcánicas ubicadas morfocronológicamente en el Terciario Medio.

La erosión en menor medida puede ser eólica pero la principal pudiera ser en este caso de orden hídrico es decir precipitación en época de lluvias. Esta última es la de mayor incidencia en forma de red drenajes de trayectoria dendrítica en el marco de procesos normales para tierras de cerros bajos y colinas con gradiente hidráulico intermedio,

actualmente exhiben pastizales de lo que anteriormente fueran potreros. El área investigada cuenta con vegas de ángulos pronunciados debido a esta erosión.

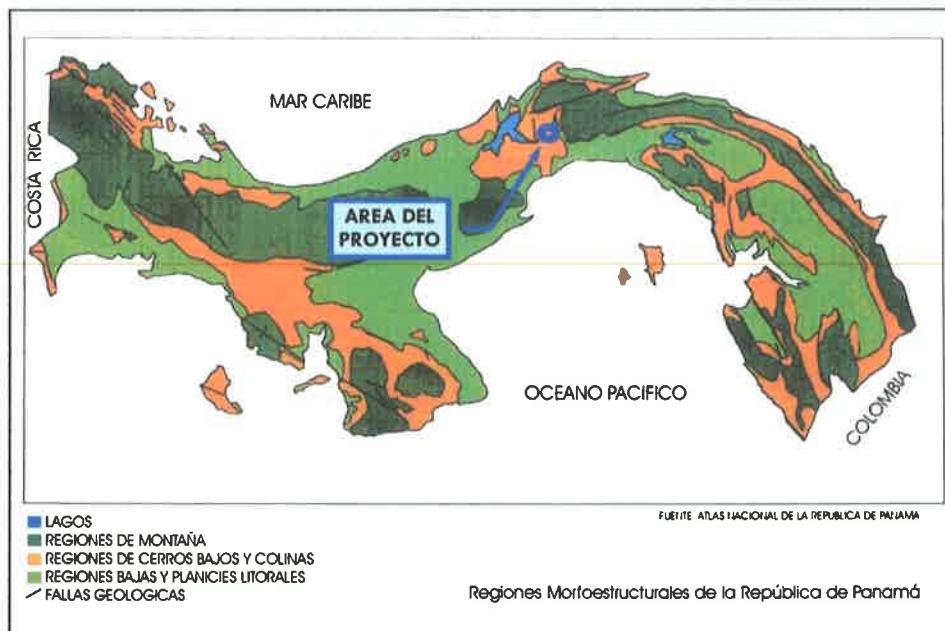


Figura 4. Región Morfoestructural del área del Proyecto.
Fuente: Mapa 4.1, Atlas Nacional de la República de Panamá, 2007.

3.4. MARCO GEOLÓGICO

En el área de influencia del proyecto Senderos del Chagres afloran rocas sedimentarias de la formación sedimentaria Gatuncillo (TE-G). En general, esta formación está constituida por esquistos arcillosos, lutita, arenisca de cuarzo, caliza algacea y foraminífera e incidencia de capas poco potentes piroclásticas, probablemente depositadas en ambiente marino (Figura 5). El material aflorante en el área del proyecto es la caliza algacea, que está bastante meteorizada con capas pobemente consolidadas fácilmente erosionable por su matriz de granulación fina. La formación geológica Gatuncillo, que han interceptado los sondeos geofísicos realizados durante la presente evaluación y que muestra afloramientos en la zona investigada, es de la Época del Eoceno superior del Período Terciario, con 33.9 millones de años de antigüedad, según la escala de tiempo geológico (Escala Cronoestratigráfica Internacional 2015).

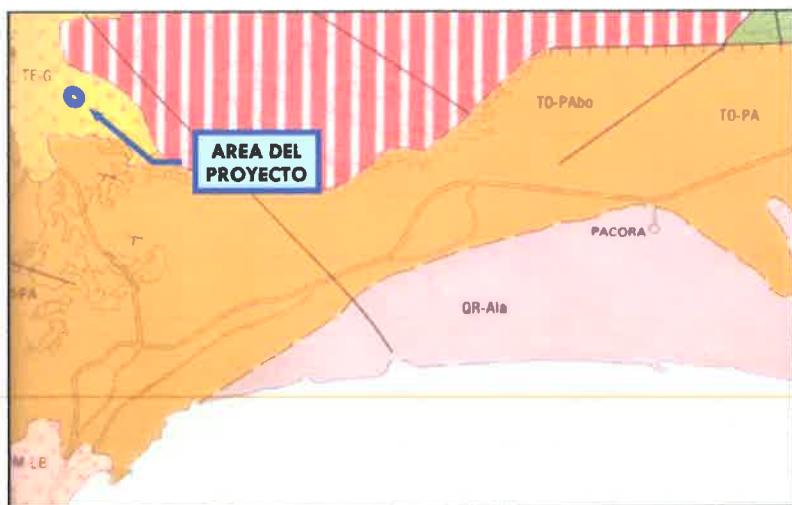


Figura 5. Mapa Geológico del Área del Proyecto
Fuente: Mapa Geológico de la República de Panamá, DGRM, 1991.

La descripción e interpretación de los materiales que se hace en este trabajo, está basada en el Mapa Geológico de la República de Panamá, escala 1:250,000 (1991), así como en las observaciones efectuadas durante las labores de campo en el proyecto Senderos del Chagres y experiencia personal en otros proyectos similares, cercanos a la zona evaluada. En tal sentido, se trata de un predio fronterizo con la formación intrusiva Mamoní (K-Coma) de mayor antigüedad y siendo un gran cuerpo compacto cristalino que empujó con fuerza desde el interior de la tierra, lo que indujo que las formaciones de menor antigüedad como la Gatuncillo se amoldaron a sus formas, pues tiene su origen en el Cretáceo Superior con unos 90 millones de años aproximadamente. Sus empujes posteriores también se notan en el fracturamiento de los estratos de la formación Gatuncillo y algunas fallas regionales.

3.5. RECURSOS HÍDRICOS DISPONIBLES

3.5.1. Fuentes superficiales

La orografía de cuerpos intrusivos y volcanes a lo largo de la Cordillera Central, unida al régimen de las lluvias existentes, ha determinado la red hidrográfica del país en su condición actual. El área del futuro proyecto se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica 115, la cual lleva el nombre de *Cuenca del Río Chagres*, que tiene una

superficie total de 3,338 km², siendo esta la cuenca de mayor extensión superficial. El río principal, río Chagres, tiene una longitud de 125 km. En cuanto a importancia económica y social, los aportes hídricos del río Chagres son utilizados en múltiples formas: para el consumo humano en las ciudades de Panamá, Colón y alrededores; para el funcionamiento del Canal de Panamá y en la generación de energía hidroeléctrica. El río Chagres nace en las montañas, donde inicia la Cordillera de San Blas y luego sigue su curso con dirección este-suroeste en casi todo su recorrido de 50.8 km, hasta su ingreso en el lago Gatún. Esta cuenca es alimentada por otros afluentes menores que confluyen por el margen izquierdo del río (ríos Las Cascadas o Indio Este, Piedras y la quebrada Las Palmas).

La subcuenca que está vinculada con el proyecto, es la No. 14 con el río Chilibrillo como curso principal y su tributario la quebrada La Cabima con un brazo llamado quebrada Federico, ambos de influencia directa con el área del proyecto Senderos del Chagres (Figura 6).

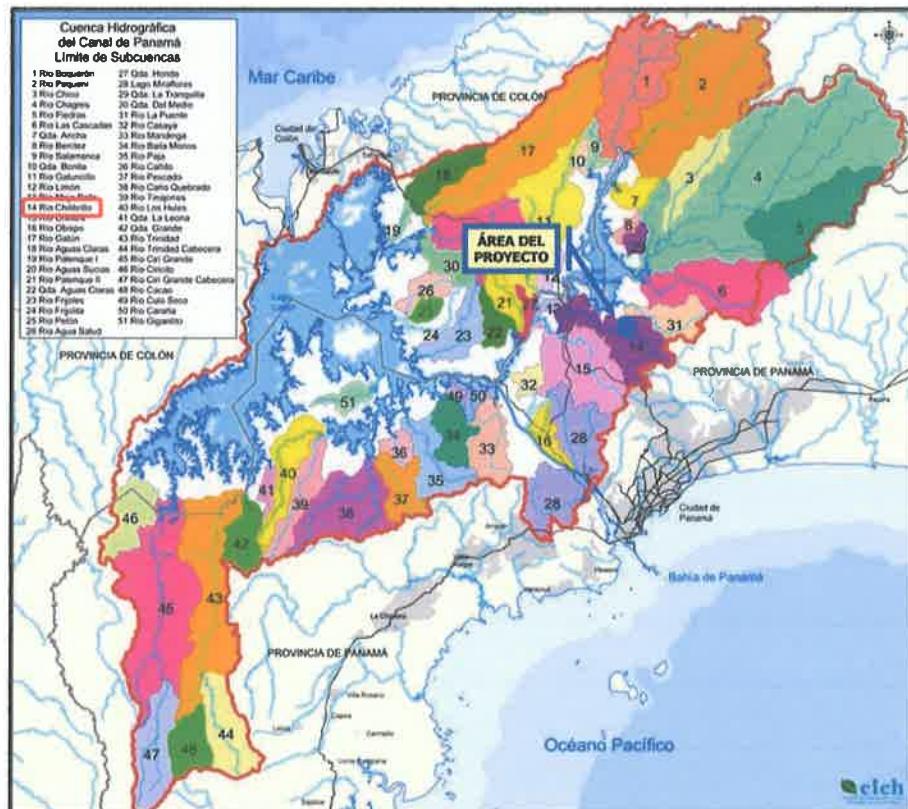


Figura 6. Mapa de Cuenca Hidrográfica del Canal No. 115. La subcuenca No. 14 es donde está localizado el Proyecto Senderos del Chagres. Fuente: CICH, 2008.

El flujo de las quebradas La Cabima y Federico tiene una orientación principal al oeste en su confluencia con el río Chillibrillo, en el área cercana a la comunidad de Calzada Larga, desembocando en el río Chilibrillo a unos 3.5 Km, antes de que este último integre sus aguas al río Chagres.

3.5.2. Fuentes subterráneas

La referencia del Mapa Hidrogeológico de Panamá, Escala 1:1,000,000 atribuye al área de estudio el siguiente tipo de acuíferos, que incluye entre otras de idénticas características a la formación Gatuncillo TE-G (Figura 7), que en síntesis aborda lo siguiente en cuanto a calidad y producción de la fuente subterránea:

Áreas con acuíferos locales, continuos o discontinuos de productividad limitada, Q=3-5 m³/h (13-22 gpm), con permeabilidad baja. Acuíferos constituidos por depósitos marinos generalmente de naturaleza clástica, con secciones ocasionales de origen bioquímico (calizas). La granulometría predominante de estos materiales es fina, teniendo como origen limos y arcillas. En estas formaciones se encuentran aleatoriamente intercalaciones de basaltos y andesitas en forma de diques, así como capas poco potentes de aglomerado. Se puede obtener cierta producción buena en pozos individuales. La calidad química de las aguas es variable.



Figura 7. Mapa Hidrogeológico del Área del Proyecto.
Fuente: Mapa Hidrogeológico de Panamá, ETESA, 1999.

En todo caso, se debe tener en consideración que en el ambiente hidrogeológico se trata de un medio acuífero, que por lo general no tiene el potencial de generar captadores o manantiales de gran producción de agua subterránea, de allí que se clasifica en la categoría de permeabilidad baja en el Mapa Hidrogeológico de Panamá.

4. INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA

4.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Ante la necesidad de poder formar una imagen tridimensional del bloque geológico que conforma el área del Proyecto Senderos del Chagres en los tres puntos de afloramientos de agua evaluados, se decidió definir este factor a través de sondeos geofísicos llamados Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), teniendo como referencia colateral el análisis de los mapas geológicos e hidrogeológico de la zona evaluada para la interpretación respectiva, así como también observaciones de campo en el sitio de investigación.

Cabe destacar, que los métodos geofísicos de exploración del subsuelo no son nuevos en el ámbito profesional, pero tampoco han sido ajenos a la actual llamada “revolución digital”, con el mejoramiento del instrumental de medición de campo e interpretación por sofisticadas aplicaciones de procesamiento de datos, que ha brindado información más rápida y confiable, pudiendo aplicarse a disciplinas como ingeniería civil, geología y evaluación de impacto ambiental. El objetivo de la presente investigación geofísica ha sido brindar las referencias sobre el papel de los manantiales como signo de conservación de agua subterráneas de cara a la protección de reservas forestales. Esto es importante pues depende de los componentes del subsuelo, así como sus propiedades acuíferas que sea aplicable la protección o no de tales manifestaciones de agua subterránea.

Para detectar las condiciones de disposición espacial de las capas litológicas, se implementó el método geofísico electroresistivo, con el arreglo de electrodos tipo

Schlumberger. El reconocimiento mediante resistividad eléctrica constituye una investigación geofísica exploratoria, en la cual las mediciones de la resistividad de la tierra se realizan en la superficie del terreno, aprovechando la particularidad de que la corriente eléctrica inyectada penetra en forma de semicírculo entre un electrodo positivo y otro negativo (Figura 8).

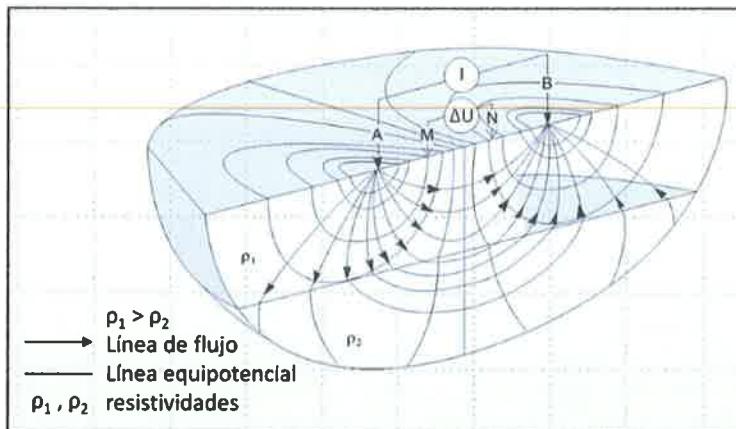


Figura 8. Arreglo de electrodos tipo Schlumberger.

Al aumentar progresivamente la distancia entre electrodos de corriente y hacerse mayor el semicírculo respectivo, se puede tener un registro de las capas geoeléctricas atravesadas, si a su vez se tienen otro par de electrodos midiendo el potencial resultante entre los electrodos de corriente. La resistividad aparente se calcula a través de coeficientes propios de cada arreglo de electrodos, interviniendo, además, los principios de cálculo de la conocida Ley de Ohm. En este caso particular del proyecto Senderos del Chagres, se utilizó un arreglo especial para objetivos de capas superficiales con alta densidad de mediciones para cotejo, con un estimado de 35 m de profundidad y el llamado arreglo de tres electrodos.

4.2. CARACTERÍSTICAS DE EJECUCIÓN

En el despliegue de los electrodos de corriente y potencial al ser un terreno baldío actualmente, no se experimentaron dificultades con ninguna interferencia natural que eventualmente puede afectar algunas lecturas como potencial espontáneo pulsante, líneas de alta tensión, obstáculos físicos o cualquier otra perturbación (Tabla 1 y Figura

9). La numeración de los 6 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) implementados en el área del proyecto, no responde a un orden de importancia sino al orden en que fue acometida la tarea de ejecutarlos.

Tabla 1. Localización de los SEV y puntos de agua detectados en época de lluvias en el predio evaluado del Proyecto Senderos del Chagres. Fuente: Equipo Consultor, 2022.

No. SEV/Puntos de Agua	Coordenadas		Elevación, m
	Este (m)	Norte (m)	
SEV-1	659774.36	1010970.49	137
SEV-2	659766.77	1010945.94	137
SEV-3	659478.55	1011463.65	117
SEV-4	659489.80	1011445.81	115
SEV-5	659520.66	1011240.41	127
SEV-6	659573.46	1011276.94	127
Punto -1	659775.61	101161.80	145
Punto -2	659517.39	1011488.87	105
Punto -3	6659408.01	1011245.18	122



Figura 9. Localización de los SEV y Puntos de Agua
Fuente: Equipo Consultor, 2022.

En cuanto a la captura de datos de campo durante la realización de la exploración geofísica, las respuestas del terreno a la inyección de corriente fueron claras y precisas, teniéndose el cuidado de que los vectores de inyección de corriente entraran en el terreno lo más vertical posible y no sobre laderas muy empinadas. Al investigarse un medio donde la resistividad es inferior, por tratarse de sedimentos de origen marino arcillosos, se dieron valores bajos acordes con la naturaleza de los estratos, que la alta calidad del programa de interpretación pudo manejar sin problemas para ajustar las curvas respectivas.

El despliegue máximo de las alas del arreglo de tres electrodos tipo Schlumberger fue de $AB/2 = 30$ metros por uno de los lados y el otro se colocó en posición de “infinito”, es decir, varias veces más grande que 30 m, previéndose lecturas de empalme de los cambios de electrodos de potencial MN (Figura 10).



Figura 10. Captura de datos en el SEV-5.
Fuente: Equipo Consultor, 2022.

Se utilizaron electrodos de acero inoxidable para prevenir la polarización de la corriente en el punto de inyección y facilitar la lectura en general de los datos. La precisión del

aparato de medición es de décimas de milivoltios y miliamperios, lo que permite obtener información sobre potencial e intensidad de corriente respectivamente. El ambiente de entorno donde se realizaron los SEV, representó pastizales con escasa presencia de arbustos. El suelo estaba bastante seco, al punto que fue necesario en algunos casos añadir agua fresca a la tierra para lograr mejor contacto y lecturas más claras, facilitando de esta manera la penetración de la corriente de inyección al terreno.

4.3. RESULTADOS DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA

4.3.1. Respuesta geoeléctrica del medio investigado

Durante de las labores de procesamiento de datos de los SEV, ejecutados con el programa WinSev 6.2, en los mismos no se experimentó ninguna dificultad, obteniéndose los resultados esperados y cónsonos con el entorno natural del Proyecto. Los principales aportes de este trabajo investigativo ha sido la definición de los complejos procesos de alteración de la capa de suelo y las deposiciones marinas que se dan en la zona evaluada, con una visual más amplia en el plano vertical y horizontal que se obtendrían con una sola observación de superficie, ya que para definir espacialmente en tres dimensiones y cubrir el polígono, fue necesario llevar a cabo no menos de 6 sondeos geoeléctricos (SEV). La navegación con datos georreferenciados por los predios del proyecto con coordenadas UTM se realizó con GPS manual y así cumplir los objetivos de generar un polígono básico en tres dimensiones.

4.3.2. Descripción de las capas litológicas detectadas con geofísica

En el Proyecto Senderos del Chagres sólo fueron observados cuatro tipos de materiales, la descripción de estas capas en su orden secuencial es la siguiente:

- *Cubierta de suelo.* Material suelto producto de la descomposición en el sitio de la roca original, es decir, no transportado. Está compuesto por fracciones finas de limo o arcillas de alta plasticidad, color de crema a chocolate claro. Esta cubierta de suelo

es de espesor variable de escasos metros en atención a procesos naturales de agentes como la erosión por el viento y la lluvia, además de la respectiva meteorización por alteración química de sus componentes originales mayormente marinos.

- *Limolita calcárea.* Es una roca de dureza baja, parcialmente meteorizada, color crema chocolatoso, granulación fina, limo arcillosa en cementante pobremente consolidado, constituido de restos de plantas y animales calcáreos, que contiene capas dispersas de material piroclástico, grava y rodados de andesita y basalto en capas poco potentes. Según sus características se trata probablemente de vulcanismo remanente (ya erosionado) de la Formación Panamá (TO-PA) por ser más joven. Al tratarse de un material con cierta plasticidad, tiende a almacenar poca agua al sellar eventuales grietas en su masa rocosa pese al fracturamiento. Por otra parte, las arcillas de su composición le confieren baja permeabilidad, siendo poca perspectiva para explotación de agua subterránea, sobre todo porque se encuentra en los niveles superiores de la estructura de la formación Gatuncillo. En época de invierno, al hincharse los limos y arcillas producto de descomposición química (caliza), puede almacenar agua que luego libera lentamente
- *Arenisca limolítica.* Roca de origen marino compuesta de limos cementados por acción de restos de fósiles marinos calcáreos muy finos compactados, dureza media, coloración variable en la roca fresca entre crema a verde oliva (experiencia en afloramientos regionales). Este tipo de roca es muy común en diferentes formaciones geológicas a nivel nacional gracias a nuestro origen inicialmente marino de tierras emergidas y procesos volcánicos. Se presenta compacta y con pocas grietas, constituyendo un material impermeable de gran espesor, que sirve de base o piso a la secuencia litológica observada.
- *Arenisca de cuarzo.* Roca de origen sedimentario, puede inferirse su contenido de cuarzo por el valor relativamente alto de resistividad (81 ohm/m). Esta capa se encuentra insertada en esta secuencia marina que, por lo general, muestran resistividad baja. Fue registrada únicamente en el SEV-5, probablemente es de dureza media moderadamente cementada.

4.3.3. Detalle de interpretación de los SEV realizados

Las respectivas fichas técnicas de los seis sondeos geoeléctricos realizados se encuentran en el Anexo de este Informe, representando los datos geofísicos recabados en el campo. No obstante, como el principal objetivo de estos trabajos es descifrar el orden espacial de las capas litológicas y no sus magnitudes geoeléctricas, se presentan a continuación las interpretaciones de secuencias respectivas de la litología ya descrita, según cada sondeo realizado.

SEV-1

- De 0.00 a 2.30 m. Cubierta de suelo.
- De 2.30 a 8.50 m. Limolita calcárea.
- De 8.50 a 35.00 m. Arenisca limolítica.

SEV-2

- De 0.00 a 3.90 m. Cubierta de suelo.
- De 3.90 a 5.20 m. Limolita calcárea.
- De 5.20 a 35.00 m. Arenisca limolítica.

SEV-3

- De 0.00 a 5.30 m. Cubierta de suelo.
- De 5.30 a 14.00 m. Limolita calcárea.
- De 14.00 a 35.00 m. Arenisca limolítica.

SEV-4

- De 0.00 a 0.50 m. Cubierta de suelo.
- De 0.50 a 5.20 m. Limolita calcárea.
- De 5.20 a 35.0 m. Arenisca limolítica.

SEV-5

- De 0.00 a 4.20 m. Cubierta de suelo.

- De 4.20 a 6.10 m. Limolita calcárea.
- De 6.10 a 17.00 m. Arenisca limolítica.
- De 17.00 a 35.00 m. Arenisca de cuarzo.

SEV-6

- De 0.00 a 2.50 m. Cubierta de suelo.
- De 2.50 a 9.40 m. Limolita calcárea.
- De 9.40 a 35.00 m. Arenisca limolítica.

4.3.4. Breves antecedentes de la geología histórica del área

Para poder comprender las condiciones geológicas imperantes en un área investigada también es importante conocer los procesos que dieron origen a las diferentes rocas en la zona. En este caso particular del proyecto Senderos del Chagres se debe señalar lo siguiente: Principalmente entre 33.9 a hace unos 28.1 millones de años existía un pequeño mar interior con aguas cálidas, que generó vida como pequeños crustáceos, algas y foraminíferas. También existieron períodos donde el agua se empezó a encerrar en caletas y creó capas de lama y arena en su fondo. Estos procesos genéticos dieron origen a dos tipos de rocas sedimentarias básicas en el polígono investigado: una relacionada con la actividad bioquímica de organismos con caparazones calcáreos que generaron limolita con cementante de tipo calcáreo y, por otra parte, las deposiciones en ambientes de pobre circulación de agua generaron roca arenisca con cementante limolítico. Luego se dieron procesos de levantamientos y asentamientos de la corteza terrestre, a su vez se producen respectivas regresiones y transgresiones del mar hasta nuestros días. También en el caso de la formación Panamá Fase Marina, que en algunos puntos se superpone a la formación Gatuncillo, se dieron procesos volcánicos de expulsión de partículas piroclásticas, formando capas de aglomerado de distintos grosores y consistencia de manera aleatoria. El fondo marino compacto compuesto por arenisca limolítica es el de mayor espesor, conformando una parte importante de las deposiciones sedimentarias del área.

4.3.5. Análisis del bloque modelo generado

Como ya hemos mencionado, los puntos de manifestación de agua observados en el área del proyecto, responden principalmente a las condiciones del manto de alteración o meteorización, interactuando en su parte inferior o su base con la roca impermeable arenisca limolítica que le sirve de piso. Cabe mencionar que según lo registrado en el Mapa Geológico Nacional de referencia y confirmado en las observaciones técnicas de campo, no había al momento de inspección ningún afloramiento de agua subterránea (Figura 11).



Figura 11. Punto 3 localizado a pocos metros de las coordenadas indicadas como nacimiento de curso superficial de agua. Fuente. Equipo Consultor, 30 de marzo 2022.

En las Figuras entre 12 y 13 a continuación, se confirma la secuencia litológica que generó un acuífero colgado.



Figura 12. Afloramiento de la estructura superior litológica del área con la cubierta de suelo en pequeña capa poco potente y la limolita calcárea (color más claro).

Esta secuencia fue observada en el campo, donde el espesor de la limolita calcárea junto con la cubierta de suelo es poco significativo, con un piso impermeable como la arenisca limolítica, que produce rechazo del agua subterránea en época de lluvia (Figura 13).



Figura 13. Puede apreciarse el corte de la arenisca limolítica sedimento marino petrificado, roca de dureza media que sirve de base a toda la región.

Como resultado de la exploración geofísica realizada en el proyecto Senderos del Chagres, han sido generados los bloques modelos litológicos y sus respectivos cortes (perfils) del interior del subsuelo. Debido al distanciamiento de los puntos de agua, la información se agrupó en dos bloques modelo. El bloque modelo #1 corresponde al Punto 1 de afloramiento de agua. Mientras tanto, el bloque modelo #2 concierne a los Puntos 2 y 3. La fidelidad del bloque modelo #1 y su respectivo corte litológico, generado con respecto a la estructura imperante, puede apreciarse en las Figuras 14 y 15.

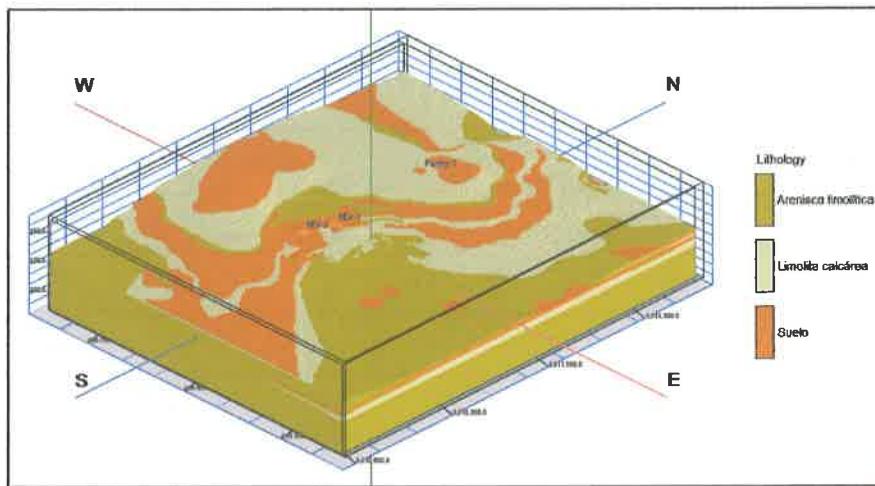


Figura 14. Bloque modelo #1 en tres dimensiones, utilizado para analizar la secuencia de capas litológicas del Punto 1. Fuente: Equipo Consultor, 2022.

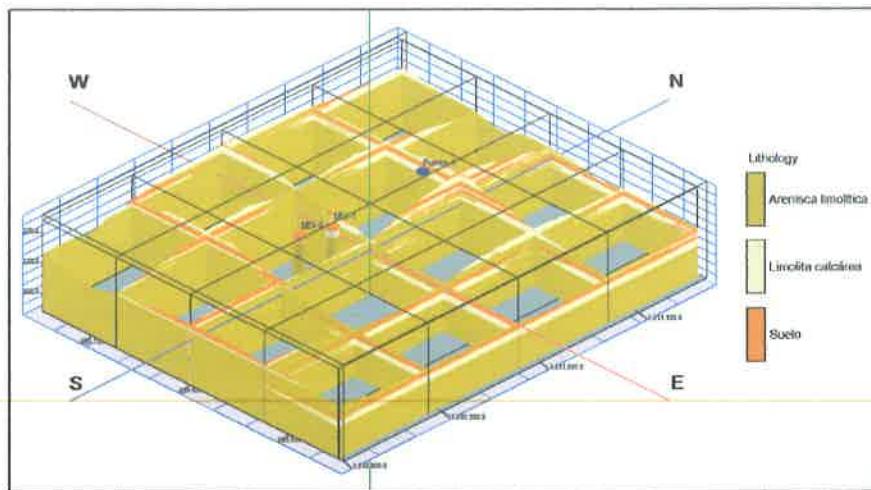


Figura 15. Cortes litológicos que muestran el interior del bloque modelo #1.
Fuente: Equipo Consultor, 2022.

El bloque modelo #2 y su respectivo corte litológico, se presenta a continuación en las Figuras 16 y 17. El bloque modelo #2, que también se presenta en terrenos de colinas, incluye además una capa de arenisca de cuarzo, lo que se reflejó en los datos de campo del SEV 5 con elevados valores de resistividad geoeléctrica. Esta capa, debido a su textura (porosa y poco cementada), podría contener agua subterránea.

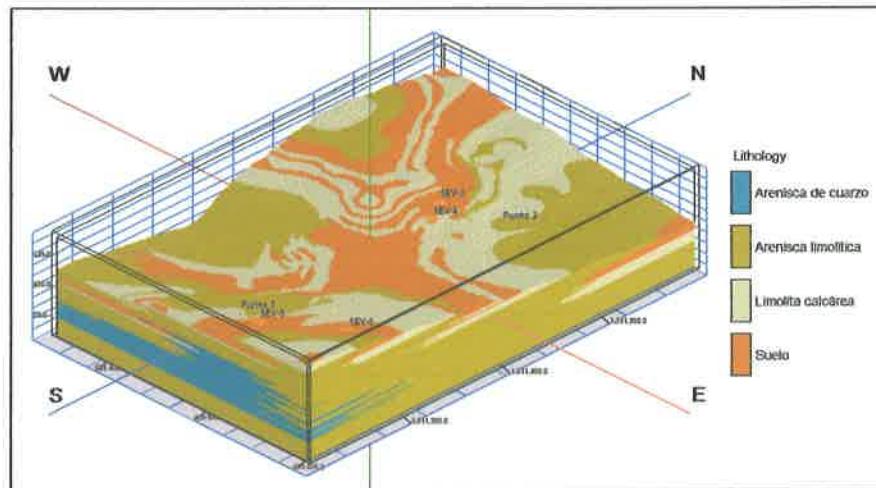


Figura 16. Bloque modelo #2 en tres dimensiones, utilizado para analizar la secuencia de capas litológicas de los Puntos 2 y 3. Fuente: Equipo Consultor, 2022.

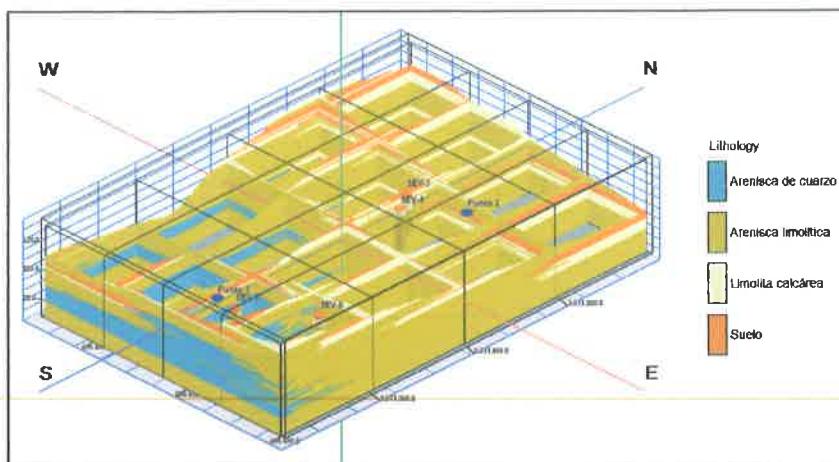


Figura 17. Cortes litológicos que muestran el interior del bloque modelo #2.
Fuente: Equipo Consultor, 2022.

5. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

5.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS PUNTOS INVESTIGADOS

A partir de la interpretación de los datos obtenidos en el inventario de los tres puntos de afloramiento de agua evaluados y apoyados en la geología y relieve del área estudiada, se puede indicar que el flujo de aguas subterráneas describe vectores paralelos a la deposición de la limolita calcárea, que es el material poroso con capacidad para recibir, almacenar y transportar el agua, aunque pobremente. Es decir, desde un enfoque hidrogeológico se ha podido diferenciar en el área del proyecto Senderos del Chagres una sola unidad acuífera con las condiciones y capacidad de dar origen a manantiales propiamente dichos, pero lamentablemente en virtud de su posición elevada con respecto al conjunto de capas geológicas, no logra cumplir con las condiciones de dar origen a un curso de agua permanente (manantial), como lo es el caso de un nacimiento de agua. Por lo tanto, solo exhibe flujo en época de lluvias y en verano se drena rápidamente debido al déficit de humedad respectivo.

Se trata de una zona topográficamente más elevada y rocosa, con numerosos escarpes debidos a los afloramientos meteorizados, que funciona conjuntamente con el fondo de arenisca limolítica común. En esta zona, desde el punto de vista hidrogeológico, se

puede hablar de la existencia de un acuífero, pero de tipo *colgado temporal*, debido a que el material acuífero es de un relativo poco espesor y tiene un piso o parte inferior de material impermeable que es la arenisca limolítica de origen marino. De los tres puntos de afloramiento de agua que fueron investigados a finales del mes de marzo de 2022, ninguno tenía una manifestación de agua, es decir, ni siquiera escaso caudal, ni tampoco se mantenían pozas de agua sin flujo en su curso. En tal sentido, el material recabado en el campo puede indicar de manera concreta el funcionamiento de estos puntos de agua, pero antes se debe ver este proceso a nivel genérico. El fenómeno de un acuífero colgado es complejo, pero puede tener una mejor comprensión si se analiza el siguiente bloque diagrama teniendo en cuenta que se da en rocas sedimentaria y en las de formaciones volcánicas, dependiendo del contraste de una capa litológica permeable sobre una impermeable.

En la Figura 18 puede notarse que se trata de una pequeña cantidad de agua subterránea atrapada fuera del contexto regional del acuífero, tratándose de un bolsón de agua aislado. El acuíclido vendría siendo la arenisca limolítica por ser un material relativamente impermeable y es por esta razón que luego del nacimiento temporal o afloramiento de agua, no se genera una quebrada propiamente dicha, como ocurre cuando es un manantial con todas las características que lo distinguen como tal y se convierte en un nacimiento propiamente dicho.

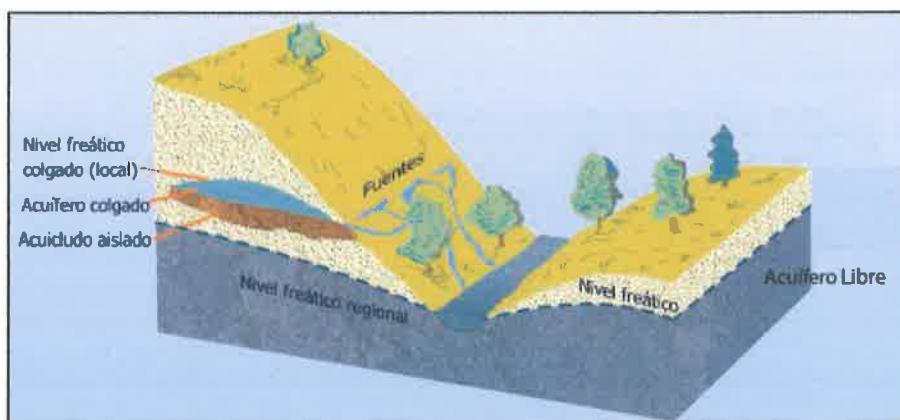


Figura 18. Bloque diagrama ilustrativo de las condiciones encontradas en el predio de proyecto Senderos del Chagres y que se da a nivel regional, donde no se genera el nacimiento de una quebrada formal, sino manifestaciones de fuentes temporales dispersas, que desaparecen en verano, estando separados del flujo base o nivel freático.

5.2. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LOS MANANTIALES

5.2.1. Introducción

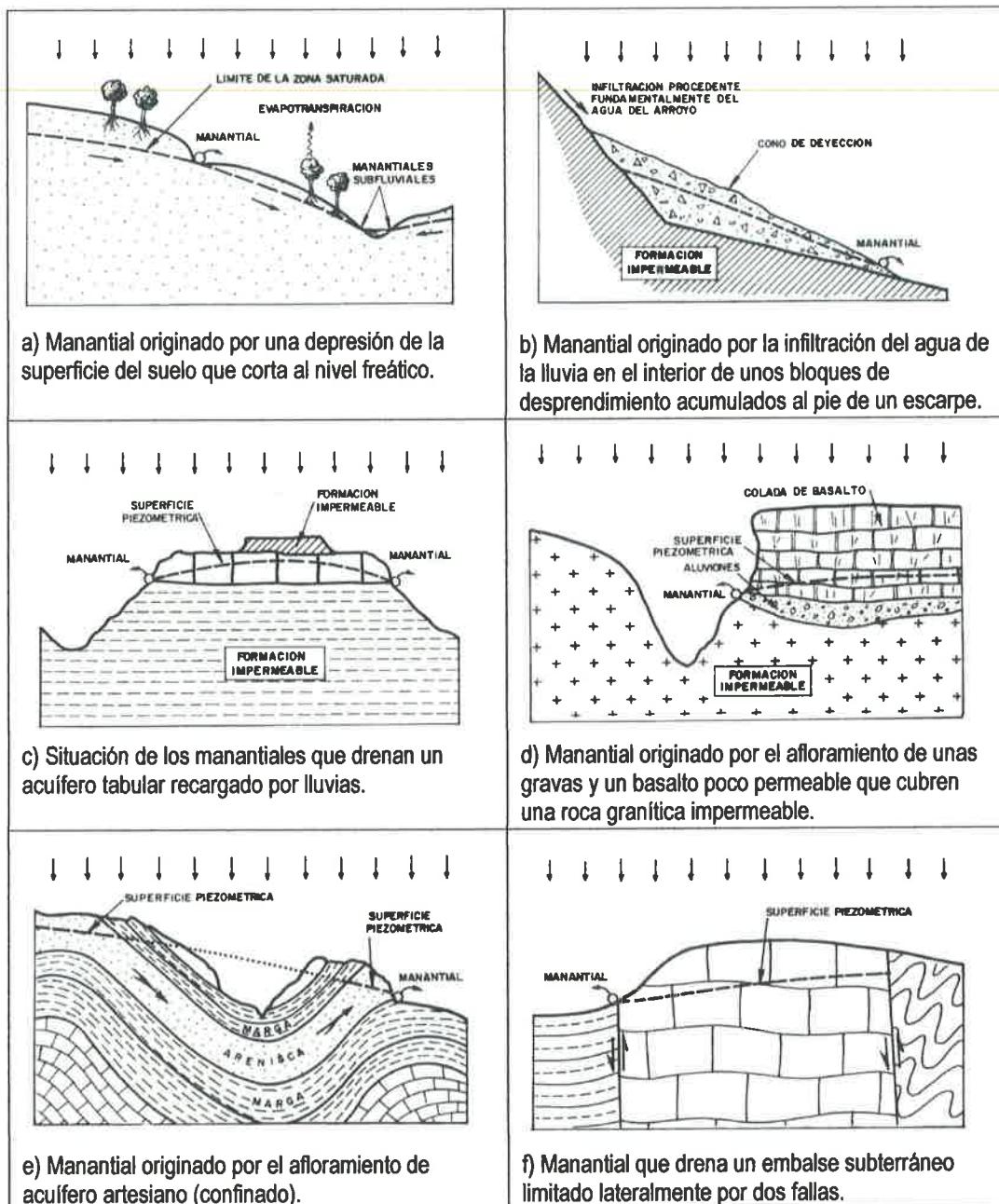
El objeto de esta investigación es verificar si el concepto de nacimiento se aplica en propiedad a determinado curso de agua, las analogías idiomáticas con los cuerpos vivos como brazo o boca de un río son comunes. No obstante, no debe perderse de vista que nacimiento significa que, a partir de un punto dado, el flujo de agua cobra vida, es decir, no se trata de flujos temporales. En términos generales, los ojos de agua o manantiales son los que originan flujo estable. En hidrología se habla de flujo base, en cambio en hidrogeología es el nivel freático de un embalse subterráneo el que genera este punto.

Con el interés de brindar un marco de referencia de los conceptos, que a nivel hidrogeológico se tiene sobre lo que es un manantial, podemos citar íntegramente la definición del Doctor en Ciencias Geológicas Manuel Ramón Llamas (Custodio y Llamas, 1976): ***“Un manantial puede definirse como un punto o zona de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua procedente de un acuífero o embalse subterráneo”***. La descarga de estos embalses no se efectúa únicamente mediante el agua de los manantiales, ya que a veces, la zona saturada al hacer contacto con la superficie del terreno no da lugar a un flujo concentrado como los manantiales típicos, sino representa una zona de flujo diseminado o zona de resumen (“seepage area”, en la literatura anglosajona). En ocasiones es posible que no exista siquiera zona de resumen y la descarga del embalse subterráneo se realice mediante la evapotranspiración de plantas o descargas no visibles en lagos o ríos y estos casos tampoco califican como nacimientos.

5.2.2. Diferentes tipos de manantiales

El funcionamiento de los manantiales resulta muy claro, si como antes se ha indicado, se tiene en cuenta que son simplemente el desagüe de un medio poroso que recibe una cierta recarga o infiltración. Así pues, los dos factores más importantes a considerar

serán los parámetros geométricos e hidrológicos del embalse subterráneo y sus condiciones de recarga, casi siempre dependientes de la infiltración de las precipitaciones lluviosas. En la siguiente figura pueden verse algunos esquemas representativos de diversos tipos de manantiales (Figura 19).



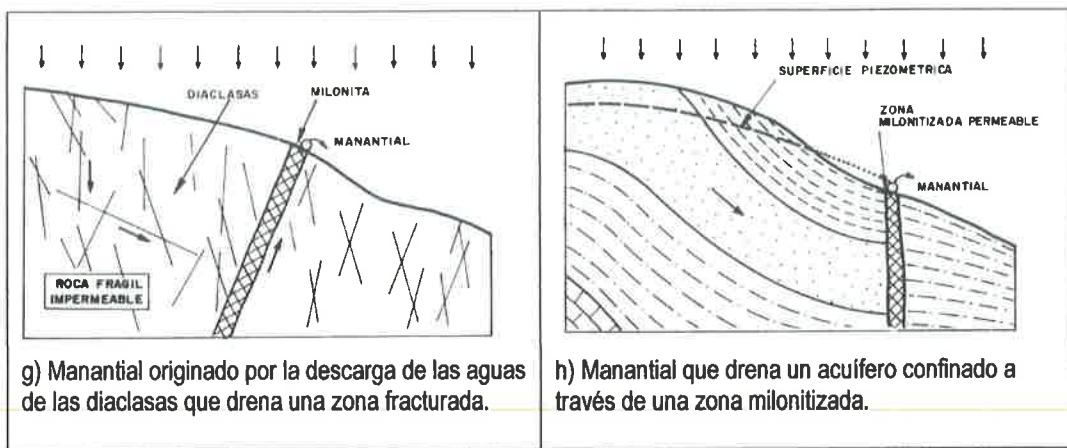


Figura 19. Origen de diversos tipos de manantiales. Fuente: Davis y De Wiest, 1966

5.2.3. Criterios de clasificación de los manantiales

Los manantiales han despertado el interés de los estudiosos desde hace muchos años, y como consecuencia de ello, se ha sugerido clasificaciones de tipos muy diversos. Fácilmente se comprende que el número de variables que puede tenerse es tal que resultarían con facilidad varios centenares o miles de clasificaciones. De acuerdo con Davis y De Wiest (1966, pag. 62), se considera que lo más importante es tratar los principios básicos y describir algunos manantiales representativos sin perderse en tecnicismos artificiosos.

Las clasificaciones más frecuentes suelen estar basadas en el volumen o caudal suministrado por el manantial (Tabla 2), en el tipo de acuífero que lo alimenta, en las características químicas de sus aguas, en la temperatura, en la dirección del flujo, en su relación con la topografía y su relación con la estructura geológica que los condiciona. Evidentemente, pese a este esfuerzo de simplificar los parámetros de clasificación, sigue siendo una labor ardua, por lo cual muchos autores dan mayor prominencia a la clasificación de la descarga del manantial como elemento primario de referencia.

Tabla 2. Clasificación de la descarga de los manantiales.

Categoría	Volumen o caudal suministrado	
Primera	Superiores a 2.80 m ³ /s	(Superiores a 44,386 gpm)
Segunda	Entre 0.28 y 2.80 m ³ /s	(4,438 y 44,386 gpm)
Tercera	Entre 28 y 280 l/s	(444 y 4,438 gpm)
Cuarta	Entre 6.3 y 28 l/s	(100 y 444 gpm)
Quinta	Entre 40 y 400 l/min	(10.6 y 106 gpm)
Sexta	Entre 4 y 40 l/min	(1.06 y 10.6 gpm)
Séptima	Entre 0.5 y 4 l/min	(0.13 y 1.06 gpm)
Octava	Menor de 0.5 l/min	(Menor de 0.13 gpm)

Fuente: Davis y De Wiest, 1966

5.2.4. Causas de la fluctuación del caudal de los manantiales

El caudal de la mayoría de los manantiales a nivel general varía considerablemente, pero, sin embargo, en algunos casos es casi constante. Tales variaciones responden fundamentalmente a los cambios en los niveles piezométricos del embalse subterráneo drenado por el manantial, que, a su vez, dependen de las relaciones entre la recarga y la descarga. Puede decirse que cualquier causa que dé lugar a una fluctuación de nivel piezométrico del embalse subterráneo, puede originar también un cambio en el caudal de sus respectivos manantiales.

Se presentan fluctuaciones apreciables de descarga como respuesta a la precipitación pluvial. La mayoría de los manantiales de octava categoría, por ejemplo, fluyen solamente durante el corto periodo de tiempo que sigue inmediatamente a cada aguacero. Otros manantiales procedentes del acuífero de mayor capacidad pueden presentar por el contrario fluctuaciones apenas perceptivas. La **variabilidad del caudal de un manantial** puede expresarse mediante la siguiente formula:

$$V_a = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{md}}} \times 100$$

en donde V_a es el porcentaje de variabilidad, Q_{\max} es el valor de la descarga máxima, Q_{\min} es el valor de la descarga mínima y Q_{md} es el valor de la descarga media.

Este factor es importante debido a que se tiene como referencia la clasificación propuesta por Meinzer, en la que debe considerarse que los caudales en muchos casos no son un elemento permanente. Por otra parte, la longitud del periodo de tiempo utilizado para estos cálculos debe ser claramente especificada en el momento de dar una cifra, ya que no es lo mismo describir un manantial diciendo que posee una variabilidad de 30 % medida entre un mes de un año cualquiera, o bien refiriéndose a un periodo comprendido entre varios años. Esto nos sugiere que se debe tener entre la documentación técnica de estas fuentes los registros sistemáticos de fluctuaciones de caudales según cada estación anual.

Como se tiene en el área del proyecto Senderos del Chagres el caso de tres manantiales que se secan, es necesario explicar que estos flujos pueden variar no solo estacionalmente sino diariamente. Esto se debe generalmente a los consumos de agua por parte de la vegetación; algunos estos manantiales fluyen “vigorosamente” entre la medianoche y el amanecer, pero pueden, en casos extremos, llegar al punto de secarse durante el día. Como la vegetación existente es sólo pasto en el caso concreto del proyecto Senderos del Chagres, no se observan fluctuaciones fuertes sino sólo un escurreimiento en época de lluvias. También es importante decir que como los puntos de agua analizados en época de verano no tienen flujo, los mismos ni siquiera se pueden clasificar en ninguna categoría de manantial arriba descrita.

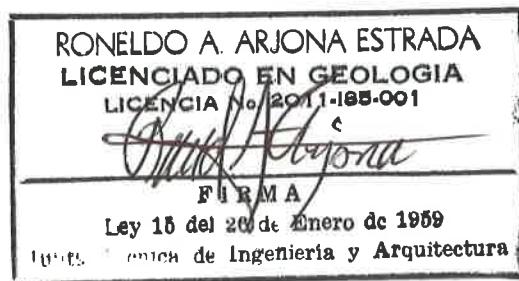
6. CONCLUSIONES

Luego de realizar la prospección geofísica e hidrológica con fines de valoración de tres puntos de afloramiento de agua en los predios del Proyecto Senderos del Chagres, se puede concluir lo siguiente:

- El resultado final de la investigación geofísica realizada permite visualizar el medio acuífero tanto en el plano vertical como en el horizontal. Esto se refleja a través de elaboración de dos bloques modelo integral en tres dimensiones, conteniendo los 3 puntos de agua, con la capacidad de corte en los planos vertical y horizontal, tipificando al detalle la parte media y el piso del acuífero respectivamente. Esto ha permitido analizar y clasificar los tres puntos de agua investigados.
- Los puntos No. 1, 2 y 3 no tenían la menor manifestación de agua al momento de ser inspeccionados (30/03/2022). En el Punto No. 1, situado sobre la cima de una colina, sólo era visible un trazo erosionado con cárcavas. En el Punto No. 2 aguas abajo, solo eran visibles pastizales y en el Punto No. 3 se distinguía un surco erosionado apenas húmedo.
- Las condiciones de disposición de capas litológicas no son favorables a la protección de acuíferos como tal, por tratarse de un acuífero colgado, según lo demuestran la abundante información técnica documentada en este proyecto, ya que se trata de dos capas permeables favorables a la infiltración, como la cubierta de suelo y la limolita calcárea de origen marino, superpuestas a la arenisca limolítica con escasa permeabilidad. Esta última hace de piso impermeable por donde escurren por rechazo los aportes por precipitación, originando puntos de agua temporales en época de lluvias.
- El objeto de esta investigación ha sido verificar si el concepto de "nacimiento" se aplica en propiedad a determinado curso de agua, las analogías idiomáticas con los cuerpos vivos como brazo o boca de un río son comunes. No obstante, no debe perderse de vista que nacimiento de una fuente significa que, a partir de un punto dado, el flujo de agua cobra vida, es decir, no se trata de flujos temporales. En términos generales, los ojos de agua o manantiales son los que originan flujo

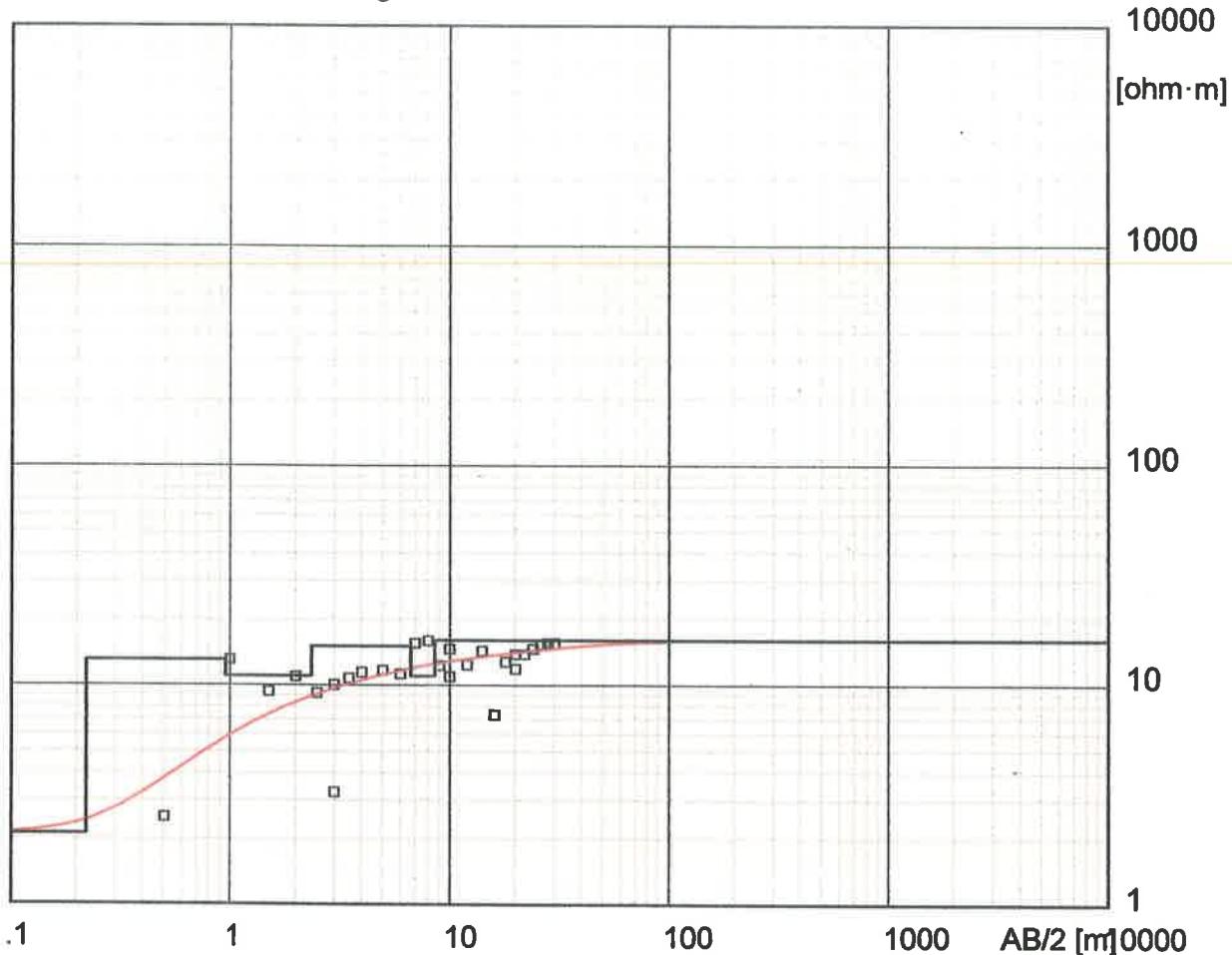
estable. En hidrología se habla de flujo base, en cambio en hidrogeología es el nivel freático de un embalse subterráneo el que genera este punto.

- Según referencias de Custodio y Llamas, (1976) que para ser digno del calificativo de “ojo de agua” o manantial la fuente debe cumplir lo siguiente: “*Un manantial puede definirse como un punto o zona de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua procedente de un acuífero o embalse subterráneo*”. Por consiguiente, a nuestro juicio, los tres puntos de agua inspeccionados, al estar el No.1, No.2 y No.3 secos al momento de la valoración, no tienen esta categoría de nacimiento de fuente superficial de agua.



Electrical sounding Schlumberger - SEV-1.WS3

SEV-1 Senderos Del Chagres



Location X = 659774 Y = 1010970 Z = 169

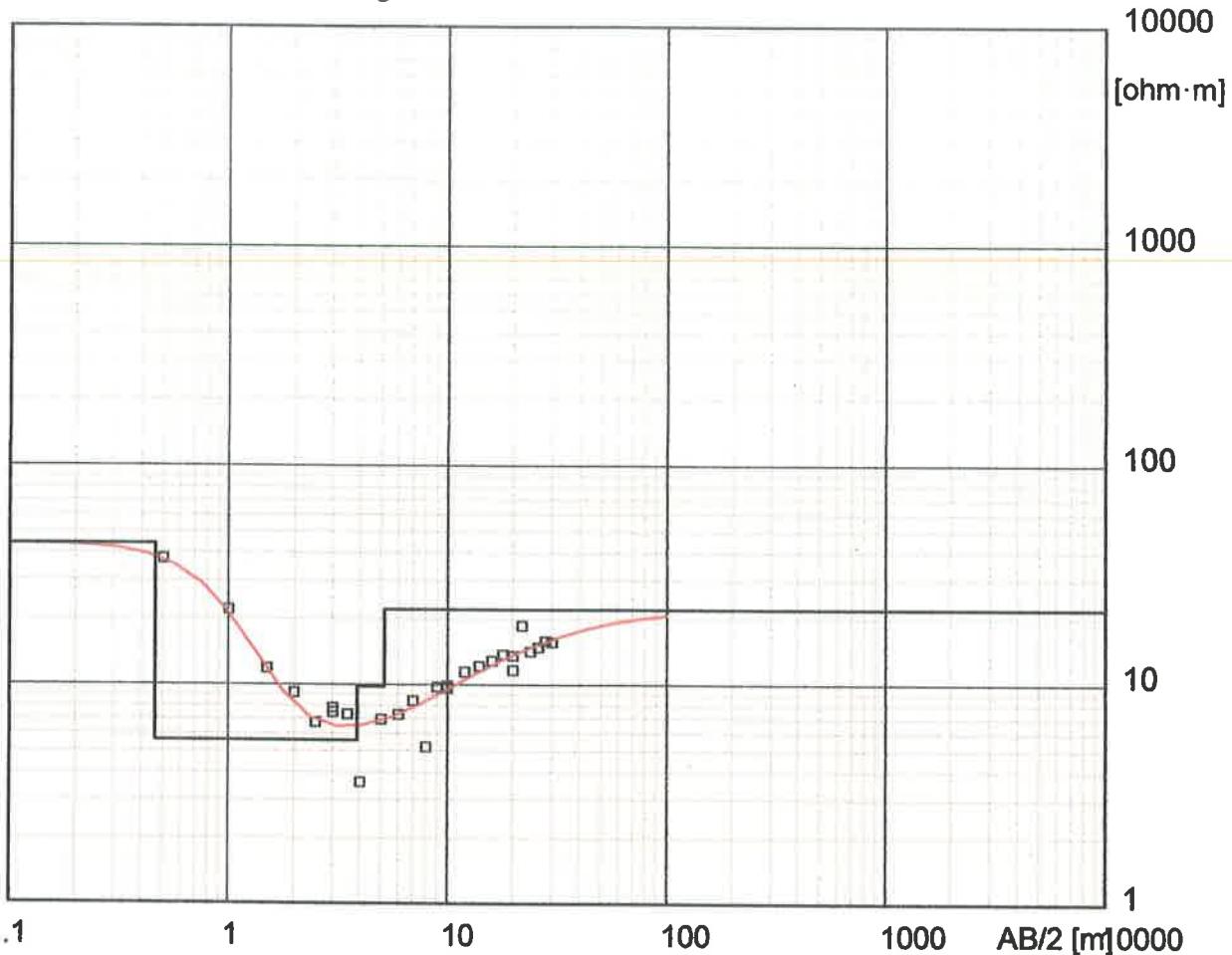
Model

Resistivity [ohm·m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
2.1	.22		169
13	.73	.22	168.8
11	1.4	.95	168
15	4.3	2.3	166.7
11	1.9	6.6	162.4
16		8.5	160.5

Área de influencia Punto No. 1 Nacimientos

Electrical sounding Schlumberger - SEV-2.WS3

SEV-2 Senderos Del Chagres 2022



Location X = 659766 Y = 1010945 Z = 169

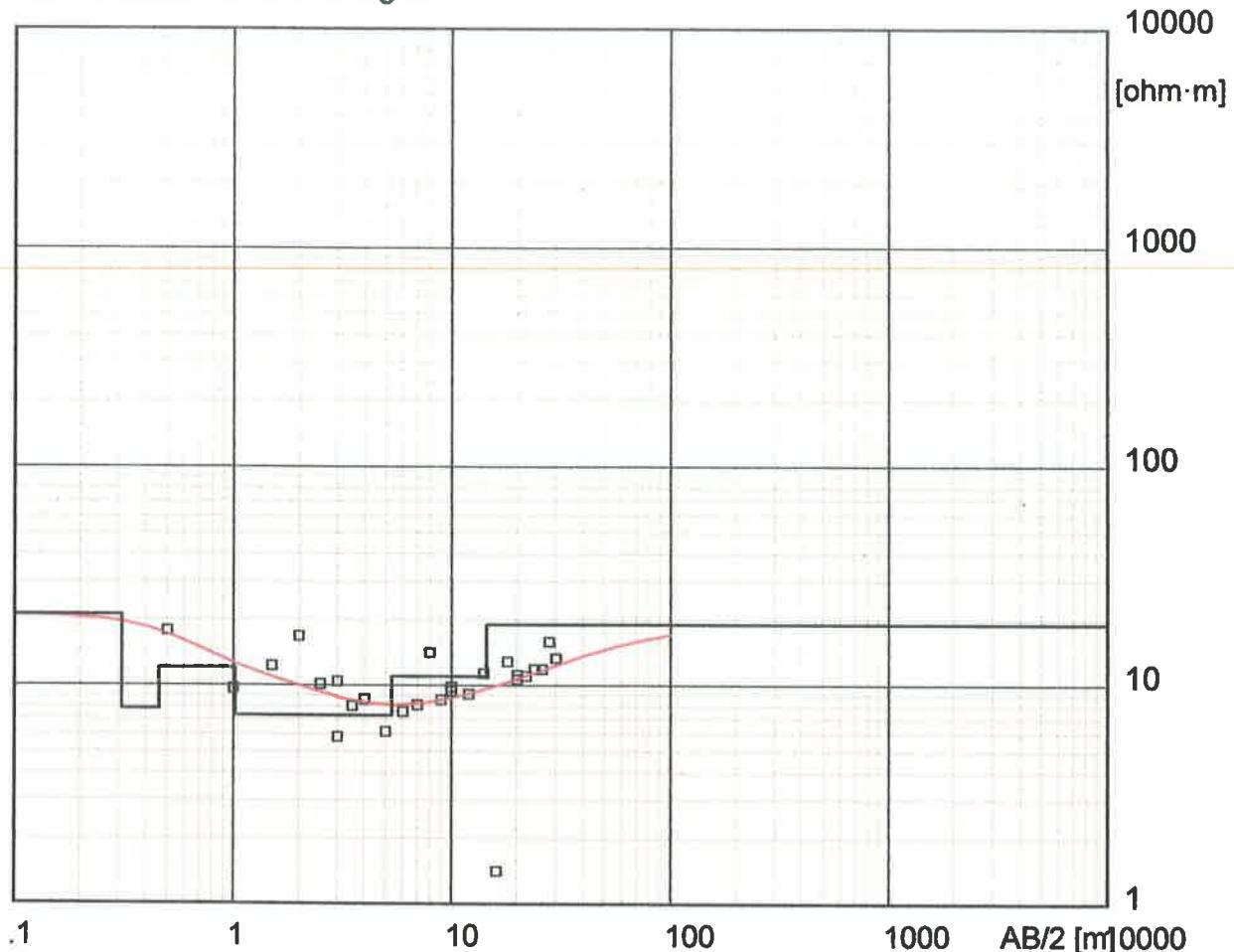
Model

Resistivity [ohm·m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
44	.46		169
5.6	3.4	.46	168.5
9.8	1.3	3.9	165.1
22		5.2	163.8

Área de influencia Punto No. 1 Nacimientos

Electrical sounding Schlumberger - SEV-3.WS3

SEV-3 Senderos Del Chagres



Location X = 659478 Y = 1011463 Z = 151

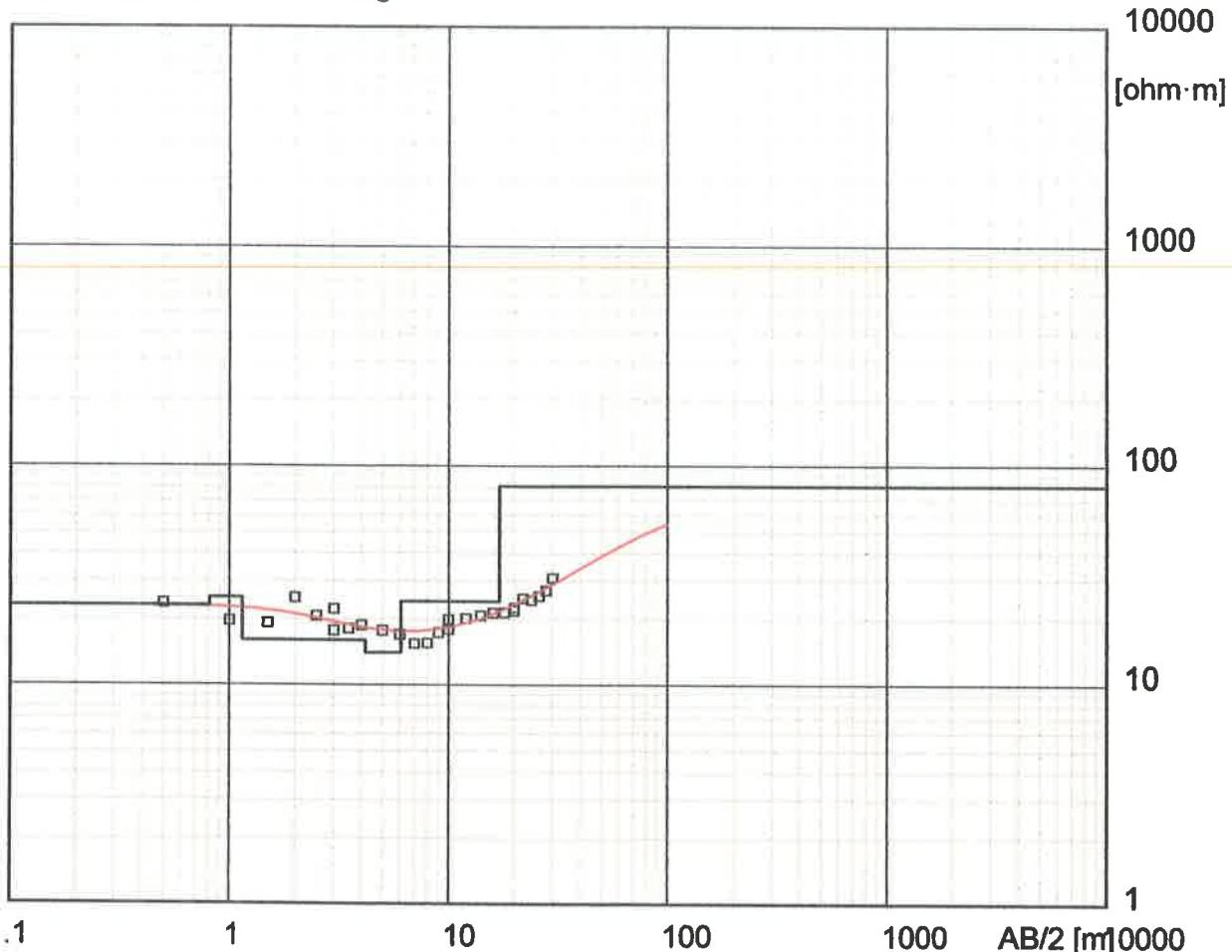
Model

Resistivity [ohm·m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
21	.31		151
7.8	.15	.31	150.7
12	.56	.46	150.5
7.3	4.3	1	150
11	9.1	5.3	145.7
19		14	137

Área de influencia Punto No. 2 Nacimientos

Electrical sounding Schlumberger - SEV-5.WS3

SEV-5 Senderos Del Chagres



Location X = 659520 Y = 1011240 Z = 145

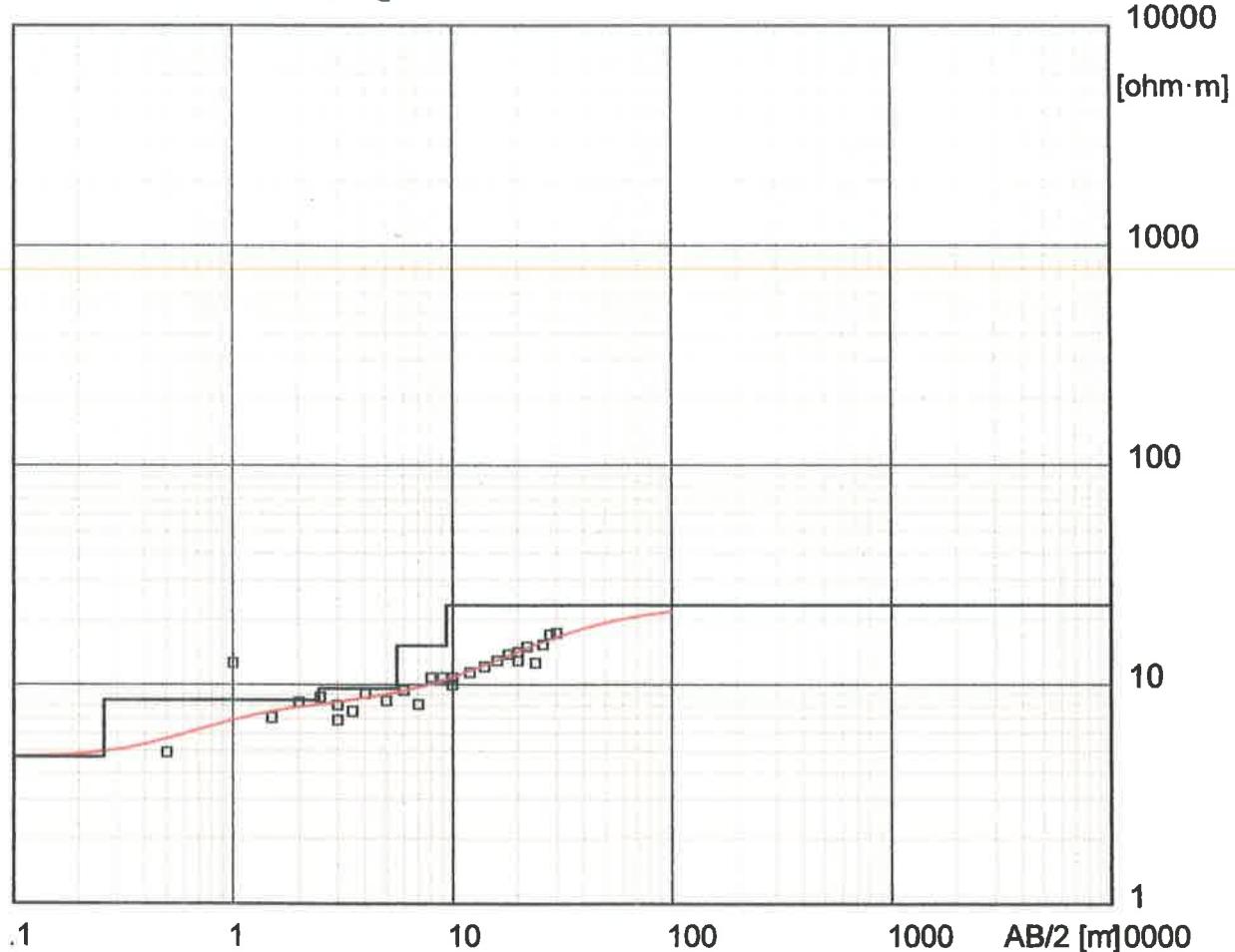
Model

Resistivity [ohm·m]	Thickness [m]	Depth [m]	Altitude [m]
23	.81		145
25	.34	.81	144.2
16	3	1.2	143.8
14	1.9	4.2	140.8
24	11	6.1	138.9
81		17	128

Área de influencia Punto No. 3 Nacimientos

Electrical sounding Schlumberger - SEV-6.WS3

SEV-6 Senderos Del Chagres



Location X = 659573 Y = 1011276 Z = 147

Model

Resistivity	Thickness	Depth	Altitude
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
4.7	.26		147
8.5	2.2	.26	146.7
9.6	3.1	2.5	144.5
15	3.8	5.6	141.4
23		9.4	137.6

Área de influencia Punto No.3 Nacimientos