

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



PROYECTO DE TRABAJO DE GRADUACION

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO POROSO EN LA
ZONA DEL DISTRITO DE RIEGO DE ZAPOTITÁN**

PRESENTADO POR:

RONALD EDUARDO MARTÍNEZ ESTRADA

ASESORES:

LAURA BEATRIZ GIL URRUTIA

CARLOS VLADIMIR NAJARRO GÁLVEZ

CÉSAR ARMANDO ALVARADO BATRES

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR, FEBRERO 2018

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR:

MAESTRO ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

LIC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FISCAL GENERAL:

LIC. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARÍN

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

DECANO:

LIC. MAURICIO HERNÁN LOVO

DIRECTOR DE ESCUELA:

M.SC. CESAR ARMANDO ALVARADO BATRES

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Deisy Estrada y Sigfredo Martínez y que con mucho esfuerzo me han animado y brindado su apoyo a lo largo de la carrera, a mi tía Leticia Romero que siempre nos ha brindado su apoyo incondicional a mí y mi familia. A mis hermanos Edgard y Marvin que siempre han estado pendientes y animándome en cada paso de mi carrera. A mi amada esposa Mirian Chavarría que ha estado pendiente siempre acompañándome en este proceso de aprendizaje. Y a todos mis familiares que de una u otra forma han estado

A mis asesores: MSc. César Alvarado, por el tiempo que se ha tomado para asesorar y darle dirección en los momentos difíciles de esta investigación; a MSc. Laura Gil y MSc. Carlos Najarro por brindar parte de su tiempo en la revisión y asesoría de esta investigación, siendo factores clave para la obtención de información del Ministerio de Medio Ambiente.

Agradecimientos especiales al MSc. Luís Castillo por darme asesoría y acompañamiento durante las giras de campo en las que se realizaron las tomografías eléctricas. Al ing. José Tejada de la Facultad de Ciencias Agronómicas por su colaboración en la gestión de préstamo del permeámetro de Guelph.

Al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), a través de la Dirección General de Ordenamiento Forestal, Cuencas y Riego por brindar parte de la información utilizada en esta investigación y gestionar acompañamiento a través de la Asociación de Regantes del Distrito de Riego de Zapotitán (AREZA) especialmente a Sigfredo Ramírez que estuvo acompañando en campo durante las mediciones. Al Ministerio de Medio Ambiente por compartir la información meteorológica.

A mis compañeros de carrera Amelia Castro, Mirian Villalobos, Bery Urrutia, Jonathan Arévalo, Adiel Molina, Alexander Castillo, Adrián Mayen, que llevamos esta lucha juntos durante estos años y que han me han brindado su amistad y ayuda en diferentes momentos, ha sido un gusto haberlos conocido y poder compartir con ustedes. A los docentes del departamento de Geofísica por sus enseñanzas. A los compañeros de Geofísica que colaboraron en las mediciones hechas en campo entre ellos Flor, Mestizo, Nata y demás compañeros.

A Dios todo poderoso, quien ha permitido que alcance esta meta iluminando mi mente en los momentos difíciles.

Especial agradecimiento al Grupo de Investigación en Hidrogeología por el apoyo en cuanto al desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| AGRADECIMIENTOS | i |
| ÍNDICE..... | ii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | v |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | viii |
| RESUMEN | x |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| OBJETIVOS | 2 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 2 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 3 |
| 1.2 DELIMITACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO | 3 |
| 1.3 GEOLOGÍA | 6 |
| 1.3.1 Geología del área de Estudio..... | 7 |
| 1.4 EXPLORACIÓN GEOFÍSICA..... | 9 |
| 1.4.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) | 10 |
| 1.4.2 Tomografías eléctricas | 13 |
| 1.5 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES..... | 15 |
| 1.6 BALANCE HÍDRICO..... | 16 |
| 1.6.1 Permeabilidad..... | 17 |
| 1.6.2 Cálculo de la permeabilidad con el “Permeámetro de Guelph” | 18 |
| 1.6.3 Cálculo de la permeabilidad por el método del doble anillo | 19 |
| 1.7 PARÁMETROS DEL CICLO HIDROGEOLÓGICO | 21 |
| 1.7.1 Precipitación | 21 |
| 1.7.2 Evaporación..... | 21 |

| | | |
|--|--|----|
| 1.7.3 | Evapotranspiración (potencial y real)..... | 22 |
| 1.7.4 | Capacidad de campo | 22 |
| 1.7.5 | Punto de Marchitez | 22 |
| 1.7.6 | Coeficiente de infiltración por vegetación y profundidad de raíces..... | 23 |
| 1.8 | ESTIMACIÓN DE RECARGA HÍDRICA POTENCIAL (SCHOSINSKY) | 24 |
| 1.9 | ESTIMACIÓN DE RECARGA HÍDRICA POTENCIAL (VARIACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO) | 26 |
| 1.9.1 | Limitaciones del método VNF..... | 30 |
| 1.10 | SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) | 31 |
| 1.10.1 | Modelos ráster..... | 32 |
| 1.10.2 | Modelos vectoriales..... | 33 |
| CAPITULO 2 METODOLOGÍA..... | | 34 |
| 2.1 | TRABAJO DE GABINETE | 35 |
| 2.2 | TRABAJO DE CAMPO..... | 36 |
| 2.3 | PROCESAMIENTO DE DATOS..... | 37 |
| CAPITULO 3 ANÁLISIS Y RESULTADOS | | 38 |
| 3.1 | CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO..... | 38 |
| 3.1.1 | Unidad acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción..... | 38 |
| 3.1.2 | Unidad acuífero poroso de gran extensión y productividad media | 38 |
| 3.2 | MAPA DE USO DE SUELO..... | 39 |
| 3.3 | MAPA DE PENDIENTES | 40 |
| 3.4 | PRUEBAS DE INFILTRACIÓN | 42 |
| 3.5 | PRECIPITACIÓN Y ETP PROMEDIO MENSUAL | 45 |
| 3.6 | CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL (SCHOSINSKY) | 47 |
| 3.7 | RECARGA POTENCIAL (VARIACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO) | 49 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.7.1 | Almacenamiento específico | 51 |
| 3.7.2 | Estimación de la recarga potencial (VNF) | 52 |
| 3.7.3 | Resultados de la recarga potencial (VNF) | 57 |
| 3.8 | MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL | 59 |
| 3.8.1 | Flujo natural superficial | 59 |
| 3.8.2 | Tomografías eléctricas | 60 |
| 3.8.3 | INVENTARIO DE POZOS Y MANANTIALES..... | 66 |
| 3.8.4 | Flujo natural del acuífero superficial | 69 |
| 3.8.5 | Modelo Hidrogeológico Conceptual en base a geología..... | 71 |
| | CONCLUSIONES..... | 76 |
| | RECOMENDACIONES | 77 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 78 |
| | ANEXOS | 81 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Delimitación del área de estudio. Se considera el área de estudio la selección de los estratos s5c y Qf del mapa geológico, ubicados dentro de la microcuenca alta del río Sucio. | 4 |
| Fig. 1.2 Vista 3D hacia el sur del relieve de la Subcuenca del Río Sucio. En color rojo se muestra el polígono del área de estudio, en color café la Microcuenca alta del Río Sucio. | 5 |
| Fig. 1.3 Delimitación del área de estudio. Se considera el área de estudio la selección de los estratos s5'c, Qf y s3'a del mapa geológico, ubicados dentro de la microcuenca alta del río Sucio. | 8 |
| Fig. 1.4 Mediciones de resistividad aparente, con mayor espaciamento entre los electrodos de corriente se conduce a un aumento de las profundidades de penetración de la corriente inyectada. Los resultados se compilan en la curva de resonancia. Fuente: (Kirsh, 2009) | 11 |
| Fig. 1.5 Equipo utilizado para realizar tomografías eléctricas. (ABEM, 2010)..... | 13 |
| Fig. 1.6 Manera en la que el equipo toma las medidas, para cada línea el equipo mantiene la distancia interelectrónica desplazándose de manera horizontal. (ABEM, 2010) | 14 |
| Fig. 1.7 Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global (Chow, Maidment, & Mays, 1994). | 17 |
| Fig. 1.8 Permeámetro de Guelph siendo utilizado durante una prueba en el área de estudio... | 19 |
| Fig. 1.9 Esquema del arreglo experimental utilizado para aplicar el método del doble anillo (Alvarado Batres, 2015)..... | 20 |
| Fig. 1.10 Hidrograma de nivel piezométrico de pozos y gráfico de barra de precipitación promedio semanal, durante el periodo de abril de 1950 a marzo de 1952, para la cuenca de Beaverdam Creek, Maryland, USA. (Healy & Cook, 2002). | 28 |
| Fig. 1.11 Variación de los niveles piezométricos, para el pozo Flor Amarilla, de la sub-cuenca del Río Sucio, El Salvador. (Elaboración propia, base de datos DGOA) | 28 |
| Fig. 1.12 <i>Ascenso del nivel freático vs precipitaciones que los produjeron, valores de almacenamiento calculados</i> (Quiroz-Londoño, Martínez, & Massone, 2012). | 30 |
| Fig. 1.13 Concepto de capas (recuperado el 19/10/2016 de: https://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/reference/GUID-6FF5EE5E-2F36-421F-B94C-87AD3212CB7E-web.png)..... | 32 |
| Fig. 1.14 Esquema de una representación ráster de la información contenida en un mapa (Martínez Solamo, 2002). | 33 |
| Fig. 1.15 Vectorización de capas ráster discretas en capas de polígonos (a) y de líneas (b) (recuperado el 20/09/2016 de: http://volaya.github.io/libro-sig/img/Vectorizacion.png)..... | 34 |

| | |
|--|----|
| Fig. 2.1 Flujograma de metodología aplicada para el desarrollo de la investigación (elaboración propia)..... | 35 |
| Fig. 3.1 Mapa de unidades acuíferas ubicadas dentro del área de estudio (Fuente: Digitalizado de ANDA – FIAS - OSUDE, 2008). | 39 |
| Fig. 3.2 Mapa de uso de suelo de la microcuenca del área de estudio (elaboración propia) | 40 |
| Fig. 3.3 Mapa de porcentajes de pendiente de la microcuenca alta del Río Sucio | 41 |
| Fig. 3.4 Mapa de resultados de pruebas de infiltración tomadas entre agosto de 2016 y mayo de 2017. | 44 |
| Fig. 3.5 Mapa de polígonos de infiltración, generado a partir de la interpolación por el método de Kriging en base a las pruebas de infiltración desarrolladas durante esta investigación. Fuente: Elaboración propia. | 45 |
| Fig. 3.6 Estaciones meteorológicas con datos de precipitación y ETP con sus respectivos polígonos de Thiessen..... | 46 |
| Fig. 3.7 Polígonos utilizados para el cálculo de la recarga potencial basado en los polígonos de Thiessen de las estaciones, y el mapa de polígonos de infiltración; L04 y L08 es la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo, mientras que los demás círculos representan las pruebas de infiltración realizadas en campo con su respectivo valor de infiltración en mm/día..... | 48 |
| Fig. 3.8 Mapa de ubicación de pozos de monitoreo de la DGOA y polígonos de Thiessen de las estaciones meteorológicas con información de precipitación diaria. | 50 |
| Fig. 3.9 Precipitación y Nivel freático del Pozo Flor Amarilla y la Estación Meteorológica L-04. | 53 |
| Fig. 3.10 Precipitación y nivel freático del pozo CENTA y la Estación meteorológica L-04 ... | 54 |
| Fig. 3.11 Precipitación y nivel freático del pozo ENA y estación meteorológica L-04..... | 55 |
| Fig. 3.12 Precipitación y Nivel freático del Pozo Las Brisas y la estación meteorológica 126 .. | 57 |
| Fig. 3.13 Mapa de red hidrométrica del departamento de La Libertad (MARN, 2014) | 60 |
| Fig. 3.14 Tomografía eléctrica RES2D01, con una longitud de 300 metros que va desde -100 (lado noroeste) hasta 200 (lado sureste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 30 ohm-m). | 62 |
| Fig. 3.15 Gráfico de correlación litología del Pozo Flor Amarilla con la tomografía eléctrica RES2D02, que posee una longitud de 300 metros que va desde -100 (lado noreste) hasta 200 (lado suroeste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores | |

| | |
|--|----|
| de resistividad debajo de 25 ohm-m) y fotografía tomada en excavación, desarrollaba zona cercana a la tomografía y pozo Flor Amarilla. | 63 |
| Fig. 3.16 Tomografía eléctrica RES2D03, con una longitud de 200 metros que va desde -100 (lado este) hasta 100 (lado oeste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 25 ohm-m). | 64 |
| Fig. 3.17 Tomografía eléctrica RES2D04, con una longitud de 200 metros que va desde -100 (lado noreste) hasta 100 (lado suroeste). La línea café punteada representa el corte entre zona húmeda, provocada posiblemente por canal de riego que pasa a un costado del perfil de tomografía, mientras que la línea negra punteada, representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 25 ohm-m). | 64 |
| Fig. 3.18 Arriba: Tomografía eléctrica RES2D05, con una longitud de 200 metros que va desde -100 (lado noreste) hasta 100 (lado suroeste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 40 ohm-m). Abajo: diagrama de bloques, los “*” representan los puntos en los que se tiene medida. | 65 |
| Fig. 3.19 Mapa de tomografías eléctricas desarrolladas junto a la ubicación de pozos de monitoreo (DGOA), pozos de riego (MAG) y Manantiales. | 69 |
| Fig. 3.20 Mapa de líneas isofreáticas, las cruces representan los puntos en los que se tiene información del nivel freático ya sea por afloramiento de manantiales, basados en el nivel estático de pozos o inferido a través de tomografías eléctricas. | 70 |
| Fig. 3.21 Mapa geológico con perfil A-A’ el cual representa un corte transversal que se ha interpretado en base a la geología superficial e información de pozos y tomografías eléctricas | 72 |
| Fig. 3.22 Litología y diseño de los pozos MAG-08 y Flor Amarilla, con su respectiva correlación | 73 |
| Fig. 3.23 Corte transversal cronoestratigráfico de los miembros geológicos que afloran en superficie en el perfil A-A’. La línea punteada celeste representa el nivel freático del acuífero superficial, la línea roja representa el contacto inferido entre el miembro s3a y s2. | 74 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 Resistividad de algunos tipos de rocas, sedimentos saturados de agua y rocas ígneas saturadas de agua. Modificada de Telford et al. (1990). | 10 |
| Tabla 1.2 Infiltración básica aproximada. Fuente: Modificada de Deras Cortéz (2003)..... | 18 |
| Tabla 1.3 Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo para diferentes texturas (Schosinsky, 2006 cita a Grassi, 1979). | 23 |
| Tabla 1.4 Coeficiente de infiltración por vegetación en base al tipo de cultivos. | 23 |
| Tabla 1.5 Profundidad de raíces en base a diferentes tipos de cultivos..... | 24 |
| Tabla 3.1 Área en kilómetros cuadrados para los diferentes tipos de suelo y porcentaje del área total utilizada..... | 40 |
| Tabla 3.2 Tabla de coeficientes de infiltración por pendiente (Modificada de Schosinsky (2000). | 41 |
| Tabla 3.3 Total de área comprendida para diferentes rangos de pendientes y porcentaje respecto al área total. | 42 |
| Tabla 3.4 Resultados de pruebas de infiltración hechas durante la investigación y su textura de suelo en base a tabla de Deras Cortez (2003)..... | 43 |
| Tabla 3.5 Área en kilómetros cuadrados y porcentaje de área para valores de infiltración respecto al mapa anterior. | 44 |
| Tabla 3.6 Promedios por cada mes de ETP para la serie de datos del 1970 al 2001 (Fuente: DGOA)..... | 46 |
| Tabla 3.7 Promedios de precipitación por cada mes para la serie de datos de 1970 a 2001 (fuente: DGOA)..... | 47 |
| Tabla 3.8 Valores utilizados para el cálculo de la recarga potencial, área de los polígonos y recarga potencial calculada. | 48 |
| Tabla 3.9 Resumen de resultados de la recarga potencial para los dos tipos de acuíferos del área de estudio..... | 49 |
| Tabla 3.10 Información general de los pozos de monitoreo de la DGOA. | 50 |
| Tabla 3.11 Información general de las estaciones meteorológicas a utilizar para la investigación. | 51 |
| Tabla 3.12 Análisis de las fechas coincidentes entre la estación meteorológica a utilizar y los pozos. | 51 |

| | |
|---|----|
| Tabla 3.13 Tabla resumen de almacenamiento específico (specific yield) por textura para de 17 estudios (Johnson, 1967)..... | 52 |
| Tabla 3.14 Resultados de la estimación de la recarga por el método de la Variación del Nivel Freático. | 58 |
| Tabla 3.15 Información general de las estaciones hidrométricas que se encuentran o son influenciadas por el área de estudio (MARN, 2014) | 59 |
| Tabla 3.16 Tabla de información del acuífero inferida en base a las tomografías eléctricas del nivel freático respecto el nivel del suelo y respecto el nivel del mar. | 65 |
| Tabla 3.17 Información recopilada de pozos propiedad del MAG del Distrito de Riego de Zapotitán. | 67 |
| Tabla 3.18 Información general de los pozos de monitoreo de la DGOA. | 67 |
| Tabla 3.19 Información de pozos excavados monitoreados estacionalmente por la DGOA.... | 68 |
| Tabla 3.20 Información de los manantiales identificados dentro al área de estudio. | 68 |
| Tabla 3.21 Esquema cronoestratigráfico de los miembros geológicos presentes cercanos al área de estudio (Baxter, 1984) | 71 |

RESUMEN

El cálculo de la recarga hídrica potencial que percibe un acuífero es de gran importancia para la adecuada gestión de recurso. Sin embargo, no se puede justificar el establecer medidas encaminadas a la protección del recurso hídrico, sin tener un conocimiento previo del mismo, de sus características y comportamiento. La zona estudiada es de gran importancia agrícola, pues debido a que se tiene acceso a sistemas de riego, la producción no disminuye durante la época seca.

Esta investigación compara los resultados obtenidos de la estimación de la recarga hídrica potencial por la metodología de Schosinsky (aproximadamente 65.7 millones de $m^3/año$), respecto a la recarga hídrica potencial estimada por el método de la Variación del Nivel Freático (aproximadamente 62.2 millones de $m^3/año$). Los resultados obtenidos por ambos métodos fueron relativamente similares, lo que genera mayor confianza en la utilización de ambos métodos.

Se plantean dentro de los alcances, correlacionar la Variación de los Niveles Piezométricos respecto a la precipitación percibida. Siendo el exceso o ausencia de precipitación, lo que controla el comportamiento en la Variación de los Niveles Piezométricos.

El flujo natural del acuífero ha sido calculado a partir de la formulación de Darcy, para la que se utilizó el gradiente hidráulico (calculado en base a la diferencia de altura del nivel freático respecto a dos puntos) y la transmisividad promedio obtenida de los informes de pozos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

Se construyó un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la información de niveles freáticos de pozos, geológica, litológica, y geofísica. El modelo establece la existencia de un acuífero poroso superficial, sugiriendo bajo este la existencia de un acuífero confinado en rocas volcánicas fracturadas. La dirección del flujo subterráneo va desde las zonas altas de la sub-cuenca del Río Sucio (Volcán de San Salvador, Lago de Coatepeque y cadena montañosa) hacia el noreste desembocando principalmente sobre el Río Sucio.

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones hidrogeológicas son de gran importancia para realizar un manejo sostenible del recurso hídrico. La zona de estudio se centra en el Distrito de Riego de Zapotitán, que se ubica entre los municipios de Ciudad Arce, Sacacoyo, Colón, San Juan Opico del departamento de La Libertad, el municipio de Armenia del departamento de Sonsonate y el municipio de El Congo del departamento de Santa Ana; ubicado aproximadamente a 30 kilómetros al sureste de San Salvador. La zona propuesta para este estudio es la parte alta de la sub-cuenca del Río Sucio, donde se centra la distribución espacial de pozos de monitoreo del nivel piezométrico, monitoreados por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) y los pozos del Distrito de Riego de Zapotitán. Comprende un área de aproximadamente 116 km^2 , con un perímetro de 175.489 km .

La investigación consiste en recopilar y analizar las bases de datos de: - Variación de los niveles piezométricos de pozos distribuidos dentro de la parte alta de la sub-cuenca del Río Sucio, - Información de estaciones meteorológicas cercanas y - Información litológica de los pozos perforados de la zona, propiedad del MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería).

Durante dicha investigación, se ejecutaron mediciones en campo, de 19 pruebas de infiltración y 5 tomografías eléctricas; por otro lado, se inventariaron las fuentes hídricas. Se utilizaron metodologías de investigación hidrogeológicas como, por ejemplo, el balance de suelos de Schosinsky y el método VNF (variación del nivel freático) para la estimación de la recarga hídrica potencial. Siendo necesaria, la utilización de diversas herramientas de software, para el procesamiento de: información geográfica, tomografías eléctricas, manejo de datos, interpolación, modelamiento de secciones transversales, etc.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el acuífero poroso en la zona del Distrito de Riego de Zapotitán ubicado en la zona alta de la subcuenca del Río Sucio, a partir de la correlación de parámetros geofísicos, inventario de pozos, permeabilidad, registros de estaciones meteorológicas y la Variación del Nivel Freático (VNF) de pozos de monitoreo a lo largo del tiempo, para elaborar un modelo hidrogeológico conceptual preliminar del acuífero poroso.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la recarga hídrica potencial, del acuífero poroso delimitado dentro del Distrito de Riego de Zapotitán, a partir de resultados de pruebas de infiltración, información geológica, datos de precipitación y evapotranspiración utilizando la metodología de Schosinsky.
- Correlacionar los registros de los niveles piezométricos en los pozos de monitoreo de la Dirección General del Observatorio Ambiental, con la precipitación promedio mensual, para asociar el comportamiento y respuesta del acuífero poroso del Distrito de Riego de Zapotitán y determinar la recarga hídrica potencial a través del método de la Variación del Nivel Freático (VNF).
- Asociar tomografías eléctricas, información litológica de pozos, y parámetros hidráulicos de la zona de estudio para elaborar un modelo hidrogeológico conceptual preliminar del acuífero poroso en la zona del Distrito de Riego de Zapotitán.

CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

El Distrito de Riego de Zapotitán se ubica en el valle llamado del mismo nombre, a unos 30 kilómetros al sureste de San Salvador. Constituye una unidad administrativa del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Fue creado por el decreto legislativo 214, en noviembre de 1970. Entrando en operación en el año 1973, con el objetivo de aminorar la escasez de alimentos, incrementando la producción de cultivos alimenticios básicos (MAG El Salvador, 1982). Se ubica dentro de la sub cuenca del Río Sucio, entre el este del Lago de Coatepeque que forma parte del Complejo Volcánico de Santa Ana y el Oeste del Volcán de San Salvador y desemboca en el borde nor-oriental del valle de Zapotitán. El área de estudio,

Guevara (2011) concluye respecto a los parámetros hidrogeológicos del sistema acuífero Zapotitán que: “La transmisividad oscila entre 340 y 994 m²/día. Estos datos se basan en los resultados de ensayos de bombeo en pozos perforados en dicho Valle. Esta zona se considera de excelentes rendimientos”.

Según Foley (1998) Los agricultores ubicados en el Distrito de Riego de Zapotitán localizado en el Valle de Zapotitán enfrentan múltiples problemas, desde contaminación de aguas ocasionada por la expansión urbana e industrial, hasta un contexto de políticas económicas desfavorables al sector agropecuario. Este caso ilustra las limitaciones que la organización local enfrentada con problemas cuya solución depende, en parte, del contexto político e institucional. Durante los noventa se incrementó el número de industrias asentadas en el valle de Zapotitán; aumentando la demanda de tierras, para satisfacer la necesidad de construcción de viviendas, utilizadas por la mano de obra movilizaba hacia los nuevos empleos industriales.

Por último, el consorcio Water Earth Science Associates (2001) estimó que los recursos dentro de la Cuenca del Río Sucio pueden proveer de manera sostenible al menos 2.1m³/s (aproximadamente 66.3 millones de m³/año).

1.2 DELIMITACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se centra en el Distrito de Riego del Valle de Zapotitán, dentro de la zona alta de la sub-cuenca del Río Sucio. Está ubicada entre el este del Lago de Coatepeque que pertenece al Complejo Volcánico de Santa Ana y el Oeste del Volcán de San Salvador, es parte de la

microcuenca alta de Rio Sucio y comprendiendo un área de 116 km^2 , con un perímetro de 175.489 km (Fig. 1.1).

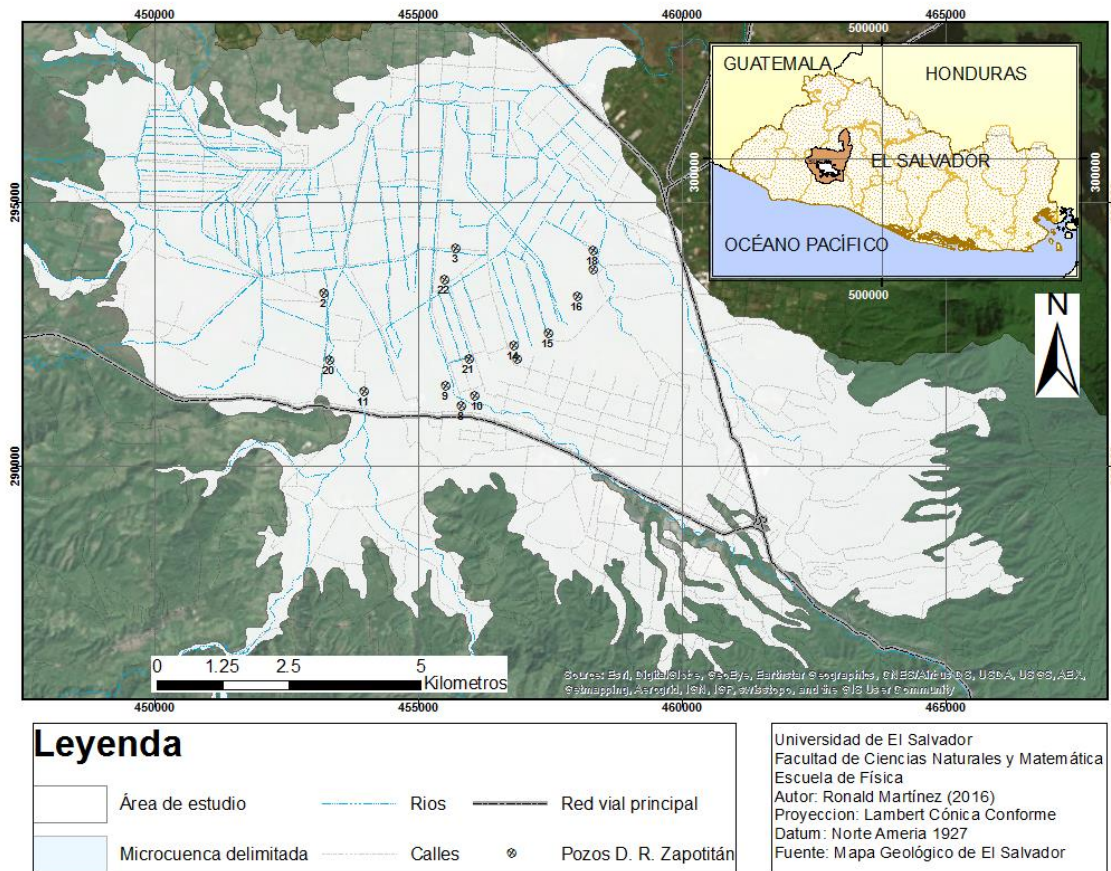


Fig. 1.1 Delimitación del área de estudio. Se considera el área de estudio la selección de los estratos s5c y Qf del mapa geológico, ubicados dentro de la microcuenca alta del rio Sucio.

El área de estudio comprende parte de la microcuenca alta del Rio Sucio, donde la escorrentía viaja en dirección norte. En la Fig. 1.2, se muestra una vista 3D de la subcuenca del Rio Sucio, haciendo énfasis en el área de estudio (polígono color rojo). Puede observarse que, de toda la subcuenca del Rio Sucio, es la zona con menores pendientes, lo que facilita la existencia de depósitos sedimentarios, y la infiltración.

En la zona, existe una gran cantidad de pozos de diversos usos; entre ellos, cuatro de monitoreo de los niveles piezométricos, administrados por la DGOA (Dirección General de Observatorio Ambiental). Otros pozos, propiedad de ANDA (Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados), MAG (Ministerio de Agronomía y Ganadería), empresas privadas de la zona y pozos excavados artesanalmente. De algunos pozos, existe información litológica y de

parámetros hidráulicos, que reflejan las propiedades del acuífero y son de utilidad para la caracterización del acuífero poroso ubicado en el Distrito de Riego de Zapotitán.

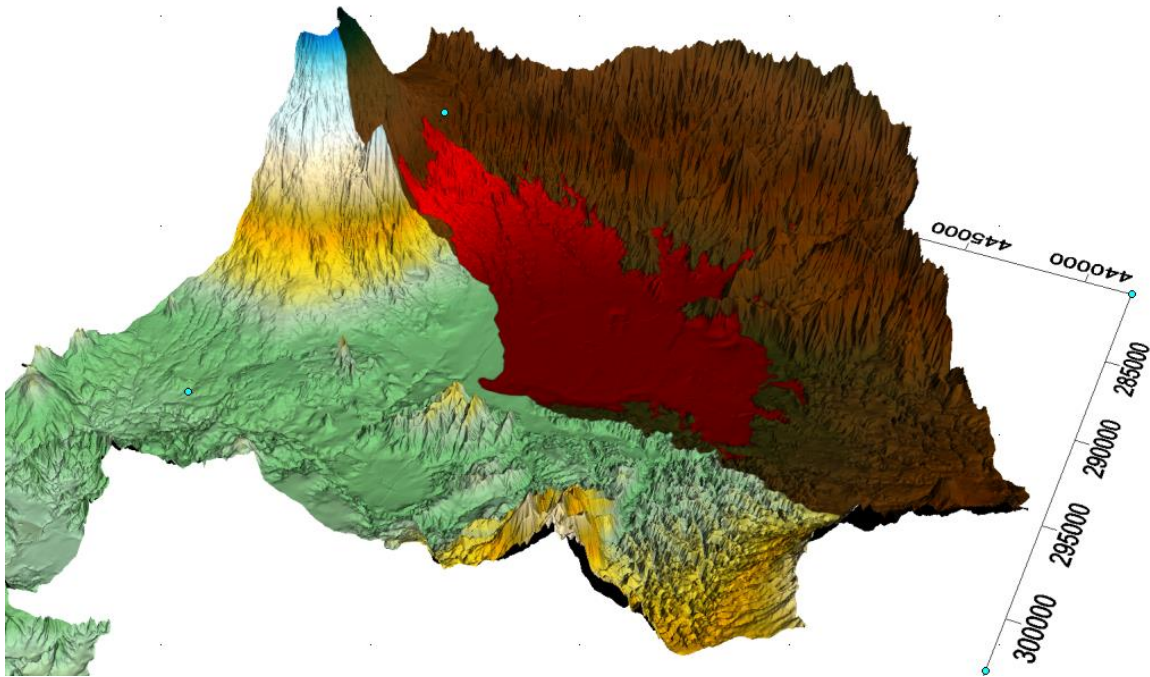


Fig. 1.2 Vista 3D hacia el sur del relieve de la Subcuenca del Río Sucio. En color rojo se muestra el polígono del área de estudio, en color café la Microcuenca alta del Río Sucio.

Según el mapa hidrogeológico de El Salvador, en la zona del Distrito de Riego de Zapotitán el acuífero es de tipo “Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media”; Los materiales de esta unidad consisten principalmente de materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapilli y tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia del grado del grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye. Esta unidad puede tener más de 50 metros de espesor (ANDA-FIAS-COSUDE, 2008).

Sin embargo, dentro del área delimitada también está comprendido el acuífero “Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Extensión Limitada y Productividad Media”; Los materiales de esta unidad consisten de flujos y coladas de lavas (basálticas y andesíticas) que han sido eyectados de los centros de erupción volcánica pero que no han alcanzado grandes extensiones, los cuales pueden estar intercalados con materiales piroclásticos. Presentan conductividades hidráulicas

medias. El espesor de estos materiales puede variar de unos 10 a 20 metros (ANDA-FIAS-COSUDE, 2008).

Payes Hernández (2014) indica que dicha zona se encuentra en una planicie conformada por materiales aluviales y sedimentarios, resultado de procesos erosivos y deposiciones piroclásticas del Volcán de San Salvador.

1.3 GEOLOGÍA

La geología predominante de El Salvador se establece como una secuencia de unidades terciarias y cuaternarias, netamente continentales y de origen volcánico con intercalaciones de sedimentos fluvio-lacustres. De igual manera en el resto del país, la geología se caracteriza por una confluencia de diversos sistemas de fallas y fracturas asociados a la tectónica regional, siendo el sistema de fallas predominante en dirección NO – SE. Estas fallas se deben al movimiento entre placas tectónicas, cuya dirección controla el drenaje y el movimiento del flujo de agua subterránea (ANDA-FIAS-COSUDE, 2008).

El fenómeno de subducción, que produce sistemas de fallas, producto del desplazamiento hacia el NE de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe, que es responsable tanto del desarrollo del Graben Centroamericano, paralelo a la fosa oceánica Mesoamericana, como de la edificación de la cordillera volcánica (Payes Hernández, 2014).

La geología de El Salvador se divide en tres unidades principales, entre ellas: sedimentarias de mesozoicas a terciario medio, terciarias y cuaternarias (Baxter, 1984). Estas unidades principales se dividen en formaciones, que a la vez están subdivididas en miembros.

Las unidades sedimentarias mesozoica a terciaria media, son las más antiguas y se ubican en la zona nor-oeste de El Salvador. Está compuesta por la formación Todos Santos (Metapán), grupo Yojoa y Valle de Ángeles, Baxter (1984) cita a Schuchert (1935) quien en estas unidades identifica los afloramientos geológicos: rocas calizas (rocas sedimentarias químicas), conglomerados, areniscas, lutitas arcillosas y margas.

Las unidades del terciario y cuaternarias. Son unidades netamente continentales principalmente de origen volcánico con intercalaciones de materiales fluviales y algunas secciones lacustres (Baxter, 1984). Está dividida en cuatro formaciones geológicas. De mayor a menor antigüedad, los nombres de dichas formaciones son: Formación Morazán, Formación Chalatenango,

Formación Cuscatlán y Formación San Salvador; cada formación está subdividida en diferentes miembros.

1.3.1 Geología del área de Estudio

La porción de la zona alta de la cuenca del Río Sucio corresponde al flanco oriental de la caldera de Coatepeque, que se encuentra recubierta por capas piroclásticas ácidas relacionadas con el ciclo eruptivo pliniano que formó dicha estructura. Sobre esos piroclastos ácidos yacen las capas de cenizas y lapíllis básicos emitidos por los volcanes Santa Ana, Cerro Verde, Chino y San Marcelino. En esa zona (occidental) sobresale la lava basáltica “Teixcal” del año 1722, proveniente del volcán San Marcelino, con 11 km de largo, que sirvió hasta hace poco como un canal de recarga del lago Zapotitán, el cual fue drenado para el desarrollo agrícola del valle (Guevara, 2011).

Al oriente se localiza el estrato volcán San Salvador de edad Plio–Pleistoceno, cuyo cráter El Boquerón tiene una elevación máxima de 1892 m. El flanco occidental posee además varios conos pequeños de ceniza volcánica y cráteres de explosión de los cuales sobresalen el Cerro El Playón y la laguna de Chanmico. Los materiales eruptivos del volcán San Salvador están constituidos por una secuencia de tefras predominantemente andesíticas y en menor presencia dacíticas y lavas andesítico–basálticas. En la superficie de la ladera sur del volcán San Salvador afloran las cenizas finas Tierra Blanca del Ilopango (s4) y una capa de productos freatomagmáticos del Boquerón conocidos como Talpetate (ibíd).

Al norte y al sur sobresalen del relieve los límites de Graben Central con una separación de 10 km, constituidos por rocas de la formación El Bálsamo de edad Terciaria. La parte norte está formada por cerros de 700 msnm en promedio, mientras que al sur se localiza un macizo escarpado superior a los 1000 de elevación. La parte más deprimida de la planicie de la cuenca se encuentra a 455 msnm (ibíd.).

Según Sayre & Taylor (1951), la cuenca de Zapotitán está compuesta por materiales aluviales y lacustres, provenientes de las zonas altas que la rodean. Dentro de los materiales se encuentran: limo tobáceo acuoso, pómez y cenizas intercaladas con gravas finas. Además, el nivel freático es poco profundo, interceptando la superficie en algunas zonas, dando lugar a manantiales y zonas pantanosas.

El área de estudio está contenida entre los estratos geológicos del miembro Qf (depósitos sedimentarios del cuaternario) y el miembro s5'c (cenizas y tobas de lapilli) y pequeñas porciones del miembro s3'a (piroclásticas ácidas y epiclásticas), todas de la formación San Salvador, de unidades cuaternarias (Fig. 1.3).

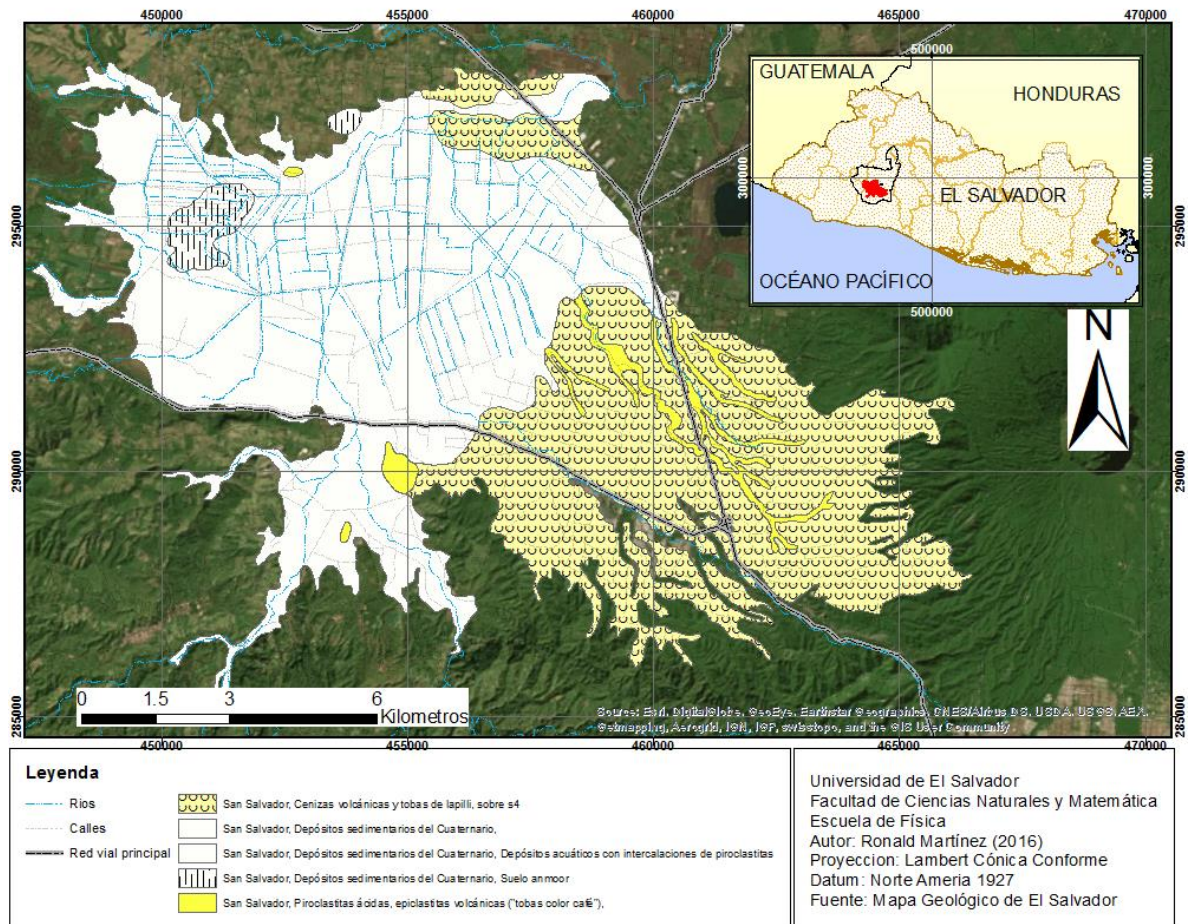


Fig. 1.3 Delimitación del área de estudio. Se considera el área de estudio la selección de los estratos s5'c, Qf y s3'a del mapa geológico, ubicados dentro de la microcuenca alta del río Sucio.

1.3.1.1 Miembro Q'f (depósitos sedimentarios del cuaternario) de la Formación San Salvador.

Baxter, (1984) en el léxico estratigráfico de El Salvador describe la formación como: depósitos sedimentarios del cuaternario constituidos principalmente por secciones con intercalaciones de rocas piroclásticas, depósitos de estuario, barras costeras, depósitos coluviales, conos de deyección y suelos-armoor. Y están ubicados a lo largo de la línea de costa (costa de construcción) en sectores recién emergidos como la zona de la Bahía de Jiquilisco, el Golfo de

Fonseca; a lo largo riel Río Lempa, y en depresiones como el sector de la Laguna de Olomega, y en la *Laguna Ciega de Zapotitán*.

1.3.1.2 Miembro s5'c (cenizas y tobas de lapilli) de la Formación San Salvador

Baxter (1984) cita a Wieseemann et al (1978), quienes definen el miembro s5c como una secuencia volcánica constituida principalmente por cenizas y tobas de lapilli, siendo contemporánea con la secuencia de los miembros s3'b, s4, s5'a, s5'b, aunque Previamente Wieseemann (1975) lo incluía de forma general como parte del miembro s5 que aflora principalmente en el sector occidental y oriental, a lo largo de la faja central del país.

1.3.1.3 Miembro s3'a (piroclásticas acidas y epiclásticas volcánicas) de la formación San Salvador.

En la zona de estudio lo componen bancos que exceden los 15 metros de espesor, constituidos por fragmentos de pómez y líticos de hasta 15 centímetros y sobreyace una secuencia de cenizas dacíticas de un espesor superior a los 30 metros. En las cercanías del Volcán de San Salvador (Boquerón) se reportan tobas de color café, constituidas por piroclastitas y epiclásticas con capas de escoria negra intercaladas, y capas de suelos desarrollados en diferentes horizontes. El espesor es de unos 25 metros (Baxter, 1984).

1.4 EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

La exploración geofísica, se dedica a estudiar las propiedades físicas del subsuelo. Normalmente, es utilizada en la búsqueda de recursos naturales tales como: petróleo, agua subterránea, minerales metálicos, yacimientos geotérmicos, etc. En otras ocasiones se utiliza para investigaciones arqueológicas; determinación de estructuras de aguas residuales y tuberías de abastecimiento de agua potable (cuando no se tienen planos del diseño).

Las aplicaciones son muy diversas y existen varios métodos aplicables, que utilizan diferentes propiedades físicas de la materia tales como: el electromagnetismo, resistividad eléctrica, propagación de ondas (sísmicas), atracción gravitacional (gravimetría). Dichas propiedades, están íntimamente relacionadas con las características del subsuelo y la naturaleza geológica de los materiales en profundidad. Ayudan a localizar y algunas veces determinar las dimensiones del recurso buscado.

Los métodos geofísicos más comunes aplicados en la exploración hidrogeológica son: geoelectrónicos, electromagnéticos en el dominio de la frecuencia, sondeos de resonancia magnética, magnetotéluricos, gravimétricos y sísmicos (Kirsh, 2009).

Esta investigación aborda el caso de los métodos geoelectrónicos aplicados a la exploración hidrogeológica. Para realizar este tipo de exploración, se requiere de una fuente de corriente directa, que se pueda manipular la cantidad de corriente que se inyecta al subsuelo, y un voltímetro, capaz de detectar las diferencias de potencial que se generan al inyectar la corriente. Este, se conoce como el método de las cuatro puntas. A partir de los valores de corriente y diferencia de voltaje que se obtienen, se procede a calcular la resistividad eléctrica del subsuelo. La exploración geofísica en base a la inyección de corriente y medidas de diferencia de voltaje se conoce comúnmente como Sondeos Eléctricos Verticales.

1.4.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Los sondeos eléctricos verticales son de gran ayuda para la estimación de las variaciones de la resistividad de las rocas en las profundidades. Estas variaciones de resistividad según el rango de medida se asocian con diferentes tipos de rocas o estratos geológicos. La Tabla 1.1 muestra los rangos de resistividades de diversos tipos de rocas sedimentarias.

La resistividad de los materiales del subsuelo se determina a partir de la inyección de corriente y midiendo las diferencias de potencial generadas. Para eso, se requiere dos pares de electrodos (Fig. 1.4). Los electrodos A y B se utilizan para la inyección de corriente, mientras los electrodos M y N sirven para medir las diferencias de potencial, luego estos electrodos se van separando para obtener medidas de resistividad a diferentes profundidades. Para elegir las distancias entre los electrodos, existen varios arreglos (configuración entre electrodos).

Tabla 1.1 Resistividad de algunos tipos de rocas, sedimentos saturados de agua y rocas ígneas saturadas de agua. Modificada de Telford et al. (1990).

| Tipo de roca | Intervalo de resistividad [ohm-m] |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Lutitas consolidadas | 20 a 2×10^3 |
| Argilitas | 10 a 8×10^2 |
| Calcita | 10^9 |
| Tabla de agua en sedimentos | 10 a 100 |
| Tabla de agua en rocas ígneas | 0.1 a 3×10^3 |

| Tipo de roca | Intervalo de resistividad [ohm-m] |
|---------------|---------------------------------------|
| Limolita | $10^3 - 10^7$ |
| Cuarzo | $4 \times 10^{10} a 2 \times 10^{14}$ |
| Conglomerados | $2 \times 10^3 a 10^4$ |
| Tobas | $2 \times 10^3 a 10^5$ |
| Arcillas | 1 a 100 |

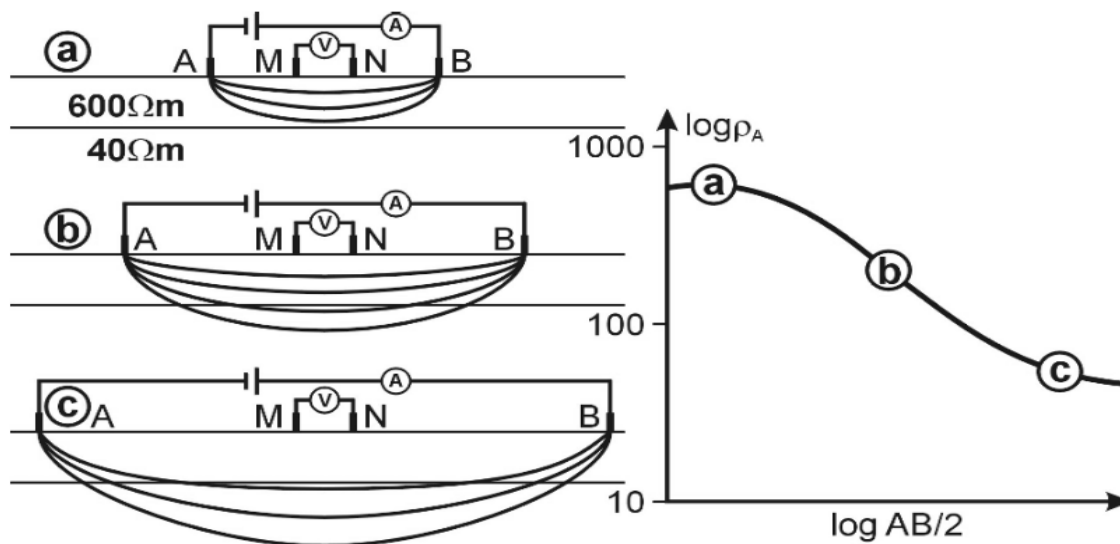


Fig. 1.4 Mediciones de resistividad aparente, con mayor espaciamento entre los electrodos de corriente se conduce a un aumento de las profundidades de penetración de la corriente inyectada. Los resultados se compilan en la curva de resonancia. Fuente: (Kirsch, 2009)

Según Kirsch (2009), para un suelo homogéneo y una disposición de electrodos arbitraria, la resistividad ρ_a [$Ohm * m$] puede calcularse a partir de la corriente I y la diferencia de potencial V como:

$$\rho_a = K \frac{V}{I} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde K es un factor geométrico y depende del arreglo de distancias elegido entre los electrodos y se calcula a partir de la **Ecuación 2**.

$$K^{-1} = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde K^{-1} es el inverso del factor geométrico. Según la Fig. 1.4, AM es la distancia entre el electrodo A y el electrodo M, BM es la distancia entre el electrodo B y el electrodo M, AN es la distancia entre el electrodo A y el electrodo N y BN es la distancia entre el electrodo B y el electrodo N.

Algunos de los arreglos interelectrónicos (configuración de separación de los electrodos) más usados son: Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, calicata, entre otros. Cada arreglo tiene sus beneficios y dificultades, pues dependiendo de este, la ecuación para el cálculo de la resistividad se simplifica, tal es el caso del arreglo Wenner; o puede complicar el cálculo de la resistividad, tal es el caso del arreglo Schlumberger, sin embargo, para los ejemplos anteriores, tomar las medidas en campo para el arreglo Wenner implica mayor logística y esfuerzo físico.

Los arreglos más comunes utilizados para realizar Sondeos Eléctricos Verticales son: el arreglo Wenner y el arreglo Schlumberger, ambos abordados a continuación.

1.4.1.1 Arreglo Wenner

En el arreglo Wenner, se debe tener los cuatro electrodos separados la misma distancia respecto los electrodos ubicados a su lado. Y los incrementos en las distancias deben darse de manera proporcional. Implicando según la Fig. 1.4 que la separación entre los electrodos sea igual (distancias $AM = MN = NB$). Si se toman estas condiciones, al desarrollar la **Ecuación 2**, se obtiene el factor geométrico para dicho arreglo (**Ecuación 3**).

$$K_{Wenner} = 2\pi a \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde: $a = AM = MN = NB$, siendo estos la distancia que existe entre la separación de electrodos (Kirsh, 2009).

1.4.1.2 Arreglo Schlumberger

El arreglo Schlumberger, implica que los electrodos de los extremos (A y B) sean separados en forma simétrica, pero sin mover los electrodos del centro (M y N). Esto permite que la logística para tomar las medidas sea menos complicada, sin embargo, al aplicar estas distancias a la ecuación 2, el cálculo del factor geométrico se vuelve un poco más complejo que para el arreglo Wenner (**Ecuación 4**).

$$K_{Schlumberger} = \frac{\pi}{MN} \left(\frac{AB}{2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde AB es la separación entre los electrodos de corriente A y B. MN es la separación entre los electrodos de voltaje M y N (Fig. 1.4). La ecuación aplica cuando $AB \gg MN$ (ibíd).

1.4.2 Tomografías eléctricas

Las tomografías eléctricas se basan en los principios básicos de los Sondeos Eléctricos Verticales. Cabe mencionar que esta es una de las técnicas empleadas en el desarrollo de esta investigación. Utilizando el equipo ABEM Terrameter SAS 1000 para realizar perfiles 2D de resistividad eléctrica del subsuelo; el equipo cuenta con una interfaz que permite conectar unos cables especiales de 100 metros de longitud, con conectores para electrodos cada 5 metros (Fig. 1.5).

En la Fig. 1.6, muestra la forma en que el equipo toma las medidas utilizando el arreglo Wenner, para el cual el espaciamiento interelectródico se define y se mantiene siempre la misma configuración, con la distancia mínima “a (espaciamiento a)”. Este arreglo, se desplaza de forma lateral, de manera que se van determinando valores de resistividad aparente a lo largo de la primera línea ($n=1$). Así mismo se hace para las siguientes líneas, variando únicamente el espaciamiento “a” obteniendo los valores de resistividad de las líneas 2, 3, 4 y 5 ($n=2$, $n=3$, $n=4$ y $n=5$).



Fig. 1.5 Equipo utilizado para realizar tomografías eléctricas. (ABEM, 2010)

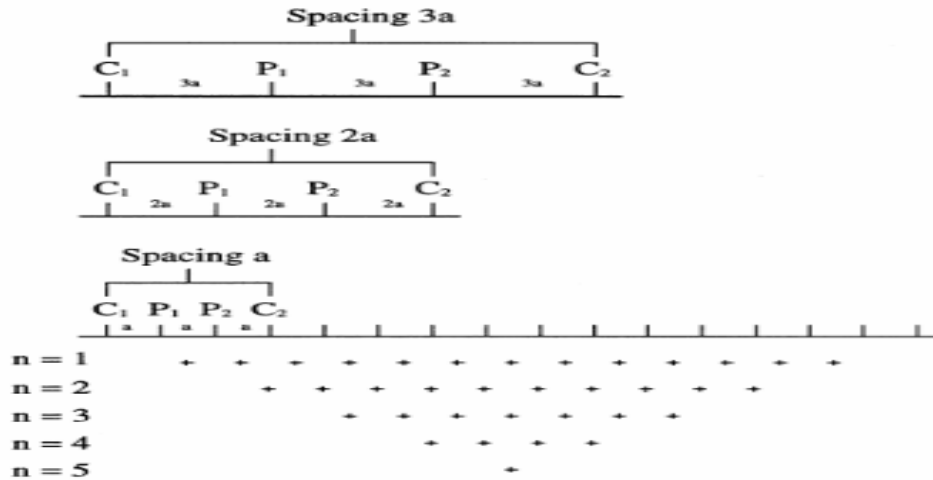


Fig. 1.6 Manera en la que el equipo toma las medidas, para cada línea el equipo mantiene la distancia interelectrónica desplazándose de manera horizontal. (ABEM, 2010)

Al realizar la tomografía eléctrica se obtienen datos de resistividad aparente, por lo que es necesario realizar un proceso de inversión para poder determinar la resistividad real del subsuelo. El Software utilizado para tal propósito es el RES2DINV.

El archivo requerido por el software RES2DINV debe ser de extensión .dat y según el manual (Geotomo Software, 2011) debe poseer el formato que se describe a continuación:

Línea 1: Nombre.

Línea 2: Espaciamiento mínimo entre electrodos.

Línea 3: Nro. del arreglo. Wenner (1), PoloPolo (2); Dipolo-Dipolo (3), Polo-Dipolo (6), Schlumberger (7) y ecuatorial Dipolo-Dipolo (8).

Línea 4: Número total de puntos.

Línea 5: Posición del punto. Si se da la posición del primer electrodo del arreglo se digita 0, si se da la posición del punto medio del arreglo se digita 1.

Línea 6: Etiqueta para datos IP. Si existen datos de resistividad aparente se digita 0.

Línea 7: Si el arreglo es del tipo Wenner, los datos estarán en 3 columnas: la primera será de a posición, la segunda de la abertura del arreglo y la tercera el valor de resistividad.

Al final de los datos, se agregan 6 ceros consecutivos.

En el caso de incluir la topografía se agrega un 2 bajo la última línea de datos, luego en la línea siguiente se agrega la cantidad de datos topográficos y a continuación los datos en 2 columnas, la primera con la posición respecto del primer electrodo y la segunda columna con la altura de ese punto. Una vez ingresado esto, en la línea siguiente se coloca un número entero correspondiente a la posición en los datos topográficos del primer electrodo.

1.5 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES

La modelación en investigaciones hidrogeológicas es de vital importancia para la comprensión del comportamiento de un acuífero. Estas abordan representaciones físicas o numéricas y permiten observar a escala el comportamiento hidrogeológico de un acuífero. Se fundamenta con información proveniente del campo y el laboratorio, definiendo las características como dinámicas de un área de interés (Córdova, Meffe, & Martínez Hernandez, 2013).

El flujo de las aguas subterráneas se estudia a partir de las leyes de la hidrodinámica, donde la porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento son los parámetros principales a considerar, siendo la ley de Darcy la base teórica que permitió el desarrollo analítico de esta disciplina en el siglo XIX (Betancur & Palacio, 2009).

Bredehoeft (2005) indica que al hacer análisis a modelos conceptuales pre-existentes, se pueden tener resultados sorpresa, que no sean coherentes con el modelo hidrogeológico. En estos casos, hace las siguientes recomendaciones:

“No hay otra solución disponible a este problema del modelo conceptual diferente de: (1) Recolectar tanta información como sea posible, mediante la utilización de todos los métodos aplicables, lo cual puede resultar en que esta nueva información ayude a cambiar el modelo conceptual vigente, y (2) Que el analista de modelos se mantenga siempre abierto al hecho de que un modelo conceptual puede cambiar de manera total, en la medida en que se colecte más información. En el análisis final el hidrogeólogo toma una decisión subjetiva en cuanto al modelo conceptual apropiado. El problema de la conceptualización no produce modelos infalibles. El problema presenta una incertidumbre, la cual a menudo no es tenida en cuenta de manera adecuada. Esta incertidumbre en los modelos conceptuales se aumenta, cuando se hacen predicciones a largo plazo del comportamiento de un sistema dado.”

Debido a esto se recomienda que los modelos conceptuales se estén actualizando, con nuevas mediciones de parámetros hidrogeológicos. Que se tome la mayor cantidad de datos posibles en

el área abarcada por el modelo. Esto hará que sean más confiables, a la hora de hacer predicciones a corto e inclusive a largo plazo, pero con mejor grado de confiabilidad.

Para la realización de un modelo hidrogeológico conceptual, se deben tener ciertas herramientas informáticas que ayuden a coleccionar la información de parámetros hidrogeológicos, y en base a esta, modelar las características de un acuífero. Herramientas tales como los Sistemas de Información Geográficos (SIG).

En el capítulo 3 de análisis y resultados de esta investigación se presenta una propuesta de modelo conceptual hidrogeológico, construida en base a información geológica, litológica y de niveles estáticos de pozos a lo largo de un perfil trazado sobre el área de estudio.

1.6 BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico, involucra diversos parámetros del ciclo hidrogeológico, tanto espaciales como temporales. Ejemplos de parámetros temporales se tiene la precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudal de ríos, etc. Mientras que parámetros espaciales pueden ser el coeficiente de infiltración, capacidad de campo, uso de suelos, pendiente del terreno, etc.

El estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia. O sea, el agua que entra a un suelo es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la infiltración del agua meteórica hacia el suelo, y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos (Schosinsky N G. , 2006).

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se les entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de *sistema*. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo. El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico. Estos componentes pueden agruparse en subsistemas del ciclo total (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

En la Fig. 1.7, se representa en ciclo global hidrológico como un sistema. Las líneas punteadas lo dividen en tres subsistemas: el *sistema de agua atmosférica* contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el *sistema de agua superficial* contiene los procesos de

flujo superficial, escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea, y escorrentía hacia ríos y océanos; y el *sistema de agua subsuperficial* contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea. El flujo subsuperficial ocurre en la capa del suelo cercana a la superficie, el flujo de agua subterránea, en estratos profundos (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

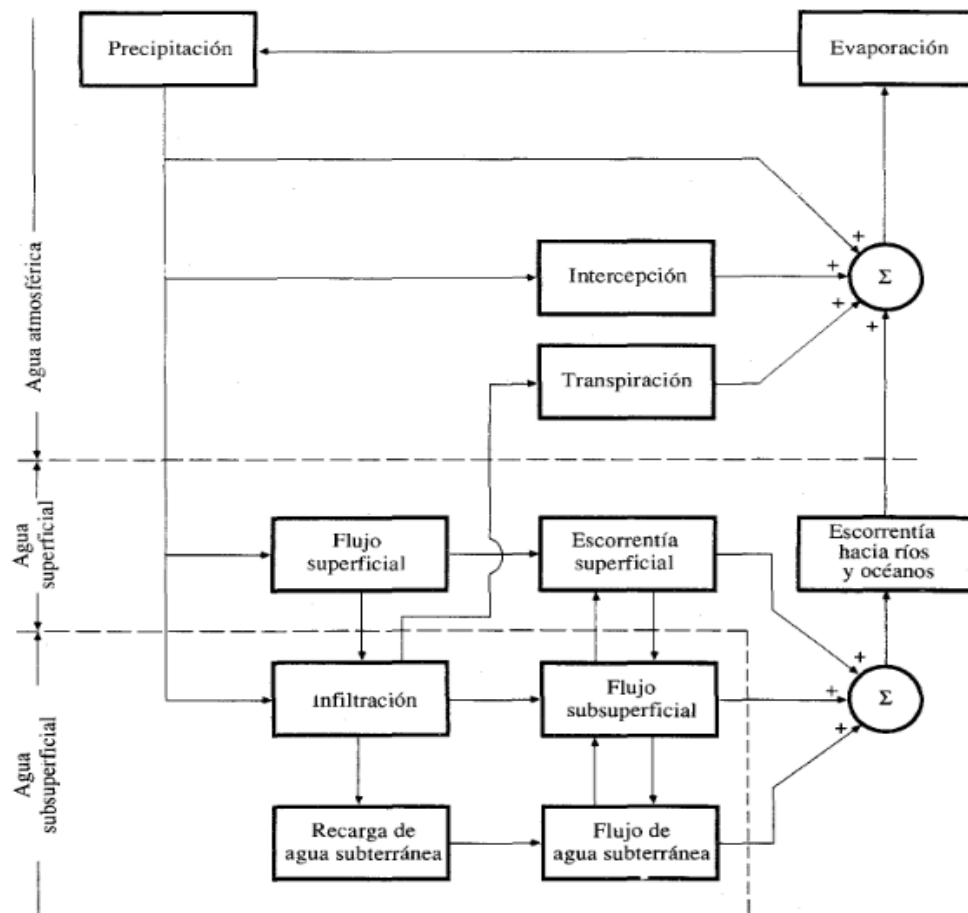


Fig. 1.7 Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

A continuación, se describen y explican algunos de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico.

1.6.1 Permeabilidad

La permeabilidad del suelo es un parámetro que determina la velocidad de infiltración del agua que precipita en determinada zona. Por lo que es indispensable en el cálculo del balance hídrico.

Esta se puede estimar en base a las características geológicas del suelo. Sin embargo, para resultados más confiables, es preferible que se tomen medidas de permeabilidad en el campo.

La infiltración del agua posee un rol fundamental en los procesos de escorrentía. Como respuesta a una precipitación dada en una cuenca, dependiendo de su magnitud, lluvias de iguales intensidades pueden producir caudales diferentes (Alvarado Batres, 2015).

En El Salvador Deras Cortéz (2003), propone una tabla de rangos de infiltración, correspondientes a diferentes tipos de suelos, estos se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Infiltración básica aproximada. Fuente: Modificada de Deras Cortéz (2003)

| Tipo de Suelo | Infiltración básica (mm/hr) | Infiltración Básica (mm/día) |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Arcilloso | 1 – 5 | 24 – 120 |
| Franco Arcilloso | 5 – 10 | 120 – 240 |
| Franco Limoso | 10 – 20 | 240 – 480 |
| Franco Arenoso | 20 – 30 | 480 – 720 |
| Arenoso | 30 o más | 720 o más |

Para la determinación de la permeabilidad del subsuelo, existen varios métodos; entre ellos: permeámetro de Guelph, doble anillo, anillo simple, porchet, etc. De los métodos antes descritos a continuación se explica el método del permeámetro de Guelph y del doble anillo.

1.6.2 Cálculo de la permeabilidad con el “Permeámetro de Guelph”

El permeámetro o infiltrómetro de Guelph (Fig. 1.8) es un instrumento que consta de dos tubos concéntricos de diferentes diámetros. Uno actúa como depósito de agua, y el otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo, lleva acoplado un sistema que permite mantener una carga hidráulica constante (Rodríguez, 2013).

La metodología que se usa para determinar la permeabilidad se describe en los siguientes pasos:

- Se perfora un orificio en el suelo de unos 15 cm de profundidad.
- Se llena el depósito de agua y se cierra para crear el vacío.
- Se introduce el cilindro de menor diámetro en el orificio del suelo.
- Se abre el émbolo de la parte superior y se realizan lecturas del flujo para dos cargas hidráulicas constantes, de 5 y 10 cm.

Rodríguez (2013) cita a Reynolds & Elrick (1985) quien define la ecuación que se utiliza para determinar la infiltración, considerando un régimen estacionario como:

$$K_{Guelph} = 60 \left(\frac{D_p^2}{D_o^2 + 4D_o H_2} \right) \times Q \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde K_{Guelph} es la infiltración en mm/h; D_p el diámetro del permeámetro en cm; D_o el diámetro del pozo de muestreo en cm; H_2 es la carga hidráulica utilizada en la medición y Q es el flujo a intensidad constante en condiciones de estado estacionario (mm/min).



Fig. 1.8 Permeámetro de Guelph siendo utilizado durante una prueba en el área de estudio.

1.6.3 Cálculo de la permeabilidad por el método del doble anillo

El método consiste en instalar en el terreno que se requiere determinar su infiltración, en un sitio característico y previamente limpiado de hierbas, desechos, piedras, etc., dos cilindros concéntricos de acero, huecos en el centro.

Los cilindros se introducen en el suelo cuidando que queden bien centrados entre sí y tratando de disturbar lo menos posible el suelo, sobre todo no compactarlo (Fig. 1.9). El cilindro interior debe quedar enterrado unos 12 cm y el exterior 10 cm. La cámara que queda formada entre ambos cilindros también se llena con agua hasta una altura conveniente y para que actúe como amortiguador, evitando que el agua que ingresa en el cilindro central se desplace lateralmente (tener en cuenta que se quiere medir la infiltración en sentido vertical).

Una vez que incorporada el agua a los cilindros, se comienzan a cronometrar los descensos del nivel de agua que ocurren en el cilindro central, debido a la infiltración, en intervalos de tiempo inicialmente pequeños, del orden del minuto, evaluar el proceso de infiltración durante un lapso antes definido, en base a los fines para los cuales se realizan las mediciones.

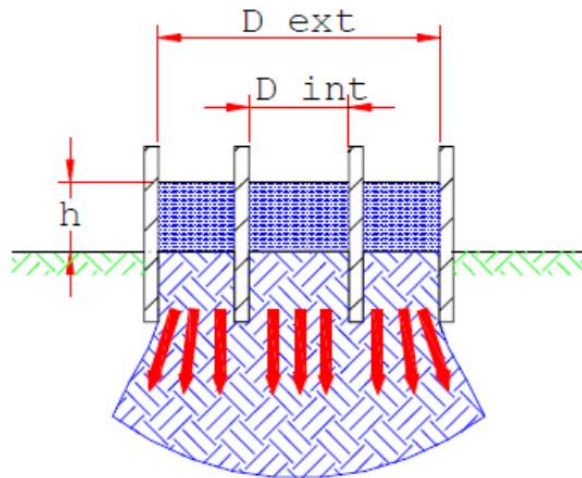


Fig. 1.9 Esquema del arreglo experimental utilizado para aplicar el método del doble anillo (Alvarado Batres, 2015)

El tiempo total de la prueba varía en función del tipo de suelo (de 45 a 90 minutos en suelos arenosos y de 3 a 5 horas en suelos arcillosos), de la duración de la aplicación de agua que proponga el método de riego a realizar.

El hecho de utilizar dos anillos se da para que el anillo exterior cuando se le vierta el agua impida que el agua del anillo interior fluya en sentido horizontal, ya que el flujo horizontal causaría errores en la determinación de la infiltración ya que el coeficiente de infiltración supone el flujo del agua es en sentido vertical.

Existen varias ecuaciones, propuestas por diferentes investigadores para poder determinar la velocidad de infiltración, de las cuales se abordará solamente la ecuación de Horton y la de Kostakov-Lewis.

1.6.3.1 Ecuación de Horton (1940):

$$I = V_f + (V_i - V_f)e^{-kt}$$

Ecuación 6

Donde “ I ” es la velocidad de infiltración [cm/hr], “ v_f ” la velocidad final de infiltración [cm/hr], “ v_i ” La velocidad inicial de infiltración [cm/hr], “ k ” es una constante adimensional y “ t ” es el tiempo [hr].

1.6.3.2 Ecuación de Kostakov-Lewis (1932)

Esta es una ecuación empírica y es la más utilizada para determinar la velocidad de infiltración por su fácil aplicación, por lo que en base a esta ecuación se realizaran los cálculos de permeabilidad del suelo.

$$I = kt^n$$

Ecuación 7

Donde “ I ” es la velocidad de infiltración [cm/hr], “ k ” es el parámetro que representa la velocidad de infiltración [cm/hr] durante el intervalo inicial (cuando $t = 1$), y n parámetro adimensional que indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo [$-1.0 < n < 0$].

1.7 PARÁMETROS DEL CICLO HIDROGEOLÓGICO

1.7.1 Precipitación

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Los instrumentos más utilizados para la medición de la precipitación en forma de lluvia son los pluviómetros y pluviógrafos, estos últimos se utilizan para determinar las precipitaciones pluviales de corta duración y alta intensidad. El lugar donde se deben instalar debe ser en zonas donde no se produzcan interferencias de edificaciones, árboles, o elementos orográficos como montañas.

La precipitación pluvial se mide en mm, y equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación sobre una superficie de 1 m² plana e impermeable (Alvarado Batres, 2015), que es equivalente a que 1 Litro de agua fuese depositado en una superficie de 1 m².

1.7.2 Evaporación

Se refiere al cambio de fase del agua, de líquida a gaseosa, este cambio en la superficie del suelo se da por dos factores. - La evaporación desde la superficie terrestre y - La transpiración de la vegetación. A los dos procesos en conjunto se les conocen con el nombre de *evapotranspiración*.

Los dos factores principales que influyen en la evaporación desde una superficie abierta de agua son el suministro de energía para proveer el calor latente de vaporización, y la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación. La radiación solar es la principal fuente de energía calórica. La evaporación desde la superficie terrestre comprende la evaporación directa desde la superficie del suelo y desde la superficie de la vegetación, y la *transpiración* a través de las hojas de las plantas, mediante la cual el agua es extraída por las raíces de las plantas, transportada hacia arriba a lo largo de sus tallos y difundida a la atmósfera a través de pequeñas aberturas en las hojas llamadas estomas (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando las estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua (Schosinsky N G. , 2006).

1.7.3 Evapotranspiración (potencial y real)

Potencial. Es la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, por evaporación y transpiración de las plantas, que ocurriría en el caso que hubiera un adecuado abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento (Monsalve, 1999; citado por Alvarado Batres, 2015)

Real. Es la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones reinantes atmosféricas y de humedad del suelo, por fenómenos de evaporación y transpiración de las plantas (ibíd.).

1.7.4 Capacidad de campo

Es la máxima humedad que puede tener un suelo contra la fuerza de la gravedad sostenida por capilaridad, expresada en porcentaje por peso seco [%] o en lámina de agua [mm] (Citizen Science, 2008; citado en Alas Romero & Cáceres Cruz, 2010).

1.7.5 Punto de Marchitez

Es el límite inferior del contenido de humedad, a partir del cual el agua no puede ser adsorbida por las raíces. Se expresa en lámina de agua o en peso seco de suelo (ibíd).

Schosinsky et. al. (2006) cita a Grassi (1976) quien desarrolla una clasificación de punto de marchitez (**PM**), capacidad de campo (**CC**) y densidad de suelo (**DS**); en base a la textura del suelo, por lo que, conociendo la textura podemos asignar valores para estos tres parámetros (Tabla 1.3).

Estos valores, son importantes para el cálculo del balance de suelos por la metodología de Schosinsky, basados en la textura del suelo que asignamos para ciertos valores de infiltración.

Tabla 1.3 Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo para diferentes texturas (Schosinsky, 2006 cita a Grassi, 1979).

| Textura del suelo | Porcentaje por peso de suelo seco | | |
|-------------------|-----------------------------------|---------|--|
| | PMP % | CC% | Densidad Aparente (g/cm ³) |
| Arcilloso | 15 – 19 | 31 – 39 | 1.20 – 1.30 |
| Arcillo arenoso | 13 – 17 | 27 – 31 | 1.25 – 1.35 |
| Franco arcilloso | 11 – 15 | 23 – 31 | 1.30 – 1.40 |
| Franco limoso | 8 – 12 | 18 – 26 | 1.35 – 1.50 |
| Franco arenoso | 4 – 8 | 10 – 18 | 1.40 – 1.60 |
| Arenoso | 2 – 6 | 6 – 12 | 1.55 – 1.80 |

1.7.6 Coeficiente de infiltración por vegetación y profundidad de raíces

El coeficiente de infiltración por vegetación, tanto como la profundidad de raíces son de gran importancia para el cálculo de la recarga potencial. En el caso de esta investigación, se elegirá el coeficiente de infiltración por vegetación y profundidad de raíz en base al tipo de uso de suelo.

Para el caso del coeficiente de infiltración por cobertura vegetal Schosinsky et. al. (2000) proponen la profundidad de raíces en base al tipo de cultivos (Tabla 1.4).

Tabla 1.4 Coeficiente de infiltración por vegetación en base al tipo de cultivos.

| Por cobertura vegetal | Kv |
|---------------------------------|------|
| Cobertura con zacate menos 50% | 0.09 |
| Terrenos cultivados | 0.1 |
| Cobertura con pastizal | 0.18 |
| Bosques | 0.2 |
| Cobertura con zacate más de 75% | 0.21 |

La profundidad de raíces es indispensable para el cálculo del balance hídrico, la cual puede ser electa en base al uso de suelo del área de estudio. Schosinsky et. al. (2000) proponen una tabla

para definir la profundidad de las raíces, basándose en el tipo de cultivo o vegetación de la zona. Esta vegetación, en el caso de este estudio se asignará partiendo del mapa de uso de suelo.

Tabla 1.5 Profundidad de raíces en base a diferentes tipos de cultivos.

| PROFUNDIDAD DE RAICES | m |
|------------------------------|----------|
| Alfalfa (pastos) | 1-2 |
| Algodón | 1-1.7 |
| Banano | 0.5-0.8 |
| Caña Azúcar | 1.20-2 |
| Frijol | 0.5-0.7 |
| Cebolla | 0.3-0.5 |
| Cítricos | 1.20-2.0 |
| Bosques | 2.0-3.0 |

1.8 ESTIMACIÓN DE RECARGA HÍDRICA POTENCIAL (SCHOSINSKY)

Gunter Schosinsky (2006), desarrolla una metodología para realizar el cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante el balance hídrico de suelos. Esta metodología considera varias variables que influyen en la recarga potencial de los acuíferos, tales como: la precipitación mensual, la retención pluvial, la capacidad de infiltración de los suelos y sus características, la cobertura vegetal, profundidad de raíces, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno. Desarrollando una hoja electrónica en Excel, que permite aplicar la metodología para el cálculo de la recarga potencial de manera fácil, haciendo uso de parámetros hidrogeológicos tomados en campo o de tabla en base a las características del área de estudio.

La hoja electrónica, diseñada por Schosinsky & Losilla (2000), utiliza la ecuación denominada “Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual”, descrita a continuación:

$$I = (1 - K_i)CP = 0.88CP = 0.88(K_p + K_v + K_f)P \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde I es la infiltración, K_i la fracción interceptada por el follaje (0.12), P la precipitación y C el coeficiente de infiltración, que representa la suma de los coeficientes: K_p la fracción que infiltra

por efecto de pendiente, K_v la fracción infiltrada por cobertura vegetal y K_{fc} la fracción que infiltra por textura del suelo.

En la hoja electrónica de Shcosinsky & Losilla (2000) utiliza diversa simbología para los parámetros hidrogeológicos que se utilizan la cual se describe a continuación describe a continuación.

- Permeabilidad **fc** (llamada también conductividad hidráulica o capacidad de infiltración).
- Coeficiente de infiltración por pendiente **Kp**.
- Coeficiente de infiltración debido a la vegetación **Kv**.
- Densidad del suelo **DS**.
- Profundidad de las raíces **PR**.
- Humedad inicial del suelo en el mes anterior a la estación lluviosa **HSi**.
- El número de mes con que inicia la humedad inicial (para El Salvador sería el mes 5 mayo).
- Lluvia retenida (0.20 para bosques y 0.12 para otros).
- Capacidad de campo **CC%**.
- Punto de marchitez **PM%**.
- Promedio de los datos tomados durante varios años de la precipitación promedio (**P**) de cada mes.
- Promedio de los datos tomados durante varios años de la evapotranspiración (**ETP**) potencial de cada mes.

Al sustituir los parámetros hidrológicos anteriores, la hoja de Excel calcula los siguientes:

- **Kfc**: Coeficiente de infiltración (factor estimado con base a la prueba de infiltración **fc**)
- **C**: Fracción de infiltración (este es la suma de k_p , k_v y k_{fc} si este es mayor que 1 se toma el valor de $I = 1$).
- **(CC-PM)**: Rango de Agua Disponible.
- **C1**: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR.
- **C2**: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR.
- **Pi**: Precipitación que infiltra.

- **ESC:** Escorrentía Superficial.
- **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.

Para el cálculo de los parámetros antes mencionados, la hoja electrónica hace uso de varias ecuaciones. Algunas de las cuales son condicionales a ciertos rangos numéricos para los que la ecuación cumple (Schosinsky N G. , 2006)

Tal es el caso de la **Ecuación 9** propuesta por Schosinsky et al. (2000) para el cálculo del coeficiente de infiltración por textura **Kfc**, que se calcula a partir del valor de permeabilidad (**fc**) calculado en base a pruebas de infiltración. Cabe mencionar que esta es una ecuación se formuló en base a la correlación de valores de precipitación mensual, con los valores de infiltración potencial del país de Costa Rica, sin embargo, debido a la similitud climática entre Costa Rica y El Salvador, se tomará esta ecuación como válida.

$$Kfc = 0.267 \times \ln(fc) - 0.000154 \times fc - 0.723 \quad \text{Ecuación 9}$$

1.9 ESTIMACIÓN DE RECARGA HÍDRICA POTENCIAL (VARIACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO)

Conocer la recarga potencial que un acuífero recibe, es un factor clave para dar protección y manejo sostenible a la explotación de este. Para Healy y Cook (2002) la estimación de la recarga potencial es de vital importancia para gestionar adecuadamente un acuífero, siendo el método de la variación del nivel freático (VNF), de los más sencillos de aplicar, debido la independencia del mecanismo de desplazamiento del agua subterránea. Dicho método es aplicable para acuíferos no confinados (acuíferos libres) y requiere conocimiento del almacenamiento específico y las variaciones temporales del nivel freático.

Una de las definiciones más común del nivel freático, es la superficie que separa la zona capilar de la zona saturada, pudiendo ser definida por el nivel del agua en pozos que se encuentran en acuíferos no confinados. Físicamente se refiere a la superficie en la cual la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica (Hamad, 2009).

La recarga no se produce de forma continua, en algunas épocas con mayor intensidad que otras; existen lugares donde la precipitación es casi inexistentes o no es eficaz para producir recarga durante varios meses del año, con lo que se marcan claramente, estaciones en que se produce recarga y otras estaciones en las que no se produce. La recarga origina una elevación del nivel de agua y después, el agua aportada se extiende hacia los lugares de descarga, naturales o artificiales del acuífero, dando origen a un descenso o recesión gradual del nivel piezométrico que se mantiene hasta el siguiente periodo de recarga. (Custodio & Llamas, 2001). La Fig. 1.10, muestra una secuencia de datos de precipitación y variación del nivel piezométrico para un acuífero libre con un comportamiento similar al descrito anteriormente; donde se aprecia que justo después de una semana con alta precipitación, se produce un ascenso en el nivel piezométrico, que luego de alcanzar el máximo en la curva de datos, desciende gradualmente.

El ejemplo de la Fig. 1.10, es un caso particular de la zona del estado de Maryland, Estados Unidos, que se encuentra en latitud 39° , por lo que a esas latitudes (arriba de los 20°), se perciben las cuatro estaciones año (invierno, primavera, verano, otoño). En el caso de El Salvador, se encuentra en latitud 13° (muy cercana al ecuador) se perciben dos estaciones bien marcadas en el año (época seca y época lluviosa), estas épocas se dan con periodos de seis meses, la época lluviosa típicamente comienza en mayo y finalizando en octubre; por lo que para secuencia de datos de niveles piezométricos de pozos de El Salvador; específicamente para un pozo de la zona de estudio (Fig. 1.11), se marcan claramente una época de niveles altos seguida de una época de niveles bajos con periodicidad anual.

En base al comportamiento climático, y la respuesta del acuífero ante este; se hace factible utilizar la variación de los niveles piezométricos, para la estimación de la recarga potencial del acuífero.

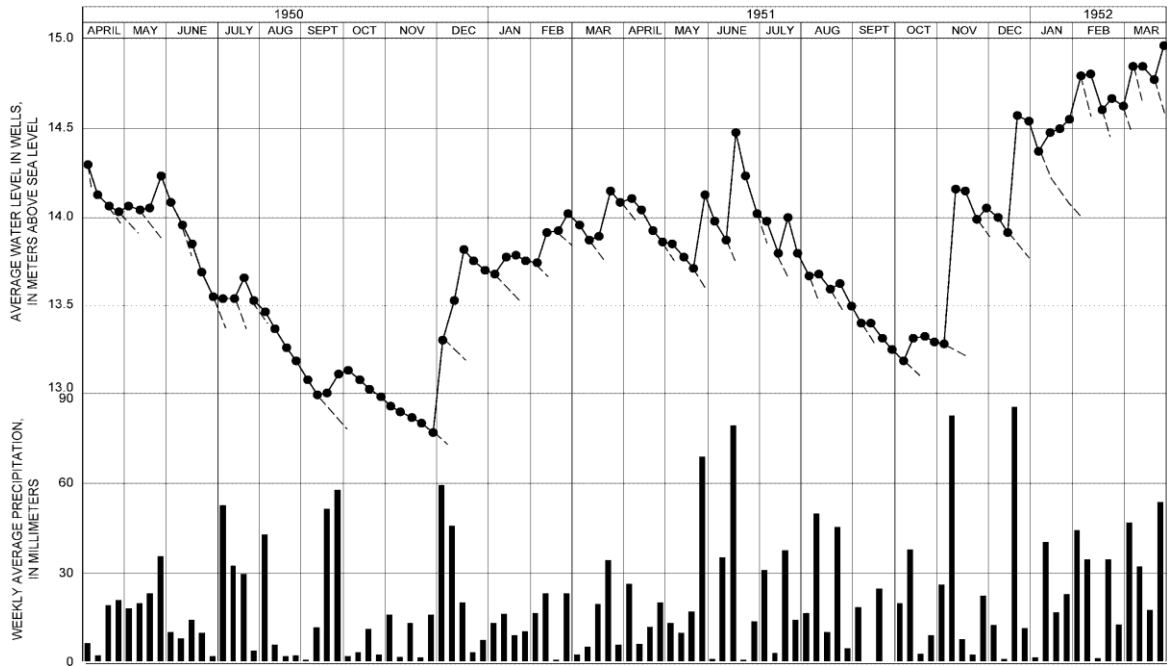


Fig. 1.10 Hidrograma de nivel piezométrico de pozos y gráfico de barra de precipitación promedio semanal, durante el periodo de abril de 1950 a marzo de 1952, para la cuenca de Beaverdam Creek, Maryland, USA. (Healy & Cook, 2002).

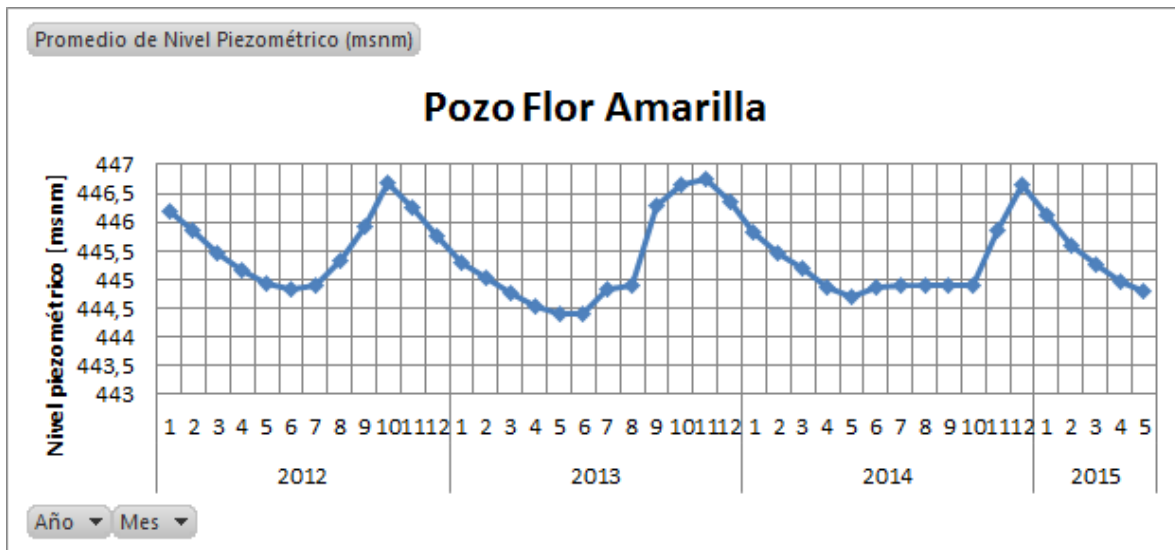


Fig. 1.11 Variación de los niveles piezométricos, para el pozo Flor Amarilla, de la sub-cuenca del Río Sucio, El Salvador. (Elaboración propia, base de datos DGOA)

Ya que los pozos normalmente son construidos para el abastecimiento de agua, se vuelve poco atractivo invertir en la construcción de pozos destinados para el monitoreo del nivel piezométrico de acuíferos; sin embargo, son muy útiles para propósitos investigativos y de manejo del recurso hídrico (Chávez Matal & Pastora Flores, 2007).

El cálculo de la recarga potencial es aplicable a acuíferos freáticos poco profundos, con respuesta rápida de los niveles freáticos a los fenómenos de recarga. Es uno de los métodos más utilizados en el mundo para estimar la entrada de agua a acuíferos libres. Requiere para su aplicación de la estimación previa del coeficiente de almacenamiento específico y mediciones temporales de nivel (Healy & Cook, 2002) Este puede ser simplificado de la siguiente manera:

$$R = \Delta S^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde Q_{off}^{gw} es el flujo subterráneo entrante; Q_{on}^{gw} , el flujo subterráneo saliente; ΔS^{gw} , el cambio en el almacenamiento; Q^{bf} , el flujo base, y ET^{gw} es la evapotranspiración desde el acuífero.

El método de VNF se basa en la premisa de que aumentos en la superficie freática en acuíferos libres se deben a la incorporación de agua procedente desde la superficie. El cálculo de la recarga potencial según este método es definido por la siguiente expresión matemática:

$$R = \frac{S_y dh}{dt} = \frac{S_y \Delta h}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde R es la recarga; S_y , el almacenamiento específico; h, la altura del nivel piezométrico, y t es el tiempo.

Esta ecuación asume que toda el agua que alcanza el nivel freático llega inmediatamente al almacenamiento y que todos los otros componentes de la ecuación general de recarga son cero durante el tiempo de duración del evento, lo que hace que el tiempo sea crítico en el éxito del método. La valoración de la recarga se realiza estimando el valor de Δh , el cual obedece a la diferencia entre el pico más alto del gráfico nivel-tiempo y un punto extrapolado desde la curva de descenso anterior, para cada lapso seleccionado (Healy & Cook, 2002).

Para el cálculo del almacenamiento específico S_y , Quiroz Londoño et al (2012) realiza este cálculo, graficando los ascensos del nivel freático respecto a las precipitaciones que lo generaron (Fig. 1.12). Siendo el almacenamiento específico o rendimiento específico (S_y , el inverso de la pendiente de la recta que envuelve los puntos graficados.

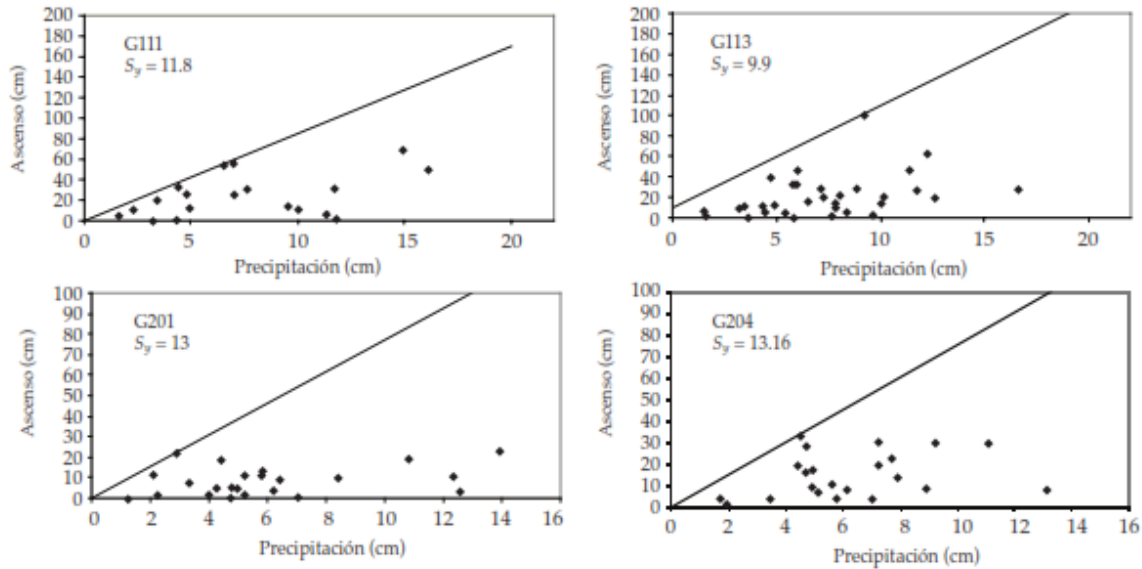


Fig. 1.12 Ascenso del nivel freático vs precipitaciones que los produjeron, valores de almacenamiento calculados (Quiroz-Londoño, Martínez, & Massone, 2012).

1.9.1 Limitaciones del método VNF

Según Healy & Cook (2002) este método no se ve afectado por los mecanismos de transporte del agua en la zona no saturada, por lo que los resultados no se ven afectados por estos. Siendo el nivel del agua medido en un pozo, representativo de hasta varios metros cuadrados. Aunque el flujo en la zona no saturada no es un problema, Healy & Cook describe ciertas limitantes:

1. El método se aplica mejor a acuíferos libres no muy profundos, en que la variación del nivel cambie de manera abrupta.
2. Las razones de recarga pueden variar sustancialmente de un sitio a otro debido a diferencias de elevación, geología, vegetación, pendiente entre otros factores, por lo que el pozo debe estar ubicado de manera que los niveles del agua monitoreados sean representativos de la cuenca como un todo.
3. El método no puede representar una tasa de recarga constante. Por ejemplo, si la tasa de recarga fuera igual a la tasa de descarga que sale del acuífero libre, los niveles de agua no cambiarían, por lo que el método no sería aplicable.
4. Otras limitantes están relacionadas con la causa de las fluctuaciones y el cálculo adecuado para el almacenamiento específico.

1.10 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

El desarrollo de herramientas informáticas ha permitido en los últimos años la solución de diversos problemas de forma práctica y rápida. Estas herramientas fueron mejorándose con los avances en el uso de ordenadores. A continuación, se presenta una breve reseña histórica de los avances que se han tenido en los Sistemas de Información Geográfica hecha por Martínez Solamo (2002).

“Hacia finales de los años 1950 apareció lo que se ha dado en llamar la segunda generación de ordenadores. Estos tenían un coste mucho más económico que sus predecesores y facilitaron que su uso se extendiera más allá de las grandes agencias gubernamentales. La primera consecuencia del aumento en el uso de los ordenadores fue un incremento progresivo de la exigencia requerida a los mismos. Esto incluía su uso para dos aplicaciones que requerían una gran capacidad de cálculo: la estadística y el manejo de información gráfica. Así, en 1959 Waldo Tobler diseña un sistema de gestión de mapas que bautizó como MIMO (Map In – Map Out). Este sistema sentó las bases para la geocodificación, y poseía todas las herramientas estándar de lo que hoy se conoce como SIG. Un poco más tarde, en 1963, se desarrolla en Canadá un proyecto dirigido por Roger Tomlison denominado Canadian Geographic Information System (CGIS). Dos años después surge en los Estados Unidos un sistema similar, el MIDAS. Tanto con el CGIS como con el MIDAS se pretendía procesar información sobre los recursos naturales. Un año después se creó el Laboratorio de Análisis Espacial y Gráfico por Ordenador en la Universidad de Harvard. Allí estudiaron, entre otros, los creadores de Intergraph (David Sinton), ESRI (Jack Dangermond) y ERDAS (Lawrie Jordan y Bruce Rado).”

Los Sistemas de Información Geográfica, son de vital importancia, pues en investigaciones de cualquier disciplina se utiliza información georreferenciada, asignándole un lugar en el espacio geográfico. Por otro lado, ayudan a presentar los resultados de forma gráfica, haciendo de fácil entendimiento los resultados de investigaciones presentadas.

Una de las definiciones más simples que podría hacerse de un SIG es que constituye un potente conjunto de herramientas para la recogida, almacenamiento, extracción, análisis y visualización de información geográfica procedente del mundo real (Burrough, 1986; citado por Martínez Solamo (2002)). En sí se puede considerar que los SIG son bases de datos donde la información está georreferenciadas.

La funcionalidad de un SIG incluye: entrada de datos, visualización de datos, gestión de datos, recuperación y análisis de la información. Considera la disposición, en capas (Fig. 1.13), de un conjunto de datos. "Serie de mapas de la misma porción del territorio, donde la localización de un punto tiene las mismas coordenadas en todos los mapas incluidos". De esta forma, es posible analizar sus características temáticas y espaciales para obtener un mejor conocimiento de la zona (Escobar, Hunter, Bishop , & Zerger , s.f.).

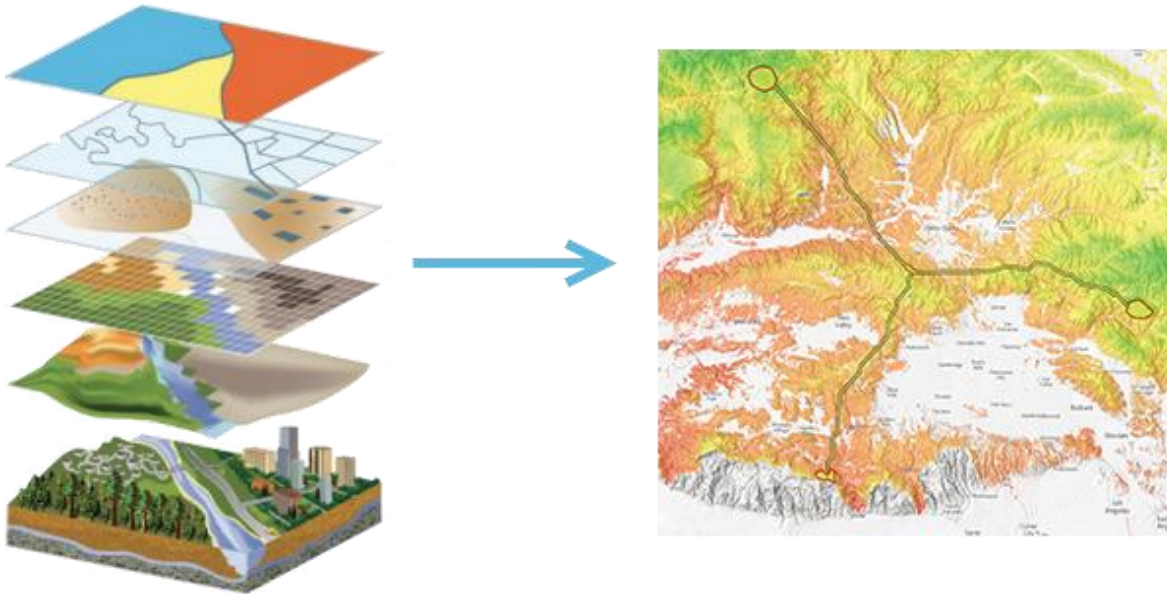


Fig. 1.13 Concepto de capas (recuperado el 19/10/2016 de: <https://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/reference/GUID-6FF5EE5E-2F36-421F-B94C-87AD3212CB7E-web.png>)

Las representaciones espaciales de los datos en un SIG se llaman Modelos Espaciales de datos. Los modelos espaciales de datos usados por un SIG pueden clasificarse básicamente en dos modelos elementales: el *modelo ráster* o *matricial* (también llamado *modelo grid*) y el *modelo vectorial* (Martínez Solamo, 2002).

1.10.1 Modelos ráster

El modelo ráster de representación de datos espaciales emula la realidad a través de la creación de una rejilla regular. En este modelo de datos, lo que se almacena de cada objeto es, no solo su contorno, sino su interior. Se suele aplicar una rejilla o cuadrícula en la cual cada celda tiene la misma forma y tamaño (Fig. 1.14). De esta forma se obtiene una especie de matriz cuyas celdas almacenarán el valor que la variable elegida toma en ese punto. Esta variable almacenada puede ser cualitativa (como es el caso de usos del terreno o el tipo de demanda de agua) o cuantitativa (elevación o caudal demandado en cada punto de una red). Se han descrito varias estructuras de

datos para el almacenamiento permanente de esta información. La primera sería una enumeración exhaustiva. Consiste básicamente en la recogida de manera individualizada y secuencial de los contenidos de cada celda (Martínez Solamo, 2002).

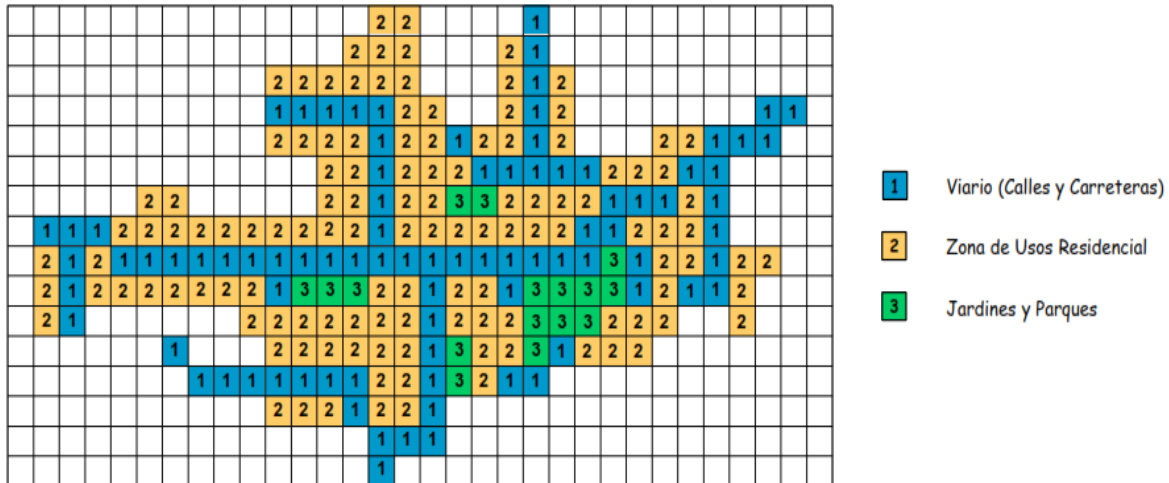


Fig. 1.14 Esquema de una representación ráster de la información contenida en un mapa (Martínez Solamo, 2002).

1.10.2 Modelos vectoriales

En el modelo vectorial los datos son almacenados como objetos y éstos pueden ser clasificados dependiendo de su naturaleza en dos tipos principales (OGC, 1999; citado en Martínez Solamo, 2002).

Los modelos vectoriales comprenden polígonos, líneas o puntos georreferenciados; asignándoles dimensiones espaciales (longitud, área). A estas formas geométricas se asignan atributos con información temática dentro de una base de datos. A partir de esta, posteriormente se pueden hacer búsquedas espaciales, ubicando sitios de interés con las características requeridas. A diferencia de los modelos ráster, los modelos vectoriales no pierden resolución al realizar acercamientos en ellos. En la Fig. 1.15 se observa un ejemplo de vectorización de un modelo (pasar de modelo ráster a modelo vectorial).

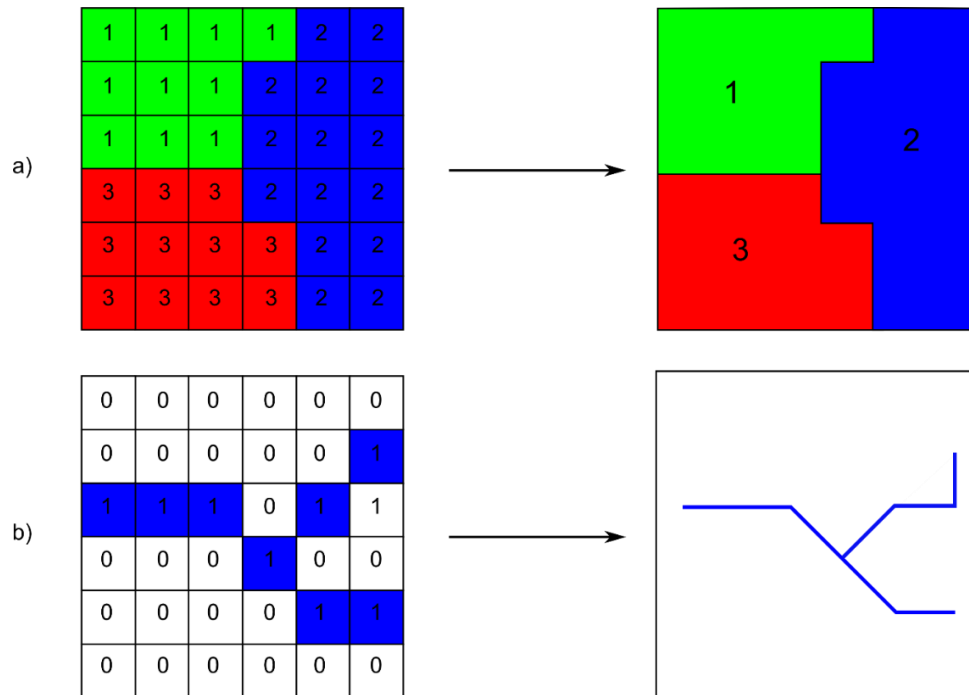


Fig. 1.15 Vectorización de capas ráster discretas en capas de polígonos (a) y de líneas (b) (recuperado el 20/09/2016 de: <http://volaya.github.io/libro-sig/img/Vectorizacion.png>).

Entre los programas más comunes de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se encuentran algunos de código abierto como QGIS, GRASS, gvSIG, GeoServer, etc., mientras que dentro de la gama de software comerciales se encuentran ArcGIS, Autodesk Map, MapInfo, etc. Existen otros softwares que integran los SIG con el modelado numérico de superficies como MODFLOW, Golden Surfer, Golden Strater, GMS AQUAVEO, etc.

CAPITULO 2 METODOLOGÍA

En la Fig. 2.1 se describe la metodología para el desarrollo de esta investigación de manera esquemática. De las primeras 3 subsecciones que presenta el esquema, se explica con mayor detalle en los siguientes apartados.

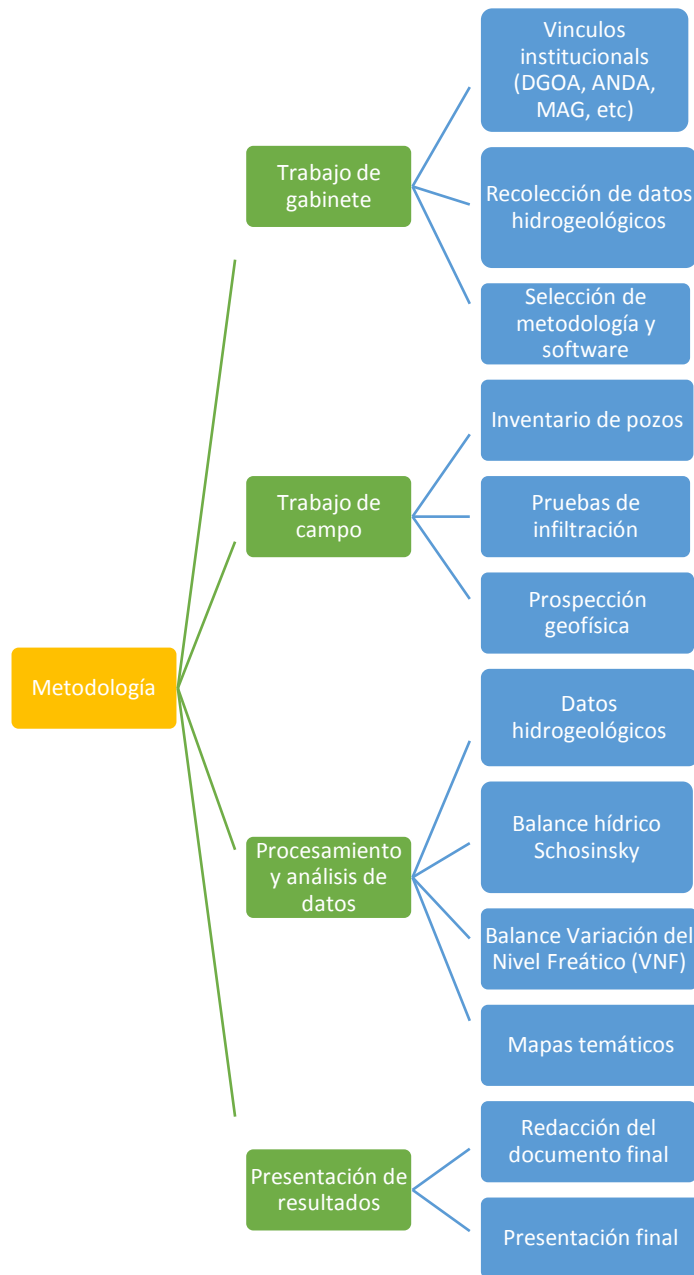


Fig. 2.1 Flujograma de metodología aplicada para el desarrollo de la investigación (elaboración propia).

2.1 TRABAJO DE GABINETE

Para realizar la investigación, se debe recopilar la mayor cantidad de datos de los pozos ubicados dentro de la zona de estudio, entre éstos los datos de los **niveles piezométricos** de los pozos ubicados dentro de la zona de estudio, la **litología de pozos** y **parámetros hidrogeológicos**.

- Solicitud de información al Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador (MAG), de los informes de pozos perforados en la zona propiedad del MAG, estos pozos fueron

perforados con el propósito de extraer agua para riego dentro del distrito de riego de Zapotitán. Estos informes de pozos contienen información vital como la **litología y los parámetros hidrogeológicos del cada pozo**, parámetros que son un reflejo de las características propias del acuífero poroso del Distrito de Riego de Zapotitán.

- Solicitud a la Dirección General del Observatorio Ambiental, de la serie de datos de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio. Con esto se podrá correlacionar las variaciones de los niveles piezométricos en los pozos de monitoreo de la DGOA, con el registro de precipitaciones. Además los datos de temperatura y evaporación, permitirán hacer una estimación de la evapotranspiración que luego será utilizada para realizar el balance hídrico por medio de la hoja electrónica de Schosinsky (2000).
- Delimitación de la parte alta de la subcuenca del Río Sucio, basada en el tratamiento y análisis geoespacial del Modelo Digital de Elevación (DEM) con resolución de 10 metros por pixel.
- Análisis del mapa geológico, hidrogeológico y de uso de suelos; para establecer los sitios para realizar las **pruebas de infiltración y tomografías eléctricas**.

2.2 TRABAJO DE CAMPO

- Inventario de pozos de la zona, para determinar la superficie del nivel piezométrico del acuífero. Esto permitirá modelar el agua subterránea y determinar el potencial y gradiente hidráulico.
- Pruebas de infiltración distribuidas dentro del área de estudio de manera homogénea (dependiendo del acceso al área), tomando en cuenta el uso de suelo y la geología del área de estudio, en base a estas pruebas se elaborará un mapa de infiltración. La velocidad de infiltración en esta investigación será medida in-situ ya sea por el método del permeámetro de Guelph o aplicando el método del doble anillo.
- Tomografías eléctricas, con el objetivo de modelar perfiles 2D de resistividad eléctrica del subsuelo; realizadas principalmente en las zonas donde se tienen los depósitos sedimentarios del Cuaternario (Qf) ya que son el estrato más reciente en la secuencia litológica de los estratos geológicos, por lo que los demás estratos deberían de encontrarse bajo este. En base a esto se podrá determinar el espesor de los estratos geológicos más superficiales en diversos puntos, pudiendo correlacionar con las columnas litológicas de pozos perforados ubicados dentro del área de estudio.

2.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el procesamiento de los datos hidrogeológicos se utilizará software de manejo de datos como Excel, a partir del cual se ordenará y estructurará la información, adaptándola a formatos requeridos por otros softwares, tales como: QGIS, para el análisis y presentación de la información geográfica (geodatos); Golden Software Surfer, utilizado en la interpolación de datos para generar mapas de contorno y modelos en 3D; Golden Software Strater, elaboración de perfiles litológicos, diseño de pozos, etc.; hoja electrónica de Schosinsky en Excel, utilizada para el balance hídrico de suelos; RES2DINV para realizar la inversión de tomografías eléctricas, entre otros.

Excel, es un software de la compañía Microsoft Office, y se utiliza como hoja de cálculo, dentro de esta, se pueden realizar operaciones matemáticas y estadísticas, además permite presentar la información de manera gráfica. Permite exportar las tablas a extensiones .csv, txt, .xls, etc. Por lo que será de gran utilidad para el manejo de datos tales como: coordenadas geográficas de mediciones realizadas en campo, puntos que luego utilizando software SIG, permitirá plasmar la información en mapas.

QGIS, es un software SIG de uso libre, que permite presentar información geográfica, se pueden manejar formatos ráster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL y OGR, así como bases de datos. Algunas de sus características son: Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS; Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS, etc.; Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.). QGIS además permite la integración de plugins desarrollados tanto en C++ como Python, que ayudan a facilitar el análisis y presentación de geodatos (información georreferenciada). Durante esta investigación se utilizará en la elaboración de mapas para la presentación de resultados y el análisis espacial, tal es el caso de la delimitación del área de estudio.

La hoja electrónica de Schosinsky, se utilizará para facilitar los cálculos del balance hídrico de suelos, utilizando los parámetros hidrogeológicos de la zona de estudio. Pudiendo comparar los resultados de la recarga hídrica potencial, mediante la metodología de Schosinsky, con los resultados de recarga hídrica potencial obtenidos por el método de Variación del Nivel Freático (VNF).

Strater y Surfer, de Golden Software, el primero sirve para la elaboración de secciones transversales, diseños de pozos, etc. Mientras que Surfer, se utiliza para la elaboración de mapas de contorno, para la zonificación tanto de zonas de recarga hídrica, como la variación de la precipitación a lo largo del terreno. Además, es capaz de generar modelos de capas del suelo en dos y tres dimensiones, por lo que es una herramienta esencial para el modelamiento del acuífero.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la información de bases de datos que ha sido brindada por diversas instituciones, e información generada a partir de las mediciones hechas en campo durante el desarrollo de esta investigación.

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

Según el mapa hidrogeológico de El Salvador (ANDA-FIAS-COSUDE, 2008), dentro del área de estudio se define la existencia de dos unidades acuíferas. La primera se refiere a la “Unidad acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción”, y la otra se refiere a la “Unidad acuífero poroso de gran extensión y productividad media”. En la Fig. 3.1 se muestra el mapa de las unidades acuíferas presentes en el área de estudio.

La transmisividad de los pozos profundos propiedad del MAG que son utilizados para riego van desde los $127.87\text{m}^2/\text{día}$, hasta los $843.26\text{m}^2/\text{día}$, con un promedio de $499.62\text{m}^2/\text{día}$ (HAZAMA CORPORATION, 1998).

3.1.1 Unidad acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción.

Esta unidad la constituyen principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Se pueden distinguir en flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria debido a fallamiento existente (ANDA-FIAS-COSUDE, 2008).

3.1.2 Unidad acuífero poroso de gran extensión y productividad media

Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos, aglomerados retrabajados (pómez, lapilli, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a

gruesa, Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia del grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituyen. Esta unidad puede llegar a tener hasta más de 50 metros de espesor (ANDA-FIAS-COSUDE, 2008).

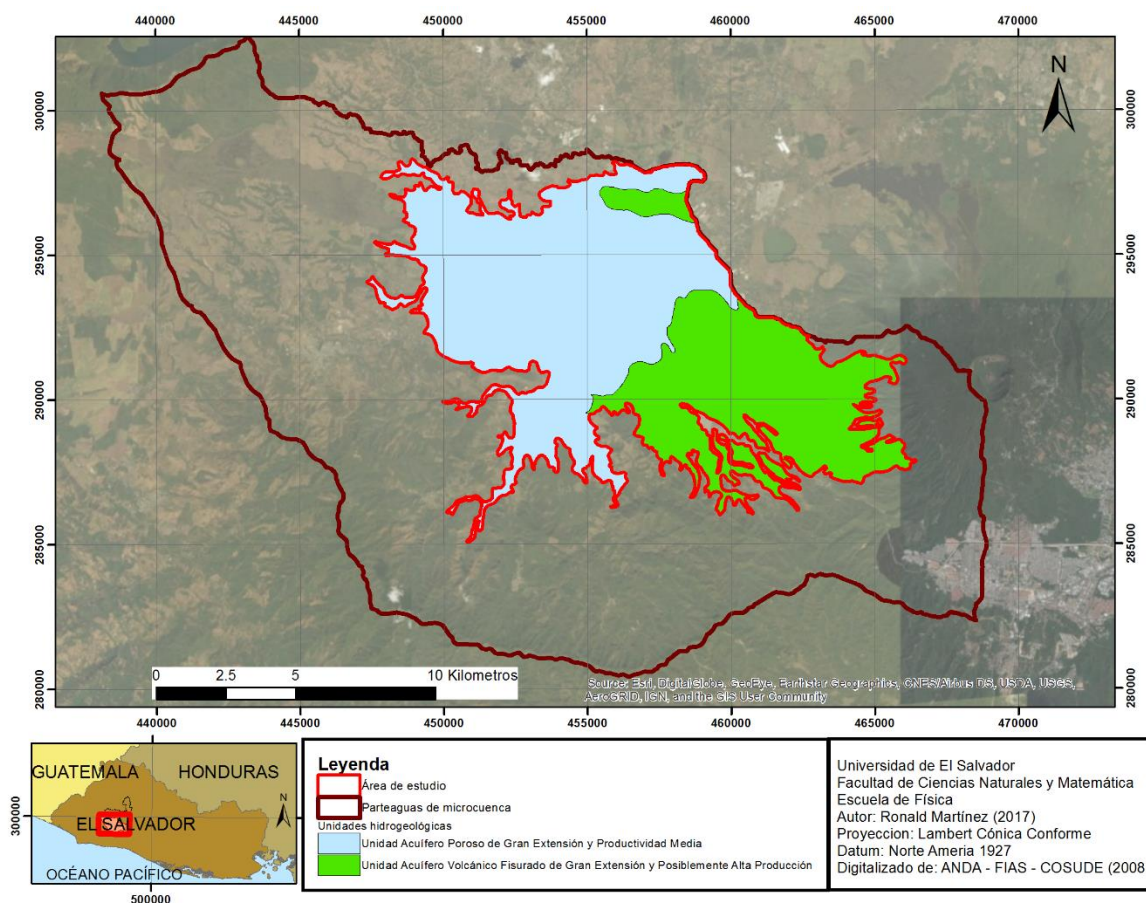


Fig. 3.1 Mapa de unidades acuíferas ubicadas dentro del área de estudio (Fuente: Digitalizado de ANDA – FIAS - OSUDE, 2008).

3.2 MAPA DE USO DE SUELO

Para la elaboración del mapa de uso de suelos se tomó en cuenta las observaciones hechas en campo, mapas de uso de suelos preexistentes elaborados por el Centro Nacional de Registros en 1996 y la revisión de imágenes satelitales para delimitar y actualizar zonas de uso de suelo. Este mapa se ha desarrollado para definir el coeficiente de vegetación y la profundidad de raíces dentro del área de estudio, necesarios en el cálculo de balance hídrico (Fig. 3.2).

En la Tabla 3.1 se presenta el análisis espacial de la distribución de áreas para diferentes tipos de uso de suelo, pudiendo observarse que apenas el 0.12% del área es bosque natural sin embargo posee el 42.96% es bosque de café. Dentro del área de estudio, predominan cultivos de café, pastos y granos básicos y caña de azúcar.

Tabla 3.1 Área en kilómetros cuadrados para los diferentes tipos de suelo y porcentaje del área total utilizada.

| Uso de Suelo | Área (km ²) | Porcentaje % |
|-------------------------|-------------------------|--------------|
| Áreas urbanas | 27.90446269S | 7.429883869 |
| Bosques naturales | 0.448672326 | 0.119464163 |
| Café | 161.3578375 | 42.96337855 |
| Caña de azúcar | 60.48736203 | 16.10545526 |
| Hortalizas | 1.215267985 | 0.323579067 |
| Pastos y granos básicos | 124.1570415 | 33.0582391 |
| Total | 375.570644 | 100% |

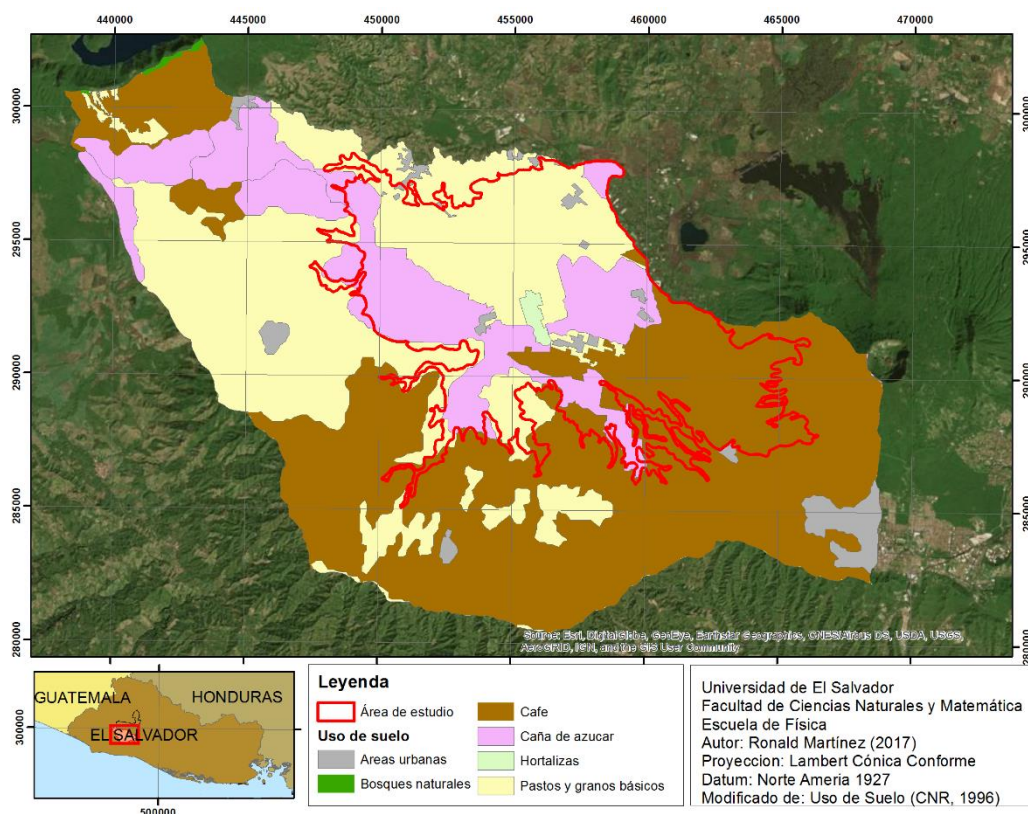


Fig. 3.2 Mapa de uso de suelo de la microcuenca del área de estudio (elaboración propia)

3.3 MAPA DE PENDIENTES

En base al modelo de elevación digital de la zona, generado a partir de información topográfica del Centro Nacional de Registros, se elaboró el mapa de pendientes (Fig. 3.3) para la zona de

estudio. Esta información será utilizada para el cálculo del balance de suelos aplicando la metodología de Schosinsky para determinar el coeficiente de infiltración por pendiente K_p .

Schosinsky & Losilla (2000) proponen una tabla de rangos de coeficientes de infiltración para diversos rangos de porcentaje de pendiente, sin embargo los rangos de porcentajes propuesto no poseen continuidad por lo que se propone una modificación a estos (Tabla 3.2). Este coeficiente de pendiente aumenta a medida que la pendiente disminuye.

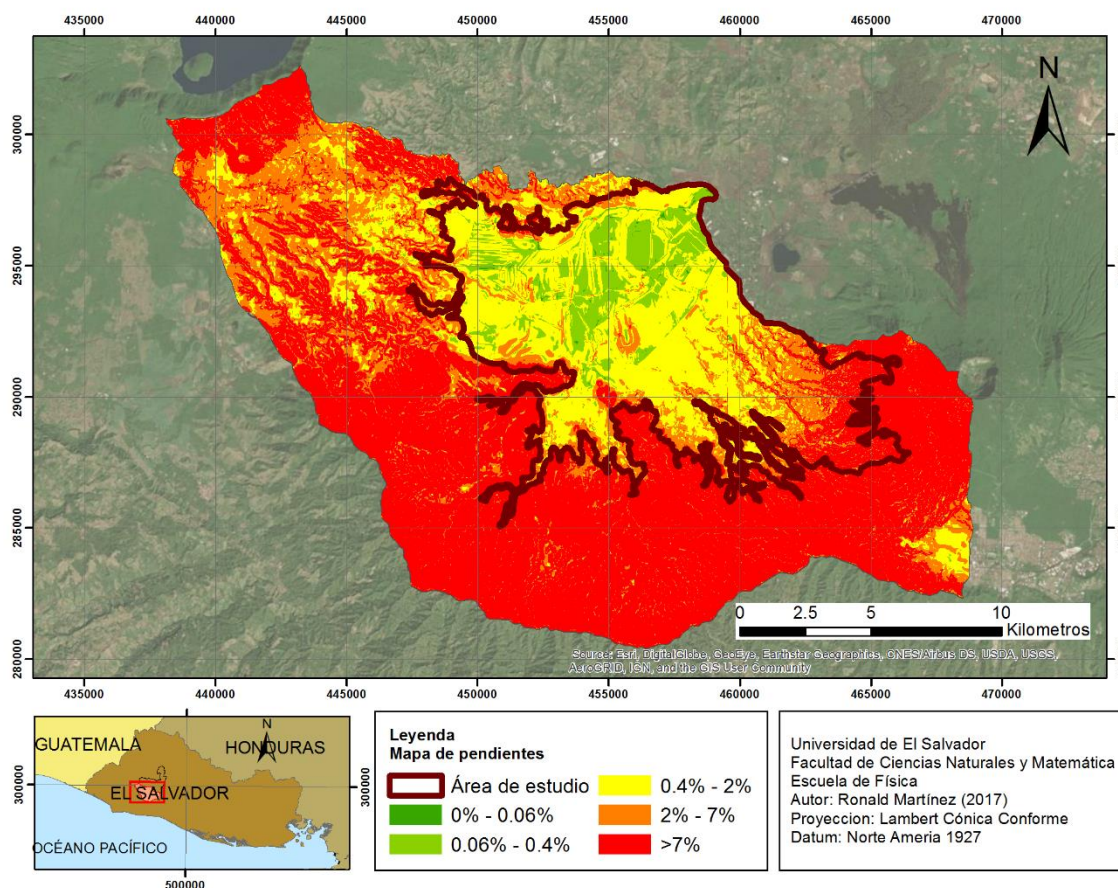


Fig. 3.3 Mapa de porcentajes de pendiente de la microcuenca alta del Río Sucio

Tabla 3.2 Tabla de coeficientes de infiltración por pendiente (Modificada de Schosinsky (2000)).

| Por pendiente | Rango de pendientes % | K_p |
|---------------|-----------------------|-------|
| Muy plana | 0 – 0.06 | 0.3 |
| Plana | 0.06 – 0.4 | 0.2 |
| Algo plana | 0.4 – 2 | 0.15 |
| Promedio | 2 – 7 | 0.1 |
| Fuerte | >7 | 0.06 |

Del mapa de pendientes, se puede identificar el total de área referida a cada rango de pendientes. Siendo las pendientes >7% predominantes, con el 55.32% del área total del parteaguas de la microcuenca; dentro del área de estudio este porcentaje se reduce. El rango pendiente con menor porcentaje de área es entre el 0% - 0.06% cubriendo apenas el 0.15% del área total (Tabla 3.3). Sin embargo, dentro del área de estudio las pendientes que predominan son la plana (0.06% – 0.4%) y algo plana (0.4% – 2%).

Tabla 3.3 Total de área comprendida para diferentes rangos de pendientes y porcentaje respecto al área total.

| Por pendiente | Rango de pendientes % | Área (km²) | % de área |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| Muy plana | 0 – 0.06 | 0.56 | 0.15 |
| Plana | 0.06 – 0.4 | 18.46 | 4.92 |
| Algo plana | 0.4 – 2 | 75.55 | 20.12 |
| Promedio | 2 – 7 | 73.16 | 19.49 |
| Fuerte | >7 | 207.67 | 55.32 |
| | Total | 375.3911986 | 100 |

3.4 PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

Para realizar pruebas de infiltración se utilizó el permeámetro de Guelph, que fue proporcionado por el Departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador. Con este equipo se realizaron diecinueve pruebas de infiltración, distribuidas de forma uniforme sobre el área de estudio durante un periodo de tiempo entre agosto de 2016 y mayo de 2017. A estas pruebas, se les asignó el código que va desde PIGh01, hasta PIGh19 asignando el número de forma correlativa.

Debido a que la zona de estudio se concentra dentro de la parte alta de la Microcuenca del Río Sucio; dos de estas pruebas, fueron llevadas a cabo en la zona alta en las cercanías del Cerro Verde (fuera del área principal de estudio). Pues se considera que, por gravedad la precipitación que cae dentro del parteaguas aporta tanto escorrentía como flujo de agua subterránea.

Por otro lado, dos pruebas (PIGh07 y PIGh15) no se pudieron desarrollar debido a las condiciones del terreno, por lo que en base al tipo de suelo observado en campo (aparentemente arcillas) se le asignó un valor de tabla.

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de las pruebas de infiltración hechas en campo durante esta investigación, obteniendo valores que van desde los 20.1 mm/día hasta 872.7 mm/día. Para

lograr apreciar mejor los resultados, en la Fig. 3.4 se presenta la distribución espacial de estos puntos en sobre el mapa del área delimitada para la microcuenca alta del Río Sucio que engloba el área de estudio.

Tabla 3.4 Resultados de pruebas de infiltración hechas durante la investigación y su textura de suelo en base a tabla de Deras Cortez (2003).

| Código Prueba | Coordenadas UTM 16P | | Fecha | Cultivo | Textura del suelo (en base a infiltración) | Infiltración (mm/día) |
|---------------|---------------------|---------|------------|----------------|--|-----------------------|
| | X | Y | | | | |
| PIGh01 | 237801 | 1523156 | 08/12/2016 | Maíz | Arenoso | 20.12 |
| PIGh02 | 239170 | 1523524 | 08/12/2016 | Maíz | Arcilloso | 1.26 |
| PIGh03 | 238205 | 1522589 | 15/12/2016 | Frijol | Arcilloso | 28.39 |
| PIGh04 | 234018 | 1526462 | 20/12/2016 | Maíz | Arcilloso | 21.95 |
| PIGh05 | 234375 | 1526093 | 20/12/2016 | Maíz | Arcilloso | 58.83 |
| PIGh06 | 234741 | 1525341 | 20/12/2016 | Rábanos | Arcilloso | 608.69 |
| PIGh07 | 236181 | 1524765 | 20/12/2016 | Maíz | Arenoso | 24.00* |
| PIGh08 | 235414 | 1522550 | 21/12/2016 | Caña | Arcilloso | 660.64 |
| PIGh09 | 237805 | 1525593 | 21/12/2016 | Maíz | Franco Arenoso | 154.11 |
| PIGh10 | 236931 | 1521321 | 13/01/2017 | Caña | Franco Arcilloso | 872.71 |
| PIGh11 | 237010 | 1522492 | 13/01/2017 | Maíz | Arenoso | 183.38 |
| PIGh12 | 239603 | 1520773 | 13/01/2017 | Pepino | Franco Arcilloso | 278.95 |
| PIGh13 | 239154 | 1522450 | 13/01/2017 | Maíz | Franco Limoso | 51.37 |
| PIGh14 | 241609 | 1523613 | 13/01/2017 | Caña | Arcilloso | 235.33 |
| PIGh15 | 240549 | 1523752 | 13/01/2017 | Caña | Franco Limoso | 24.00* |
| PIGh16 | 241155 | 1525272 | 13/01/2017 | Maíz | Arcilloso | 146.94 |
| PIGh17 | 245306 | 1518062 | 20/05/2017 | Bosque | Franco Arcilloso | 176.21 |
| PIGh18 | 222751 | 1527280 | 20/05/2017 | Caña | Franco Arcilloso | 602.10 |
| PIGh19 | 222354 | 1529813 | 20/05/2017 | Bosque de café | Franco Arenoso | 535.80 |

* Valor asignado en base a tabla (Deras Cortéz, 2003)

Con el objetivo de facilitar el análisis y los cálculos del balance hídrico de suelos, a partir de los resultados de las pruebas de infiltración, se desarrolló un mapa de áreas de infiltración; basándose en un método de interpolación de software, combinado con las unidades acuíferas del Mapa Hidrogeológico de El Salvador (ANDA-FIAS-COSUDE, 2008). El mapa de infiltración (Fig. 3.5) se ha dividido en cinco clases según la velocidad de infiltración: 72 mm/día (arcilloso), 180 mm/día (franco arcilloso), 360 mm/día (franco limoso), 600 mm/día (franco arenoso) y 860 mm/día (arenoso).

Los valores de infiltración asignados en base a la interpolación y la geometría de las unidades acuíferas se basan en el promedio entre el máximo y mínimo de cada rango de infiltración por textura presentados en anteriormente en la Tabla 1.2.

Tabla 3.5 Área en kilómetros cuadrados y porcentaje de área para valores de infiltración respecto al mapa anterior.

| Tipo de suelo (textura) | Infiltración (mm/día) | Área (km ²) | Porcentaje % |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------|
| Arcilloso | 72 | 24.0883315 | 6.37 |
| Franco arcilloso | 180 | 215.473268 | 56.98 |
| Franco limoso | 360 | 37.6254349 | 9.94 |
| Franco Arenoso | 600 | 96.3380696 | 25.48 |
| Arenoso | 860 | 4.63312375 | 1.23 |
| Total | | 378.1582278 | 100 |

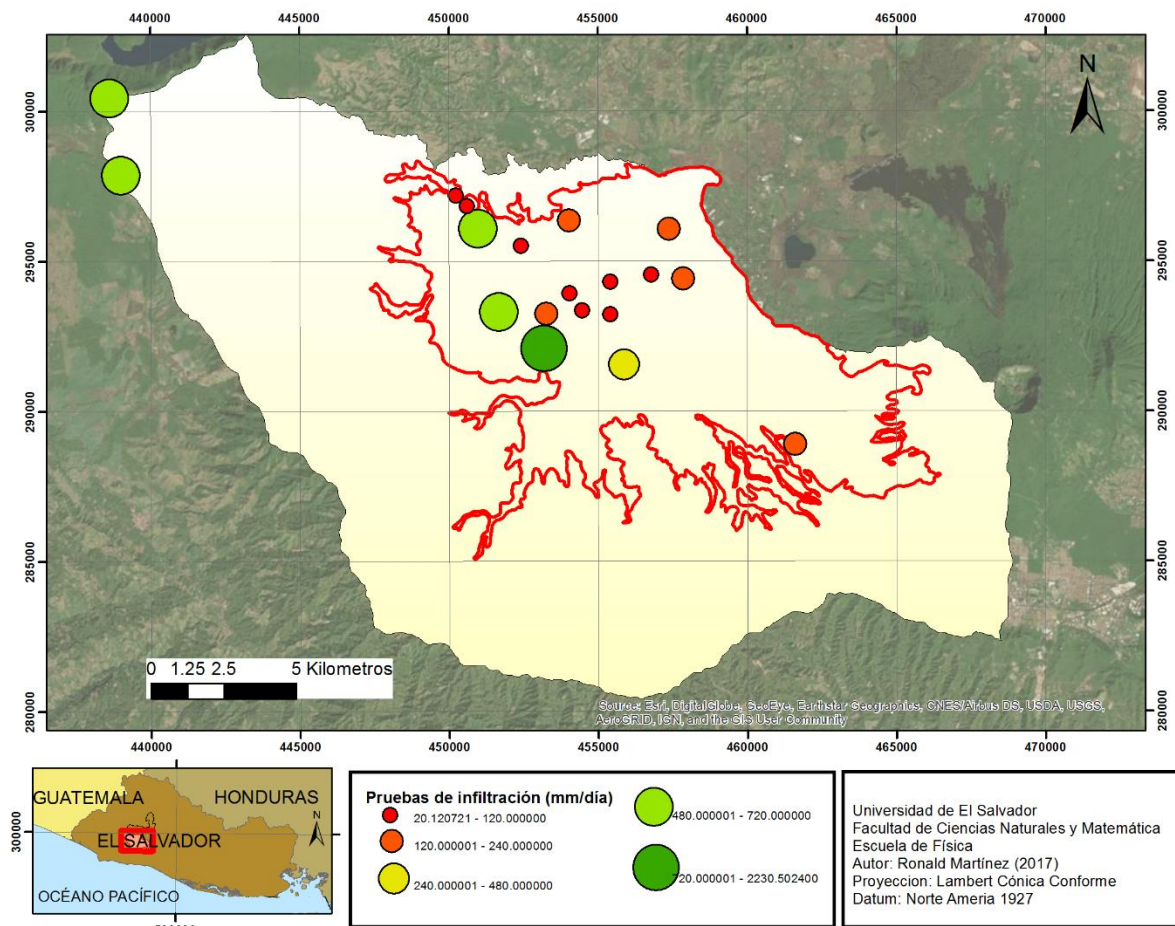


Fig. 3.4 Mapa de resultados de pruebas de infiltración tomadas entre agosto de 2016 y mayo de 2017.

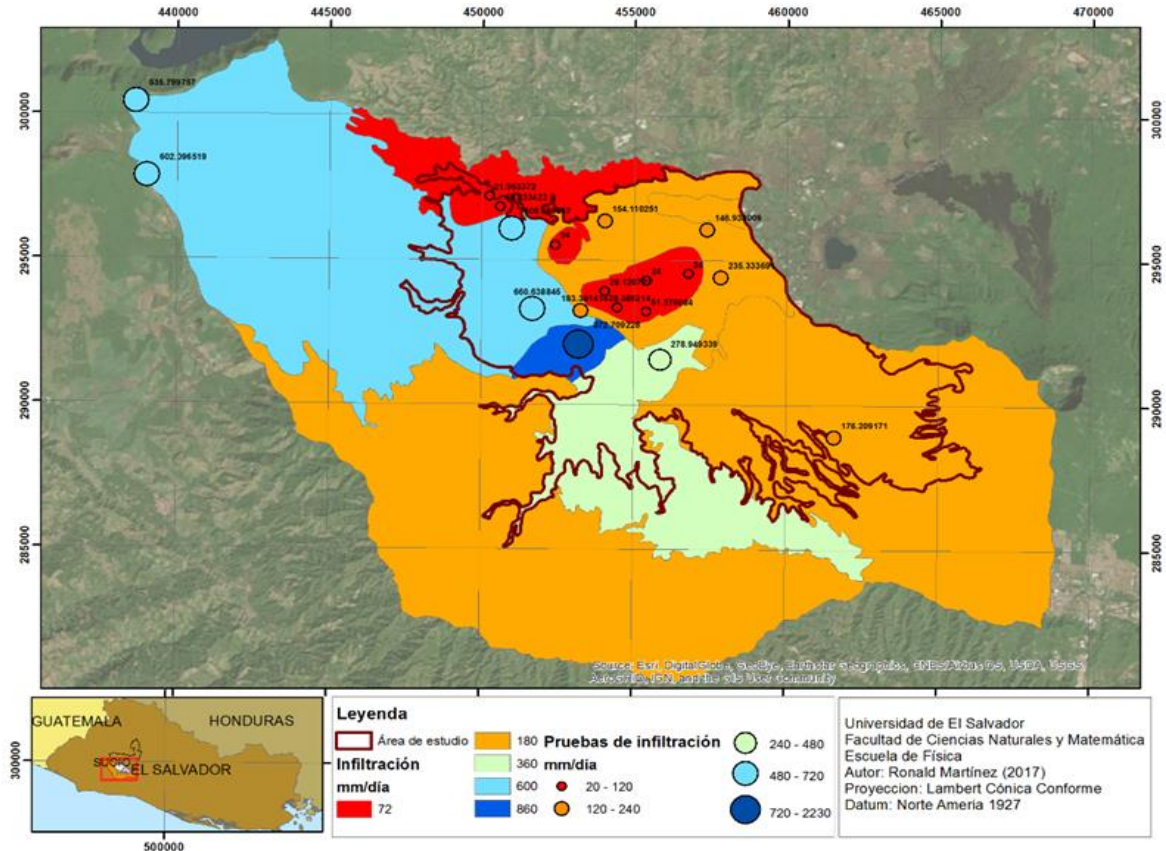


Fig. 3.5 Mapa de polígonos de infiltración, generado a partir de la interpolación por el método de Kriging en base a las pruebas de infiltración desarrolladas durante esta investigación. Fuente: Elaboración propia.

3.5 PRECIPITACIÓN Y ETP PROMEDIO MENSUAL

Para elaborar un mapa de distribución de la precipitación y ETP (evapotranspiración potencial), se dispuso una base de datos de precipitación y ETP, que cuenta con una serie de datos mensuales que van desde el año 1970 hasta el año 2001, esta información es generada por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA).

En base a estos datos, se calculó la Precipitación y ETP promedio mensuales, para cada una de las estaciones cercanas a la microcuenca que engloba el área de estudio. Se seleccionaron solamente las estaciones que cuentan con datos de ETP y precipitación (A35, L04, L08 y L27). Con las estaciones resultantes de la selección anterior, generamos el mapa de polígonos de Thiessen (Fig. 3.6). De las estaciones cercanas, solamente se utilizará la información de los polígonos de Thiessen L08 y L04, pues estos abarcan prácticamente toda el área de estudio.

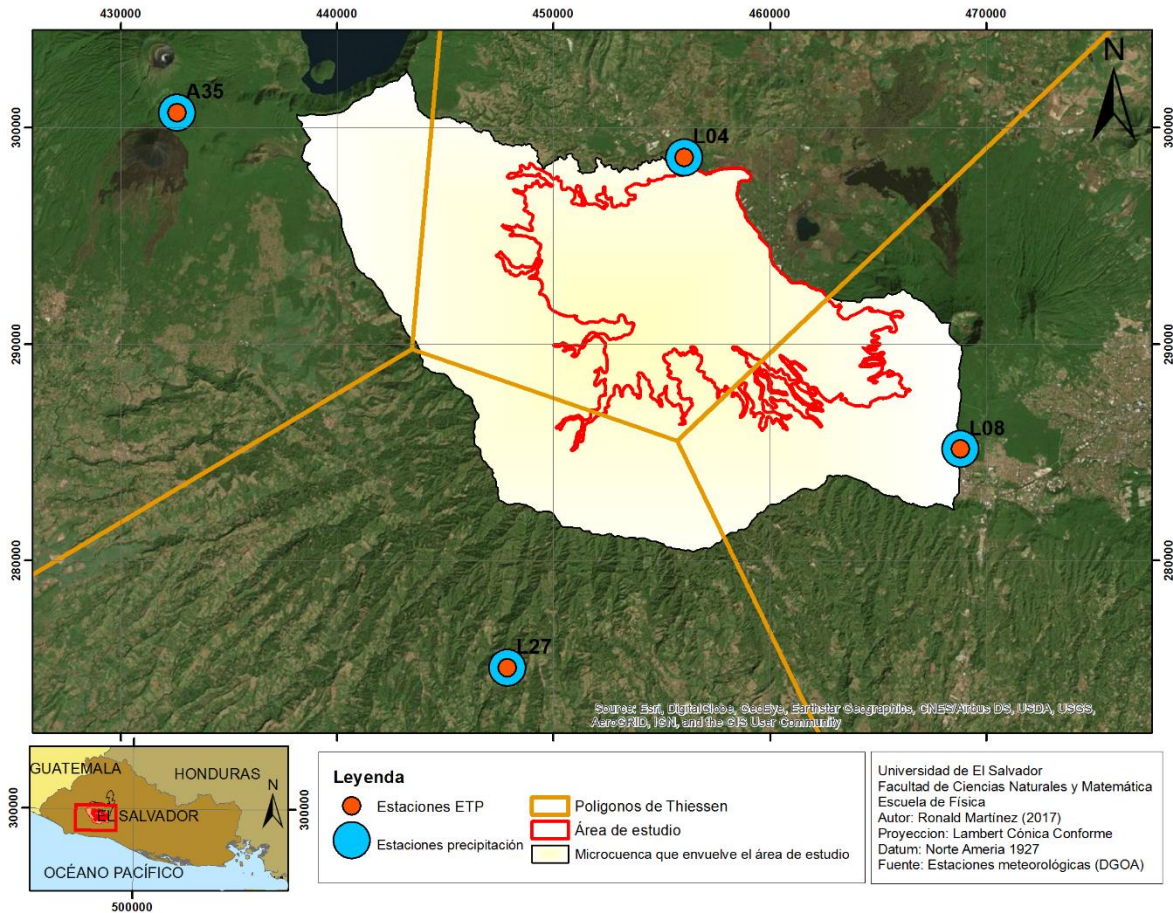


Fig. 3.6 Estaciones meteorológicas con datos de precipitación y ETP con sus respectivos polígonos de Thiessen

Los datos de la ETP promedio mensual, serán utilizados para el cálculo del balance de suelos por la metodología de Schosinsky. En la Tabla 3.6 se muestran los promedios por cada mes obtenidos de la serie de datos que va desde el año 1970 al 2001.

Tabla 3.6 Promedios por cada mes de ETP para la serie de datos del 1970 al 2001 (Fuente: DGOA)

| Estación | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP |
|------------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|-------|-------|
| A35 | 95.215 | 95.3437 | 94.4625 | 100.9 | 101.5843 | 119.0656 | 119.003 | 112.125 | 95.8968 | 107.2 | 107.1 | 87.77 |
| L04 | 138.01 | 125.931 | 126.465 | 132.915 | 138.0718 | 172.3125 | 176.268 | 171.7875 | 150.7281 | 158.5437 | 156.0 | 139.5 |
| L08 | 127.07 | 118.173 | 115.646 | 122.132 | 125.476 | 150.272 | 152.028 | 144.604 | 137.436 | 152.044 | 147.2 | 128.5 |
| L27 | 129.83 | 129.528 | 134.946 | 143.175 | 143.2062 | 168.8062 | 167.643 | 156.1187 | 141.3625 | 153.5187 | 147.1 | 128.6 |

Por otro lado, también se utilizarán los promedios mensuales de precipitación, que se han calculado a partir de la serie de datos que va desde el año 1970 al 2001 (Tabla 3.7)

Tabla 3.7 Promedios de precipitación por cada mes para la serie de datos de 1970 a 2001 (fuente: DGOA)

| Estación | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP |
|------------|--------|---------|---------|----------|----------|---------------|---------|----------|----------|----------|----------|-------|
| A35 | 186.52 | 76.025 | 13.6656 | 6.05 | 8.9625 | 23.57187 5 | 65.5406 | 249.65 | 440.1343 | 374.7875 | 386.2875 | 363.3 |
| L04 | 219.37 | 46.7837 | 8.75194 | 4.818836 | 2.558413 | 13.24857 | 51.7829 | 195.5226 | 325.1448 | 281.7474 | 326.684 | 363.5 |
| L08 | 200.02 | 56.0562 | 8.25 | 5.43125 | 1.45625 | 12.49375 | 35.8 | 170.2187 | 320.0812 | 349.1687 | 336.125 | 355.2 |
| L27 | 286.59 | 78.375 | 10.925 | 2.5 | 1.65625 | 10.90625 | 41.9593 | 196.5093 | 358.2156 | 339.4093 | 333.109 | 418.3 |

3.6 CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL (SCHOSINSKY)

Para la estimación de la recarga se utilizó el mapa de infiltración, que se generó a partir de las pruebas de infiltración hechas en campo, este mapa se interceptó con el mapa de los polígonos de Thiessen para poder correlacionar la información de las estaciones meteorológicas. Generando de esta manera el mapa mostrado en la Fig. 3.7. Por otro lado, para definir el coeficiente de infiltración por pendiente K_p y el coeficiente de infiltración por vegetación K_v que predominan en el área correspondiente a cada polígono de infiltración se utilizó el mapa de rangos de pendientes y mapa de uso de suelo.

En base a la Tabla 1.4 se asignó el valor de K_v para terrenos cultivados (0.1), para las áreas con los usos de suelo de: “Pastos y granos básicos”, “Hortalizas”, “Caña de azúcar”, K_v para cobertura de pastizal (0.18) en el caso de haber una mezcla entre cultivos de “Café” y “Caña”, por último K_v de bosques (0.2) para terrenos con bosque de “Café”.

El coeficiente de infiltración por pendiente (K_p) se definió basándose en los rangos propuestos en la Tabla 3.2. Mientras que coeficiente de almacenamiento debido a la textura del suelo (K_{fc}) fue estimado en base a la **Ecuación 9**.

La densidad del suelo (DS), capacidad de campo (CC) y el punto de marchites (PM) se han definido en base a los rangos de infiltración, asociados a la textura del suelo presentado en la Tabla 1.3.

La Tabla 1.5, se utilizó para asignar los valores de profundidad de raíces, se estableció que para terrenos en los que predominan “Pastos y granos básicos” la profundidad de raíz sería de 150 mm; para terrenos con cultivos de “Café” y mezcla entre “Café” y “Caña”, se asignó una profundidad de raíz de 200 mm; y para terrenos con predominancia de “Caña” se asignó una profundidad de raíz de 180 mm.

A partir de los parámetros de los polígonos de infiltración y su área respectiva (Fig. 3.7), se ha generado la Tabla 3.8; en la que se definen los parámetros utilizados para el cálculo de la recarga potencial, el área abarcada por cada tipo de polígono de infiltración, el tipo de acuífero al que se asocia el área y los resultados de la recarga anual obtenida en mm/año.

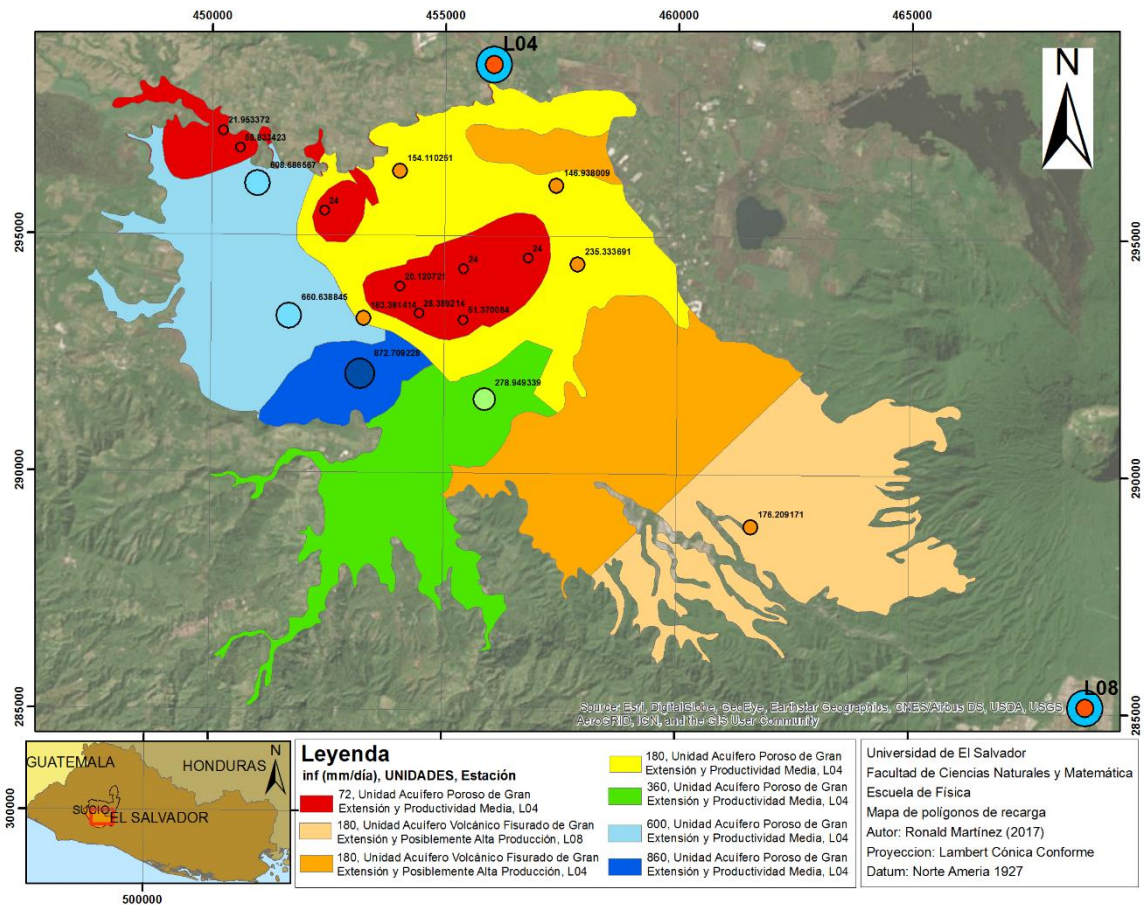


Fig. 3.7 Polígonos utilizados para el cálculo de la recarga potencial basado en los polígonos de Thiessen de las estaciones, y el mapa de polígonos de infiltración; L04 y L08 es la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo, mientras que los demás círculos representan las pruebas de infiltración realizadas en campo con su respectivo valor de infiltración en mm/día.

Tabla 3.8 Valores utilizados para el cálculo de la recarga potencial, área de los polígonos y recarga potencial calculada.

| Unidad Hidrológica infiltración | Estación meteorológica | Infiltración (mm/día) | Kfc | Textura | CC (%) | PM (%) | DS (g/cm ³) | Kp | Cobertura vegetal principal | Kv | PR (mm) | Área (km ²) | Recarga Potencial anual (mm) |
|---------------------------------|------------------------|-----------------------|--------|------------------|--------|--------|-------------------------|------|--|------|---------|-------------------------|------------------------------|
| Acuífero fisurado | L-08 | 180 | 0.6358 | Franco arcilloso | 27 | 13 | 1.35 | 0.10 | Bosque de café (Kv: Bosque) | 0.2 | 200 | 22.55 | 622.98 |
| Acuífero fisurado | L-04 | 180 | 0.6358 | Franco arcilloso | 27 | 13 | 1.35 | 0.15 | Bosque Café Pastos y Granos Básicos (Kv: Pastizal) | 0.18 | 200 | 22.9 | 597.98 |
| Acuífero Poroso | L-04 | 860 | 0.9487 | Arenoso | 9 | 4 | 1.65 | 0.20 | Caña (Kv: Terrenos cultivado) | 0.1 | 180 | 4.44 | 641.56 |

| Unidad Hidrogeológica infiltración | Estación meteorológica | Infiltración (mm/día) | Kfc | Textura | CC (%) | PM (%) | DS (g/cm ³) | Kp | Cobertura vegetal principal | Kv | PR (mm) | Área (km ²) | Recarga Potencial anual (mm) |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------|------------------|--------|--------|-------------------------|------|---|-----|---------|-------------------------|------------------------------|
| Acuífero Poroso | L-04 | 600 | 0.8926 | Franco arenoso | 14 | 6 | 1.5 | 0.15 | Caña (Kv: Terrenos cultivados) | 0.1 | 180 | 16.28 | 655.17 |
| Acuífero Poroso | L-04 | 360 | 0.79315 | Franco limoso | 22 | 10 | 1.43 | 0.15 | Caña (Kv: Terrenos cultivados) | 0.1 | 180 | 15.39 | 646.21 |
| Acuífero Poroso | L-04 | 180 | 0.6358 | Franco arcilloso | 27 | 13 | 1.35 | 0.2 | Pastos y granos básicos (Kv: Terrenos cultivados) | 0.1 | 150 | 23.21 | 552.79 |
| Acuífero Poroso | L-04 | 72 | 0.4078 | Arcilloso | 14 | 34 | 1.25 | 0.15 | Pastos y granos básicos (Kv: Terrenos cultivados) | 0.1 | 150 | 10.88 | 151.09 |

De los resultados anteriores, se ha calculado la recarga potencial en base al tipo de acuífero (Tabla 3.9), siendo el acuífero poroso, el que aporta mayor recarga dentro del área de estudio por poseer mayor área (60.7%). Sin embargo, al hacer el análisis de recarga por unidad de área se obtiene que el acuífero fisurado posee mayor capacidad de recarga que el acuífero poroso ($0.061 \frac{m^3}{año} \cdot \frac{1}{m^2}$ del acuífero fisurado a $0.054 \frac{m^3}{año} \cdot \frac{1}{m^2}$ del acuífero poroso).

En total, dentro del área de estudio se estima una recarga potencial por la metodología de Schosinsky de 65.73 millones de metros cúbicos de agua al año.

Tabla 3.9 Resumen de resultados de la recarga potencial para los dos tipos de acuíferos del área de estudio.

| Unidades Acuíferas | Área (m ²) | Área % | Recarga $\frac{m^3}{año}$ | Recarga por unidad de área $\frac{m^3}{año} \cdot \frac{1}{m^2}$ |
|--------------------|------------------------|------------|---------------------------|--|
| Acuífero Fisurado | 45447399 | 39.30 | 27741941 | 0.61 |
| Acuífero Poroso | 70190154 | 60.70 | 37933981 | 0.54 |
| | Total: 115637553 | Total: 100 | Total: 65675922 | |

3.7 RECARGA POTENCIAL (VARIACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO)

La Dirección General de Observatorio Ambiental (DGOA) ha proporcionado la información de la variación del nivel freático de cuatro pozos dentro del área de estudio. Por otro lado, también se tiene una serie de datos de precipitación diaria de varias estaciones meteorológicas dentro y aledañas a la zona de estudio. Se han creado los polígonos de Thiessen en base a la ubicación espacial de las estaciones meteorológicas, con el propósito de determinar las estaciones a utilizar para correlacionarlas con la información que se tiene de los pozos. La Fig. 3.7, muestra el mapa de ubicación de los pozos de monitoreo de la DGOA junto a los polígonos de Thiessen

de las estaciones meteorológicas, en la que se define que para los pozos “ENA”, “Flor Amarilla” y “CENTA”, solo se utilizará la estación meteorológica L-04 (San Andrés); mientras que para el pozo “Las Brisas”, se utilizará la información de la estación meteorológica 126 (Talnique).

En la Tabla 3.10 se muestra la información de las coordenadas de los pozos de monitoreo de la DGOA, en la que además de la información espacial, también cuenta con la fecha de inicio y final de la serie de mediciones del nivel freático.

Tabla 3.10 Información general de los pozos de monitoreo de la DGOA.

| Nombre | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | Profundidad Nivel Piezométrico promedio (m) | Nivel piezométrico promedio (msnm) | Fecha de inicio | Fecha final |
|--------------------|-------------|-------------|----------|---|------------------------------------|-----------------|-------------|
| Pozo Flor Amarilla | 457732.52 | 296524.24 | 451.465 | 6.19 | 445.275 | 17/01/2012 | 15/02/2017 |
| Pozo CENTA | 457078.75 | 298052.89 | 458.057 | 14.91 | 443.147 | 17/01/2012 | 15/02/2017 |
| Pozo ENA | 456525.21 | 297865.44 | 455.417 | 11.85 | 443.567 | 01/01/2009 | 15/02/2017 |
| Pozo las Brisas | 459365.8 | 289937.16 | 531.647 | 37.72 | 494.447 | 01/01/2009 | 15/02/2017 |

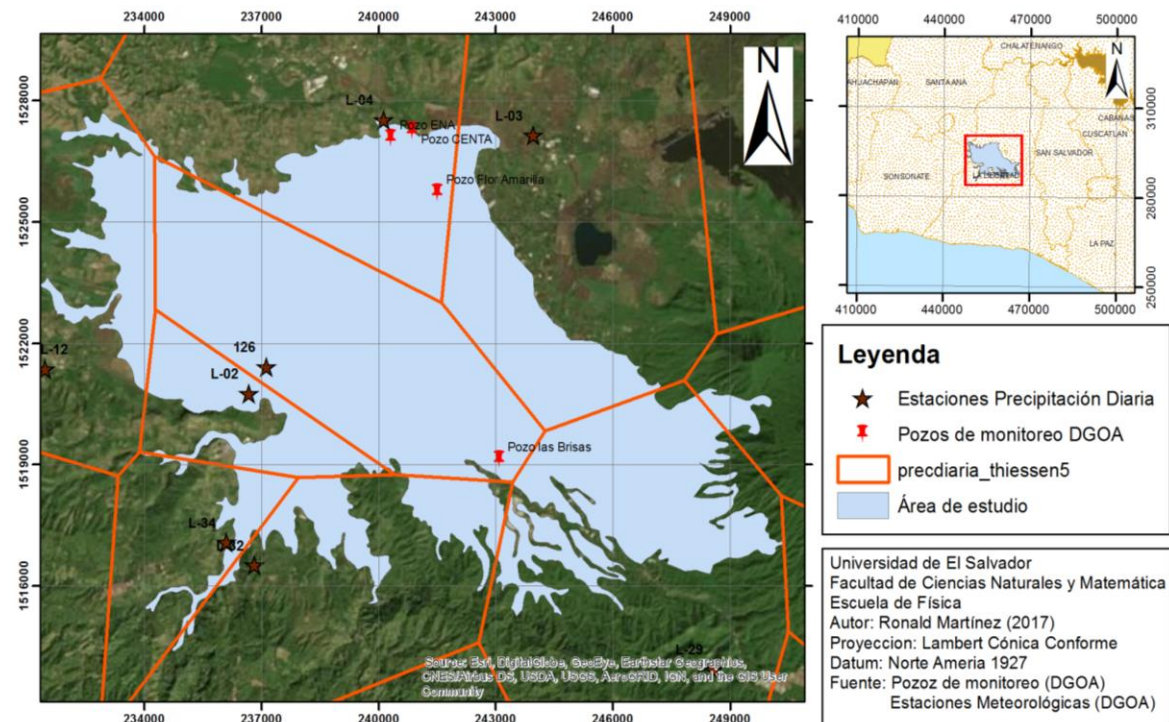


Fig. 3.8 Mapa de ubicación de pozos de monitoreo de la DGOA y polígonos de Thiessen de las estaciones meteorológicas con información de precipitación diaria.

Con el objetivo de describir mejor las estaciones meteorológicas a utilizar, se presenta en la Tabla 3.11, en la que se muestra la información espacial, fechas de inicio y fin de la serie de mediciones de precipitación diaria.

Tabla 3.11 Información general de las estaciones meteorológicas a utilizar para la investigación.

| Estación | Código | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | Fecha de inicio | Fecha final |
|------------|--------|-------------|-------------|----------|-----------------|-------------|
| San Andrés | L-04 | 456338.8 | 298203.5 | 473.8 | 01/01/2001 | 01/01/2017 |
| Talnique | 126 | 453384.5 | 292071.9 | 461.9 | 25/05/2013 | 31/01/2017 |

En la Tabla 3.12 se presenta el nombre de cada pozo, asociado con su respectiva estación meteorológica a utilizar para el análisis. Partiendo de las fechas iniciales y finales del cada pozo con su estación asignada, se determinó el periodo de tiempo en el que se tiene disposición de información tanto del pozo como de la estación meteorológica.

Tabla 3.12 Análisis de las fechas coincidentes entre la estación meteorológica a utilizar y los pozos.

| Nombre | Fecha inicial (Pozos) | Fecha final (Pozos) | Código de estación | Fecha inicial (Estación) | Fecha final (Estación) | Fechas coincidentes | |
|--------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|-------------|
| | | | | | | Fecha inicial | Fecha final |
| Pozo Flor Amarilla | 17/01/2012 | 15/02/2017 | L-04 | 01/01/2001 | 01/01/2017 | 17/01/2012 | 01/01/2017 |
| Pozo CENTA | 17/01/2012 | 15/02/2017 | L-04 | 01/01/2001 | 01/01/2017 | 17/01/2012 | 01/01/2017 |
| Pozo ENA | 01/01/2009 | 15/02/2017 | L-04 | 01/01/2001 | 01/01/2017 | 01/01/2009 | 01/01/2017 |
| Pozo las Brisas | 01/01/2009 | 15/02/2017 | 126 | 25/05/2013 | 31/01/2017 | 25/05/2013 | 31/01/2017 |

En cuanto a la información de las estaciones, se tienen datos de precipitación diaria, mientras que para los pozos existen en algunos casos hasta tres mediciones diarias. Para asignar un solo valor de nivel freático a cada fecha, se tomó a bien realizar un promedio de las mediciones diarias con las que se cuenta. Sin embargo, el pozo “ENA” posee dos mediciones diarias, una en la madrugada (1:22 a.m.) y la otra por la tarde (1:22 p.m.). En este caso, la medición hecha a la 1:22 p.m., posee mucha variación; que podría estar asociada a la extracción de agua de pozos cercanos durante el día. Asumiendo esto, se ha procedido a seleccionar solamente los datos de la madrugada para correlacionarlos con la precipitación diaria.

3.7.1 Almacenamiento específico

Healy & Cook (2002) citan a Meinzer (1923) quien define el Almacenamiento específico (Sy, specific yield) como la proporción del volumen de agua que, después de ser saturada, producirá por efecto de gravedad, respecto a su propio volumen. Normalmente se define de la siguiente manera:

$$S_y = \varphi - S_r$$

Ecuación 12

Donde φ se refiere a la porosidad y S_r a la retención específica (volumen de agua retenido por una roca, por unidad de volumen de roca).

Healy & Cook (2002) presenta un resumen estadístico de los resultados estadísticos de 17 estudios compilados por Johnson (1967) (ver Tabla 3.13). Basados en esto se asignará un valor de almacenamiento específico para el cálculo de la recarga por el método de la variación del nivel freático.

Tabla 3.13 Tabla resumen de almacenamiento específico (*specific yield*) por textura para de 17 estudios (Johnson, 1967).

| Textura | Sy promedio | Coefficiente de variación % | Sy mínimo | Sy máximo | Numero de mediciones |
|-------------------|-------------|-----------------------------|-----------|-----------|----------------------|
| Arcillas | 0.02 | 59 | 0.0 | 0.05 | 15 |
| Limos | 0.08 | 60 | 0.03 | 0.19 | 16 |
| Arcillas y arenas | 0.07 | 44 | 0.03 | 0.12 | 12 |
| Arenas finas | 0.21 | 32 | 0.10 | 0.28 | 17 |
| Arenas medianas | 0.26 | 18 | 0.15 | 0.32 | 17 |
| Arenas gruesas | 0.27 | 18 | 0.20 | 0.35 | 17 |
| Arena gravosa | 0.25 | 21 | 0.20 | 0.35 | 15 |
| Gravas finas | 0.25 | 18 | 0.21 | 0.35 | 17 |
| Gravas medias | 0.23 | 14 | 0.13 | 0.26 | 14 |
| Gravas gruesas | 0.22 | 20 | 0.12 | 0.26 | 13 |

El dato del almacenamiento específico es necesario para la estimación de la recarga por el método de la variación del nivel freático. Existen diversas maneras de calcularlo, sin embargo, para este caso utilizarán valores de la Tabla 3.13, asumiendo que el acuífero, está compuesto por materiales con textura de arenas medias (Sy promedio de 0.26), basados en la observación de textura hecha en una excavación cercana al pozo de monitoreo de la DGOA “Flor Amarilla” en el que se observan materiales geológicos con textura arenosa (depósitos sedimentarios), el acuífero también está contenido en materiales piroclásticos, pudiendo incluir cenizas, lapilli y pómez. Debido a esto, para el cálculo de la recarga se utilizará $S_y = 0.26$.

3.7.2 Estimación de la recarga potencial (VNF)

La información de los datos de precipitación y variación del nivel freático corresponden a los pozos “Flor Amarilla”, “ENA”, “CENTA” y “Las Brisas” (ver mapa en Fig. 3.8). Y los datos de precipitación han sido tomados de la estación meteorológica que encierra cada pozo con su polígono de Thiessen, cada pozo.

3.7.2.1 Pozo Flor Amarilla

En base a los datos de la variación del nivel freático, este pozo posee una profundidad del nivel freático promedio de 6.19 metros, y se ubica a una elevación aproximada de 451.465 msnm, por lo que se puede decir que el nivel freático promedio se encuentra en los 445.275 msnm.

En la Fig. 3.9 se muestra los gráficos de la serie de datos de precipitación diaria, junto a la serie de datos del nivel freático del pozo Flor Amarilla. En el gráfico se pueden observar discontinuidades en la variación del nivel freático, estos se asocian a lapsos de tiempo en el medidor deo de medir correctamente.

La Variación del Nivel Freático (VNF) se comporta de manera repetitiva anualmente, oscilando entre un máximo y mínimo de nivel freático. Debido a que la serie de VNF posee discontinuidades en ciertos periodos de tiempos; para el cálculo de la recarga, se utilizará nada más el periodo que comprende de junio de 2012 (inicio el aumento del nivel freático) a octubre de 2012 (final del aumento del nivel freático), se asumirá que en este periodo se da la recarga anual, por lo que en la ecuación del cálculo de la recarga se tomará un Δt de un año.

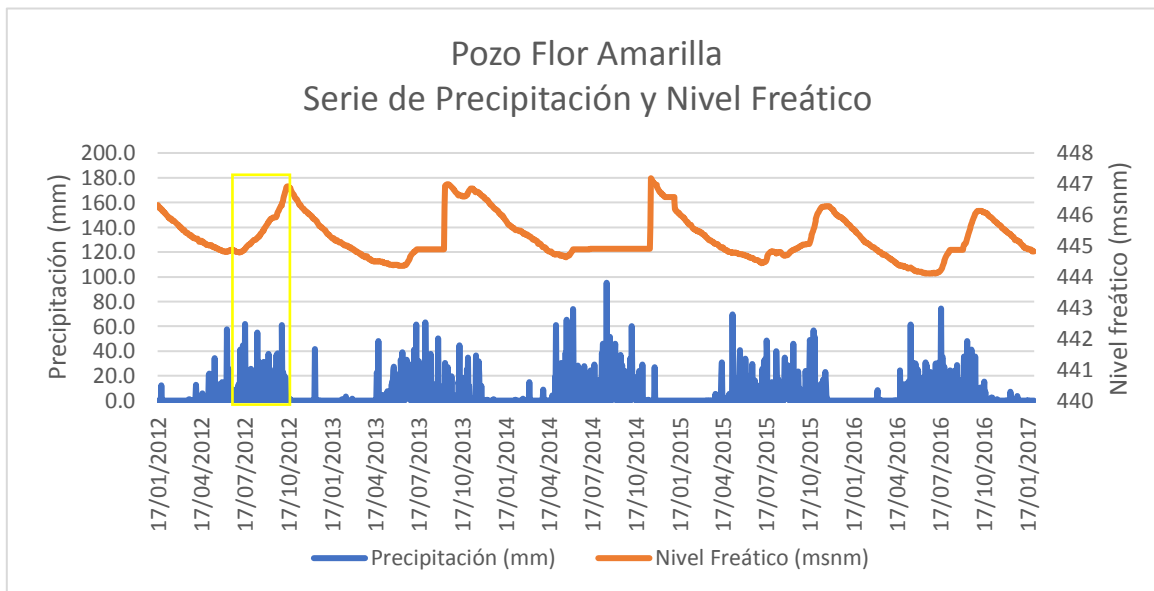


Fig. 3.9 Precipitación y Nivel freático del Pozo Flor Amarilla y la Estación Meteorológica L-04.

Si se observa el gráfico de precipitación, respecto a la variación del nivel freático, el nivel comienza a aumentar al pasar cerca de dos meses luego del inicio de las precipitaciones, y deja de aumentar, en el momento que finalizan las precipitaciones. La profundidad de excavación de este pozo es de 46 metros y posee rejilla desde los 39 metros, lo que indica que es un pozo

superficial, lo que influye que influye que el aumento y descenso del nivel freático sea rápido respecto a la precipitación.

El nivel freático mínimo en el periodo de tiempo seleccionado es de 444.825 msnm mientras que el máximo es de 446.895 msnm, por lo que el cálculo de la recarga queda de la siguiente manera.

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0.26 \frac{(446.895 \text{ m} - 444.825 \text{ m})}{1 \text{ año}} = 0.26 \times 2.07 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 0.5382 \text{ m/año}$$

3.7.2.2 Pozo CENTA

Este pozo posee una profundidad promedio del nivel piezométrico de 14.91 metros, y su ubicación se encuentra a una elevación aproximada de 458.057 msnm. Basado en esto se puede decir que el nivel piezométrico promedio se encuentra a 443.147 msnm.

En la Fig. 3.10 se muestra la serie de datos de precipitación diaria, junto a la serie de datos del nivel freático del pozo CENTA. En el gráfico se pueden observar discontinuidades en la variación del nivel freático, solamente se tiene la serie completa durante el periodo del año 2012 a 2013 por lo que para el cálculo de la recarga se utilizará el mínimo en el mes de junio y el máximo correspondiente al mes de octubre del año 2012.

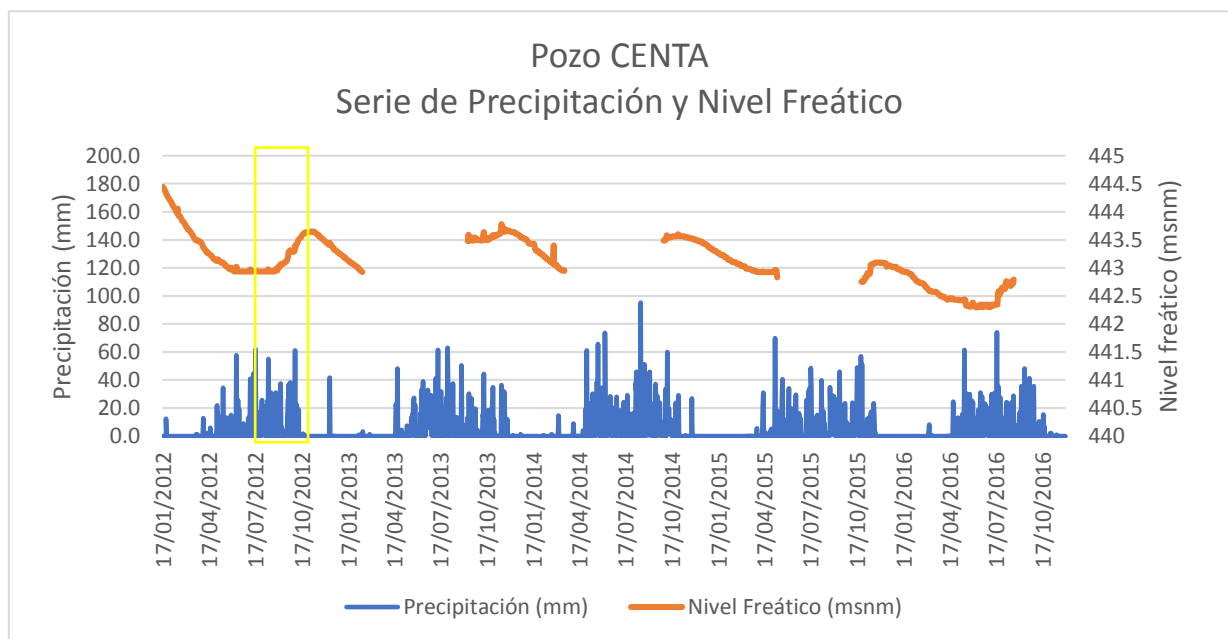


Fig. 3.10 Precipitación y nivel freático del pozo CENTA y la Estación meteorológica L-04

Al observar el gráfico de precipitación, respecto a la variación de nivel piezométrico, el nivel comienza a aumentar, cerca de cuatro meses luego de haber iniciado las precipitaciones y al finalizar las precipitaciones, el nivel no comienza a disminuir inmediatamente, como en el caso del pozo Flor Amarilla, si no hasta cierto tiempo después. De este pozo no existe con información litológica ni de su diseño, sin embargo, este comportamiento puede asociarse a que es un pozo profundo.

El nivel piezométrico mínimo en el periodo de tiempo seleccionado es de 442.937 msnm mientras que el máximo es de 443.537 msnm, por lo que el cálculo de la recarga queda de la siguiente manera.

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0.26 \frac{(443.537 \text{ m} - 442.937 \text{ m})}{1 \text{ año}} = 0.26 \times 0.6 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 0.156 \text{ m/año}$$

3.7.2.3 Pozo ENA

Este pozo posee una profundidad promedio del nivel piezométrico de 11.85 metros, y su ubicación se encuentra a una elevación aproximada de 455.417 msnm, por lo que el nivel piezométrico promedio se encuentra a 443.567 msnm.

En la Fig. 3.11 se muestra la serie de datos de precipitación diaria, junto a la serie de datos del nivel piezométrico del pozo ENA. En el gráfico se pueden observar cierta dispersión entre los valores de nivel freático, e incluso se observan discontinuidades ciertos periodos de tiempo.

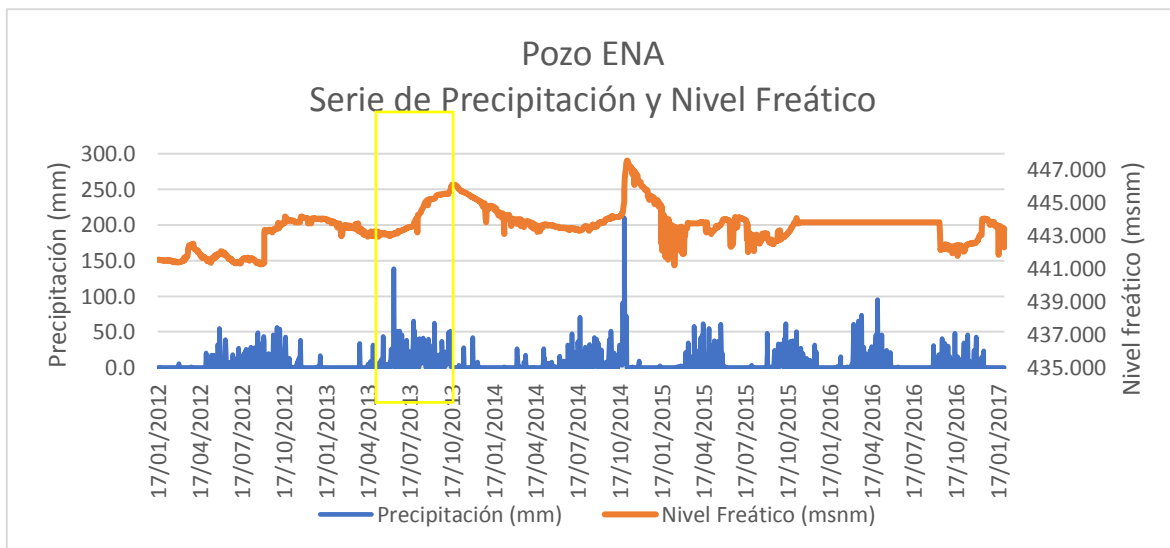


Fig. 3.11 Precipitación y nivel freático del pozo ENA y estación meteorológica L-04

El comportamiento del nivel piezométrico de este pozo respecto a la precipitación posee cierta relación, aumentando de nivel cerca de tres meses luego de iniciar las precipitaciones, cabe destacar que se observan descensos repentinos en el nivel piezométrico, lo que puede estar asociado a interferencia de otros pozos extractores cercanos. De este pozo no se conoce la litología ni su diseño.

Para el cálculo de la recarga por el método VNF, se ha tomado el periodo de tiempo de junio de 2013 a octubre de 2013, pues es el periodo en el que los datos tienen mejor calidad. El nivel freático mínimo para el tiempo seleccionado es de 442.987 msnm mientras que el máximo es de 445.967 msnm, por lo que el cálculo de la recarga queda de la siguiente manera.

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0.26 \frac{(445.967 \text{ m} - 442.987 \text{ m})}{1 \text{ año}} = 0.26 \times 2.98 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 0.7748 \frac{\text{m}}{\text{año}}$$

3.7.2.4 Pozo Las Brisas

Posee una profundidad promedio del nivel piezométrico de 37.72 metros y se encuentra a una elevación de 531.647, por lo que el nivel piezométrico promedio respecto al nivel del mar se encuentra a 494.447 msnm.

La Fig. 3.12 muestra la serie de datos de los niveles piezométricos de este pozo, que se correlacionó con los datos de precipitación de la estación meteorológica 126 (Talnique). Nótese que el formato de la fecha en la serie de nivel piezométrico está en mes/día/año, a diferencia de los datos de la estación meteorológica que presenta la fecha en formato día/mes/año. Para el cálculo de la recarga se ha seleccionado el periodo que va desde junio de 2013 hasta el máximo en el mes de enero de 2014.

Las profundidades de los niveles piezométricos de este pozo son muy altas respecto a los pozos anteriores, teniendo un comportamiento similar que aumenta cierto tiempo después del inicio de las precipitaciones; sin embargo, en este caso el nivel piezométrico comienza a disminuir cerca de tres meses luego de finalizar las precipitaciones, la curva de variación de nivel es más suavizada y las diferencias en los cambios de nivel son mucho menores que en los casos anteriores.

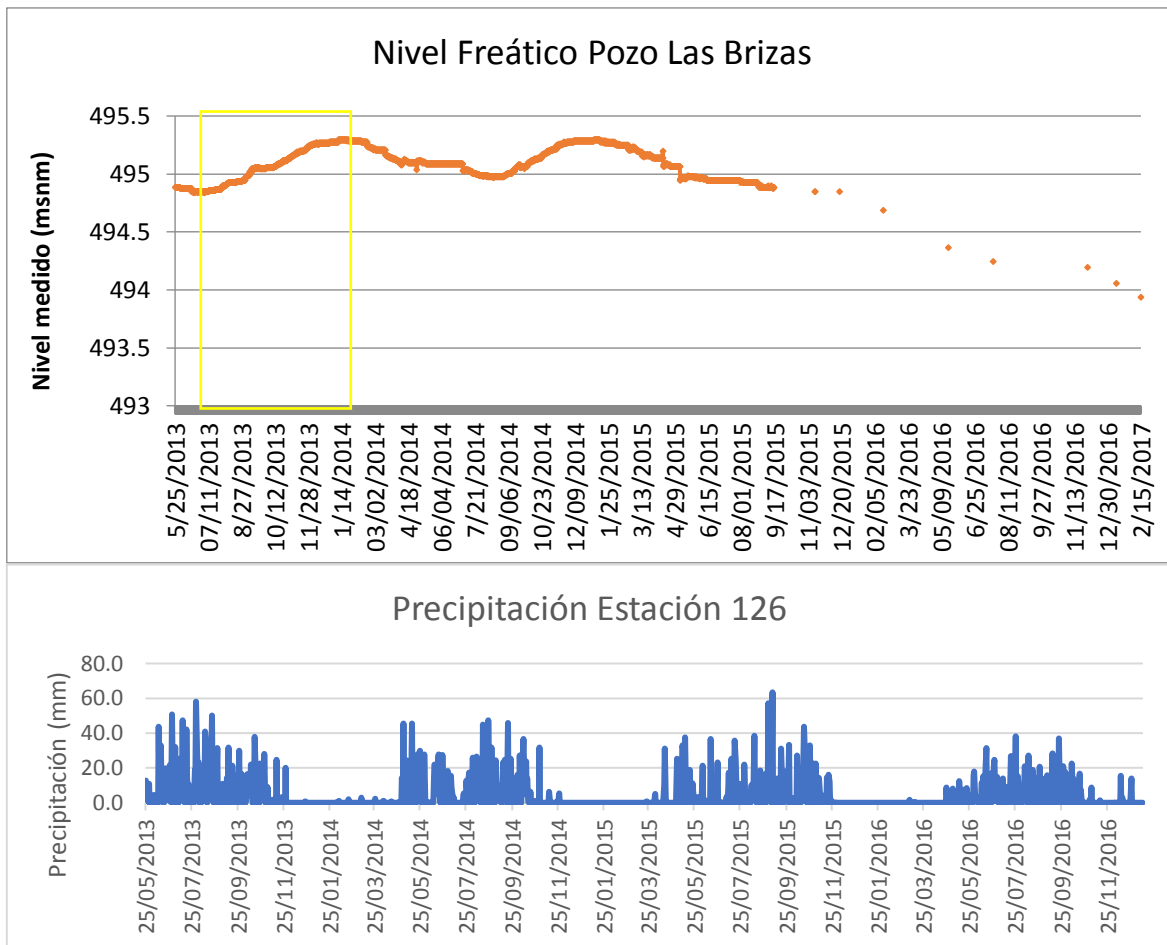


Fig. 3.12 Precipitación y Nivel freático del Pozo Las Brisas y la estación meteorológica 126

Según la Fig. 3.12, el nivel freático mínimo para el tiempo seleccionado es de 442.987 msnm mientras que el máximo es de 495.297 msnm, por lo que el cálculo de la recarga queda de la siguiente manera.

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0.24 \frac{(495.297 \text{ m} - 494.847 \text{ m})}{1 \text{ año}} = 0.26 \times 0.45 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 0.117 \frac{\text{m}}{\text{año}}$$

3.7.3 Resultados de la recarga potencial (VNF)

En resumen, se realizó el cálculo de la recarga por el método de la variación del nivel freático para cuatro pozos (Flor Amarilla, CENTA, ENA y Las Brisas). Estos resultados se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Resultados de la estimación de la recarga por el método de la Variación del Nivel Freático.

| Pozo | Recarga (m/año) |
|--------------------|-----------------|
| Pozo Flor Amarilla | 0.5382 |
| Pozo CENTA | 0.156 |
| Pozo ENA | 0.7748 |
| Pozo Las Brisas | 0.117 |

Sin embargo, considerando las limitantes de la aplicación del método descritas en la sección 1.9.1 sobre las limitaciones del método VNF, para el cálculo del volumen de recarga anual dentro del área de estudio, solamente se ha considerado el pozo Flor Amarilla, pues posee las mejores condiciones para la aplicación del método. Entre ellas: 1- Pozo poco profundo (Acuífero libre), además este fue construido específicamente para el monitoreo del nivel freático. 2- Las pendientes dentro del área de estudio son muy bajas y su ubicación se encuentra más céntrica al área que los demás pozos. 3- El comportamiento en la variación del nivel es abrupto. 4- No se ve influenciado por interferencias causadas por la extracción de agua en pozos aledaños.

Para el cálculo volumétrico de la recarga anual, se multiplicará el área en metros cuadrados (aproximadamente 115 millones de metros cuadrados), por el valor estimado de la recarga del pozo Flor Amarilla (0.5382m/año) dando como resultado la recarga anual, en metros cúbicos por año.

$$R = 115,637,553m^2 \times 0.5382 \frac{m}{año} = 62,236,131.02 \frac{m^3}{año}$$

$$\approx 62.24 \text{ millones de metros cúbicos al año}$$

Cabe destacar que este cálculo se ha realizado utilizando un almacenamiento específico de tabla, que corresponde a arenas medias, con un valor de 0.26. Este coeficiente podría ser estimado por medio del análisis de la información de precipitación y variación del nivel freático; aplicando la metodología descrita por Quiroz et. al. (2012); sin embargo, este análisis se vuelve complicado debido a que los resultados dependen en gran medida, de la manera en que se selecciona la información de precipitación con su respectivo cambio del nivel freático. Por tal motivo, se decidió tomar un valor de almacenamiento específico de tabla.

3.8 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual debe reunir la mayor cantidad de información involucrada en el ciclo hidrogeológico. Ente la información con la que se cuenta para la elaboración de éste se tiene: escorrentía superficial, tomografías eléctricas hechas dentro del área de estudio, inventario de pozos y manantiales, litología de pozos y geología la cual debe ser analizada y sintetizada, em manera de obtener como resultado final un modelo que indique los detalles más importantes sobre el acuífero.

3.8.1 Flujo natural superficial

La escorrentía superficial podría representar parte de la descarga de un acuífero, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) posee una red de estaciones hidrométricas que miden el caudal en ciertos puntos de ríos (Fig. 3.13). En el área de estudio se encuentra la estación de Ateos (estación telemétrica). Sin embargo, río abajo se encuentra la estación Joya de Cerén (estación convencional). La “Estadística hidrológica por departamento año 2014” del MARN, presenta los datos mostrados en la Tabla 3.15. Asumiendo que durante la epoca seca no existen influencia en la escorrentía por las precipitaciones; se podría considerar el caudal mínimo medido, como caudal base aportado por el acuífero; considerado la estación Joya de Cerén como el punto donde se acumula la escorrentía del área de estudio, este valor puede tomarse hasta cierto punto como referencia de la escorrentía superficial ($1.41m^3/s \approx 44 \text{ mill } m^3/\text{año}$).

Tabla 3.15 Información general de las estaciones hidrométricas que se encuentran o son influenciadas por el área de estudio (MARN, 2014)

| Estación Ateos – Río Talnique, | |
|---|--------------------------|
| Periodo de registro: enero 1961 – mayo 1965; julio 2013 – abril 2014 | |
| Caudal promedio multianual | 2.49 m ³ /s |
| Caudal máximo registrado (19/08/1964) | 150.05 m ³ /s |
| Caudal mínimo registrado (25/11/1963) | 0.05 m ³ /s |
| Estación Joya de Cerén – Río Sucio, | |
| Periodo de registro: mayo 2002 – marzo 2013 | |
| Caudal promedio multianual | 7.11 m ³ /s |
| Caudal máximo registrado (30/05/2010) | 180 m ³ /s |
| Caudal mínimo registrado (6/05/2002) | 1.41m ³ /s |

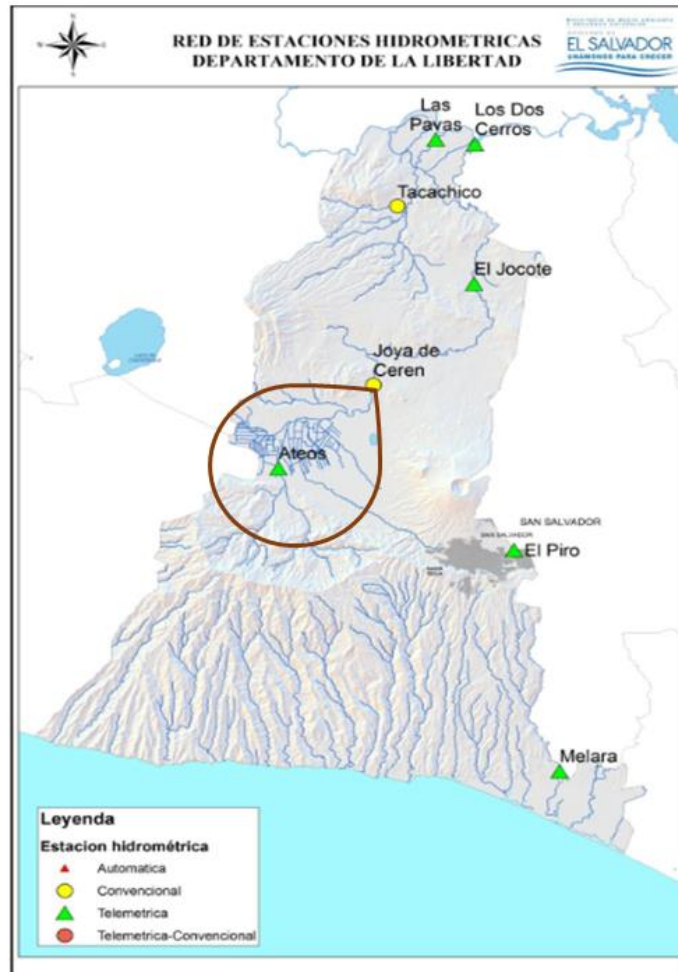


Fig. 3.13 Mapa de red hidrométrica del departamento de La Libertad (MARN, 2014)

3.8.2 Tomografías eléctricas

Durante el proceso de esta investigación se realizaron cinco tomografías eléctricas, distribuidas dentro del área de estudio. Estas se han utilizado para inferir la profundidad del nivel freático. Las distribuciones espaciales de estas tomografías se presentan junto a la distribución de pozos en la Fig. 3.19, estas pueden diferenciarse en el mapa por un código que va desde RES2D01 hasta RES2D05, para los cinco casos se utilizó el arreglo Wenner, tomando una repetición de dos medidas por cada selección de arreglo entre los electrodos.

El uso del software RES2DINV para la inversión de los datos de resistividad aparente a resistividad real se presentan en la sección 1.4.2 Tomografías eléctricas; en base a éste, se han obtenido las siguientes secciones transversales.

Los rangos de resistividades para diferentes materiales pueden ser similares (como se mostró en la Tabla 1.1), por lo que no se puede definir el tipo de material geológico sin conocer a detalle la geología o excavar. Sin embargo, se puede definir la presencia de un material saturado con agua al observar contrastes bien marcados en cuanto a los valores de resistividad (La resistividad en materiales saturados con agua debe ser menor que en materiales no saturados con agua); siendo este el criterio principal que se ha tomado para inferir la profundidad del nivel freático.

Las arcillas tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua, sin embargo, éstas ceden el agua tan fácilmente. Las resistividades de las arcillas según la Tabla 1.1 oscilan entre 1 ohm-m y 100 ohm-m. Por lo que al identificar valores bajos de resistividad en las secciones transversales pueden estar relacionados con este tipo de materiales.

3.8.2.1 RES2D01

Se ubica en la zona central de área de estudio y posee una longitud de 300 metros, este perfil fue tomado en dirección de noroeste hacia el sureste (ver Fig. 3.19), se utilizó la configuración roll-along, que implica inicialmente un arreglo de 200 metros, dejando el centro con el quipo en 100 metros, al culminar esta medición se procede mover el equipo a 200 metros, y se colocan otros 100 metros de cable hasta llegar a los 300 metros. Con este arreglo se aumenta la longitud de la medida, sin embargo, la profundidad de prospección es la misma que si solo se hubiese tomado una longitud de 200 metros.

La Fig. 3.14 muestra la sección transversal de la tomografía realizada, en la cual podemos observar que la escala de resistividades va desde aproximadamente 8 ohm-m, hasta cerca de 400 ohm-m. Se puede decir que valores debajo de los 40 ohm-m pueden indicar la presencia de agua, por lo que se infiere que la profundidad del nivel freático se encuentra entre 4 a 8 metros y se ha delimitado por la línea punteada. Los valores bajos de resistividad (en colores azules) pueden deberse a presencia de lentes arcillosos. No existe información litológica cercana al lugar donde se realizó esta tomografía, sin embargo, si se contrasta con la litología del pozo Flor Amarilla presentada en la Fig. 3.15, se puede decir que debajo del nivel freático inferido, los materiales geológicos podrían estar compuestos por arenas, piroclastos (ceniza volcánica y lapilli) y algunos lentes arcillosos.

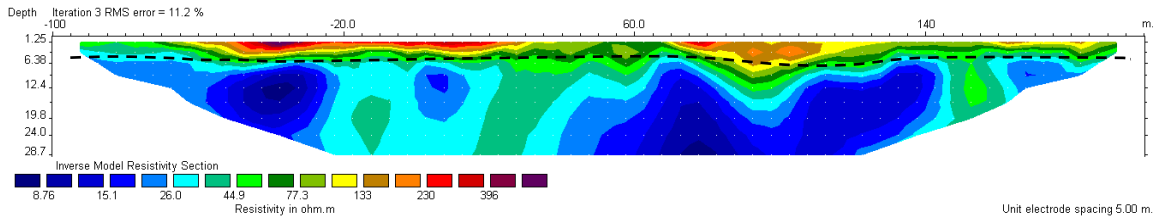


Fig. 3.14 Tomografía eléctrica RES2D01, con una longitud de 300 metros que va desde -100 (lado noroeste) hasta 200 (lado sureste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 30 ohm-m).

3.8.2.2 RES2D02

Esta tomografía se tomó en dirección de noreste a suroeste (ver mapa de planta de la Fig. 3.19), se ubica en una zona cercana a la iglesia católica de Flor Amarilla, y el pozo de monitoreo “Flor Amarilla (DGOA)”, un kilómetro al sur de la Carretera Panamericana. Se empleó el arreglo roll-along igual que en la tomografía RES2D01.

En la Fig. 3.15 se muestra la sección transversal del modelo de resistividad eléctrica, en la que se infiere que el nivel freático se encuentra entre los 5 y 7 metros de profundidad, este dato puede ser correlacionado con el valor de profundidad promedio que posee el pozo de monitoreo que es de 6.19 metros.

Durante una visita hecha a la zona, en el terreno de la iglesia católica, se estaban realizando trabajos de excavación. Por lo que se procedió a observar y tomar una fotografía al tipo de materiales geológicos (Fotografía en Fig. 3.15), habiendo en superficie una pequeña capa de cenizas volcánicas en los primeros 70 centímetros que se asocia a la zona resistiva superficial que se muestra en la tomografía eléctrica. Bajo esta capa, se encontró un material de tipo sedimentario con textura arenosa y color oscuro, la excavación no supera los 4 metros por lo que se interpreta que este puede ser el material que se encuentra saturado de agua entre 5 y 7 metros de profundidad, pudiendo llegar hasta los 24 metros. Por otro lado, la litología del pozo Flor Amarilla define una capa de depósitos sedimentarios que llega hasta los 24 metros, lo que confirma que el cambio de la capa conductiva a resistiva representaría la interfaz entre los depósitos sedimentarios y las cenizas volcánicas (la ubicación aproximada del pozo Flor Amarilla y la excavación en la tomografía eléctrica se ubica aproximadamente en el cuadro amarillo).

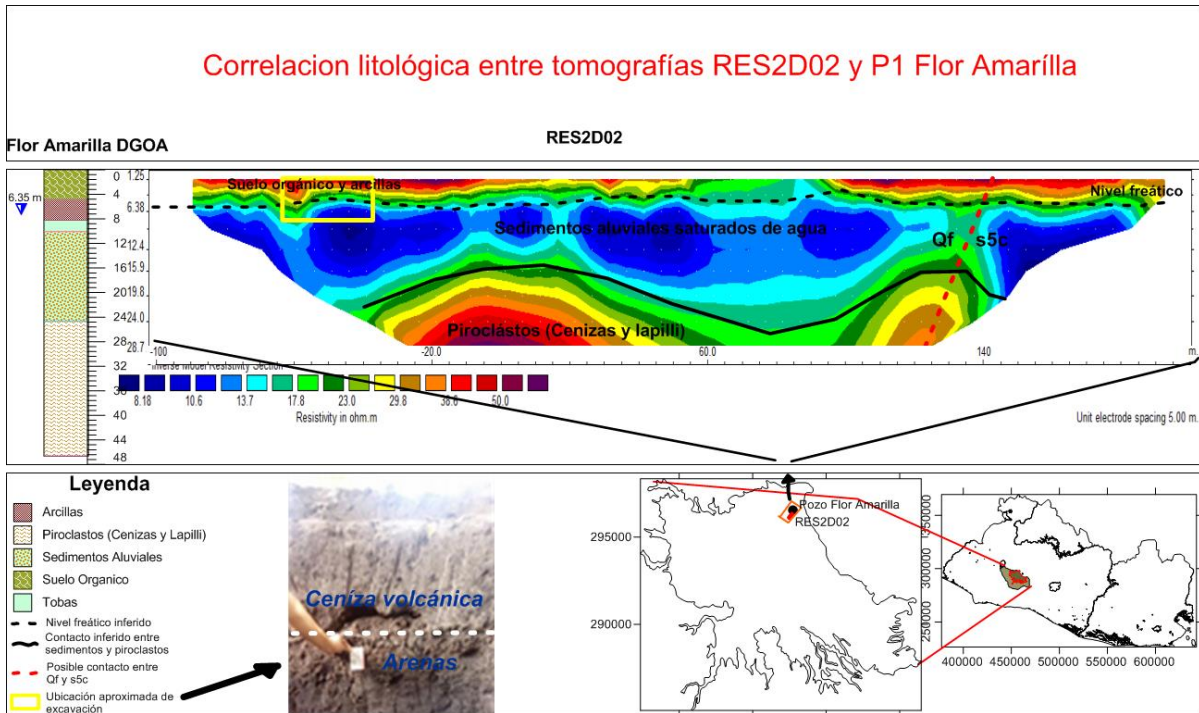


Fig. 3.15 Gráfico de correlación litológica del Pozo Flor Amarilla con la tomografía eléctrica RES2D02, que posee una longitud de 300 metros que va desde -100 (lado noreste) hasta 200 (lado suroeste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 25 ohm-m) y fotografía tomada en excavación, desarrollaba zona cercana a la tomografía y pozo Flor Amarilla.

3.8.2.3 RES2D03

Este perfil se realizó en la zona central del área de estudio, en dirección de este a oeste (ver mapa de planta de la Fig. 3.19). En este se realizó una simple tomografía de 200 metros de longitud (Fig. 3.16), prospectando hasta una profundidad máxima de 28.7 metros, la profundidad a la que se infiere el nivel freático es entre 14 y 17 metros de profundidad con resistividades debajo de 22 ohm-m. Cerca de este sitio no se cuenta con información litológica ni de nivel freático de ningún pozo, por lo que se infiere que en este sitio la profundidad del nivel freático está a aproximadamente 16 metros. La capa resistiva que se muestra en superficie, por su forma estratificada puede asociarse a depósitos sedimentarios no saturados de agua.

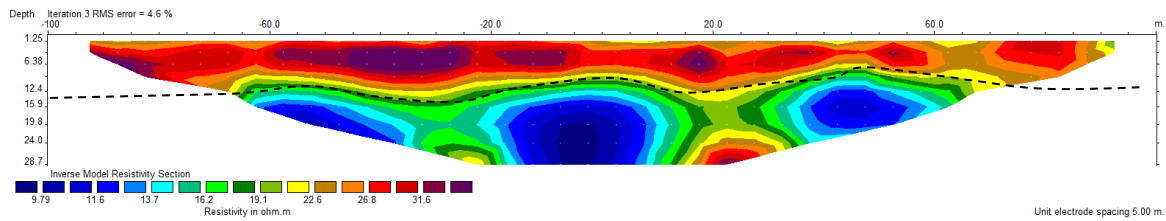


Fig. 3.16 Tomografía eléctrica RES2D03, con una longitud de 200 metros que va desde -100 (lado este) hasta 100 (lado oeste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 25 ohm-m).

3.8.2.4 RES2D04

Este se realizó en el lado oeste del área de estudio, en dirección que va de oeste a este (ver mapa de planta de la Fig. 3.19). La longitud es de 200 metros y se prospectó hasta 28.7 metros de profundidad, el nivel estático se infiere entre 16 y 19 metros de profundidad y se representa en la línea punteada inferior (Fig. 3.17).

Por no contar con información de ningún pozo en esta zona, se infiere que para este sitio la profundidad del nivel freático se encuentra a 17 metros.

La capa conductiva en superficie (color azulado) puede deberse a la humedad proporcionada por un canal de riego que se conduce de forma paralela al perfil en la superficie del terreno.

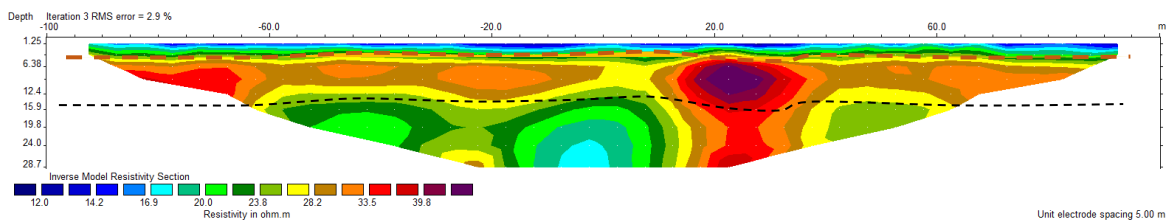


Fig. 3.17 Tomografía eléctrica RES2D04, con una longitud de 200 metros que va desde -100 (lado noreste) hasta 100 (lado suroeste). La línea café punteada representa el corte entre zona húmeda, provocada posiblemente por canal de riego que pasa a un costado del perfil de tomografía, mientras que la línea negra punteada, representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 25 ohm-m).

3.8.2.5 RES2D05

Este sondeo se realizó dentro de los campos experimentales de la Escuela Nacional de Agricultura, un kilómetro al oeste de la Carretera Panamericana en dirección que va de sur a norte (ver mapa de planta de la Fig. 3.19).

Se trata de una zona pantanosa en la que se observan muchos charcos de lodo. Los resultados de esta tomografía indican la presencia de saturación de agua desde los primeros metros (Fig.

3.18, arriba). Cerca de la zona existe un pozo de monitoreo de la DGOA del cual la profundidad promedio de la serie de datos es de 11.85 metros, el cual difiere mucho debido a las condiciones del suelo.

Al centro de esta sección transversal se muestra una anomalía altamente resistiva, sin embargo, esta anomalía se debe a falta de datos en esa zona, debido a la mala conexión de algunos electrodos, pues durante el periodo de mediciones se tuvieron varios inconvenientes con la conexión y batería del equipo (Fig. 3.18, diagrama de bloques).

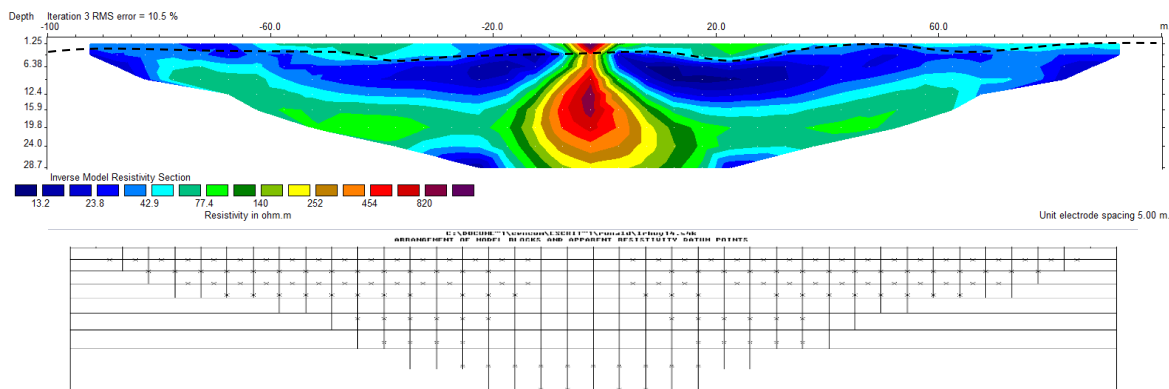


Fig. 3.18 Arriba: Tomografía eléctrica RES2D05, con una longitud de 200 metros que va desde -100 (lado noreste) hasta 100 (lado suroeste). La línea punteada representa la posible profundidad del nivel freático (valores de resistividad debajo de 40 ohm-m). Abajo: diagrama de bloques, los “*” representan los puntos en los que se tiene medida.

3.8.2.6 Síntesis de resultados de las tomografías eléctricas

De los resultados de cada una de las tomografías eléctricas desarrolladas dentro de esta investigación, se ha logrado correlacionar algunas tomografías con la columna litológica del pozo Flor Amarilla y además se ha inferido la profundidad del nivel del agua subterránea. Para propósitos de elaboración de las líneas isofreáticas y correlacionar con la información de pozos y manantiales, se ha asignado un valor de profundidad estimada, al centro de cada una de las tomografías. Esta información se presenta en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Tabla de información del acuífero inferida en base a las tomografías eléctricas del nivel freático respecto el nivel del suelo y respecto el nivel del mar.

| Nombre | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | Profundidad Nivel Freático inferido (m) | Nivel freático inferido (msnm) |
|---------|-------------|-------------|----------|---|--------------------------------|
| RES2D01 | 453975.5 | 293126.9 | 461.5 | 6 | 455.5 |
| RES2D02 | 457573.5 | 296304.2 | 453.6 | 6 | 447.6 |
| RES2D03 | 453403.5 | 294592.4 | 458.0 | 15 | 443 |
| RES2D04 | 451042.3 | 296109.8 | 457.9 | 17 | 440.9 |

| Nombre | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | Profundidad Nivel Freático inferido (m) | Nivel freático inferido (msnm) |
|---------|-------------|-------------|----------|---|--------------------------------|
| RES2D05 | 456093.2 | 297737.3 | 459.8 | 6 | 453.8 |

3.8.3 INVENTARIO DE POZOS Y MANANTIALES

Se cuenta con la información de pozos profundos entre los que destacan los pozos del Ministerio de Agricultura y Ganadería, junto a los pozos de monitoreo de la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA). Por otro lado, la DGOA hace un monitoreo del nivel freático en algunos pozos excavados cercanos a la zona de estudio, las mediciones se hacen en época seca y durante la época lluviosa respectivamente. Se han identificado algunos manantiales en los que el nivel freático del acuífero coincide con el nivel de la topografía.

Debido a la ocurrencia de pozos surgentes, se plantea la existencia de al menos dos acuíferos; un acuífero libre (superficial) y bajo éste, un acuífero con cierto grado de confinamiento (profundo), con propósito de modelar las líneas equipotenciales del acuífero superficial se han asociado: el nivel estático inferido con las tomografías eléctricas, la elevación de los manantiales, el nivel estático de pozos excavados y pozos perforados que poseen rejilla antes de los 40 metros de profundidad.

Por otro lado, se cuenta con información de pozos profundos, siendo varios de estos de tipo artesiano a su fecha de aforo (HAZAMA CORPORATION, 1998). Según informes de los pozos: muchos de éstos poseen rejilla a diferentes profundidades, ocurriendo una mezcla de acuíferos; por lo que el nivel piezométrico de estos no refleja las condiciones propias del acuífero profundo.

3.8.3.1 Pozos Profundos (Perforados)

El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) a través de la Dirección General de Ordenamiento Forestal, Cuencas y Riego ha perforado varios pozos que son utilizados en el Distrito de Riego de Zapotitán, para la producción agrícola; al sumar los caudales presentados en la Tabla 3.17 se obtiene que anualmente se explotan cerca de 21.3 millones de metros cúbicos de agua.

En campo, se ha corroborado que algunos de los pozos se encuentran en estado de abandono. Por otro lado, estos pozos de riego no bombean agua las 24 horas y no se tiene información de

pozos utilizados para extracción industrial. En la Tabla 3.17 se muestra el listado de pozos del Distrito de Riego de Zapotitán, de los que se cuenta con la información litológica.

Tabla 3.17 Información recopilada de pozos propiedad del MAG del Distrito de Riego de Zapotitán.

| Nombre | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | Profundidad Nivel piezométrico (m) | Nivel piezométrico (msnm) | Transmisividad (m ² /día) | Almacenamiento Sy | Caudal de producción requerido (Lt/s) | Fecha de aforo |
|---------------------------------------|-------------|-------------|----------|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------|
| MAG-P02 | 453200 | 293259 | 465 | 0 * | 465 | 639.74 | 0.001 | 35 | 03/11/1997 |
| MAG-P03 | 455700 | 294100 | 460 | 0 * | 460 | 193.74 | 0.001 | 50 | 24/11/1997 |
| MAG-P08 | 455800 | 291125 | 480 | 0 * | 480 | 584.48 | 0.001 | 35 | 11/11/1997 |
| MAG-P09 | 455500 | 291500 | 475 | 0 * | 475 | 744.28 | 0.001 | 60 | 16/12/1997 |
| MAG-P10 | 456050 | 291300 | 480 | 2.26 | 477.74 | 314.2 | 0.001 | 40 | 19/01/1998 |
| MAG-P11 | 453950 | 291400 | 470 | 2.31 | 467.69 | 406.48 | 0.001 | 40 | 29/01/1998 |
| MAG-P13 | 456850 | 292000 | 460 | 0 * | 460 | 843.26 | 0.001 | 60 | 15/11/1997 |
| MAG-P14 | 456800 | 292250 | 480 | 0 * | 480 | 368.85 | 0.001 | 60 | 09/02/1998 |
| MAG-P15 | 457450 | 292500 | 480 | 0 * | 480 | 625.93 | 0.001 | 50 | 02/02/1998 |
| MAG-P16 | 458000 | 293200 | 475 | 0 * | 475 | 127.87 | 0.001 | 35 | 14/01/1998 |
| MAG-P17 | 458300 | 293700 | 475 | 0 * | 475 | 235.96 | 0.001 | 35 | 14/02/1998 |
| MAG-P18 | 458300 | 294050 | 465 | 0 * | 465 | 416.2 | 0.001 | 35 | 22/12/1997 |
| MAG-P20 | 453300 | 291980 | 465 | 0.12 | 464.88 | 823.39 | 0.001 | 50 | 25/10/1997 |
| MAG-P21 | 455950 | 292000 | 470 | 0 * | 470 | 652.01 | 0.001 | 40 | 03/09/1997 |
| MAG-P22 | 455470 | 293500 | 460 | 0 * | 460 | 517.88 | 0.001 | 50 | 20/11/1997 |
| Promedio T (m²/día) | | | | | | 499.62 | Suma Q (Lt/s) | 675 | |

* Pozos artesianos según información de los informes de pozo a su fecha de aforo (HAZAMA CORPORATION, 1998)

Cabe destacar que estos pozos solo se utilizan para riego durante la época seca (aproximadamente seis meses) y no bombean agua las 24 horas; además, en campo se ha identificado que algunos de estos no están en funcionamiento o se encuentran abandonados.

Por otro lado, se cuenta con la serie de datos de variación del nivel piezométrico de cuatro pozos de monitoreo de la DGOA, en la Tabla 3.10 se muestra la información general de estos, incluyendo el periodo de tiempo en el que se tienen información de variación de los niveles piezométricos. La profundidad del nivel piezométrico promedio de estos pozos se ha estimado en base al promedio de la serie de datos de la variación del nivel piezométrico y se utilizarán para modelar las líneas isofreáticas.

Tabla 3.18 Información general de los pozos de monitoreo de la DGOA.

| Nombre | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | Profundidad Nivel Piezométrico promedio (m) | Nivel piezométrico promedio (msnm) | Fecha de inicio | Fecha final |
|--------------------|-------------|-------------|----------|---|------------------------------------|-----------------|-------------|
| Pozo Flor Amarilla | 457732.52 | 296524.24 | 451.465 | 6.19 | 445.275 | 17/01/2012 | 15/02/2017 |
| Pozo CENTA | 457078.75 | 298052.89 | 458.057 | 14.91 | 443.147 | 17/01/2012 | 15/02/2017 |
| Pozo ENA | 456525.21 | 297865.44 | 455.417 | 11.85 | 443.567 | 01/01/2009 | 15/02/2017 |
| Pozo las Brisas | 459365.8 | 289937.16 | 531.647 | 37.72 | 494.447 | 01/01/2009 | 15/02/2017 |

3.8.3.2 Manantiales y pozos superficiales (excavados)

Periódicamente la DGOA monitorea el nivel freático de algunos pozos excavados; una medida en época seca y otra en época lluviosa. Estos pozos no alcanzan mucha profundidad por ser excavados de forma artesanal. La Tabla 3.19 presenta la información que se ha generado en base a las coordenadas, la elevación en metros sobre el nivel del mar y el nivel freático calculado en base a la profundidad obtenida del promedio de los datos de nivel que se han medido estacionalmente. Este último dato (NF promedio) servirá para elaborar el modelo de las líneas isofreáticas.

Tabla 3.19 Información de pozos excavados monitoreados estacionalmente por la DGOA.

| Código pozo | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | Prof. N. F. Promedio (m) | N. F. prom. (msnm) |
|-------------|-------------|-------------|----------|--------------------------|--------------------|
| ZAP-17 | 453426 | 291309 | 468.5 | 5.44 | 463.06 |
| ZAP-23a | 443800 | 295293 | 607.2 | 16.22 | 590.98 |
| ZAP-22 | 448561 | 292443 | 488.3 | 3.85 | 484.45 |
| ZAP-03 | 460957 | 297665 | 440.6 | 7.10 | 433.50 |
| ZAP-13a | 456000 | 299734 | 479.3 | 10.33 | 468.97 |
| ZAP-20a | 450944 | 302047 | 489.8 | 18.83 | 470.97 |

En el lado Oeste, cerca de los límites del área de estudio, se han identificado cuatro manantiales, casualmente estos coinciden con el límite entre el acuífero poroso (área en estudio) y el acuífero fisurado ubicado al oeste del área en estudio, por lo que la surgencia puede estar relacionada por el contacto entre el acuífero sedimentario y el acuífero fisurado. En la Tabla 3.20 se presenta la información general de estos manantiales que será útil para modelar las líneas isofreáticas.

Tabla 3.20 Información de los manantiales identificados dentro al área de estudio.

| Código | X (Lambert) | Y (Lambert) | Z (msnm) | NF (msnm) |
|----------------------|-------------|-------------|----------|-----------|
| Manantial Suncín | 448045 | 292807 | 500 | 500 |
| Manantial El Ojustal | 447524.62 | 293674 | 510 | 510 |
| Manantial Texal | 447958 | 297063 | 501 | 501 |
| Manantial El Naranjo | 450716 | 297325 | 470 | 470 |

En la Fig. 3.19 se muestra el mapa tanto de pozos profundos de riego propiedad del MAG y de monitoreo de la DGOA, como de la ubicación de los perfiles de tomografías eléctrica hechas en campo durante el periodo de la investigación, los pozos de excavados dentro del área que son

monitoreados estacionalmente por la DGOA y los manantiales que se han identificado en la zona.

La información del nivel freático de los pozos excavados, junto a la información de profundidad inferidas por las tomografías eléctricas, manantiales, y el pozo de monitoreo Flor Amarilla de la DGOA serán utilizadas para hacer un mapa de líneas isofreáticas del acuífero superficial.

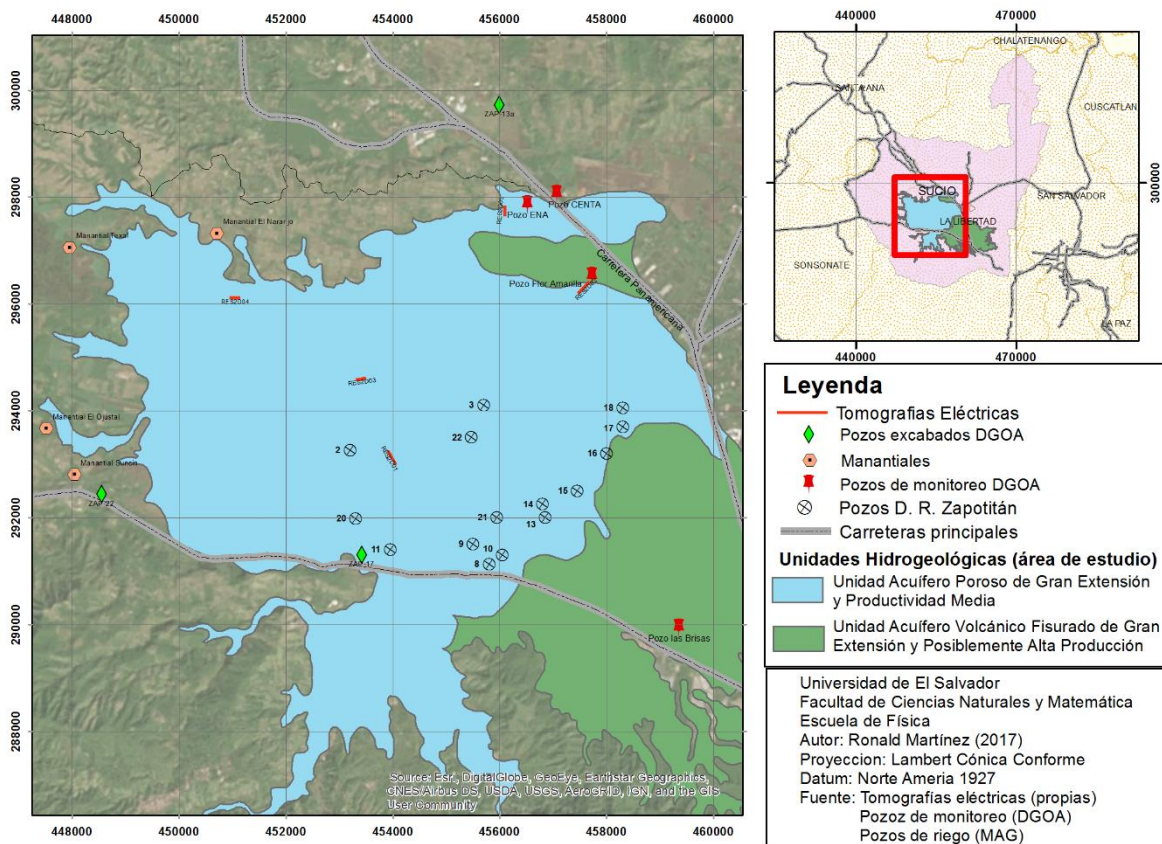


Fig. 3.19 Mapa de tomografías eléctricas desarrolladas junto a la ubicación de pozos de monitoreo (DGOA), pozos de riego (MAG) y Manantiales.

3.8.4 Flujo natural del acuífero superficial

Con la información del nivel estático de pozos, tomografías eléctricas y manantiales; recopilada en las secciones anteriores, se procedió a realizar las líneas isofreáticas (Fig. 3.20), en el mapa se puede observar que la dirección preferencial del flujo es de suroeste a noreste, con una tendencia a descargar en la salida del Río Sucio.

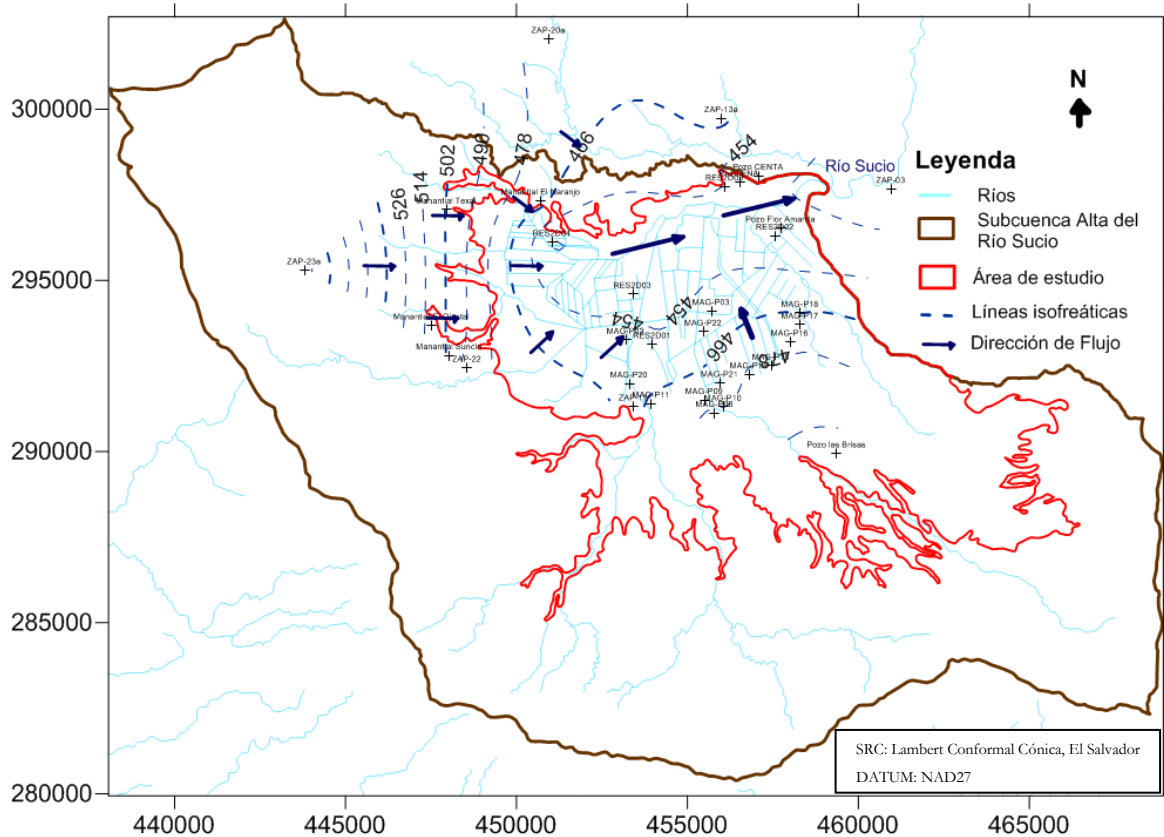


Fig. 3.20 Mapa de líneas isofreáticas, las cruces representan los puntos en los que se tiene información del nivel freático ya sea por afloramiento de manantiales, basados en el nivel estático de pozos o inferido a través de tomografías eléctricas.

Con el propósito de estimar la velocidad del flujo subterráneo, se ha calculado el gradiente hidráulico entre: Manantial el Ojustal y el pozo Flor Amarilla. Ya que las líneas de flujo indican que el agua subterránea fluye en esa dirección. Estos están separados una distancia de 10,864 metros y la diferencia entre el nivel freático es de 65.5 metros, por lo que el cálculo para el gradiente hidráulico queda de la siguiente manera:

$$i = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{65.5m}{10864m} = 0.006029 \approx 0.006$$

Por medio de la ecuación la ley de Darcy se procede a realizar el cálculo del flujo natural por metro lineal transversal a la dirección de flujo. Quedando los cálculos de la siguiente manera.

$$Q = TiL = 499.62 \frac{m^2}{d} \times 0.006 \times 1m = 2.82 \frac{m^3}{d}$$

Donde T se ha tomado la transmisividad promedio de los pozos de riego del MAG, i es el gradiente hidráulico calculado en base a los puntos definidos entre el manantial El Ojustal y el pozo Flor Amarilla y L es el ancho de unidad transversal de las celdas que atravesarían el acuífero.

Este resultado indica el volumen de agua que estaría atravesando el acuífero por cada metro del ancho total del mismo.

3.8.5 Modelo Hidrogeológico Conceptual en base a geología

En la zona de estudio, se diferencian dos unidades acuíferas; en base al mapa hidrogeológico una unidad acuífera se asocia a depósitos sedimentarios del cuaternario (acuífero superficial), mientras la otra unidad se asocia a lavas fracturadas y depósitos volcánicos de caída.

Según el Léxico estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984) la disposición estratigráfica basada en los depósitos geológicos por su antigüedad (periodos recientes del cuaternario). Estos depósitos están divididos en formaciones, las cuales se dividen en miembros geológicos (Ver Tabla 3.21)

Tabla 3.21 Esquema cronoestratigráfico de los miembros geológicos presentes cercanos al área de estudio (Baxter, 1984)

| | | | |
|-------------|------------------------|------|--|
| Cuaternario | Formación San Salvador | Q'f | Depósitos sedimentarios del cuaternario |
| | | s5'c | Cenizas volcánicas y tobas de lapilli |
| | | s5'b | Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder) |
| | | s5'a | Efusivas básicas intermedias |
| | | s4 | “Tierra blanca”: Piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas |
| | | s3'a | Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas (tobas color café) |
| | | s2 | Efusivas básicas – intermedias, piroclastitas subordinadas |
| | | s1 | Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas localmente efusivas básicas - intermedias |

A grandes rasgos, se puede decir que los estratos que contienen el acuífero superficial están compuestos por materiales de textura porosa, formados principalmente por rocas de los miembros Q'f (depósitos piroclásticos del cuaternario) y s5c (cenizas volcánicas y tobas de lapilli), mientras que el acuífero fisurado debe encontrarse bajo estos y podría estar compuesto por los miembros s5'a, s2 y s1 que se refieren principalmente a lavas efusivas que van desde composiciones básicas a intermedias.

Según la litología descrita por los informes de pozos propiedad del MAG (HAZAMA CORPORATION, 1998), a profundidades someras (menores a los 40 metros) se observan

Para estudiar este perfil se correlacionará la litología del pozo “MAG-08” que se ubica sobre el perfil A-A’, con una profundidad de 103.63 metros y el pozo de monitoreo de niveles “Flor Amarilla”, que se ubica cercano al final del perfil A-A’ con una profundidad de 46.63 metros. La Fig. 3.22 muestra la información litológica con su respectiva correlación y el diseño de ambos pozos.

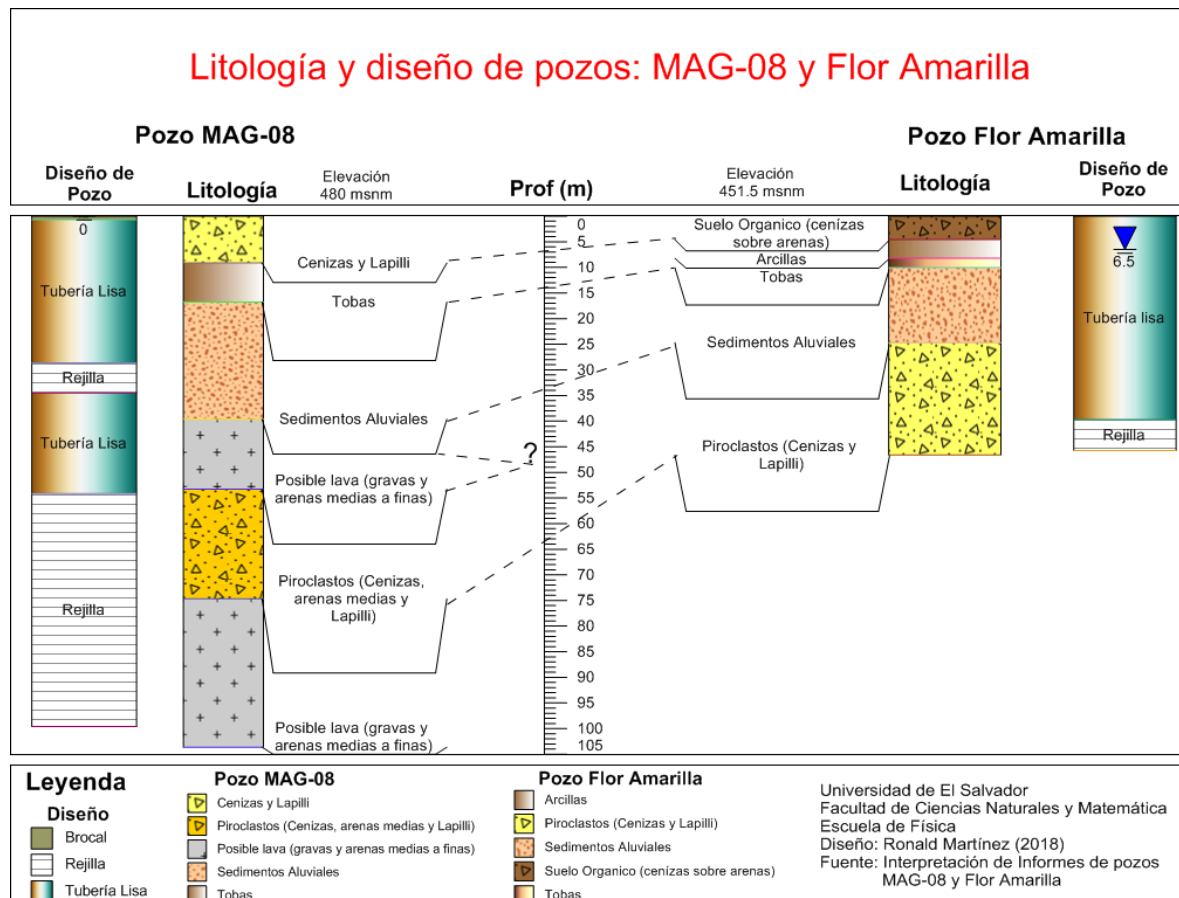


Fig. 3.22 Litología y diseño de los pozos MAG-08 y Flor Amarilla, con su respectiva correlación

Si se analiza el diseño del pozo MAG-08, se observa que existe rejilla en dos zonas, la primera inicia cerca de los 28 metros y finaliza a los 34 metros de profundidad, seguida de una sección de tubería lisa que culmina a los 54, dando inicio nuevamente a tubería con rejilla que se extiende hasta el final del pozo. Esto indica, que el pozo extrae agua de dos tipos de materiales geológicos diferentes, pero con características similares, hasta llegar a lavas cerca de los 75 metros de profundidad. El hecho de que el este pozo sea surgente, indica que debe haber cierto grado de confinamiento; sin embargo, que posea doble rejilla impide que se pueda definir la profundidad y espesor de la capa sello.

El pozo Flor Amarilla, posee una profundidad cercana a los 46 metros y posee rejilla desde los 39 metros de profundidad. El nivel freático de este pozo oscila cercano a los 6.5 metros de profundidad. Este pozo no profundiza hasta encontrar materiales que indiquen la presencia de lavas y no es de tipo surgente (artesiano). Indicando que, hasta profundidades cercanas a los 46 metros, no existen indicios de un acuífero confinado, lo que sugiere que la capa confinante podría estar cercana al contacto entre los depósitos piroclásticos y las lavas.

En la Fig. 3.23, se observa el corte transversal del perfil **A-A'**, para el que se ha tomado en cuenta: el nivel freático, el afloramiento de los miembros geológicos y fallas en superficie, la topografía y finalmente la litología de los pozos MAG-08 y Flor Amarilla; siendo esta última la que sugiere las profundidades entre los contactos de los diferentes miembros geológicos.

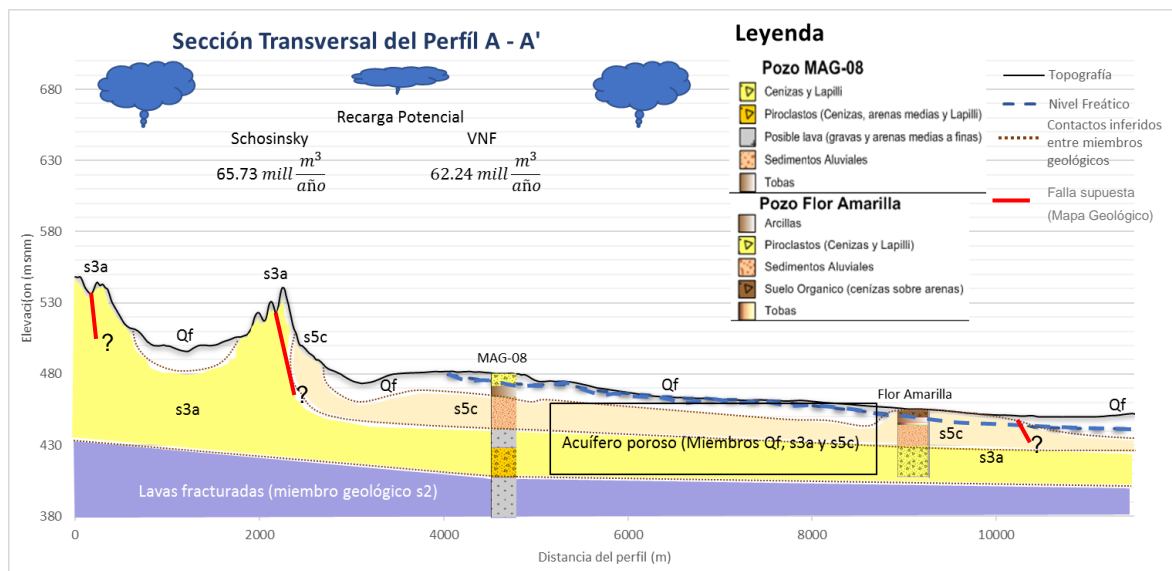


Fig. 3.23 Corte transversal cronoestratigráfico de los miembros geológicos que afloran en superficie en el perfil A-A'. La línea punteada celeste representa el nivel freático del acuífero superficial, la línea roja representa el contacto inferido entre el miembro s3a y s2.

Basado en la información litológica y de diseño de pozos, se define que a profundidades superiores a los 46 metros debe existir un acuífero confinado, independiente del acuífero poroso superficial, pudiendo encontrar una capa sello, cercana al contacto entre los miembros geológicos s3a (piroclásticas tipo tobas) y s2 (efusivas básicas intermedias).

Según el modelo de la Fig. 3.23, el mecanismo de recarga al acuífero poroso superficial en estudio; es de tipo vertical. Por la metodología de Schosinsky se estima una recarga potencial de

65.7 millones de metros cúbicos al año mientras que por la metodología de la Variación del Nivel Freático (VNF) se estimó en 62.2 millones de metros cúbicos al año. La recarga vertical depende de factores locales como la textura de suelo, las pendientes del terreno, el tipo de cultivos, etc.

Se infiere que existe un mecanismo de recarga horizontal en el acuífero, a través de fracturas o del mismo medio poroso, provenientes de las zonas con mayor elevación, tales como: el Volcán de San Salvador, el Lago de Coatepeque y montañas que se encuentran al sur del área de estudio. Según las líneas isofreáticas (Fig. 3.20), el acuífero descarga en dirección hacia el noreste del área en estudio a través de la subcuenca del Río Sucio.

CONCLUSIONES

Dentro del área en estudio, se reconocen dos unidades hidrogeológicas: el “Acuífero poroso de gran extensión y productividad media” y un “Acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción”. El acuífero poroso posee un área de 70.19km², mientras que el acuífero fisurado posee un área de 45.44 km². En base al cálculo de la recarga por la metodología de Schosinsky, se determinó la recarga por unidad de área para cada uno de los acuíferos, siendo el área del acuífero fisurado la que aporta mayor recarga con $0.61 \frac{m^3}{m^2.año}$, respecto a $0.54 \frac{m^3}{m^2.año}$ del acuífero poroso.

Las mediciones de la variación del nivel freático en los pozos de monitoreo de la DGOA muestran cierto grado de periodicidad anual relacionado con las precipitaciones. Se asocia un máximo de nivel piezométrico finalizando la época lluviosa y un mínimo al inicio esta misma.

A partir de la información de la variación del nivel freático se realizó la estimación de la recarga potencial anual para el área de estudio, dando como resultado en 62.224 millones de metros cúbicos de recarga potencial anual.

El modelo conceptual define la existencia de un acuífero poroso superficial (libre) que podría llegar hasta profundidades de entre 40 y 50 metros, en materiales de textura porosa; bajo los cuales debe encontrarse un acuífero volcánico fisurado confinado; sugerido por la existencia de pozos profundos surgentes (artesianos). En base a las líneas isofreáticas, se define que el flujo subterráneo principal, va en dirección suroeste-noreste. El acuífero superficial está compuesto principalmente por depósitos sedimentarios, cenizas y lapilli (miembros geológicos Qf, s5c y s3a).

En cuanto a los cálculos del balance hídrico realizados por las dos metodologías de Schosinsky y Variación del Nivel Freático (VNF); resulta en de *62.234 mill m³/año* por la metodología VNF y en *65.732 mill m³/año* por la metodología de Schosinsky, con una diferencia de *3.498 mill m³/año*, representando el cálculo por la VNF un 94.7% del cálculo hecho por la metodología de Schosinsky. Tanto la recarga estimada por la metodología de Schosinsky, como la estimada por la Variación del Nivel Freático (VNF) dan resultados muy similares para la misma área, por lo que se concluye que es factible utilizar la metodología de la VNF, siempre y cuando

el pozo de monitoreo posea las condiciones adecuadas de profundidad y esté ubicado en una zona representativa del área.

RECOMENDACIONES

Estimar el valor del almacenamiento específico (specific yield) de los pozos a través de la correlación entre datos del aumento de nivel de pozo y los valores de precipitación que lo causan. Con esto se obtendrán resultados de recarga, acordes a las condiciones del pozo que se pretenda analizar.

Sellar o rehabilitar los pozos que se encuentran en estado de abandono, para evitar algún siniestro que pueda contaminar el acuífero.

Continuar estudios de este tipo, densificando pruebas de infiltración hacia la zona alta del parteaguas de la subcuenca alta del Río Sucio.

Generar los mecanismos necesarios para obtener y sistematizar la información de extracción agua de todos los pozos de la zona de estudio, tanto privados como estatales, para tomarlos en cuenta en el balance hídrico y evaluar así la disponibilidad del recurso.

Realizar un estudio hidrogeoquímico que permita determinar si el acuífero puede estar salinizándose debido al uso intensivo de riego y agro fertilizantes para producción agrícola en la zona.

Establecer una línea base que permita monitorear cambios significativos de los parámetros fisicoquímicos del acuífero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado Batres, C. A. (2015). *Modelo conceptual de la parte oeste de la cuenca del Río Suquiapa, Santa Ana, El Salvador*. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, Programa de Estudios de posgrado en Geología, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica.
- ANDA-FIAS-COSUDE. (Septiembre de 2008). Cuadrante A1 y B1 del Mapa hidrogeológico de El Salvador. *Mapa hidrogeológico de El Salvador*. San Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Baxter, S. (1984). *LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE EL SALVADOR*. San Salvador, El Salvador: Comisión Eléctrica de El Salvador (CEL).
- Betancur, T., & Palacio, C. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales. *SciELO*, 39-49.
- Bredehoeft, J. (2005). The conceptualization model problem - surprise. *Hidrogeology*, 37-46. doi:10.1007/s 10040-004-0430-5
- Chávez Matal, D. A., & Pastora Flores, D. V. (2007). *Gestión e implementación de la red de monitoreo de aguas subterráneas en el AMSS y Valle de Zapotitán*. Tesis, Universidad Centro Americana "José Simeón Cañas", Antigua Cuscatlán .
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.
- Córdova, D. F., Meffe, R., & Martínez Hernandez, M. V. (2013). Metodología para el desarrollo de un modelo hidrogeológico mediante herramientas de información geográfica. *Centro de Investigaciones y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH, Chile), Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA agua, España)*, 18.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega, S. A.
- Deras Cortéz, J. R. (2003). *Guía técnica de riegos*. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal.
- Escobar, F., Hunter, G., Bishop, I., & Zerger, A. (s.f.). *Introducción a los SIG*. Universidad de Melbourne, Departamento de Geomática. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de <http://www.sli.unimelb.edu.au/gisweb/>

- Geotomo Software. (2011). *Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method*.
- Guevara, M. (2011). Modelación numérica de flujo del acuífero El Playón, comprendido entre el Cantón Sitio del Niño y el campo de pozos de San Juan Opico administrado por ANDA. El Salvador: Unidad de Post-Grado, Universidad de El Salvador.
- Hamad, S. (2009). Geoestatistical analysis of groundwater levels in the south Al Jabal Al Akhdar area using GIS . *GIS Ostrava* .
- HAZAMA CORPORATION. (1998). *Reporte de construcción de los pozos No: 2, 3, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18-A, 20, 21 y 22*. Informes de pozos , Ministerio de Agricultura y Ganadería, San Salvador.
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 91-109.
- Johnson, A. (1967). *Specific yield - Compilation of Specific Yields for Various Materials*. Washington.
- Kirsh, R. (2009). *Groundwater Geophysics a Tool for Hydrogeology* (Vol. 2da edición). Berlin Heidelberg: Springer.
- MARN, M. (2014). *Estadística hidrológica por departamento año 2014*.
- Martínez Solamo, F. J. (2002). *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión técnica de redes de distribución de agua potable*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería, Hidráulica y Medio Ambiente.
- Payes Hernández, J. E. (2014). Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, Municipio de San Juan Opico. San Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Quiroz-Londoño, O. M., Martínez, D., & Massone, H. (2012). Estimación de recarga de acuíferos en ambientes de llanura con base en variaciones del nivel freático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 123-130.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1985). *The constant head well permeameter: Effect of unsaturated flow*. *Soil Science*, 139: 172-180.

- Rodríguez, M. G. (2013). Estimación de la infiltración del agua de lluvia con permeámetro de Guelph. *Revista Electrónica de Medio Ambiente UCM*.
- Sayre, A. N., & Taylor, G. C. (1951). *Ground-Water Resources of Republic of El Salvador Central American*. Washington, Estados Unidos.
- Schosinsky N, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 13-30.
- Schosinsky N, G. E. (2000). *Modelo analítico para determinar la infiltración con base a la lluvia mensual*. *Revista Geológica de América Central*.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN CON BASE EN LA LLUVIA MENSUAL. *Revista Geológica de América Central*, 43-55.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (Segunda ed.). Cambridge, Nueva York, Estados Unidos de América: Cambridge University Press.
- Water Earth Science Associated (WESA). (2001). *Cuenca del Río Sucio, Evaluación para el abastecimiento de agua potable*. Borrador, Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). .

ANEXOS

ANEXO 1. INFORMACIÓN GENERALIZADA DE POZOS PERFORADOS DEL MAG

1. Información general y de diseño de pozos perforados propiedad del MAG utilizados en para riego

| Codigo | X (Lambert) | Y (Lambert) | h (msnm) | prof (m) | NE (msnm) | Prof total (m) | Prof total (msnm) | Inicio Rejilla 1 (m) | Inicio Rejilla (msnm) | Fin de Regilla 1 (m) | Fin de Regilla 1 (msnm) | Inicio de regilla 2 (m) | Inicio de regilla 2 (msnm) | Radio de interferencia (m) |
|---------|-------------|-------------|----------|----------|-----------|----------------|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| MAG-P02 | 453200 | 293259 | 465 | 0 | 465 | 99.61 | 365.39 | 48.39 | 416.61 | 58 | 407 | 75.61 | 389.39 | 1890 |
| MAG-P03 | 455700 | 294100 | 460 | 0 | 460 | 80.31 | 379.69 | 21.08 | 438.92 | 32.82 | 427.18 | 50.43 | 409.57 | 1280 |
| MAG-P08 | 455800 | 291125 | 480 | 0 | 480 | 99.61 | 380.39 | 28.65 | 451.35 | 34.53 | 445.47 | 52.13 | 427.87 | 1829 |
| MAG-P09 | 455500 | 291500 | 475 | 0 | 475 | 99.72 | 375.28 | 28.75 | 446.25 | 46.36 | 428.64 | 63.94 | 411.06 | 2317 |
| MAG-P10 | 456050 | 291300 | 480 | 2.26 | 477.74 | 99.72 | 380.28 | 52.23 | 427.77 | 63.97 | 416.03 | 75.71 | 404.29 | 1433 |
| MAG-P11 | 453950 | 291400 | 470 | 2.31 | 467.69 | 99.06 | 370.94 | 40.14 | 429.86 | 46.01 | 423.99 | 63.62 | 406.38 | 1646 |
| MAG-P13 | 456850 | 292000 | 460 | 0 | 460 | 61.1 | 398.9 | 19.48 | 440.52 | 37.09 | 422.91 | 42.96 | 417.04 | 2317 |
| MAG-P14 | 456800 | 292250 | 480 | 0 | 480 | 72 | 408 | 6.9 | 473.1 | 24.51 | 455.49 | 36.25 | 443.75 | 1676 |
| MAG-P15 | 457450 | 292500 | 480 | 0 | 480 | 81.72 | 398.28 | 22.8 | 457.2 | 34.51 | 445.49 | 46.28 | 433.72 | 2011 |
| MAG-P16 | 458000 | 293200 | 475 | 0 | 475 | 99.72 | 375.28 | 46.36 | 428.64 | 52.23 | 422.77 | 63.97 | 411.03 | 1036 |
| MAG-P17 | 458300 | 293700 | 475 | 0 | 475 | 99.72 | 375.28 | 46.36 | 428.64 | 52.23 | 422.77 | 63.97 | 411.03 | 1372 |
| MAG-P18 | 458300 | 294050 | 465 | 0 | 465 | 99.72 | 365.28 | 28.75 | 436.25 | 46.36 | 418.64 | 63.97 | 401.03 | 1706 |
| MAG-P20 | 453300 | 291980 | 465 | 0.12 | 464.88 | 99.31 | 365.69 | 45.96 | 419.04 | 69.44 | 395.56 | 81.18 | 383.82 | 2317 |
| MAG-P21 | 455950 | 292000 | 470 | 0 | 470 | 102.73 | 367.27 | 41.33 | 428.67 | 53.51 | 416.49 | 71.78 | 398.22 | 1890 |
| MAG-P22 | 455470 | 293500 | 460 | 0 | 460 | 99.61 | 360.39 | 40.39 | 419.61 | 52.13 | 407.87 | 69.74 | 390.26 | 1829 |

ANEXO 2. HOJAS ELECTRÓNICAS DEL CÁLCULO DE SCHOSISNKY

| BALANCE HIDRICO DE SUELOS | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--------|--------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Gunther Schosinsky | | | | | | | | | | | | | |
| Zona de Estudio: | Distrito de Riego de Zapotitán | | | | | | | | | | | | |
| Fecha: | Septiembre de 2017 | | | | | | | | | | | | |
| Textura de Suelo: | Franco Arcilloso-AcuiferoVolcánico-Café-Estación L08 | | | | | | | | | | | | |
| 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] | 180.00 | | | | | | | | | | | | |
| Kp [0.01%] | 0.10 | | | | | | | | | | | | |
| Kv [0.01%] | 0.20 | | | | | | | | | | | | |
| Kfc [0.01%] | 0.6358 | | | | | por peso | | | | | | | |
| I [0.01%] = | 0.9358 | | | | | (%) | | | | | | | |
| DS (g/cm ³): | 1.35 | | | | | (mm) | | | | | | | |
| PR (mm) | 200.00 | | | | | CC | 27.00 | 72.90 | | | | | |
| HSi (mm) | 72.00 | | | | | PM | 13.00 | 35.10 | | | | | |
| Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? | 11 | | | | | (CC-PM) | 14.00 | 37.80 | | | | | |
| Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 | 0.12 | | | | | | | | | | | | |
| Concepto | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
| P (mm) | 5.43 | 1.46 | 12.49 | 35.80 | 170.22 | 320.08 | 349.17 | 336.13 | 355.20 | 200.02 | 56.06 | 8.25 | 1850.30 |
| Ret [mm] | 5.00 | 1.46 | 5.00 | 5.00 | 20.43 | 38.41 | 41.90 | 40.34 | 42.62 | 24.00 | 6.73 | 5.00 | 235.88 |
| Pi (mm) | 0.40 | 0.00 | 7.01 | 28.82 | 140.18 | 263.59 | 287.54 | 276.80 | 292.51 | 164.72 | 46.16 | 3.04 | 1510.77 |
| ESC (mm) | 0.03 | 0.00 | 0.48 | 1.98 | 9.62 | 18.08 | 19.73 | 18.99 | 20.07 | 11.30 | 3.17 | 0.21 | 103.65 |
| ETP (mm) | 122.13 | 125.48 | 150.27 | 152.03 | 144.60 | 137.44 | 152.04 | 147.20 | 128.50 | 127.07 | 118.17 | 115.65 | 1620.58 |
| HSi (mm) | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.00 | 59.08 | |
| C1 | 0.01 | 0.00 | 0.19 | 0.76 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.71 | |
| C2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | |
| HD (mm) | 0.40 | 0.00 | 7.01 | 28.82 | 140.18 | 301.39 | 325.34 | 314.60 | 330.31 | 202.52 | 83.06 | 27.02 | |
| ETR (mm) | 0.40 | 0.00 | 7.01 | 28.82 | 72.30 | 137.44 | 152.04 | 147.20 | 128.50 | 127.07 | 59.09 | 27.02 | 886.89 |
| HSf (mm) | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 59.08 | 35.10 | |
| DCC (mm) | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 13.82 | 37.80 | |
| Rp (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 30.07 | 126.15 | 135.50 | 129.60 | 164.01 | 37.65 | 0.00 | 0.00 | 622.98 |
| NR (mm) | 159.53 | 163.28 | 181.06 | 161.01 | 72.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 72.91 | 126.43 | 936.51 |

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Distrito de Riego de Zapotitán
Fecha: Septiembre de 2017
Textura de Suelo: Franco Arcilloso-Acuífero Volcánico-Café-Estación L08

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] | 180.00 | | |
| Kp [0.01%] | 0.10 | | |
| Kv [0.01%] | 0.20 | | |
| Kfc [0.01%] | 0.6358 | | |
| I [0.01%] = | 0.9358 | | |
| DS (g/cm ³): | 1.35 | | |
| PR (mm) | 200.00 | | |
| HSi (mm) | 72.00 | | |
| Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? | 11 | | |
| Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 | 0.12 | | |

| | | | |
|--|---------|----------|-------|
| | | por peso | |
| | | (%) | (mm) |
| | CC | 27.00 | 72.90 |
| | PM | 13.00 | 35.10 |
| | (CC-PM) | 14.00 | 37.80 |

| Concepto | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P (mm) | 5.43 | 1.46 | 12.49 | 35.80 | 170.22 | 320.08 | 349.17 | 336.13 | 355.20 | 200.02 | 56.06 | 8.25 | 1850.30 |
| Ret [mm] | 5.00 | 1.46 | 5.00 | 5.00 | 20.43 | 38.41 | 41.90 | 40.34 | 42.62 | 24.00 | 6.73 | 5.00 | 235.88 |
| Pi (mm) | 0.40 | 0.00 | 7.01 | 28.82 | 140.18 | 263.59 | 287.54 | 276.80 | 292.51 | 164.72 | 46.16 | 3.04 | 1510.77 |
| ESC (mm) | 0.03 | 0.00 | 0.48 | 1.98 | 9.62 | 18.08 | 19.73 | 18.99 | 20.07 | 11.30 | 3.17 | 0.21 | 103.65 |
| ETP (mm) | 122.13 | 125.48 | 150.27 | 152.03 | 144.60 | 137.44 | 152.04 | 147.20 | 128.50 | 127.07 | 118.17 | 115.65 | 1620.58 |
| HSi (mm) | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.00 | 59.08 | |
| C1 | 0.01 | 0.00 | 0.19 | 0.76 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.71 | |
| C2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | |
| HD (mm) | 0.40 | 0.00 | 7.01 | 28.82 | 140.18 | 301.39 | 325.34 | 314.60 | 330.31 | 202.52 | 83.06 | 27.02 | |
| ETR (mm) | 0.40 | 0.00 | 7.01 | 28.82 | 72.30 | 137.44 | 152.04 | 147.20 | 128.50 | 127.07 | 59.09 | 27.02 | 886.89 |
| HSf (mm) | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 35.10 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 72.90 | 59.08 | 35.10 | |
| DCC (mm) | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 13.82 | 37.80 | |
| Rp (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 30.07 | 126.15 | 135.50 | 129.60 | 164.01 | 37.65 | 0.00 | 0.00 | 622.98 |
| NR (mm) | 159.53 | 163.28 | 181.06 | 161.01 | 72.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 72.91 | 126.43 | 936.51 |

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Distrito de Riego de Zapotitán
Fecha: Septiembre de 2017
Textura de Suelo: Franco Limosos-Acuifero Poroso-Caña-Estacion 04

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 |

Página 1

| | | | |
|--|---------|--|--|
| fc [mm/d] | 860.00 | | |
| Kp [0.01%] | 0.15 | | |
| Kv [0.01%] | 0.18 | | |
| Kfc [0.01%] | 0.94866 | | |
| I [0.01%] = | 1 | | |
| DS (g/cm ³): | 1.65 | | |
| PR (mm) | 180.00 | | |
| HSi (mm) | 65.00 | | |
| Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? | 11 | | |
| Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 | 0.12 | | |

| | | |
|---------|----------|-------|
| | por peso | |
| | (%) | (mm) |
| CC | 22.00 | 65.34 |
| PM | 10.00 | 29.70 |
| (CC-PM) | 12.00 | 35.64 |

| Concepto | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P (mm) | 4.82 | 2.56 | 13.25 | 51.78 | 195.52 | 325.14 | 281.75 | 326.68 | 363.50 | 219.37 | 46.78 | 8.75 | 1839.91 |
| Ret [mm] | 4.82 | 2.56 | 5.00 | 6.21 | 23.46 | 39.02 | 33.81 | 39.20 | 43.62 | 26.32 | 5.61 | 5.00 | 234.64 |
| Pi (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 172.06 | 286.13 | 247.94 | 287.48 | 319.88 | 193.05 | 41.17 | 3.75 | 1605.27 |
| 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) | 132.92 | 138.07 | 172.31 | 176.27 | 171.79 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 125.93 | 126.47 | 1786.53 |
| HSi (mm) | 29.70 | 29.70 | 29.70 | 29.70 | 29.70 | 65.34 | 65.34 | 65.34 | 65.34 | 65.34 | 65.00 | 43.20 | |
| C1 | 0.00 | 0.00 | 0.23 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.48 | |
| C2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | |
| HD (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 172.06 | 321.77 | 283.58 | 323.12 | 355.52 | 228.69 | 76.47 | 17.26 | |
| ETR (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 86.55 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 62.97 | 17.26 | 963.37 |
| HSf (mm) | 29.70 | 29.70 | 29.70 | 29.70 | 65.34 | 65.34 | 65.34 | 65.34 | 65.34 | 65.34 | 43.20 | 29.70 | |
| DCC (mm) | 35.64 | 35.64 | 35.64 | 35.64 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 22.14 | 35.64 | |
| Rp (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 49.87 | 135.40 | 89.39 | 131.48 | 180.38 | 55.04 | 0.00 | 0.00 | 641.56 |
| NR (mm) | 168.56 | 173.71 | 199.70 | 166.34 | 85.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 85.10 | 144.85 | 1023.50 |

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Distrito de Riego de Zapotitán
Fecha: Septiembre de 2017
Textura de Suelo: Franco Arenoso-Acuífero Poroso-Caña-Estación L04

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] | 600.00 | | |
| Kp [0.01%] | 0.15 | | |
| Kv [0.01%] | 0.10 | | |
| Kfc [0.01%] | 0.89258 | | |
| I [0.01%] = | 1 | | |
| DS (g/cm ³): | 1.50 | | |
| PR (mm) | 180.00 | | |
| HSi (mm) | 37.00 | | |
| Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? | 11 | | |
| Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 | 0.12 | | |

| | | | |
|---------|-------|----------|-------|
| | | por peso | |
| | | (%) | (mm) |
| CC | 14.00 | | 37.80 |
| PM | 6.00 | | 16.20 |
| (CC-PM) | 8.00 | | 21.60 |

| Concepto | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P (mm) | 4.82 | 2.56 | 13.25 | 51.78 | 195.52 | 325.14 | 281.75 | 326.68 | 363.50 | 219.37 | 46.78 | 8.75 | 1839.91 |
| Ret [mm] | 4.82 | 2.56 | 5.00 | 6.21 | 23.46 | 39.02 | 33.81 | 39.20 | 43.62 | 26.32 | 5.61 | 5.00 | 234.64 |
| Pi (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 172.06 | 286.13 | 247.94 | 287.48 | 319.88 | 193.05 | 41.17 | 3.75 | 1605.27 |
| 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) | 132.92 | 138.07 | 172.31 | 176.27 | 171.79 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 125.93 | 126.47 | 1786.53 |
| HSi (mm) | 16.20 | 16.20 | 16.20 | 16.20 | 16.20 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.00 | 16.20 | |
| C1 | 0.00 | 0.00 | 0.38 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.17 | |
| C2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | |
| HD (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 172.06 | 307.73 | 269.54 | 309.08 | 341.48 | 214.65 | 61.97 | 3.75 | |
| ETR (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 86.98 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 61.97 | 3.75 | 949.30 |
| HSf (mm) | 16.20 | 16.20 | 16.20 | 16.20 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 37.80 | 16.20 | 16.20 | |
| DCC (mm) | 21.60 | 21.60 | 21.60 | 21.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 21.60 | 21.60 | |
| Rp (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 63.48 | 135.40 | 89.39 | 131.48 | 180.38 | 55.04 | 0.00 | 0.00 | 655.17 |
| NR (mm) | 154.52 | 159.67 | 185.66 | 152.30 | 84.81 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 85.56 | 144.31 | 966.83 |

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Distrito de Riego de Zapotitán
Fecha: Septiembre de 2017
Textura de Suelo: Franco Limosos-Acuifero Fisurado-Café y Caña-Estación L04

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] | 360.00 | | |
| Kp [0.01%] | 0.15 | | |
| Kv [0.01%] | 0.10 | | |
| Kfc [0.01%] | 0.79315 | por peso | |
| I [0.01%] = | 1 | (%) | (mm) |
| DS (g/cm ³): | 1.43 | CC | 22.00 |
| PR (mm) | 180.00 | PM | 10.00 |
| HSi (mm) | 56.00 | (CC-PM) | 12.00 |
| Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? | 11 | | |
| Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 | 0.12 | | |

| Concepto | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P (mm) | 4.82 | 2.56 | 13.25 | 51.78 | 195.52 | 325.14 | 281.75 | 326.68 | 363.50 | 219.37 | 46.78 | 8.75 | 1839.91 |
| Ret [mm] | 4.82 | 2.56 | 5.00 | 6.21 | 23.46 | 39.02 | 33.81 | 39.20 | 43.62 | 26.32 | 5.61 | 5.00 | 234.64 |
| Pi (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 172.06 | 286.13 | 247.94 | 287.48 | 319.88 | 193.05 | 41.17 | 3.75 | 1605.27 |
| 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) | 132.92 | 138.07 | 172.31 | 176.27 | 171.79 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 125.93 | 126.47 | 1786.53 |
| HSi (mm) | 25.74 | 25.74 | 25.74 | 25.74 | 25.74 | 56.63 | 56.63 | 56.63 | 56.63 | 56.63 | 56.00 | 34.20 | |
| C1 | 0.00 | 0.00 | 0.27 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.40 | |
| C2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | |
| HD (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 172.06 | 317.02 | 278.83 | 318.37 | 350.77 | 223.93 | 71.43 | 12.22 | |
| ETR (mm) | 0.00 | 0.00 | 8.25 | 45.57 | 86.65 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 62.97 | 12.22 | 958.43 |
| HSf (mm) | 25.74 | 25.74 | 25.74 | 25.74 | 56.63 | 56.63 | 56.63 | 56.63 | 56.63 | 56.63 | 34.20 | 25.74 | |
| DCC (mm) | 30.89 | 30.89 | 30.89 | 30.89 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 22.42 | 30.89 | |
| Rp (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 54.52 | 135.40 | 89.39 | 131.48 | 180.38 | 55.04 | 0.00 | 0.00 | 646.21 |
| NR (mm) | 163.80 | 168.96 | 194.95 | 161.59 | 85.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 85.39 | 145.14 | 1004.96 |

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Distrito de Riego de Zapotitán
Fecha: Septiembre de 2017
Textura de Suelo: Franco Arcilloso-Acuífero Fisurado-Café y Caña-Estación L04

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] | 180.00 | | |
| Kp [0.01%] | 0.20 | | |
| Kv [0.01%] | 0.10 | | |
| Kfc [0.01%] | 0.6358 | | |
| I [0.01%] = | 0.9358 | | |
| DS (g/cm ³): | 1.35 | | |
| PR (mm) | 150.00 | | |
| HSi (mm) | 54.00 | | |
| Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? | 11 | | |
| Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 | 0.12 | | |

| | | |
|---------|----------|-------|
| | por peso | |
| | (%) | (mm) |
| CC | 27.00 | 54.68 |
| PM | 13.00 | 26.33 |
| (CC-PM) | 14.00 | 28.35 |

| Concepto | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P (mm) | 4.82 | 2.56 | 13.25 | 51.78 | 195.52 | 325.14 | 281.75 | 326.68 | 363.50 | 219.37 | 46.78 | 8.75 | 1839.91 |
| Ret [mm] | 4.82 | 2.56 | 5.00 | 6.21 | 23.46 | 39.02 | 33.81 | 39.20 | 43.62 | 26.32 | 5.61 | 5.00 | 234.64 |
| Pi (mm) | 0.00 | 0.00 | 7.72 | 42.64 | 161.01 | 267.76 | 232.02 | 269.03 | 299.34 | 180.65 | 38.53 | 3.51 | 1502.21 |
| ESC (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.53 | 2.93 | 11.05 | 18.37 | 15.92 | 18.46 | 20.54 | 12.39 | 2.64 | 0.24 | 103.06 |
| ETP (mm) | 132.92 | 138.07 | 172.31 | 176.27 | 171.79 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 125.93 | 126.47 | 1786.53 |
| HSi (mm) | 26.33 | 26.33 | 26.33 | 26.33 | 26.33 | 54.68 | 54.68 | 54.68 | 54.68 | 54.68 | 54.00 | 29.56 | |
| C1 | 0.00 | 0.00 | 0.27 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.24 | |
| C2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | |
| HD (mm) | 0.00 | 0.00 | 7.72 | 42.64 | 161.01 | 296.11 | 260.37 | 297.38 | 327.69 | 209.00 | 66.20 | 6.75 | |
| ETR (mm) | 0.00 | 0.00 | 7.72 | 42.64 | 85.89 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 62.97 | 6.75 | 948.75 |
| HSf (mm) | 26.33 | 26.33 | 26.33 | 26.33 | 54.68 | 54.68 | 54.68 | 54.68 | 54.68 | 54.68 | 29.56 | 26.33 | |
| DCC (mm) | 28.35 | 28.35 | 28.35 | 28.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 25.11 | 28.35 | |
| Rp (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 46.77 | 117.03 | 73.48 | 113.03 | 159.84 | 42.64 | 0.00 | 0.00 | 552.79 |
| NR (mm) | 161.27 | 166.42 | 192.94 | 161.97 | 85.89 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 88.08 | 148.07 | 1004.65 |

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Distrito de Riego de Zapotitán
Fecha: Septiembre de 2017
Textura de Suelo: Arcilloso-Acuifero Poroso-Pastos y Granos Básicos-Estación L04

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] | 72.00 | | |
| Kp [0.01%] | 0.15 | | |
| Kv [0.01%] | 0.10 | | |
| Kfc [0.01%] | 0.40778 | por peso | |
| I [0.01%] = | 0.65778 | (%) | (mm) |
| DS (g/cm ³): | 1.25 | CC | 34.00 |
| PR (mm) | 150.00 | PM | 17.00 |
| HSi (mm) | 63.00 | (CC-PM) | 17.00 |
| Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12? | 11 | | |
| Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1 | 0.12 | | |

| Concepto | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P (mm) | 4.82 | 2.56 | 13.25 | 51.78 | 195.52 | 325.14 | 281.75 | 326.68 | 363.50 | 219.37 | 46.78 | 8.75 | 1839.91 |
| Ret [mm] | 4.82 | 2.56 | 5.00 | 6.21 | 23.46 | 39.02 | 33.81 | 39.20 | 43.62 | 26.32 | 5.61 | 5.00 | 234.64 |
| Pi (mm) | 0.00 | 0.00 | 5.43 | 29.97 | 113.18 | 188.21 | 163.09 | 189.10 | 210.41 | 126.98 | 27.08 | 2.47 | 1055.92 |
| ESC (mm) | 0.00 | 0.00 | 2.82 | 15.59 | 58.88 | 97.92 | 84.85 | 98.38 | 109.47 | 66.06 | 14.09 | 1.28 | 549.35 |
| ETP (mm) | 132.92 | 138.07 | 172.31 | 176.27 | 171.79 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 138.01 | 125.93 | 126.47 | 1786.53 |
| HSi (mm) | 31.88 | 31.88 | 31.88 | 31.88 | 31.88 | 59.16 | 63.75 | 63.75 | 63.75 | 63.75 | 63.00 | 31.88 | |
| C1 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 0.94 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.08 | |
| C2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.65 | 0.00 | 0.00 | |
| HD (mm) | 0.00 | 0.00 | 5.43 | 29.97 | 113.18 | 215.49 | 194.96 | 220.98 | 242.29 | 158.86 | 58.21 | 2.47 | |
| ETR (mm) | 0.00 | 0.00 | 5.43 | 29.97 | 85.89 | 150.73 | 158.54 | 156.00 | 139.50 | 114.14 | 58.21 | 2.47 | 900.88 |
| HSf (mm) | 31.88 | 31.88 | 31.88 | 31.88 | 59.16 | 63.75 | 63.75 | 63.75 | 63.75 | 63.75 | 31.88 | 31.88 | |
| DCC (mm) | 31.88 | 31.88 | 31.88 | 31.88 | 4.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 31.88 | 31.88 | |
| Rp (mm) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 32.89 | 4.55 | 33.10 | 70.91 | 12.85 | 0.00 | 0.00 | 154.29 |
| NR (mm) | 164.79 | 169.95 | 198.76 | 178.17 | 90.48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 23.87 | 99.60 | 155.87 | 1081.50 |

ANEXO 3. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN (PERMEAMETRO DE GUELP)

PIG01



 Input

 Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): 1
 Enter water Head Height ("H" in cm): 5
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): 3

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): 2

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): 0.0200

Res Type 35.22
 H 5
 a 3
 H/a 1.667
 a* 0.04
 C0.01 0.809
 C0.04 0.842
 C0.12 0.803
 C0.36 0.803
 C 0.842
 R 0.020
 Q 0.012
 pi 3.142

$\alpha^* =$ 0.04 (cm⁻¹)
 $C =$ 0.842059
 $Q =$ 0.01174
 $K_{fs} =$ 1.02E-05 cm/sec
6.14E-04 cm/min
1.02E-07 m/sec
2.42E-04 inch/min
4.03E-06 inch/sec
 $\Phi_m =$ 2.56E-04 (cm²/min)

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): 1
 Enter water Head Height ("H" in cm): 9
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): 3

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): 2

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravelly sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): 0.1000

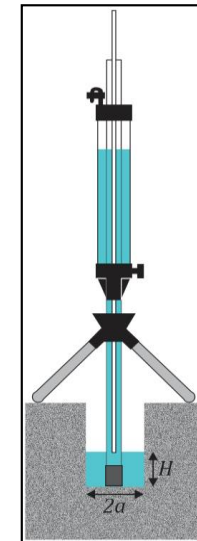
Res Type 35.22
 H 9
 a 3
 H/a 3
 a* 0.04
 C0.01 1.147682
 C0.04 1.211608
 C0.12 1.20101
 C0.36 1.20101
 C 1.211608
 R 0.100
 Q 0.0587
 pi 3.1415

$\alpha^* =$ 0.04 (cm⁻¹)
 $C =$ 1.211608
 $Q =$ 0.0587
 $K_{fs} =$ 3.63E-05 cm/sec
2.18E-03 cm/min
3.63E-07 m/sec
8.59E-04 inch/min
1.43E-05 inch/sec
 $\Phi_m =$ 9.09E-04 (cm²/min)

Average

8.38E-01

$K_{fs} =$ 2.33E-05 cm/sec
1.40E-03 cm/min
2.33E-07 m/s
5.50E-04 inch/min
9.17E-06 inch/sec
 $\Phi_m =$ 5.82E-04 (cm²/min)





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **27**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.0100**

| | | |
|----------|-------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 27 | |
| a | 3 | |
| H/a | 9 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 2.016 | |
| C0.04 | 2.214 | |
| C0.12 | 2.342 | |
| C0.36 | 2.342 | |
| C | 2.214 | |
| R | 0.010 | |
| Q | 0.006 | |
| pi | 3.142 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 2.21399$
 $Q = 0.00587$

$K_{fs} = 1.46E-06 \text{ cm/sec}$
 $8.78E-05 \text{ cm/min}$
 $1.46E-08 \text{ m/sec}$
 $3.46E-05 \text{ inch/min}$
 $5.76E-07 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 3.66E-05 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **27**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.0100**

| | | |
|----------|----------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 27 | |
| a | 3 | |
| H/a | 9 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 2.016226 | |
| C0.04 | 2.21399 | |
| C0.12 | 2.34213 | |
| C0.36 | 2.34213 | |
| C | 2.21399 | |
| R | 0.010 | |
| Q | 0.00587 | |
| pi | 3.1415 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 2.21399$
 $Q = 0.00587$

$K_{fs} = 1.46E-06 \text{ cm/sec}$
 $8.78E-05 \text{ cm/min}$
 $1.46E-08 \text{ m/sec}$
 $3.46E-05 \text{ inch/min}$
 $5.76E-07 \text{ inch/sec}$

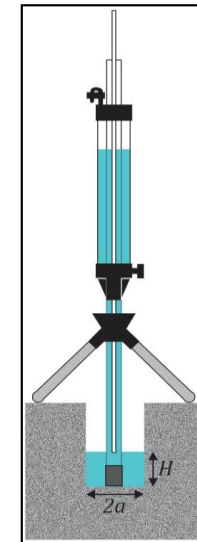
$\Phi_m = 3.66E-05 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Average

5.27E-02

$K_{fs} = 1.46E-06 \text{ cm/sec}$
 $8.78E-05 \text{ cm/min}$
 $1.46E-08 \text{ m/s}$
 $3.46E-05 \text{ inch/min}$
 $5.76E-07 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 3.66E-05 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.1200**

| | | |
|----------|-------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | |
| H/a | 3.333 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 1.218 | |
| C0.04 | 1.29 | |
| C0.12 | 1.288 | |
| C0.36 | 1.288 | |
| C | 1.29 | |
| R | 0.120 | |
| Q | 0.07 | |
| pi | 3.142 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 1.290234$
 $Q = 0.07044$

$K_{fs} = 4.07E-05 \text{ cm/sec}$
 $2.44E-03 \text{ cm/min}$
 $4.07E-07 \text{ m/sec}$
 $9.60E-04 \text{ inch/min}$
 $1.60E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.02E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **15**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.1000**

| | | |
|----------|----------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 15 | |
| a | 3 | |
| H/a | 5 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 1.518269 | |
| C0.04 | 1.629144 | |
| C0.12 | 1.666893 | |
| C0.36 | 1.666893 | |
| C | 1.629144 | |
| R | 0.100 | |
| Q | 0.0587 | |
| pi | 3.1415 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 1.629144$
 $Q = 0.0587$

$K_{fs} = 2.51E-05 \text{ cm/sec}$
 $1.50E-03 \text{ cm/min}$
 $2.51E-07 \text{ m/sec}$
 $5.92E-04 \text{ inch/min}$
 $9.87E-06 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 6.27E-04 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Average

1.18E+00

$K_{fs} = 3.29E-05 \text{ cm/sec}$
 $1.97E-03 \text{ cm/min}$
 $3.29E-07 \text{ m/s}$
 $7.76E-04 \text{ inch/min}$
 $1.29E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 8.21E-04 \text{ (cm}^2\text{/min)}$



Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.0000**

| | | |
|----------|--------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| C0.01 | 0.809 | $C = 0.842059$ |
| C0.04 | 0.842 | $Q = 0$ |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 0.00E+00 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $0.00E+00 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $0.00E+00 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.000 | $0.00E+00 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0 | $0.00E+00 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 0.00E+00 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.1500**

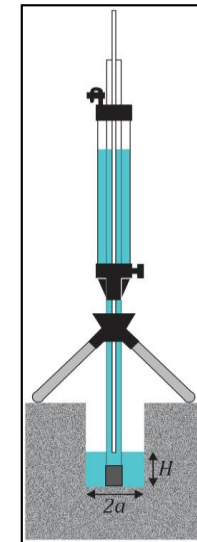
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| C0.01 | 1.21841 | $C = 1.290234$ |
| C0.04 | 1.290234 | $Q = 0.08805$ |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 5.08E-05 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $3.05E-03 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $5.08E-07 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.150 | $1.20E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.08805 | $2.00E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 1.27E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

9.15E-01

$K_{fs} = 2.54E-05 \text{ cm/sec}$
 $1.52E-03 \text{ cm/min}$
 $2.54E-07 \text{ m/s}$
 $6.00E-04 \text{ inch/min}$
 $1.00E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 6.35E-04 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.2000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| C0.01 | 0.809 | $C = 0.842059$ |
| C0.04 | 0.842 | $Q = 0.1174$ |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 1.02E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $6.14E-03 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $1.02E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.200 | $2.42E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.117 | $4.03E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 2.56E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.1000**

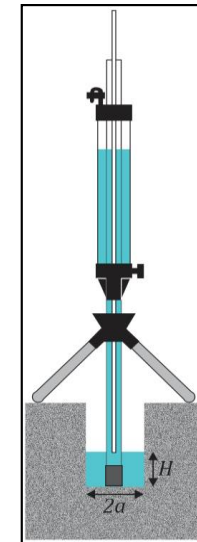
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| C0.01 | 1.21841 | $C = 1.290234$ |
| C0.04 | 1.290234 | $Q = 0.0587$ |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 3.39E-05 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $2.03E-03 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $3.39E-07 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.100 | $8.00E-04 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.0587 | $1.33E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 8.47E-04 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

2.45E+00

$K_{fs} = 6.81E-05 \text{ cm/sec}$
 $4.09E-03 \text{ cm/min}$
 $6.81E-07 \text{ m/s}$
 $1.61E-03 \text{ inch/min}$
 $2.68E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.70E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.9000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.5283$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 4.60E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $2.76E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $4.60E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.900 | $1.09E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.528 | $1.81E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 1.15E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **2.8000**

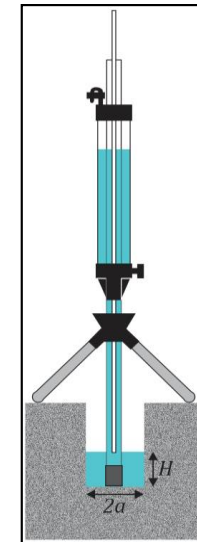
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 1.6436$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 9.49E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $5.69E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $9.49E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 2.800 | $2.24E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 1.6436 | $3.73E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 2.37E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

2.54E+01

$K_{fs} = 7.04E-04 \text{ cm/sec}$
 $4.23E-02 \text{ cm/min}$
 $7.04E-06 \text{ m/s}$
 $1.66E-02 \text{ inch/min}$
 $2.77E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.76E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.0000**

| | | |
|----------|--------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 0.00E+00 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $0.00E+00 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $0.00E+00 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.000 | $0.00E+00 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0 | $0.00E+00 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 0.00E+00 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.0000**

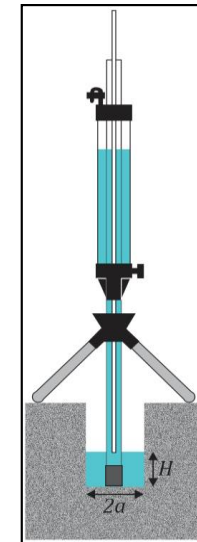
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 0$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 0.00E+00 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $0.00E+00 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $0.00E+00 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.000 | $0.00E+00 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0 | $0.00E+00 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 0.00E+00 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

0.00E+00

$K_{fs} = 0.00E+00 \text{ cm/sec}$
 $0.00E+00 \text{ cm/min}$
 $0.00E+00 \text{ m/s}$
 $0.00E+00 \text{ inch/min}$
 $0.00E+00 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 0.00E+00 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **1.4000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.8218$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 7.16E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $4.30E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $7.16E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 1.400 | $1.69E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.822 | $2.82E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 1.79E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **2.4000**

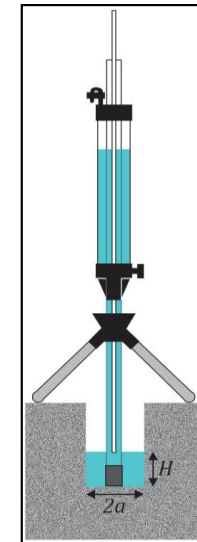
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 1.4088$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 8.13E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $4.88E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $8.13E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 2.400 | $1.92E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 1.4088 | $3.20E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 2.03E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

2.75E+01

$K_{fs} = 7.65E-04 \text{ cm/sec}$
 $4.59E-02 \text{ cm/min}$
 $7.65E-06 \text{ m/s}$
 $1.81E-02 \text{ inch/min}$
 $3.01E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.91E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.3000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.1761$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 1.53E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $9.21E-03 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $1.53E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.300 | $3.63E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.176 | $6.04E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | |
| | | $\Phi_m = 3.84E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.6000**

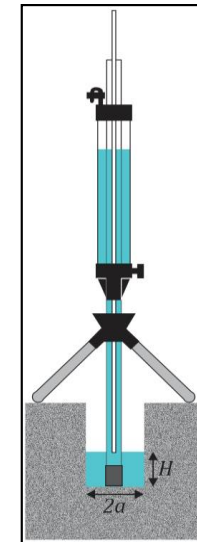
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 0.3522$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 2.03E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $1.22E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $2.03E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.600 | $4.80E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.3522 | $8.00E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | |
| | | $\Phi_m = 5.08E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

6.42E+00

$K_{fs} = 1.78E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.07E-02 \text{ cm/min}$
 $1.78E-06 \text{ m/s}$
 $4.21E-03 \text{ inch/min}$
 $7.02E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 4.46E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **1.3000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.7631$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 6.65E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $3.99E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $6.65E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 1.300 | $1.57E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.763 | $2.62E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 1.66E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **4.0000**

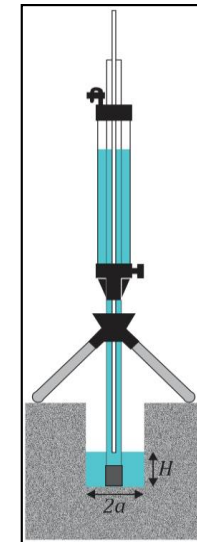
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 2.348$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 1.36E-03 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $8.13E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $1.36E-05 \text{ m/sec}$ |
| R | 4.000 | $3.20E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 2.348 | $5.34E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 3.39E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

3.64E+01

$K_{fs} = 1.01E-03 \text{ cm/sec}$
 $6.06E-02 \text{ cm/min}$
 $1.01E-05 \text{ m/s}$
 $2.39E-02 \text{ inch/min}$
 $3.98E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 2.53E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.3000**

| | | |
|----------|-------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 0.809 | |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | |
| C0.36 | 0.803 | |
| C | 0.842 | |
| R | 0.300 | |
| Q | 0.176 | |
| pi | 3.142 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 0.842059$
 $Q = 0.1761$

$K_{fs} = 1.53E-04 \text{ cm/sec}$
 $9.21E-03 \text{ cm/min}$
 $1.53E-06 \text{ m/sec}$
 $3.63E-03 \text{ inch/min}$
 $6.04E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 3.84E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.8000**

| | | |
|----------|----------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 1.21841 | |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | |
| C0.36 | 1.287543 | |
| C | 1.290234 | |
| R | 0.800 | |
| Q | 0.4696 | |
| pi | 3.1415 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 1.290234$
 $Q = 0.4696$

$K_{fs} = 2.71E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.63E-02 \text{ cm/min}$
 $2.71E-06 \text{ m/sec}$
 $6.40E-03 \text{ inch/min}$
 $1.07E-04 \text{ inch/sec}$

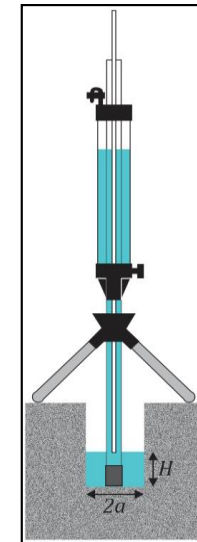
$\Phi_m = 6.78E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Average

7.64E+00

$K_{fs} = 2.12E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.27E-02 \text{ cm/min}$
 $2.12E-06 \text{ m/s}$
 $5.01E-03 \text{ inch/min}$
 $8.36E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 5.31E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.6000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.3522$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 3.07E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $1.84E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $3.07E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.600 | $7.25E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.352 | $1.21E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 7.67E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **1.0000**

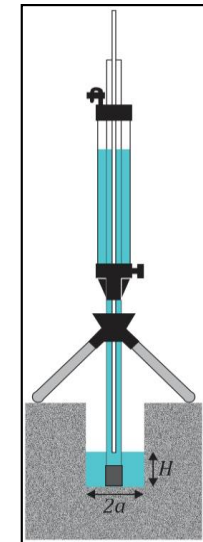
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 0.587$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 3.39E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $2.03E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $3.39E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 1.000 | $8.00E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.587 | $1.33E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 8.47E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

1.16E+01

$K_{fs} = 3.23E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.94E-02 \text{ cm/min}$
 $3.23E-06 \text{ m/s}$
 $7.63E-03 \text{ inch/min}$
 $1.27E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 8.07E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.1000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.0587$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 5.12E-05 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $3.07E-03 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $5.12E-07 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.100 | $1.21E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.059 | $2.01E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 1.28E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravelly sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.2000**

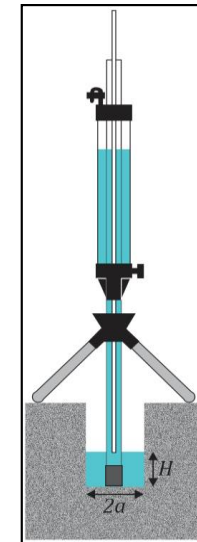
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 0.1174$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 6.78E-05 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $4.07E-03 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $6.78E-07 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.200 | $1.60E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.1174 | $2.67E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 1.69E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

2.14E+00

$K_{fs} = 5.95E-05 \text{ cm/sec}$
 $3.57E-03 \text{ cm/min}$
 $5.95E-07 \text{ m/s}$
 $1.40E-03 \text{ inch/min}$
 $2.34E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.49E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.8000**

| | |
|----------|-------|
| Res Type | 35.22 |
| H | 5 |
| a | 3 |
| H/a | 1.667 |
| a* | 0.04 |
| C0.01 | 0.809 |
| C0.04 | 0.842 |
| C0.12 | 0.803 |
| C0.36 | 0.803 |
| C | 0.842 |
| R | 0.800 |
| Q | 0.47 |
| pi | 3.142 |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 0.842059$
 $Q = 0.4696$

$K_{fs} = 4.09E-04 \text{ cm/sec}$
 $2.46E-02 \text{ cm/min}$
 $4.09E-06 \text{ m/sec}$
 $9.67E-03 \text{ inch/min}$
 $1.61E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.02E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.4000**

| | |
|----------|----------|
| Res Type | 35.22 |
| H | 10 |
| a | 3 |
| H/a | 3.333333 |
| a* | 0.04 |
| C0.01 | 1.21841 |
| C0.04 | 1.290234 |
| C0.12 | 1.287543 |
| C0.36 | 1.287543 |
| C | 1.290234 |
| R | 0.400 |
| Q | 0.2348 |
| pi | 3.1415 |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 1.290234$
 $Q = 0.2348$

$K_{fs} = 1.36E-04 \text{ cm/sec}$
 $8.13E-03 \text{ cm/min}$
 $1.36E-06 \text{ m/sec}$
 $3.20E-03 \text{ inch/min}$
 $5.34E-05 \text{ inch/sec}$

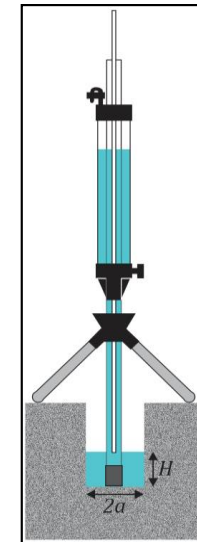
$\Phi_m = 3.39E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Average

9.81E+00

$K_{fs} = 2.72E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.63E-02 \text{ cm/min}$
 $2.72E-06 \text{ m/s}$
 $6.43E-03 \text{ inch/min}$
 $1.07E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 6.81E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.0000**

| | |
|----------|--------|
| Res Type | 35.22 |
| H | 5 |
| a | 3 |
| H/a | 1.667 |
| a* | 0.04 |
| C0.01 | 0.809 |
| C0.04 | 0.842 |
| C0.12 | 0.803 |
| C0.36 | 0.803 |
| C | 0.842 |
| R | 0.000 |
| Q | 0 |
| pi | 3.1415 |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 0.842059$
 $Q = 0$

$K_{fs} = 0.00E+00 \text{ cm/sec}$
 $0.00E+00 \text{ cm/min}$
 $0.00E+00 \text{ m/sec}$
 $0.00E+00 \text{ inch/min}$
 $0.00E+00 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 0.00E+00 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.0000**

| | |
|----------|----------|
| Res Type | 35.22 |
| H | 10 |
| a | 3 |
| H/a | 3.333333 |
| a* | 0.04 |
| C0.01 | 1.21841 |
| C0.04 | 1.290234 |
| C0.12 | 1.287543 |
| C0.36 | 1.287543 |
| C | 1.290234 |
| R | 0.000 |
| Q | 0 |
| pi | 3.1415 |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 1.290234$
 $Q = 0$

$K_{fs} = 0.00E+00 \text{ cm/sec}$
 $0.00E+00 \text{ cm/min}$
 $0.00E+00 \text{ m/sec}$
 $0.00E+00 \text{ inch/min}$
 $0.00E+00 \text{ inch/sec}$

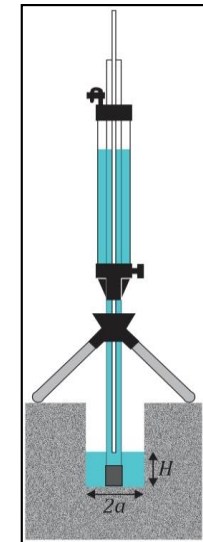
$\Phi_m = 0.00E+00 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Average

0.00E+00

$K_{fs} = 0.00E+00 \text{ cm/sec}$
 $0.00E+00 \text{ cm/min}$
 $0.00E+00 \text{ m/s}$
 $0.00E+00 \text{ inch/min}$
 $0.00E+00 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 0.00E+00 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.4000**

| | | |
|----------|-------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 0.809 | |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | |
| C0.36 | 0.803 | |
| C | 0.842 | |
| R | 0.400 | |
| Q | 0.235 | |
| pi | 3.142 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 0.842059$
 $Q = 0.2348$

$K_{fs} = 2.05E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.23E-02 \text{ cm/min}$
 $2.05E-06 \text{ m/sec}$
 $4.83E-03 \text{ inch/min}$
 $8.06E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 5.12E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravelly sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.4000**

| | | |
|----------|----------|--|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | |
| C0.01 | 1.21841 | |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | |
| C0.36 | 1.287543 | |
| C | 1.290234 | |
| R | 0.400 | |
| Q | 0.2348 | |
| pi | 3.1415 | |

$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
 $C = 1.290234$
 $Q = 0.2348$

$K_{fs} = 1.36E-04 \text{ cm/sec}$
 $8.13E-03 \text{ cm/min}$
 $1.36E-06 \text{ m/sec}$
 $3.20E-03 \text{ inch/min}$
 $5.34E-05 \text{ inch/sec}$

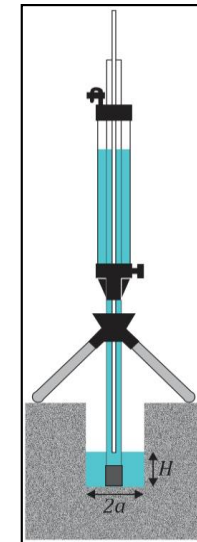
$\Phi_m = 3.39E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Average

6.12E+00

$K_{fs} = 1.70E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.02E-02 \text{ cm/min}$
 $1.70E-06 \text{ m/s}$
 $4.02E-03 \text{ inch/min}$
 $6.70E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 4.25E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.4000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.2348$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 2.05E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $1.23E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $2.05E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.400 | $4.83E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.235 | $8.06E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 5.12E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0.6000**

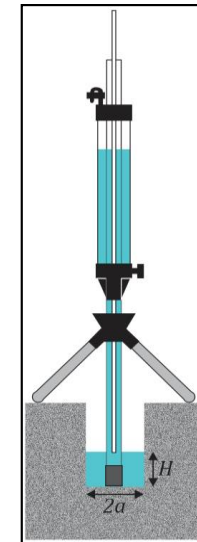
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 0.3522$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 2.03E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $1.22E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $2.03E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 0.600 | $4.80E-03 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.3522 | $8.00E-05 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 5.08E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

7.34E+00

$K_{fs} = 2.04E-04 \text{ cm/sec}$
 $1.22E-02 \text{ cm/min}$
 $2.04E-06 \text{ m/s}$
 $4.82E-03 \text{ inch/min}$
 $8.03E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 5.10E-03 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **1.4000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.8218$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 7.16E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $4.30E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $7.16E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 1.400 | $1.69E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.822 | $2.82E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 1.79E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **2.0000**

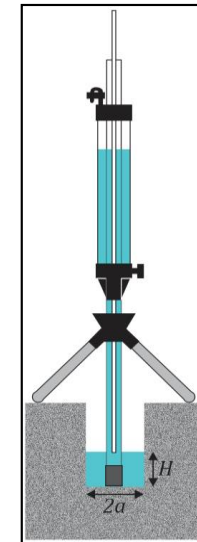
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 1.174$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 6.78E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $4.07E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $6.78E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 2.000 | $1.60E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 1.174 | $2.67E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 1.69E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

2.51E+01

$K_{fs} = 6.97E-04 \text{ cm/sec}$
 $4.18E-02 \text{ cm/min}$
 $6.97E-06 \text{ m/s}$
 $1.65E-02 \text{ inch/min}$
 $2.74E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.74E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$





Guelph Permeameter Calculations

Input

Result

Support: ali@soilmoisture.com

Head #1

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

| Categoría del Medio Poroso | |
|----------------------------|---|
| 1 | Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados |
| 2 | Suelos que tienen estructura fina y desestructurada |
| 3 | Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas |
| 4 | Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos |

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **1.1000**

| | | |
|----------|-------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 5 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 1.667 | |
| a* | 0.04 | $C = 0.842059$ |
| C0.01 | 0.809 | $Q = 0.6457$ |
| C0.04 | 0.842 | |
| C0.12 | 0.803 | $K_{fs} = 5.63E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 0.803 | $3.38E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 0.842 | $5.63E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 1.100 | $1.33E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 0.646 | $2.22E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.142 | $\Phi_m = 1.41E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Head #2

Reservoir Type (enter "1" for Combined and "2" for Inner reservoir): **1**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **3**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **2**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **2.0000**

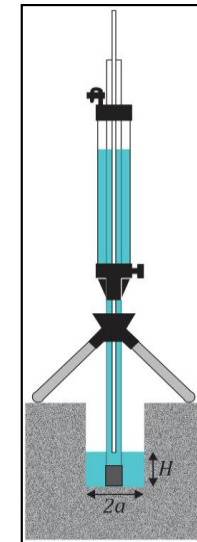
| | | |
|----------|----------|---|
| Res Type | 35.22 | |
| H | 10 | |
| a | 3 | $\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ |
| H/a | 3.333333 | |
| a* | 0.04 | $C = 1.290234$ |
| C0.01 | 1.21841 | $Q = 1.174$ |
| C0.04 | 1.290234 | |
| C0.12 | 1.287543 | $K_{fs} = 6.78E-04 \text{ cm/sec}$ |
| C0.36 | 1.287543 | $4.07E-02 \text{ cm/min}$ |
| C | 1.290234 | $6.78E-06 \text{ m/sec}$ |
| R | 2.000 | $1.60E-02 \text{ inch/min}$ |
| Q | 1.174 | $2.67E-04 \text{ inch/sec}$ |
| pi | 3.1415 | $\Phi_m = 1.69E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$ |

Average

2.23E+01

$K_{fs} = 6.20E-04 \text{ cm/sec}$
 $3.72E-02 \text{ cm/min}$
 $6.20E-06 \text{ m/s}$
 $1.46E-02 \text{ inch/min}$
 $2.44E-04 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = 1.55E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$



ANEXO 4: FOTOGRAFÍAS TOMADAS DURANTE EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN





