

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMERICA LATINA
EDICION 2017



TEMA:

Metodología para la Identificación y Caracterización de
Acuíferos Superficiales en un Campo Geotérmico de El
Salvador.

PRESENTAN:

Ascencio Hernández Eduardo Ismael
Campos Hernández Glenda Xiomara
Muñoz Cardoza Tania Gissel

ASESOR:

Antonio Matus
Luis Alberto Franco

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2017

Contenido

RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	7
3. OBJETIVOS.....	8
3.1. Objetivo General.....	8
3.2. Objetivos específicos.....	8
4. MARCO TEÓRICO.....	9
4.1. Conceptos básicos.....	9
4.1.1. Geología.....	9
4.1.2. Hidrología.....	9
4.1.3. Hidrogeología.....	12
4.1.4. Hidrogeoquímica.....	17
4.1.5. Geofísica.....	22
4.1.6. Conceptos complementarios.....	25
5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
5.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	27
5.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	28
5.3. ELABORACIÓN DE METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ACUÍFEROS EN UN CAMPO GEOTÉRMICO.....	28
6. ANÁLISIS DE DATOS.....	29
6.1. Geología:.....	29
6.2. Litología.....	29
6.3. Hidrología.....	30
6.4. Hidrogeología.....	31
6.5. Hidrogeoquímica.....	35
6.6. Geofísica.....	44
6.7. Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	46
7. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	53
7.1. METODOLOGÍA PARA IDENTIFICACIÓN DE ACUÍFEROS.....	53
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
9. AGRADECIMIENTOS.....	56
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
11. APÉNDICES.....	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico	11
Figura 2. Pozos en acuífero libre y confinado	13
Figura 3. Esquema de correlación de información para generación de modelo conceptual	28
Figura 4. Geología presente en la zona de estudio.	30
Figura 5. Zona de estudio, delimitada por cuenca hidrográfica.	31
Figura 6. Unidades Hidrogeológicas presentes en la zona de estudio y dirección de flujo subterráneo	35
Figura 7. Mapa hidrogeológico con diagramas de stiff.	37
Figura 8. Evaluación del pH.....	38
Figura 9. Evaluación de Temperatura.	38
Figura 10. Concentraciones de Sodio.....	39
Figura 11. Concentraciones de Potasio	40
Figura 12. Concentraciones de Calcio	40
Figura 13. Concentraciones de Magnesio.....	41
Figura 14. Concentraciones de Cloruros.....	42
Figura 15. Concentraciones de Sulfatos	42
Figura 16. Diagrama de piper	43
Figura 17. Localización de TDEM utilizados en el análisis de resistividad.....	46
Figura 18. Modelo hidrogeológico conceptual.....	47
Figura 19. Mapa de secciones de interés.....	48
Figura 20. Sección longitudinal 1, Modelo Hidrogeológico Conceptual.	49
Figura 21. Sección longitudinal 2, Modelo Hidrogeológico Conceptual.	50
Figura 22. Sección 3 (transversal), Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de la Transmisividad	15
Tabla 2. Cationes y aniones fundamentales	17
Tabla 3. Sitios de red de monitoreo disponible para el presente estudio.....	19
Tabla 4. Parámetros para la valoración de la calidad del agua	20
Tabla 5. Valores estándares de normativas aplicables	21
Tabla 6. Características de los métodos eléctricos.	24
Tabla 7. Tabla de correlación de resistividad y minerales.	25
Tabla 8. Tabla de información recopilada	27
Tabla 9. Piezometría de las fuentes localizadas al interior de la zona de estudio.	34
Tabla 10. Datos químicos analizados.	36
Tabla 11. Tipos de agua de fuentes con base en Diagrama de Piper.	44
Tabla 12. Coordenadas de sondeos TDEM	45

RESUMEN

El presente documento expone una metodología diseñada para la caracterización de acuíferos. En principio, se pueden definir como acuíferos profundos los situados a profundidades mayores a 300 m.

La metodología empleada para caracterizar acuíferos, se basa en estudios de hidrogeología convencional, combinado con resultados obtenidos en diversas especialidades de Geociencias, y la aplicación de técnicas que permiten resolver algunas incertidumbres que podrían surgir como parte de la complejidad del medio a profundidad.

Se describen las técnicas y metodología aplicadas para llevar a cabo la caracterización hidrogeológica, resolver los diferentes aspectos relacionados con la determinación litológica, funcionamiento hidrodinámico, así como características hidroquímicas y ambientales del acuífero existente. Cabe indicar, que los resultados obtenidos de la aplicación metodológica, han permitido obtener algunas conclusiones relacionadas con la determinación a profundidad del acuífero de interés, así como la definición de un modelo conceptual básico, del funcionamiento hidrogeológico.

Palabras clave: Acuíferos, metodología, hidrogeología, geociencias, hidrogeoquímica, litología, modelo conceptual.

INTRODUCCIÓN

El presente documento, contiene la investigación titulada *Metodología para la Identificación y Caracterización de Acuíferos Superficiales en un Campo Geotérmico de El Salvador*, que se ha desarrollado en el Marco del Diplomado en Geotermia para América Latina, edición 2017 con apoyo de UNU-GTP, NDF, ICEIDA, Universidad de El Salvador y Grupo CEL.

Considerando que los acuíferos en el subsuelo del Campo Geotérmico en estudio, son de real importancia tanto para la población de la zona como para otros actores que intervienen en el territorio, existen acuíferos que son aprovechados para el abastecimiento de agua potable para la población que constituyen el área de estudio.

En este contexto se considera de especial relevancia tanto teórica como práctica el elaborar una propuesta metodológica que permita identificar y caracterizar acuíferos someros en un campo geotérmico, a través de la interpretación de diferentes datos hidrológicos, hidrogeoquímicos y geofísicos, con el fin de localizarlos en profundidad e identificar sus características principales.

Los datos e información recabada en campo se clasifican en las distintas disciplinas como hidrología, hidrogeoquímica, geofísica. Estos datos proporcionaron los suficientes elementos para interpretar las condiciones y características en las que se localiza los acuíferos someros, contribuyendo a un análisis más detallado de la zona en estudio.

Finalmente, los hallazgos obtenidos en esta investigación permiten ordenar una propuesta metodológica para identificar y caracterizar los acuíferos someros en zonas de campos geotérmicos, que puede implementarse en otros casos similares, y así contribuir a la comunidad académica y/o a la geotermia en general.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los acuíferos existentes en el subsuelo del Campo Geotérmico, son de vital importancia en la zona, dado que existen acuíferos localizados superficialmente, que son aprovechados para el abastecimiento del recurso hídrico hacia los municipios que circundan el campo geotérmico.

Consientes que el agua es un elemento básico para la vida de los seres humanos, las plantas y los animales, es además imprescindible para el desarrollo de la agricultura e industria de un país, su escasez o abundancia determinan el potencial productivo de una región. Sin embargo, son los seres humanos quienes más inciden en la calidad y disponibilidad del agua, tanto superficial como subterránea, pues a medida que las poblaciones crecen, la necesidad de abastecimiento es mayor y al mismo tiempo la cantidad apta para el consumo disminuye (UICN, 2005).

Con base en lo anterior, se indica en términos generales, la importancia del recurso hídrico, considerando una utilización sostenible, que permita una adecuada gestión y protección del recurso agua. Asimismo la importancia de realizar investigaciones hidrogeológicas, que permitan caracterizar los recursos hídricos del país, principalmente en zonas con potencial de desarrollo industrial, como es el caso de la Generación Geotérmica y que la investigación denominada "Metodología para la Identificación de Acuíferos Superficiales en un Campo geotérmico de El Salvador" permitirá la caracterización en términos generales de un acuífero, comprendiendo criterios hidrogeológicos y considerando un análisis geofísico, litológico e hidrogeoquímico del agua subterránea, lo cual, se espera sea útil para las instancias y/o instituciones gubernamentales relacionadas con el abastecimiento y monitoreo del recurso; así como constituir la base para investigaciones posteriores de interés regional o nacional.

2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

En vista que el agua subterránea suple diferentes demandas como resultado de los usos del agua a nivel nacional, tanto para consumo humano, abastecimiento doméstico, desarrollo turístico, como para desarrollo industrial; siendo todos empleados en la zona de estudio, debido a la presencia de un campo geotérmico.

La importancia de disponer de una metodología para la identificación y caracterización de acuíferos superficiales en un campo geotérmico, es de relevante importancia para la empresa que hace geotermia a nivel nacional, así como en general para el país, dado que permite realizar una investigación hidrogeológica puntualmente para la zona de estudio, considerando que éste tipo de información es limitada o en muchas ocasiones no disponible, dado que corresponde a datos o informes con intereses particulares de explotación del recurso hídrico y por consiguiente la poca información generalizada con la que se cuenta, se resume en el mapa hidrogeológico del país; condición que muchas veces no permite ampliar sobre las características de los acuíferos existentes.

La disponibilidad del recurso subterráneo recobra relevancia, principalmente porque el agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento, en los continentes; misma que se encuentra almacenada en acuíferos ubicados a diferentes niveles de profundidad que, en función del desarrollo de cada zona en particular, podría llegarse a una sobreexplotación, en los casos donde no se puede tener el control correspondiente.

Con base en lo antes indicado, la necesidad de estudiar y plantear una metodología para la identificación de acuíferos en un campo geotérmico, a fin de establecer un procedimiento funcional que facilite la caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de un acuífero.

3. OBJETIVOS

3.1.Objetivo General

Plantear una metodología que permita identificar y/o caracterizar acuíferos someros en un campo geotérmico, mediante la interpretación hidrogeológica, hidrogeoquímica básica y geofísica, disponible para conocer la localización en profundidad del sistema-acuífero presente y sus características asociadas.

3.2.Objetivos específicos

- Identificar el acuífero en un campo geotérmico, a partir del análisis de información hidrogeológica existente, principalmente de pozos perforados y manantiales con propósitos de abastecimiento y datos contenidos en mapas del país, disponibles para consulta.

- Caracterización hidrogeoquímica del acuífero presente al interno del campo geotérmico, a partir del análisis de resultados químicos obtenidos de datos tomados previamente y disponibles para propósitos académicos.

- Interpretación y correlación de información de sondeos TDEM disponibles, así como de análisis perfiles litológicos de pozos perforados para propósitos de abastecimiento y pozos geotérmicos, con el propósito de complementar el análisis de identificación de acuíferos superficiales en un campo geotérmico.

4. MARCO TEÓRICO

Para este estudio se ha retomado diferentes conceptos teóricos que permitirán la comprensión en cuanto a la interpretación de los resultados de los datos analizados para la presente investigación y posteriormente presentar los hallazgos encontrados.

4.1. Conceptos básicos

Con el objeto de comprender la lógica del proceso de formación de un acuífero, es importante entender algunos conceptos como los que se describen a continuación:

4.1.1. Geología

La geología es la información base para los estudios hidrogeológicos ya que define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas favorables para almacenar aguas subterráneas (Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2004).

4.1.1.1. Litología (www.ecured.q, 2017)

La litología es la parte de la geología que estudia a las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte así como su composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.

4.1.2. Hidrología

4.1.2.1. Ciclo Hidrológico

Casi toda el agua subterránea existente en la tierra tiene origen en el ciclo hidrológico, que es el sistema por el cual el agua circula desde océanos y mares hacia la atmósfera y de allí hacia los continentes, donde retorna superficial o subterráneamente los mares y océanos. Los factores que influyen en los procesos del ciclo hidrológico son fundamentalmente los factores climáticos, como la temperatura del aire, intensidad de los vientos, la humedad relativa del aire y la insolación y el tipo de densidad de la cobertura vegetal.

En el ciclo hidrológico se deben comprender seis conceptos fundamentales, que son los siguientes:

- **Precipitación:** es la caída del agua en estado líquido o sólido sobre la superficie terrestre. Es la fuente de la formación de las aguas de la tierra, ríos, lagos, aguas subterráneas y glaciares. El vapor de la precipitación en una cuenca o región, se obtiene a partir de registros pluviométricos.

- **Evaporación:** es el proceso por el cual el agua de la superficie terrestre pasa del estado líquido al vapor, siendo la energía solar el principal factor desencadenante del proceso.
- **Evapotranspiración:** es el agua evaporada a partir del tenor de humedad del suelo y transpiradas en el proceso de desarrollo de las plantas.
- **Escurremientos superficiales:** es el proceso por el cual el agua de lluvia precipitada en la superficie de la tierra fluye por acción de la gravedad desde las partes más altas hacia las más bajas, confluyendo en ríos, arroyos y otros cuerpos de agua.
- **Escurrecimiento sub-superficial:** es la precipitación que llega a infiltrarse en el suelo y circula lateralmente a pequeñas profundidades, sin llegar a la zona saturada y reaparece en superficie, incorporándose al escurrecimiento superficial
- **Escurrecimiento subterráneo:** es parte del agua precipitada que se infiltra y llega a la zona saturada, recargando los acuíferos.

Por otra parte, es esencial hacer la diferencia entre agua superficial y agua subterránea, ésta última, es el agua que se aloja y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos. La fuente de aporte principal es el agua de lluvia, mediante el proceso de infiltración. Otras fuentes de alimentación localizada pueden ser los ríos, arroyos, lagos y lagunas. El agua subterránea se sitúa por debajo del nivel freático y está saturando completamente los poros y fisuras del terreno y fluye a la superficie de forma natural a través de vertientes, manantiales o cauces fluviales. La Figura 1 muestra el ciclo hidrológico.

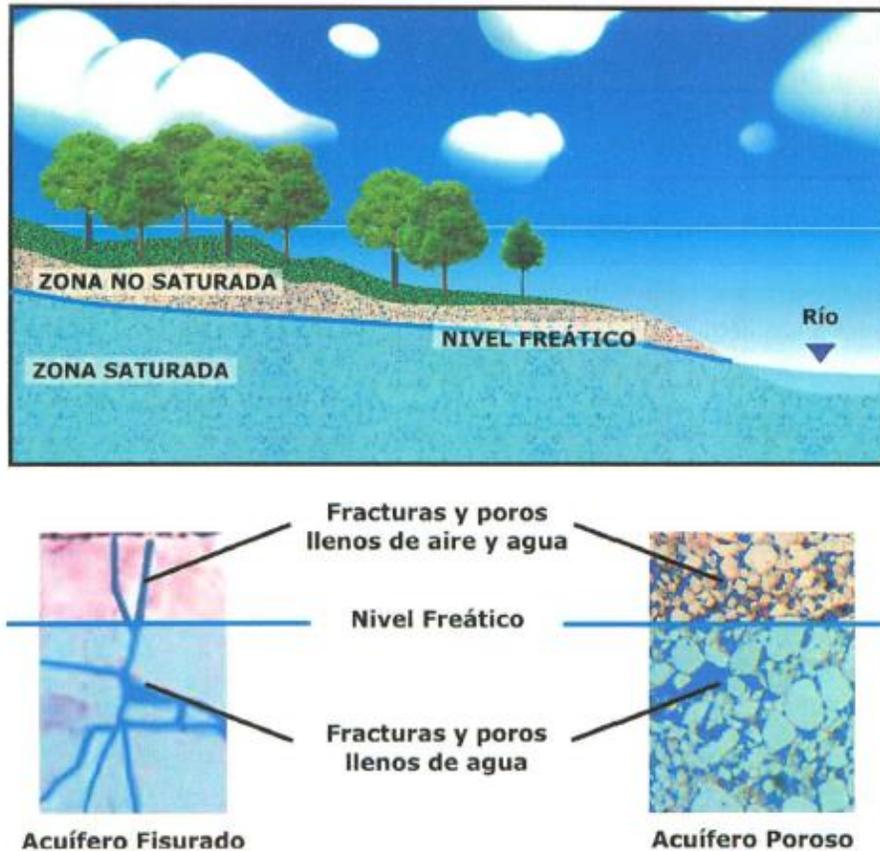


Figura 1. Ciclo hidrológico

Fuente: Collazo, 2012

- Distribución vertical del agua subterránea:** en un perfil del subsuelo, normalmente se presentan dos zonas con caracteres hidráulicos diferentes, integrados por arrias franjas o fajas. La zona más somera se denomina de aireación o zona no saturada y la más profunda de saturación o zona saturada. La zona no saturada es la situada entre la superficie del terreno y la superficie freática y sus poros y fisuras están ocupados por agua y aire. Esta zona se divide en: a) zona de evapotranspiración o zona edáfica, se extiende hasta donde llegan las raíces de la vegetación existente; por tanto, tiene espesor variable y se caracteriza por ser la sección donde los procesos físicos-químicos y biológicos, son más intensos y variados. La existencia de abundante materia orgánica (horizonte A del suelo) y la fuerte actividad biológica vegetal y de microorganismos, que genera una alta producción de CO₂, hacen que la faja edáfica actúe como un eficiente filtro natural frente a numerosos contaminantes (metales, plaguicidas, etc.), b) zona intermedia: está comprendida entre el límite de ascenso capilar del agua y el límite de alcance de las raíces de las plantas, c) zona capilar: se encuentra desde la superficie freática hasta el límite de ascenso capilar del agua. Su espesor depende principalmente de la distribución del tamaño de los poros y de la homogeneidad del terreno. La zona

saturada: está situada debajo de la superficie freática y donde todos los poros existentes en el terreno están llenos de agua.

4.1.3. Hidrogeología

4.1.3.1. Acuífero

Se denomina acuífero a toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir el agua subterránea a través de ella, pudiendo extraerse en cantidades significativas mediante obras de captación. No todas las formaciones geológicas tienen la capacidad de almacenar y transmitir agua, encontrándose formaciones que pudiendo contener agua no la transmiten en condiciones naturales y por lo tanto no es posible extraerla, son los llamados acuicludos (ejemplo: arcillas), otras formaciones no son capaces de almacenar ni transmitir el agua subterránea, son impermeables y a estas se les llama acuífugos (ejemplo: granitos, gneiss) y por último encontramos los acuitardos (ejemplo: limos arenosos), que son formaciones semipermeables, que transmiten el agua muy lentamente y que resulta muy difícil su extracción mediante obras de captación, pero que son importantes para la recarga de acuíferos subyacentes, debido a la posible infiltración vertical o drenaje. Los acuíferos se clasifican, en función de su estructura y el tipo de porosidad derivada de los materiales que conforman el acuífero.

- En La *Figura 2* se muestra el acuífero en función de su estructura son:
 - El acuífero libre, no confinado o freático: son cuyo piso es impermeable y su techo está a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuífero es directa y se realiza por infiltración del agua lluvia de la zona no saturada o por infiltración de ríos o lagos. Son los más afectados en caso de sequía, debido a que su nivel freático oscila con los cambios climáticos. Pozos muy someros se ven afectados, cuando el nivel freático desciende hasta por debajo de la profundidad total del pozo.
 - Acuífero confinado, cautivos o a presión: limitados en su parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad. La presión hidrostática a nivel del techo del acuífero es superior a la atmosférica y la recarga es lateral. Cuando se realiza un pozo en este tipo de acuíferos, el agua contenida en ellos asciende rápidamente por su interior. Si el agua alcanza la superficie, al pozo se llama surgente. Superficie potenciométrica se denomina al nivel del agua virtual que se genera cuando se integran todos los niveles hidráulicos observados en los pozos del acuífero confinado.
 - Acuífero semiconfinados o semicautivos: son mucho más frecuentes en la naturaleza que los cautivos. En estos, el techo, el piso o ambos están formados por capas de baja permeabilidad que si bien dificultan no impiden la circulación vertical del agua. para que ello suceda, además de la permeabilidad debe existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y otro superior o inferior. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de las unidades de baja permeabilidad denominada semiconfinante, filtrante o acuitardos.

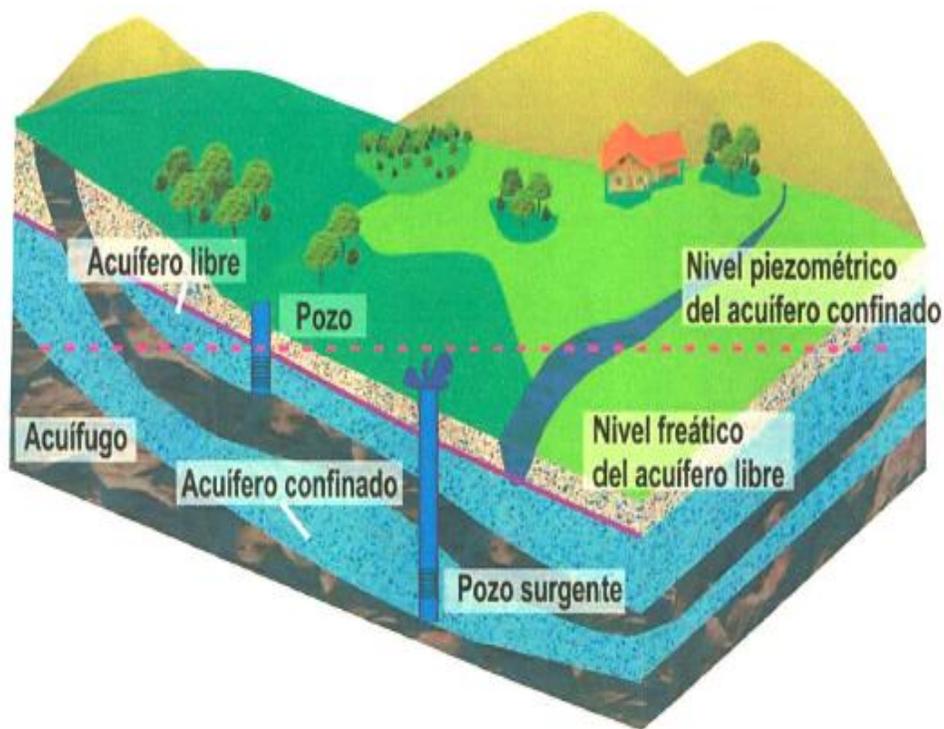


Figura 2. Pozos en acuífero libre y confinado

Fuente: Collazo, 2012

- Los acuíferos, en función del tipo de porosidad se clasifican en:
 - Acuífero de porosidad primaria, poroso o sedimentario: constituidos por formaciones geológicas sedimentarias. Los materiales suelen ser gravas y principalmente arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc.) estos materiales pueden ser sueltos o no consolidados (generalmente son formaciones recientes, de edad cuaternaria) o consolidados
 - Acuífero de porosidad secundaria o fisurado: formado por rocas "duras" de origen ígneo o metamórfico. La porosidad en estos acuíferos viene dada por la presencia de zonas de alteración, fracturas, fallas o diaclasas, única forma que tiene el agua al almacenarse y de circular. Hay que tener en cuenta que para que el agua pueda circular, estas fracturas tienen que estar abiertas y comunicadas.
 - Acuíferos kársticos por disolución: compuestos por rocas de origen carbonático (calizas, margas, dolomías), donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrollan de forma secundaria por disolución de carbonato. El agua en estos acuíferos circula

por entre los huecos con una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fracturados.

4.1.3.2. Propiedades físicas de los acuíferos

Las propiedades de los acuíferos, son imprescindibles para conocer la capacidad de almacenar y transmitir agua, y así poder establecer un modelo real de comportamiento del agua subterránea. Aquí se mencionarán la porosidad, la transmisividad, la permeabilidad, y el coeficiente de almacenamiento.

- Porosidad: es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la roca o suelo. Se puede expresar en porcentaje, multiplicando el valor de la porosidad por 100.
- Porosidad efectiva: es la razón entre el volumen de agua efectivamente liberado y el volumen total de la misma.

En la porosidad influyen varios factores: forma de los granos que determina la forma y dimensiones de los poros. Disposición de los granos en el espacio (empaquetamiento). Tamaño del grano.

Conocer los componentes disueltos o en otras formas del agua subterránea es una de las características más importantes a determinar. La presencia y concentración de determinados compuestos hace que el agua subterránea se diferencie de otras.

Parámetros hidrogeológicos (Iglesias, 1984)

- La permeabilidad es el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero, bajo la influencia de un gradiente, a temperatura de campo.
- La transmisividad es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Partiendo de la definición, sus dimensiones son las siguientes:

$$T = (L^3/T)/L = L^2 T^{-1}$$

T = dimensión tiempo. L = dimensión longitud.

Lo más común es que la transmisividad se mida en m²/día, m²/hora o m²/segundo. Sin embargo, la unidad que da cifras más manejables es el m²/día, por lo que se aconseja sea usada en todos los ensayos.

A efectos de irse incorporar este concepto en la **Tabla 1**, se presentan los valores de transmisividad, asociados a diferentes tipos de acuíferos.

Tabla 1. Valores de la Transmisividad

T (m²/día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100l/s con 10 m de depresión teórica

Fuente: (Iglesias, 1984)

4.1.3.3. Características físicas

- Temperatura: poco variable y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar. En profundidad depende del gradiente geotérmico, que aumenta 1° cada 30 m de profundidad.
- Conductividad eléctrica: es la medida de la facilidad de un agua para conducir la corriente eléctrica y su valor aumenta con el tenor de sales disueltas en forma de iones. En aguas subterráneas los valores de conductividad son del orden de 10⁻⁶ mhos/cm, o micromho/cm (mhos/cm a 25° C). Este parámetro aumenta con la temperatura.

4.1.3.4. Piezometría (Custodio & Llamas, 1983)

La superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero referidas a una determinada profundidad. Se las representa mediante líneas de igual altura piezométrica, de forma similar a las de la representación de una superficie topográfica mediante curvas de nivel.

La superficie freática es la que define el límite de saturación de un acuífero libre, y coincide con la superficie piezométrica correspondiente a los puntos situados en el límite de saturación.

- Determinación de los niveles piezométricos

La única forma disponible para medir los niveles piezométricos en un acuífero es mediante una perforación que permita un acceso directo al mismo. En el caso de acuíferos libre, solo en raras ocasiones los métodos geofísicos de superficie permiten determinar con una garantía aceptable la posición de la superficie freática. Las perforaciones para medir los niveles piezométricos son los pozos existentes en la zona, excavaciones hasta el nivel del

agua y los piezómetros que son a modo de pozos, en general de pequeño diámetro, construidos especialmente con este objetivo.

Por las razones aludidas debe tratarse de aprovechar los accesos al acuífero que ya existían y sean suficientemente representativos tales como pozos, galerías, zonas pantanosas, manantiales, ríos conectados con el acuífero, etc. Los pozos y galerías en producción provocan afecciones a los niveles piezométricos y dan valores dinámicos que varían según el régimen de explotación. Las zonas pantanosas y lagunas indican una salida de agua y en general son una superficie de nivel constante. Los manantiales son rebosaderos naturales y señalan niveles de base si son permanentes; a veces puede dar lugar a confusiones si drenan zonas no saturadas o acuíferos suspendidos; por eso deben seleccionarse manantiales de caudal importante y con geología bien conocida. Debe considerarse como manantiales las zonas de surgencias en ríos.

En pozos y piezómetros, el nivel del agua se mide en general con una metálica y un dispositivo o artificio para delatar el nivel de agua. La profundidad del nivel piezométrico se mide desde una determinada referencia; para conocer el nivel piezométrico es preciso conocer la cota de referencia respecto a un cierto punto fijo tal como el nivel del mar, una señal determinada, etc.

4.1.3.5. Hidráulica subterránea (Salamanca)

El agua se mueve de los puntos en los que tiene más energía hacia aquellos en los que tiene menor energía., esa energía se denomina potencial hidráulico.

En el flujo del agua subterránea la velocidad es tan lenta que la energía cinética es despreciable frente a la energía potencial y la energía de la presión.

- Líneas de flujo y superficies equipotenciales

Una línea de flujo es la envolvente de los vectores de velocidad en un instante determinado. Trayectorias son los caminos seguidos por las partículas de agua en su recorrido. En régimen permanente las trayectorias coinciden con las líneas de flujo, en régimen variable pueden no coincidir.

Una superficie equipotencial es el lugar geométrico de los puntos del espacio que tienen un mismo potencial hidráulico. Por tanto, el flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales, buscando el máximo gradiente, igual que una pelota rueda por una ladera perpendicularmente a las curvas de nivel buscando la máxima pendiente.

Flujo regional

El flujo natural del agua subterránea en una región también se esquematiza mediante redes de flujo. La forma de la superficie freática es la que gobierna toda la red. Si la geología es compleja, nuestra representación será solamente una simplificación de la realidad. Las áreas de recarga y de descarga son aquellas en que el flujo subterráneo presenta una componente vertical descendente, y las áreas de descarga, ascendente.

Flujos locales y regionales, la diferenciación es relativa, depende de la escala que consideremos. Los flujos locales normalmente están asociados a valles de menor entidad y los flujos regionales a los valles principales de una región.

4.1.4. Hidrogeoquímica

4.1.4.1. Características químicas, físicoquímicas y físicas del agua

- Características químicas

PH: es la medida de la concentración de hidrogeniones del agua o de la solución estando controlado por las reacciones químicas y por el equilibrio entre los iones presentes. En agua subterránea varía entre 6,5 y 8,5.

- Constituyentes iónicos principales y secundarios (Lazio, 2001)

La gran mayoría de las sustancias disueltas en agua subterráneas se encuentran en estado iónico. En el agua subterránea los cationes y los aniones fundamentales son los siguientes: (Ver **Tabla 2**).

Tabla 2. Cationes y aniones fundamentales

Cationes	Aniones
Sodio (Na ⁺), Potasio (K ⁺), Calcio (Ca ⁺²), Magnesio (Mg ⁺²)	Cloruro (Cl ⁻), Sulfato (SO ₄ ⁻²), Bicarbonato (HCO ⁻³), Carbonato (CO ₃ ⁻²), Nitrato (NO ₃ ⁻)

Fuente: Elaboración propia a partir de Lazio, 2001.

El potasio, el nitrato y el carbonato suelen considerarse dentro de los iones fundamentales, aunque sus concentraciones sean pequeñas. Los constituyentes minoritarios, se encuentran en concentraciones inferiores al 1%, en relación a los iones fundamentales. Algunos de estos constituyentes son: Boro (B⁺³), Bromuro (Br), Compuesto fenólicos, Fosfato (PO₄⁻³, Manganeseo (Mn), Sílice (Si), circon (Zr⁺²), y Cobre (Cu⁺), Hierro (Fe⁺²).

Dentro de los constituyentes tóxicos y carcinógenos, se encuentra el Arsénico (As), Bario (Ba⁺²), Cadmio (Cd⁺²), Plomo (Pb), Fluoruros (F), y Selenio (Se). Con respecto a los gases disueltos en el agua, los principales son el oxígeno disuelto (O₂), Gas Carbónico (CO₂) y el Gas Sulfhídrico (H₂S).

- Agua subterránea destinada al abastecimiento humano

El agua destinada para el consumo humano, debe presentar características físicas, químicas y biológicas, que no perjudiquen la salud del ser humano. Para ello se establecen

normas de potabilidad, donde se indican las concentraciones máximas aceptables y máximas admitidas.

- Métodos Gráficos de Análisis

Comúnmente, se utilizan diagramas de Piper, Schoeller, Scatter y Stiff, cuyos fundamentos e interpretaciones son relativamente directos para quien los analiza. En forma particular, en los estudios de acuíferos, el diagrama de Piper, muestra de gran utilidad ya que permite conocer la evolución hidrogeoquímica en el proceso de mezclas de aguas de diferente naturaleza.

4.1.4.2. Calidad de Agua (La Geo, 2011)

La calidad del agua es entendida como la condición del agua con respecto a la presencia o ausencia de contaminación debido a la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas. Este, es un término neutral que no puede ser clasificado como bueno o malo sin hacer referencia al uso para el cual el agua es destinada. Por lo tanto, la Valoración de la Calidad de Agua, corresponde a la evaluación de la naturaleza, química, física y biológica del agua, en relación con su calidad natural, efectos humanos y uso pretendido.

- Red de monitoreo

Los puntos de muestreo caracterizan la calidad del agua en el período de tiempo muestreado. La red de monitoreo ambiental disponible para el presente estudio, cuenta con 21 sitios de toma de muestra fijos (9 fuentes o manantiales, 3 pozos excavados, 3 pozos perforados y 6 en el río y quebradas) (Ver **Tabla 3**).

Tabla 3. Sitios de red de monitoreo disponible para el presente estudio

ID	Tipo	Estación	Uso	X	Y
F_ Cruc	Fuente	Fuente Las Crucitas (Grifo)	Consumo	553465.38	265336.11
F_ Riy	Fuente	Fuente El Riyito	Consumo	552232.89	267084.00
F-01	Fuente	Fuente Santa Anita No.1	Consumo	551621.95	270999.97
F-05	Fuente	Fuente No. 5 ACOSAPMER	Consumo	551742.32	271092.09
F-16	Fuente	Fuente San Simón No.16	---	551115.90	271192.87
F-45	Fuente	Fuente San Simón No.45	---	545931.05	274804.15
F-79	Fuente	Fuente Zapotillo No.79	---	553740.01	267330.15
F-83	Fuente	Fuente El Tronador No.83	---	553230.06	266742.15
F-84	Fuente	Fuente Guallinac No.84	Consumo	554478.86	266576.64
PE-01	Pozo excavado	P. domestico Santos Pineda	---	552686.55	271128.40
PE-04*	Pozo excavado	P. domestico Juan Díaz	Consumo	552610.52	270816.33
PE-12*	Pozo excavado	P. domestico Pompilio Castaneda	Consumo	555133.15	271977.63
PP-01	Pozo perforado	Pozo ANDA 1	Consumo	552803.55	270512.19
PP-02	Pozo perforado	Pozo ANDA 2	Consumo	553216.13	271198.93
PP-03*	Pozo perforado	P. domestico Xochitl Cihuatl	Consumo	555470.54	270385.29
R_Casc	Río	Cauce La Cascada	---	551962.26	271306.41
R_DSanS	Río	Desembocadura Río San Simón	---	545842.92	274836.57
R_Frio	Río	Cauce Río Frío	---	551967.10	271292.90
R_Pisc	Río	Cauce Piscina	---	552002.93	271268.08
R_SanS	Río	Nacimiento Rio San Simón	---	552695.18	271324.78
RIO-02*	Río	Desembocadura Qda. Agua Caliente	---	550438.71	271890.05

Fuente: Elaboración propia, a partir del inventario de fuentes de agua de empresa geotérmica.

- **Medición de parámetros de la calidad del agua**

La calidad del agua se caracteriza por su composición (física, química y bacteriológica) la cual determina sus usos potenciales. Las mediciones de parámetros realizadas para cada punto de la red de monitoreo y su aplicación se muestran en la **Tabla 4**, a continuación:

Tabla 4. Parámetros para la valoración de la calidad del agua

Parámetros		Límite de detección	Unidad	Consumo	Riego	Calidad ambiental
in-situ	Temperatura Ambiente	-	°C			X
	Temperatura del agua	-	°C	X		X
	pH	-	u pH	X	X	X
	Conductividad		µmhos*10 ⁶ /cm		X	
Laboratorio de análisis	pH	1 - 14	u pH	X	X	X
	Conductividad		µmhos*10 ⁶ /cm		X	
	Sodio	0.01	mg/L	X		
	Potasio	10	mg/L	X		
	Calcio	2.5	mg/L	X		
	Magnesio	0.01	mg/L	X		
	Cloruros	0.30	mg/L	X	X	
	Sulfatos	1	mg/L	X	X	
	Nitratos	0.038	mg/L	X	X	X
	Boro	0.07	mg/L	X	X	
	Arsénico	0.005	mg/L	X	X	
	Calculados	Dureza Total (CaCO ₃)		mg/L	X	
Alcalinidad			mg/L	X		
Sólidos Totales Disueltos (STD)			mg/L	X	X	
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)			u RAS		X	
% Sodio			meq/meq		X	

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- **Frecuencia de muestreo**

El inventario de fuentes de agua retomado para el presente estudio, dispone de registros de muestreo con una frecuencia de dos (2) veces al año, uno en época seca y otro en la transición de lluviosa-seca. El primer muestreo realizado en los meses de marzo-abril y el segundo a finales de la época lluviosa septiembre-octubre.

- **Estándares aplicables para la evaluación de la calidad del agua**

Con el objetivo de contar con un referente de comparación de acuerdo a la aptitud de uso, la **Tabla 5** resume los valores máximos permitidos para agua potable, agua de consumo y de riego en El Salvador y los valores guías para la región centroamericana.

Tabla 5. Valores estándares de normativas aplicables

Parámetros	NSO 13.07.01:08	Límites permisibles			Unidad
		CAPRE	Decreto No. 51		
			Consumo	Riego	
pH	6 – 8.5	6.5 – 8.5	6.5 – 9.2	6.5 – 8.4	u pH
Temperatura del agua	No rechazable	18 - 30			°C
Conductividad		400		250 – 750	µS/cm
Sodio	200	25 – 200			mg/L
Potasio		10			mg/L
Calcio		100			mg/L
Magnesio		30 – 50			mg/L
Cloruros		25 – 250	50 – 250	195	mg/L
Sulfatos	400			200	mg/L
Nitratos (NO ₃)	45	25 – 50			mg/L
Boro	0.3			0.5 – 2.0	mg/L
Arsénico	0.01	0.01			mg/L
Dureza Total (CaCO ₃)	500				mg/L
Alcalinidad		350			mg/L
Sólidos Totales Disueltos STD	1000	1000			mg/L
Relación de Adsorción de Na RAS				0 - 10	
% Sodio				30 – 60	meq/meq

Fuente: La Geo, 2011.

Se conoce como Estándar o Norma, a la limitación específica establecida por la regulación y los requerimientos de una ley. Sin embargo existen también los Criterios o Parámetros de evaluación, los cuales permiten comparar la concentración o el nivel que una sustancia tiene y comprobar la calidad para un uso potencial. Un criterio puede ser utilizado para el desarrollo de un estándar (Lobo, 2000). La selección de parámetros de evaluación, también suelen dividirse en:

- **Específicos:** Cationes, Aniones y Oligoelementos.
- **Sustitutos:** DBO₅, Aceites, minerales, entre otros.
- **Indicadores:** Bacterias coliformes, especies de plancton, bentos (insectos acuáticos, caracoles, etc.), necton (peces).

Pozos para abastecimiento de agua (Norma Salvadoreña NSO 13.07.01:97, 1998).

Según la normativa Norma Técnica de Calidad de Agua Potable agua potable se considera como el agua apta para consumo humano, la cual debe estar exenta de organismos capaces de provocar enfermedades y de elementos o sustancias que pueden producir efectos fisiológicos perjudiciales, cumpliendo con los requisitos de la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:97.

Por otra parte para su abastecimiento se toma de referencia la Normas Técnicas Para abastecimiento de agua potable y Alcantarillados de aguas negras.

Las aguas superficiales y/o aguas subterráneas, que alimentarán el sistema, deberán satisfacer las siguientes condiciones:

- Caudal aprovechable: este será igual o mayor a la demanda máxima diaria de agua a final de período. El caudal disponible de la fuente deberá comprobarse con un “Estudio Base” fundamentado en Balances Hidrológicos, investigaciones hidrogeológicas y/o coeficientes hidráulicos de acuíferos y pozos. En el caso de pozos el caudal aprovechable será igual o mayor que la demanda máxima diaria suministrada en un período no mayor de 20 horas de bombeo. En caso de que el caudal aprovechable sea menor a Q_{mxD} , se podrán construir reservorios para compensar la demanda máxima horaria.
- Calidad del agua: según el documento “Reporte de monitoreo de calidad de agua en la Cuenca del Río San Simón, 2000-2011”, el análisis de las muestras de agua ha sido realizado en un laboratorio especializado de acuerdo a los Métodos Estándar APHA-AWWA. Las muestras se someterán a los siguientes análisis para investigar las sustancias tales como arsénico y boro; entre otros parámetros como temperatura, pH, sulfatos, cloruros, hierro, manganeso, calcio, sílice, etc.

Otras Consideraciones Legales (La Geo 2011).

Las empresas que utilicen agua en su proceso de producción también deben de conocer otros aspectos legales que les ayuden a establecer las características propias de su actividad y contar a su vez con manuales de operación que incluyan los aspectos de atención a denuncias ambientales, manejo de conflictos y un manejo adecuado de muestras comunes y muestras especiales (muestras para descargar o cargar una prueba legal).

A continuación se incluye la información resumida de lo que puede contemplarse en un proceso legal.

4.1.5. Geofísica

La geofísica estudia las propiedades físicas del subsuelo y permite correlacionarlas con la geología, lo cual en el caso de la exploración de aguas subterráneas contribuye a determinar la presencia y la geometría de los acuíferos o zonas acuíferas y la obtención de un modelo conceptual, que a su vez se valida con perforaciones exploratoria (Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2004).

4.1.5.1. Las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología (Arias, 2002)

Los avances alcanzados recientemente con las técnicas de prospección geofísica en la exploración de las aguas subterráneas abarcan muchas aplicaciones. Sin embargo, a pesar que el rendimiento y la confiabilidad de los estudio hidrogeológicos pueden ser mejorados con la aplicación de las técnicas geofísicas, estas son relativamente poco utilizadas por los hidrogeólogos.

Es de resaltar que los métodos geofísicos actúan en la exploración de aguas subterráneas como métodos indirectos; es decir, que ayudan a determinar las zonas más aptas a partir de parámetros físicos del subsuelo.

Por otra parte la prospección geofísica orienta la localización de las zonas donde existen condiciones para que una formación geológica se explote como acuífero. Solo un método de reciente aplicación en hidrogeología, la resonancia magnética protónica, permite la detección directa del agua subterránea.

Según Mario Enrique Arias Salguero los aportes de la prospección geofísica en la investigación hidrogeológica son los siguientes:

- **Delimitación de zonas aptas para la explotación del agua subterránea:** es decir, definir la geometría de los acuíferos. Por lo tanto, es un procedimiento indirecto que consiste en determinar la topografía del techo y de la base de la formación acuífera, así como de su extensión lateral
- **Control de calidad de las aguas subterráneas:** esto consiste en delimitar la interface de aguas con diferentes características como consecuencia de la contaminación. El agente contaminante podría atribuirse directamente a la acción humana (vertidos industriales o de hidrocarburos) o inducida por la sobreexplotación (intruso marina). Esta última detecta a menudo mediante el aumento de la conductividad eléctrica aparente que provoca el incremento de minerales en el agua subterránea
- **Estimación de los parámetros hidráulicos:** consiste en establecer correlaciones entre los parámetros físicos medidos y las características hidrodinámicas de la formación acuífera. Esta aplicación no siempre puede efectuarse dado que es necesario disponer en el sector estudiado de algunos sondeos mediante los cuales se identifiquen las características hidráulicas para tratar de obtener una correlación estadística
- **Protección de acuíferos superficiales:** se basa en la elaboración de mapas de vulnerabilidad, para lo cual se tiene en cuenta el grosor y la conductividad hidráulica vertical de los materiales situados entre la superficie del terreno y el nivel freático, es decir la zona no saturada. (Arias, 2002).

4.1.5.2. Métodos geofísicos (Vargas, 2002).

La **Tabla 6** muestra las características de los métodos eléctricos.

Tabla 6. Características de los métodos eléctricos.

Categoría	Tipo de registro	Utilización
Métodos que utilizan corrientes naturales	Polarización espontánea: mide las corrientes eléctricas naturales generadas en el subsuelo	En testificación geofísica y en algunos casos para la búsqueda de acuíferos
	Telúrico: registra las corrientes variables en el tiempo, generadas por la radiación solar y el campo magnético del planeta	Determinación de los espesores de la capas conductoras, morfología del basamento
Métodos que utilizan corrientes artificiales	Equipotenciales: si es un suelo homogéneo se introduce corriente continua, esta fluirá radialmente, generando superficies de igual potencia	Delimitación de cuerpos conductores a partir de mapas de potencial
	Caída de potencial: mide la relación en la disminución del potencial entre tres electrodos debido a las corrientes que circulan entre otros dos electrodos	Muy sensible a variaciones laterales de resistividad en el subsuelo, por lo que da buenos resultados en la localización de contactos y fallas geológicas
	Resistividad: se utilizan generalmente cuatro electrodos dispuestos de manera variable, en dos de ellos se inyecta una corriente y en los otros dos se mide el potencial generado; con lo cual se puede obtener el valor de la resistividad del suelo en función del dispositivo a utilizar	Fines ingenieriles; para la localización del sustrato rocoso. Tiene gran aceptación en las etapas de prospección del agua subterránea, así como en la búsqueda de restos arqueológicos
	Polarización inducida: se inyecta corriente en el terreno y se evalúa el decaimiento del potencial	Aplicado con mucho éxito a la prospección de minerales metálicos

Fuente: Vargas, 2002

4.1.5.3. Métodos electromagnéticos

Estos métodos son especialmente útiles en exploración de acuíferos colgados, cartografiado de contaminantes industriales, medición de salinidad e intrusión marina. Sus aspectos ventajosos con respecto a los métodos de corriente continua consisten en su mayor sensibilidad a pequeñas variaciones de resistividad, en que las mediciones se pueden hacer más rápidamente, y facilitan las investigaciones a mayor profundidad; además, son más eficaces en detectar los cuerpos conductores más que los resistivos, dentro de ellos la variedad de sondeos electromagnéticos en el dominio temporal (TDEM) quedan menos afectados por los efectos laterales y son muy útiles para la delimitación del

contacto de sedimentos aluviales con el basamento, cartografiado de lentes arenosos así como la interfase agua dulce/ agua salda. En la **Tabla 7** se muestra la correlación de resistividad y minerales.

Tabla 7. Tabla de correlación de resistividad y minerales.

Material	Resistividad (ohm-m)
Agua de mar	+/- 0,1
Agua dulce subterránea	20 - 100
Agua dulce superficial	20 - 1000
Agua salobre subterránea	1 - 20
Agua salobre superficial	2 - 20
Arcilla	2 - 30
Arena no saturada	>50
Arena saturada con agua dulce	30 - 300
Arena saturada con agua salada	0,1 - 5
Arena saturada con agua salobre	5 - 30
Arenisca y caliza maciza	1000 - 15000
Arenisca y caliza porosa	5 - 1000
Calcita	5E+12
Caliza	1E+04
Cuarzo	1E+12
Grafito	3E-04
Granito	1,00E+07
Ignea y metamórfica maciza	>1000
Ignea y metamórfica meteorizada	50 - 1000
Pirita	1E-02

Fuente: Miranda, s.f.

4.1.6. Conceptos complementarios

4.1.6.1. Pozo geotérmico (www.psb.com.sv, 2017).

Según la Perforadora Santa Bárbara los pozos geotérmicos se subdividen en productores y reinyectores. Los primeros son utilizados para extraer el vapor del reservorio, el cual es conducido hasta la turbina para generar electricidad. En cambio los segundos, conducen el agua residual del campo geotérmico para ser devuelta al reservorio a través de ellos.

Los pozos suelen tener un diseño telescópico; ya que la perforación se va desarrollando por etapas, en las cuales hay distintos diámetros. En algunos casos se inicia perforando un agujero de 34 pulgadas de diámetro, hasta una profundidad de 100 m. Se corre tubería, se cementa para fijarla al subsuelo y luego se continúa perforando y corriendo tubería de 20 pulgadas y al llegar a la profundidad deseada, se coloca una tubería ranurada de 12

pulgadas de diámetro y es a través de esas ranuras que gracias a la presión del reservorio se extrae la mezcla de vapor y agua caliente hacia la superficie.

Usos principales en la zona de estudio

En el proceso de exploración de un campo geotérmico, los pozos que se perforan suelen conocerse como exploratorios, y por otro lado dependiendo de la profundidad de los mismos también se les suele conocer como someros o profundos.

Un pozo de producción geotérmica expulsa líquidos con una temperatura considerable, debido al calor natural de la tierra. Los fluidos geotérmicos pueden ser de vapor seco o de agua caliente. Los fluidos geotérmicos muy calientes pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica. Los fluidos geotérmicos más "fríos" se destinan a proyectos tales como la calefacción, la acuicultura, el derretimiento de nieve, la elaboración de alimentos, la deshidratación, las tinas calientes y spas. Es de recalcar que en donde se ubica el acuífero los pozos geotérmicos están revestidos de cemento que sella para lograr una impermeabilidad.

5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se ha empleado una metodología por etapas o fases, con el objeto que se facilite la obtención de la información, posterior y análisis y por consiguiente la obtención de resultados satisfactorios. Las etapas consideradas en el presente estudio, se indican a continuación:

5.1.RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En esta primera etapa se gestionó la información necesaria para la ejecución del estudio, la cual fue proporcionada por la empresa concesionaria del campo geotérmico donde se localiza la zona de estudio, no obstante también se obtuvo alguna información no menos importante en la Alcaldía correspondiente a la zona de interés: (Ver **Tabla 8**)

Tabla 8. Tabla de información recopilada

Información Recopilada	Fuente de información
a. Perfiles litológicos de pozos geotérmicos existentes	Empresa geotérmica
b. Resistividad de sondeos aplicando la técnica TDEM en la zona de estudio	Empresa geotérmica
c. Inventario de información sobre parámetros químicos de fuentes de agua.	Empresa geotérmica
d. Registros de perforación pozos superficiales de abastecimiento de agua potable	Entidad de gobierno local
e. Información de coberturas (shape, cuenca hidrográfica).	Información publicada por el MARN.
f. Mapa Geológico de la República de El Salvador, escala 1:100,000, año 1978	Información publicada por el MARN.
g. Mapa hidrogeológico, escala 1:44,000 año 2007.	Información publicada por ANDA.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Con la información antes indicada fue posible la generación de un modelo hidrogeológico conceptual, que además fue correlacionada entre sí, para la obtención de los resultados requeridos.

5.2.PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Fue necesario interpretar la información que permitiera realizar un procesamiento adecuado, bajo criterios de correlación que simplifiquen o faciliten la integración de la información de cada uno de los componentes disponibles para la presente investigación. Con el objeto de realizar una correlación válida, se utilizó los software's siguientes:

- ROCKWORKS 16: A partir del cual se elaboró un modelo resistivo, con el objeto de obtener una mejor visualización de las capas que conforman en profundidad el subsuelo de la zona de estudio y verificar a partir de secciones el comportamiento litológico de pozos para abastecimiento y pozos geotérmicos.
- AQUACHEM: Permite realizar el análisis de los parámetros químicos de las fuentes de abastecimiento de agua e identificar y/o caracterizar el agua disponible en dichas fuentes.
- ARCGIS Y SURFER: Empleados para la definición gráfica de la información disponible de la zona de estudio.

5.3.ELABORACIÓN DE METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ACUÍFEROS EN UN CAMPO GEOTÉRMICO

El procesamiento de la información indicada anteriormente, es el antecedente que permite plantear la metodología objeto de la presente investigación, en la cual se indica la información que es requerida para realizar la identificación de acuíferos someros y el empleo de una secuencia lógica de procesamiento y análisis de la información, para la obtención de resultados satisfactorios. Con base en lo anterior, se elaboró un esquema, que permite correlacionar la información disponible para el estudio desarrollado, tal como se muestra en la Figura 3.

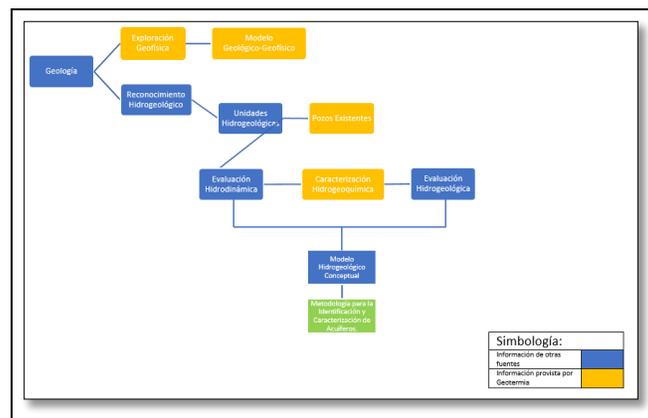


Figura 3. Esquema de correlación de información para generación de modelo conceptual

Fuente: Elaboración propia, 2017, a partir de Ingeominas, 2014.

6. ANÁLISIS DE DATOS

El desarrollo geotérmico de El Salvador, cuenta con un enfoque en la búsqueda de equilibrio en distintos ámbitos: ambiental, social y económico. Al respecto, se aborda un caso de estudio que desde luego brindará información sobre los aspectos antes indicados.

A partir de la información disponible para la presente investigación, el análisis se ha realizado, con base en las áreas del conocimiento siguientes: hidrología, hidrogeología, hidrogeoquímica, geofísica e inclusive litología.

6.1. Geología:

Como parte de la información de importancia, se ha tomado en consideración la Unidades geológicas, definidas por el Mapa Geológico de la República de El Salvador, escala 1:100,000, año 1978, en donde el subsuelo de la zona en estudio se observa que está constituido principalmente por: **1)** Depósitos sedimentarios del cuaternario (Qf), **2)** Efusivas básicas intermedias (b3), **3)** Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas intermedias (s1), **4)** Efusivas básicas_ intermedias, piroclastitas subordinadas (s2), **5)** Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánica, tobas color café (s3a), siendo dichos depósitos, correspondientes principalmente a la formación Bálsamo y San Salvador; tal como se muestra en la *Figura 4*.

6.2. Litología

En vista que para el presente estudio fue posible disponer de información sobre perfiles litológicos, dicha información fue empleada para el procesamiento y fue incorporada al modelo hidrogeológico conceptual trabajado en el software Rockworks.

La litología de los perfiles analizados ha sido agrupada y/o simplificada como: **a)** aglomerado, **b)** andesita, **c)** andesita basáltica, **d)** depósito epiclastita, **e)** lava, **f)** piroclastos, **g)** piroclastos retrabajados, **h)** suelo, **i)** toba y **j)** toba lítica.

anteriormente, está conformado por el cerro VE y el volcán TE, los cuales cuentan con una topografía con elevaciones en el orden de 1,078 msnm, hasta 1,593.

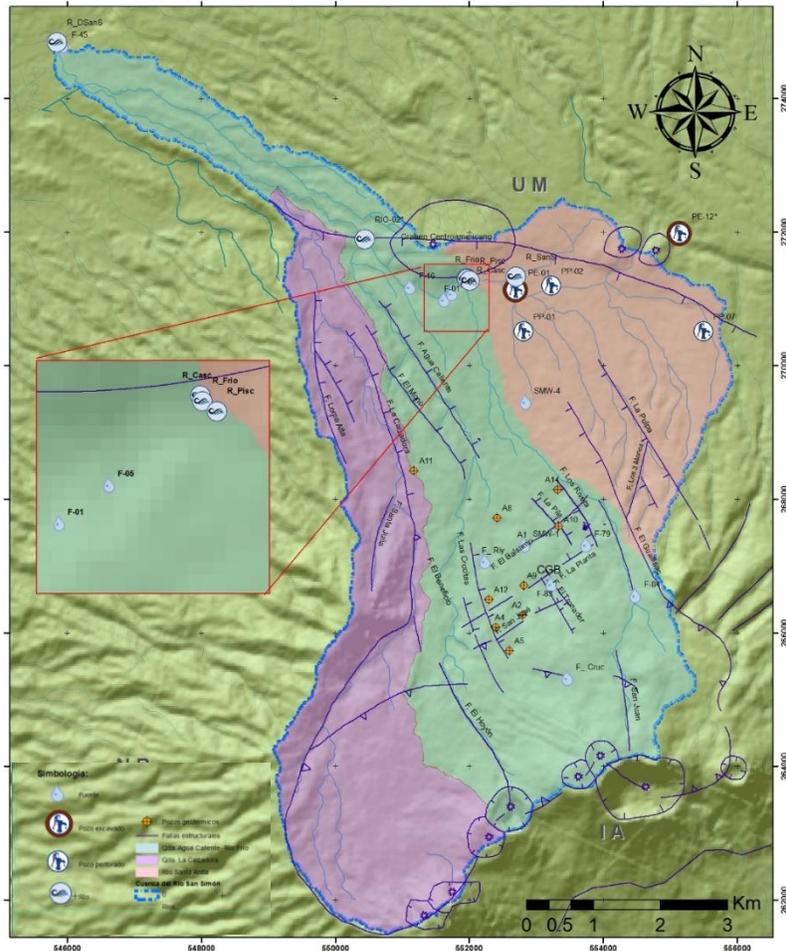


Figura 5. Zona de estudio, delimitada por cuenca hidrográfica.

Fuente: Elaboración propia, 2017. A partir de información publicada por el MARN.

6.4. Hidrogeología

Para la hidrogeología ha sido necesario disponer de información publicada por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillado (ANANDA) y se ha identificado las unidades hidrogeológicas correspondientes a la zona de estudio, misma que ha sido delimitada, a partir del comportamiento hidrológico (cuenca), según se indicó en el apartado previo. El mapa hidrogeológico, escala 1:44,000 año 2007, corresponde a un mapa reciente y que muy probablemente no está disponible para cualquier región de estudio. No obstante lo anterior, para el caso específico se cuenta con dicha información y el presente estudio, podría brindar aportes al mapa existente en la zona de estudio particularmente.

Las unidades hidrogeológicas presentes son a) unidad acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción, b) unidad acuífero volcánico fisurado de extensión limitada y productividad media, c) unidad acuífero poroso de gran extensión y productividad media, d) unidad acuífero local de extensión limitado y de productividad de mediana a baja y e) unidad rocas no acuíferas. Las unidades hidrogeológicas relacionadas con la zona de estudio se muestran en la *Figura 6* y se describen a continuación:

a) Unidad acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción: Esta unidad la constituyen rocas volcánicas de carácter andesítica y basáltico con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente).

b) Unidad acuífero volcánico fisurado de extensión limitada y productividad media: Los materiales de esta unidad consisten en flujos y coladas de lavas (Basálticas y andesítica), que han sido inyectados en los centros de erupción volcánica, pero que no han alcanzado grandes extensiones, los cuales pueden estar intercalados con materiales piroclásticos. Presentan conductividades hidráulicas medias, el espesor de estos materiales pueden ser unos 10 a 20 m.

c) Unidad acuífero poroso de gran extensión y productividad media: Los materiales consisten principalmente en materiales piroclásticos, aglomerados y retrabajados (pómez, lapilli, tobas) teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades pueden variar de medianas a baja, como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituyen. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

d) Unidad acuífero local de extensión limitado y de productividad de mediana a baja: los materiales constituidos son sedimentos aluviales (arenas, gravas) que han sido transportados por los fluidos desde la parte alta de los cerros hasta la planicie, los materiales de esta unidad presentan una conductividad hidráulica de media a baja, la que depende de la granulometría, del grado de limpieza (Contenido de limo y arcilla), y del grado de compactación que presentan los materiales. El espesor de estos materiales puede superar los 15 m.

e) Unidad rocas no acuíferas: los materiales de esta unidad están compuestos por flujos macizos de lavas, intercalados con tobas aglomeradas y brechosas además de lahares cementados, presentando conductividad hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad y su alto grado de compactación o cementación. Se considera que

constituyen el basamento de los acuíferos identificados en la zona de estudio. La profundidad de esta unidad pueden superar los 100 m.

Es importante mencionar que el análisis correspondiente, se ha realizado a partir de un modelo digital de elevación, información de nueve fuentes, siete pozos y seis ríos, con lo cual se procesó además la elevación a nivel de brocal y el nivel piezométrico de las diferentes fuentes de agua, la determinación de la dirección del flujo de agua para la zona de interés, resultando con orientación en dirección de Sur a Norte, tal como se muestra en la *Figura 6*. También, es importante aclarar, que las fuentes empleadas para el procesamiento antes descrito corresponden al inventario de fuentes monitoreadas por la empresa a cargo del desarrollo geotérmico en la zona, los cuales permitieron generar la tendencia en cuanto a la dirección del flujo de agua subterráneo presente en la zona de estudio.

Asimismo y para una mejor interpretación de la información, se ha incluido las fallas geológicas, elemento de relevante importancia, dado que podría condicionar o incidir en la definición de la dirección del flujo del agua subterránea.

En la **Tabla 9**, se presenta la información con la cual se generó la dirección del flujo subterráneo de la zona de estudio.

Tabla 9. Piezometría de las fuentes localizadas al interior de la zona de estudio.

X	Y	ID	Descripción	Tipo	Altura	Piezometría
553465	265336	F_ Cruc	Fuente Las Crucitas (Grifo)	Fuente	1078	1078
552232	267084	F_ Riy	Fuente El Riyito	Fuente	553	553
551621	270999	F-01	Fuente Santa Anita No.1	Fuente	283	283
551742	271092	F-05	Fuente No. 5 ACOSAPMER	Fuente	281	281
551115	271192	F-16	Fuente San Simón No.16	Fuente	257	257
545931	274804	F-45	Fuente San Simón No.45	Fuente	24	24
553740	267330	F-79	Fuente Zapotillo No.79	Fuente	648	648
553230	266742	F-83	Fuente El Tronador No.83	Fuente	687	687
554478	266576	F-84	Fuente Guallinac No.84	Fuente	860	860
552686	271128	PE-01	P. domestico Santos Pineda	Pozo	350	284.72
555133	271977	PE-12*	P. domestico Pompilio Castaneda	Pozo	574	323.89
552803	270512	PP-01	Pozo ANDA 1	Pozo	293	292.29
553216	271198	PP-02	Pozo ANDA 2	Pozo	336	286.02
551962	271306	R_Casc	Cauce La Cascada	Río	306	293
545842	274836	R_DSans	Desembocadura Río San Simón	Río	304	12
551967	271292	R_Frio	Cauce Río Frío	Río	396	294
552002	271268	R_Pisc	Cauce Piscina	Río	293	291
552695	271324	R_SanS	Nacimiento Rio San Simón	Río	12	309
550438	271890	RIO-02*	Desembocadura Qda. Agua Caliente	Río	294	213
555493	270513	PP-07	Pozo ANDA 3 Mercedes	Pozo	291	306.78
552839	269473	SMW-4		Pozo	309	300
552823	267329	SMW-1		Pozo	213	502

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 10. Datos químicos analizados.

Station ID	X coordinate m	Y coordinate m	Water Type	Temp °C	El. Cond. uS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	B mg/l
F_Cruc	553465.4	265336.1	Ca-Mg-Na-HCO3-NO3	24.3	254.9	22.3	5.8	9.8	3.5	2.7	72.49	2.7	25.58	0.07
F-84	554478.9	266576.6	Ca-Mg-HCO3	23.7	299	32.91	10.55	11.98	3.27	8.74	105.36	8.74	27.81	0.024
F-83	553230.1	266742.2	Ca-Na-K	67.6	371	31.31	1.5	21.6	14	1.26	6.68	1.26	0.07	0.12
F_Riy	552232.9	267084	Ca-Na-HCO3-Cl	39.6	981	103.11	27.46	70.3	17.8	106.06	396.57	106.06	9.32	2.231
F-79	553740	267330.2	Na-Ca-HCO3	59	505	36.11	7.05	60.5	18.11	5.92	237.27	5.92	16.14	0.994
PP-03	555470.6	270385.3	Ca-Mg-HCO3		286.8	26.4	11.8	12.5	3.8	4.8	169.95	4.8	8.28	0.07
PP-01	552803.6	270512.2	Mg-Ca-Na-HCO3	29.3	496	35.15	27.8	26.72	7.87	5.15	300.68	5.15	5.35	0.066
PE-04	552610.5	270816.3	Mg-Ca-HCO3		345.9	24.8	18.4	16.5	5.2	5.22	195.79	5.22	9.08	0.07
F-01	551621.9	271000	Mg-Ca-Na-HCO3	31.4	589	45.8	31.58	34.73	10.55	8.96	344.31	8.96	8.95	0.27
F-05	551742.3	271092.1	Mg-Ca-Na-HCO3	31.7	606	42.66	32.18	35.07	10.59	8.81	348.96	8.81	7.13	0.24
PE-01	552686.6	271128.4	Mg-Ca-HCO3	27.3	379	28.81	20.66	17.4	6.2	3.32	200.47	3.32	8.5	0.216
F-16	551115.9	271192.9	Ca-Mg-Na-HCO3	41.5	564	40.03	21.15	39.7	11.8	17.49	254.25	17.49	13.54	0.628
PP-02	553216.1	271198.9	Mg-Ca-Na-HCO3	0	320	24.98	16.12	15.72	4.71	2.54	188.38	2.54	5.98	0.034
R_Pisc	552002.9	271268.1	Mg-Ca-Na-HCO3	29.8	382	29.4	19.06	19.91	7.11	3.42	225.29	3.42	5.37	0.053
R_Frio	551967.1	271292.9	Mg-Ca-Na-HCO3	26.9	387	27.73	21.22	19.39	6.05	2.98	236.48	2.98	5.07	0.07
R_Casc	551962.3	271306.4	Mg-Ca-Na-HCO3	27	364	27.52	17.64	17.22	6.23	2.97	202.7	2.97	5.64	0.037
R_SanS	552695.2	271324.8	Mg-Ca-Na-HCO3	27.2	308	24.87	15.63	15.63	4.81	2.27	174.41	2.27	7.53	0.029
RIO-02	550438.7	271890.1	Mg-Ca-Na-HCO3	27.1	439.5	29.3	24.9	22.5	7.7	7.01	262.13	7.01	7.6	0.108
PE-12	555133.1	271977.6	Ca-Mg-Na-HCO3		267.1	21.4	12.5	13.5	3.9	6.18	148.16	6.18	8.75	0.07
F-45	545931.1	274804.2	Na-Ca-Mg-HCO3-Cl-SO4	48.7	877.4	52	27.23	83	20.6	98.66	331.15	98.66	4.47	0.07
R_DSanS	545842.9	274836.6	Mg-Ca-Na-HCO3	25	436	30.97	24.5	25.51	8.66	4.82	269.33	4.82	3.69	0.136

Fuente: Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

A continuación, se presenta un mapa donde se muestran los sitios de muestreos de calidad de agua para la zona de estudio. Dichos sitios cuentan con fichas de calidad de agua que indican sus coordenadas de ubicación, descripción del acceso, datos de calidad de agua (Ver Figura 7).

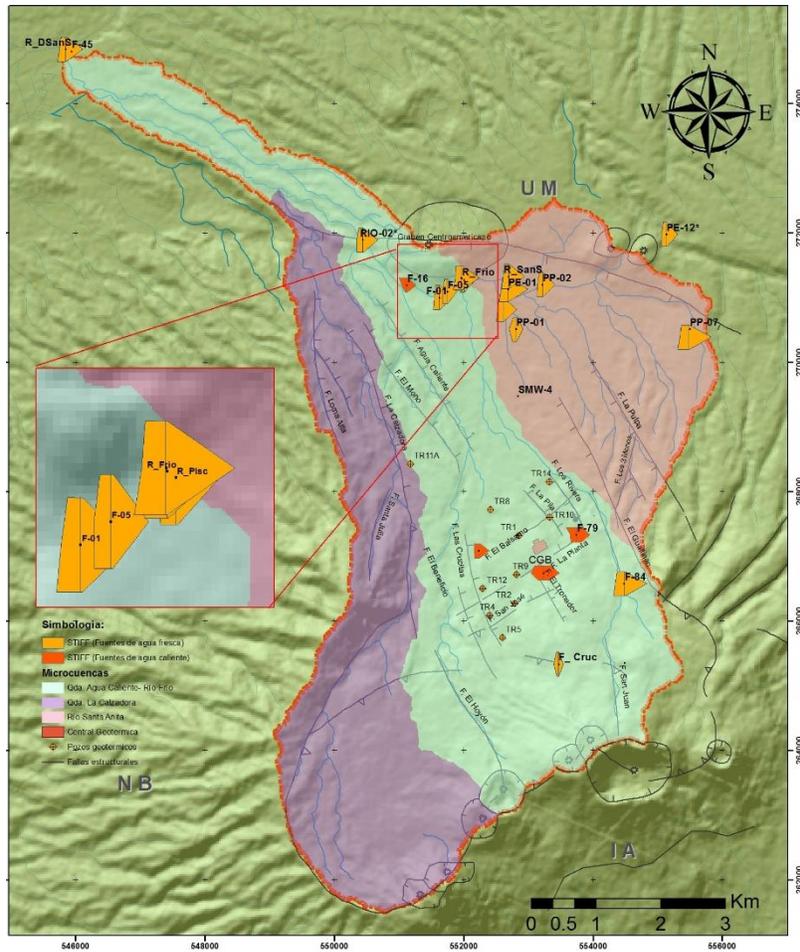


Figura 7. Mapa hidrogeológico con diagramas de stiff.

Fuente: Elaboración propia a partir de información publicada por el MARN e inventario de fuentes de empresa geotérmica.

Los resultados de los análisis se han dividido en 4 grupos:

- a) Fuentes para consumo
- b) Pozos perforados y excavados
- c) Ríos y quebradas
- d) Otras fuentes

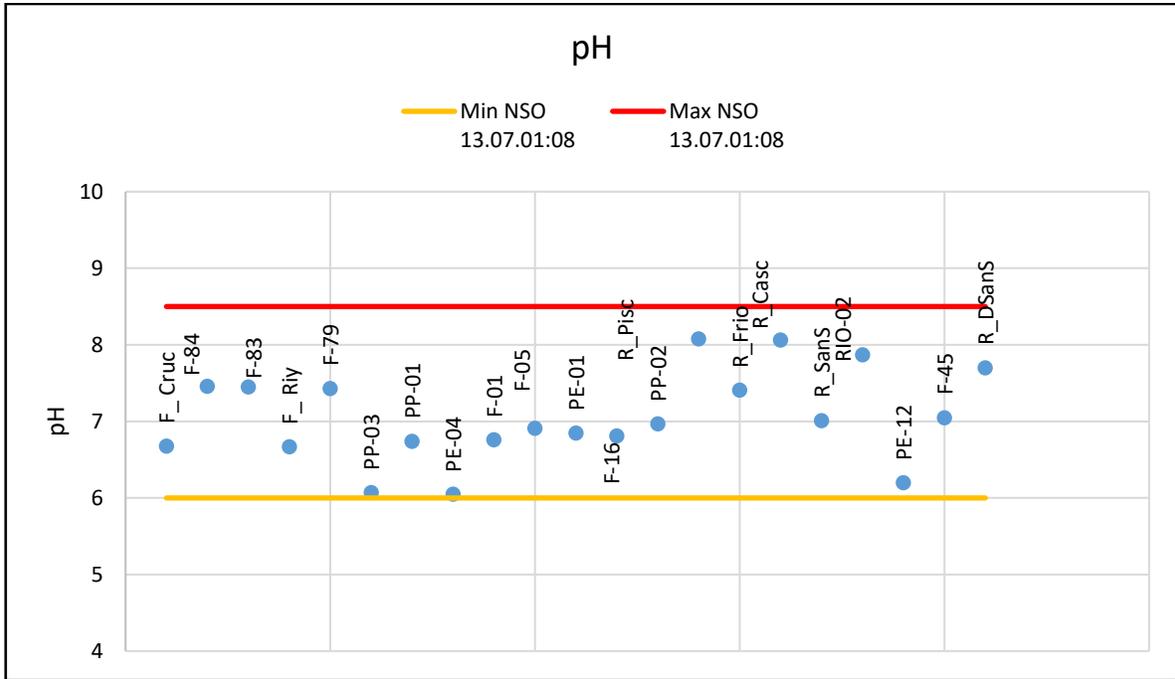


Figura 8. Evaluación del pH

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

Los resultados, muestran que los valores cumplen con los estándares para el consumo y no representan un riesgo según este parámetro y su uso destinado. (Ver Figura 8).

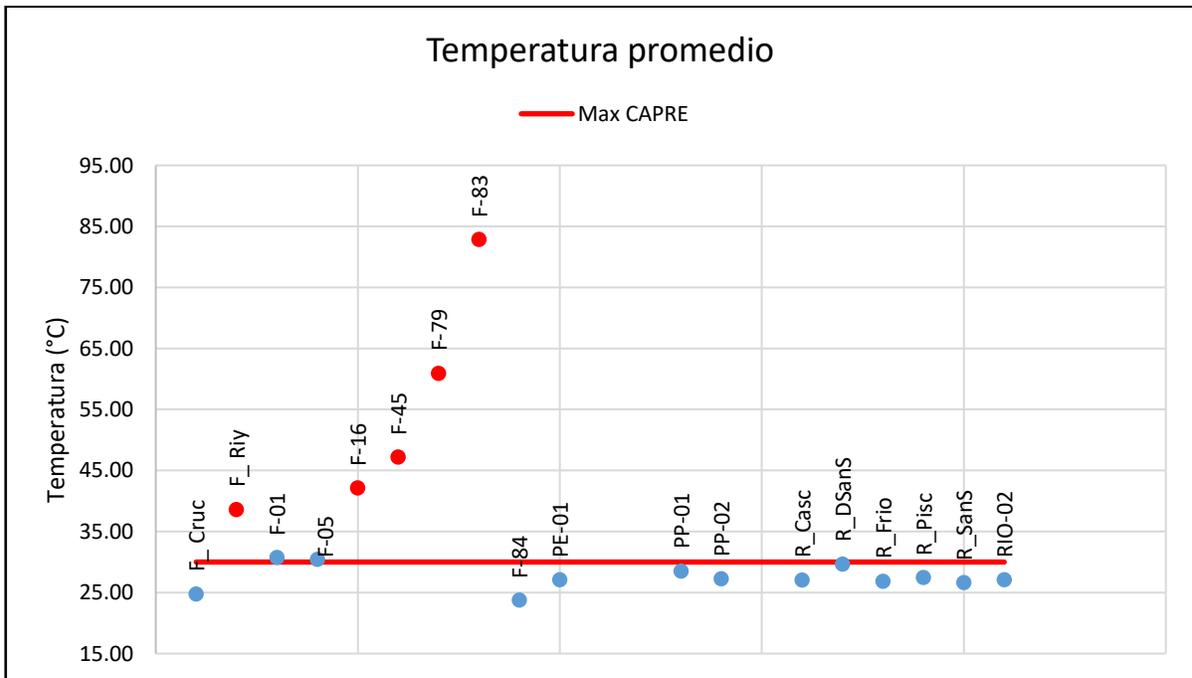


Figura 9. Evaluación de Temperatura.

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

La temperatura medida para las fuentes de consumo muestra un comportamiento estable con algunos aumentos o descensos puntuales. Los resultados muestran que los valores muestreados con excepción de la Fuente 01 y 05 que se encuentran cerca del límite máximo cumplen con los estándares para el consumo y no representan un riesgo según este parámetro y su uso destinado.

Se observa que las fuentes F_Riy, F-16, F-45, F-79 y F-83 exceden los límites, estas fuentes históricamente se han considerado de naturaleza hidrotermal. (Ver *Figura 9*).

Evaluación del Cationes y Aniones respecto a normativa para agua potable

En la *Figura 10* se observan las concentraciones de Sodio.

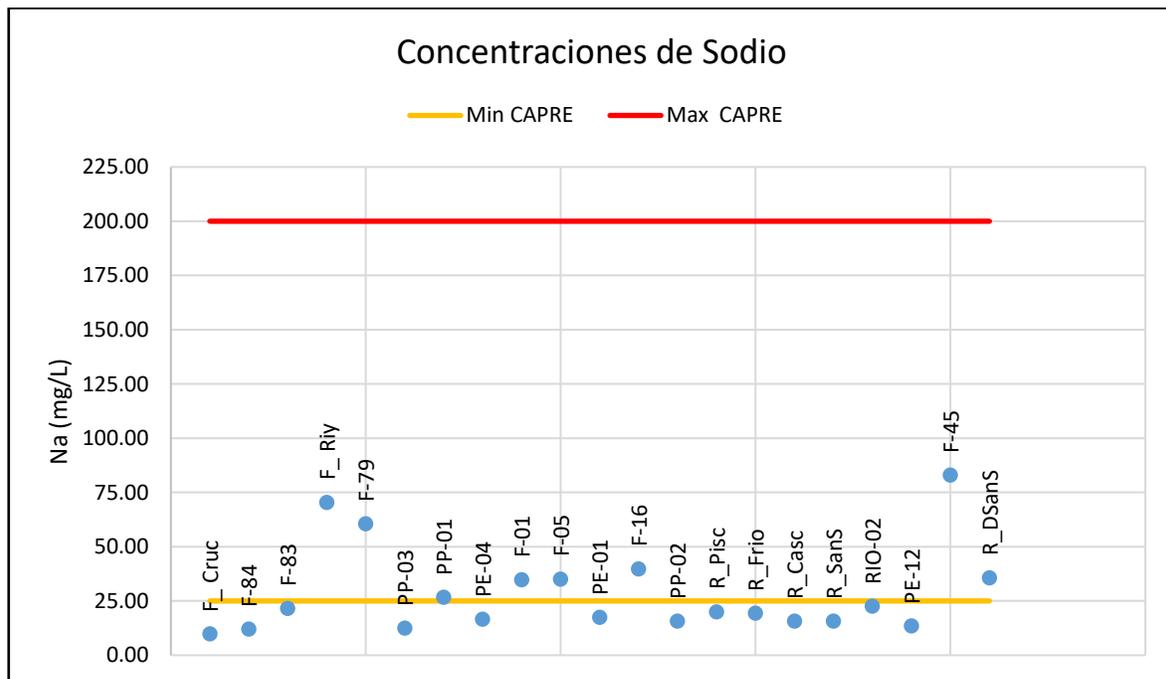


Figura 10. Concentraciones de Sodio

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

En la *Figura 11* se observan concentraciones de potasio y su valor estándar.

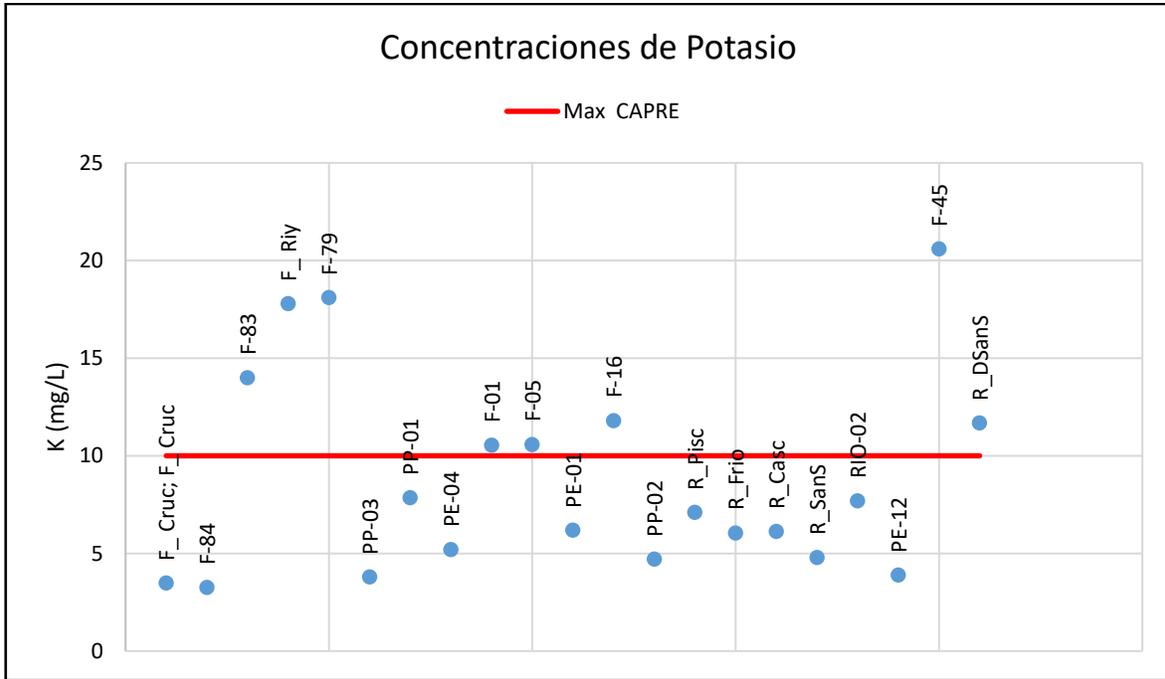


Figura 11. Concentraciones de Potasio

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

En la Figura 12 se muestran las concentraciones de calcio y su valor estándar.

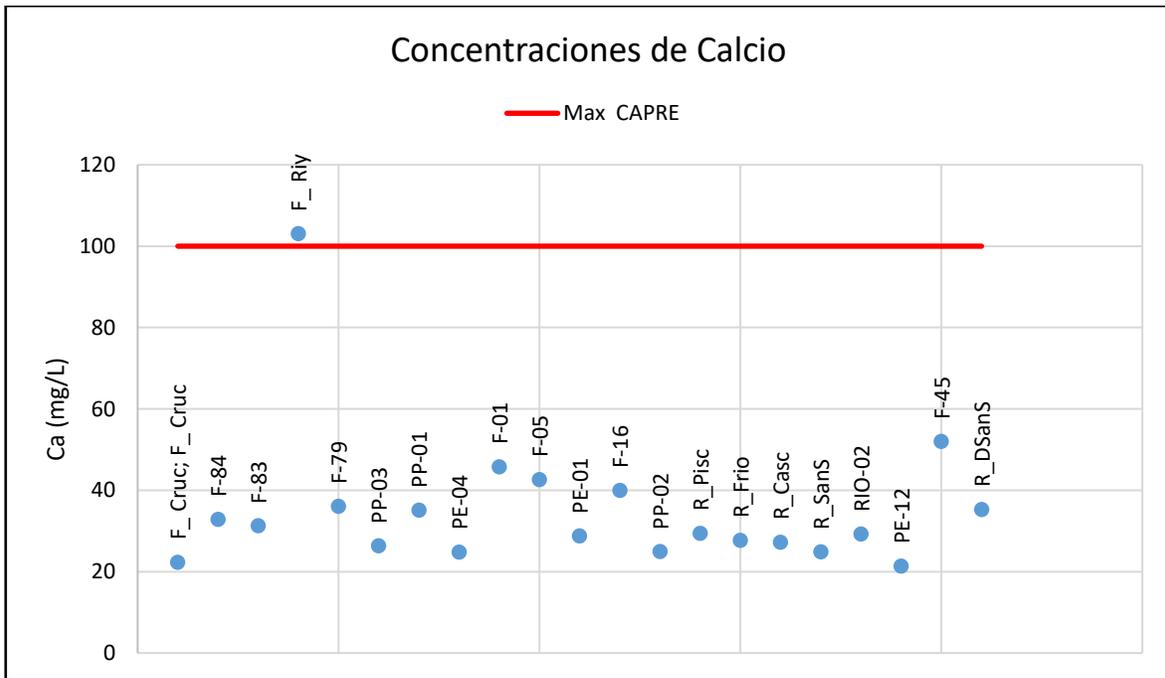


Figura 12. Concentraciones de Calcio

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

En la *Figura 13* se muestran las concentraciones de Magnesio y su valor estándar.

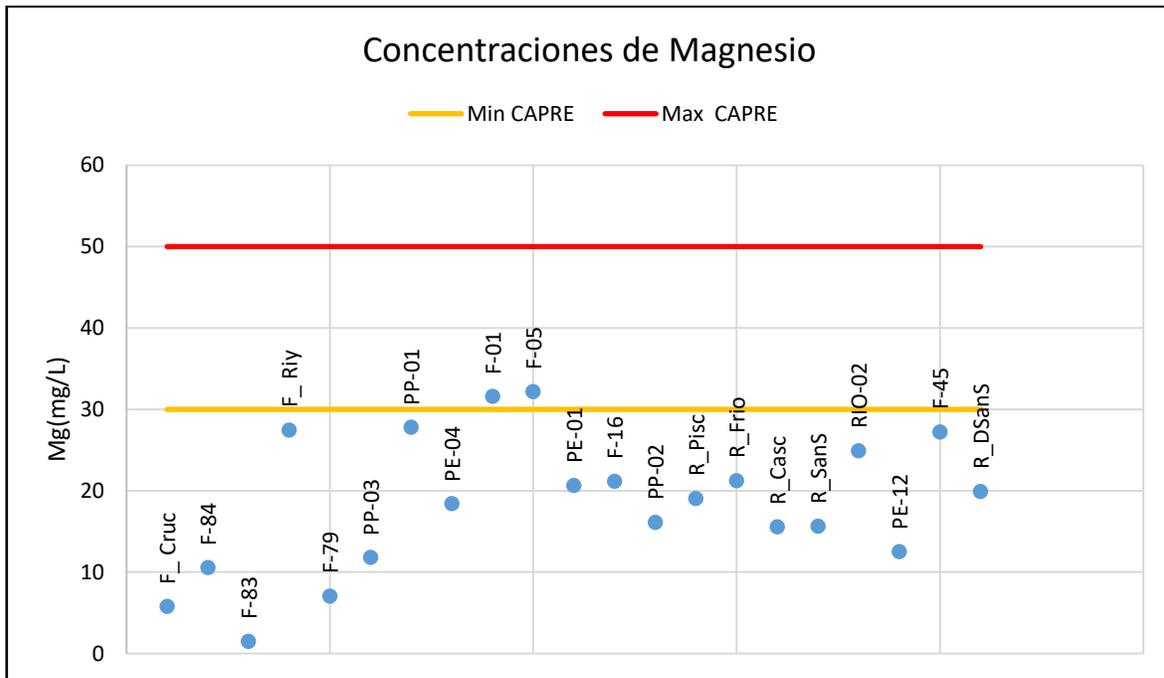


Figura 13. Concentraciones de Magnesio

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

La mayoría de los cationes se encuentran bajo la norma, casi siempre debajo del 50% del valor límite, excepto para el caso del Potasio que presentan valor un poco sobre el valor establecido por la norma. Los resultados muestran que los valores cumplen con los estándares para el consumo y no representan un riesgo según este parámetro y su uso destinado, incluso con valores altos de Potasio ya que esto no representa un riesgo para la salud.

En la *Figura 14* se muestran las concentraciones de Cloruros y su valor estándar.

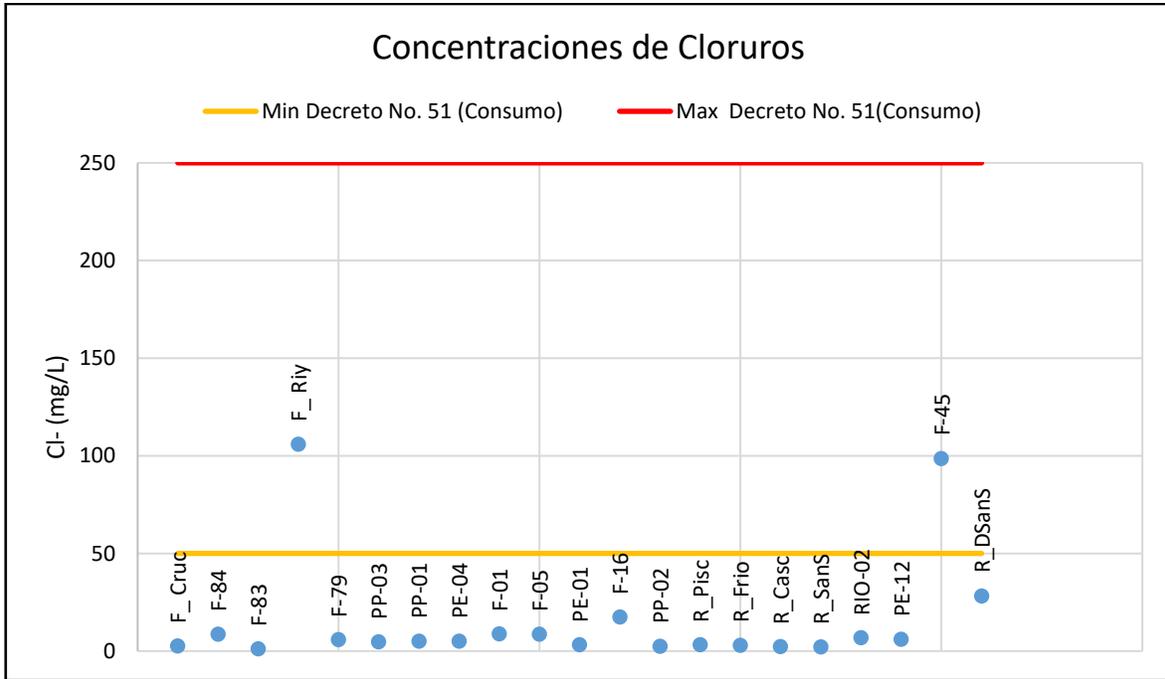


Figura 14. Concentraciones de Cloruros

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

En la *Figura 15* se muestran las concentraciones de Sulfatos y su valor estándar.

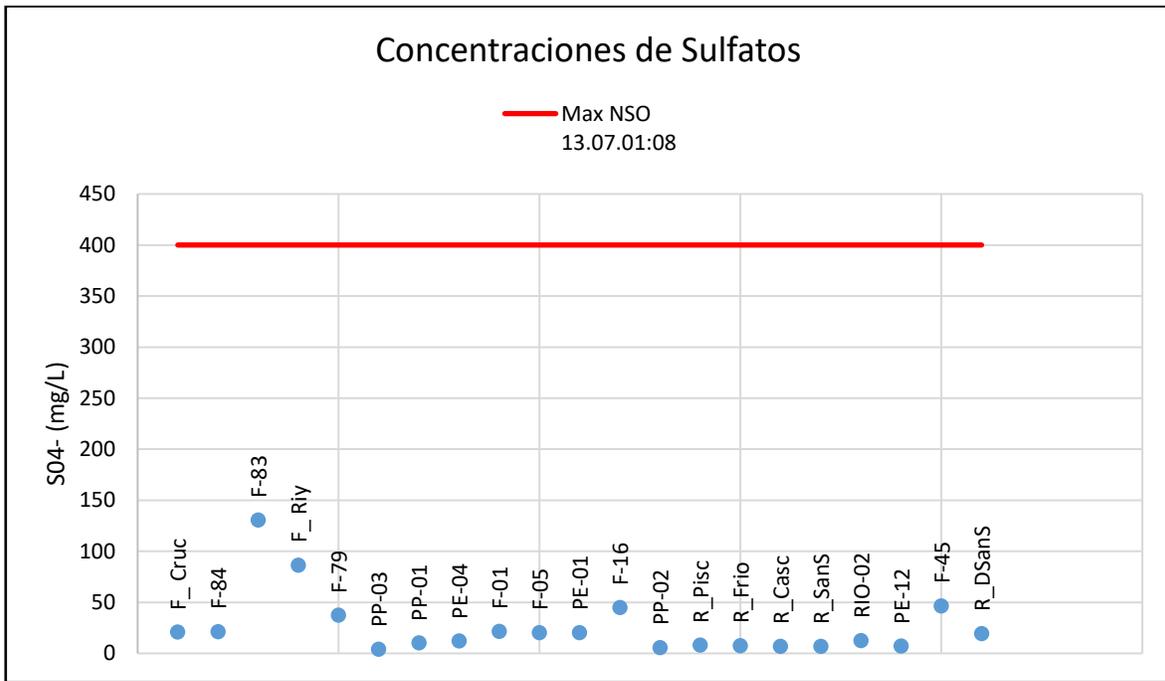


Figura 15. Concentraciones de Sulfatos

Fuente: Elaboración propia a partir de Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

Todos los valores de los aniones se encuentran muy por debajo del valor establecido por la norma, aproximadamente 30% de su valor límite. Por lo que al igual que el caso de los cationes, los aniones cumplen con los estándares para el consumo y no representan riesgo.

A continuación, se presenta el diagrama de Piper, donde se puede identificar que la mayoría de las fuentes de agua se encuentran en una zona de dureza cálcica dominadas por ácidos débiles, excepto tres de ellas (F-83 que se encuentra en la zona de dureza magnésica y las R_DSans como F-79 en la zona en la que ningún Catión o Anión excede el 50%). En el diagrama de Piper se pueden ver 3 grupos de aguas (Ver *Figura 16*).

- Las fuentes Cálcicas bicarbonatadas** que son considerados fuentes con bajo contenido de Cloruros y Conductividad eléctrica asociados a acuíferos del tipo colgado.
- Las fuentes Mixtas Bicarbonatadas** con temperatura menores a 34 °C y corresponden a los manantiales y pozos que son utilizados para consumo
- Las fuentes que muestran alteración hidrotermal histórica.** En el área marcada en rojo se muestran las fuentes calientes (F-16, F-45, F-79, F-83 y F-Riy).

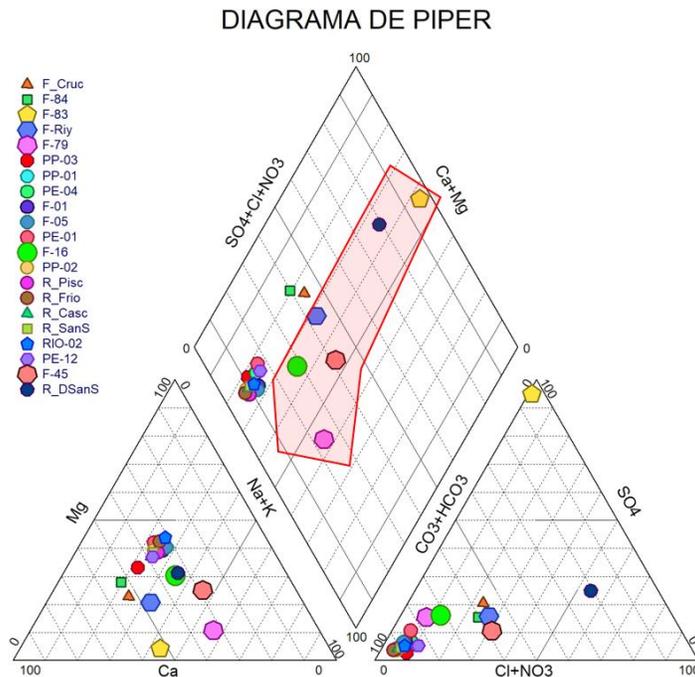


Figura 16. Diagrama de piper

Fuente: Inventario de fuentes de empresa geotérmica.

Haciendo uso del diagrama de Piper los tipos de agua en el área de estudio se presentan en la **Tabla 11**, a continuación:

Tabla 11. Tipos de agua de fuentes con base en Diagrama de Piper.

Fuentes de agua		Clasificación de aguas	
		Catión más abundante	Anión más abundante
a)	F_ Cruc, F-84	Cálcica	Bicarbonatada
b)	PP-03, PP-01, PE-04, F-01, F-05, PE-01 F-16, PP-02, R_Pisc, R_Frio, R_Casc, R_SanS, RIO-02, PE-12	Mixta	Bicarbonatada
c)	F-45, F_ Riy	Mixta	Bicarbonatada
	F-83	Cálcica	Sulfatada
	F-79	Sódica	Bicarbonatada
	R_DSanS	Clorurada	Mixta
		Temp. > 34 °C	

Fuente: Elaboración propia, 2017.

La mayor parte de las fuentes analizadas resultaron con concentraciones altas en carbonatos y calcio. Es importante mencionar que las fuentes con alteración hidrotermal únicamente se encuentran en la subcuenca central de la zona de estudio (localización de pozos geotérmicos), por lo que se puede inferir que no se observa una mezcla de los flujos con dichas características con las fuentes y pozos utilizados para el consumo.

6.6. Geofísica

Los sondeos TDEM utilizados, fueron distribuidos al interior del área en estudio y permiten disponer en general información de la zona de interés, tal como se muestra en la **Tabla 12** y Figura 17, a continuación.

Tabla 12. Coordenadas de sondeos TDEM

Estación	X	Y
mtbn01	555875.159	269108.881
mtbn02	554374.209	268204.91
mtbn03	556247.147	269505.867
mtbn04	554650.199	268961.885
mtbn05	553484.238	268911.887
mtbn06	556318.144	270670.829
mtbn07	552341.589	268338.66
mtbn08	551511.303	267834.922
mtbn09	550461.338	265829.988
mtbn10	555176.182	270166.846
mtbn11	554395.208	270775.826
mtbn12	553837.226	270128.847
mtbn13	550453.338	268175.911
mtbn14	551083.317	269077.881
mtbn14b	551329.309	269032.883
mtbn15	549430.371	267543.932
mtbn16	549222.378	266551.965
mtbn17	550273.344	267612.93
mtbn18	557693.099	269403.871
mtbn19	552381.274	270220.844
mtbn20	549407.372	268335.906
mtbn21	550628.332	269945.853
mtbn22	548714.395	267276.941
mtbn23	548390.406	267801.923
mtbn24	547439.437	268521.9
mtbn25	548326.408	270214.844
mtbn26	552715.263	271391.805

mtbn27	551552.301	271973.786
mtbn28	556556.137	268575.898
mtbn29	550832.325	271922.788
mtbn30	554047.219	271419.804
mtbn31	552552.269	264793.023
mtbn32	549358.374	265238.008
mtbn33	553714.23	264952.017
mtbn34	552468.271	272000.785
mtbn35	554445.206	269917.854
mtbn36	553606.234	268052.915
mtbn37	549785.36	269783.858
mtbn38	552383.274	263650.06
mtbn39	551609.3	269692.861
mtbn40	549710.362	271635.797
mtbn41	555973.156	267933.919
mtbn42	555958.156	266687.96
mtbn43	556637.134	267505.933
mtbn44	557345.111	266649.962
mtbn45	557946.091	265961.984
mtbn46	557028.121	265099.013
mtbn47	556637.134	265624.995
mtbn48	555853.16	265908.986
mtbn49	549228.378	271495.802
mtbn50	548100.415	271281.809
mtbn51	558285.08	269836.857
mtbn52	553674.232	270728.827

Fuente: Elaboración propia, 2017.

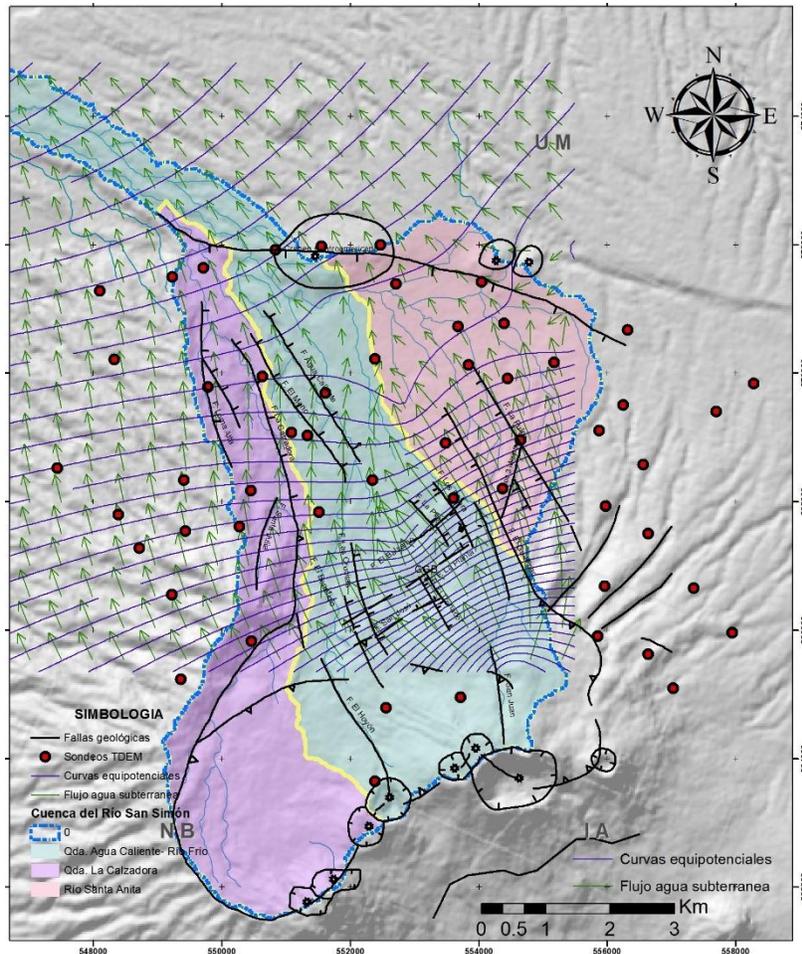


Figura 17. Localización de TDEM utilizados en el análisis de resistividad.

Fuente: Elaboración propia, 2017. A partir de información publicada por el MARN y base de datos empleada para el estudio.

En la figura anterior, se observa la localización de 36 puntos de sondeos TDEM, de los cuales como parte del procesamiento resultó un total de cinco (5) capas que definen en profundidad la variación de resistividad. La información geofísica fue procesada en el software Rockworks, a partir de lo cual es posible definir las características y definición de la profundidad de acuíferos presentes.

6.7. Modelo Hidrogeológico Conceptual

Para el análisis y generación del Modelo Hidrogeológico Conceptual se incorporó la información de resistividades de las cinco capas determinadas como parte del procesamiento geofísico. Así mismo se incorporó información litológica, ubicación en elevación de pérdidas en perforación de pozos geotérmicos y profundidades lo cual fue correlacionado con el objeto de definir la localización en profundidad de los acuíferos

presentes en la zona de estudio, tal como se muestra en la *Figura 18*, obteniendo el modelo hidrogeológico conceptual.

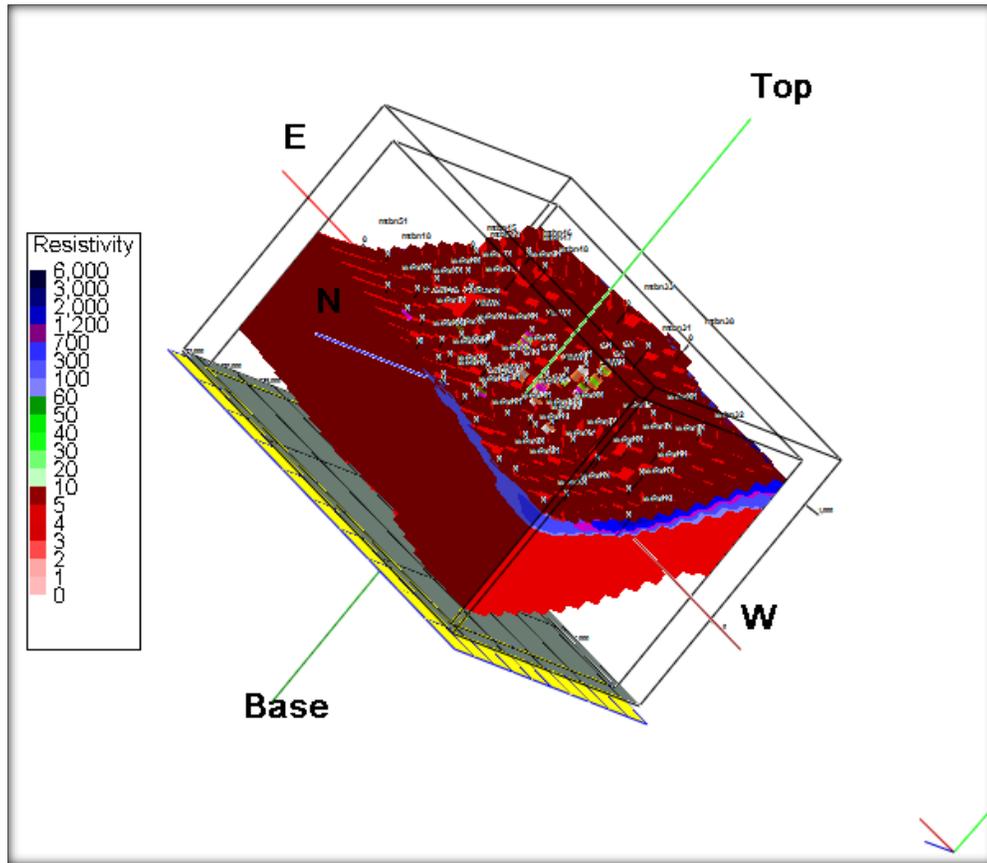


Figura 18. Modelo hidrogeológico conceptual

Fuente: Elaboración propia 2017. A partir de datos de resistividad

Posteriormente a la obtención del modelo conceptual de resistividad, es posible determinar secciones transversales de interés, al interior de la zona de estudio, con lo cual se correlaciona la información hidrogeológica y geológica, para la identificación de los acuíferos. A continuación en las *Figura 19*, *Figura 20*, *Figura 21* y *Figura 22* se detallan las secciones de interés.

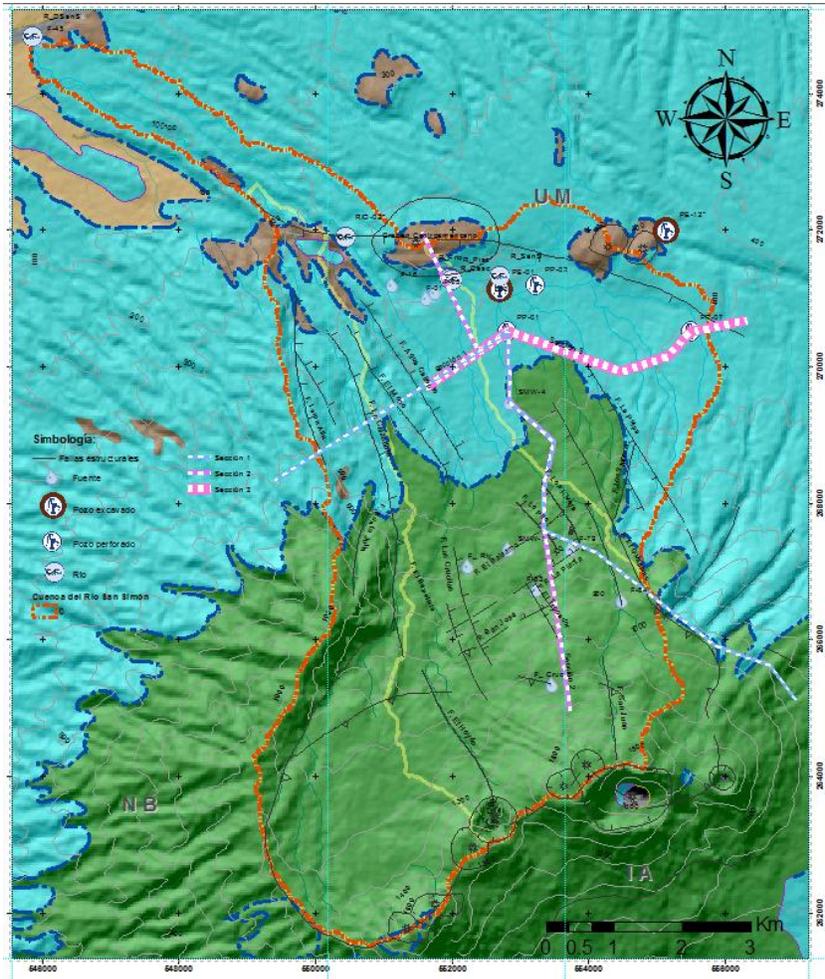


Figura 19. Mapa de secciones de interés

Fuente: Elaboración propia 2017. A partir de datos correlacionados para este estudio

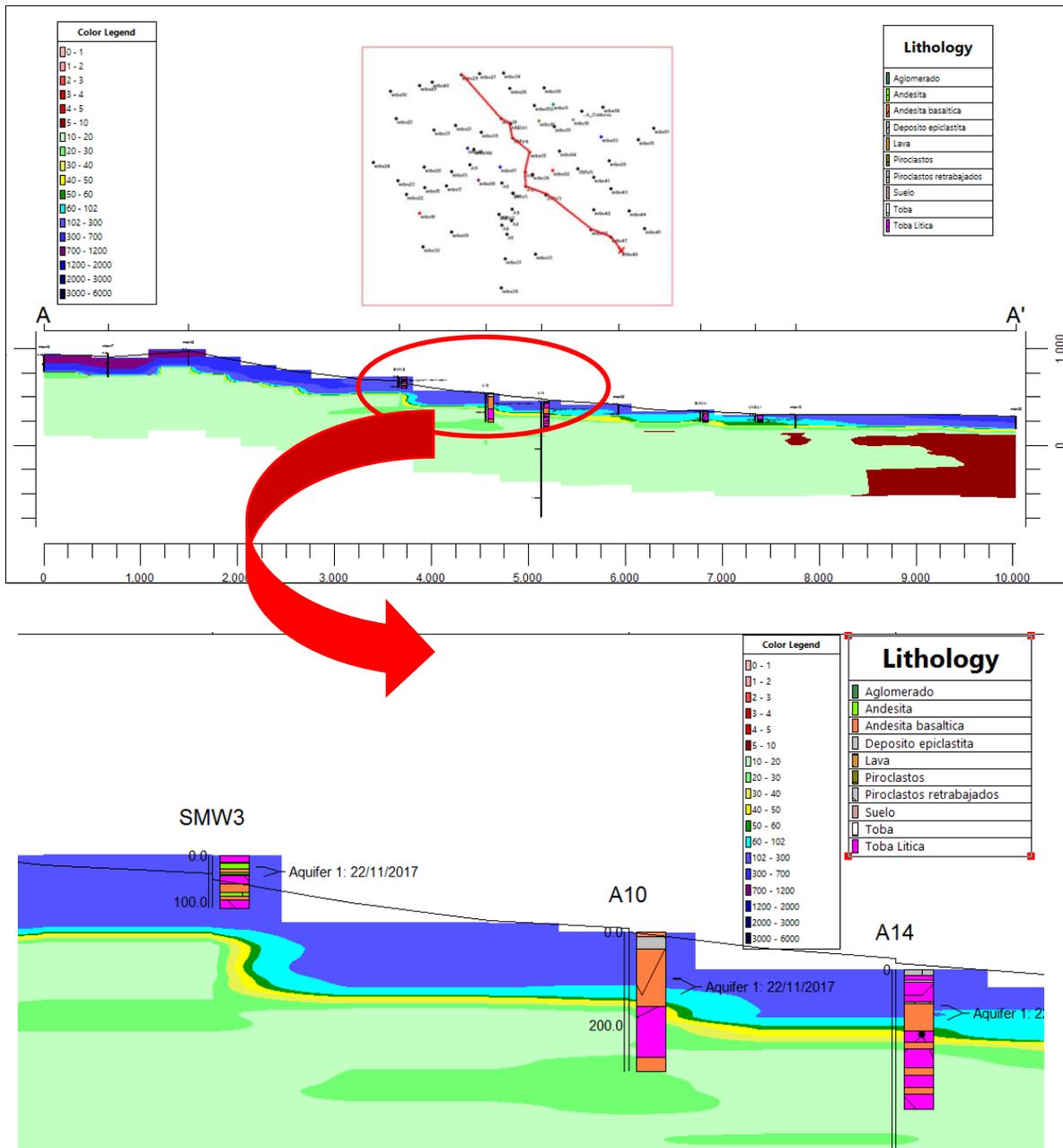


Figura 20. Sección longitudinal 1, Modelo Hidrogeológico Conceptual.

Fuente: Elaboración propia 2017. A partir de datos correlacionados para este estudio

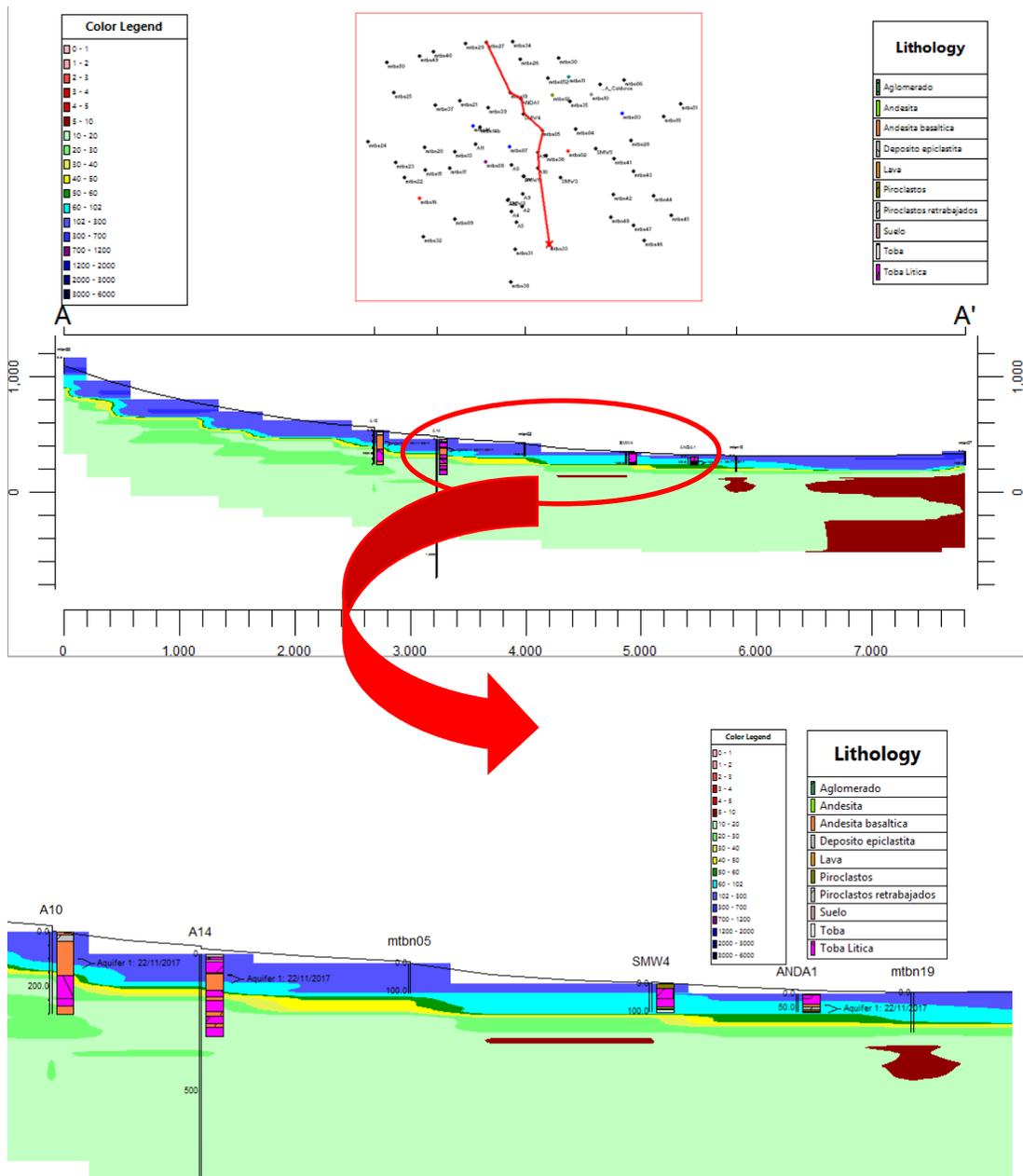


Figura 21. Sección longitudinal 2, Modelo Hidrogeológico Conceptual.

Fuente: Elaboración propia 2017. A partir de datos correlacionados para este estudio

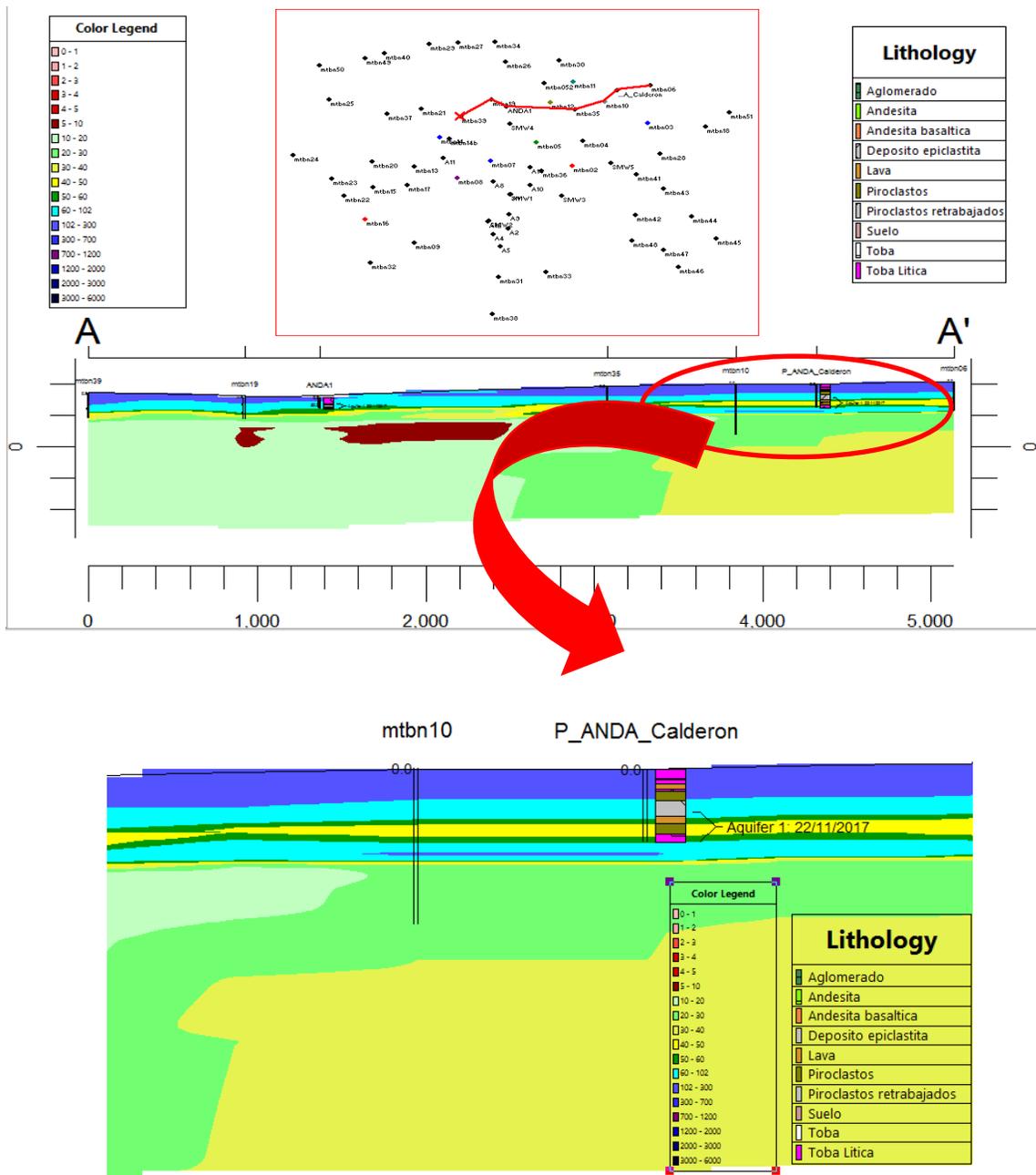


Figura 22. Sección 3 (transversal), Modelo Hidrogeológico Conceptual.

Fuente: Elaboración propia 2017. A partir de datos correlacionados para este estudio

Luego de la integración de la información existente, se identificó que el acuífero superficial se localiza a una profundidad de aproximadamente 40 m a partir del nivel de terreno natural y con un espesor de aproximadamente 30 metros, encontrándose en las formaciones litológicas siguientes: lavas fracturadas, piroclastos retrabajados y tobas líticas, las cuales muy probablemente estén constituidas por fragmentos de roca que permitan el flujo de agua. Cabe indicar, que en general, la zona de estudio presenta al sur piroclastos

retrabajados y en la zona norte principalmente el subsuelo se constituye por tobas y lavas. Asimismo, es posible identificar que la dirección del flujo subterráneo se orienta en dirección de sur a norte, viéndose afectado en cuanto a reorientación, por una falla geológica localizada al interior de la zona de estudio.

También, es posible afirmar que el acuífero se localiza a una mayor profundidad en el sector sur de la zona de estudio (zona de localización de los pozos para generación geotérmica), en relación con la zona norte, donde se localizan los pozos para consumo humano. Es importante aclarar que los pozos geotérmicos disponen en las zonas de localización de pérdidas, de una tubería no perforada (casing), que no permite la contaminación de acuíferos que pudieran ser intersectados como parte del desarrollo geotérmico en la zona de estudio.

Con base en lo observado en los resultados hidrogeoquímicos y la hidrología, se determinó que las fuentes que cuentan con mayor temperatura se localizan al sur de la subcuenca que contiene la mayor área del campo geotérmico en estudio. Además, se identificó que para las fuentes de agua estudiadas, los tipos de agua presentes son: a) Cállicas bicarbonatadas, b) Mixtas Bicarbonatadas y c) Alteración hidrotermal histórica.

En relación con la geofísica se determinó que el acuífero se identifica en un rango de resistividad de entre 60 y 102 ohm, lo cual con base en bibliografía relacionada dicha resistividad es consistente el rango asociado para agua dulce subterránea. Asimismo, la información ha sido confirmada dado que la profundidad del acuífero corresponde con los estratos donde se obtuvo pérdidas durante la perforación de pozos geotérmicos y/o la localización de la rejilla de pozos de abastecimiento de agua para consumo humano.

En cuanto al aspecto social para la zona de estudio, es posible afirmar que en una proyección a largo plazo puede generarse una incidencia en el acuífero, en caso de realizarse una sobreexplotación del mismo, si fuera el caso de no disponer de un adecuado manejo de dicho recurso hídrico.

7. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.

7.1.METODOLOGÍA PARA IDENTIFICACIÓN DE ACUÍFEROS

A continuación se explica la metodología empleada como parte de la investigación realizada.



Etapa 1: Recopilación de información antecedente o existente en general, incluyendo mapas de tipo geológico, hidrológico e hidrogeológico de la zona de estudio. Esto conlleva las siguientes actividades:

- Conocimiento previo de la zona de estudio: con el propósito de validar o realizar una actualización de la información antecedente recopilada
- Revisión y selección de información específica de interés consistente en mapas existentes de las temáticas siguientes: geológica, geofísica y geoquímica del área relacionada.
- Recopilación de información antecedente y/o levantamiento de información para actualización de base de datos correspondiente a la zona de interés

Etapa 2: Procesamiento de la información

En esta etapa se requiere una base de datos que su procesamiento permita la obtención de resultados fiables, que además disponga de una adecuada trazabilidad respecto al tiempo.

- Disponer de una base de datos robusta para posteriormente seleccionar la información de interés aplicable a la zona de estudio
- Emplear diferentes software para una adecuada interpretación de los datos
- Verificación de la información con base a la experiencia técnica del equipo multidisciplinario que realiza el estudio.

Etapas 3: Análisis de datos

En esta etapa una vez verificada la información procesada, se realiza el análisis de cada uno de los componentes que es de interés. Los análisis pueden ser los siguientes:

- Análisis de información geológica (preferiblemente contar con un mapa geológico de la zona de estudio) y definir las unidades geológicas presentes en la zona de estudio
- Análisis de información geofísica
- Análisis de información geoquímica (parámetros de calidad de agua) para consumo humano
- Análisis de información hidrogeológica para lo cual se deberá disponer de perfiles litológicos de pozos existentes perforados con propósito de abastecimiento de agua para consumo y con propósito de explotación geotérmica. Además contar con un mapa hidrogeológico de la zona de estudio, para retomar información principalmente sobre piezometría, definición de unidades hidrogeológicas de la zona de estudio así como el comportamiento del flujo subterráneo del sistema acuífero
- Como parte del análisis de requiere generar mapas hidrogeológicos, hidrológicos, geológicos, geofísico y de representación gráfica del quimismo de las fuentes
- Empleo de métodos gráficos de análisis para la obtención de diagramas de Stiff y Piper.
- Definición de trayectoria de perfiles transversales para verificación en profundidad del modelo conceptual generado.

Etapas 4: Modelo hidrogeológico conceptual

Es el resultado obtenido y/o esperado, a partir de la implementación de cada una de las etapas previas, mismas que integran toda la información requerida, como parte de la metodología de identificación de acuíferos superficiales en un campo geotérmico.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Para este estudio de investigación se puede concluir lo siguiente:

- A partir del análisis hidrogeológico realizado a la información disponible para el presente estudio, la cual fue recaba de diferentes fuentes de información; es posible identificar acuíferos superficiales que, con un adecuado manejo del recurso, pueden suplir las necesidades para consumo humano. No obstante, lo anterior, es importante realizar una adecuada interpretación, consciente que el resultado es un Modelo Hidrogeológico Conceptual, el cual deberá confirmarse a medida se realicen más exploraciones en la zona de estudio.
- Disponer de un inventario de fuentes de agua que disponga de una frecuencia corta de actualización de información de datos químicos para la identificación de la calidad de agua, es valioso para un estudio hidrogeoquímico fiable, tal como el contenido en el presente trabajo, en zonas o regiones que cuenten con potencial geotérmico.
- Contar con información geofísica analizada adecuadamente, permite realizar una visualización más detallada del subsuelo presente en una zona de estudio en particular, lo cual al ser complementada con registros de perfiles litológicos de pozos perforados independiente el propósito (abastecimiento o desarrollo geotérmico) puede determinarse o en su defecto inferirse la presencia con mayor detalle de acuíferos superficiales.
- A partir del análisis hidrogeológico, hidrogeoquímico y geofísico realizado en el presente estudio se determinó una metodología aplicable para la identificación y caracterización de acuíferos superficiales en un campo geotérmico de El Salvador; no obstante, lo anterior, dicha metodología puede ser retomada para cualquier zona o región en estudio, siempre que se disponga de los datos o información de la naturaleza que contiene el análisis del estudio contenido en el presente trabajo.
- La presente investigación podría ser la base de próximas investigaciones, en las cuales se podría robustecer la información analizada y obtener resultados que además de identificar la localización en profundidad de un acuífero y sus características o propiedades asociadas, también permita realizar una delimitación en extensión del acuífero o determinación de volúmenes de extracción de agua subterránea con el propósito de evitar la sobreexplotación del recurso hídrico.

9. AGRADECIMIENTOS.

Gracias a las autoridades por la realización del Diplomado en Geotermia para América Latina, edición 2017, ha sido una experiencia llena de muchos conocimientos, experiencias y aprendizaje que pondré en práctica en mi vida profesional y personal. Muchas gracias a todas las personas que hicieron posible mi participación en dicho diplomado; gracias a los instructores por facilitar sus conocimientos y experiencias durante estos 5 meses.

Muchas gracias Ingeniera Bertha Arenivar (Unidad Ambiental Lageo) por tu aporte y colaboración en el área de geoquímica del presente trabajo; de igual manera quiero agradecer a Ingeniera Luz Barrios por su valioso aporte en el área de geología. Gracias a mis compañeros de la Unidad Ambiental de Lageo, por su disposición de ayuda y servicio cada vez que los abordé para pedirles apoyo o interrogantes asociadas al Diplomado en Geotermia.

A nuestros asesores del presente trabajo Ingeniero Luis Franco e Ingeniero Antonio Matus, por su dedicación, entrega plena y el compartir de sus conocimientos en la realización de todas las actividades desarrolladas satisfactoriamente para la consecución de nuestro trabajo final.

Licenciada Tania Muñoz e Ingeniera Glenda Campos, muchas gracias por haberme permitido trabajar con ustedes, ha sido grato, satisfactorio y de mucha alegría el compartir con ambas durante la realización de nuestro trabajo final.

Eduardo Ascencio

Agradezco a Dios todopoderoso, por la vida, la salud, bendiciones y oportunidades concedidas cada día.

Agradezco a las organizaciones internacionales y nacionales que hicieron posible la realización del Diplomado en Geotermia para América Latina, edición 2017, así como la oportunidad y apoyo que las jefaturas de LaGeo S.A. de C.V. para capacitarme y cursar tan importante estudio, cuyos conocimientos adquiridos me permitirán un mejor desarrollo en el ámbito profesional y laboral.

Agradezco a los docentes del Diplomado, por sus enseñanzas, su entrega y dedicación para transmitir los conceptos relacionados a la geotermia.

También agradezco a mis tutores del presente trabajo: Ingeniero Antonio Matus e ingeniero Luis Franco, por la dedicación y entrega para transmitir el conocimiento científico, necesario para la conclusión de la presente investigación.

Asimismo, agradezco a mis compañeros Eduardo Ascencio y Tania Muñoz, por haber compartido la experiencia de crecimiento profesional, mediante la realización de ésta investigación, haciendo trabajo en equipo y principalmente por los momentos amenos compartidos.

Finalmente, agradezco a mis compañeros extranjeros y nacionales por el tiempo y experiencias compartidas.

Glenda Campos

Agradecimientos

Agradezco la oportunidad que LaGeo me brindo para poder participar en el Diplomado en Geotermia para América Latina, y seguir creciendo profesional y personalmente. Gracias a cada una de las personas que me apoyo, escucho y ayudo incansablemente para salir adelante y superar mis obstáculos.

Agradezco a mis asesores Antonio Matus y Luis Franco, que son personas extraordinariamente entregadas al conocimiento científico, y que a través de su paciencia y buena voluntad, me guiaron para la feliz y satisfactoria consecución de la investigación.

Muy agradecida de mi compañero Eduardo Ascencio y compañera Glenda Campos, por ayudarme a comprender más sobre la temática, por ser excelentes profesionales, pero sobre todo agradezco las risas y los momentos compartidos.

Gracias a la vida por dejarme aprender de esta experiencia maravillosa y seguir creciendo como ser humano.

Tania Muñoz

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

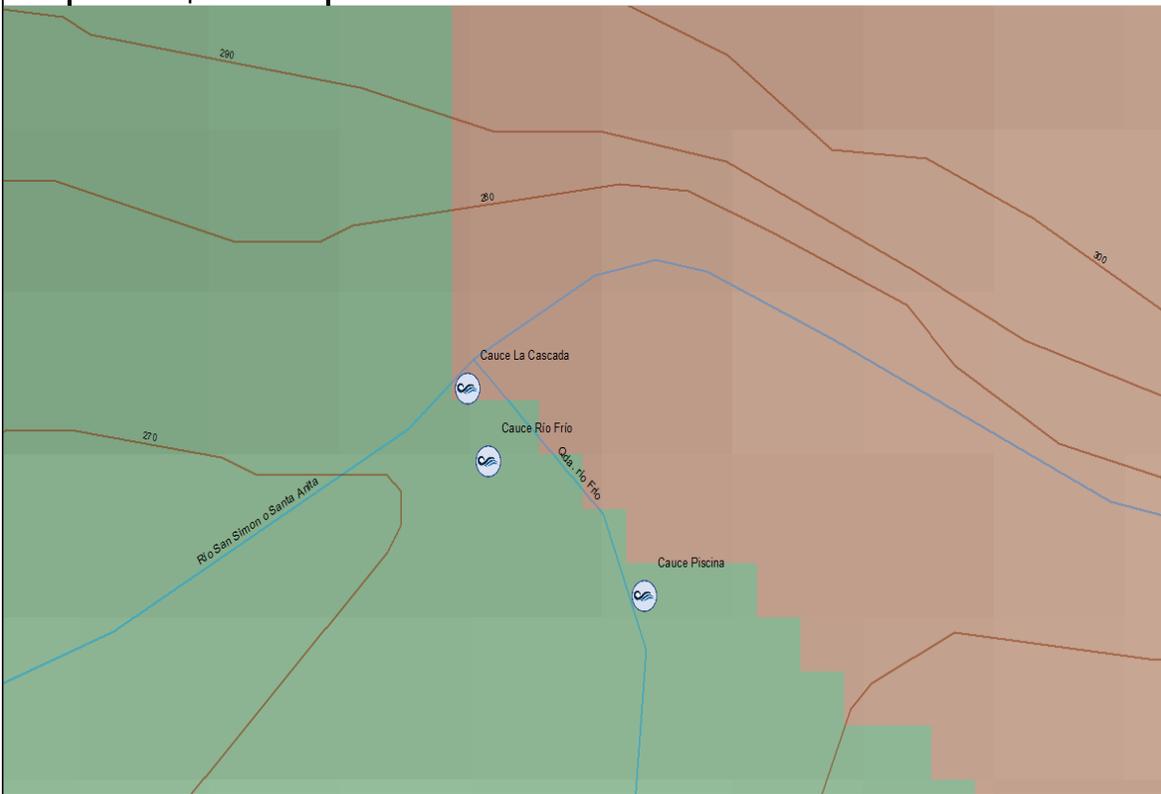
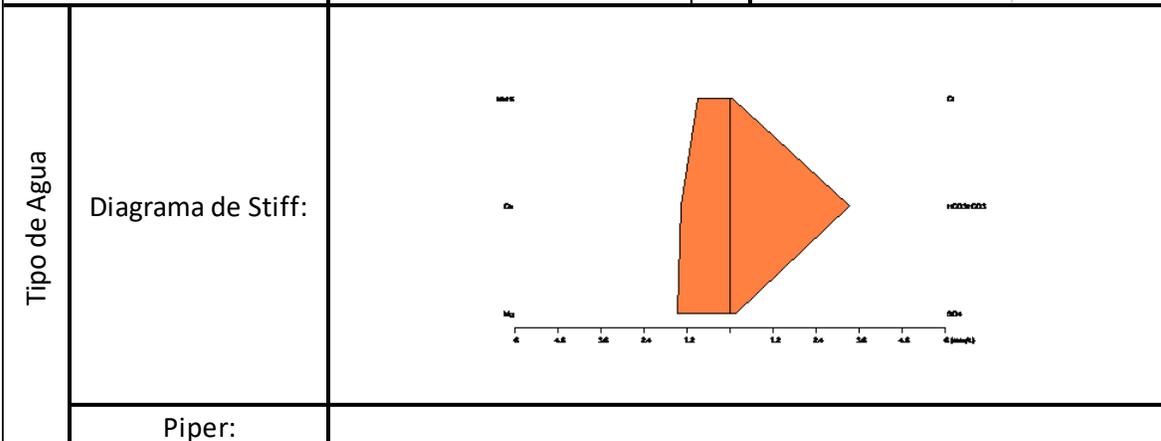
1. COLLAZO, María & Jorge, Montañó (2012). Manual de Agua Subterránea. Ministerio de Ganadería y Agricultura, Montevideo, Uruguay, 121 p.
E. Custodio/M.R. Llamas (1983). Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, s.a., Barcelona, 1983
2. ECURED (2017). Litología, Cuba, Extraído del sitio web: <https://www.ecured.cu/Litolog%C3%ADa>
3. Emilio Custodio y Manuel Ramón Llamas
4. IGLESIAS, Alfredo y Manuel, VILLANUEVA (1984). Pozos y Acuíferos. Técnicas de Evaluación mediante ensayos de bombeo. IBERGESA: Madrid, 435 p.
5. Instituto Colombiano de Geología y Minería (2004). Programa de Exploración de aguas subterráneas. Bogota D.C, 45 p.
6. Javier Sánchez San Román (2017). Hidrología superficial y subterránea. Hidráulica Subterránea: principios básicos. Createspace Independent Publishing Platform: Salamanca.
7. LAGEO (2011). Reporte de Monitoreo de la calidad del agua en la Subcuenca del Río San Simón 200-2011. LaGeo: San Salvador, 67 p.
8. Losilla, Marcelino & et al (2001). Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central, Editorial Universidad de Costa Rica; San José, 205 p.
9. M. Mejías (1), (et all, sf) Metodología de caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas profundas. aplicación al acuífero regional del maestrazgo, Universidad de Madrid.
10. MIRANDA, José Perforadora Santa Bárbara (s.f.) Los Pozos geotérmicos. PSB, San Salvador, Extraído del sitio web: <http://www.psb.com.sv/?cat=1012&title=Los%20Pozos%20Geot%E9rmicos&lang=es>
11. Unión Mundial para la Naturaleza (UICN, 2005). Proyecto: Manejo Integrado de Cuencas Asociadas al Complejo Hidrográfico El Imposible – Barra De Santiago, Ahuachapán, El Salvador (BASIM), Plan de Monitoreo para Sistemas de Abastecimiento de Pozos Perforados en el Sur de Ahuachapán, El Salvador, C.A.
12. Vargas, Jenny (2002). Manejo Integrado de Aguas Subterráneas Un reto para el futuro. EUNED: San José, C.R. 348 P.
13. (s. f.) Capitulo 4 Exploración de Aguas Subterráneas, 47 pp.

11. APÉNDICES

Punto de muestreo:	Cauce La Cascada				
Coordenadas de ubicación:	x:	551962	E	Departamento:	UE
	y:	271306	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	306	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

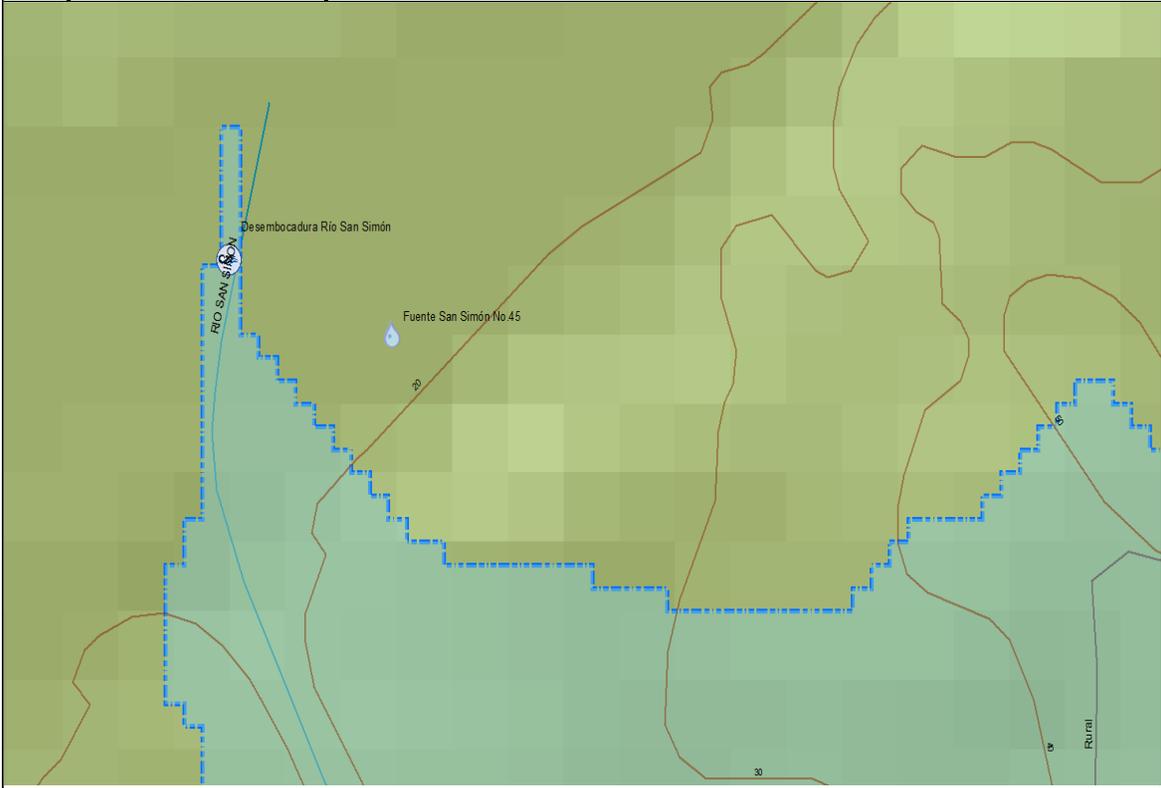
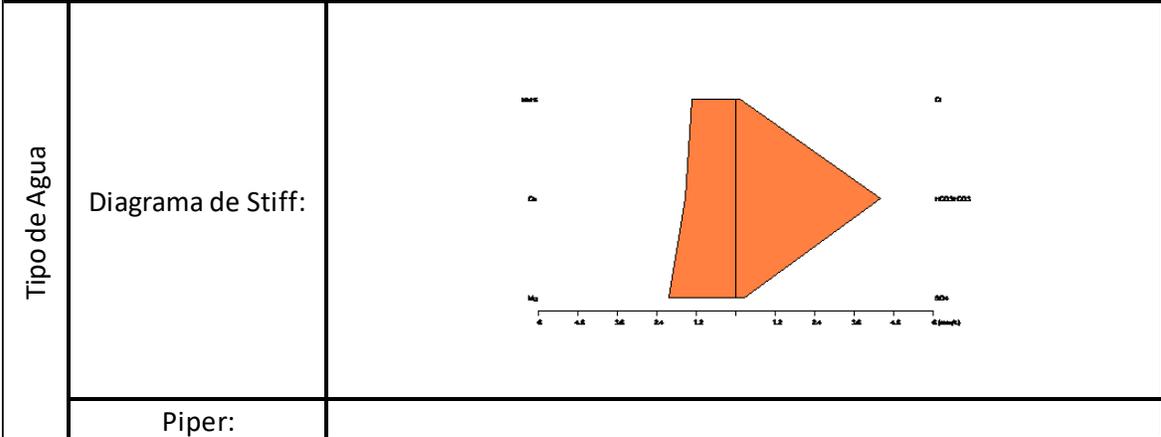
Clasificación:	1- Fuente			
	2- Pozo Perforado			
	3- Pozo excavado			
	4- Río		X	



Punto de muestreo:	Desembocadura Río San Simón				
Coordenadas de ubicación:	x:	545842	E	Departamento:	UE
	y:	274836	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	304	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

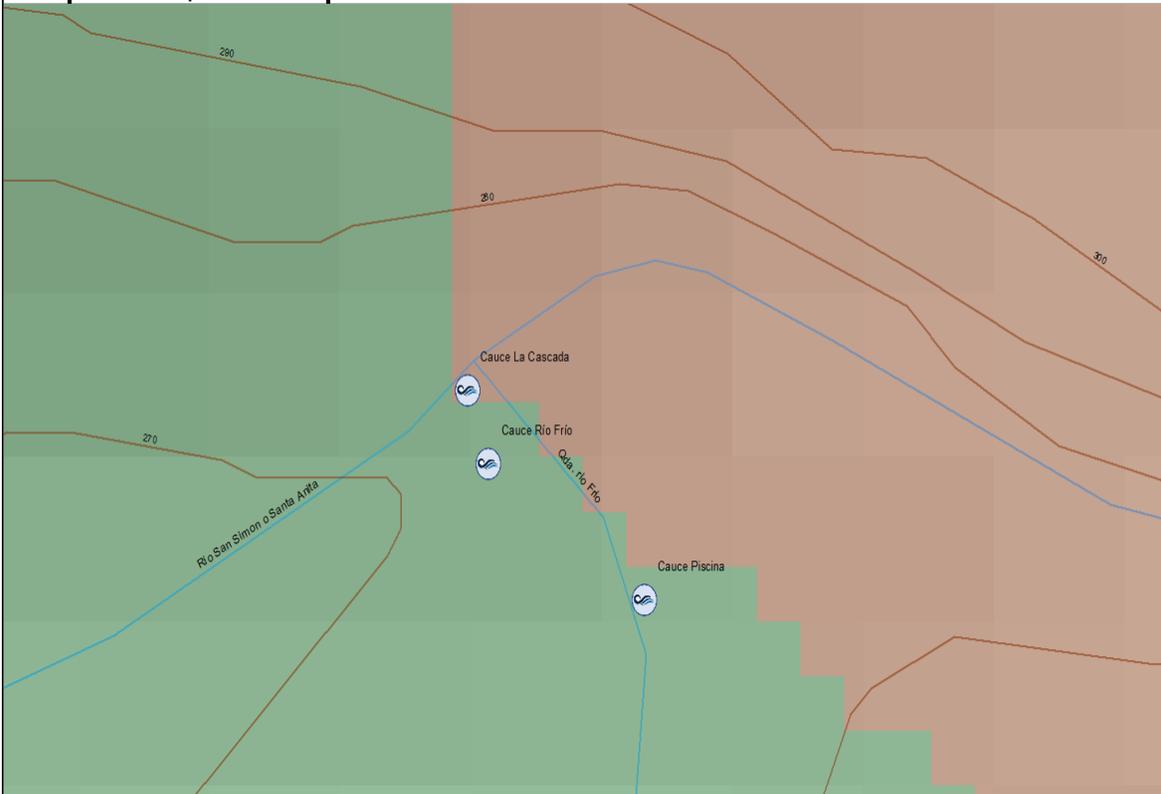
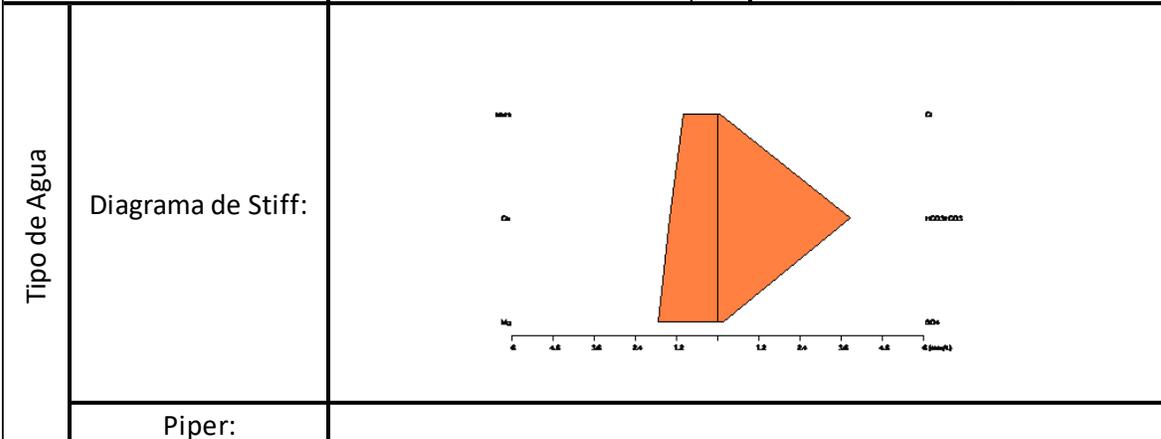
Clasificación:	1- Fuente			
	2- Pozo Perforado			
	3- Pozo excavado			
	4- Río	X		



Punto de muestreo:	Cauce Río Frío				
Coordenadas de ubicación:	x:	551967	E	Departamento:	UE
	y:	271292	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	396	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

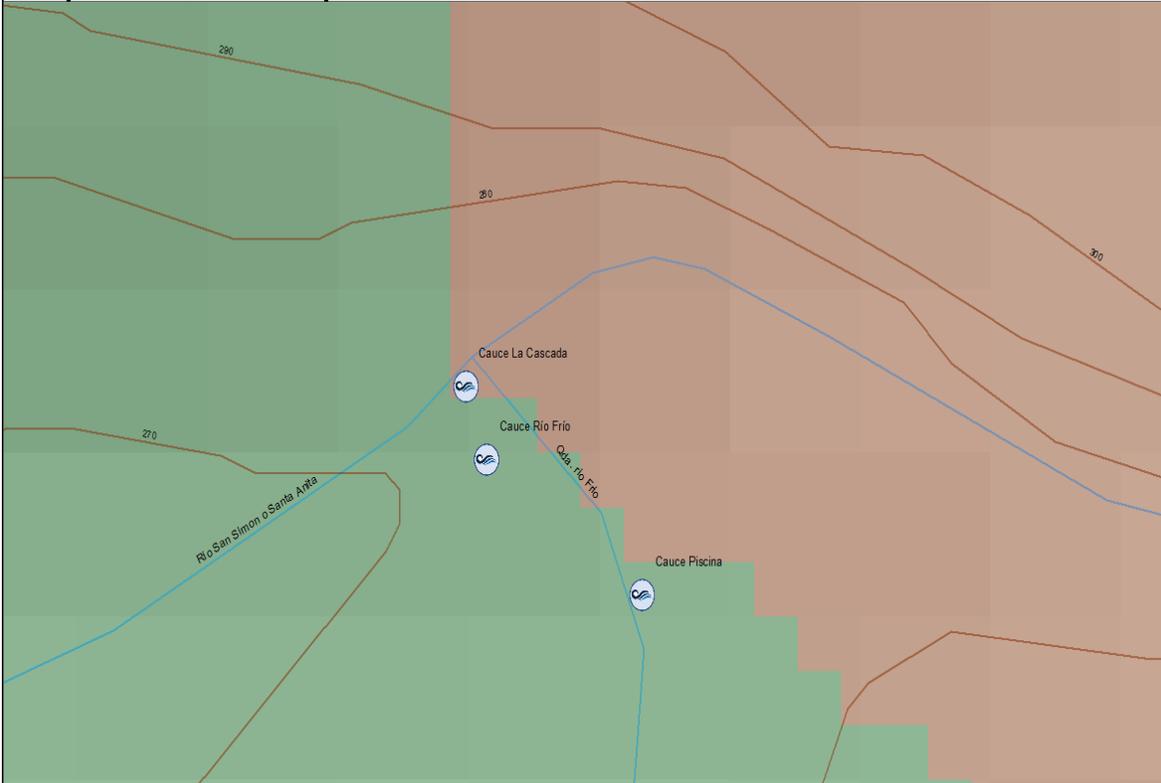
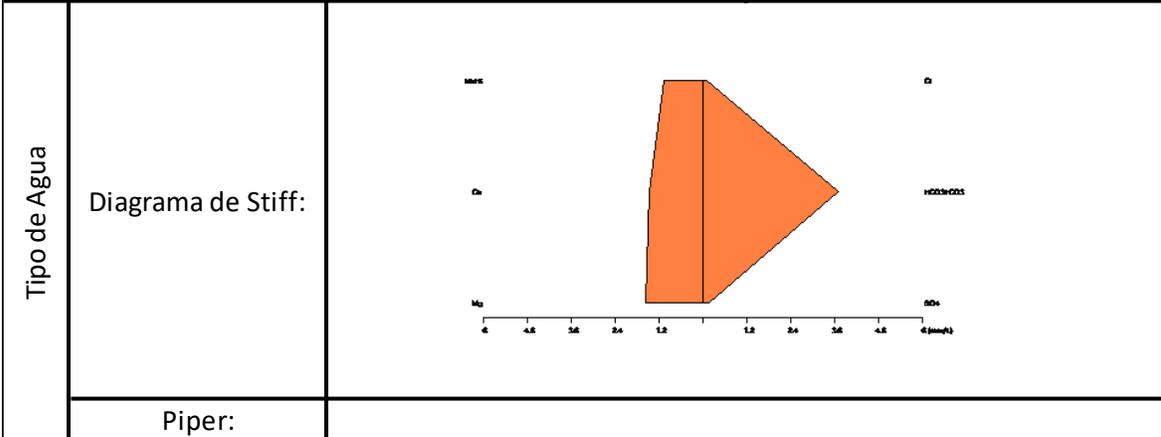
Clasificación:	1- Fuente				
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río		X		



Punto de muestreo:	Cauce Río Piscina					
Coordenadas de ubicación:	x:	552002	E	Departamento:	UE	
	y:	271268	N	Municipio:	BE	
Altura:	z:	293	m	Cantón:	BE	

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

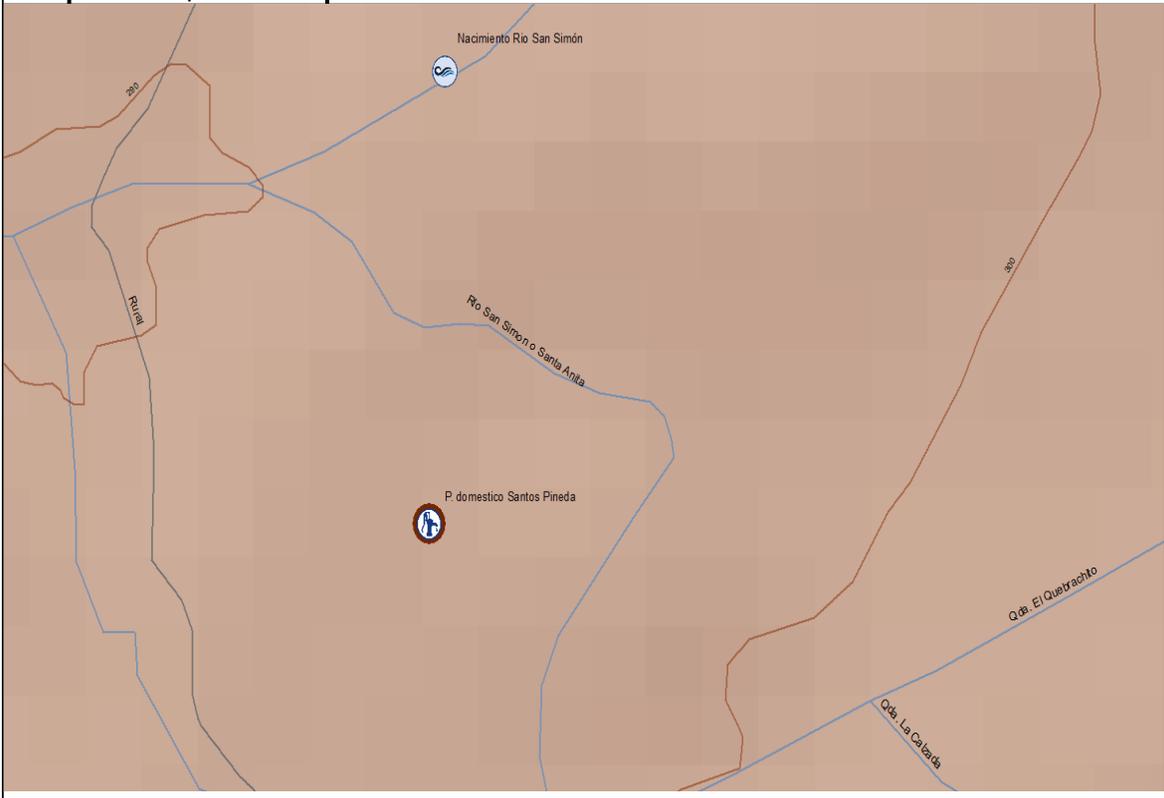
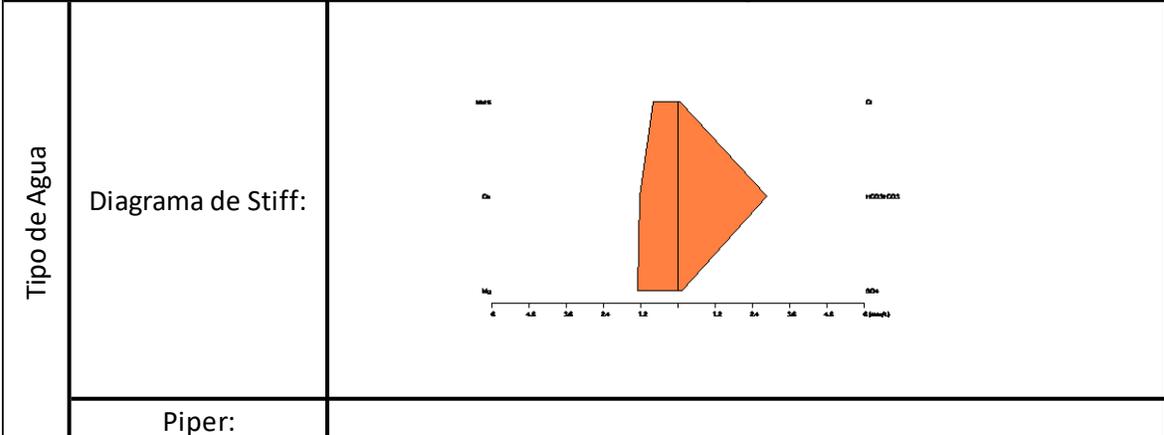
Clasificación:	1- Fuente				
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río		X		



Punto de muestreo:	Nacimiento Rio San Simon					
Coordenadas de ubicación:	x:	552695	E	Departamento:	UE	
	y:	271324	N	Municipio:	BE	
Altura:	z:	12	m	Cantón:	BE	

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

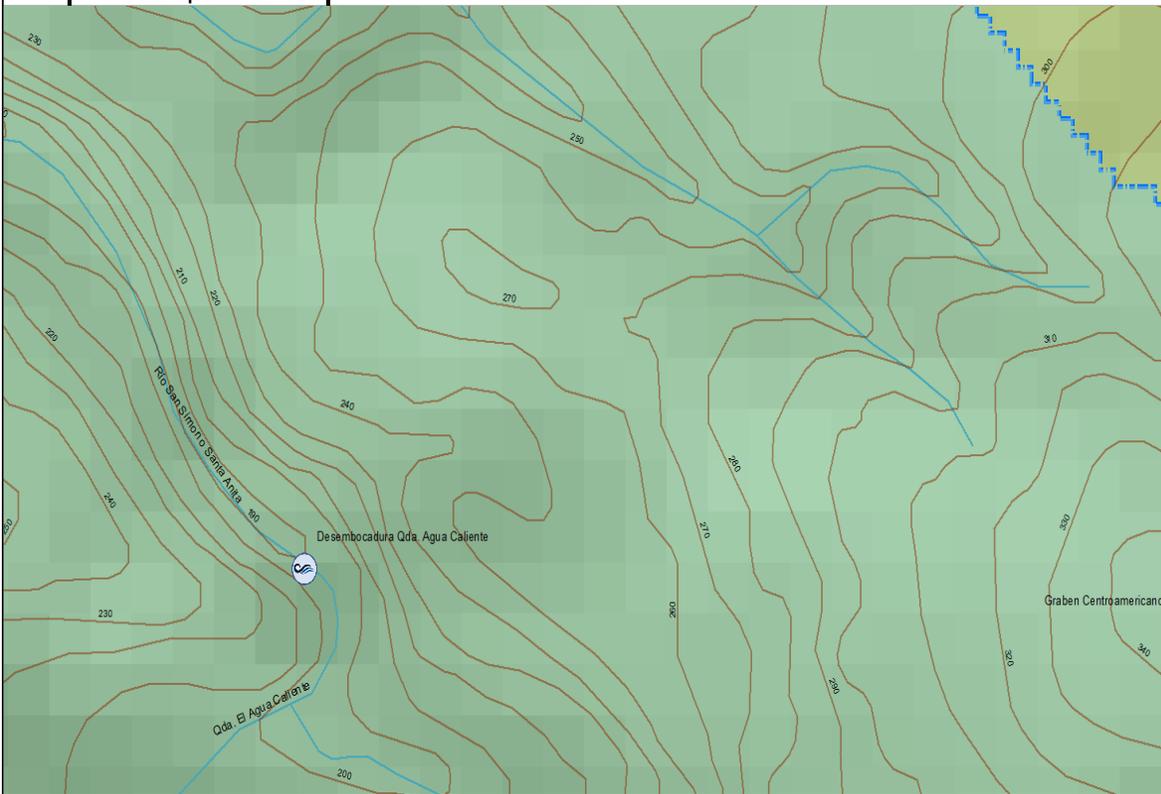
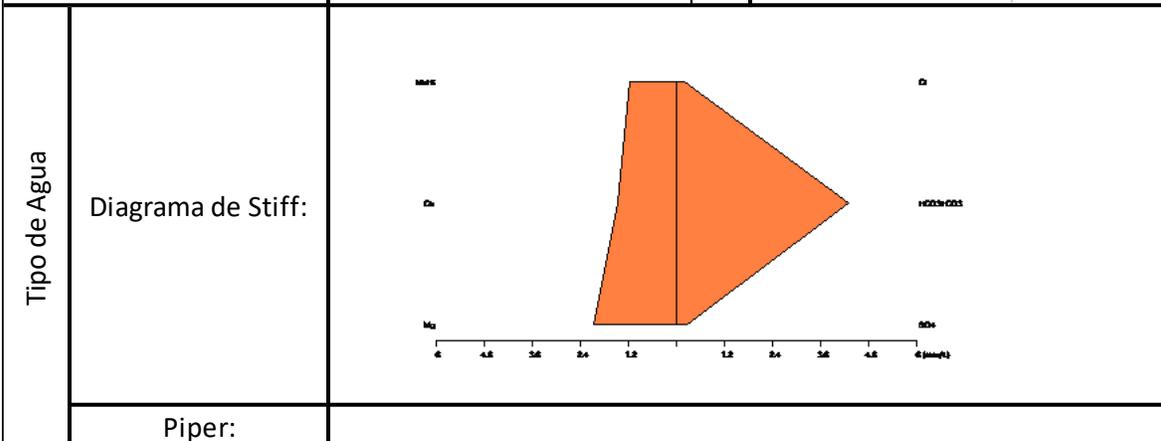
Clasificación:	1- Fuente			
	2- Pozo Perforado			
	3- Pozo excavado			
	4- Río	X		



Punto de muestreo:	Desembocadura Qda. Agua C				
Coordenadas de ubicación:	x:	550439	E	Departamento:	UE
	y:	271890	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	294	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

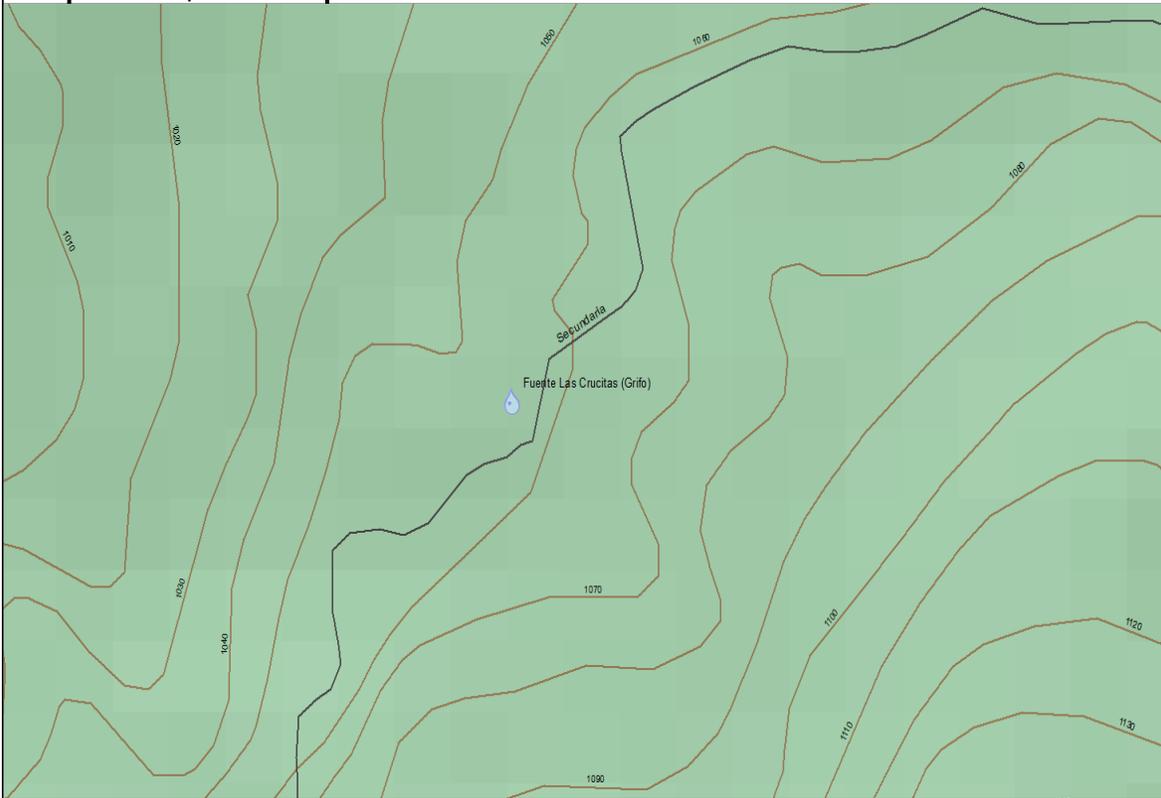
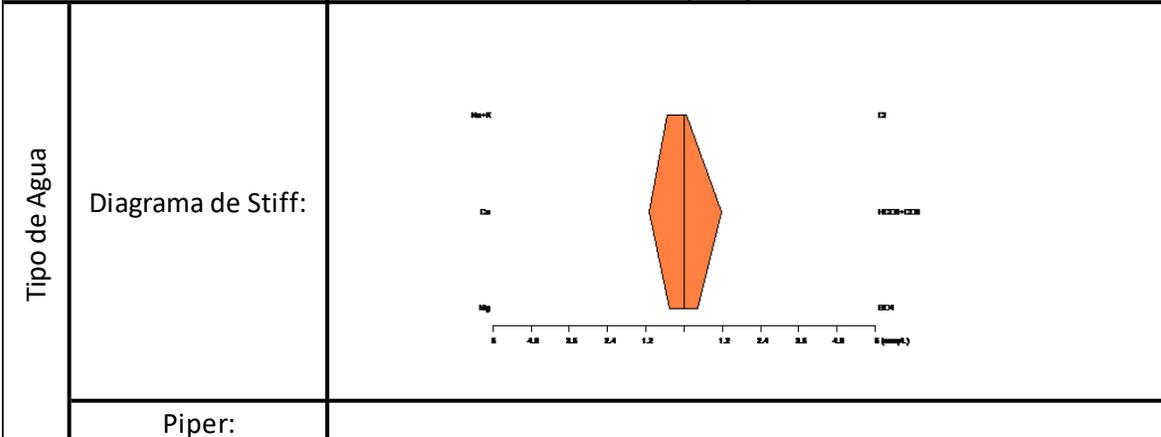
Clasificación:	1- Fuente		
	2- Pozo Perforado		
	3- Pozo excavado		
	4- Río	X	



Punto de muestreo:	Fuente Las Crucitas				
Coordenadas de ubicación:	x:	553465	E	Departamento:	UE
	y:	265336	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	1078	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

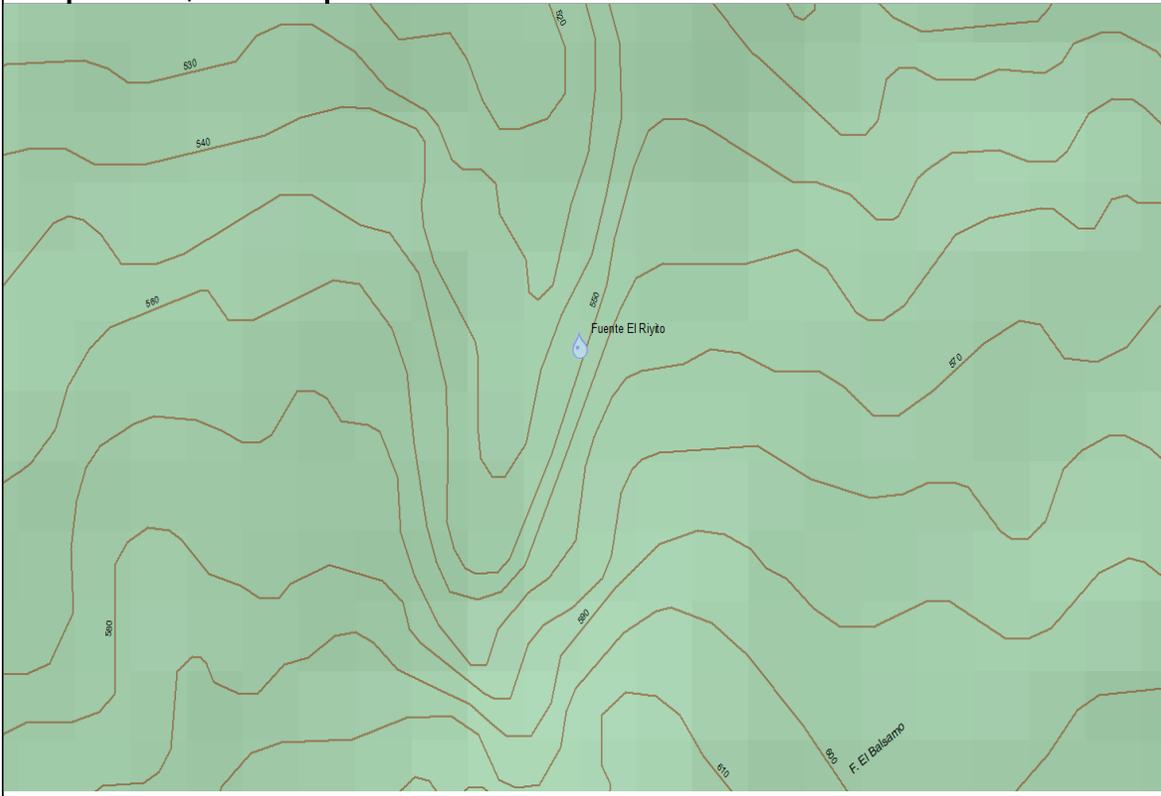
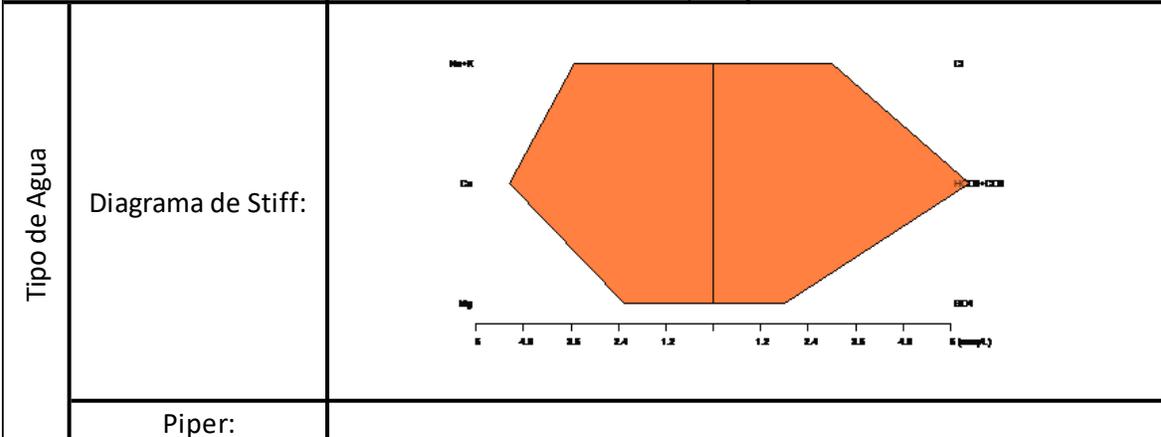
Clasificación:	1- Fuente	X			
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río				



Punto de muestreo:	Fuente El Riyito				
Coordenadas de ubicación:	x:	552232	E	Departamento:	UE
	y:	267084	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	1078	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

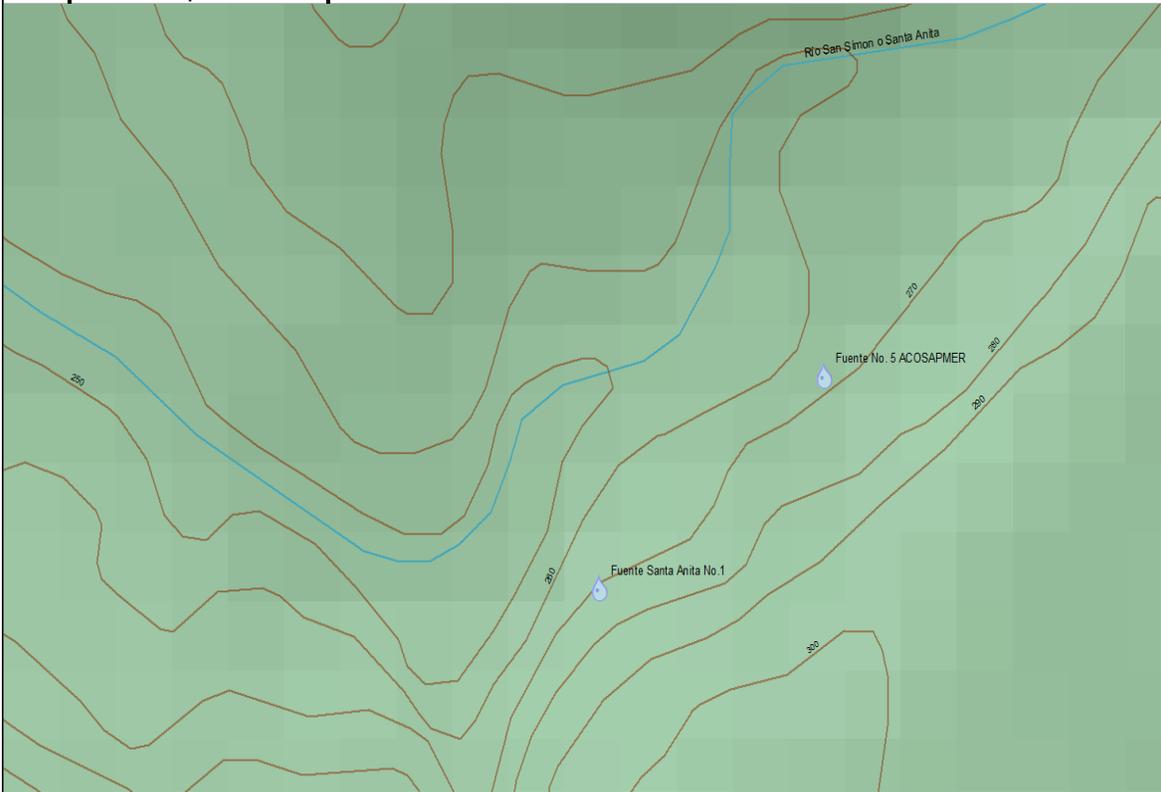
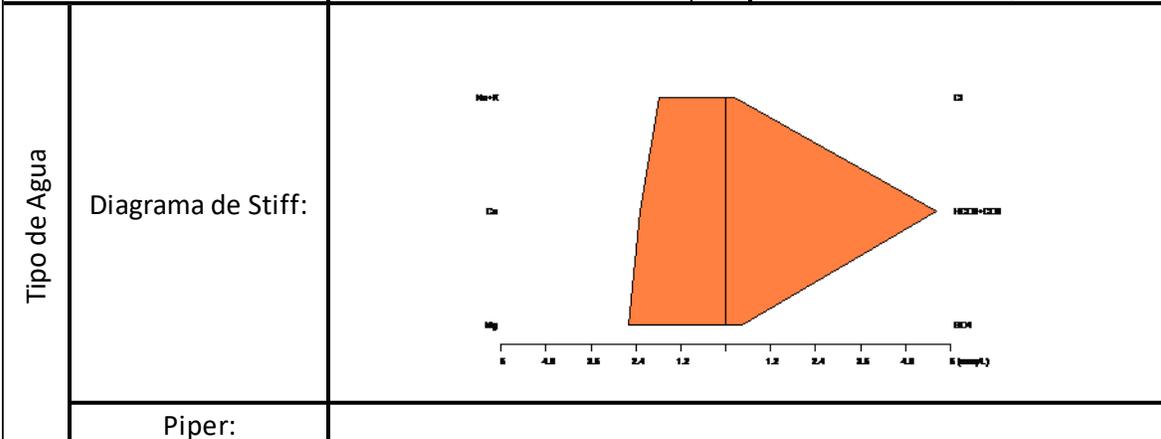
Clasificación:	1- Fuente	X			
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río				



Punto de muestreo:	Fuente Santa Anita No.1				
Coordenadas de ubicación:	x:	551621	E	Departamento:	UE
	y:	270999	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	283	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente	X		
	2- Pozo Perforado			
	3- Pozo excavado			
	4- Río			

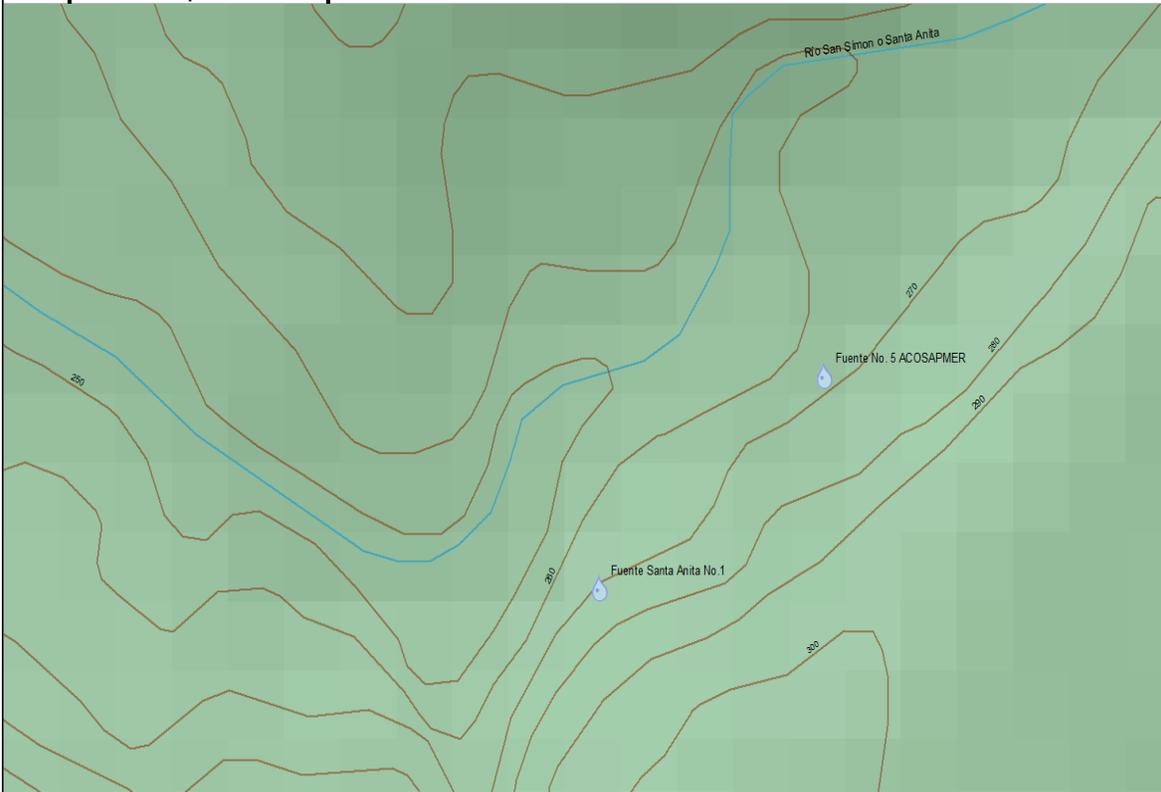


Punto de muestreo:	Fuente No. ACOSAPMER				
Coordenadas de ubicación:	x:	551742	E	Departamento:	UE
	y:	271092	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	281	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente	X		
	2- Pozo Perforado			
	3- Pozo excavado			
	4- Río			

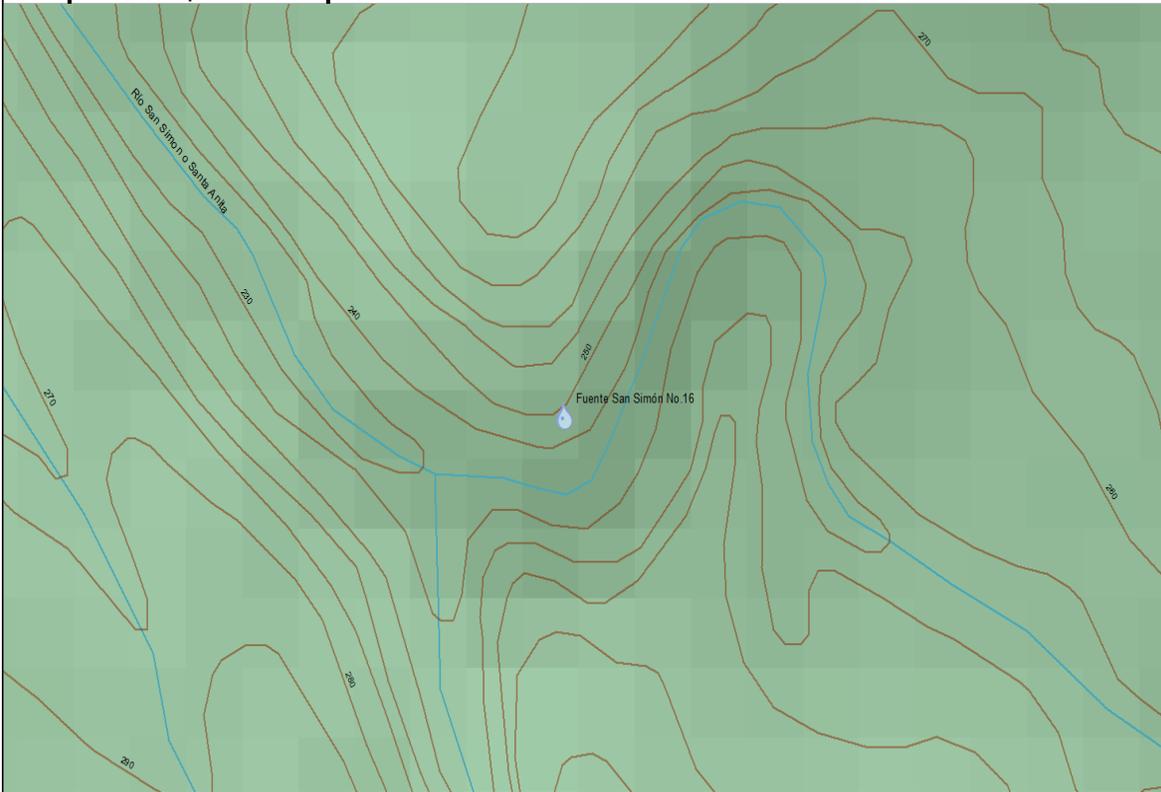
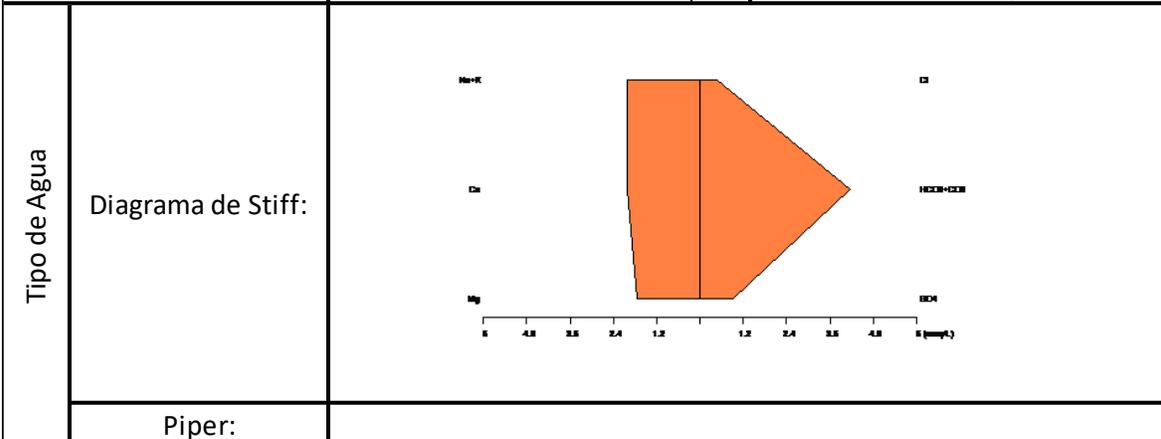
Tipo de Agua	Diagrama de Stiff:	
	Piper:	



Punto de muestreo:	Fuente San Simón No.16					
Coordenadas de ubicación:	x:	551115	E	Departamento:	UE	
	y:	271192	N		Municipio:	BE
Altura:	z:	257	m	Cantón:	BE	

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

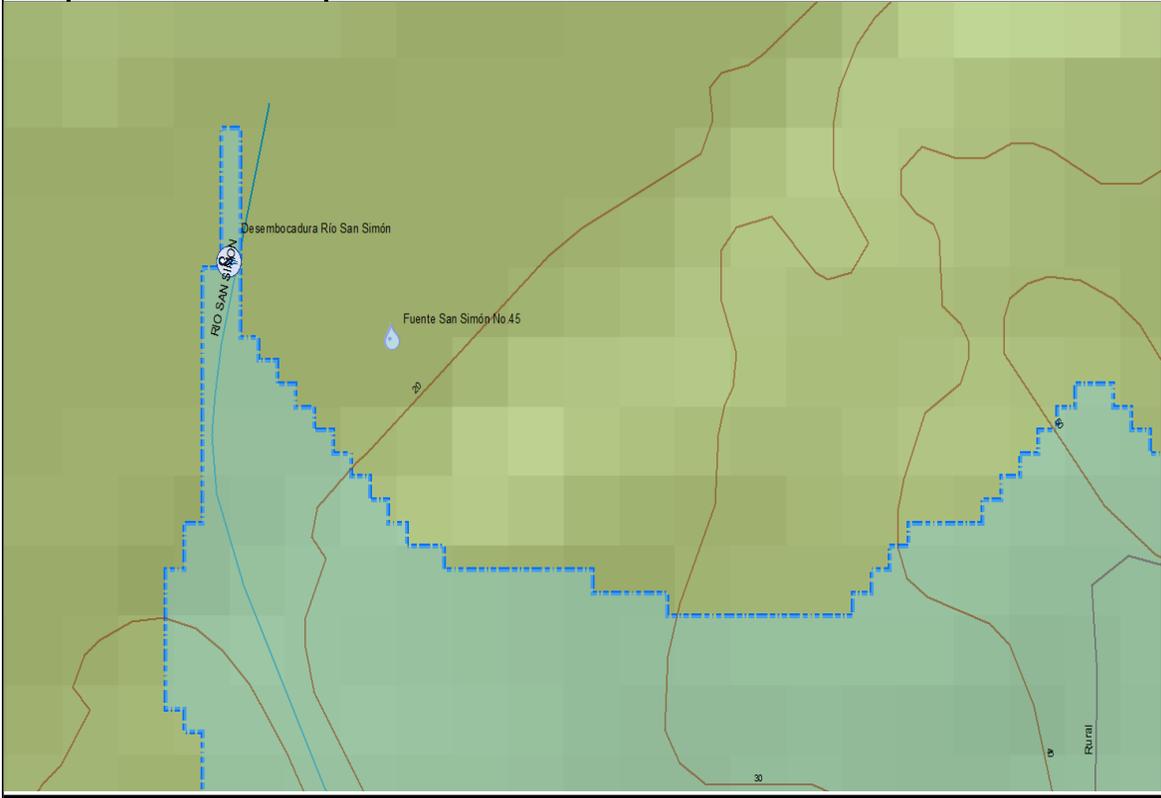
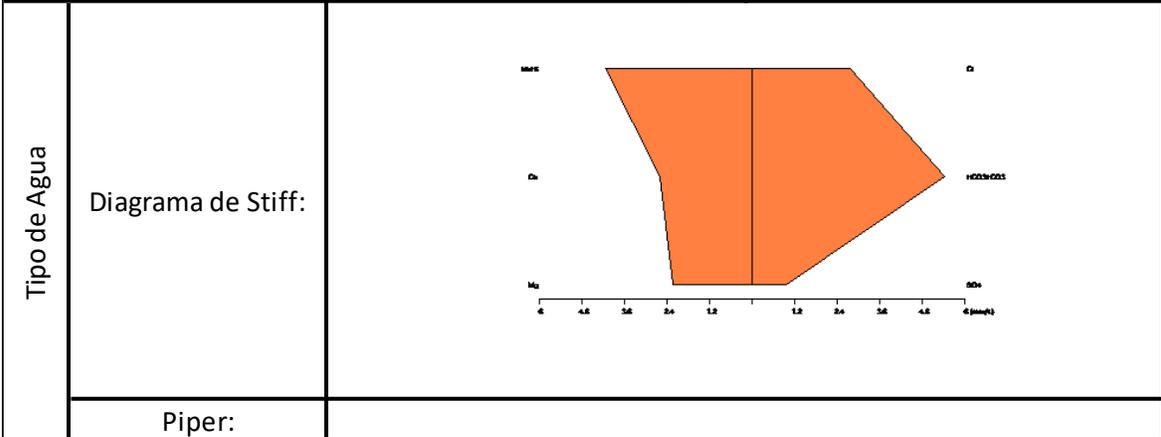
Clasificación:	1- Fuente	X			
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río				



Punto de muestreo:	Fuente San Simón No.45				
Coordenadas de ubicación:	x:	545931	E	Departamento:	UE
	y:	274804	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	24	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente	X			
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río				

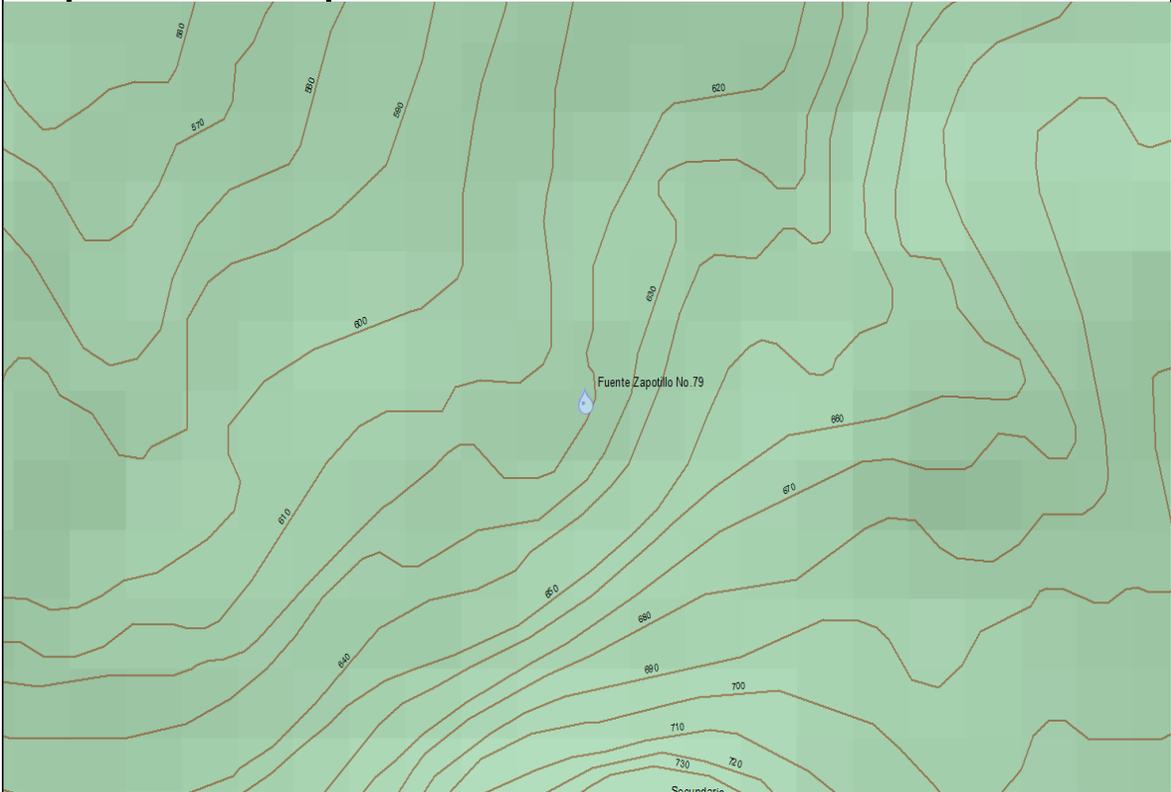


Punto de muestreo:	Fuente Zapotillo No.79				
Coordenadas de ubicación:	x:	553740	E	Departamento:	UE
	y:	267330	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	648	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente	X			
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río				

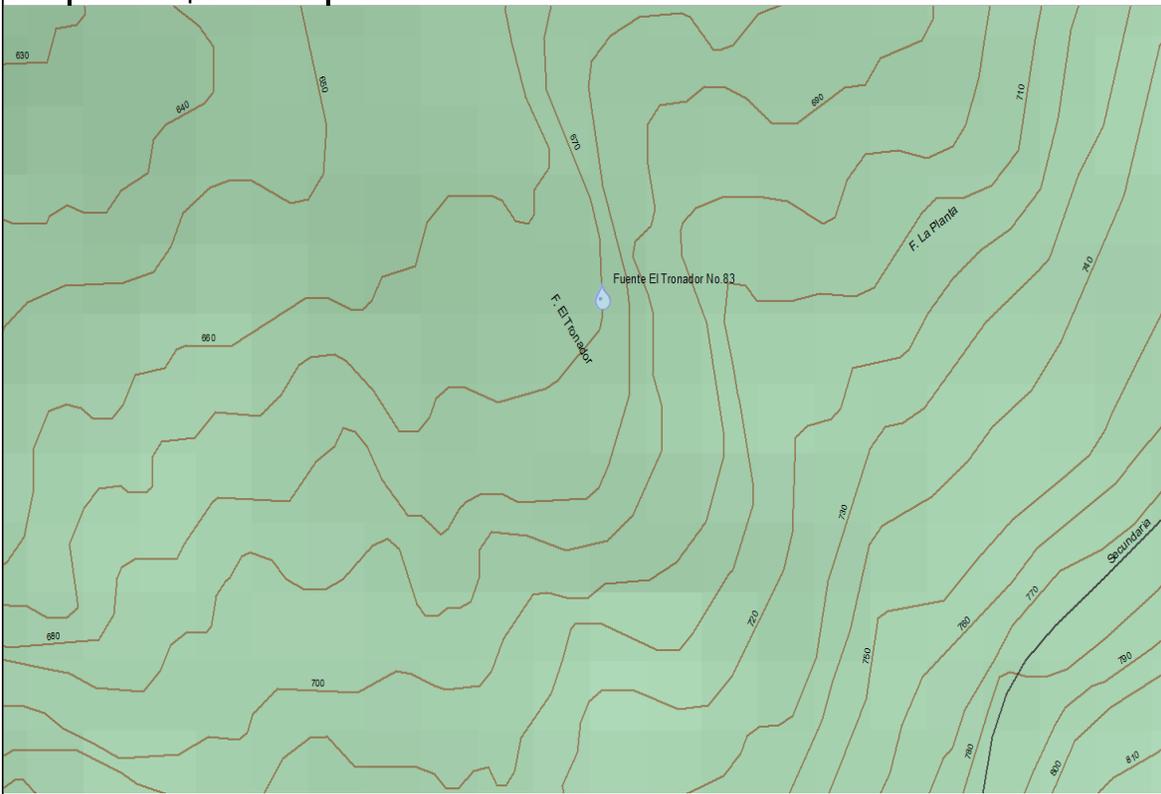
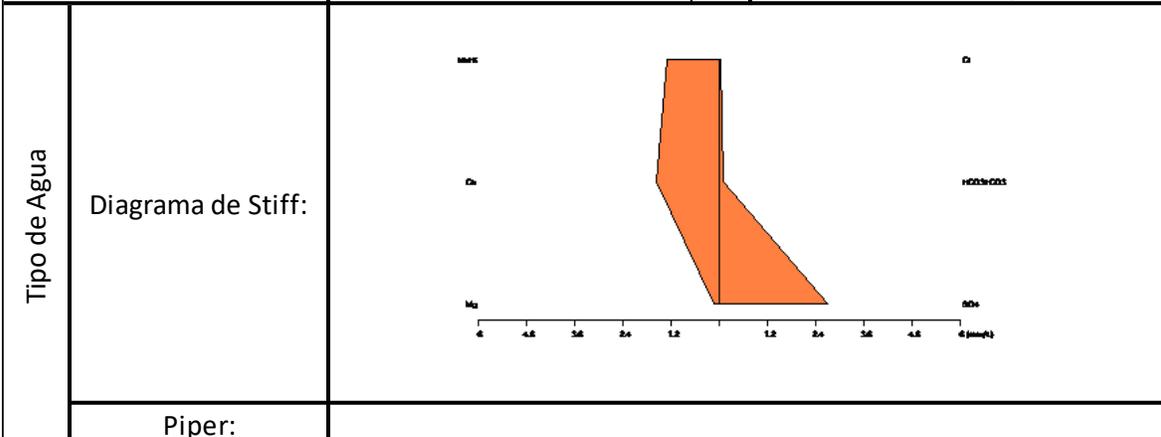
Tipo de Agua		<p>Diagrama de Stiff:</p>
	Piper:	



Punto de muestreo:	Fuente El Tronador No.83				
Coordenadas de ubicación:	x:	553230	E	Departamento:	UE
	y:	266742	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	687	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

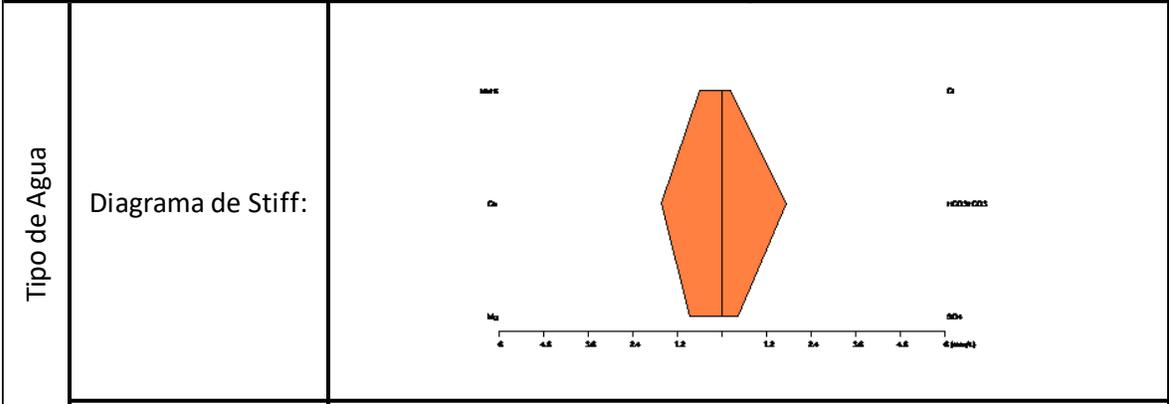
Clasificación:	1- Fuente	<input checked="" type="checkbox"/>		
	2- Pozo Perforado	<input type="checkbox"/>		
	3- Pozo excavado	<input type="checkbox"/>		
	4- Río	<input type="checkbox"/>		



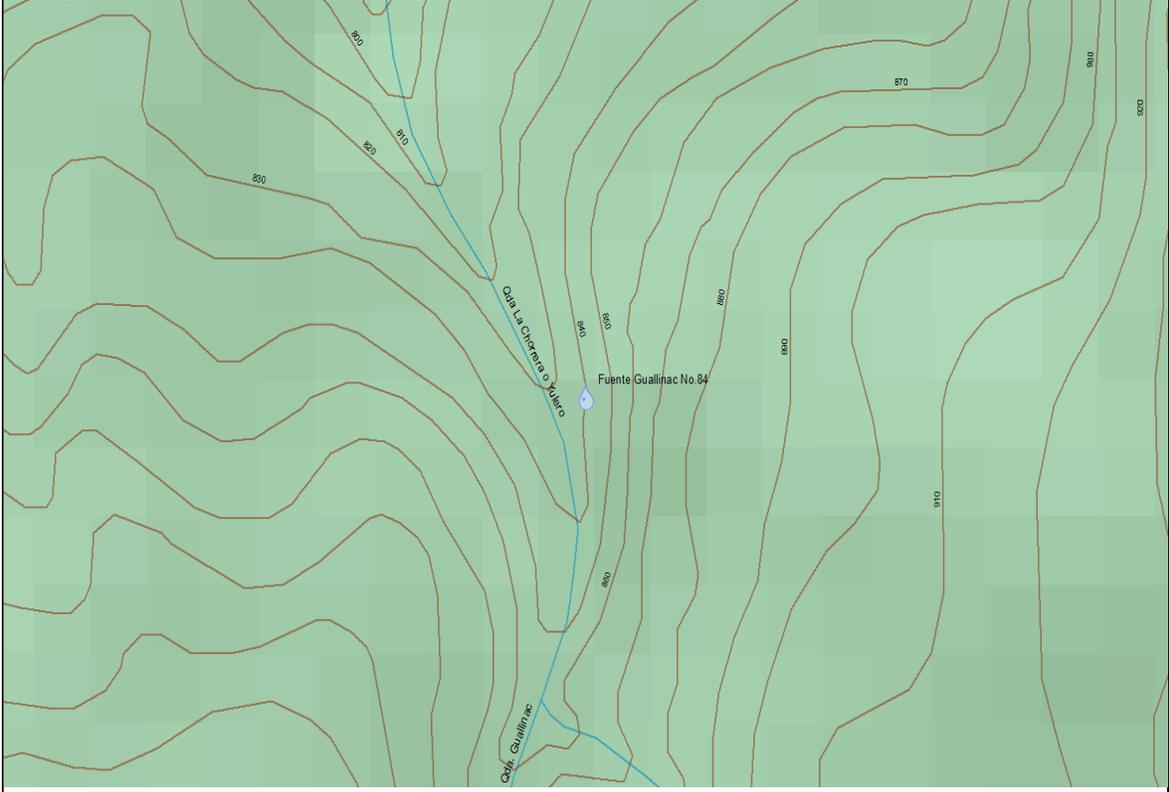
Punto de muestreo:	Fuente Guallinac No.84					
Coordenadas de ubicación:	x:	554478	E	Departamento:	UE	
	y:	266576	N	Municipio:	BE	
Altura:	z:	860	m	Cantón:	BE	

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente	X			
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado				
	4- Río				



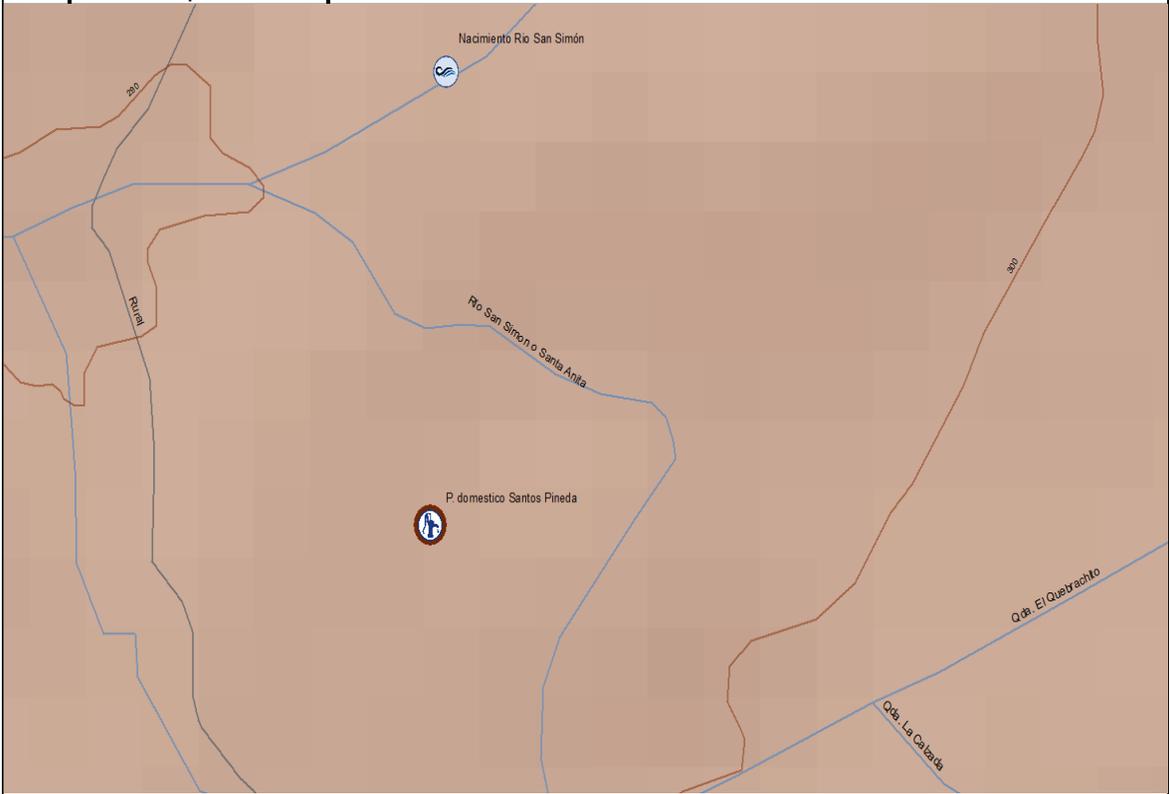
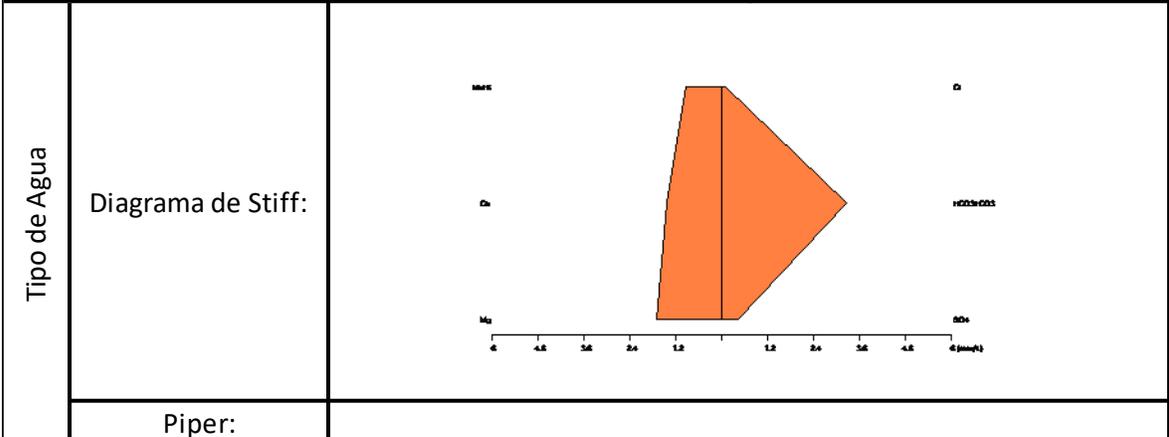
Piper:



Punto de muestreo:	P. Domestico Santos Pineda					
Coordenadas de ubicación:	x:	552686	E	Departamento:	UE	
	y:	271128	N	Municipio:	BE	
Altura:	z:	350	m	Cantón:	BE	

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

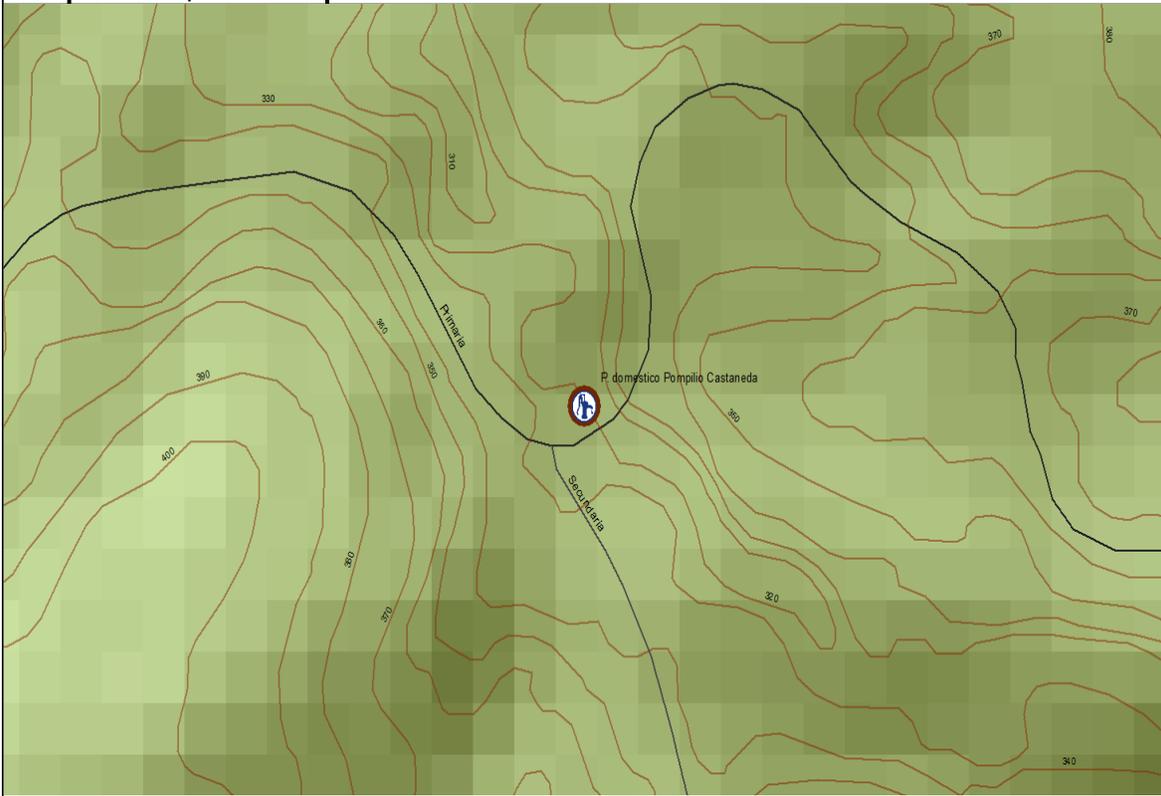
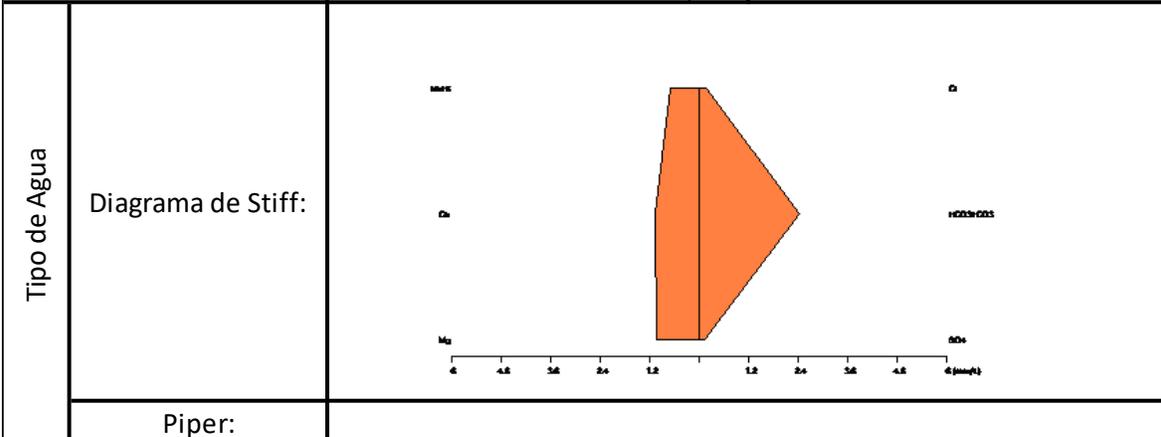
Clasificación:	1- Fuente				
	2- Pozo Perforado				
	3- Pozo excavado	X			
	4- Río				



Punto de muestreo:	P. Domestico Pompilio Castaneda				
Coordenadas de ubicación:	x:	555133	E	Departamento:	UE
	y:	271977	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	574	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

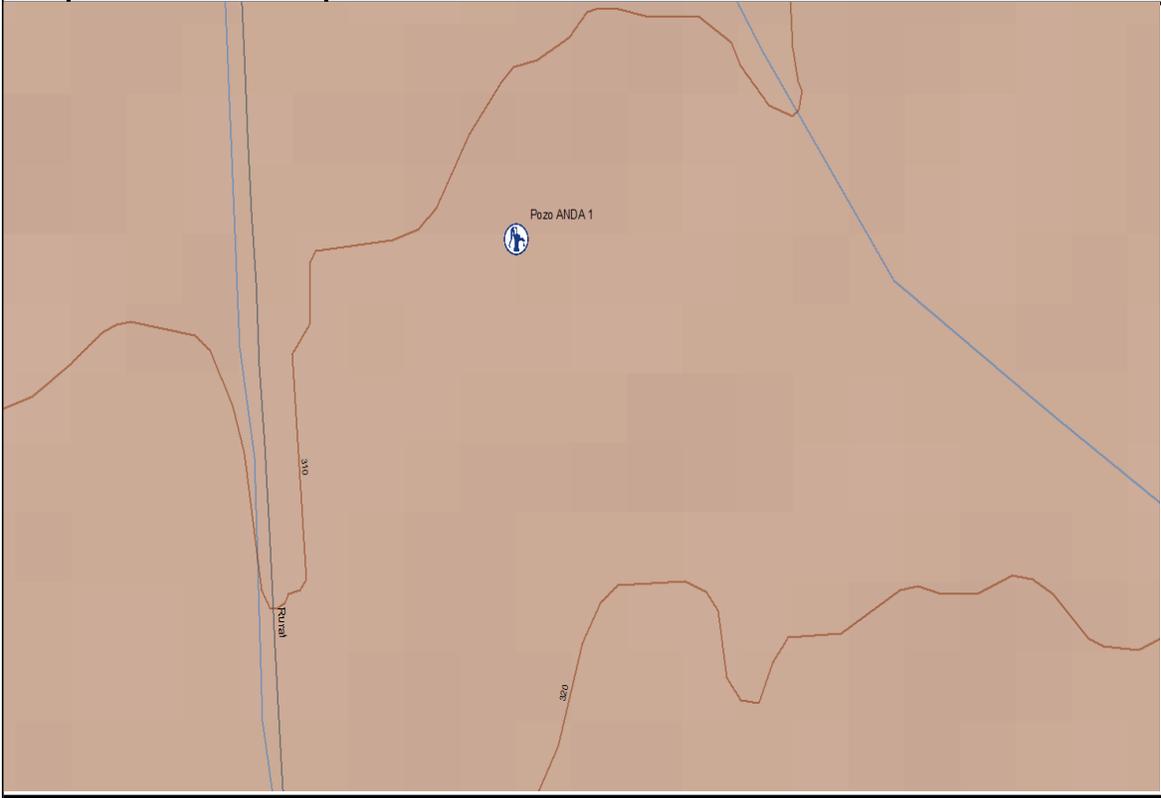
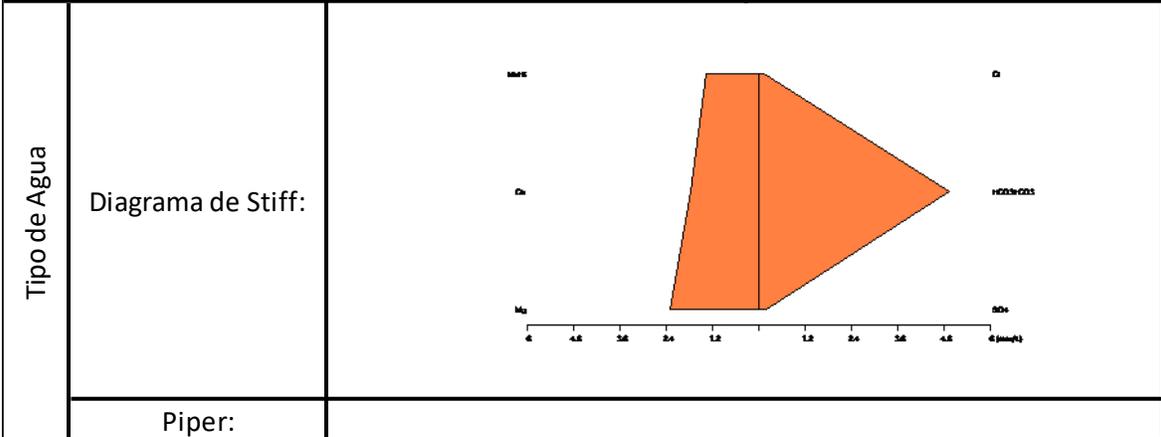
Clasificación:	1- Fuente			
	2- Pozo Perforado			
	3- Pozo excavado	X		
	4- Río			



Punto de muestreo:	Pozo ANDA 1					
Coordenadas de ubicación:	x:	552803	E	Departamento:	UE	
	y:	270512	N	Municipio:	BE	
Altura:	z:	293	m	Cantón:	BE	

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

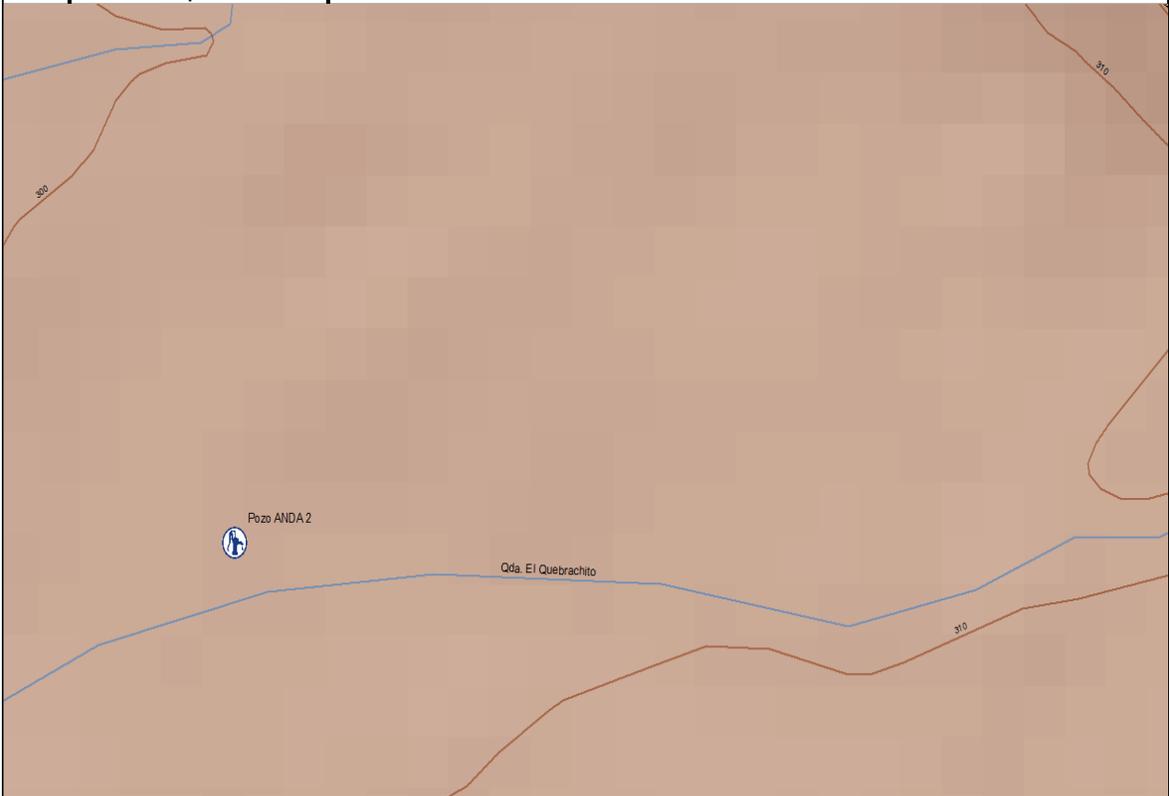
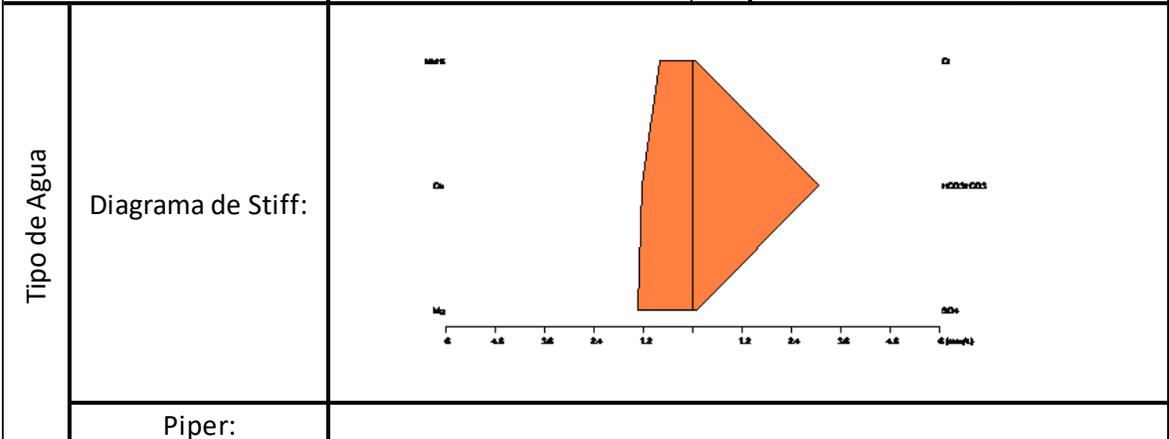
Clasificación:	1- Fuente				
	2- Pozo Perforado	X			
	3- Pozo excavado				
	4- Río				



Punto de muestreo:	Pozo ANDA 2				
Coordenadas de ubicación:	x:	553216	E	Departamento:	UE
	y:	271198	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	336	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente				
	2- Pozo Perforado	X			
	3- Pozo excavado				
	4- Río				

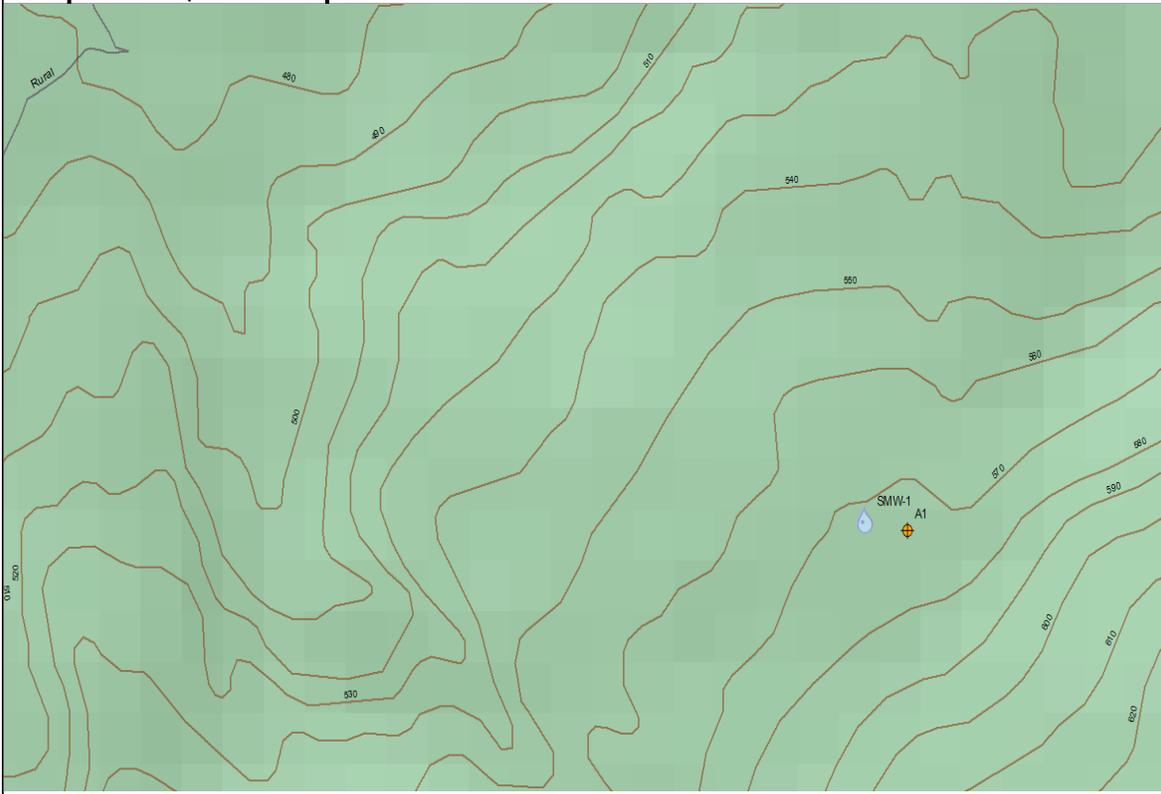


Punto de muestreo:	SMW-1					
Coordenadas de ubicación:	x:	552823	E	Departamento:	UE	
	y:	267329	N	Municipio:	BE	
Altura:	z:	213	m	Cantón:	BE	

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente				
	2- Pozo Perforado	X			
	3- Pozo excavado				
	4- Río				

Tipo de Agua	Diagrama de Stiff:	No se tiene información
	Piper:	



Punto de muestreo:	SMW-4				
Coordenadas de ubicación:	x:	552839	E	Departamento:	UE
	y:	269473	N	Municipio:	BE
Altura:	z:	309	m	Cantón:	BE

DATOS GENERALES DEL PUNTO DE MONITOREO

Clasificación:	1- Fuente				
	2- Pozo Perforado	X			
	3- Pozo excavado				
	4- Río				

Tipo de Agua	Diagrama de Stiff:	No se tiene información
	Piper:	

