

**Informe Final “Estudio  
Hidrogeológico del  
Cacahuatique Norte y Este”**

**Enero 2019**

**J. R. Duarte S. A. de C.V.**

*División Water Services*



## INDICE DE CONTENIDO

.....	
INDICE DE CONTENIDO .....	i
INDICE DE FIGURAS .....	ii
INDICE DE TABLAS .....	iii
I. INTRODUCCION .....	1
1.1 Descripción y Ubicación Geográfica de la Zona de Estudio. ....	2
1.2 Objetivo.....	4
II. METODO DE TRABAJO.....	5
2.1 Revisión y Recopilación de Información Existente.....	5
2.2 Trabajo de Campo.....	6
2.3 Análisis, Interpretación y Obtención de Resultados.....	8
III. MARCO GEOLOGICO.....	12
3.1 Geomorfología.....	12
3.1.1 Cadena Interior.....	12
3.1.2 Fosa Interior.....	12
3.1.3. Montaña Frontera.....	13
3.2 Geología Local.....	13
3.2.1. Estratigrafía.....	15
IV. CONTEXTO HIDROGEOLOGICO .....	23
4.1 Generalidades.....	23
4.2 Unidades Hidrogeológicas.....	23
4.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	25
4.4 Parámetros Hidráulicos.....	27
4.5 Inventario y Características de las Fuentes de Agua.....	27
4.6 Exploración del Agua Subterránea.....	29
4.6.1. Comportamiento y Dirección del Sistema de Flujo del Agua Subterránea de los Acuíferos Generados por Fallas Locales.....	29
4.6.2 Identificación de Fracturas y Procesamiento de Imágenes Satelitales.....	31
4.6.3 Sensores Remotos.....	32
4.6.4 Representación de la Realidad en una Imagen a partir de los Datos del Sensor Remoto. ...	35
4.6.5 Indicadores de Agua Subterránea en Imágenes Satelitales.....	36

4.6.6 Imagen Sentinel 2 Utilizada para la Identificación de Alineamientos.....	39
4.6.7 Procesamiento e Interpretación de Imágenes Satelitales. ....	42
4.6.8 Metodología para Interpretación de Alineamientos en Imágenes Satelitales. ....	44
4.6.9 Procesamiento de Datos. ....	47
V. BALANCE HIIDRICO Y CALCULO DE LA RECARGA POTENCIAL .....	53
5.1 Generalidades. ....	53
5.2 Desarrollo del Balance Hídrico. ....	54
5.3 Metodología Aplicada en el Balance Hídrico. ....	55
5.3.1. Realización de Pruebas de Infiltración. ....	64
5.4. Cálculo de la Recarga Hídrica Potencial. ....	69
5.5 Lineamientos para la Delimitación de Areas de Protección de las Fuentes de Agua. ....	78
VI. CONCLUSIONES.....	81
6.1 Conclusiones.....	81
VII. BIBLIOGRAFIA.....	85
VIII. ANEXOS .....	88
8.1 Pruebas de Infiltración .....	88
8.2 Balances Hídricos Específicos de Suelos.....	90

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Geográfica de la Zona de Estudio. ....	3
Figura 2. Mapa Geológico de la Zona de Estudio.....	14
Figura 3. Rocas Efusivas Básicas Intermedias con Intercalaciones de Piroclastitas (Miembro b2). ....	16
Figura 4. Andesitas Intercaladas con Cenizas y Lapilli (Miembro b3). ....	17
Figura 5. Tobas con Fragmentos de Lavas Dacíticas (Miembro c1). ....	19
Figura 6. Andesitas Basálticas muy Fracturada (Miembro c3).....	20
Figura 7. Depósitos Aluviales (Miembro Q´f). ....	21
Figura 8. Columna Estratigráfica de la Zona de Estudio.....	22
Figura 9. Mapa Hidrogeológico de la Zona de Estudio.....	26
Figura 10. Características de los Sistemas de Fracturas que Controlan la Ocurrencia del Agua Subterránea.....	30
Figura 11. Arreglo de Pixeles de una Imagen Ordenando en Filas y Columnas con su Respectivo Número Digital. ....	36
Figura 12. Características Superficiales que puede ser Indicadores de Agua Subterránea: Vegetación, Cambios Topográficos, Patrón de Drenaje, Tonos de Suelo y Fracturas. ....	37

Figura 13. Drenaje Estructuralmente Controlado que Sirve para Inferir la Existencia de un Alineamiento.....	38
Figura 14. Patrones de Drenaje Controlados Estructuralmente y Combinación con Vegetación. ....	39
Figura 15. Imagen Sentinel 2 Utilizada para la Identificación de Alineamientos en la Zona de Estudio. ....	41
Figura 16. Cuadro de Diálogo del Editor de Leyendas de Imagen. ....	43
Figura 17. Identificación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos a partir de Imagen Satelital Sentinel 2.....	48
Figura 18. Correlación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos con Fuentes de Agua Inventariadas.....	49
Figura 19. Correlación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos con Parámetro de Conductividad Eléctrica de Fuentes de Agua Inventariadas. ....	50
Figura 20. Correlación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos con Parámetro de Sólidos Disueltos Totales de Fuentes de Agua Inventariadas. ....	51
Figura 20. Identificación de Zonas de Influencia y Determinación de Dirección de Flujo Subterránea de las Fuentes de Agua Inventariadas.....	52
Figura 22. Ubicación de Pruebas de Infiltración según Miembro Geológico Predominante.....	61
Figura 23. Determinación de la Profundidad del Agujero.....	64
Figura 24. Dispositivos que se Utilizaron para la Medición del Nivel del Agua en las Pruebas de Infiltración. ....	65
Figura 25. Colocación de los Dispositivos que se Utilizaron para la Medición del Nivel del Agua en las Pruebas de Infiltración. ....	66
Figura 26. Gráfica de la Presión (cm H <sub>2</sub> O) vrs Tiempo Acumulado. ....	67
Figura 27. Gráfica de la Columna de Agua Arriba del Diver (cm H <sub>2</sub> O) vrs Tiempo Acumulado.....	67
Figura 28. Determinación del Factor de Infiltración Básica. ....	68
Figura 29. Mapa de Recarga Hídrica Potencial de la Zona de Estudio. ....	70
Figura 30. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Chilanga.....	71
Figura 31. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Yoloaiquín.....	72
Figura 32. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Delicias de Concepción.....	73
Figura 33. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Osicala. ....	74
Figura 34. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Gualococti. ....	75
Figura 35. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de San Simón.....	76
Figura 36. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Ciudad Barrios. ....	77

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de Fuentes de Agua en la Zona de Estudio. ....	28
Tabla 2. Características de las Bandas de la Imagen Sentinel 2. ....	40
Tabla 3. Determinación de K <sub>p</sub> según el Rango de la Pendiente. ....	59
Tabla 4. Índice K <sub>v</sub> Asociado a Usos de Suelo. ....	60
Tabla 5. Datos de Precipitación de la Estación Climatológica San Francisco Gotera (Z 02).....	62

Tabla 6. Datos de Evapotranspiración Potencial de las Estaciones Climatológicas San Francisco Gotera (Z 02). ..... 63

Tabla 7. Datos Característico de Recarga Hídrica Potencial en las Zonas Identificadas. .... 69



## I. INTRODUCCION

El presente estudio de la zona del Cacahuatique Norte y Este, Departamento de Morazán, pretende dar a conocer los aspectos más importantes referentes al reconocimiento hidrogeológico, donde se incluye la descripción de las distintas unidades hidrogeológicas identificadas y su correspondiente interrelación con las formaciones geológicas presentes, además de la descripción del sistema de drenaje natural existente que condiciona a la generación de la escorrentía superficial; para lo cual se detallan los siguientes aspectos: descripción física del área de estudio, marco geológico, contexto hidrogeológico, incluyendo el comportamiento de los flujos subterráneos en medios fracturados y porosos, el sistema hidrológico, en el que se describe y se detalla el análisis de las variables climatológicas, que luego sirve de base para el cálculo del balance hídrico, y finalmente la determinación y cuantificación de la recarga hídrica.

En este informe también se incorporan los criterios técnicos y analíticos determinados durante las visitas de campo realizadas a la zona de estudio, que sirvieron de base para la descripción de las condiciones geológicas, hidrogeológicas e hidrológicas, las cuales han sido correlacionadas con la información existente: geología, topografía, climatología, hidrogeología, hidrología, etc. Este estudio y análisis hidrogeológico pretende establecer los principales elementos para el conocimiento y comportamiento de los flujos subterráneos y su interrelación con los flujos subsuperficiales de la zona de estudio, y la determinación de las zonas de recarga de los principales manantiales ubicados en la zona de estudio.

El presente documento está estructurado de manera que en la primera parte se introduzca a la descripción de la zona de estudio, la cual contempla el establecimiento de su ubicación geográfica y algunas características físicas del lugar; posteriormente, se presentan los objetivos de la investigación, conjuntamente con la metodología empleada; luego se hace la descripción geológica, seguida de la interpretación hidrogeológica en la que se detallan y describen las unidades almacenadoras de agua, los tipos de flujo existentes y su interrelación

con las formaciones geológicas presentes, especialmente haciendo una explicación del comportamiento de los flujos subterráneos en medios fracturados y porosos; luego se analizan las características del sistema hidrológico superficial, además de exponer la caracterización de las aguas subterráneas; y finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones establecidas para el presente informe.

### **1.1 Descripción y Ubicación Geográfica de la Zona de Estudio.**

El área de estudio, establecida para los municipios de Chilanga, Yoloaiquin, Delicias de Concepción, Oscicala, Gualococti, San Simón y Ciudad Barrios Departamento de Morazán, tiene una extensión de 313.02 km<sup>2</sup>.

El área de estudio establecida se encuentra delimitada por los siguientes aspectos: el límite norte está definido por la Subcuenca del Río Corola, el límite oeste y sur por la Subcuenca del Río Grande de San Miguel y el límite oeste por la Subcuenca del Río Goascorán.

Las condiciones topográficas prevalecientes en la zona corresponden a la de una sabana tropical caliente, que se extiende desde la parte media a alta de las Sierras del Norte, forjando un drenaje natural, con cauces profundos que generan caudales de moderados a altos. Se puede apreciar el afloramiento de manantiales cercanos a la zona de estudio, de pequeños a moderados caudales, aflorando principalmente a través de fracturas en los cauces de los principales ríos.

En lo que respecta a la climatología, el área de estudio se identifica como Sabana Tropical Caliente, según la clasificación de Kopper, presentando las siguientes características: precipitación pluvial promedio de 1,880 mm y teniendo una temperatura promedio que varía de 27.5 a 30.9 °C, datos que son característicos por las condiciones topográficas que presenta la zona, cuya elevación varía de los 247 msnm en las zonas bajas y 1,000 msnm en las zonas altas.

MAPA TOPOGRÁFICO  
PROYECTO EL CACAHUATIQUE

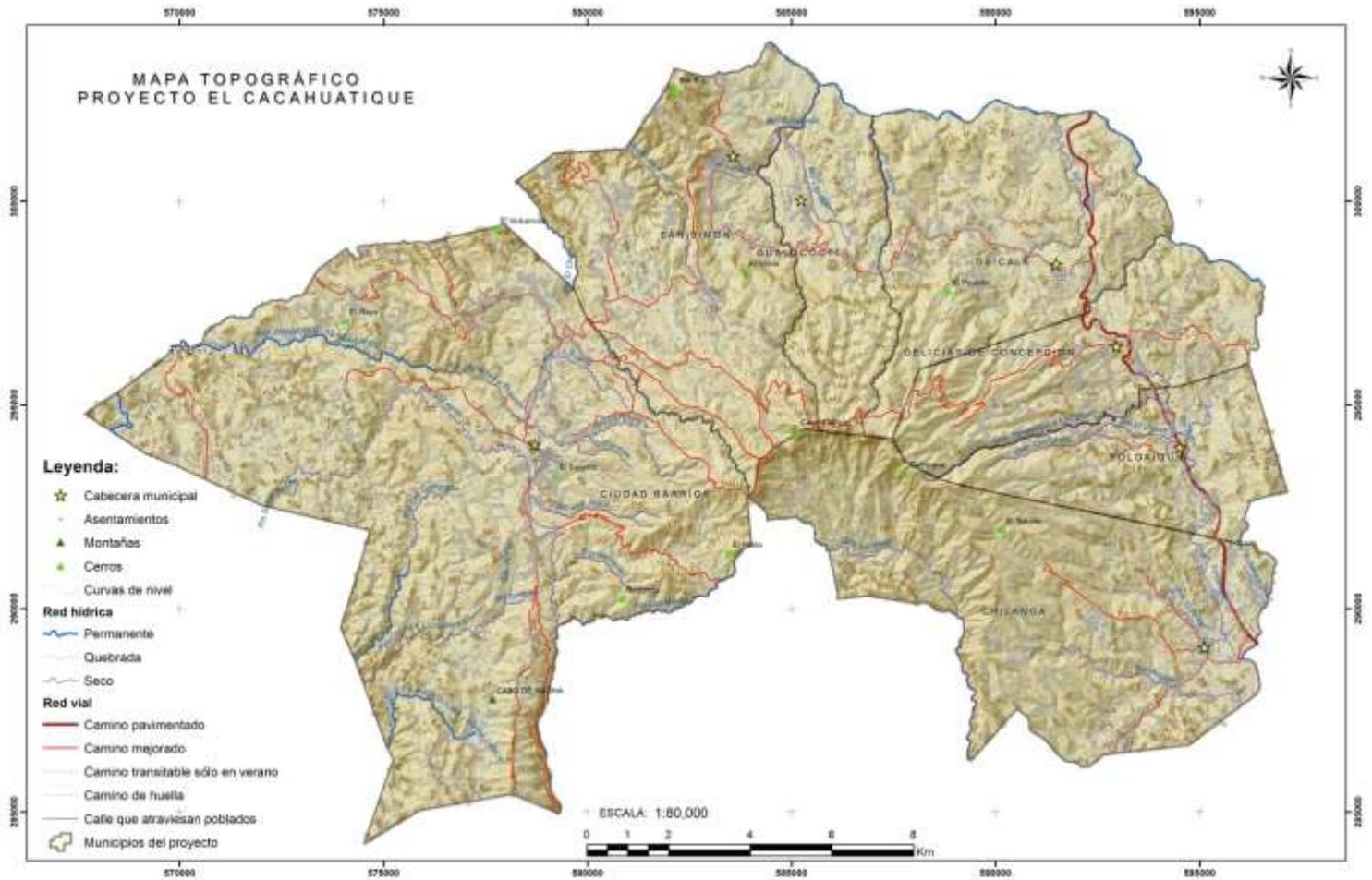


Figura 1. Ubicación Geográfica de la Zona de Estudio.

## 1.2 Objetivo.

El objetivo principal es el conocer el comportamiento del agua subterránea y sub-superficial en el Cerro Cacahuatique (Morazán), específicamente en los municipios de Chilanga, Yoloaiquin, Delicias de Concepción, Oscicala, Gualococti, San Simón y Ciudad Barrios.; así como también la determinación si los principales manantiales y ríos tienen una recarga hídrica subterránea o bien subsuperfial, y la determinación de las zonas de recarga de estos manantiales principales y ríos.

## II. METODO DE TRABAJO.

Para el desarrollo del presente informe se planteó el siguiente método de trabajo, el cual consistió en tres fases fundamentales que se detallan a continuación.

### 2.1 Revisión y Recopilación de Información Existente.

Esta actividad conlleva la recopilación, selección y análisis de la información existente, la cual puede dividirse en diferentes categorías indispensables: geología, topografía, climatología, hidrogeología, hidrología, etc.

La recopilación de la información por las diferentes categorías se detalla a continuación:

#### a) Geología y Topografía.

La información geológica consistió, básicamente, en la recopilación de mapas geológicos de la zona de estudio, a escala 1:100,000, y complementados con la información topográfica mediante la utilización de los cuadrantes cartográficos recientes a escala 1:25,000 y 1:50,000, proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional “Ing. Pablo Arnoldo Guzmán” del Centro Nacional de Registros CNR.

El objetivo fundamental de esta categoría es conocer y delimitar la geología regional de la zona de estudio, además de correlacionarla con los perfiles geológico-litológicos de los pozos identificados, los cuales en su mayoría son de penetración parcial, y no alcanzan los estratos más profundos ni el basamento.

#### b) Meteorología.

Se recopilaron datos pluviométricos y climatológicos de las estaciones circundantes a la zona de estudio. Los datos comprendieron las principales variables climatológicas como: precipitación y evapotranspiración potencial, etc. Con este tipo de información se pretende

determinar los principales componentes para la determinación del balance hídrico específico y la obtención de la recarga hídrica potencial.

c) Hidrogeología.

La información hidrogeológica consistió en la actualización del inventario de fuentes de agua (manantiales y pozos) que existen en la zona de estudio; además de la recopilación de informes técnicos de manera de contar con los datos básicos para la realización de la caracterización hidrogeológica. Además, de tomar cuenta los criterios técnicos con los que se realizó el Mapa Hidrogeológico de El Salvador (Escala 1:100,000) desarrollado por el Proyecto FIAS<sup>1</sup>-ANDA-COSUDE<sup>2</sup> (2008) y la simbología internacional hidrogeológica (IAH<sup>3</sup>, 1995).

d) Hidrología.

Este tipo de categoría de información consistió en la obtención de datos que determinen el comportamiento del sistema de drenaje superficial (escurrimiento) y su interacción con el medio físico, además de la relación existente con los flujos subterráneos presentes en la zona de estudio. Además de incluir la información existente sobre la red hídrica nacional: subcuencas, ríos, quebradas, manantiales, etc.

## 2.2 Trabajo de Campo.

El trabajo de campo comprendió las actividades que se realizaron in-situ y los análisis necesarios para caracterizar y conocer el comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio. Los datos hidrogeológicos obtenidos tienen como objetivo primordial dar a conocer los principales parámetros hidráulicos del sistema de acuíferos identificados, así como la determinación del movimiento y dirección del agua subterránea con respecto al agua superficial.

a) Inventario de Fuentes de Agua.

---

<sup>1</sup> FIAS: Fortalecimiento Institucional de ANDA para la Investigación de las Aguas Subterráneas.

<sup>2</sup> COSUDE: Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.

<sup>3</sup> IAH: Asociación Internacional de Hidrogeólogos.

Este aspecto consistió en la actualización del inventario de fuentes de agua, que se localizan en la zona de estudio. La información que se obtuviera servirá para la determinación del potencial hidrogeológico de la zona de estudio.

b) Pruebas de infiltración.

La infiltración es el proceso durante el cual el agua de la superficie se mueve hacia el subsuelo. La velocidad de la infiltración depende del tipo, textura y del contenido de humedad del suelo. Por ejemplo, si el suelo se encuentra en condiciones secas antes de una precipitación, la velocidad de la infiltración será mucho mayor que la obtenida en condiciones saturadas. A medida que el suelo se satura más y más, la velocidad de infiltración disminuye hasta alcanzar un punto de equilibrio, cuyo valor se denomina Capacidad de Infiltración Saturada o Infiltración Básica, la cual es similar a la conductividad hidráulica (K).

Las pruebas de infiltración se realizaron por el método de Porchet y correspondieron a los diferentes tipos de suelos identificados (según material geológico) en la zona de estudio, el cual fue el principal criterio para la designar las áreas de investigación. Se realizarán un total de 12 pruebas de infiltración. Además se utilizó información existente de pruebas realizadas en tipos de suelo (material geológico) similares y de referencia realizadas a lo largo del país, las cuales ayudarán a obtener una mayor distribución del análisis de las capacidades de infiltración planteadas.

c) Aforos de Fuentes de Agua.

En la medida que la presente estacionalidad y que las condiciones técnicas lo permitan, se realizaron aforos de las principales fuentes de agua inventariadas (de aquellas que no cuenten con aforo realizado según el inventario proporcionado por CRS/ACUGOLFO), de manera de establecer su caudal de producción. Esta información sirvió para determinar el potencial hídrico de la zona analizada.

d) Realización del Balance Hídrico Específico de Suelos

Con la información obtenida de las pruebas de infiltración y de la determinación de las condiciones geológicas, se realizaron los balances hídricos específicos de suelos por cada miembro geológico identificado, mediante la utilización del Método de Schosinsky-Losilla (2000), el cual determina el valor de recarga hídrica potencial anual de la zona delimitada.

### **2.3 Análisis, Interpretación y Obtención de Resultados.**

Esta fase consistió en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos tanto en la etapa de la recopilación de la información existente como de la que se determinó en la etapa del trabajo de campo, de manera que pueda establecerse el modelo conceptual hidrogeológico que indicó el comportamiento y dirección tanto del sistema de flujo subterráneo como superficial de la zona, además de realizar el correspondiente análisis de la recarga hídrica potencial de la zona.

En lo que respecta a la elaboración del mapa hidrogeológico y el de recarga hídrica potencial, se realizaron las siguientes actividades:

a) **Elaboración del Mapa Hidrogeológico.**

Esta actividad consistió en el desarrollo del formato digital de los datos obtenidos tanto de la recopilación de información existente como de la obtenida en campo, referente a los comportamientos de los sistemas de flujo subterráneo en cada una de las zonas de estudio.

El software que se utilizó para la elaboración del mapa fue el ArcGIS 10.3, el cual es una plataforma estándar de un sistema de información geográfico, muy útil para el trabajo de coberturas georeferenciadas y tablas de información relacionadas.

La simbología que se utilizó fue la establecida por la Leyenda Internacional para la Elaboración de Mapas Hidrogeológicos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) Edición 1995, y el sistema de proyección de los mapas fue el

Sistema de Proyección Cónica Conformal de Lambert, Datum Nad27, Elipsoide de Clarke 1866. Ambas particularidades son las que se utilizaron para el desarrollo del Mapa Hidrogeológico de El Salvador, Escala 1:100,000 como parte del Proyecto FIAS-ANDA-COSUDE, 2008.

Para la elaboración del Mapa Hidrogeológico de la zona de estudio, se realizaron los siguientes procesos:

- Recopilación de las capas digitales de información existente, tales como: geología, cuencas hidrográficas, topografía, red hídrica, etc.
- Edición de las capas de información recopiladas y adecuación del área de estudio.
- Analizar y editar tanto la información existente como la obtenida en campo, relacionada a los recursos hídricos de la zona de estudio establecida, para su respectiva incorporación en el Mapa Hidrogeológico.
- Integración de la información en la plataforma de un sistema de información geográfico de manera sistemática, ordenada y de fácil interpretación.
- Presentación digital e impresa del mapa hidrogeológico resultante.

Las capas de información que comprende el Mapa Hidrogeológico de la zona de estudio, se enumeran a continuación:

- Topografía (Curvas de nivel): organización de la información existente, agrupación y delimitación de zona de estudio.
- Geología (Formaciones Geológicas): identificación de las principales formaciones geológicas presentes en la zona de estudio, así como los sistemas de fallamiento.
- Unidades Hidrogeológicas: Con base a los criterios técnicos establecidos (características geológicas e hidráulicas) definición de las unidades hidrogeológicas correspondientes.

- Cuerpos de Agua (lagos, lagunas, etc.) Establecida como información complementaria para el mapa hidrogeológico.
- Delimitación de subcuencas hidrográficas.
- Límites de acuífero: la delimitación se hará conforme a la definición de las unidades hidrogeológicas identificadas, topografía, puntos de agua identificados, análisis de la información litológica de pozos localizados en la región.
- Piezometría: a partir de la toma de los niveles del agua subterránea se construye la superficie piezométrica de los acuíferos identificados.
- Líneas de flujo subterráneo: determinación del comportamiento y dirección de flujo subterráneo.
- Red Hidrológica (Ríos y quebradas).
- Manantiales: ubicación y localización de dichos afloramientos.
- Pozos: creación de base de datos de pozos (perforados y artesanales) con su información respectiva.
- Fallas geológicas locales: las cuales provienen del procesamiento de las imágenes satelitales de la zona de estudio.
- Zonas de Recarga de Acuíferos generados por fallas geológicas locales.
- Zonas de recarga de los acuíferos localizados en valles o planicies.

#### b) Elaboración del Mapa de Recarga Hídrica Potencial

Esta actividad consistió en el desarrollo del mapa de recarga hídrica potencial, con la base de la información suministrada en la realización del respectivo balance hídrico. En dicho mapa se muestran cada una de las áreas que abarca a la zona de estudio, con su respectivo índice de recarga potencial. De igual manera se desarrollarán los mapas correspondientes de recarga hídrica de los manantiales inventariados.

- c) Relacionar las áreas de recarga de los acuíferos (áreas de infiltración) con las estructuras geológicas existentes y las fuentes de agua identificadas.

Para el desarrollo de esta actividad se presentan las áreas de recarga de los principales acuíferos identificados en la zona de estudio, siempre y cuando existió la información pertinente a las fuentes de agua identificadas. Se aplicó la metodología de Sensores Remotos para la identificación de fallamientos o estructuras geológicas y su posterior correlación con las fuentes de agua. Además se realizó la utilización y procesamiento de imágenes de satélite (Sentinel 2) de la zona de estudio. El objetivo de relacionar las áreas de recarga acuífera con las estructuras geológicas existentes y las fuentes de agua identificadas, es para presentar en una primera instancia las zonas estratégicas para ser intervenidas con alguna obra de conservación y protección para garantizar los flujos de agua tanto en cantidad como en calidad.

### **III. MARCO GEOLOGICO**

En esta parte del estudio se pretende establecer la descripción correspondiente a las distintas formaciones geológicas que comprende la zona de estudio, haciendo referencia a la geomorfología y su respectiva geología local, la cual sirve para el establecimiento de su interrelación con las unidades hidrogeológicas que se identifican y que se expondrán en el apartado IV.

#### **3.1 Geomorfología.**

Desde el punto de vista geomorfológico la zona de estudio ha estado determinada por una serie de eventos o fenómenos naturales como procesos tectónicos, fenómenos volcánicos y procesos erosivos fluviales, los cuales han influido en la disposición de los distintos estratos geológicos. Los dos primeros fenómenos han sucedido de forma alternada o simultánea, mientras que el último se ha dado en largos períodos de calma sobreviniendo a los dos primeros.

Las unidades geomorfológicas identificadas se detallan a continuación:

##### **3.1.1 Cadena Interior.**

Se establece una división estrecha e irregular que separa la fosa central de la fosa interior. La elevación sobre el nivel del mar de la cadena interior, es menos pronunciada que la de la cadena costera. Su altura asciende a 700 msnm, existiendo alturas que superan 1,000 msnm, en algunas zonas. Es importante hacer notar que tanto la cadena interior como la costera están formadas por encorvamientos; el buzamiento principal de sus ejes y estratos es hacia el norte. Petrográficamente está formada por conglomerados pliocénicos, existiendo sobre éstos sedimentos volcánicos de carácter dacítico.

##### **3.1.2 Fosa Interior.**

Vista morfológicamente es una llanura cuya altura asciende entre los 250 y 550 msnm, aproximadamente. Cubre parte del área de los municipios de San Francisco Gotera y

Chilanga. Petrográficamente, el basamento está formado por aglomerados pliocénicos, miocénicos y oligocénicos con sedimentos de carácter dacíticos.

### **3.1.3. Montaña Frontera.**

La unidad geomorfológica está compuesta por un grupo diverso de rocas volcánicas y sedimentarias que subyacen en grandes áreas de la cordillera septentrional. Estas rocas, consideradas del terciario medio, subyacen a rocas del terciario reciente.

## **3.2 Geología Local.**

La geología local del área está conformada por una secuencia de materiales de origen terciario y cuaternario, comprendidas entre las Formaciones Geológicas Morazán, Chalatenango, Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (Figura 2).

Los materiales más antiguos que se encuentran en la zona de estudio consisten en una gruesa secuencia de capas consolidadas que han formado el basamento o Roca Madre, constituido principalmente por aglomerados con intercalaciones de flujos de lava, tobas líticas y aglomeráticas, provenientes de erupciones volcánicas.

Las rocas del terciario medio incluyen lavas extrusivas meteorizadas de andesita y basalto asociadas con fonalita, tracita, dacita y riolita. Estas rocas se encuentran intercaladas con rocas volcánicas piroclásticas y sedimentos dentríticos, que incluyen areniscas, conglomerados, y localmente materiales diatomáceos y arcillas.

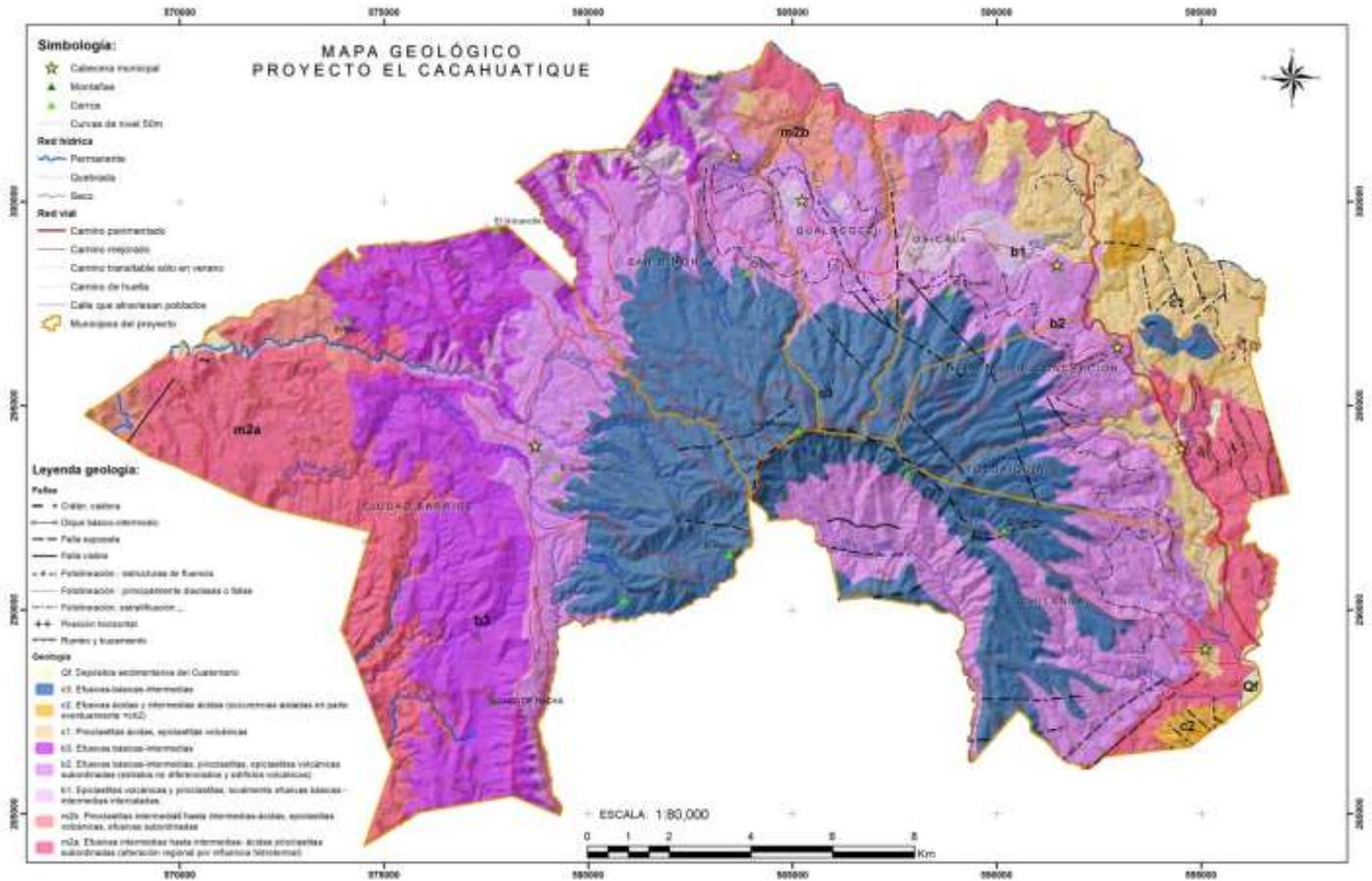


Figura 2. Mapa Geológico de la Zona de Estudio.

### **3.2.1. Estratigrafía.**

Específicamente, para la zona de estudio se establece que las características regionales muestran materiales volcánicos relacionados con las formaciones Morazán (Eoceno) hacia el norte y sur, Chalatenango (Oligoceno – Mioceno) hacia el este, Bálsamo (Plioceno) hacia el noroeste, Cuscatlán (Plioceno Superior a Pleistoceno Medio) hacia el norte y sur, y San Salvador (Holoceno) hacia el suroeste. En la Figura 8, se presenta la columna estratigráfica de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio.

La secuencia y descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente, se presenta a continuación:

- a) Formación Morazán.
- b) Formación Bálsamo.
- c) Formación Cuscatlán.
- d) Formación San Salvador.

#### **a) Formación Morazán.**

El término Formación Morazán fue introducido por Wiesemann en 1975, quien a su vez la dividió en cuatro miembros, de los cuales uno afloran en la parte norte, central y sur de la zona estudio. Los materiales agrupados en esta formación pertenecen al período Oligoceno y Eoceno, cuyos afloramientos de esta formación están en el norte y sur, encontrándose ajustados a líneas estructurales de rumbo noroeste-sureste. El miembro principal identificado en la zona de estudio es: m2'a.

#### **Miembro m2'a.**

Está constituida por rocas efusivas intermedias hasta intermedias-ácidas y piroclastitas subordinadas, en parte silicificadas, con metamorfismo de contacto o con alteración hidrotermal. En la zona afloran andesitas de augita profundamente meteorizadas, aglomerados, tobas brechosas, plegadas y ligeramente inclinadas por fallamiento normal.

También, aflora en forma de coladas de lavas, las cuales han asimilado fragmentos de roca dando la apariencia de conglomerados volcánicos. Su espesor aproximado es de 150 a 300 m.

### **b) Formación Bálsamo**

Esta formación está comprendida entre los periodos Mioceno-plioceno, los afloramientos en la zona de estudio. Los miembros geológicos identificados en el área de estudio son b2, y b3, que se presentan a continuación:

#### **Miembro b2**

Esta unidad se define como una secuencia de rocas volcánicas de tipo efusivas básicas-intermedias, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas, con alteración hidrotermal y limos rojos (Figura 3). En la zona del Volcán Cacahuatique se reportan en forma de tobas brechosas basálticas, estratificadas, de 200 m de espesor aproximadamente con lavas y tobas intercaladas.



**Figura 3. Rocas Efusivas Básicas Intermedias con Intercalaciones de Piroclastitas (Miembro b2).**

### Miembro b3

Este miembro es el superior de la Formación Bálsamo y está constituido por rocas efusivas básicas-intermedias, localmente con alteración hidrotermal, silificación y limos rojos. Se presenta además como domos de andesita hipersténica-augítica, porfidítica intercalado con cenizas y lapilli de tipo basalto de olivino y augita, con un espesor aproximado de 150 m (Figura 4).



Figura 4. Andesitas Intercaladas con Cenizas y Lapilli (Miembro b3).

### **c) Formación Cuscatlán.**

Esta formación es de edad plio-pleistoceno y se define como una secuencia Volcano-sedimentaria. La sección volcánica está constituida por tobas ácidas en la base, seguido por lavas ácidas intermedias y andesitas-basaltos en la parte superior. La secuencia sedimentaria está limitada a cuencas intermontanas, las cuales incluyen horizontes de diatomita, epiclastitas y areniscas, intercaladas localmente por capas carbonosas, tobas y una localidad con calizas de agua dulce en las cercanías del Valle del Río Torola. Los miembros presentes en la zona de estudio son los siguientes: c1, c2 y c3.

#### **Miembro c1.**

Este miembro está constituido tanto de unidades sedimentarias como de volcánicas. Las unidades sedimentarias identificadas en la zona de estudio, se ubican en cuencas intermontanas en las cercanías de la Subcuenca del Río Torola y las unidades volcánicas están conformadas por tobas que pueden observarse a lo largo y ancho de la Subcuenca del Río San Francisco (Figura 5). Estos depósitos son el resultado de eventos denominados como nubes ardientes, y dicha unidad se caracteriza por la abundancia de bombas de pómez, lapilli de pómez, pisolitas, fragmentos angulares de lavas dacíticas vítreas y andesitas.



**Figura 5. Tobas con Fragmentos de Lavas Dacíticas (Miembro c1).**

### **Miembro c2.**

Los materiales constituyentes de este miembro son rocas efusivas del tipo ácido y ácido intermedio, de ocurrencia aislada. Al sur se reconocen la formación de dacitas perlíticas, vítreas, ricas en biotita, de tono rosa y guis.

### **Miembro c3.**

Se define como una unidad constituida por rocas volcánicas de tipo andesítica y basáltica. Las coladas de lavas constituyen la parte principal de esta unidad, siendo su afloramiento más importante, dentro de la zona de estudio, el área del Volcán Cacahuatique, el cual está constituido por andesitas (Figura 6). Además se interrelacionan con coladas de basalto de 250 m de espesor aproximadamente, de aspecto sano, denso, de textura porfírica y con presencia de fenocristales.



**Figura 6. Andesitas Basálticas muy Fracturada (Miembro c3).**

#### **d) Formación San Salvador.**

Los materiales de esta formación comprenden depósitos cuaternarios y productos efusivos de los volcanes de la zona. Estos materiales corresponden del período Pleistoceno al Holoceno. Se identifica el miembro geológico “Q’f”, el cual consiste en sedimentos aluviales con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos, es decir, arenas, gravas y limos, los cuales han sido transportados por corrientes de agua desde la parte alta de la cadena volcánica.

#### **Miembro Q’f.**

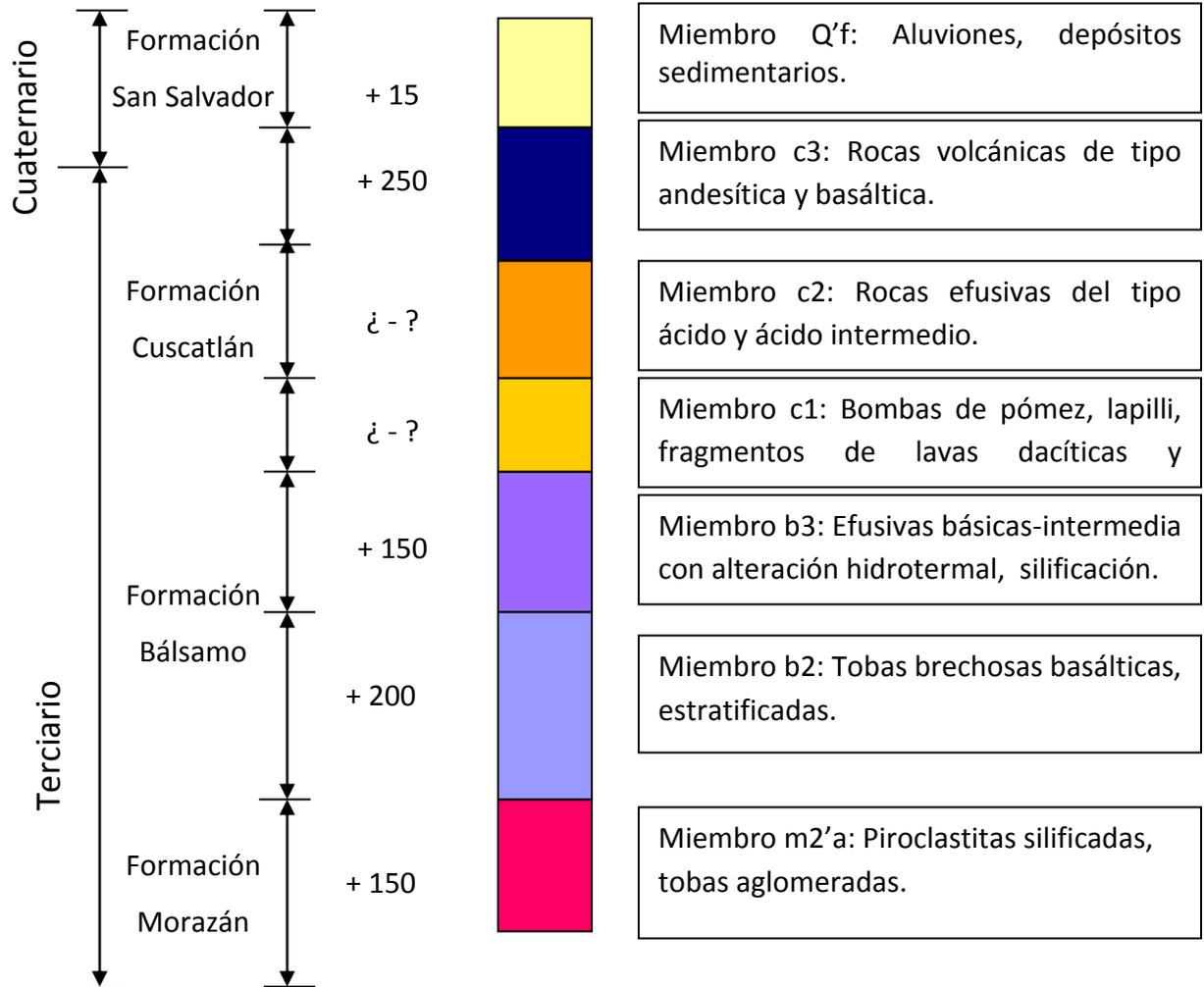
Son el producto de la acumulación de materiales volcánicos y sedimentarios, producto de la erosión, transporte y depositación de material arrastrado por los ríos (principalmente aluviales) circundantes en la zona de estudio. Dichos depósitos aluviales y coluviales alcanzan espesores más bien reducidos, cercanos a la decena de metros, y se considera que se han desarrollado principalmente durante el período Holoceno (Figura 6).



**Figura 7. Depósitos Aluviales (Miembro Q´f).**

**ESPESOR (m)**

**LITOLOGIA**



\* Fuente: Léxico Estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984), Columnas Litológicas de Pozos de la Zona de Estudio (ANDA).

**Figura 8. Columna Estratigráfica de la Zona de Estudio.**

## **IV. CONTEXTO HIDROGEOLOGICO**

En esta sección se contempla la descripción del contexto hidrogeológico de la zona de estudio, además de identificar y describir las unidades hidrogeológicas presentes y establecer su correlación respectiva con las formaciones geológicas. Todo esto con el propósito de establecer el modelo conceptual del sistema de flujo subterráneo de la zona.

### **4.1 Generalidades.**

En el caso particular de la zona de estudio, las características hidrogeológicas están determinadas, en gran medida, por los fenómenos tectónico-volcánicos y los procesos erosivos que han afectado a la zona. Principalmente la zona se ve condicionada por la ocurrencia de los flujos subterráneos mediante el almacenamiento en materiales volcánicos fisurados, circundados por estratos impermeables con cierto grado de fracturamiento que tienen una orientación NO-SE, NE-SO y O-E, lo cual establece el agua subterránea tenga su ocurrencia a través el afloramiento de manantiales.

### **4.2 Unidades Hidrogeológicas.**

La diferenciación de las unidades hidrogeológicas presentes en la zona estará influenciada por las características hidráulicas (conductividad hidráulica) de los diferentes materiales que constituyen cada una de las formaciones geológicas identificadas.

Entre las principales unidades hidrogeológicas identificadas en la zona de estudio, se establecen a las siguientes: a) Unidad Acuífero Volcánico Figurado de Extensión Limitada y Mediana Producción, b) Unidad Acuíferos Locales Generados por Sistemas de Fallas, c) Unidad Acuíferos Locales de Extensión Limitada y de Productividad Mediana a Baja, y d) Unidad Rocas No Acuíferas. Dichas unidades hidrogeológicas están definidas con base a la nomenclatura estandarizada de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH), Edición 1995.

**a) Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Extensión Limitada y Mediana Producción.**

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica de la zona, principalmente del Volcán Cacahuatique. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a bajas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente). El acuífero de esta unidad se considera del tipo libre dado que no se aprecia ningún tipo de material de características impermeables que lo sobreyace.

**b) Unidad Acuíferos Locales Generados por Sistemas de Fallas.**

Los materiales de esta unidad consisten en rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, distinguiéndose flujos y coladas de lavas que provienen de procesos tectónico-volcánicos originados en la zona. Las conductividades hidráulicas de los materiales de esta unidad pueden ser de medias a bajas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fracturamiento existente), formando pequeños acuíferos locales. La manifestación de esta unidad se da por el afloramiento de manantiales que posteriormente contribuyen a la generación del caudal base de los sistemas de escorrentía superficial de la zona.

**c) Unidad Acuíferos Locales de Extensión Limitada y de Productividad Mediana a Baja.**

Esta unidad está constituida, básicamente, por sedimentos aluviales (arenas, gravas, etc.) que han sido transportados por los ríos, 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 10 m.

#### **d) 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 conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de compactación y cementación. Se considera que constituyen el basamento de los acuíferos identificados en la zona de estudio. La profundidad a la que se encuentra esta unidad puede superar los 250 m.

### **4.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual.**

En la zona de estudio puede identificarse dos sistemas de flujo predominantes, el primero de ellos, del tipo volcánico fisurado constituido principalmente por flujos de lavas andesíticas y basálticas, localizado en la parte alta y en las faldas del sector norte del Cerro Cacahuatique; y el segundo consistente en pequeños acuíferos generados por el sistema de fallas localizados en la zona de estudio (Figura 9).

El modelo hidrogeológico conceptual para el primer sistema, consiste en un acuífero volcánico fisurado de extensión limitada y mediana producción constituido por flujos de lavas andesíticas y basálticas, localizado en la parte alta y en las faldas del Cerro Cacahuatique. Dicho sistema puede generar caudales de explotación que no superan los 10 l/s.

De igual manera, en la zona de estudio, se encuentran pequeños acuíferos locales que se han generado por el fallamiento existente sobre la Unidad No Acuífera. Estos acuíferos se identifican por el afloramiento de manantiales que generan caudales de moderados a bajos, en un rango que varía de 1 a 5 l/s. Es de tomar en cuenta que el flujo de agua en medios permeables por fisuración, no implica necesariamente la ausencia de porosidad, sino que se puede dar una combinación entre las fracturas y los poros presentes en la roca, y en donde cada propiedad puede actuar de manera independiente o complementaria una de la otra.

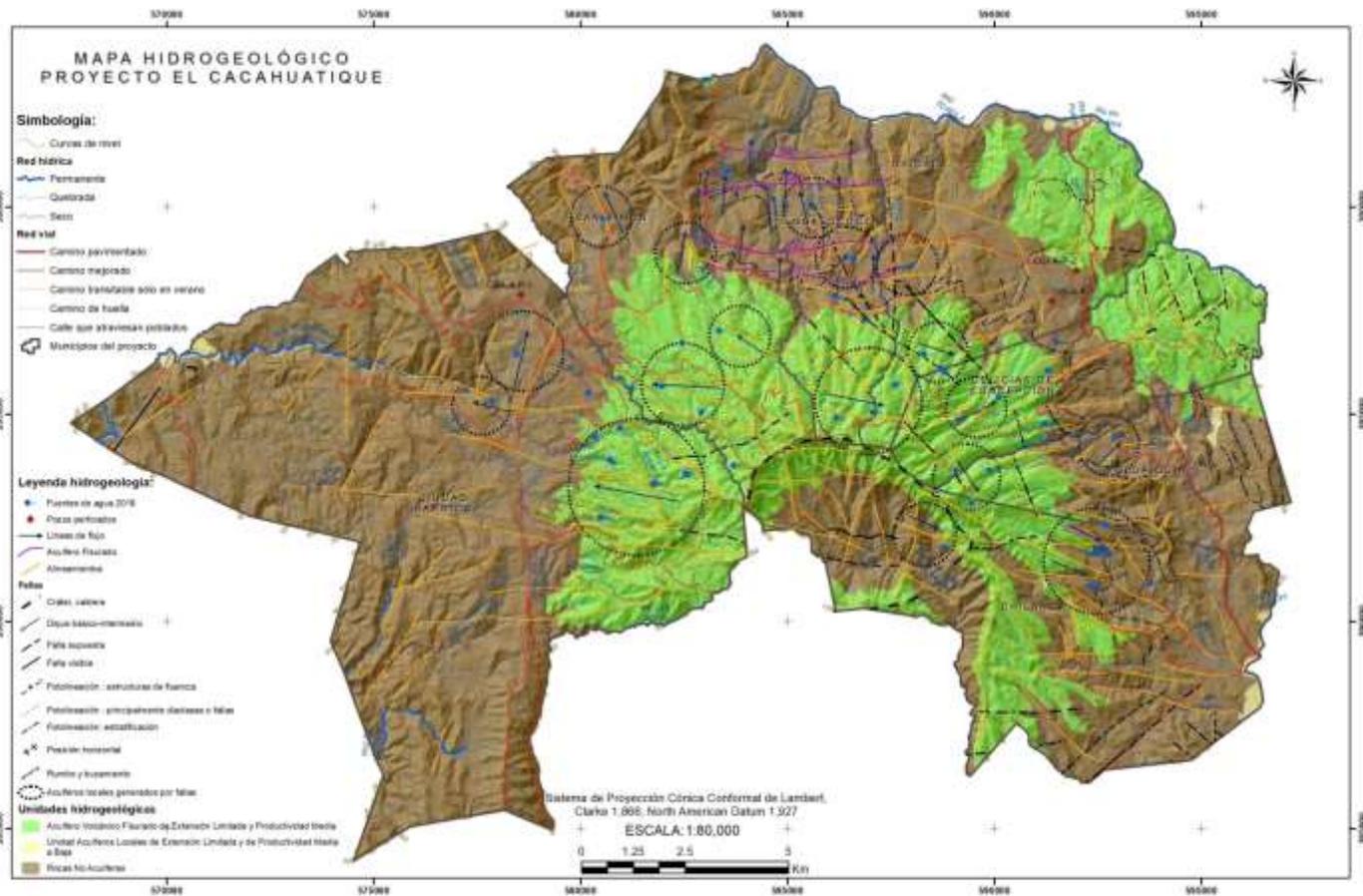


Figura 9. Mapa Hidrogeológico de la Zona de Estudio.

#### **4.4 Parámetros Hidráulicos.**

El objetivo principal de establecer los parámetros hidráulicos es definir, y en algunos casos predecir, el funcionamiento y la respuesta del o los acuíferos ante determinadas acciones externas, como por ejemplo las extracciones de agua por bombeo.

Para el acuífero volcánico fisurado, dada la composición de sus materiales se puede establecer que la transmisividad varía entre los valores de 100 a 250 m<sup>2</sup>/día, con un espesor saturado que puede variar entre 20 - 40 m, y con un coeficiente de almacenamiento de 0.01, por lo que también puede considerarse como libre o freático.

Para el caso de los Acuíferos Locales generados por el Sistema de Fallas, no han sido determinados sus parámetros hidráulicos, ya que en la zona donde se localizan solamente existen afloramientos de manantiales, pero por el rango de caudal que presentan, puede establecerse que la transmisividad oscilará entre 20 a 50 m<sup>2</sup>/día.

#### **4.5 Inventario y Características de las Fuentes de Agua.**

En la Tabla 1 se presenta el inventario de manantiales obtenido a partir de las visitas de campo realizadas a la zona de estudio durante los meses de septiembre y noviembre de 2018. La base de datos ha sido depurada, clasificada y analizada para ser utilizada en la elaboración del mapa hidrogeológico de la zona de estudio, integrando los campos necesarios de información para su adecuada utilización.

En dicha tabla se expone una serie de información relevante como lo es: nombre, municipio, departamento, coordenadas, elevación, caudal (aforado), pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, y el material sobre el que aflora, etc.

Tabla 1. Inventario de Fuentes de Agua en la Zona de Estudio.

Nº	Nombre de la Fuente	Municipio	Departamento	Latitud Norte (m)	Longitud Oeste (m)	Elevación (msnm)	Caudal (l/s)	pH	Temperatura (°C)	Cond. Eléctrica (µS/cm)	SDT (mg/l)	Fecha	Observaciones
1	Fuente El Ocoté	Oscala	Morazán	296,027	588,843	1133	1.38	6.70	21.80	72	36	04/09/2018	Aforamiento al pie de la cuesta sobre material rocoso
2	Fuente El Borbollón	Oscala	Morazán	296,547	588,007	657	18.30	6.78	24.20	111	56	04/09/2018	Aforamiento en materiales volcánicos no consolidados
3	Fuente Los Mata	Chilanga	Morazán	292,846	589,528		0.80	7.02	25.00	74	37	05/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
4	Fuente ENDESA	Chilanga	Morazán	291,640	592,803		12.83	7.09	24.80	94	47	05/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada y materiales no consolidados
5	Fuente El Ocoté	Delicias de Concepción	Morazán	296,097	588,780	1127	1.00	6.54	21.50	60	30	07/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
6	Fuente El Ocoté Las Cruces	Delicias de Concepción	Morazán	291,792	588,848	1168	2.15	6.94	21.10	66	33	07/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
7	Fuente Cuyapa	Delicias de Concepción	Morazán	294,841	589,193	1071	0.82	6.68	22.60	80	37	07/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
8	Fuente Los Pérez	Delicias de Concepción	Morazán	294,770	591,296		4.24	7.58	26.10	91	45	07/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
9	Fuente El Caracof (Col. Boillat)	Ciudad Barrios	Morazán	292,504	580,555	977	1.44	7.78	22.50	146	61	17/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada con intercalaciones de tobas
10	Fuente Trigueros N° 1	Ciudad Barrios	Morazán	293,838	580,839	1019	6.47	7.51	22.60	71	35	17/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada con intercalaciones de tobas
11	Fuente Trigueros N° 2	Ciudad Barrios	Morazán	293,890	580,772	982	3.24	7.73	22.30	92	46	17/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada con intercalaciones de tobas
12	Fuente Aposento N° 1	Ciudad Barrios	Morazán	293,289	581,822	1132	4.42	7.95	22.00	42	22	17/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada con intercalaciones de tobas
13	Fuente Aposento N° 2	Ciudad Barrios	Morazán	293,341	581,879	1095	2.14	7.52	23.20	61	33	17/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada con intercalaciones de tobas
14	Fuente El Mamey	Ciudad Barrios	Morazán	294,447	580,419	943	1.23	6.82	22.40	88	44	17/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
15	Fuente Colonia Las Palmeras	Ciudad Barrios	Morazán	294,663	581,015	963	0.50	6.90	22.10	88	53	18/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
16	Fuente La Arenera	Ciudad Barrios	Morazán	294,661	581,026	1012	0.70	6.87	21.80	78	41	18/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
17	Fuente Los Orellana N° 1	Ciudad Barrios	Morazán	293,553	582,604	1273	0.76	6.30	20.60	42	20	18/09/2018	Aforamiento en material de depósito no consolidado
18	Fuente Los Orellana N° 2	Ciudad Barrios	Morazán	293,564	582,613	1252	0.45	6.29	20.70	49	28	18/09/2018	Aforamiento en material de depósito no consolidado
19	Fuente Los Orellana N° 3	Ciudad Barrios	Morazán	293,542	582,640	1271	0.88	6.65	20.50	62	30	18/09/2018	Aforamiento en material de depósito no consolidado
20	Fuente San Pedro	Gualoccti	Morazán	300,054	585,627	519	3.10	6.80	27.70	155	77	20/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
21	Fuente Japón	Gualoccti	Morazán	298,743	586,639	663	9.69	6.97	23.60	105	53	20/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
22	Fuente Las Presas	Gualoccti	Morazán	297,853	586,213	809	5.56	7.53	22.50	92	46	20/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
23	Fuente El Aguaje	Gualoccti	Morazán	300,863	583,624		9.22	6.71	26.50	150	75	20/09/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
24	Fuente El Charcón	San Simón	Morazán	297,011	583,420	1080	2.78	7.60	21.90	85	43	21/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
25	Fuente El Cerro	San Simón	Morazán	297,088	583,461							21/09/2018	Fuente totalmente captada no pudo apreciarse el aforamiento ni aforar
26	Fuente ADESCOBA Carrizal	San Simón	Morazán	296,720	582,526	1071	1.06	5.86	22.50	21	11	21/09/2018	Aforamiento en material no consolidado (piroclástico)
27	Fuente El Duende ADESCO SIG	San Simón	Morazán	299,716	580,590	820	3.52	6.62	25.20	97	49	21/09/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
28	Fuente Guallincora	San Simón	Morazán	299,420	582,838	660	1.44	7.00	27.00	141	71	21/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada y en punto de contacto impermeable
29	Fuente EL Platanar	San Simón	Morazán	299,157	583,055	656	2.31	7.09	26.10	114	57	21/09/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada y en punto de contacto impermeable
30	Fuente ENDESA 1	Chilanga	Morazán	290,870	592,419	515	4.23	7.88	26.00	93	46	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
31	Fuente ADESCOCAPE Los Pérez	Chilanga	Morazán	290,817	592,500	502	0.14	7.85	26.90	102	54	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
32	Fuente El Ojushal ADESCOPE El Pastor	Chilanga	Morazán	290,842	592,471	510	2.00	7.56	30.00	110	55	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
33	Fuente Los Martínez N° 1	Chilanga	Morazán	292,353	592,726		0.39	7.74	28.80	139	69	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
34	Fuente Los Martínez N° 2	Chilanga	Morazán	292,353	592,726		0.08	7.65	29.30	126	63	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
35	Fuente ADESCOMAG N° 1 Los Blancos	Chilanga	Morazán	291,830	592,676		0.20	7.69	28.70	97	49	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
36	Fuente ADESCOMAG N° 2	Chilanga	Morazán	290,891	593,812		0.23	7.70	28.50	95	50	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
37	Fuente ENDESA N° 2	Chilanga	Morazán	291,621	592,447		2.51	7.66	28.50	107	53	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
38	Fuente ADESCOPRIM	Chilanga	Morazán	291,672	592,588		1.67	7.77	29.60	86	43	19/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
39	Fuente PACUN	Yoloaquin	Morazán	293,628	589,138	1083	1.50	7.73	20.90	62	32	20/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
40	Fuente El Chichipate	Yoloaquin	Morazán	293,647	589,938	1052	0.50	7.91	21.00	69	35	20/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
41	Fuente La Laguna	Yoloaquin	Morazán	294,425	592,968	539	3.40	7.77	25.00	145	73	20/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
42	Fuente El Pitah	Delicias de Concepción	Morazán	296,047	591,357	756	0.05	7.58	23.80	101	50	20/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
43	Fuente El Corozo	Delicias de Concepción	Morazán	296,747	591,556	613	2.30	7.65	26.60	100	50	20/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
44	Fuente Los Majano	Delicias de Concepción	Morazán	296,407	590,171	606	3.70	7.71	24.90	152	76	20/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
45	Fuente La Unión	Oscala	Morazán	294,918	586,246	1443	3.29	7.65	19.90	59	30	21/11/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
46	Fuente El Estadio	Oscala	Morazán	295,039	587,127	1359	2.64	7.74	20.20	79	39	21/11/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
47	Fuente San Pablo	Oscala	Morazán	295,704	587,671	1241	3.26	7.75	20.90	49	24	21/11/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
48	Fuente Centroamérica	Oscala	Morazán	296,436	588,378	1023	0.72	7.77	21.60	45	23	21/11/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
49	Fuente El Cacao	Oscala	Morazán	297,252	586,904	812	2.30	7.56	22.00	61	30	21/11/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
50	Fuente El Rillito	San Simón	Morazán	303,072	583,093	555	3.33	7.94	26.80	184	88	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica con intercalaciones de material piroclástico
51	Fuente El Plan de la Ramada, Caserío San Antonio	Ciudad Barrios	Morazán	295,629	581,304	1019	1.87	7.82	22.20	59	31	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
52	Fuente San Carlos, Caserío San Antonio	Ciudad Barrios	Morazán	295,038	582,979	1143	2.78	7.82	22.20	59	31	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
53	Fuente Santo Tomás	Ciudad Barrios	Morazán	295,668	582,028	1070	4.20	7.98	21.70	26	13	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
54	Fuente El Limar	Ciudad Barrios	Morazán	295,506	580,244	946	1.49	7.97	22.20	19	8	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada y en punto de contacto impermeable
55	Fuente San Matías	Ciudad Barrios	Morazán	293,762	583,776	1352	2.30	7.87	21.50	39	21	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada
56	Fuente Barrancón	Ciudad Barrios	Morazán	295,314	577,942	685	1.89	7.72	25.20	108	54	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
57	Fuente Comunidad Tepenoguste	Ciudad Barrios	Morazán	296,435	578,526	826	57.00	7.94	25.10	94	47	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico
58	Fuente El Amadón	Ciudad Barrios	Morazán	295,565	577,296	677	0.02	7.94	25.40	106	59	22/11/2018	Aforamiento en roca volcánica fracturada (bloques grandes) con material piroclástico

## **4.6 Exploración del Agua Subterránea.**

El entendimiento del comportamiento del sistema de flujo del agua subterránea del área de estudio, resulta de mucho interés especialmente porque esclarece las distintas interrelaciones existentes entre las unidades geológicas e hidrogeológicas, además de entender el mecanismo de transporte que puede tener el agua a lo largo del sistema.

Por lo general, no todas las formaciones geológicas poseen la misma facilidad para transmitir y almacenar agua, por lo que la identificación hecha de las características hidráulicas de los materiales por donde puede fluir el agua da resultados para el entendimiento del sistema de flujo de la zona.

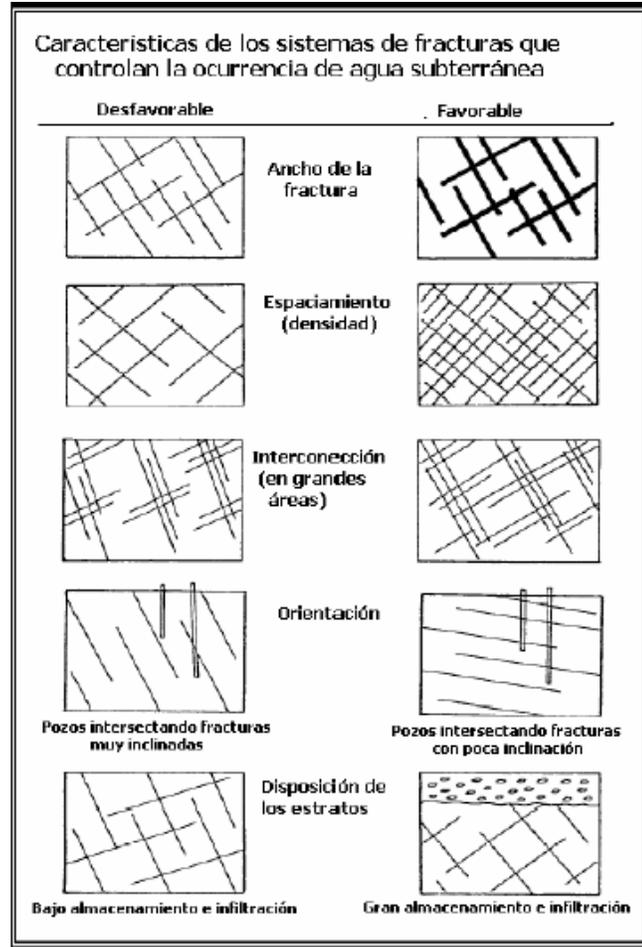
### **4.6.1. Comportamiento y Dirección del Sistema de Flujo del Agua Subterránea de los Acuíferos Generados por Fallas Locales.**

El movimiento del agua subterránea por medio de las fracturas de las rocas, se puede entender como el paso del agua a través de planos de paredes más o menos rugosas y con cierta anchura. Si las fracturas son estrechas el flujo suele ser laminar, pero si el ancho es considerable y a gran velocidad el flujo se vuelve turbulento.

Para el caso de la zona de estudio, el movimiento del agua subterránea en los acuíferos locales generados por el sistema de fallas, se ve influenciado por una serie de factores externos que condicionan dicho comportamiento, entre los que se pueden mencionar:

- Los esfuerzos tectónicos, los cuales condicionan la diaclasación, exfoliación, planos de fractura y plegamientos. La fuente sismogénica de dichos esfuerzos tectónicos en su mayoría, es el movimiento de subducción de las placas tectónicas del Caribe y de Cocos.
- La erosión, la cual expone rocas antes enterradas bajo un peso, y en este proceso se produce una descomposición que ensancha las fisuras y crea otras nuevas.

La ocurrencia del agua subterránea en medios fracturados también se ve afectada por ciertas características del medio como por ejemplo: la longitud, ancho y localización de las fracturas, la interconexión entre las mismas; ya que la posibilidad de encontrar agua aumenta cuando las fracturas están interconectadas formando una red; y la cantidad de material que pueda obstruir el paso del agua a través de las grietas (Figura 10).



**Figura 10. Características de los Sistemas de Fracturas que Controlan la Ocurrencia del Agua Subterránea.**

En cuanto a los parámetros hidráulicos de las rocas fracturadas, se puede decir que la conductividad hidráulica no suele rebasar unos pocos m/día, y muchas veces es

notablemente menor, en materiales volcánicos antiguos son usuales valores entre 0.01 a 1 m/día, pudiendo llegar a 1,000 m/día en los más recientes.

En rocas fracturadas el movimiento del flujo de agua subterránea tiene lugar a lo largo de las discontinuidades, juntas, fracturas y zonas de corte de matriz rocosa. La interconexión entre las discontinuidades en las rocas y sus espaciamentos, tamaño de aberturas y orientación influye en la porosidad y la permeabilidad de dichas masas de roca. La abertura de las juntas y fracturas que no están llenas con material meteorizado o triturado forman un paso potencial para el movimiento del agua subterránea, pero su permeabilidad es enormemente reducida cuando se rellenan con material arcilloso.

#### **4.6.2 Identificación de Fracturas y Procesamiento de Imágenes Satelitales.**

El estudio del agua subterránea en roca fracturada en la mayoría de los casos se centra en factores que conciernen en la roca más que en el comportamiento del agua como tal. En medios donde el origen de la roca es volcánico, la variedad de las características hidrogeológicas que se puedan encontrar puede ser inmensa debido a que es un medio bastante heterogéneo, ya que por ejemplo, pozos perforados en este tipo de rocas puedan dar caudales espectaculares, pero en la misma formación y a escasa distancia los pozos pueden ser estériles.

El presente trabajo, para la determinación de los comportamientos de flujo del agua subterránea y su interrelación con los flujo superficiales, se centró en la recopilación de información en campo para obtener el inventario de manantiales, para luego ser apoyado con la herramienta de sensores remotos, con el objetivo de conocer la geometría de las estructura geológicas, las fuentes de agua y su correlación.

A continuación se presenta una introducción a la tecnología de sensores remotos y luego se explica la metodología seguida para identificar los alineamientos de las fallas geológicas dentro de la zona de estudio.

#### **4.6.3 Sensores Remotos.**

El término “sensor remoto” se refiere a un dispositivo empleado para estudiar las características de objetos usando datos recopilados desde un punto remoto de observación (Brinker, 2000) Dicho término abarca el estudio de datos de satélite y fotografías aéreas, siendo una técnica extremadamente poderosa para la exploración el mapeo y la administración de los recursos de la tierra.

El principio básico de los sensores remotos es que cada objeto, dependiendo de sus características físicas, refleja, emite y absorbe intensidades de radiación que varían en diferentes rangos de longitudes de onda electromagnéticas.

El uso de esta tecnología en el campo de la investigaron puede ofrecer muchas ventajas, algunas de éstas se enlistan a continuación:

- En áreas inaccesibles, el uso de sensores remotos puede ser la única manera de obtener la información quejes difícil de visualizar desde el suelo, tales como el sistema fluvial de drenaje, la topografía, litología, vegetación; así como cambios de estas características a través del tiempo.
- También, el uso de técnicas de sensores remotos ahorra tiempo y trabajo humano, ya que la información de una gran área puede ser reunida rápidamente.
- La misma imagen de sensor remoto puede ser usada por usuarios de diferentes disciplinas como la sismología, geología, agricultura, ecología, urbanismo, meteorología, oceanografía, hidrología entre otros.
- En cuanto a la exploración de aguas subterráneas en rocas fracturadas; se logran mayores rangos de éxito en cuanto a menos pozos con baja producción, y a la vez producción sostenible de los pozos excavados. Llevando esto a procedimientos más racionales y exactos para limitar el área de búsqueda, por lo tanto es más económico.

- Se ocupa mejor los datos existentes y los campos de investigación son menos extensos.

La principal limitación de la técnica de sensores remotos para usos geológicos-hidrogeológicos surge del hecho que la radiación electromagnética tiene una profundidad de penetración limitada de la superficie cerca de la fracción de milímetros en el rango visible casi infrarrojo. Por eso las interpretaciones hidrogeológicas de la superficie se tienen que basar por evidencia superficial indirecta como topográfica, litología, vegetación, suelo, sistema de drenaje entre otras características de la superficie (Singhal y Gupta, 1999)

Para la investigación del agua subterránea en roca fracturada, se pueden utilizar 23 tipos de sensores, estos son: a) los sistemas fotográficos, b) los sistemas de imágenes de radar y c) los sistemas de escáner.

#### **a) Sistemas Fotográficos**

El más familiar de los sensores remotos es la fotografía, la ventaja de usar fotografía aérea es la alta resolución y su precisión geométrica, lo cual permite una interpretación detallada del suelo, roca y condiciones de la vegetación.

El principio de trabajo de una cámara aérea o espacial es simple, objetos en el suelo que caen dentro del campo de visión de los lentes son enfocados y reflejados en un filme fotográfico. Digitalizar y georeferenciar las fotografías aéreas llevan bastante tiempo y es factible sólo para pequeñas áreas.

#### **b) Sistemas de imágenes de radar**

Básicamente operan con el principio de generar artificialmente microondas que son enviadas en una dirección particular, estas colisionan con la superficie por lo que son dispersadas. Las radiaciones dispersadas que regresan al punto de partida son recibidas, amplificadas y analizadas para determinar la localización, propiedades eléctricas y

configuración de las superficie de los objetos. La técnica de imagen de radar se puede realizar en cualquier momento y con cualquier condición climática y es independiente de la iluminación solar así como de los factores atmosféricos-metereológicos.

### **c) Sistemas de escáner satelitales:**

Constituyen los principales dispositivos para detectar objetos en al tierra desde plataforma de satélite. Son usados, ampliamente, ya que son capaces de almacenar radiación en el rango visible al ojo humano, cercano al –infrarrojo y termal- infrarrojo del espectro electromagnético. Un escáner es un sistema no fotográfico y genera información digital de intensidad de las radiaciones en el suelo.

En general, un sistema de escáner consiste en 2 partes importantes: la parte óptica y el detector. La parte óptica recolecta la radiación emitida por un cuerpo y la divide en diferentes rangos de longitud de onda, mientras que el detector transforma la energía óptica en señal eléctrica. Esta señal amplificada es clasificada dependiendo de su intensidad en uno o varios niveles, llamados niveles de ecualización o números digitales (DN) Estos datos son retransmitidos en los sensores satelitales a las estaciones en la tierra, para luego ser transformados a un arreglo de 2 dimensiones y formar la imagen (Singhal y Gupta, 1999).

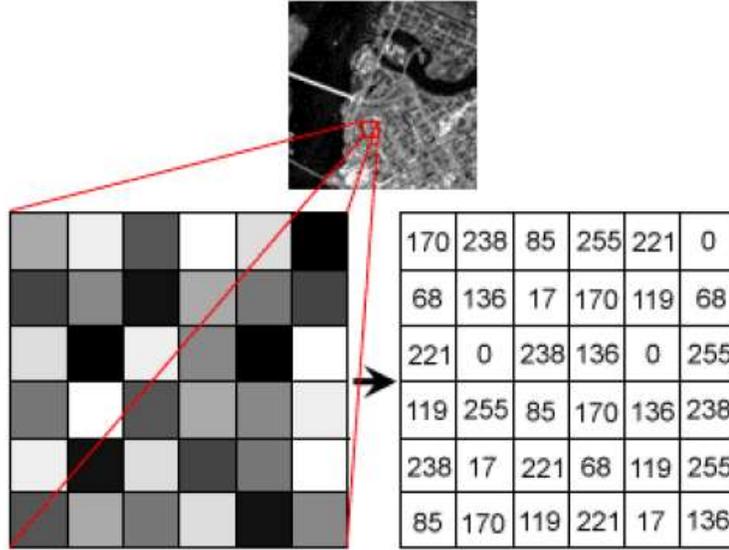
Entre las ventajas que poseen las imágenes satelitales de sistemas escáner sobre la fotografía aérea, se detiene: (Nils, 2002)

- Las imágenes satelitales ya están disponibles en formato digital, ayudando al procesamiento e integración de la imagen con otros datos.
- Para la mayoría de las áreas, especialmente en terreno árido, así como en semi-árido, se pueden encontrar imagines actualizadas libres de nubes. Además, se pueden adquirir imágenes de estaciones secas o lluviosas y de diferente época para hacer estudios multi-temporales.

- Las imágenes de satélite usualmente tienen una resolución espectral alta, con información de diversas bandas en el espectro electromagnético.
- Los datos de satélite cubren áreas relativamente grandes, que proveen una vista más global que las fotografías aéreas. Esto, facilita el reconocimiento de grandes características estructurales, como zonas de fallas, que sería difícil de detectar con fotografía aérea.

#### **4.6.4 Representación de la Realidad en una Imagen a partir de los Datos del Sensor Remoto.**

Como se mencionó anteriormente la información captada por un sensor remoto se representa en una imagen como un arreglo matricial donde cada celda corresponde a un pixel (elemento de imagen), y a cada pixel se le asigna un número digital (DN), que representa el nivel del brillo de ese pixel en la imagen. En la Figura 11 se muestra un ejemplo de una imagen digital, los datos están en un formato digital. Estos tipos de imágenes digitales se refieren como imágenes raster en las cuales los pixeles forman un arreglo de filas y columnas.



**Figura 11. Arreglo de Pixeles de una Imagen Ordenando en Filas y Columnas con su Respectivo Número Digital.**

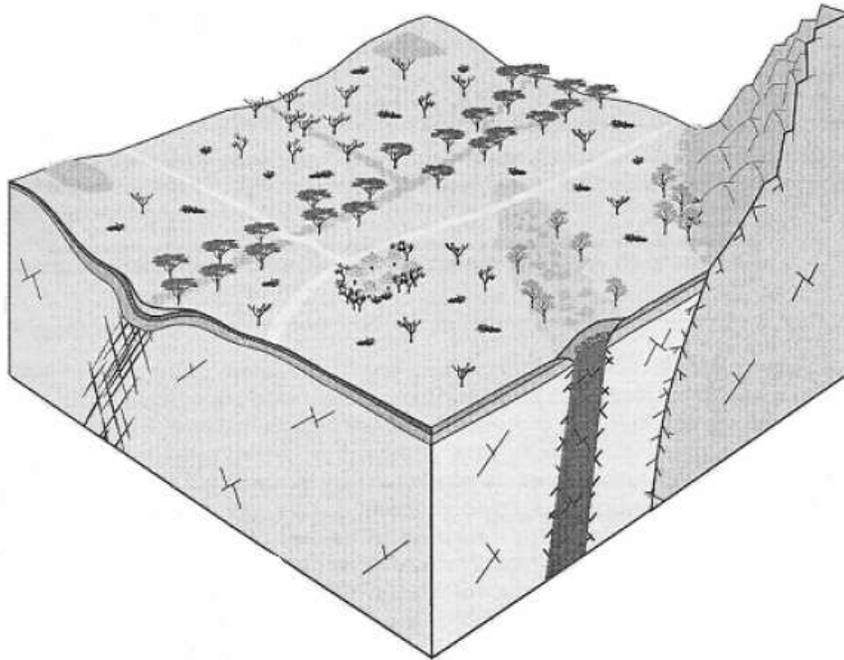
Usando la información de uno o más rangos de longitud de ondas es posible discriminar entre diferentes tipos de objetos en el suelo (agua, suelo seco, suelo húmedo, vegetación) y localizar su distribuido en el suelo.

#### **4.6.5 Indicadores de Agua Subterránea en Imágenes Satelitales.**

Debido a que la penetración de las radiaciones electromagnéticas en el terreno está apenas en el orden de fracciones de milímetros en la región visible y de apenas unos metros en la región de microondas, los sensores remotos no son capaces de proporcionar una información directa del agua subterránea en la mayoría de los casos. Sin embargo, la morfología, hidrología y geología que gobiernan las condiciones del agua subterránea pueden ser estudiadas e identificadas en un producto obtenido de un sensor remoto.

La Figura 12 muestra algunos de los indicadores de agua subterránea que se pueden visualizar en un sensor remoto entre los que se pueden mencionar: cambios de tonalidad en

el suelo, vegetación, cambios topográficos, componentes lineales de canales de drenaje o las combinaciones de éstos.



**Figura 12. Características Superficiales que puede ser Indicadores de Agua Subterránea: Vegetación, Cambios Topográficos, Patrón de Drenaje, Tonos de Suelo y Fracturas.**

#### **a) Topografía**

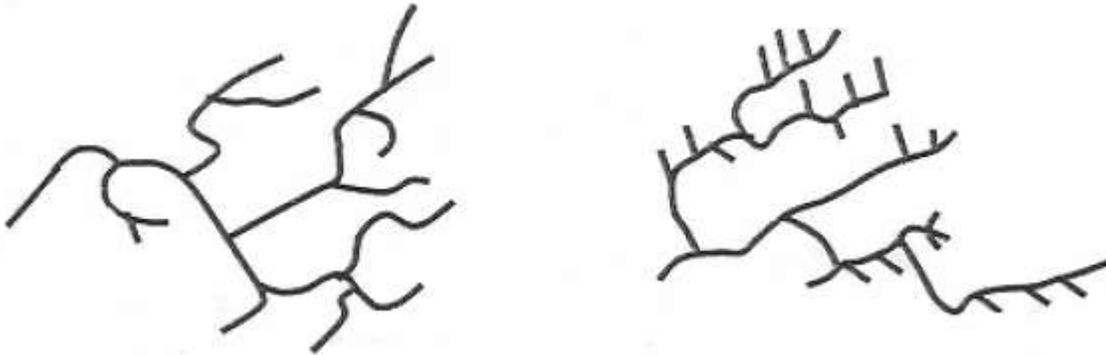
Las estructuras geológicas pueden tener manifestaciones topográficas que pueden ser atribuidas a meteorización, erosión, compensaciones de la superficie y compactación de los estratos inferiores.

Los cambios en la topografía se pueden identificar por diferencias en la reflexión de las ondas electromagnéticas causados por sombras, por ejemplo, depresiones en la superficie que están alineadas o cambios abruptos en la topografía asociados con fallas menores.

## b) Patrones de drenaje

Los componentes lineales del drenaje pueden indicar un alineamiento con zonas de fracturas subyacentes. Un canal también puede actuar como conducto de recarga en caso intercepte una zona de fractura. La combinación de alineamientos vegetales y sistemas de drenaje podría mostrar agua subterránea controlada por fractura.

El drenaje sirve de ayuda para localizar alineamiento éstos se pueden identificar, por ejemplo, en los cambios abruptos en la dirección que lleva el drenaje, teniéndose una relación entre los alineamientos y el sistema de drenaje. Generalmente, el drenaje controlado estructuralmente puede mostrar un patrón que se muestra en la siguiente Figura 13.

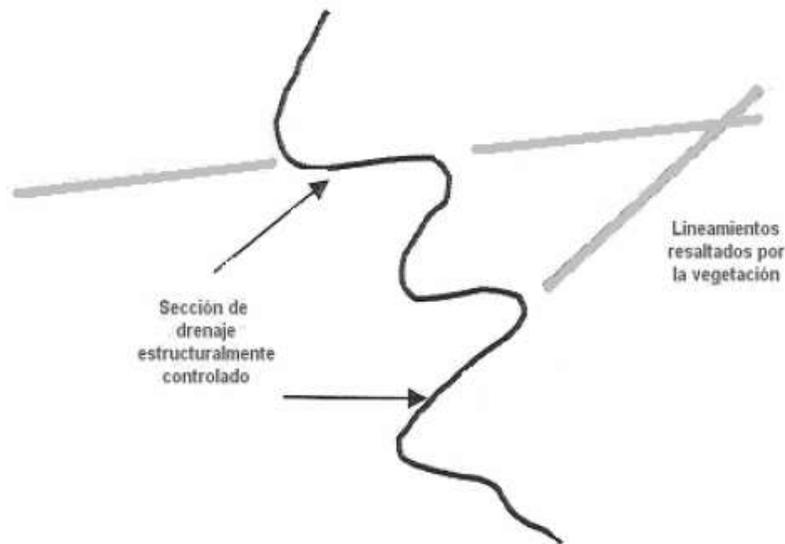


**Figura 13. Drenaje Estructuralmente Controlado que Sirve para Inferir la Existencia de un Alineamiento.**

## c) Vegetación anómala

La vegetación anómala puede servir como una guía directa para las investigaciones de agua subterránea. El agua que fluye entre las fracturas puede mantener constantemente vegetación no importando si es estación seca. Se puede observar en patrones lineales comúnmente asociados con el drenaje, canales o agrupaciones individuales de árboles donde el agua subterránea es poco profunda.

En imágenes satelitales la vegetación ayuda a identificar componentes lineales, éstos se pueden identificar como vegetación agrupada, también como cambios de tono debido a diferente tipo de vegetación, si existe una combinación entre drenaje controlado y vegetación, se podría tener más seguridad de la existencia de un lineamiento como se muestra en la Figura 914



**Figura 14. Patrones de Drenaje Controlados Estructuralmente y Combinación con Vegetación.**

#### **4.6.6 Imagen Sentinel 2 Utilizada para la Identificación de Alineamientos.**

Para la identificación de los alineamientos geológicos de la zona de estudio, se utilizó una imagen sentinel 2. Los sistemas de satélites son operados por la compañía de Satélites de Observación de la Tierra (EOSAT) de Estados Unidos, el satélite pesa cerca de 2200 kg y tiene una longitud aproximada de 4 metros (Figura 15).

Cada una de las imágenes posee características diversas y uno de los criterios de selección de la información se basó en que esta tuviera una resolución espectral, espacial, temporal y radiométrica.

Con base en lo anterior la imagen seleccionada fue la proveniente del satélite Sentinel 2 de alta resolución, provista de forma gratuita, la cual posee las características siguientes (Tabla 2):

**Tabla 2. Características de las Bandas de la Imagen Sentinel 2.**

<b>Bandas de Sentinel-2</b>	<b>Ancho de banda central (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolución (m)</b>	<b>Ancho de banda (nm)</b>
Band 1 – Coastal aerosol	0.443	60	27/45 (2A/2B)
Band 2 – Blue	0.490	10	98
Band 3 – Green	0.560	10	45/46 (2A/2B)
Band 4 – Red	0.665	10	38/39 (2A/2B)
Band 5 – Vegetation Red Edge	0.705	20	19/20 (2A/2B)
Band 6 – Vegetation Red Edge	0.740	20	18
Band 7 – Vegetation Red Edge	0.783	20	28
Band 8 – NIR	0.842	10	115
Band 8A – Narrow NIR	0.865	20	20
Band 9 – Water vapour	0.945	60	20
Band 10 – SWIR – Cirrus	1.375	60	20
Band 11 – SWIR	1.610	20	90
Band 12 – SWIR	2.190	20	180

La imagen principal utilizada corresponde al año 2018 y fue capturada el día 31 de marzo, las bandas 2, 3, 4 y 8 NIR poseen una resolución máxima de pixel de 10 m x 10 m, lo que hace posible la identificación de alineamientos en la zona de estudio.

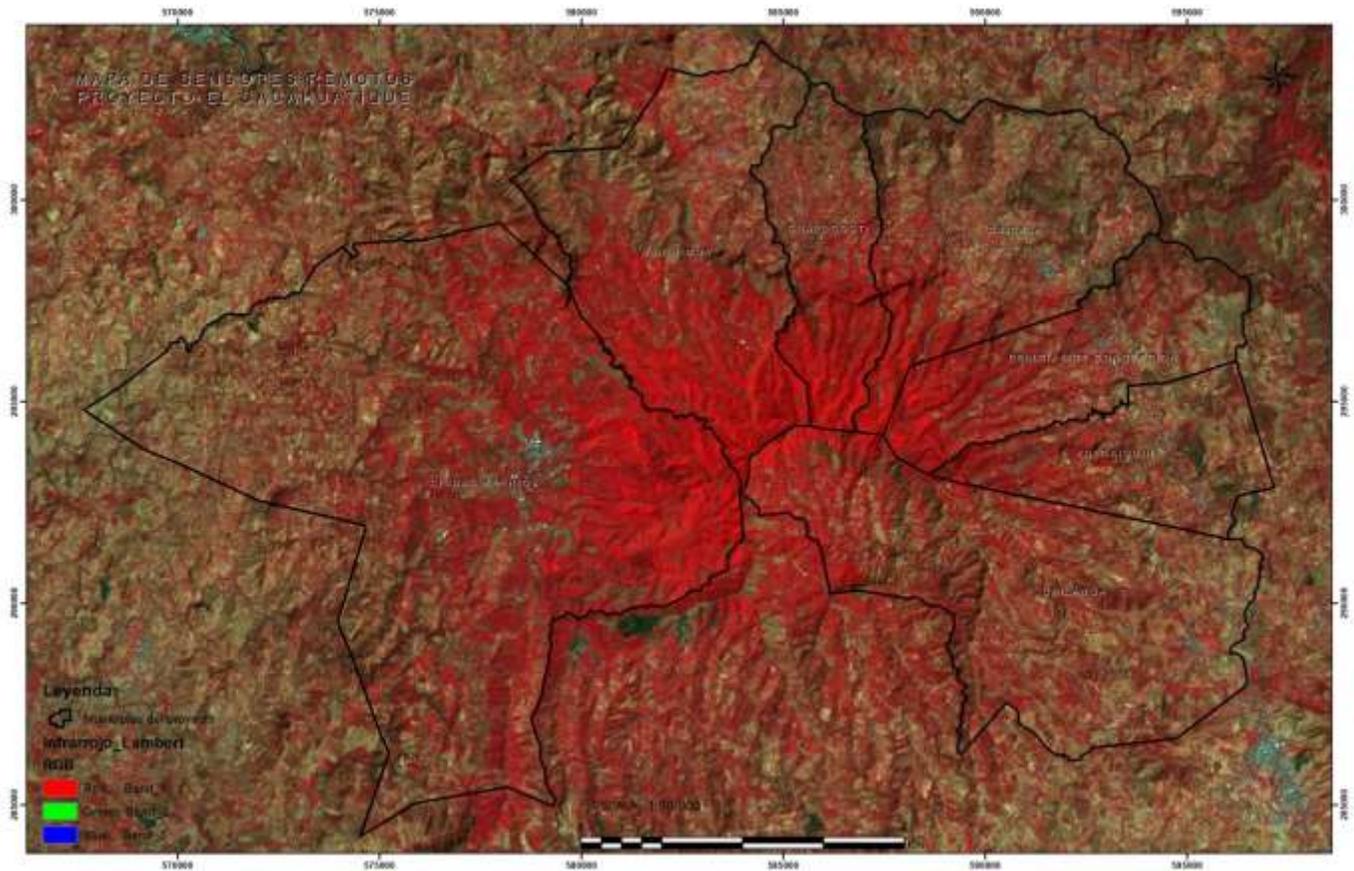


Figura 15. Imagen Sentinel 2 Utilizada para la Identificación de Alineamientos en la Zona de Estudio.

La descripción de las tres bandas utilizadas para la identificación de alineamientos en zona de estudio es la siguiente:

- Banda 2 o Azul (Blue): diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entresuelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo: coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.
- Banda 3 o Verde (Green): Especialmente diseñada para evaluar la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas, y al igual que al banda 1, para detectar la presencia o no de arcilla.

- Banda 4 o Roja (Red): Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

De lo anterior, se observa que cada banda es capaz de brindar características del terreno, como la vegetación, humedad, tipo de suelo y rocas; según la reflexión de la luz y la tonalidad con que cada una de estas características se guarda en las bandas de imagen. Por ejemplo el agua exhibe diferentes tonalidades en las bandas dependiendo de la carga que tenga suspendida y la profundidad del cuerpo de agua. El agua clara se ve generalmente oscura y las aguas con turbiedad y de poca profundidad reflejan en las ondas de longitud cortas.

#### **4.6.7 Procesamiento e Interpretación de Imágenes Satelitales.**

Para representar una imagen satelital de manera que el ojo humano pueda distinguir las diferentes características que existen en el terreno, se encuentran la siguiente técnica de procesamiento de imágenes satelitales: la composición de falso color.

##### **a) La composición de falso color**

Es una técnica muy usada para combinar imágenes multiespectrales de la misma área con la ayuda de la codificación de colores.

En una composición de falso color, tres bandas de una imagen multiespectral son proyectadas al mismo tiempo, a cada una se le asigna un color primario y se superponen para producir una composición de color.

Esta combinación óptica que se obtiene lleva información de las tres imágenes que sirvieron de insumo en función de la variación de color a lo largo de la escena. Como los colores obtenidos no presentan los colores verdaderos de los objetos en la realidad, se llama a este modo de representar la información: composición de falso color (Singhal y Gupta, 1999). Por lo que, dependiendo de la información que se quiera resaltar, así como,

conociendo las características propias de cada banda, así se pueden escoger las diferentes combinaciones existentes y escoger aquella o aquellas donde se pueden extraer información de manera más efectiva.

Las combinaciones de falso color se representan de la siguiente manera “RGB” que viene del inglés red, green and blue o bien rojo, verde y azul en español; esto significa que se escogen tres bandas para resaltar cierta información, a una se la asigna color rojo, a otra verde y a la que queda azul respectivamente. Por ejemplo una combinación RGB 4,3,2 significa que a la banda 4 se le asignó rojo, verde a la banda 3 y a la banda 2 se le asignó el color azul como se muestra en las Figura 16.



**Figura 16. Cuadro de Diálogo del Editor de Leyendas de Imagen.**

En la combinación presentada 4,3,2 se identificó prácticamente la totalidad de los alineamientos observados, mientras que con otras combinaciones sirvieron para corroborar que los alineamientos identificados con la primera, no fueran carreteras caminos o ríos, así como, para corroborar las longitudes y orientaciones de los alineamientos.

#### **4.6.8 Metodología para Interpretación de Alineamientos en Imágenes Satelitales.**

Una vez desarrollados los conceptos asociados con el término sensor remoto, los tipos de sistemas satelitales para obtener imágenes, así como el procesamiento de éstas para una mejor visualización del terreno, se presenta a continuación la metodología seguida para la interpretación de alineamientos de la zona de estudio, con el objeto de exponer en forma resumida y breve los pasos de dicha metodología.

Los siguientes criterios y procedimientos han sido definidos para la interpretación de los alineamientos:

##### **a) Definición de alineamiento.**

Para el presente estudio lo que se identificó con la imagen satelital fue los alineamientos de estructuras geológicas (fallas), por tal motivo, es necesario al iniciar el procesamiento e interpretación de una imagen satelital definir lo que es alineamiento, ya que un alineamiento en la imagen satelital puede ser una carretera, un río, una línea de vegetación o una estructura geológica (fallas). Se definió como alineamientos a la característica lineal o curvilínea que se puede clasificar por su significado hidrogeológico inferido, estos alineamientos pueden representar fallas de carácter geológico, diques y contactos entre diferentes clases de roca, los cuales, pueden estar relacionados con zonas de roca fracturada, donde existe potencial de conductividad hidráulica.

##### **b) Escala de procesamiento e interpretación de imagen satelital.**

Debe elegirse una escala adecuada para el procesamiento e interpretación de la imagen satelital según el tipo de sensor remoto con que se obtuvo dicha imagen. Para el presente caso donde la imagen es captada con el sistema de satélite Sentinel 2 y el procesamiento se hizo en el programa ArcGIS 10.3.

**c) Georectificación de la Imagen Satelital**

La georectificación de la imagen satelital se realizó utilizando el programa ArcGIS 10.3 Tomando como base la cobertura digital de los ríos y red vial de la zona se eligieron 10 puntos de control para la rectificación final.

**d) Procesamiento de la imagen satelital.**

Para una mejor visualización de los alineamientos se utilizaron las técnicas de combinación de bandas en falso color (RGB). De esta forma fue posible observar de manera más clara las expresiones de la superficie del suelo como la geología, formas del terreno, pueblos, carreteras y un realce en los tipos de vegetación, lo que permitió visualizar alineamientos en el terreno e identificar las estructuras geológicas (fallas).

**e) Traslape de la imagen satelital y digitalización de alineamientos.**

Los alineamientos fueron digitalizados en la pantalla de la computadora usando el programa ArcGIS 10.3 Se dividió la zona de estudio en áreas, haciendo un traslape entre estas últimas del 50% en las direcciones, para luego desplazarse sistemáticamente para la siguiente. Esto se hace para asegurar que cada áreas fuera examinada varias veces y los alineamientos de mayor longitud fueran visualizados y trazados correctamente.

**f) Características físicas de la zona de estudio.**

Para la interpretación y trazado de la capa de alineamientos además de tener la imagen satelital como base, se utilizó la cobertura de ríos y la cobertura de carreteras de la zona, esto para evitar la confusión y que se digitalizada un alineamiento incorrecto así como de ayuda para observar los patrones de drenaje controlados estructuralmente.

**g) Clasificación de los alineamientos identificados**

Los alineamientos se clasificaron según su importancia hidrogeológica utilizando la capa de manantiales de la zona junto con la capa de alineamientos digitalizada, de tal forma de buscar una correlación entre ellas según su proximidad, y así, dependiendo de los

caudales observados así fue la clasificación o importancia hidrogeológica que se le dio al alineamiento. Haciendo círculos, como mejor figura geométrica que engloba a los alineamientos con potencial hidrogeológico, y los manantiales o fuentes de agua identificados.

#### **h) Limitantes en el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales.**

Entre los obstáculos que se pueden mencionar durante la interpretación de alineamientos se pueden mencionar: la imagen, el intérprete y las características del suelo.

- La Imagen: la claridad con que se pueda interpretar la imagen satelital dependerá del nivel de procesamiento, fuente de origen de la imagen, así como, la calidad de la misma; además hay que tener en cuenta la exactitud de la georeferenciación en la proyección y sistema de coordenadas adecuadas. Dependiendo de la escala con que se trabaje para interpretar la imagen, así dependerá el nivel de detalle que se pueda detectar en la imagen.
- El Intérprete: Uno de los principales obstáculos en la interpretación de alineamientos es que no importando quien sea el individuo encargado de realizar la interpretación, siempre existirá cierta subjetividad, llevando esto a tener gran influencia en los resultados en términos de reproducibilidad y caracterización de los alineamientos observados. Esto debido a que interpretaciones repetidas por un individuo u otros individuos nunca serán exactamente idénticas en términos de atributos asignados, número de longitud y posición de características detectadas en el área.
- Características de la superficie: Algunos lineamientos pueden pasar desapercibidos si solo se usa sensores remotos para su identificación. En nuestro país existen zonas que están afectadas por el uso de la tierra, que han cambiado la superficie del suelo así como el drenaje y la vegetación que existía originalmente. También existe la posibilidad de que se confundan carreteras, cercos, divisiones de propiedades,

caminos y drenajes como alineamientos verdaderos, así como, que la vegetación no deje ver estructuras geológicas de interés.

#### **4.6.9 Procesamiento de Datos.**

Para entender mejor el potencial hidrogeológico de los alineamientos (fallas geológicas identificadas) que se obtuvieron al procesar e interpretar la imagen satelital (Figura 17), se realizó una interrelación entre cada alineamiento y las fuentes de agua presentes en la zona de estudio. La mayoría de manantiales de la zona de estudio, perfectamente siguen el patrón de los alineamientos o fallamientos geológicos presente. Cada alineamiento se relacionó con la fuente de agua más próxima y, según el rango de caudal al que perteneciera dicha fuente, el alineamiento determina su potencial hidrogeológico (Figura 18).

De igual manera, para poder identificar la dirección y orientación del flujo subterránea, se utilizaron los parámetros de conductividad eléctrica (CE) (Figura 19) y/o sólidos disueltos totales (SDT) (Figura 20) obtenidos en campo; ya que al identificar que una serie de alineamientos se correlacionaban con varios manantiales de un área específica, el aumento de la conductividad eléctrica y/o los sólidos disueltos totales indican un patrón de disolución de minerales o un transporte del flujo de agua de una zona determinada. En vista a esto puede identificarse de donde proviene el agua y hacia a donde se dirige. Esta secuencia logra determinar las líneas de flujo, las cuales ayudaron a delimitar específicamente las zonas de recarga hídrica para una serie de manantiales identificados en la zona de estudio (Figura 21).

En la zona de estudio se identificaron tres fuentes específicas, las cuales presentaban gran caudal, en comparación con la mayoría de los manantiales presentes en la zona de estudio; siendo estos Fuente El Borbollón y Fuente ENDESA del Municipio de Chilanga, con caudales de 18.30 y 12.83 l/s respectivamente, y la Fuente Comunidad Tepenoguate en el Municipio de Ciudad Barrios, con un caudal de 57 l/s; las cuales, además de la correlación con

alineamientos geológicos de la zona pueden estar interconectados con flujos regionales provenientes de la parte alta del Cerro Cacahuatique o con una alineamiento geológico mayor.

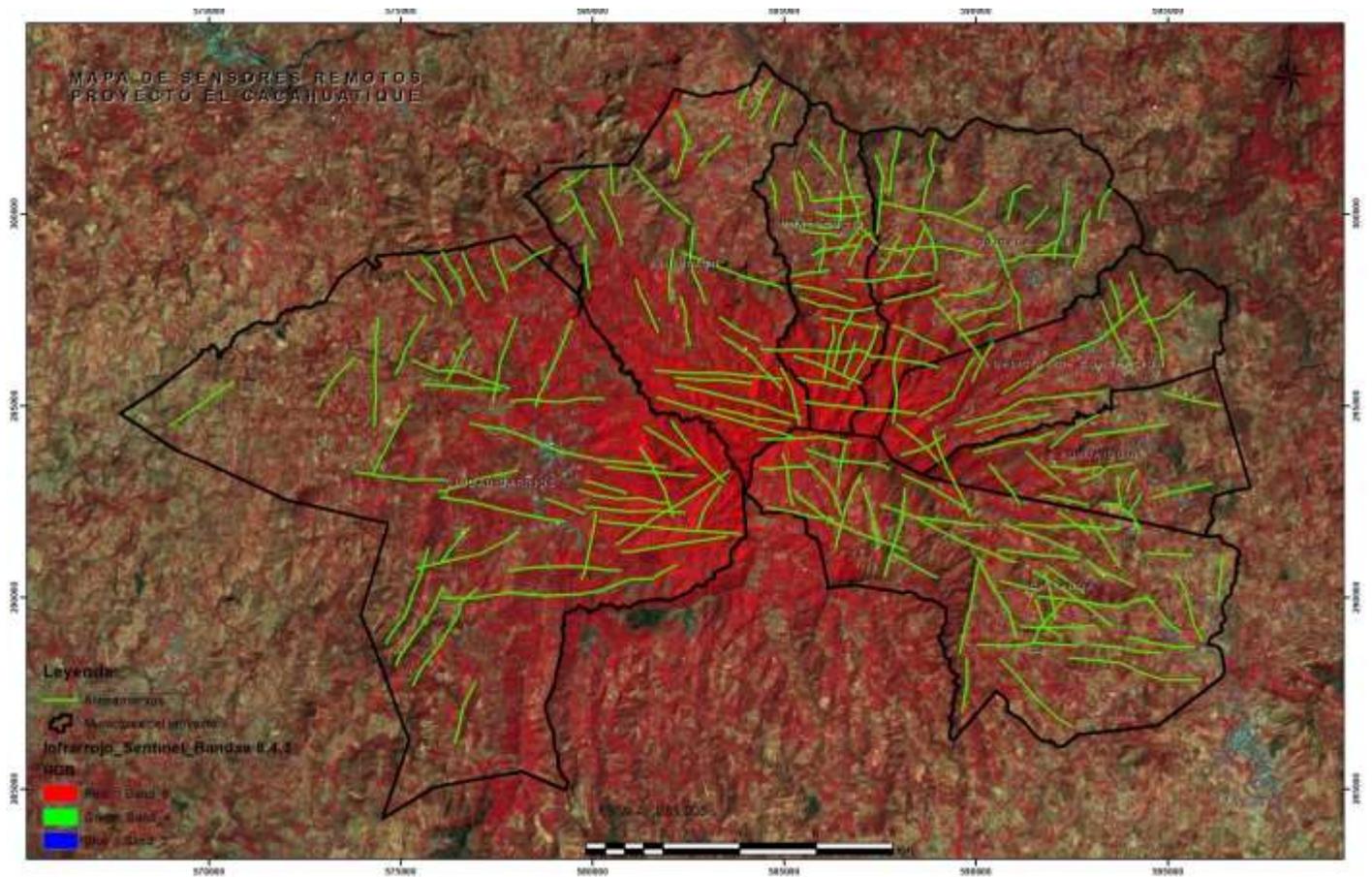


Figura 17. Identificación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos a partir de Imagen Satelital Sentinel 2.

MAPA GEOLÓGICO  
PROYECTO EL CACAHUATIQUE

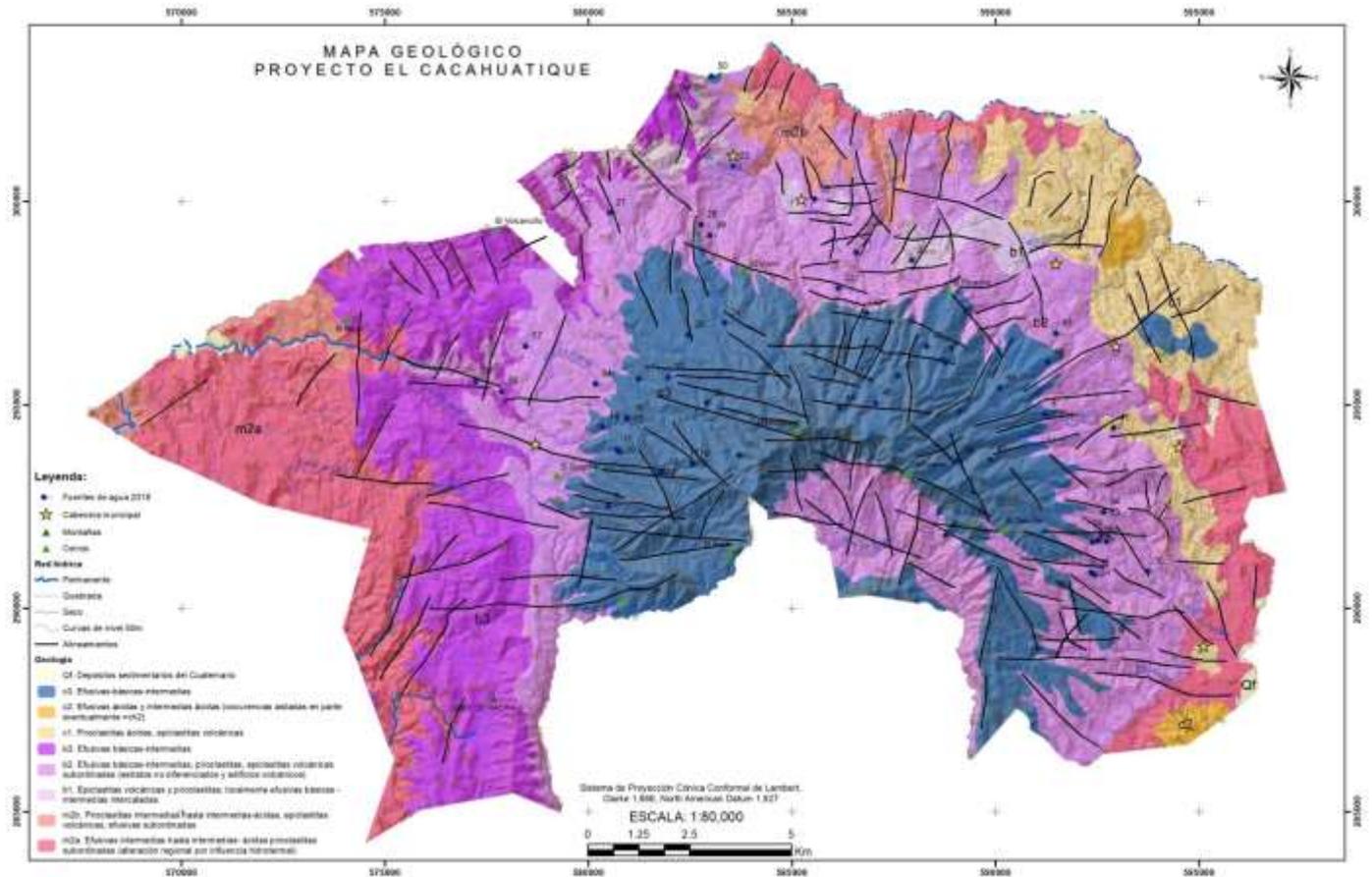


Figura 18. Correlación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos con Fuentes de Agua Inventariadas.

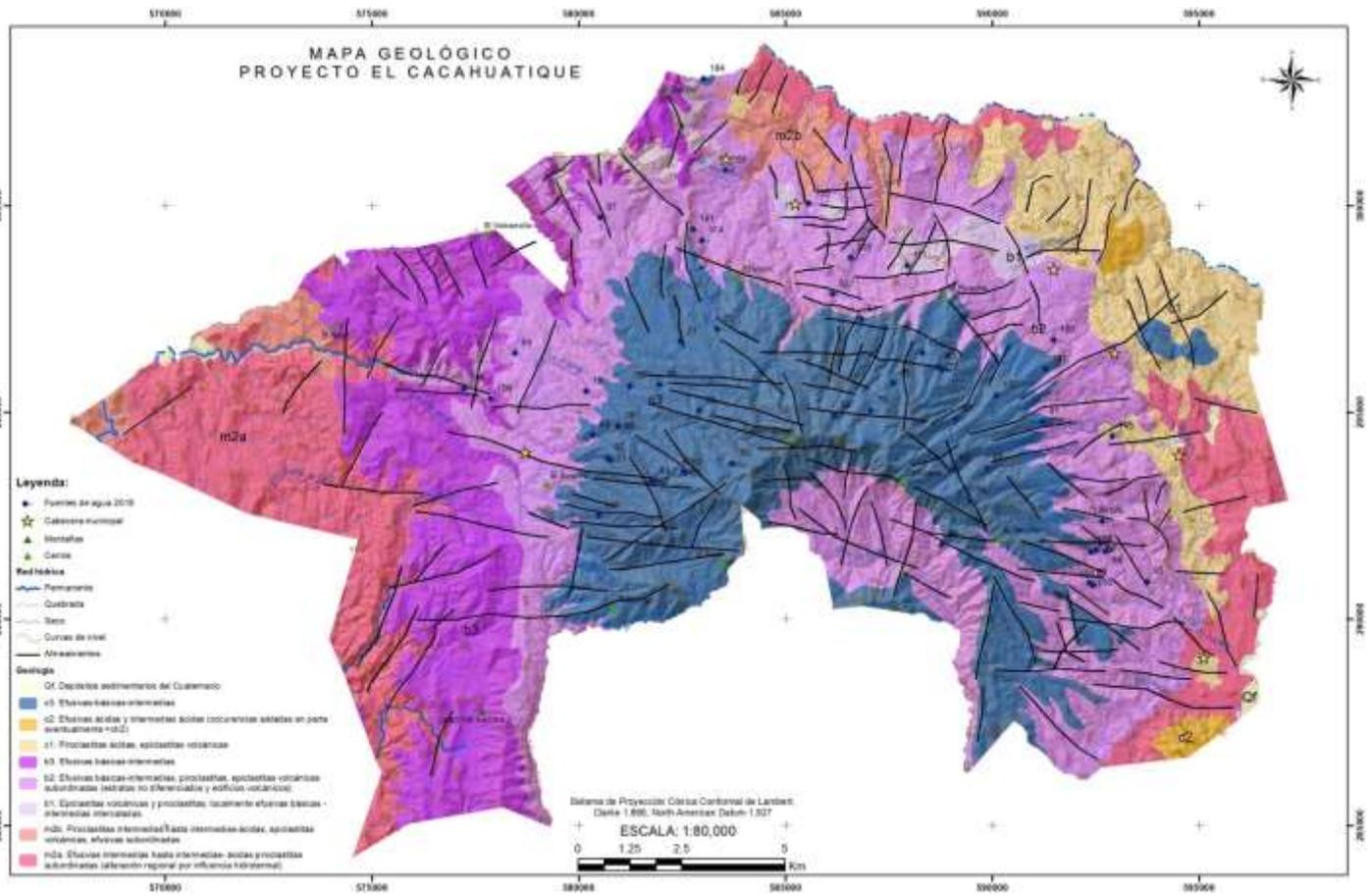
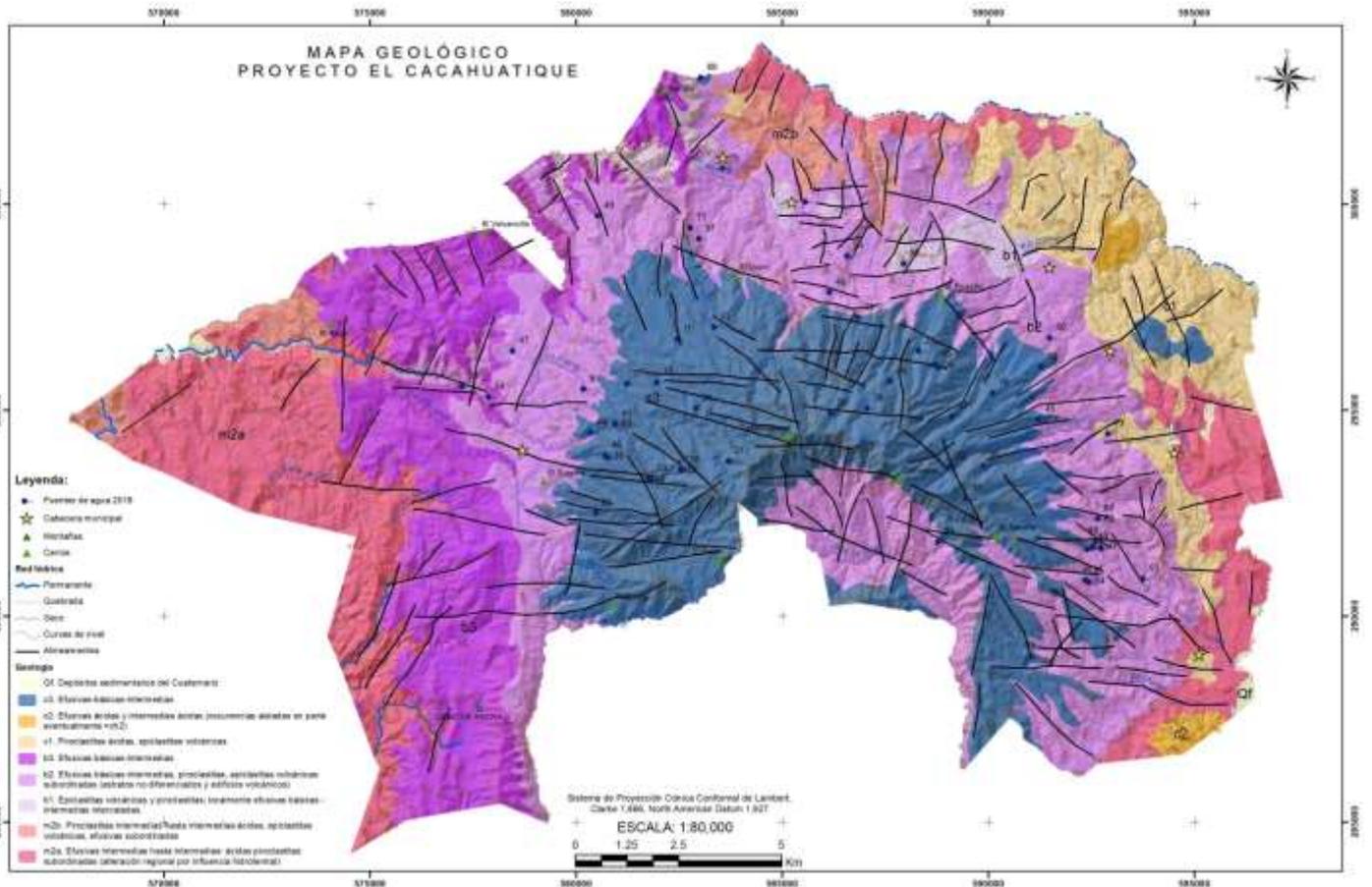
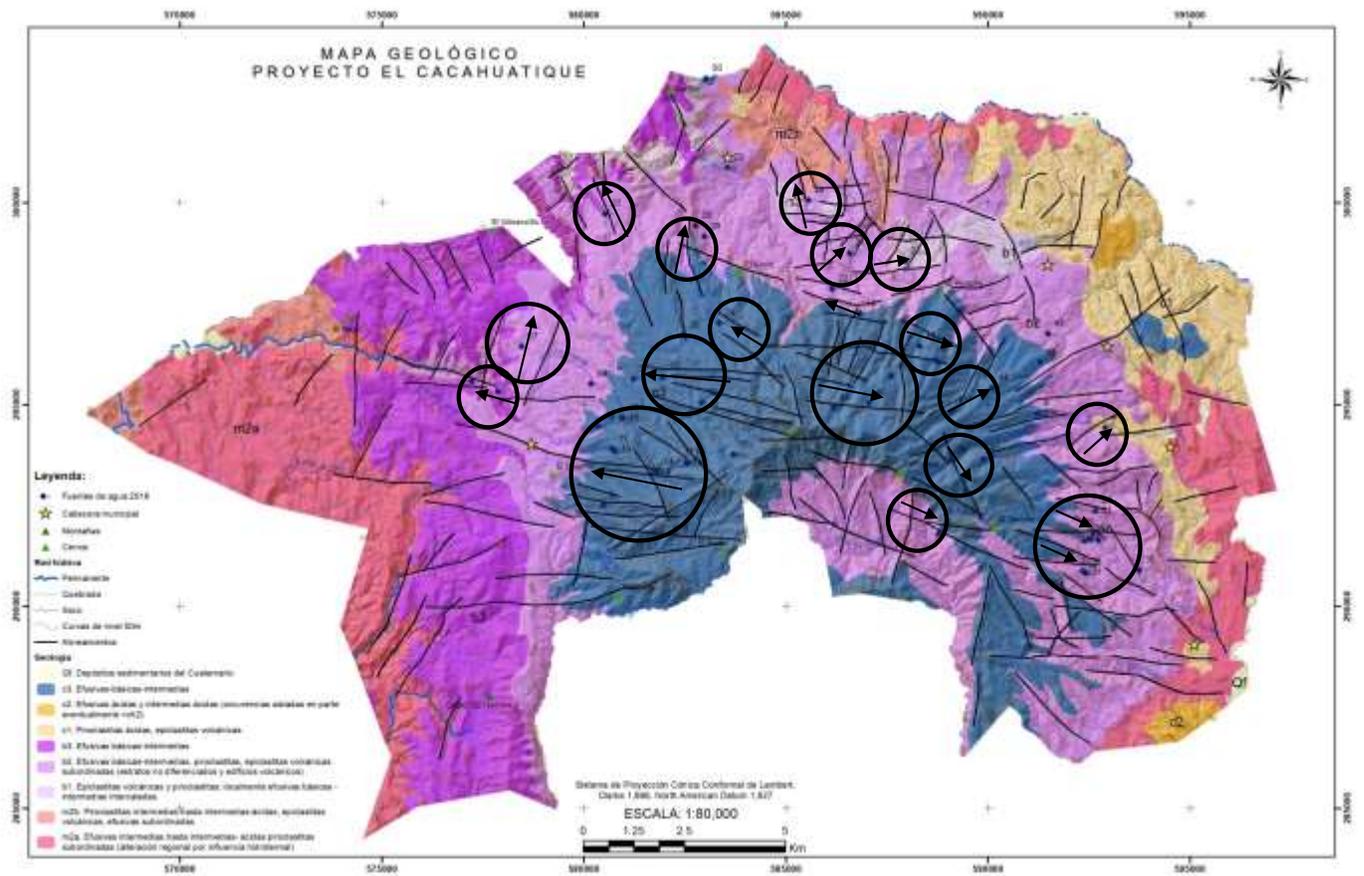


Figura 19. Correlación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos con Parámetro de Conductividad Eléctrica de Fuentes de Agua Inventariadas.



**Figura 20. Correlación de Alineamientos o Fallamientos Geológicos con Parámetro de Sólidos Disueltos Totales de Fuentes de Agua Inventariadas.**



**Figura 21. Identificación de Zonas de Influencia y Determinación de Dirección de Flujo Subterránea de las Fuentes de Agua Inventariadas.**

## **V. BALANCE HÍDRICO Y CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL**

La finalidad de la determinación del balance hídrico es la de establecer y analizar las entradas, salidas y cambios de humedad del suelo dentro de un área determinada (Rodríguez, 1997). La recarga del acuífero es una de las salidas de humedad del suelo que se analiza por medio del balance hídrico, el cual involucra para su determinación los componentes básicos del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración e infiltración), además de los principales grados de humedad del suelo (capacidad de campo, y punto de marchitez) y de la profundidad de raíces de las plantas, considerada como la profundidad donde suceden los cambios de humedad.

En este apartado se presenta la determinación de la recarga hídrica potencial de la totalidad de la zona de estudio, para lo cual fue necesario la realización de balances hídricos específicos de suelo, los cuales determinan la recarga hídrica potencial para cada miembro geológico predominante identificado.

### **5.1 Generalidades.**

Desde el momento en que las precipitaciones tocan el suelo, comienza a funcionar una serie de factores que afectan el comportamiento del agua en el subsuelo. Si no existe intervención humana, el agua puede infiltrarse y posteriormente percolar, escurrir sobre la superficie o evaporarse, de acuerdo con las características del medio natural. En las áreas naturales, sin intervención que aún existen en las microcuencas, la mayor parte del agua o se infiltra en el suelo para luego conformar la recarga acuífera o es absorbida por la vegetación, que más tarde regresa a la atmósfera mediante la transpiración.

Cuando en la superficie del suelo existe la intervención de la actividad antrópica (humana), los procesos dinámicos del ciclo hidrológico resultan afectados. Por ejemplo, las urbanizaciones afectan la dinámica hídrica de una manera más drástica. Primeramente, una considerable porción de suelo está cubierta por una superficie relativamente impermeable de varios tipos de materiales y pavimentos. En estos casos, la infiltración es casi nula y la

evaporación se ve reducida considerablemente, ya que la mayor parte del agua proveniente de la precipitación se pierde como escorrentía, generando en pocos minutos, grandes avenidas que difícilmente los cauces naturales podrán absorber, dando como resultado las inundaciones en las zonas urbanas.

La cobertura boscosa controla el flujo del agua que desciende desde la cabecera de las cuencas hasta los valles, lugares donde se localizan los centros urbanos. Su destrucción modifica los balances hidrológicos y produce cambios en los regímenes hídricos aguas abajo, particularmente en los casos en que se desvían volúmenes significativos a otras cuencas. Por ejemplo, si se extrae agua de un acuífero, se modifican los volúmenes de carga y descarga desde y hacia los cauces con el que dicho acuífero tiene algún tipo de conexión hidráulica. Todos los elementos del sistema hidrológico se encuentran íntimamente relacionados, de manera que los efectos de cualquier acción pueden resultar mucho más complejos de lo que aparentan a primera vista.

Es por ello que resulta importante la determinación del balance hídrico para establecer y analizar las entradas, salidas y cambios de humedad del suelo dentro de un área determinada. La recarga del acuífero es una de las salidas de humedad del suelo que se analiza por medio del balance hídrico, el cual involucra para su determinación los componentes básicos del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración e infiltración), además de los principales grados de humedad del suelo (capacidad de campo, y punto de marchitez) y de la profundidad de raíces de las plantas, considerada como la profundidad donde suceden los cambios de humedad.

## **5.2 Desarrollo del Balance Hídrico.**

La totalidad de la zona de estudio ha sido simplificada dividiéndose en áreas, de manera de calcular la recarga hídrica potencial que aporta cada miembro geológico que se encuentran ubicados tanto en la parte alta, media y baja de la zona de interés. En cada una de ellas se calculó la recarga mediante la determinación del balance hídrico específico de suelos; los cuales se detallan en la sección de Anexos. Para su división se consideró el tipo de

material geológico predominante, las características de textura del suelo, y sobre todo su disposición en la zona de estudio.

La precipitación efectiva se considera como la porción de la precipitación pluvial que logra infiltrarse en el suelo y que se encuentra disponible para ser utilizada por las raíces de las plantas o para recargar al acuífero.

Existen varios factores que intervienen en la determinación de la precipitación efectiva, entre los que se mencionan a los siguientes: intensidad de la precipitación, la velocidad de intensidad de infiltración en el suelo, la cobertura vegetal y la topografía. A partir de estos factores existen diversos métodos, basados en fórmulas, para calcular la precipitación efectiva.

### 5.3 Metodología Aplicada en el Balance Hídrico.

En el presente estudio se utilizó la fórmula de correlación estadística desarrollada por Gunther Schosinsky y Marcelino Losilla (1999) y Gunther Schosinsky (2007), la cual considera a la velocidad de infiltración del suelo (capacidad de infiltración) como el factor principal que condiciona la cantidad de precipitación pluvial que puede infiltrarse; ya que depende básicamente de las características físicas del suelo, como lo son la textura, estructura, compactación y contenido de humedad.

La cantidad de precipitación que infiltra en el subsuelo, está condicionada por el factor de coeficiente de infiltración, y la cual está sujeta a las condiciones de pendiente del terreno ( $k_p$ ), vegetación existente ( $k_v$ ), y tipo de suelo ( $k_{fc}$ ).

Las fórmulas utilizadas son las siguientes:

$$K_{fc} = 0.267 \ln(f_c) - 0.000154 f_c - 0.723 \quad (\text{ec. 5.1})$$

$$C = K_p + K_v + K_{fc} \quad (\text{ec. 5.2})$$

$$I = 0.88 * C * P \text{ (ec. 5.3)}$$

Donde:

I: Infiltración mensual (mm/mes).

C: Coeficiente de infiltración.

P: Precipitación (mm/mes).

$K_p$  : Fracción que infiltra por efecto de la pendiente del terreno. (Valores propuestos en la metodología).

$K_v$  : Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal. (Valores propuestos en la metodología de acuerdo al tipo de uso del suelo).

$K_{fc}$  : Fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo. (Calculado a partir de la capacidad de infiltración básica del suelo).

$f_c$  : Infiltración básica del suelo (mm/día).

Se determinan los coeficientes de infiltración a partir de la sumatoria de cada uno de los parámetros asignados.

Los valores de precipitación mensual son evaluados de acuerdo a la ec. 5.3, donde se determina la cantidad de precipitación mensual que infiltra ( $P_i$ ).

Los valores de humedad inicial en el suelo ( $H_{si}$ ), se determina considerando que el suelo se encuentra a capacidad de campo (CC), en la zona radicular (PR) de la vegetación existente, y la densidad del suelo (DS) a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{si} = \frac{CC * PR * DS}{100} \text{ (ec. 5.4)}$$

El resultado obtenido a partir de la ec. 5.4, es utilizado únicamente en el mes con que se inicia el balance hídrico, en el caso analizado se ha iniciado con el mes de octubre, para tener la certeza que el suelo esté en el punto de capacidad de campo, considerando que las precipitaciones de los meses previos han provisto de suficiente humedad al suelo, para que se encuentre en dicha condición. En los meses siguientes, la humedad inicial corresponde a la húmeda final del mes anterior al que se va a analizar.

La determinación de la humedad final del suelo se calcula considerando los factores  $C_1$ (ec. 5.5) y  $C_2$ (ec. 5.6), los cuales se refieren al coeficiente antes de que ocurra la evapotranspiración real (ETR) y después de que ocurre la evapotranspiración real (ETR), respectivamente.

$$* C_1 = \frac{H_{si} - PM + P_i}{CC - PM} \text{ (ec. 5.5)}$$

donde:

PM: Punto de Marchitez.

\* Si  $C_1 > 1$ , entonces  $C_1 = 1$ .

$$C_2 = \frac{H_{si} - PM + P_i - (ETP * C_1)}{CC - PM} \text{ (ec. 5.6)}$$

La humedad disponible está condicionada por la humedad inicial del suelo más la precipitación que infiltra menos el punto de marchitez permanente (ec. 5.7).

$$HD = H_{si} - PM + P_i \text{ (ec. 5.7)}$$

La evapotranspiración real que ocurre durante el proceso se calcula a partir de los índices  $C_1$  y  $C_2$ .

$$ETR = \left( \frac{C_1 + C_2}{2} \right) ETP \text{ (ec. 5.8)}$$

Cálculo de humedad final:

$$H_{sf} = H_{si} + P_i - ETR \text{ (ec.5.9)}$$

Si la humedad final es mayor que la capacidad de campo, el valor que se le asigna es el de capacidad de campo, debido a que el suelo no puede retener mayor humedad, que la correspondiente a dicho punto. Por lo que la recarga potencial a los acuíferos se da cuando la humedad final es mayor a la capacidad de campo, y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_p = H_{si} - H_{sf} + P_i - ETR \text{ (ec. 5.10)}$$

La determinación de cada uno de los factores involucrados en el cálculo de la infiltración se realizó considerando:

- Las pendientes de la cuenca: a partir de las curvas de nivel a cada 10 m se generó el modelo de elevación digital del terreno a partir del cual se obtuvieron las pendientes y se clasificó de acuerdo a los rangos propuestos por la metodología antes mencionada (Tabla 3):

**Tabla 3. Determinación de  $K_p$  según el Rango de la Pendiente.**

0.02% - 0.3%	0.3
0.3% - 1.0%	0.2
1% - 2%	0.15
2% - 7%	0.1
Mayor de 7%	0.06

Fuente: Schosinsky, 2007.

Los índices de cobertura vegetal se generaron a partir del mapa de uso de suelo elaborado por el proyecto SHERPA. Los índices asignados se detallan a continuación (Tabla 4):

**Tabla 4. Índice K<sub>v</sub> Asociado a Usos de Suelo.**

Índice K <sub>v</sub> asociado a los usos de suelo presentes en la zona de estudio	
Uso de suelo	K <sub>v</sub>
Escombreras ,Vertederos y Rellenos Sanitarios	0.100
Aeropuertos	0.090
Bosques	0.200
Café	0.190
Caña de Azucar	0.100
Cultivos Anuales Asociados con Cultivos	0.150
Granos Basicos	0.100
Instalaciones Deportivas y Recreativas	0.100
Lagos,lagunas y lagunetas	0.000
Mosaico de Cultivos y Pastos	0.100
Otros Cultivos Irrigados	0.100
Pastos Cultivados	0.100
Pastos Naturales	0.100
Plantaciones de Bosques Monoespecifico	0.200
Playas,dunas y arenales	0.070
Praderas Pantanosas	0.050
Ríos	0.000
Roqueda,lavas	0.090
Tejido Urbano Continuo	0.053
Tejido Urbano Discontinuo	0.100
Tejido Urbano Precario	0.090
Tejido Urbano Progresivo	0.100
Terrenos Principalmente Agricola, pero con importante espacio de vegetación natural	0.150
Vegetación Arbustiva Bajas	0.200
Vegetación Esclerofila o Espinoza	0.090
Vegetación herbacea natural	0.100
Zonas Comerciales o Industriales	0.090
Zonas de Extracción Minera	0.090
Zonas en Construcción	0.090
Zonas Quemadas	0.100
Zonas Verdes Urbanas	0.210

Fuente: Junker, 2005. Schosinsky, 2007.

- El índice  $K_{fc}$  fue determinado a partir de la zonificación realizada considerando la capacidad de infiltración de los materiales presentes en la zona de estudio, para lo cual se realizaron 12 pruebas de infiltración (Figura 14) (Ver en Anexo Pruebas de Infiltración realizadas). La zonificación con base a los índices  $K_{fc}$ , se realizó considerando los diferentes miembros geológicos que afloran en la zona de estudio.

MAPA UBICACIÓN DE PUNTOS DE PRUEBAS DE INFILTRACIÓN PROYECTO EL CACAHUATIQUE

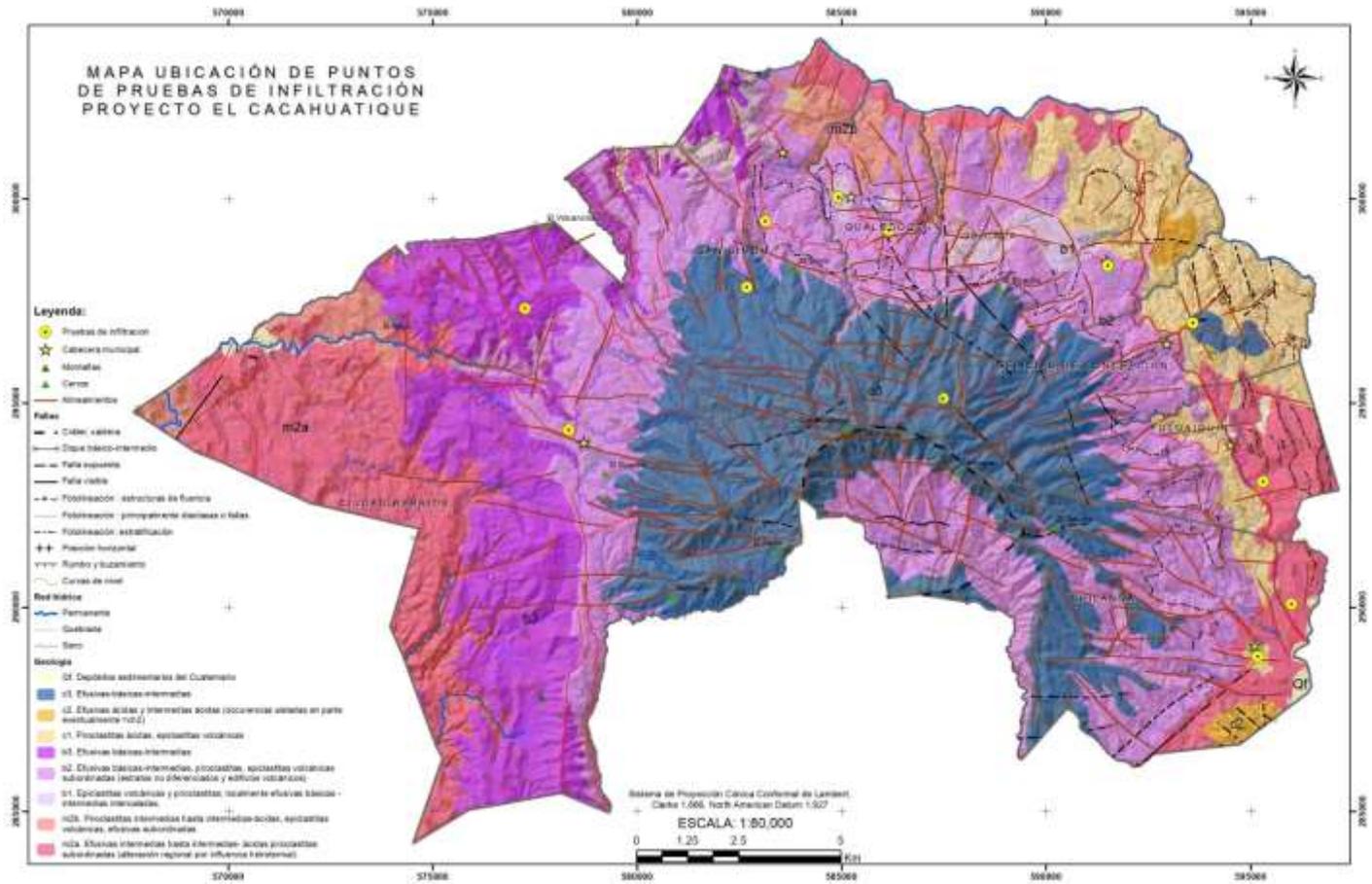


Figura 22. Ubicación de Pruebas de Infiltración según Miembro Geológico Predominante.

Una vez obtenido el valor de  $K_{fc}$  se determinó el coeficiente de infiltración “C” para cada una de las zonas establecidas para la realización del balance hídrico. La obtención de coeficiente de infiltración se obtuvo mediante la aplicación de la expresión (ec. 5.2), donde se considera que es la suma de los coeficientes  $K_p$ ,  $K_v$  y  $K_{fc}$ .

La determinación de la cantidad de agua que infiltra en una zona determinada depende principalmente del coeficiente de infiltración “C”, y se encuentra directamente relacionado con la precipitación que tiene lugar en el sitio.

Para la realización del balance hídrico de suelos se utilizaron los datos de la estación que caracteriza a las condiciones de la zona de estudio, siendo ésta la estación Z 02 (San Francisco Gotera) (Tabla 5):

**Tabla 5. Datos de Precipitación de la Estación Climatológica San Francisco Gotera (Z 02).**

PRECIPITACION EN MM													
ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Z 02	1	3	11	57	244	328	224	326	415	291	59	9	1968

Fuente: MARN.

Como se mostró anteriormente, la metodología empleada para el cálculo del balance hídrico de suelos, considera los siguientes factores:

- Evapotranspiración: se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

Para el cálculo de la recarga del acuífero proveniente de la precipitación, se consideró la evapotranspiración potencial de la Estación San Francisco Gotera (Z 02). Esta estación fue considerada, ya que dentro de la zona de estudio, es la que reporta datos de evapotranspiración potencial. Los registros de dicha estación se presentan en la Tabla 6:

**Tabla 6. Datos de Evapotranspiración Potencial de las Estaciones Climatológicas San Francisco Gotera (Z 02).**

EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL EN MM													
ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Z 02	158	162	198	201	189	165	177	173	150	146	141	148	2008

Fuente: MARN.

- Contenido de humedad del suelo: este aspecto considera el agua retenida en el suelo. Teniendo en cuenta dos puntos característicos para cada tipo de suelo: la capacidad de campo, y el punto de marchitez; los cuales representan la máxima humedad retenida por el suelo sometido a la fuerza de gravedad, y el mínimo contenido de humedad que el suelo puede tener, el cual representan el agua que no puede ser extraída del suelo por las plantas, respectivamente.

La zona de estudio fue zonificada considerando los siguientes aspectos:

- Coeficiente de infiltración: en este parámetro se consideran los factores  $K_v$ ,  $K_p$ , y  $K_{fc}$ . El cual es utilizado para el cálculo de la precipitación que infiltra en el suelo.
- 
- Precipitación promedio en la zona: considerando la distribución de la precipitación medida por la estación que se encuentra en la zona de estudio, se seleccionó ya que es representativa de las condiciones predominantes de dicha área.
- Tipo de suelo: Este factor se consideró nuevamente, debido a que en el cálculo de la recarga al acuífero se consideran los parámetros de densidad aparente, capacidad de campo, y punto de marchitez, propios para cada material. El método aplicado evalúa por separado la precipitación que infiltra (C) y el agua retenida en el suelo por lo que fue necesario considerarlo en los criterios de zonificación.

### 5.3.1. Realización de Pruebas de Infiltración.

El método empleado para la realización de la prueba de infiltración fue el de Porchet, el cual consiste en la hechura de un agujero en el suelo a ensayar, con un diámetro y profundidad determinada. Una vez realizado dicho agujero se procede a la saturación del mismo, vertiendo agua en su interior, de manera de alcanzar su punto de saturación. Por lo general, estas pruebas de infiltración se realizan en las épocas del año cuando se garantice que los suelos se encuentran totalmente saturados (en la estación lluviosa). Una vez que se consigue el nivel de saturación se procede a establecer un punto de referencia, por lo general es el nivel de la superficie del suelo; y luego se comienza a medir, con una cinta métrica, los descensos del nivel del agua del agujero cada cierta unidad de tiempo.

Para el presente caso, se realizó un agujero de aproximadamente de 20 cm de diámetro y con una profundidad aproximada de 40 cm (Figura 23), la cual resultó ser un poco mayor con la verificación de los datos obtenidos con el dispositivo de medición utilizado (MicroDiver). Luego se vertió agua en su interior para empezar su proceso de saturación; pero es importante mencionar que los suelos ya se encontraban con cierto grado de saturación por estar en plena estación lluviosa.



**Figura 23. Determinación de la Profundidad del Agujero.**

Posteriormente, se introdujo dentro del agujero el dispositivo que mediría las variaciones del nivel del agua con respecto al tiempo; el cual fue un MicroDiver con un nivel de precisión hasta las centésimas, que funciona midiendo la columna de agua que existe por encima del dispositivo y para lo cual hay necesidad de restarle la presión barométrica que existe en la zona. Es por ello que este dispositivo también cuenta con un barómetro que se encuentra en la antena que queda en la superficie y que envía los datos vía inalámbricamente hacia la computadora (Figuras 24 y 25). El software que se utiliza para la lectura de los datos mediante este dispositivo es el Diver Office 2017.

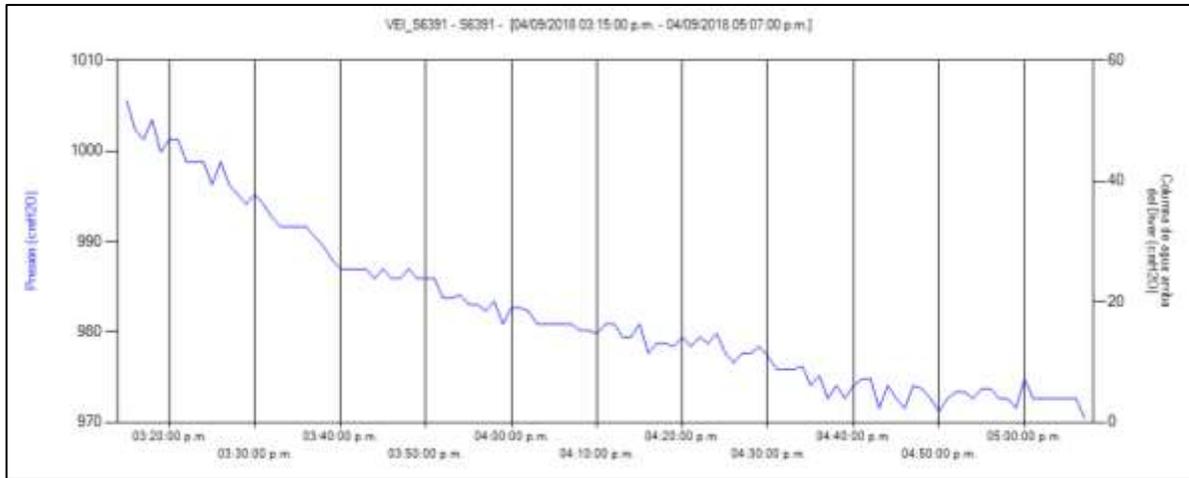


**Figura 24. Dispositivos que se Utilizaron para la Medición del Nivel del Agua en las Pruebas de Infiltración.**



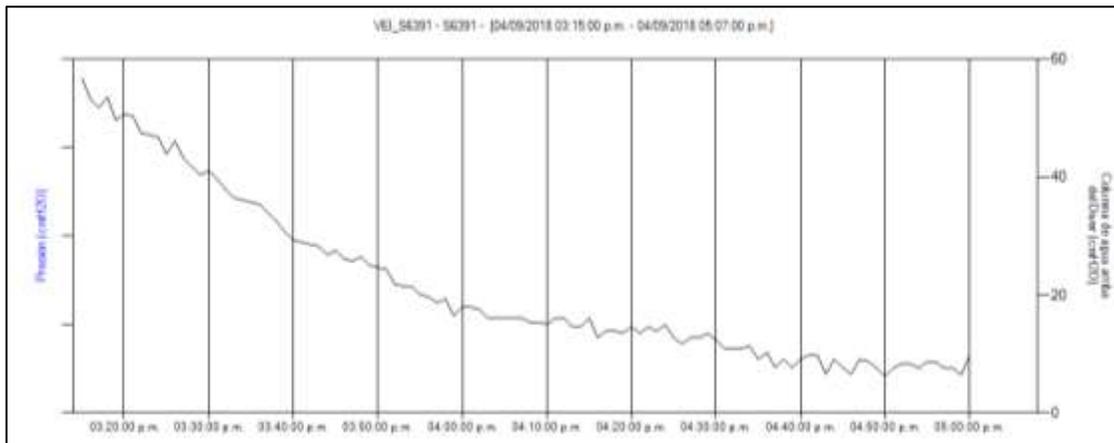
**Figura 25. Colocación de los Dispositivos que se Utilizaron para la Medición del Nivel del Agua en las Pruebas de Infiltración.**

Para el inicio de las pruebas de infiltración realizadas se tuvo un proceso previo de sobresaturación por aproximadamente 30 min, para luego introducir el dispositivo MicroDiver para la toma de datos del nivel del agua, con una frecuencia de 1 minuto. Una vez finalizada la prueba, la primera gráfica obtenida es la de la presión (columna de agua arriba del dispositivo + presión barométrica) según se muestra en la Figura 26.



**Figura 26. Gráfica de la Presión (cm H<sub>2</sub>O) vs Tiempo Acumulado.**

Posteriormente, a los datos de la gráfica anteriormente obtenida se le realiza la compensación barométrica; es decir, se le resta presión atmosférica captada en la zona durante el desarrollo de la prueba, y se obtiene la gráfica de la columna de agua arriba del dispositivo (datos compensados), según se muestra en la Figura 27.

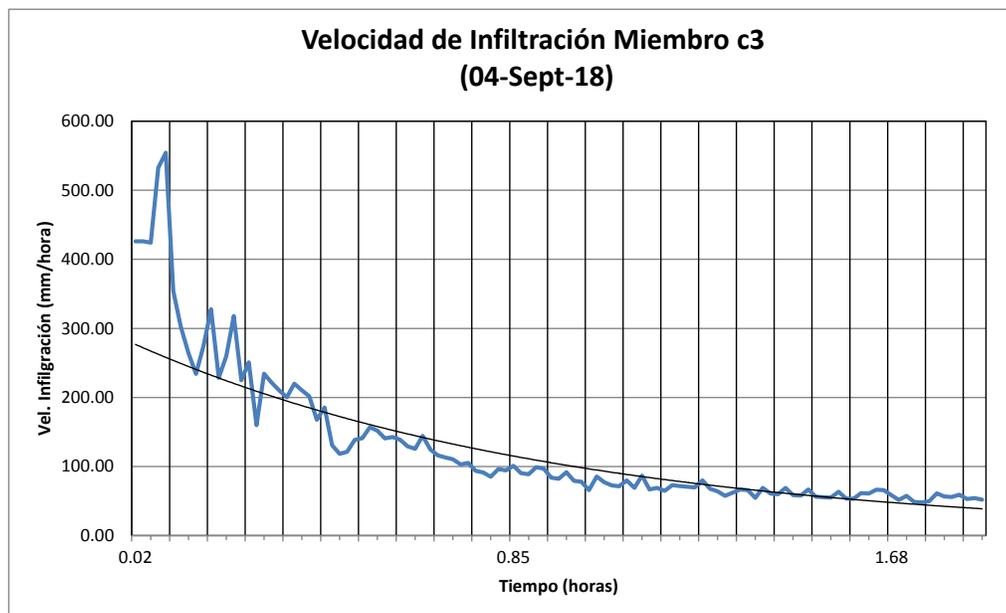


**Figura 27. Gráfica de la Columna de Agua Arriba del Diver (cm H<sub>2</sub>O) vs Tiempo Acumulado.**

Con los datos del nivel del agua ya compensados (referenciados al nivel del suelo) y el tiempo acumulado, se obtiene la velocidad de infiltración ya sea en unidades de cm/min,

mm/hr, mm/día; siendo esta última unidad la que se utiliza para la obtención del factor de infiltración básica ( $f_c$ )<sup>4</sup>, el cual es el dato necesario para la obtención del Coeficiente de Infiltración por Textura de Suelo ( $K_{fc}$ ) en el Balance Hídrico Específico de Suelo según el Método de Schosinsky 2007 (Figura 28).

De los datos anteriores se puede obtener la gráfica de la velocidad de infiltración con respecto al tiempo acumulado durante la prueba (en horas). De esta gráfica puede apreciarse (en la línea de tendencia) que al término de transcurrida la prueba, la velocidad de infiltración tiende a mantenerse constante; sin embargo podrá seguir bajando un poco más hasta su punto de saturación, pero los descensos serán mucho menores.



**Figura 28. Determinación del Factor de Infiltración Básica.**

<sup>4</sup> El valor de  $f_c$  corresponde a la permeabilidad del suelo en condiciones saturadas, en los primeros 30 centímetros de profundidad por considerar que es el espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia (en suelos profundos esta profundidad puede exceder los 30 cm). Este valor está correlacionado con la textura de suelo.

#### 5.4. Cálculo de la Recarga Hídrica Potencial.

Una vez obtenidos los valores de precipitación efectiva, evapotranspiración potencial y los contenidos de humedad (capacidad de campo y punto de marchitez), se procedió al cálculo de la recarga hídrica potencial de cada miembro geológico predominante identificado, la cual es producida por infiltración directa de la precipitación a través del subsuelo y con la interrelación de los alineamientos o fallamientos geológicos de la zona de estudio.

El balance hídrico utilizado se basa en el método de Penman y Grindley, considerando una variación lineal de la evapotranspiración potencial con respecto a la evapotranspiración real. Esta relación establece que a medida que el contenido de humedad del suelo se aproxima a su punto de marchitez, se incrementa, para las plantas, la dificultad de obtener agua del suelo a través de las raíces, por lo que las plantas cierran sus estomas con el fin de guardar humedad, es decir que existe menos evapotranspiración.

El detalle de los datos característicos de recarga hídrica para cada uno de los miembros geológicos identificados se presenta en la Tabla 7:

**Tabla 7. Datos Característico de Recarga Hídrica Potencial en las Zonas Identificadas.**

Miembro Geológico	C	Recarga (mm/año)
Q'f	0.876	434.28
c3, c1	1.0	592.52
b3	0.651	127.97
b2	0.876	434.28
b1	0.879	432.23
m2a, m2b	0.569	68.60
Fallas locales	1.0	592.52

La recarga hídrica ocurre principalmente durante los meses de julio a octubre. La distribución de la recarga mensualmente se encuentra detallada en los balances hídricos de suelo de cada una de las zonas identificadas que se presentan en Anexos. El mapa de recarga hídrica potencial resultante de toda la zona de estudio se muestra en la Figura 29; mientras que los correspondientes a cada uno de los municipios se presentan en las Figuras 30, 31, 32, 33, 34, 35 y 36.

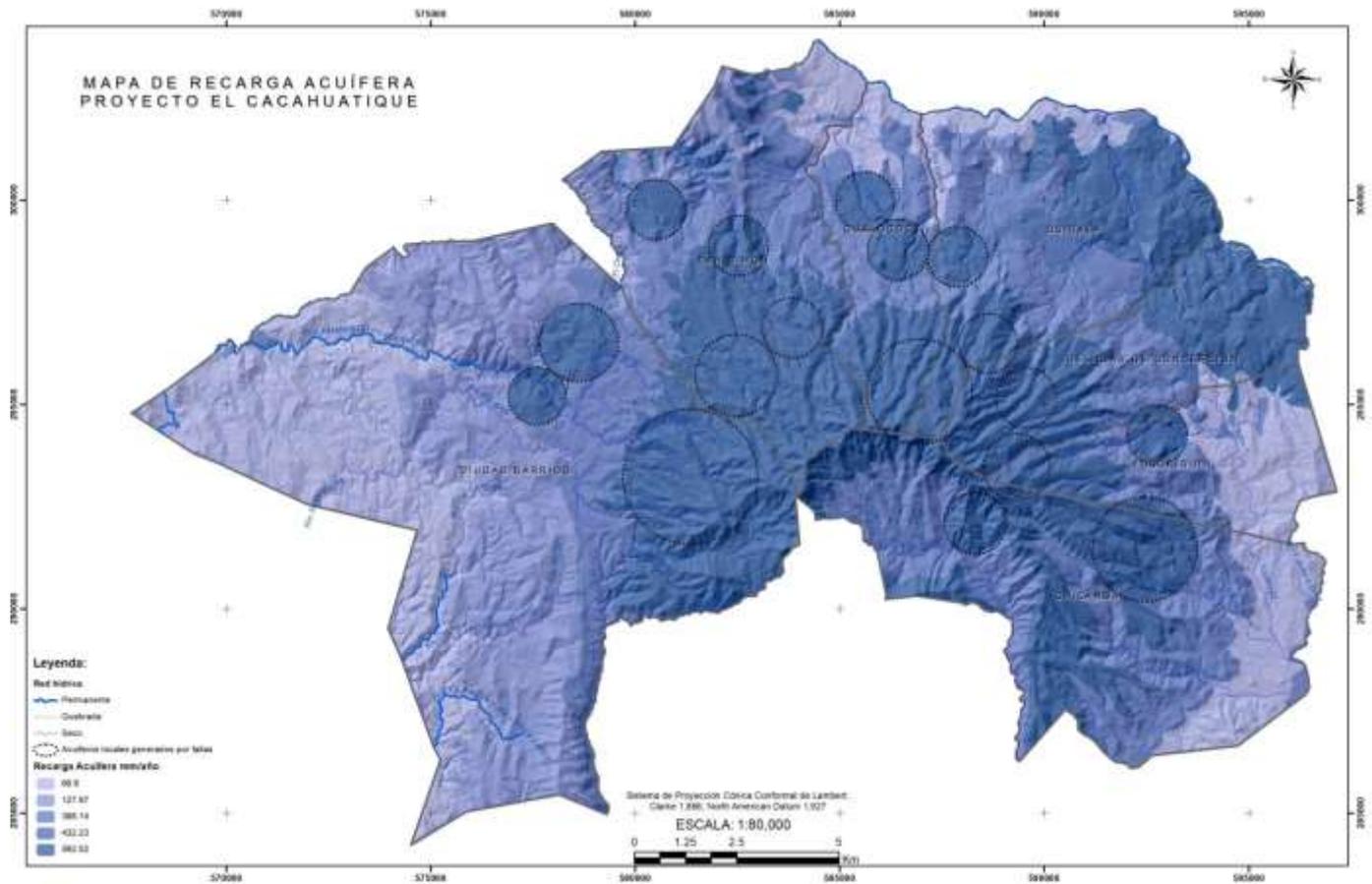


Figura 29. Mapa de Recarga Hídrica Potencial de la Zona de Estudio.

Del mapa de recarga hídrica potencial presentado anteriormente, se puede determinar que la zona alta del Cerro Cacahuatique constituye el área de recarga hídrica regional más importante, y de donde se general los principales flujos subterráneos que se

orientan a través de sus faldas. Sin embargo, las zonas determinadas por los acuíferos locales generados por fallas geológicas (alineamientos) también constituyen importantes zonas de recarga hídrica local, de donde se manifiestan o afloran la mayor parte de los manantiales identificados o inventariados que abastecen a los principales sistemas de abastecimiento de agua de los municipios que conforma el área norte del Cerro Cacahuatique. Por lo que, estas zonas definidas los alineamientos o fallamientos geológicos denominados “acuíferos locales generados por fallas geológicas” deberían ser las primeras zonas a proteger o a conservar, para asegurar el abastecimiento sostenible de agua de cada uno de los municipios.

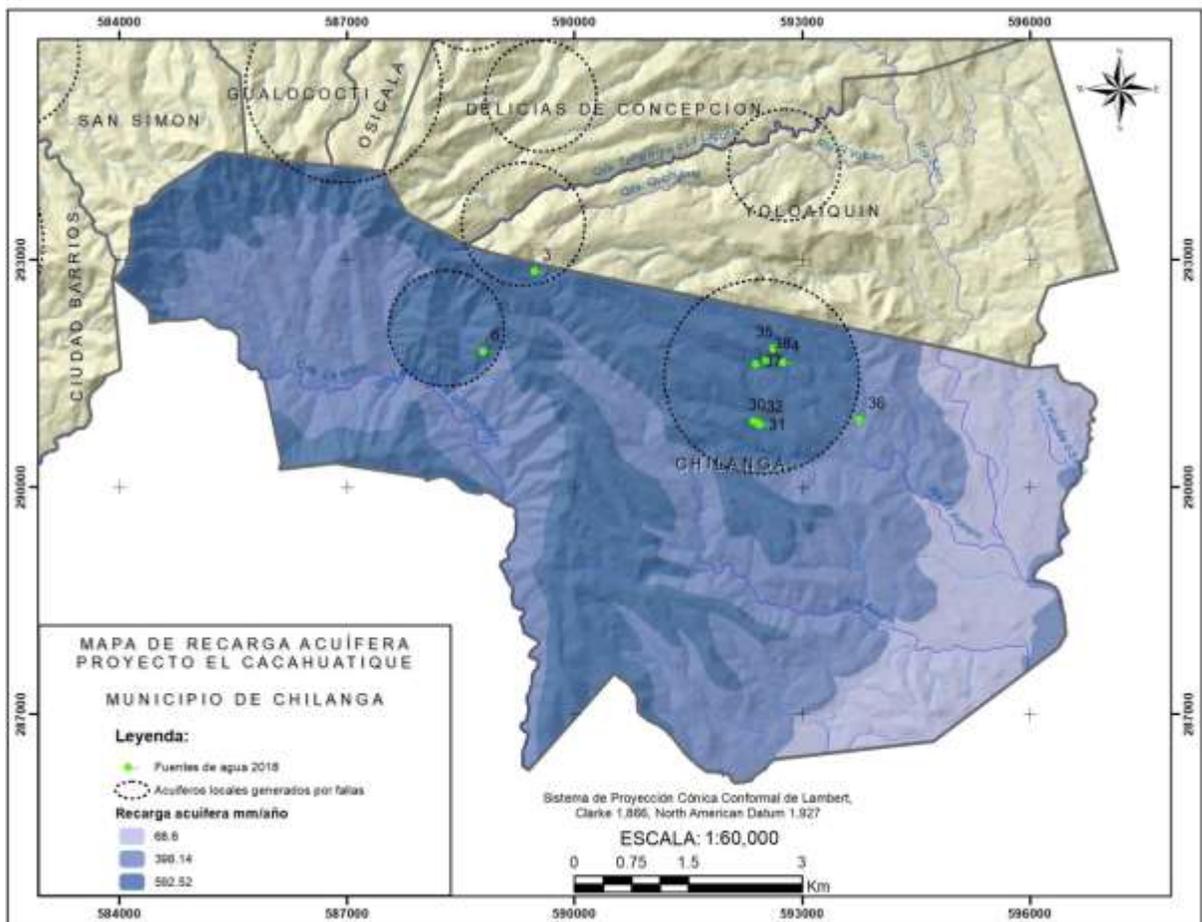


Figura 30. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Chilanga.

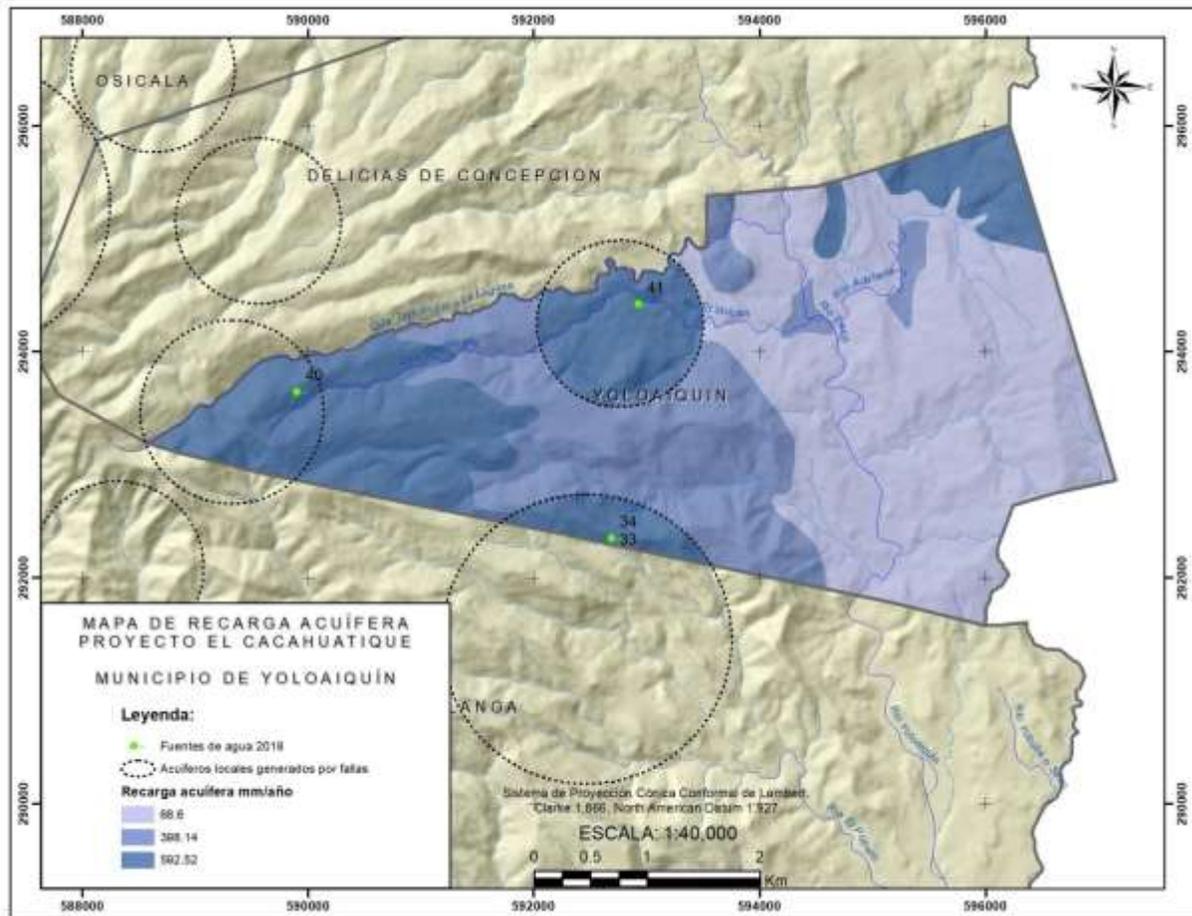


Figura 31. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Yoloaiquín.

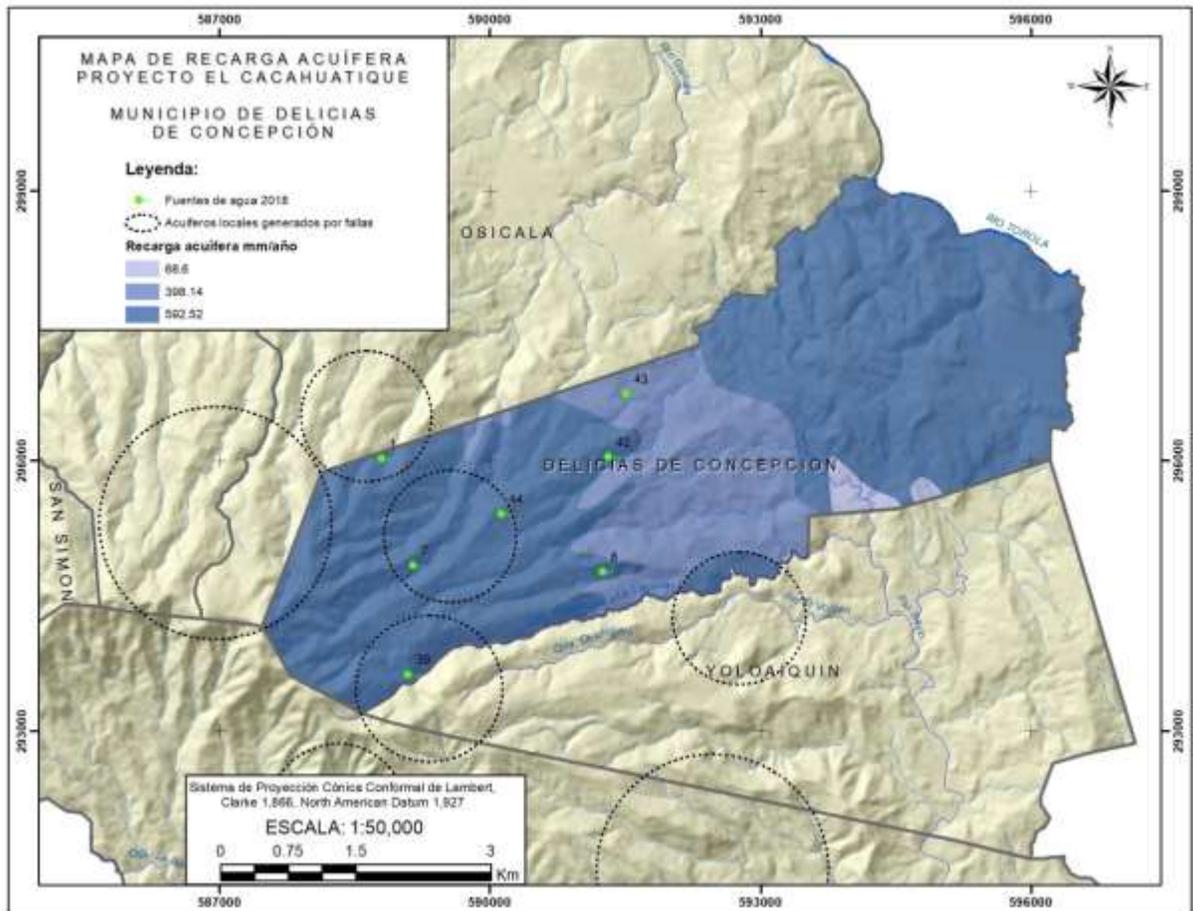


Figura 32. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Delicias de Concepción.

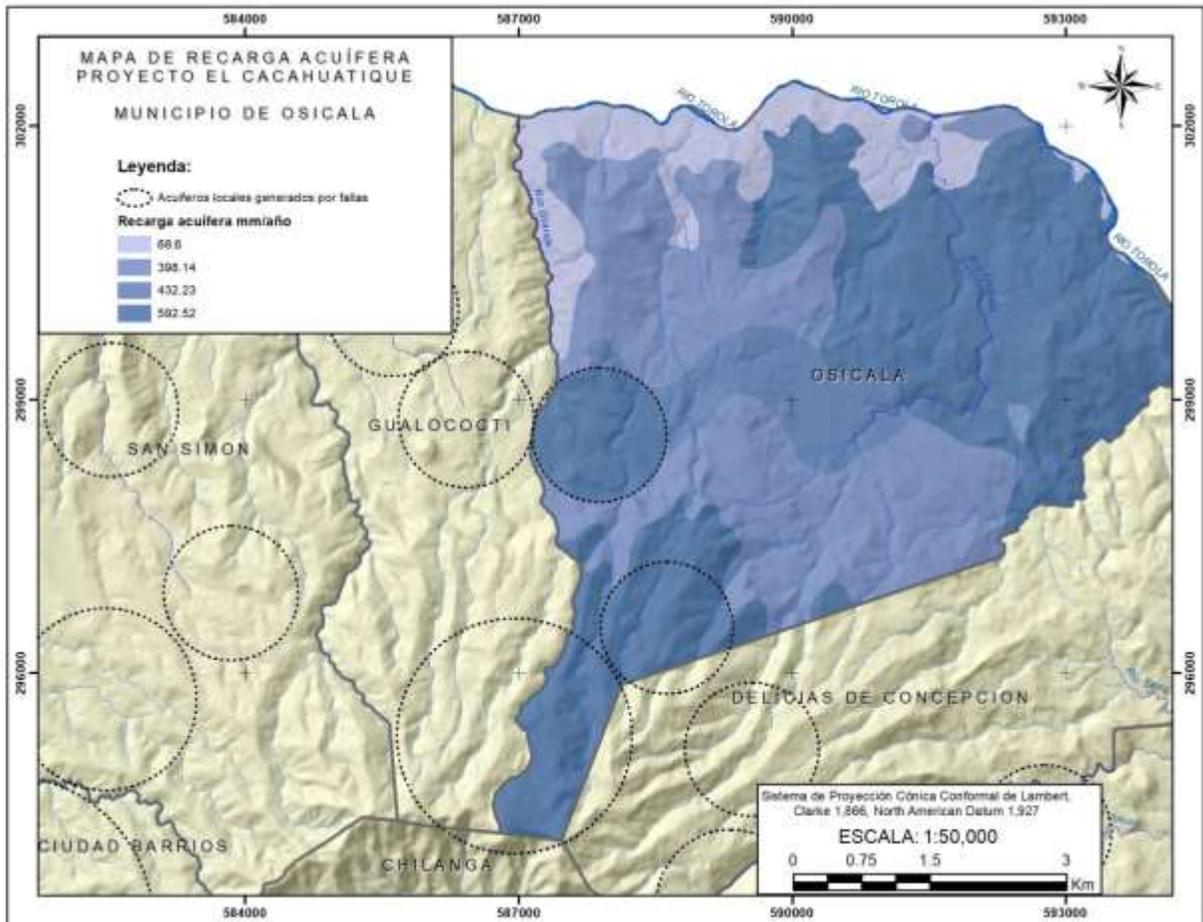


Figura 33. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Osicala.

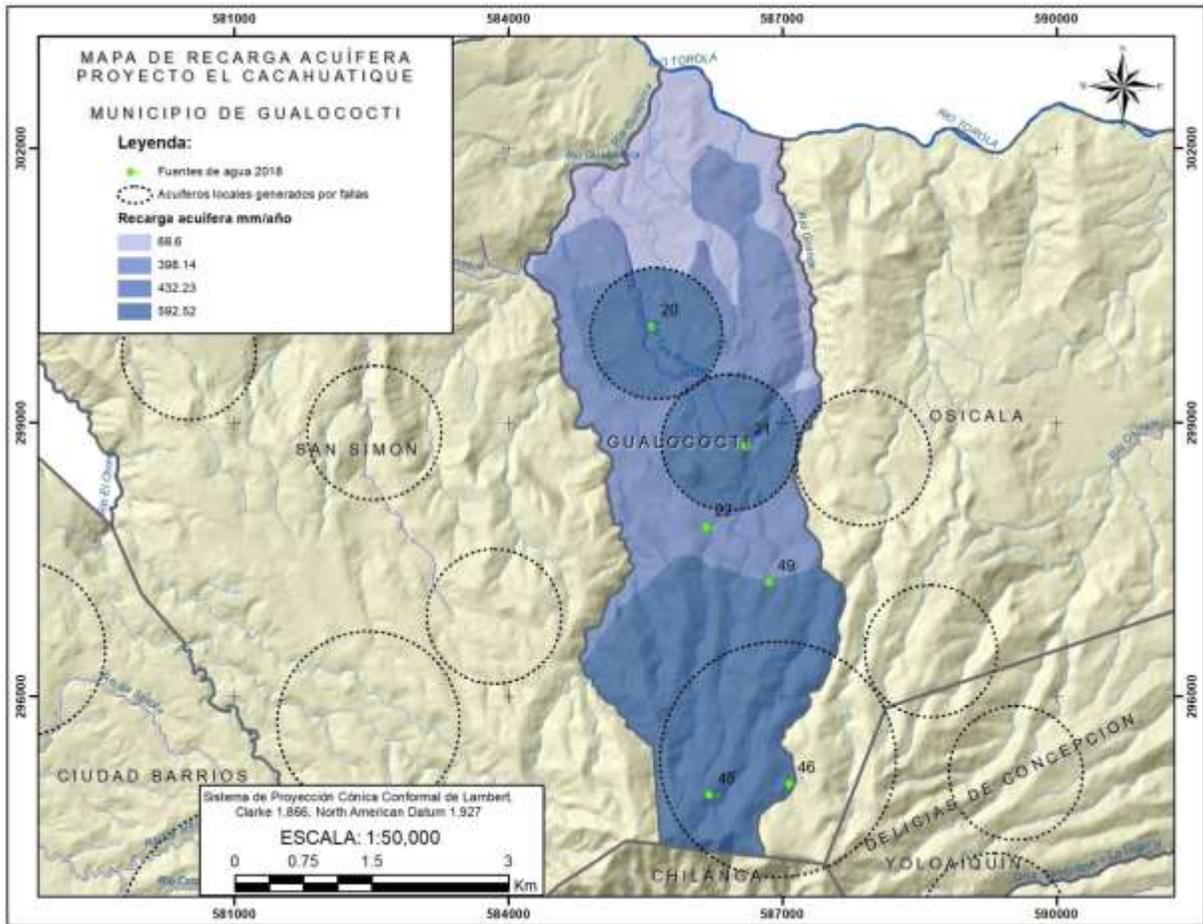


Figura 34. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Gualococti.

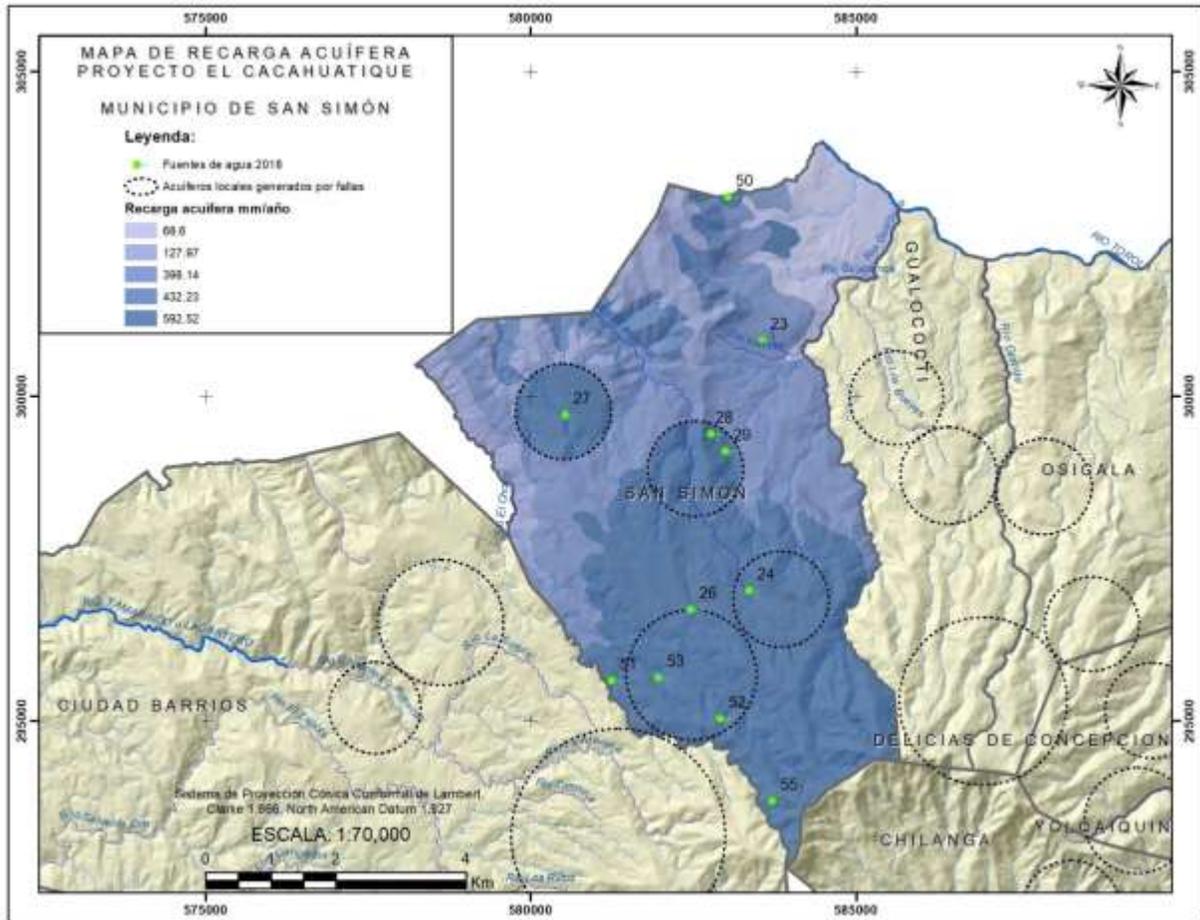


Figura 35. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de San Simón.

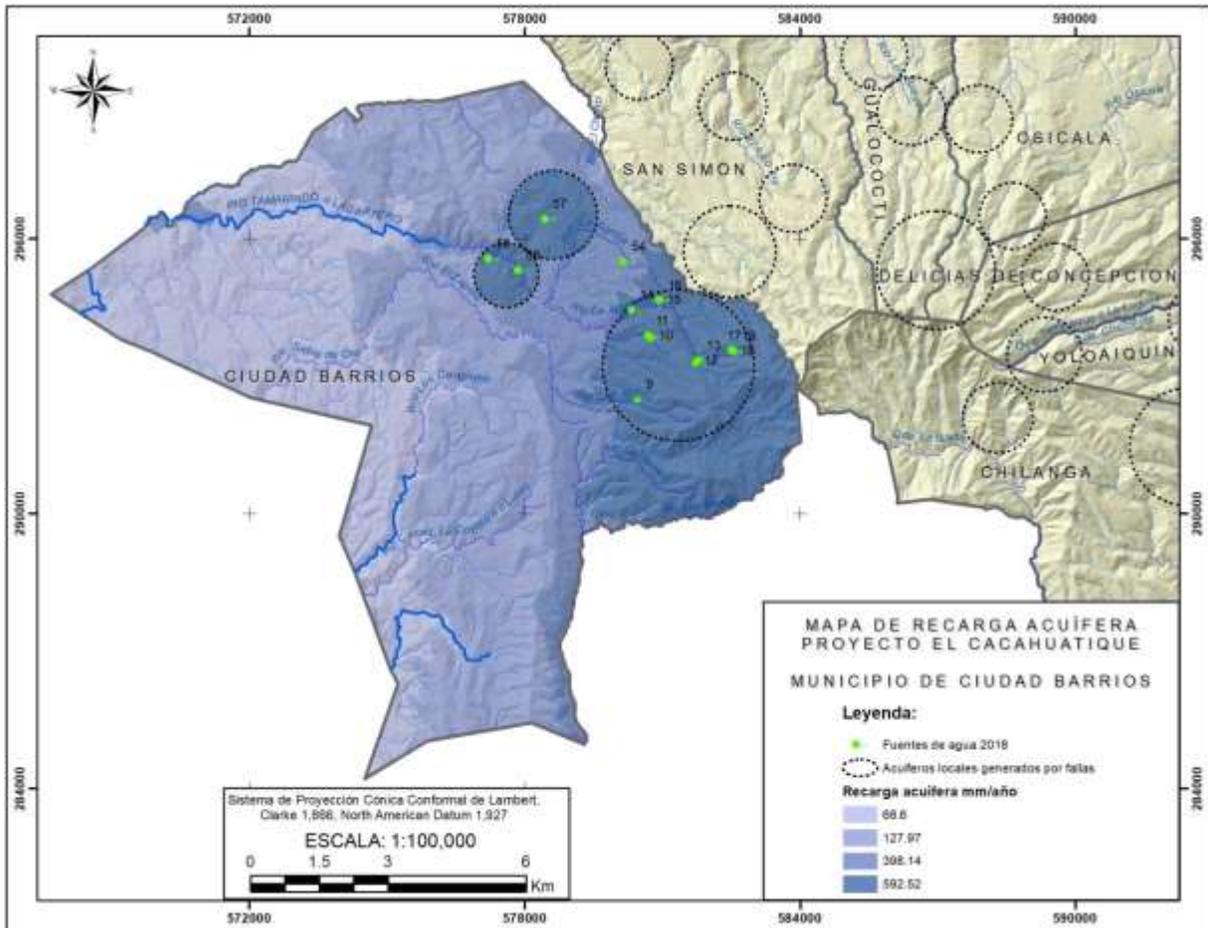


Figura 36. Mapa de Recarga Hídrica Potencial del Municipio de Ciudad Barrios.

## 5.5 Lineamientos para la Delimitación de Areas de Protección de las Fuentes de Agua.

Las áreas de protección de las fuentes de agua deben ser delimitadas para determinarles especial vigilancia contra la contaminación. La proximidad a las fuentes de agua de ciertas actividades sobre el terreno es un factor clave que influye en el peligro de contaminación de las aguas subterráneas, la cual depende de dos situaciones (Foster, S. et al, 2002):

- ✓ Si la actividad está ubicada subsuperficialmente en el área de captura de esa fuente de abastecimiento.
- ✓ Del tiempo de flujo horizontal en la zona saturada del acuífero desde la ubicación de la actividad hasta el punto de extracción de la fuente de abastecimiento.

Las áreas de protección de las fuentes (APF) deben de dar protección contra:

- ✓ Contaminantes que decaen con el tiempo, donde el tiempo de residencia subsuperficial es la mejor medida de protección.
- ✓ Contaminantes no degradables, donde se debe de considerar la dilución que depende de la trayectoria del flujo.

Se pueden establecer una serie de zonas generalmente concéntricas definidas superficialmente en torno a la fuente de abastecimiento de agua subterránea, mediante el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas locales y las propias características de la fuente. Sin embargo, de estas zonas, las dos más importantes para fuentes de agua son las siguientes (Foster, S., et al, 2002).

**a) Area Total de Captura de la Fuente.**

La zona de protección más exterior que puede ser definida para una fuente individual es su área de captura de la recarga (o área de aporte). Este es el perímetro en el que toda la recarga del acuífero (proveniente de la precipitación y/o cursos de agua superficiales) será captada por la fuente de abastecimiento de agua en consideración. Las áreas de captura de la recarga son muy importantes no solo para la protección de la calidad sino también en términos de manejo del recurso, y en situaciones de explotación intensiva del agua subterránea se podrían usar como áreas de conservación (o reserva) del recurso para abastecimiento de agua potable.

La zona total de captura se determina realmente considerando el balance de agua y geoméricamente por medio de las trayectorias de flujo subterráneo. Esta es la zona que provee un caudal de explotación protegido a largo plazo. Así, si se asumen que el sistema de agua subterránea está en régimen estacionario (como normalmente ocurre) el área de esta zona estará determinada por la tasa de recarga de agua subterránea promedio a largo plazo. Sin embargo, se debe reconocer que en sequías prolongadas (cuando la recarga de agua subterránea es menor que el valor promedio) el área de captura real será mayor que la protegida.

**b) Area de Protección Microbiológica.**

La función de la delimitación de esta zona es para prevenir la ingestión de agua subterránea contaminada con bacterias, virus y parásitos patógenos. Estos ingresan a los acuíferos someros desde tanques sépticos, letrinas, drenajes o cursos de aguas superficiales contaminados, etc. Las fuentes de agua son particularmente propensas a este tipo de contaminación. Sin embargo, en casi todas las formaciones excepto en las más vulnerables, la capacidad de atenuación natural de la zona no saturada o las capas semiconfinantes confieren una protección al acuífero contra la contaminación que se dirige hacia él.

Una zona de protección interior, ha sido ampliamente usada para proteger contra las actividades que potencialmente pueden descargar parásitos, bacterias y virus patógenos, tales como el derrame de aguas residuales y cloacales en zonas agrícolas. Esta zona de protección se determina en función de la distancia equivalente a un tiempo de flujo horizontal promedio especificado en la zona saturada del acuífero. Sin embargo, el tiempo de flujo real adoptado ha variado significativamente varias veces (de 10 a 400 días) en diferentes países y diferentes épocas.

Se establece que la distancia de viaje horizontal de los patógenos en la zona saturada está gobernada principalmente por la velocidad de escurrimiento del agua subterránea. En casos reportados y registrados de contaminación hídrica, que luego resultaron en epidemias de enfermedades de transmisión hídrica, la separación horizontal entre la fuente de abastecimiento de agua subterránea y la fuente de contaminación patogénica comprobada fue (como máximo) la distancia recorrida por el agua subterránea en 20 días en el correspondiente régimen de flujo del acuífero, a pesar que se conoce que los patógenos resistentes son capaces de sobrevivir en el subsuelo por 400 días o más. Es así, que se confirmó que la curva isócrona correspondiente a los 50 días es una base razonable para definir dicha zona.

Este perímetro de protección es tal vez el más importante de todos en términos de significancia para la salud pública y porque usualmente es de reducido tamaño y resulta más fácil implementarlo y hacerlo valer.

Por otra parte, diversos estudios han demostrado que en acuíferos fisurados, como los del presente estudio (que tienen frecuentemente propiedades hidráulicas muy heterogéneas) es prudente establecer un criterio límite de **50 metros de radio**.

## VI. CONCLUSIONES

### 6.1 Conclusiones.

Entre las conclusiones del presente estudio se pueden destacar las siguientes:

- a) En el caso particular de la zona de estudio, las características hidrogeológicas están determinadas, en gran medida, por los fenómenos tectónico-volcánicos y los procesos erosivos que han afectado a la zona. Principalmente la zona se ve condicionada por la ocurrencia de los flujos subterráneos mediante el almacenamiento en materiales volcánicos fisurados, circundados por estratos impermeables con cierto grado de fracturamiento que tienen una orientación NO-SE, NE-SO y O-E, lo cual establece el agua subterránea tenga su ocurrencia a través el afloramiento de manantiales.
- b) Entre las principales unidades hidrogeológicas identificadas en la zona de estudio, se establecen a las siguientes: a) Unidad Acuífero Volcánico Figurado de Extensión Limitada y Mediana Producción, b) Unidad Acuíferos Locales Generados por Sistemas de Fallas, c) Unidad Acuíferos Locales de Extensión Limitada y de Productividad Mediana a Baja, y d) Unidad Rocas No Acuíferas.
- c) En la zona de estudio puede identificarse dos sistemas de flujo predominantes, el primero de ellos, del tipo volcánico fisurado constituido principalmente por flujos de lavas andesíticas y basálticas, localizado en la parte alta y en las faldas del sector norte del Cerro Cacahuatique; y el segundo consistente en pequeños acuíferos generados por el sistema de fallas localizados en la zona de estudio.
- d) El modelo hidrogeológico conceptual para el primer sistema, consiste en un acuífero volcánico fisurado de extensión limitada y mediana producción constituido por flujos de lavas andesíticas y basálticas, localizado en la parte alta y en las faldas del Cerro

Cacahuatique. Dicho sistema puede generar caudales de explotación que no superan los 10 l/s.

- e) También en la zona de estudio, se encuentran pequeños acuíferos locales que se han generado por el fallamiento existente sobre la Unidad No Acuífera. Estos acuíferos se identifican por el afloramiento de manantiales que generan caudales de moderados a bajos, en un rango que varía de 1 a 5 l/s. El flujo de agua en medios permeables por fisuración, no implica necesariamente la ausencia de porosidad, sino que se puede dar una combinación entre las fracturas y los poros presentes en la roca, y en donde cada propiedad puede actuar de manera independiente o complementaria una de la otra.
- f) La ocurrencia del agua subterránea en medios fracturados también se ve afectada por ciertas características del medio como por ejemplo: la longitud, ancho y localización de las fracturas y la interconexión entre las mismas; ya que la posibilidad de encontrar agua aumenta cuando las fracturas están interconectadas formando una red; y la cantidad de material que pueda obstruir el paso del agua a través de las grietas.
- g) Para una mejor comprensión del potencial hidrogeológico de los alineamientos (fallas geológicas identificadas) se realizó una interrelación entre cada alineamiento y las fuentes de agua presentes en la zona de estudio; lo cual se obtuvo al procesar e interpretar la imagen satelital Sentinel 2, en donde se determinó que la mayoría de manantiales del área de interés, perfectamente siguen el patrón de los alineamientos o fallamientos geológicos presentes.
- h) De igual manera, para poder identificar la dirección y orientación del flujo subterránea, se utilizaron los parámetros de conductividad eléctrica (CE) y/o sólidos disueltos totales (SDT) obtenidos en campo; ya que al identificar que una serie de alineamientos se correlacionaban con varios manantiales de un área específica, el aumento de la conductividad eléctrica y/o los sólidos disueltos totales indican un patrón de disolución de

minerales o un transporte del flujo de agua de una zona determinada. En vista a esto puede identificarse de donde proviene el agua y hacia donde se dirige. Esta secuencia logra determinar las líneas de flujo, las cuales ayudaron a delimitar específicamente las zonas de recarga hídrica para una serie de manantiales identificados en la zona de estudio

- i) En la zona de estudio se identificaron tres fuentes específicas, las cuales presentaban gran caudal, en comparación con la mayoría de los manantiales presentes en la zona de estudio; siendo estos Fuente El Borbollón y Fuente ENDESA del Municipio de Chilanga, con caudales de 18.30 y 12.83 l/s respectivamente, y la Fuente Comunidad Tepenoguaste en el Municipio de Ciudad Barrios, con un caudal de 57 l/s; las cuales, además de la correlación con alineamientos geológicos de la zona pueden estar interconectados con flujos regionales provenientes de la parte alta del Cerro Cacahuatique o con un alineamiento geológico mayor.
  
- j) Del mapa de recarga hídrica potencial obtenido se puede determinar que la zona alta del Cerro Cacahuatique constituye el área de recarga hídrica regional más importante, y de donde se general los principales flujos subterráneos que se orientan a través de sus faldas. Sin embargo, las zonas determinadas por los acuíferos locales generados por fallas geológicas (alineamientos) también constituyen importantes zonas de recarga hídrica local, de donde se manifiestan o afloran la mayor parte de los manantiales identificados o inventariados que abastecen a los principales sistemas de abastecimiento de agua de los municipios que conforma el área norte del Cerro Cacahuatique. Por lo que, estas zonas definidas los alineamientos o fallamientos geológicos denominados “acuíferos locales generados por fallas geológicas” deberían ser las primeras zonas a proteger o a conservar, para asegurar el abastecimiento sostenible de agua de cada uno de los municipios.
  
- k) Las áreas de protección de las fuentes de agua deben ser delimitadas para determinarles especial vigilancia contra la contaminación. La proximidad a las fuentes de agua de ciertas actividades sobre el terreno es un factor clave que influye en el peligro de contaminación

de las aguas subterráneas. Es por ello que diversos estudios han demostrado que en acuíferos fisurados, como los del presente estudio (que tienen frecuentemente propiedades hidráulicas muy heterogéneas) es prudente establecer un criterio límite de **50 metros de radio**.

## VII. BIBLIOGRAFIA

APARICIO, F. J., 1996. Fundamentos de Hidrología de Superficie, Editorial Limusa, México.

ARÉVALO, J. L., 2002. Diagnóstico Comunitario de Agua y Saneamiento Comunidad San Pedro, Municipio de Tecoluca, Cruz Roja Salvadoreña y Cruz Roja Española, El Salvador.

ANDA, Informes de Pozos de las Zonas que comprende la Microregión Tetralogía.

ANDA-UDES, 2007. Mapeo de los Recursos Hídricos en Cinco Microcuencas donde Existan Sistemas Descentralizados: Microregión Tetralogía, Zona de San Isidro, Zona de Nueva Concepción, Zona de Suchitoto y Zona de Armenia. El Salvador.

BAXTER, S., 1984, Léxico Estratigráfico de El Salvador, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, CEL, El Salvador.

CASTELLANOS, F et al, 1999. Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Río Agua Caliente-Turín, Departamento de Ahuachapán, Proyecto FIAS-ANDA-COSUDE.

CEL, 1996. Actualización del modelo Conceptual del Campo Geotérmico de Ahuachapán, Departamento de Ingeniería de Reservorios, CEL, Nueva San Salvador.

CHAVEZ, A., et al, 2004. Comportamiento del Flujo Subterráneo dentro del Complejo Volcánico Bálsamo, Región Hidrográfica "E", Trabajo de Graduación de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA, San Salvador.

CUSTODIO, E., et al, 1976. Hidrología Subterránea, Tomo I, Editorial Omega, Barcelona, España.

DUARTE, J. R., 1998. Estudio Hidrogeológico del Acuífero de Guluchapa, San Salvador, El Salvador, Tesis de Maestría en Manejo de Recursos Hídricos e Hidrogeología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

DUARTE, J. R., 1999. Tratamiento de Datos Hidrometeorológicos de los Campos Geotérmicos de Ahuachapán y Berlín, GESAL, Nueva San Salvador.

DUARTE, J. R., 2001. Estudio Hidrológico de la Zona de Cuyanausul, Campo Geotérmico de Ahuachapán, Geotérmica Salvadoreña GESAL, Nueva San Salvador.

DUARTE, J. R., 2002. Estudio Hidrogeológico de la Zona de la Comunidad San Pedro, Municipio de Tecoluca, Departamento de San Vicente, Cruz Roja Americana, San Salvador.

DUARTE, J. R., 2006. Estudio Hidrogeológico de la Zona El Papalón, Municipio de San Miguel, Departamento de San Miguel, Banco Salvadoreño, San Salvador.

FOSTER, S. et al, 2002. Protección de la Calidad del Agua Subterránea: Guía para Empresas de Agua, Autoridades Municipales y Agencias Ambientales. GW MATE. Banco Mundial

GUEVARA, J. et al, 2006. Reconocimiento Hidrogeológico de la Subcuenca del Río Acahuapa y de la Zona de la Desembocadura del Río Lempa, Departamento de San Vicente, Trabajo de Graduación para optar al Grado de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, UCA.

KELLGREN, N., 2002. Applicability of Remote Sensing Techniques to Groundwater Exploration in Semi-Arid Hard Rock Terrain- A Systematic Approach, Department of Geology, Chalmers University of Technology, Göttemberg, Suecia.

KOKUSAI KOGYO CO. LTD, 1997. Estudio para el Plan de Desarrollo Agrícola Integrado de la Cuenca del Río Jiboa en la República de El Salvador, Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), Ministerio de Agricultura y Ganadería, El Salvador.

MINISTERIO DE SALUD PUBLICA Y ASISTENCIA SOCIAL (MSPAS), 1999. Norma Salvadoreña Obligatoria para la Calidad del Agua Potable.

NÚÑEZ W., R., 1985. Estudios sobre Aguas Subterráneas, ANDA, El Salvador.

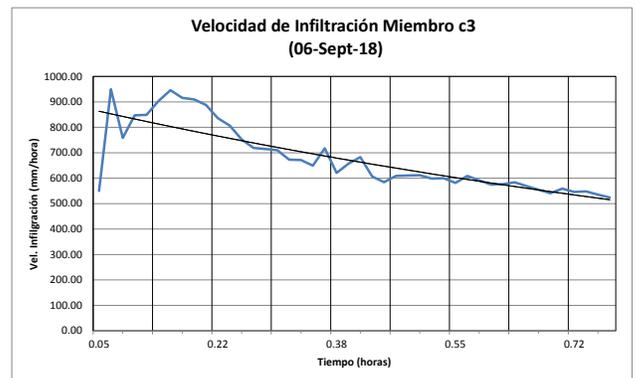
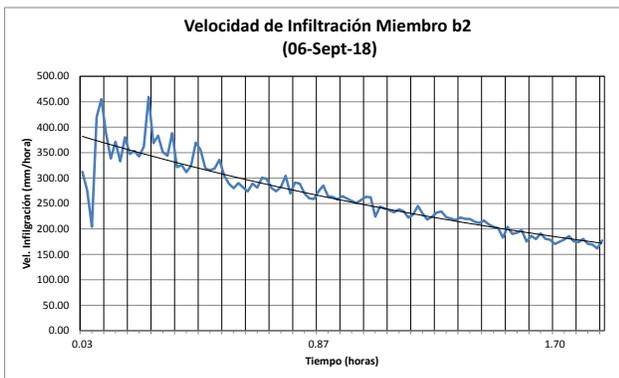
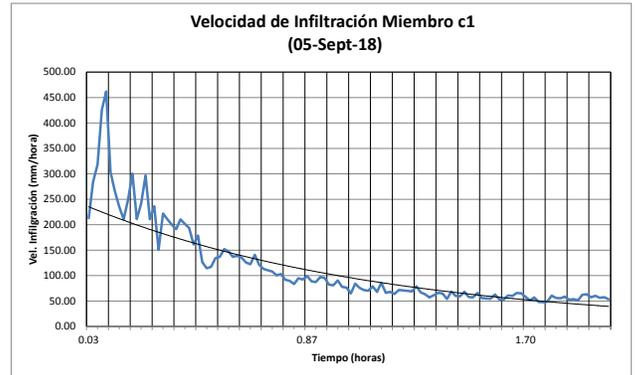
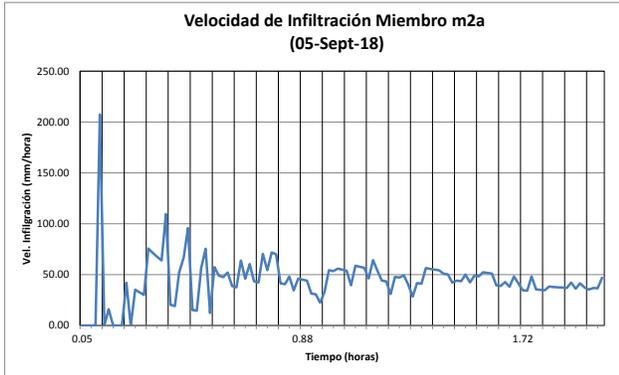
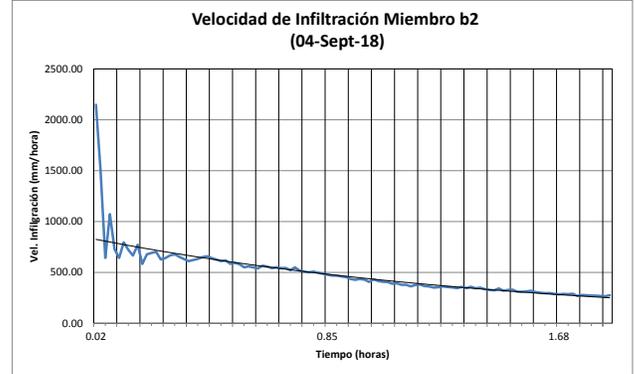
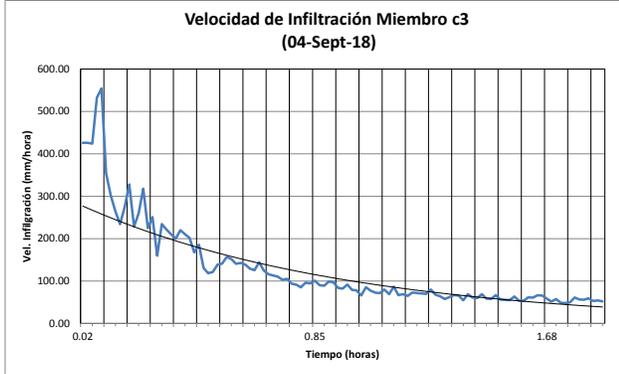
SNET, 2004. Regionalización de Caudales Máximos y Medios en El Salvador. El Salvador.

SINGHAL, B.B.S., et al, 1999. Applied Hydrogeology of fractured rocks, EUA

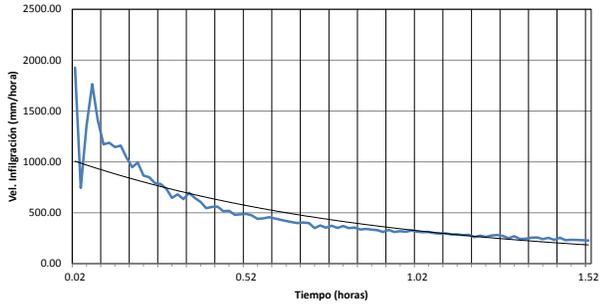
SORTO, J. M., 1989. Desarrollo de los Recursos Hidráulicos en El Salvador, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, El Salvador.

## VIII. ANEXOS

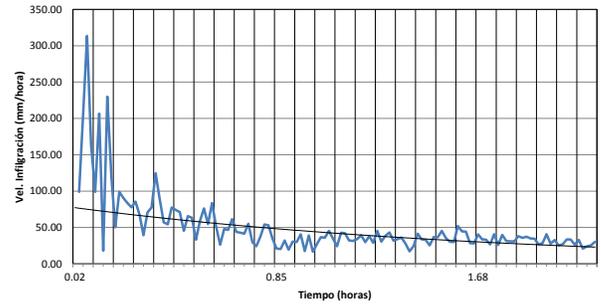
### 8.1 Pruebas de Infiltración



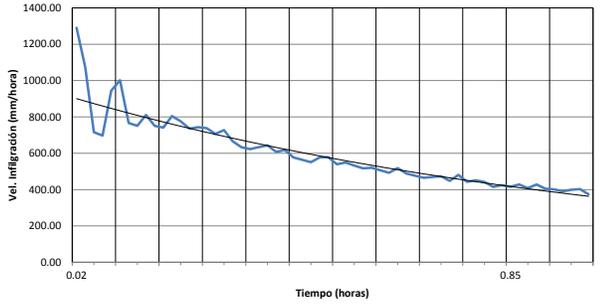
Velocidad de Infiltración Miembro c1  
(07-Sept-18)



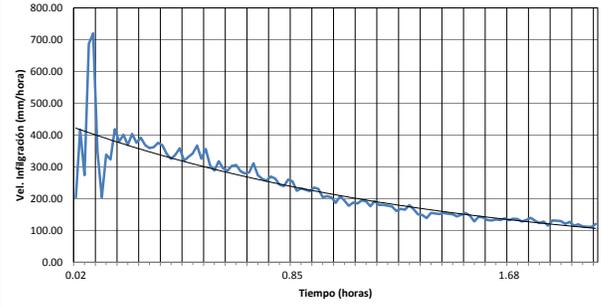
Velocidad de Infiltración Miembro b2  
(17-Sept-18)



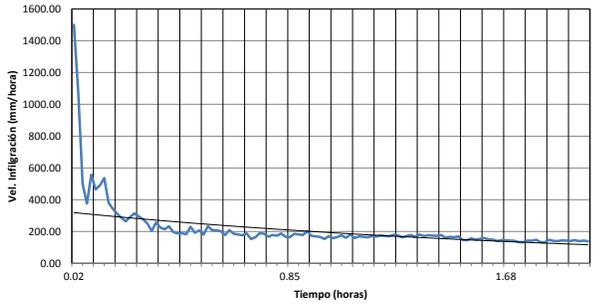
Velocidad de Infiltración Miembro b3  
(18-Sept-18)



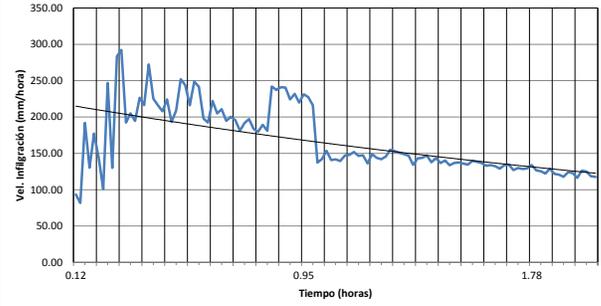
Velocidad de Infiltración Miembro b1  
(20-Sept-18)



Velocidad de Infiltración Miembro b2  
(20-Sept-18)



Velocidad de Infiltración Miembro m2a  
(21-Sept-18)



## **8.2 Balances Hídricos Específicos de Suelos.**

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Baja  
Fecha: Se-18

Textura de Suelo: c1

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	648.00		
Kp [0.01%]	0.15		
Kv [0.01%]	0.10		
Kfc [0.01%]	0.90574		
I [0.01%]	1		
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.60		
PR (mm)	500.00		
HSi (mm)	144.00		
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12		

	por peso	(%)	(mm)
CC	18.00		144.00
PM	8.00		64.00
(CC-PM)	10.00		80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.80	50.51	215.07	288.46	197.03	286.53	365.55	256.17	51.48	4.20	1720.81
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.89	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	
C1	0.06	0.00	0.07	0.63	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.89	0.06	5.80	50.51	215.07	368.46	277.03	366.53	445.55	336.17	131.48	65.18	
ETR (mm)	4.83	0.06	5.80	50.51	125.30	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	70.50	60.29	1128.29
HSf (mm)	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	68.89	
DCC (mm)	79.94	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.02	75.11	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	9.77	123.46	20.03	113.53	215.55	110.17	0.00	0.00	592.52
NR (mm)	233.11	241.94	272.20	230.49	63.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.52	162.82	1293.78

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Baja  
Fecha: Se-18

Textura de Suelo: m2a

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente ( ver léame)

Kv: Factor por vegetación ( ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	75.00
Kp [0.01%]	0.06
Kv [0.01%]	0.10
Kfc [0.01%]	0.41822
I [0.01%]	0.57822
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.60
PR (mm)	500.00
HSi (mm)	144.00
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	18.00	144.00
PM	8.00	64.00
(CC-PM)	10.00	80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	3.35	29.21	124.36	166.80	113.93	165.68	211.37	148.12	29.77	2.43	995.00
ESC (mm)	0.00	0.00	2.45	21.30	90.71	121.67	83.10	120.85	154.18	108.05	21.71	1.77	725.80
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	67.13	64.04	64.00	64.00	64.00	93.86	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	103.27	
C1	0.04	0.00	0.04	0.37	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.52	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.21	0.91	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	3.13	0.04	3.35	29.21	124.36	196.65	193.93	245.68	291.37	228.12	109.77	41.70	
ETR (mm)	3.09	0.04	3.35	29.21	94.50	115.14	107.23	165.08	150.00	146.00	70.50	38.57	922.71
HSf (mm)	64.04	64.00	64.00	64.00	93.86	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	103.27	67.13	
DCC (mm)	79.96	80.00	80.00	80.00	50.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.73	76.87	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.51	6.70	0.60	61.37	2.12	0.00	0.00	72.30
NR (mm)	234.87	241.96	274.65	251.79	144.64	49.86	69.77	7.92	0.00	0.00	111.23	186.30	1573.00

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Media

Fecha: Se-18

Textura de Suelo: b2

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente ( ver léame)

Kv: Factor por vegetación ( ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d] 200.00

Kp [0.01%] 0.06

Kv [0.01%] 0.10

Kfc [0.01%] 0.66085

I [0.01%] 0.82085

DS (g/cm<sup>3</sup>): 1.60

PR (mm) 500.00

HSi (mm) 144.00

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? 10

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 0.12

por peso

(%)

(mm)

CC 18.00 144.00

PM 8.00 64.00

(CC-PM) 10.00 80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	4.76	41.46	176.54	236.79	161.73	235.20	300.06	210.28	42.26	3.45	1412.53
ESC (mm)	0.00	0.00	1.04	9.05	38.53	51.68	35.30	51.33	65.49	45.89	9.22	0.75	308.28
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.14	64.05	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	115.76	
C1	0.05	0.00	0.06	0.52	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.69	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.81	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.14	0.05	4.76	41.46	176.54	316.79	241.73	315.20	380.06	290.28	122.26	55.20	
ETR (mm)	4.09	0.05	4.76	41.46	94.50	165.00	160.11	173.00	150.00	146.00	70.50	51.06	1060.54
HSf (mm)	64.05	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	115.76	68.14	
DCC (mm)	79.95	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.24	75.86	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	2.04	71.79	1.62	62.20	150.06	64.28	0.00	0.00	351.99
NR (mm)	233.86	241.95	273.24	239.54	94.50	0.00	16.89	0.00	0.00	0.00	98.74	172.80	1371.51

**BALANCE HIDRICO DE SUELOS**  
**Gunther Schosinsky**

**Zona de Estudio:** Media  
**Fecha:** Se-18

**Textura de Suelo:** b3

**Simbología**

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	100.00		
Kp [0.01%]	0.06		
Kv [0.01%]	0.10		
Kfc [0.01%]	0.49118		
I [0.01%]	0.65118		
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.60		
PR (mm)	500.00		
HSi (mm)	144.00		
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12		
		por peso (%)	(mm)
		CC	18.00 144.00
		PM	8.00 64.00
		(CC-PM)	10.00 80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	3.78	32.89	140.05	187.84	128.30	186.58	238.04	166.81	33.52	2.73	1120.56
ESC (mm)	0.00	0.00	2.02	17.62	75.02	100.62	68.73	99.95	127.51	89.36	17.96	1.47	600.25
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	67.43	64.04	64.00	64.00	64.00	109.55	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	107.02	
C1	0.04	0.00	0.05	0.41	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.39	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	3.43	0.04	3.78	32.89	140.05	233.39	208.30	266.58	318.04	246.81	113.52	45.76	
ETR (mm)	3.39	0.04	3.78	32.89	94.50	153.03	123.13	173.00	150.00	146.00	70.50	42.33	992.59
HSf (mm)	64.04	64.00	64.00	64.00	109.55	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	107.02	67.43	
DCC (mm)	79.96	80.00	80.00	80.00	34.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.98	76.57	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	5.17	13.58	88.04	20.81	0.00	0.00	127.97
NR (mm)	234.57	241.96	274.22	248.11	128.95	11.97	53.87	0.00	0.00	0.00	107.48	182.24	1483.37

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: **Baja**  
Fecha: **Se-18**

Textura de Suelo: **c1**

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	<b>600.00</b>		
Kp [0.01%]	<b>0.15</b>		
Kv [0.01%]	<b>0.10</b>		
Kfc [0.01%]	0.89258		
I [0.01%]	1		
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	<b>1.60</b>		
PR (mm)	<b>500.00</b>		
HSi (mm)	<b>144.00</b>		
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	<b>10</b>		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	<b>0.12</b>		

		por peso	
		(%)	(mm)
CC	<b>18.00</b>		144.00
PM	<b>8.00</b>		64.00
(CC-PM)	10.00		80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.80	50.51	215.07	288.46	197.03	286.53	365.55	256.17	51.48	4.20	1720.81
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.89	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	
C1	0.06	0.00	0.07	0.63	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.89	0.06	5.80	50.51	215.07	368.46	277.03	366.53	445.55	336.17	131.48	65.18	
ETR (mm)	4.83	0.06	5.80	50.51	125.30	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	70.50	60.29	1128.29
HSf (mm)	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	68.89	
DCC (mm)	79.94	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.02	75.11	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	9.77	123.46	20.03	113.53	215.55	110.17	0.00	0.00	592.52
NR (mm)	233.11	241.94	272.20	230.49	63.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.52	162.82	1293.78

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: **Media**

Fecha: **Se-18**

Textura de Suelo: **b1**

**Simbología**

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente ( ver léame)

Kv: Factor por vegetación ( ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d] **216.00**

Kp [0.01%] **0.10**

Kv [0.01%] **0.10**

Kfc [0.01%] 0.67894

I [0.01%] 0.87894

DS (g/cm<sup>3</sup>): **1.60**

PR (mm) **500.00**

HSi (mm) **144.00**

Nº de mes con que inicia HSi; 1,2,3...12? **10**

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 **0.12**

por peso

(%)

(mm)

CC **18.00** 144.00

PM **8.00** 64.00

(CC-PM) 10.00 80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.10	44.40	189.03	253.54	173.18	251.84	321.30	225.16	45.25	3.69	1512.48
ESC (mm)	0.00	0.00	0.70	6.12	26.04	34.92	23.85	34.69	44.26	31.01	6.23	0.51	208.33
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.38	64.05	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	118.75	
C1	0.05	0.00	0.06	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.95	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.38	0.05	5.10	44.40	189.03	333.54	253.18	331.84	401.30	305.16	125.25	58.44	
ETR (mm)	4.33	0.05	5.10	44.40	94.54	165.00	172.77	173.00	150.00	146.00	70.50	54.06	1079.75
HSf (mm)	64.05	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	118.75	68.38	
DCC (mm)	79.95	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.25	75.62	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	14.49	88.54	0.41	78.84	171.30	79.16	0.00	0.00	432.73
NR (mm)	233.62	241.95	272.90	236.60	94.46	0.00	4.23	0.00	0.00	0.00	95.75	169.56	1349.07

**BALANCE HIDRICO DE SUELOS**  
**Gunther Schosinsky**

**Zona de Estudio:** Media  
**Fecha:** Se-18

**Textura de Suelo:** b2

**Simbología**

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	210.00		
Kp [0.01%]	0.10		
Kv [0.01%]	0.09		
Kfc [0.01%]	0.67234		
I [0.01%]	0.86234		
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.60		
PR (mm)	500.00		
HSi (mm)	144.00		
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12		

		por peso	
		(%)	(mm)
CC	18.00		144.00
PM	8.00		64.00
(CC-PM)	10.00		80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.00	43.56	185.46	248.75	169.91	247.08	315.23	220.90	44.39	3.62	1483.92
ESC (mm)	0.00	0.00	0.80	6.95	29.61	39.71	27.12	39.44	50.32	35.26	7.09	0.58	236.89
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.31	64.05	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	117.89	
C1	0.05	0.00	0.06	0.54	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.72	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.31	0.05	5.00	43.56	185.46	328.75	249.91	327.08	395.23	300.90	124.39	57.51	
ETR (mm)	4.26	0.05	5.00	43.56	94.50	165.00	169.15	173.00	150.00	146.00	70.50	53.20	1074.23
HSf (mm)	64.05	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	117.89	68.31	
DCC (mm)	79.95	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.11	75.69	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	10.96	83.75	0.75	74.08	165.23	74.90	0.00	0.00	409.69
NR (mm)	233.69	241.95	273.00	237.44	94.50	0.00	7.85	0.00	0.00	0.00	96.61	170.49	1355.51

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: **Media**

Fecha: **Se-18**

Textura de Suelo: **b2**

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente ( ver léame)

Kv: Factor por vegetación ( ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de Lluvia

fc [mm/d]

240.00

Kp [0.01%]

0.10

Kv [0.01%]

0.10

Kfc [0.01%]

0.70337

I [0.01%]

0.90337

DS (g/cm<sup>3</sup>):

1.40

PR (mm)

500.00

HSi (mm)

161.00

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?

10

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1

0.12

por peso

(%)

(mm)

CC

23.00

161.00

PM

11.00

77.00

(CC-PM)

12.00

84.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.24	45.63	194.29	260.59	177.99	258.84	330.23	231.41	46.51	3.79	1554.53
ESC (mm)	0.00	0.00	0.56	4.88	20.78	27.87	19.04	27.69	35.32	24.75	4.97	0.41	166.28
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	84.60	77.45	77.02	77.00	77.00	161.00	161.00	161.00	161.00	161.00	161.00	137.01	
C1	0.09	0.01	0.06	0.54	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.76	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	7.60	0.45	5.26	45.63	194.29	344.59	261.99	342.84	414.23	315.41	130.51	63.80	
ETR (mm)	7.14	0.44	5.26	45.63	100.45	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	70.50	56.20	1096.62
HSf (mm)	77.45	77.02	77.00	77.00	161.00	161.00	161.00	161.00	161.00	161.00	137.01	84.60	
DCC (mm)	83.55	83.98	84.00	84.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.99	76.40	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	9.84	95.59	0.99	85.84	180.23	85.41	0.00	0.00	457.91
NR (mm)	234.40	245.55	276.74	239.37	88.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.49	168.20	1347.31

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

**Zona de Estudio:** Alta  
**Fecha:** Se-18

**Textura de Suelo:** c3

**Simbología**

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	840.00		
Kp [0.01%]	0.06		
Kv [0.01%]	0.20		
Kfc [0.01%]	0.94546		
I [0.01%]	1		
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.60		
PR (mm)	500.00		
HSi (mm)	144.00		
Nº de mes con que inicia HSi; 1,2,3...12?	10		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12		

		por peso	
		(%)	(mm)
CC	18.00		144.00
PM	8.00		64.00
(CC-PM)	10.00		80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.80	50.51	215.07	288.46	197.03	286.53	365.55	256.17	51.48	4.20	1720.81
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.89	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	
C1	0.06	0.00	0.07	0.63	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.89	0.06	5.80	50.51	215.07	368.46	277.03	366.53	445.55	336.17	131.48	65.18	
ETR (mm)	4.83	0.06	5.80	50.51	125.30	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	70.50	60.29	1128.29
HSf (mm)	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	68.89	
DCC (mm)	79.94	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.02	75.11	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	9.77	123.46	20.03	113.53	215.55	110.17	0.00	0.00	592.52
NR (mm)	233.11	241.94	272.20	230.49	63.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.52	162.82	1293.78

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Media

Fecha: Se-18

Textura de Suelo: b2

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente ( ver léame)

Kv: Factor por vegetación ( ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d] 288.00

Kp [0.01%] 0.10

Kv [0.01%] 0.10

Kfc [0.01%] 0.74466

I [0.01%] 0.94466

DS (g/cm<sup>3</sup>): 1.60

PR (mm) 500.00

HSi (mm) 144.00

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? 10

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 0.12

por peso

(%)

(mm)

CC 18.00 144.00

PM 8.00 64.00

(CC-PM) 10.00 80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.48	47.72	203.17	272.50	186.13	270.67	345.32	241.99	48.63	3.97	1625.58
ESC (mm)	0.00	0.00	0.32	2.80	11.90	15.96	10.90	15.86	20.23	14.18	2.85	0.23	95.23
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.66	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	122.13	
C1	0.06	0.00	0.07	0.60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.78	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.66	0.06	5.48	47.72	203.17	352.50	266.13	350.67	425.32	321.99	128.63	62.10	
ETR (mm)	4.60	0.06	5.48	47.72	111.24	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	70.50	57.44	1108.03
HSf (mm)	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	122.13	68.66	
DCC (mm)	79.94	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.87	75.34	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	11.93	107.50	9.13	97.67	195.32	95.99	0.00	0.00	517.54
NR (mm)	233.34	241.94	272.52	233.28	77.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.37	165.90	1317.12

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

**Zona de Estudio:** Alta  
**Fecha:** Se-18

**Textura de Suelo:** c3

**Simbología**

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	528.00		
Kp [0.01%]	0.06		
Kv [0.01%]	0.20		
Kfc [0.01%]	0.86954		
I [0.01%]	1		
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.60		
PR (mm)	500.00		
HSi (mm)	144.00		
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12		

		por peso	
		(%)	(mm)
CC	18.00		144.00
PM	8.00		64.00
(CC-PM)	10.00		80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	5.80	50.51	215.07	288.46	197.03	286.53	365.55	256.17	51.48	4.20	1720.81
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	68.89	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	
C1	0.06	0.00	0.07	0.63	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	4.89	0.06	5.80	50.51	215.07	368.46	277.03	366.53	445.55	336.17	131.48	65.18	
ETR (mm)	4.83	0.06	5.80	50.51	125.30	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	70.50	60.29	1128.29
HSf (mm)	64.06	64.00	64.00	64.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	124.98	68.89	
DCC (mm)	79.94	80.00	80.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.02	75.11	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	9.77	123.46	20.03	113.53	215.55	110.17	0.00	0.00	592.52
NR (mm)	233.11	241.94	272.20	230.49	63.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.52	162.82	1293.78

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: **Baja**  
Fecha: **Se-18**

Textura de Suelo: **m2a**

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente ( ver léame)

Kv: Factor por vegetación ( ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d] **60.00**

Kp [0.01%] **0.10**

Kv [0.01%] **0.10**

Kfc [0.01%] 0.36095

I [0.01%] 0.56095

DS (g/cm<sup>3</sup>): **1.60**

PR (mm) **500.00**

HSi (mm) **126.00**

Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? **10**

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 **0.12**

por peso

(%)

(mm)

CC **18.00** 144.00

PM **8.00** 64.00

(CC-PM) 10.00 80.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.20	2.50	10.80	57.40	244.40	327.80	223.90	325.60	415.40	291.10	58.50	9.20	1967.80
Ret [mm]	1.20	2.50	5.00	6.89	29.33	39.34	26.87	39.07	49.85	34.93	7.02	5.00	246.99
Pi (mm)	0.00	0.00	3.25	28.33	120.64	161.81	110.53	160.73	205.06	143.70	28.88	2.36	965.29
ESC (mm)	0.00	0.00	2.55	22.18	94.43	126.65	86.51	125.80	160.50	112.47	22.60	1.84	755.52
ETP (mm)	158.00	162.00	198.00	201.00	189.00	165.00	177.00	173.00	150.00	146.00	141.00	148.00	2008.00
HSi (mm)	66.92	64.04	64.00	64.00	64.00	90.14	144.00	144.00	144.00	126.00	142.22	100.60	
C1	0.04	0.00	0.04	0.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.49	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.17	0.85	1.00	0.75	0.00	0.00	
HD (mm)	2.92	0.04	3.25	28.33	120.64	187.96	190.53	240.73	285.06	205.70	107.10	38.96	
ETR (mm)	2.89	0.04	3.25	28.33	94.50	106.18	103.46	159.73	150.00	127.47	70.50	36.04	882.39
HSf (mm)	64.04	64.00	64.00	64.00	90.14	144.00	144.00	144.00	144.00	142.22	100.60	66.92	
DCC (mm)	79.96	80.00	80.00	80.00	53.86	0.00	0.00	0.00	0.00	1.78	43.40	77.08	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.78	7.06	1.00	55.06	0.00	0.00	0.00	64.90
NR (mm)	235.08	241.96	274.75	252.67	148.36	58.82	73.54	13.27	0.00	20.30	113.90	189.04	1621.68