

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



**ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLÓGICO
CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA
SUBCUENCA DEL LAGO DE COATEPEQUE,
DEPARTAMENTO DE SANTA ANA**

PRESENTADO POR:

METZI ELIZABETH RIVERA DE MONTES

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**MAESTRA EN GESTIÓN DE RECURSOS
HIDROGEOLÓGICOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. MANUEL ROBERTO MONTEJO SANTOS

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRA EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS

Título:

**ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLOGÍCO
CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA
SUBCUENCA DEL LAGO DE COATEPEQUE,
DEPARTAMENTO DE SANTA ANA**

Presentado por:

METZI ELIZABETH RIVERA DE MONTES

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

MSc. JOSÉ MARIO GUEVARA RETANA

SAN SALVADOR, JULIO 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

MSc. JOSÉ MARIO GUEVARA RETANA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida, la guía, sabiduría, protección, bendiciones brindadas y por haberme permitido culminar el máster.

A mi esposo, Enver por ser mi mejor amigo, mi compañero de aventuras, mi apoyo incondicional, por brindarme su amor y comprensión, por estar conmigo en todo momento y darme ánimos cuando más lo necesité a lo largo del camino.

A mi papá y mamá, César y Elsy, por su amor, esfuerzo, apoyo y enseñanzas a lo largo de mi vida.

A mis hermanos, César y Beatriz por su apoyo y ánimos.

A mis abuelos y abuelas, que siempre estuvieron pendientes de mí a lo largo de toda mi vida.

A mis compañeros de maestría por todos los buenos momentos que compartimos a lo largo de esta travesía y a mis maestros por su dedicación y las enseñanzas brindadas.

A mi asesor MSc. Mario Guevara por mostrar su interés en el presente trabajo, por dedicar su tiempo para brindarme su conocimiento, consejos, las herramientas y ayuda oportuna.

A las diferentes instituciones y personas que me proporcionaron información y facilitaron el acceso a sus instalaciones para la toma de datos.

Finalmente, a la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo (AICS) y el Instituto de Geociencias y Georrecursos – Consejo Nacional de Investigación (IGG-CNR), quienes mediante el proyecto Agua Futura financiaron este estudio.

ÍNDICE

1	ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	CONTEXTO	1
1.3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.4	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.5	OBJETIVOS	2
1.5.1	General	2
1.5.2	Específicos	2
1.6	JUSTIFICACIÓN.....	2
1.7	BENEFICIOS ESPERADOS	3
1.8	DELIMITACIÓN Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.9	ANTECEDENTES.....	3
1.9.1	Estudios previos	3
1.9.2	Clima	4
1.9.3	Geomorfología	5
1.9.4	Geología histórica	6
1.9.5	Geología superficial	8
1.9.6	Suelos	9
1.9.7	Estratigrafía	10
1.9.8	Hidrología.....	11
1.9.9	Hidrogeología.....	14
1.9.10	Hidrogeoquímica e Isotopos.....	15
1.9.11	Calidad del agua del lago de Coatepeque.....	20
2	MARCO TEORICO.....	21
2.1	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	21
2.1.1	Límites.....	21
2.1.2	Hidroestratigrafía y propiedades hidrogeológicas.....	21
2.1.3	Dirección del flujo y fuentes y sumideros.....	23
2.1.4	Componentes del balance de agua subterránea	24
2.1.5	Información complementaria	25

2.2	MODELO HIDROGEOLOGICO DE LAGO	25
3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.1	ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN	27
3.2	INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA.....	27
3.3	LÍNEAS PIEZOMÉTRICAS	28
3.4	MODELO LITOLÓGICO.....	28
3.5	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS	29
3.6	BALANCE HÍDRICO DE SUELOS	29
3.6.1	Datos de entrada.....	29
3.6.2	Cálculos del Balance Hídrico de Suelos.....	32
3.6.3	Cálculo de Volumen de Agua del Lago de Coatepeque.....	33
3.7	ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	33
4	RESULTADOS	34
4.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	34
4.1.1	Geología de la cuenca	34
4.1.2	Precipitación.....	34
4.1.3	Evapotranspiración.....	35
4.1.4	Suelos	36
4.2	INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA.....	38
4.3	LÍNEAS PIEZOMÉTRICAS	41
4.4	MODELO LITOLÓGICO.....	43
4.5	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS	47
4.5.1	Profundidad del agua subterránea	47
4.5.2	Gradiente hidráulico.....	48
4.5.3	Transmisividad.....	48
4.5.4	Coficiente de almacenamiento.....	48
4.6	BALANCE HÍDRICO DE SUELOS	49
4.6.1	Datos de entrada.....	49
4.6.2	Cálculo del Balance Hídrico de Suelos	51
4.6.3	Condición del Lago de Coatepeque.....	53
4.6.4	Evaluación de Balance Hídrico de la Cuenca.....	55
4.7	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	58
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	59

5.1	CONCLUSIONES	59
5.2	RECOMENDACIONES	60
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
7	ANEXOS.....	63
	ANEXO 1. CÁLCULO DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POR EL MÉTODO DE THIESSEN MODIFICADO	63
	ANEXO 2. INVENTARIO DE POZOS Y MANANTIALES.....	65
	ANEXO 3. NIVELES PIEZOMÉTRICOS.....	67
	ANEXO 4. COLUMNAS LITOLÓGICAS, DISEÑO DE POZOS Y PUNTOS DE CONTROL 69	
	ANEXO 5. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO DE POZOS	81
	ANEXO 6. CÁLCULO DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS	83
	ANEXO 7. MEMORIA DE NIVELES DE AGUA DEL LAGO DE COATEPEQUE.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Listado de estaciones pluviométricas.....	5
Tabla 1.2. Listado de estaciones meteorológicas.....	5
Tabla 1.3. Características fisiográficas de la cuenca del Lago de Coatepeque	12
Tabla 1.4. Datos isotópicos para muestras de lago, manantiales y pozos de la cuenca de Lago Coatepeque, Zapotitán, Santa Ana y Caluco.....	17
Tabla 2.1. Clasificación de acuíferos.....	22
Tabla 2.2. Valores de transmisividad.....	23
Tabla 2.3. Coeficientes de almacenamiento según tipo de acuífero.....	23
Tabla 3.1. Valores para los coeficientes de pendiente y cobertura vegetal.....	30
Tabla 3.2. Valores para coeficiente de infiltración por textura de suelo.....	31
Tabla 3.3. Punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC) y densidad del suelo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos.....	31
Tabla 3.4. Profundidad de raíces de diferentes cultivos.....	31
Tabla 4.1. Miembros geológicos presentes en la cuenca.....	34
Tabla 4.2. Precipitación mensual por estación pluviométrica y resultado para la cuenca del Lago de Coatepeque.....	34
Tabla 4.3. Evapotranspiración mensual por estación meteorológica y resultado para la cuenca del Lago de Coatepeque.....	35
Tabla 4.4. Evaporación mensual para el Lago de Coatepeque.....	35
Tabla 4.5. Tipos de suelo presentes en la cuenca según mapa pedológico.....	36
Tabla 4.6. Tipos de suelos de la cuenca del Lago de Coatepeque y sus características.....	37
Tabla 4.7. Usos de suelo en la cuenca del Lago de Coatepeque.....	38
Tabla 4.8. Listado de pozos identificados en visitas de campo.....	38
Tabla 4.9. Listado de manantiales identificados en visitas de campo.....	39
Tabla 4.10. Transmisividades y coeficientes de almacenamiento de pozos.....	48
Tabla 4.11. Factores de pendiente (K_P) de la cuenca de estudio.....	49
Tabla 4.12. Factores de vegetación (K_V) de la cuenca de estudio.....	49
Tabla 4.13. Factor de textura de suelo (K_{FC}) por miembro geológico.....	50
Tabla 4.14. Punto de Marchitez Permanente (PMP), Capacidad de Campo (CC) y Densidad de Suelo por miembro geológico.....	50
Tabla 4.15. Profundidad de raíz (PR) para los usos de suelo de la cuenca de estudio.....	51
Tabla 4.16. Resumen de datos de entrada para balance de suelos.....	52
Tabla 4.17. Resultados del Balance Hídrico de Suelos de Schosinsky para la cuenca del Lago de Coatepeque.....	53

Tabla 4.18. Variación del nivel de agua del Lago de Coatepeque con respecto a los parámetros de la cuenca.....	54
Tabla 4.19. Balance hídrico de la cuenca en estudio.....	56
Tabla 4.20. Comparación de resultados del Balance Hídrico de la Cuenca.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Unidades morfoestructurales del área de estudio.....	6
Figura 1.2. Formación de estructura caldérica Coatepeque.	7
Figura 1.3. Mapa vulcano tectónico del área del Lago de Coatepeque.	7
Figura 1.4. Miembros de la Formación San Salvador que se encuentran en la cuenca.....	9
Figura 1.5. Tipos de suelo según Mapa Pedológico.....	10
Figura 1.6. Ubicación de la cuenca del Lago de Coatepeque.....	11
Figura 1.7. Elevaciones de la cuenca del Lago de Coatepeque.....	12
Figura 1.8. Pendientes dentro de la cuenca del Lago de Coatepeque.....	13
Figura 1.9. Curva hipsométrica de la cuenca del Lago de Coatepeque.....	13
Figura 1.10. Unidad acuífera presenta en la cuenca.....	14
Figura 1.11. Funcionamiento hidrogeológico MASub ESA-03.....	15
Figura 1.12. Ubicación de los pozos, manantiales y localidades en el lago muestreados en la cercanía del Lago de Coatepeque para análisis isotópico.....	16
Figura 1.13. Diagrama de Piper de resultados de muestreo.	18
Figura 1.14. Composición isotópica (%o de ^2H , ^{18}O) del agua subterránea y superficial en el área del Lago Coatepeque.....	19
Figura 1.15. Sitios de evaluación de la calidad del agua en el lago de Coatepeque.....	20
Figura 2.1. Lagos clasificados por régimen de flujo de agua subterránea. (a) Un lago de descarga recibe afluencia de agua subterránea. (b) Un lago de recarga, recarga el sistema de agua subterránea. (c) Un lago de flujo continuo recibe entrada de agua subterránea a través de parte del lecho del lago y recarga el sistema de agua subterránea a través del resto del lecho del lago. (d) Un lago con un régimen de flujo complejo tiene pocas condiciones de descarga (flechas en un círculo), condiciones de flujo intermedio y recarga profunda.	26
Figura 4.1. Polígonos de Thiessen e Isoyetas de precipitación con influencia en la cuenca de estudio.	35
Figura 4.2. Polígonos de Thiessen e Isolíneas de evapotranspiración con influencia en la cuenca de estudio.	36
Figura 4.3. Tipos de suelo en la cuenca del Lago de Coatepeque.....	37
Figura 4.4. Usos de suelo en la cuenca del Lago de Coatepeque.....	38
Figura 4.5. Ubicación de pozos y manantiales en el área de estudio y su entorno.....	40
Figura 4.6. Líneas piezométricas y dirección de flujo subterráneo en la cuenca en estudio.....	42

Figura 4.7. Ubicación de puntos de control en la cuenca del Lago de Coatepeque.	43
Figura 4.8. Vista 3D del modelo litológico de la cuenca del Lago de Coatepeque.....	44
Figura 4.9. Sección longitudinal de la cuenca del Lago de Coatepeque.	45
Figura 4.10. Sección transversal de la cuenca del Lago de Coatepeque.	46
Figura 4.11. Vista en 3D de modelo de acuífero.....	47
Figura 4.12. Niveles del Lago de Coatepeque.....	53
Figura 4.13. Variación del nivel de agua del lago con respecto a la precipitación, evaporación del cuerpo de agua y escorrentía de la cuenca.	55
Figura 4.14. Distribución de los sistemas de agua comunitarios en la cuenca del Lago de Coatepeque.	57
Figura 4.15. Modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero de la cuenca Lago de Coatepeque.....	58

1 ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad El Salvador presenta problemas relacionados al manejo y gestión de los recursos hídricos, debido al desconocimiento en su mayoría, de sus características y comportamiento, que permitan realizar un aprovechamiento sostenible de los mismos.

En el presente trabajo de investigación se estudiaron las características de los recursos hídricos dentro de la cuenca del Lago de Coatepeque, para elaborar un modelo hidrogeológico conceptual con toda la información anterior, que representa el balance del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque.

El presente documento está conformado por cinco capítulos: El Capítulo 1 contiene los alcances y el planteamiento del problema, el Capítulo 2 presenta el marco teórico, en el que se presenta teoría acerca del modelo hidrogeológico conceptual, el Capítulo 3 contiene la metodología de la investigación, que describe los métodos y técnicas empleados en el trabajo de investigación, el Capítulo 4 presenta el análisis de los resultados obtenidos, en el Capítulo 5 está conformado por las conclusiones y las recomendaciones del trabajo de investigación.

1.2 CONTEXTO

El Lago de Coatepeque se localiza en los municipios de Santa Ana, El Congo e Izalco de los departamentos de Santa Ana y Sonsonate y cuenta con una superficie aproximada de 24.5 Km², una elevación de 740 msnm y su cuenca tiene un área de 64.25 Km². Esta cuenca presenta la característica particular de no tener drenaje superficial.

Bajo la cuenca del Lago de Coatepeque se encuentra la Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción y una parte de la unidad se identifica como Acuífero bajo capa de cobertura, que consiste en una parte de la masa subterránea 3, la cual abastece la demanda de agua de los habitantes de la cuenca, ya sea por medio de la extracción de agua por medio de pozos perforados y excavados, manantiales y extracción directa del agua del Lago de Coatepeque.

Al ser el Lago de Coatepeque una atracción turística, la demanda de agua ha aumentado, por lo que se desarrolló un estudio en la cuenca de dicho lago, para tener un inventario de todas las fuentes de agua, determinar las características del sistema acuífero de la cuenca, y conocer el potencial hídrico de la misma.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La demanda de agua del Lago de Coatepeque ha venido aumentando con los años, debido al abastecimiento de comunidades, restaurantes y otras atracciones turísticas, sin embargo, no se conoce la capacidad que tiene el sistema acuífero para abastecer de agua a las diferentes actividades y hasta

cuanto se puede permitir la extracción en la cuenca del Lago de Coatepeque, sin que este se vea afectado.

La falta de un inventario de fuentes de agua actualizado y potencial hídrico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, limita a las instituciones encargadas de la administración del recurso hídrico, tomar decisiones en cuanto a las extracciones de recurso hídrico a aprobar sin que se dé la sobreexplotación del mismo.

1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es el modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque?
- ¿Cuáles son los diferentes tipos de acuíferos presentes en el sistema acuífero de la cuenca hidrográfica del Lago de Coatepeque?
- ¿Cuáles son las características del sistema acuífero de la cuenca en estudio?
- ¿Cuál es el potencial hídrico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 General

Elaborar el modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, que permita mejorar la gestión del recurso hídrico.

1.5.2 Específicos

- Obtener las líneas piezométricas del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, por medio del inventario de las fuentes de agua.
- Realizar modelo litológico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, utilizando la litología de pozos.
- Determinar el potencial hídrico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, a través de un balance hídrico.
- Determinar las características hidrogeológicas del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, por medio de pruebas de bombeo previamente realizadas en los pozos.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Los acuíferos suplen diferentes demandas que surgen como resultado de los usos del agua, tanto para consumo humano, abastecimiento doméstico, desarrollo turístico, desarrollo industrial, etc.

El disponer de un inventario de todas las fuentes de agua, determinar las características del sistema acuífero de la cuenca, y conocer el potencial hídrico de la misma y un modelo hidrogeológico

conceptual lo más completo posible del recurso hídrico que represente el sistema acuífero de la cuenca, así como de sus propiedades y características, es de gran importancia, dado que permite tener una concepción hidrogeológica de la zona de estudio, y también para las instituciones encargadas de su administración, para gestionar de mejor manera el recurso hídrico en la cuenca para los futuros proyectos y así evitar la sobreexplotación del recurso hídrico.

La disponibilidad del recurso hídrico subterráneo recobra relevancia, principalmente porque el agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua dulce presente en las masas continentales; misma que se encuentra almacenada en acuíferos ubicados a diferentes profundidades que, en función del desarrollo de cada zona en particular, podría llegarse a una sobreexplotación y contaminación del mismo, sino se gestiona adecuadamente.

Del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Agua Limpia y Saneamiento) se pretende contribuir a la meta 6.4, que expresa lo siguiente: aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

Con base en lo antes indicado se establece la necesidad de definir y caracterizar por medio de la determinación de un modelo hidrogeológico conceptual el sistema acuífero en la zona de estudio.

1.7 BENEFICIOS ESPERADOS

- Mapa con líneas piezométricas del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque.
- Inventario de las fuentes de agua en la cuenca del Lago de Coatepeque.
- Potencial hídrico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque.
- Características hidrogeológicas del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque.

1.8 DELIMITACIÓN Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

- La recopilación de información para la investigación en campo se hizo en un período de cuatro meses y el procesamiento de información en tres meses.
- La investigación se basó en la información de pozos existentes y a los cuales se puede tener acceso.
- Se utilizó información y registros proporcionada por las instituciones correspondientes.
- La delimitación física de la investigación fue la cuenca hidrográfica del Lago de Coatepeque.

1.9 ANTECEDENTES

1.9.1 Estudios previos

Entre los trabajos de investigación que destacan para el presente trabajo de investigación son los siguientes:

- Alemán y Guerrero, (2007). Evaluación de la Calidad del Agua en el Lago de Coatepeque, Universidad de El Salvador.

Tuvo como finalidad evaluar la calidad del agua del Lago de Coatepeque en el período de junio a agosto de 2006.

- Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2021). Evaluación de la calidad del agua del Lago de Coatepeque.

Tuvo como finalidad evaluar la incidencia de las actividades antropogénicas y naturales de las diversas zonas de la cuenca en la calidad de las aguas.

- FORGAES y SNET. (2006), Marchand, J., Investigaciones hidrogeológicas, hidrológicas e hidroquímicas en el Lago de Coatepeque.

Su propósito es dar a conocer la historia de la formación del Lago de Coatepeque, así como los fenómenos de las variaciones de sus niveles de agua.

- Gil, (2007). Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del Municipio de Nejapa, San Salvador, El Salvador. Maestría Thesis, Universidad de Costa Rica.

Se realizó una evaluación hidrogeológica, se estableció un modelo conceptual del sistema acuífero, se determinó el potencial hídrico, la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero en depósitos piroclásticos del Cuaternario, aplicando la metodología GOD, la caracterización hidrogeoquímica del agua y generar un mapa de las fuentes potenciales de contaminación.

- Guevara, (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. Maestría Thesis, Universidad de El Salvador.

Se baso en la obtención de la información para construir un modelo hidrogeológico conceptual y la construcción del modelo numérico de flujo. Para construir el primero, se recopiló y analizó la información referente a la geología, clima, hidrogeología, hidrología, geofísica e hidrogeoquímica existente. Incluyendo además la descripción litológica de pozos, niveles piezométricos y parámetros hidráulicos del acuífero. En el campo se realizaron pruebas de infiltración y medición de niveles freáticos por más de un año, así como una campaña de recolección de muestras de aguas superficiales y subterráneas.

1.9.2 Clima

La cuenca del Lago de Coatepeque presenta las siguientes zonas climáticas:

- Sabanas tropicales calientes, tierra caliente, planicies internas de 200 a 800 msnm.
- Sabanas tropicales calurosas, tierra templada, planicies altas y faldas de montaña de 800 a 1200 msnm.
- Clima tropical de las alturas, todavía tierra templada, planicies altas, valles y faldas de montañas de 1200 a 1800 msnm.

- Clima tropical de las alturas, tierra fría, picos y cumbres de 1800 a 2700 msnm.

La zona de estudio está conformada por las siguientes zonas de vida:

- Bosque húmedo subtropical (con biotemperatura y temperatura del aire, medio anuales $< 24^{\circ}$)
- Bosque muy húmedo subtropical
- Bosque muy húmedo montano bajo subtropical

Las estaciones pluviométricas que tienen influencia en la cuenca del Lago de Coatepeque son las que se muestran en la Tabla 1.1, las cuales cuentan con un registro hasta el año 2020.

Tabla 1.1. Listado de estaciones pluviométricas.

N°	ESTE	NORTE	INDICE	REFERENCIA
1	430282	306044	A18	Finca Los Andes
2	440555	308046	A19	Lago de Coatepeque
3	444871	304349	A21	Finca San José Monterrey

Fuente: MARN, 2021.

Las estaciones meteorológicas que tienen influencia en la cuenca del Lago de Coatepeque son las que se muestran en la Tabla 1.2, las cuales cuentan con un registro hasta el año 2010, sin embargo, la estación L04 se descarta debido a que la cota a la que se encuentra es muy baja con respecto a la cuenca y a que el área de influencia conforme los polígonos de Thiessen es de 0.8% de área de toda la cuenca en estudio, se considera que no tendría ningún efecto sobre el área de estudio.

Tabla 1.2. Listado de estaciones meteorológicas.

N°	ESTE	NORTE	INDICE	REFERENCIA
1	430282	306044	A18	Finca Los Andes
2	440758	317818	A37	Santa Ana UNICAES
3	456031	298612	L04	San Andrés

Fuente: MARN, 2022.

1.9.3 Geomorfología

Conforme el Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial (VMVDU-MARN, 2004), la zona de estudio se encuentra en el sistema morfoestructural denominado Cadena Volcánica Joven, en el subsistema morfoestructural Volcánico reciente activo, en las siguientes unidades morfoestructurales:

- Caldera de Coatepeque, es una depresión caldérica ocupada por el Lago de Coatepeque.
- Sistema volcánico de Apaneca-Lamatepec, es un complejo volcánico que abarca un importante sistema de aparatos volcánicos: Volcán de Santa Ana, Izalco, San Marcelino, Cerro Verde, las Cruces, los Naranjos, el Águila, Cachio, Cuyanausul, Laguna Verde, las Ninfas, la Cumbre y Apaneca.

Estas unidades morfoestructurales colindantes al norte son la Meseta de Santa Ana-Ahuachapán y Valle del Río Paz del sistema morfoestructural Gran Depresión Central con Volcanes Extintos, y al sur son San José Las Flores-Armenia e Izalco del sistema morfoestructural Cadena Volcánica Joven y con la Sierra del Bálsamo del sistema morfoestructural Cadena Costera.

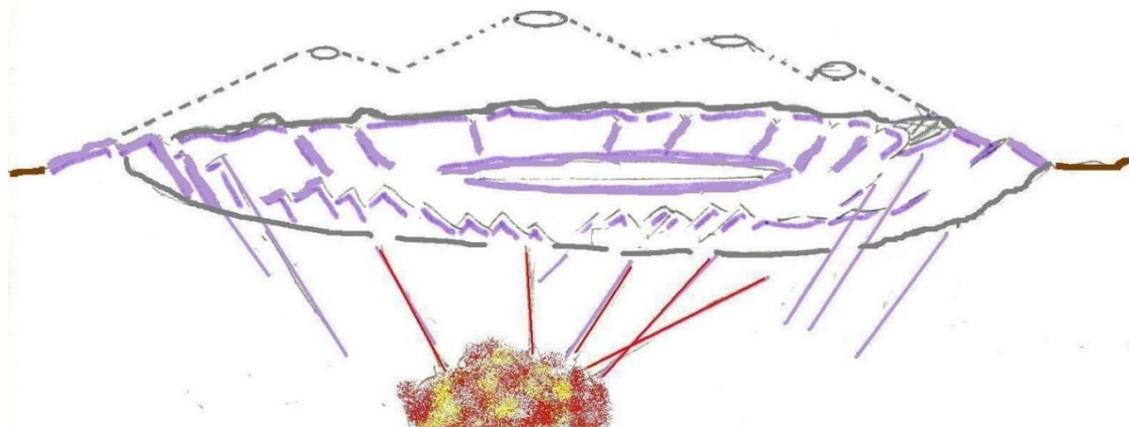


Figura 1.2. Formación de estructura caldérica Coatepeque.

Fuente: FORGAES y SNET, 2006.

En la cresta de la caldera y en su flanco sur, se formaron varios conos básicos y localmente diques, lo cual es el resultado de una erupción posterior a la erupción explosiva, y en el interior de la estructura se emplazaron varios domos riódacíticos como resultado de la última actividad magmática.

1.9.4.1 Geología estructural

La cuenca del lago de Coatepeque es una caldera volcánica fracturada, la descarga subterránea hacia las cuencas aledañas, ocurre por la diferencia de gradiente hidráulico entre el nivel del lago y el nivel del acuífero, teniendo como conductos las fallas geológicas o fracturas existentes en la caldera, tal como se observa en la Figura 1.3.

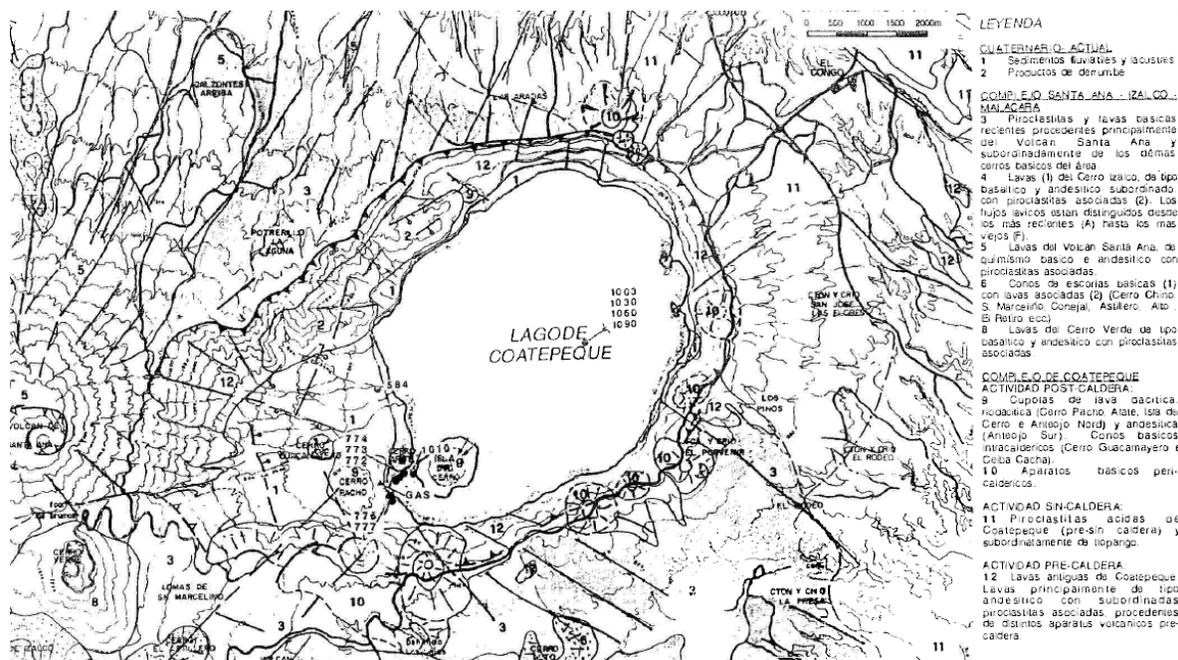


Figura 1.3. Mapa vulcano tectónico del área del Lago de Coatepeque.

Fuente: CEL, Geotérmica Italiana, 1992.

1.9.5 Geología superficial

Conforme al Mapa Geológico de El Salvador (Misión Geológica Alemana, 1978), se determina en la cuenca del Lago de Coatepeque, la formación con sus correspondientes miembros que se encuentran, los cuales se muestran en la Figura 1.4 y se describen a continuación, tomando como base el Léxico Estratigráfico (Baxter, 1984).

Formación San Salvador

La secuencia consiste en piroclastitas ácidas y efusivas ácidas-básicas intercaladas (Wiesemann, et al 1978), los miembros presentes en la zona de estudio son los siguientes:

- Miembro s1. Wiesemann (1978) lo describe como una secuencia de piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas-intermedias. En el Lago de Coatepeque coladas individuales de lava de 6 a 30 m de espesor, escoriáceos y bloques sueltos en la parte superior e inferior de la sección, densos en la parte central; son predominantemente andesitas de piroxeno oscuro y basaltos olivínicos (Cerro Mascarón) porfidíticos. Han sido observados también diques de basalto piroxénico o andesitas basálticas olivínicas de 3 a 8 m de espesor aflorando en la parte N y NO de la caldera. La procedencia de estos materiales son varios focos de erupción actualmente hundidos en la caldera.
- Miembro s2. Wiesemann (1978) lo describe como una secuencia de rocas volcánicas básica-intermedias, piroclastitas subordinadas.
- Miembro s3´a. Wiesemann (1978) lo describe como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas (tobas color café). Al norte y noreste del Lago de Coatepeque la secuencia es; la base lo compone bancos que exceden los 15 m de espesor constituidos por fragmentos de pómez y líticos de hasta 15 cm, y sobreyace una secuencia de cenizas dacíticas de un espesor superior a los 30 m. Los bancos de cascajo de pómez yacen sobre unidades Pliocénicas; en el camino a la finca El Potosí, se encuentran intercalado ambas unidades unas cenizas finas blancas y estratificadas. En parte estratificada, con algunas intercalaciones de capas de ceniza blanca fina. Las partes gruesas son principalmente pómez y en menor proporción fragmentos líticos de andesitas piroxénicas, andesitas basálticas y granodiorita o diorita cuarzica en una matriz de pómez fina y cristales acumulados producto una lluvia de pómez intensa.
- Miembro s3´b. Wiesemann (1978) lo describe como constituido por efusivas ácidas, el Cerro Pacho como una cúpula de obsidiana y riocacita, más joven que el Cerro Guacamayero, la cúpula norte de Los Antojos está cubierta por bloques de lava riocacítica y consiste en un vidrio friable y vesicular con pequeños y escasos cristales de plagioclasa, hornblenda y piroxenos. El Cerro Grande o Isla de la Cabra, es una cúpula dacítica o riocacítica cuyas lavas y vidrio fluidal devitrificado, presentan fenocristales de plagioclasa, biotita, hornblenda y piroxenos.
- Miembro s5´b. Wiesemann (1978) lo describe como una acumulación de escorias, tobas de lapilli y cinder. En el Lago de Coatepeque, definen el Cerro Guacamayero como un cono de lapilli y los fragmentos eyectados de tipo basáltico con iddingsita.

- Miembro s5´c. Wiesemann (1978) lo describe como una secuencia volcánica constituida principalmente por cenizas y tobas de lapilli.

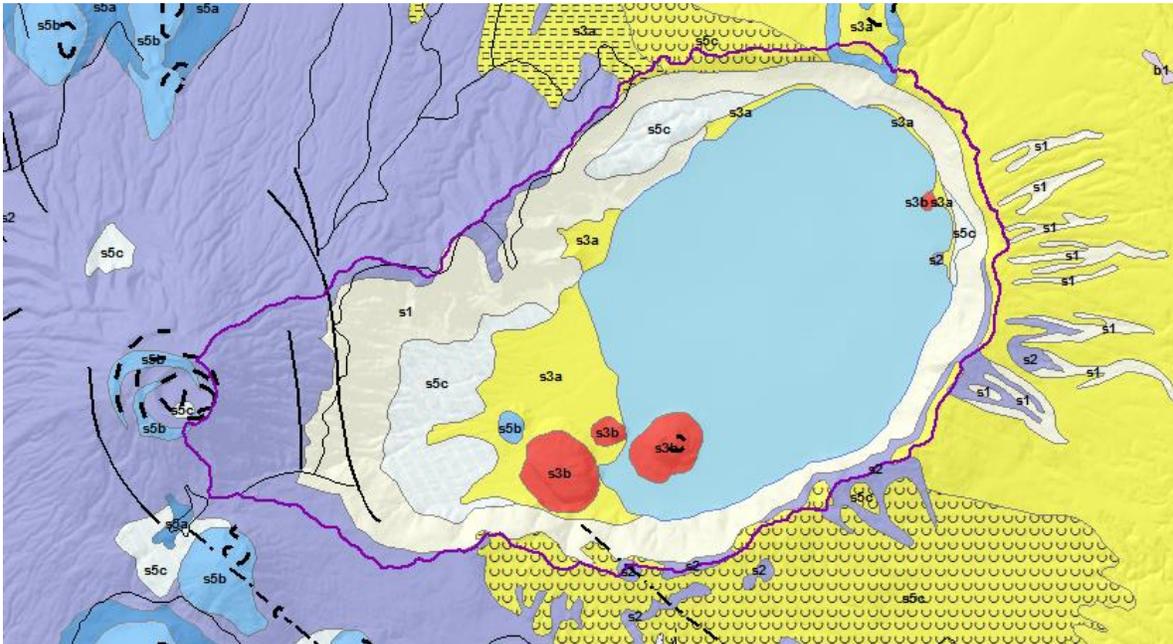


Figura 1.4. Miembros de la Formación San Salvador que se encuentran en la cuenca.

Fuente: Misión Geológica Alemana, 1978.

1.9.6 Suelos

Conforme el Mapa Pedológico de El Salvador (MAG, 1974), que se muestra en la Figura 1.5, se identifican los siguientes tipos de suelo en la cuenca de estudio:

- Andisoles, suelos originados de cenizas volcánicas, de distintas épocas y en distintas partes del país, tienen por lo general un horizonte superficial entre 20 y 40 centímetros de espesor, de color oscuro, textura franca y estructura granular. Su capacidad de producción es de alta a muy alta productividad, según la topografía son aptos para una agricultura intensiva mecanizada para toda clase de cultivos.
- Litosoles, suelos de muy poca profundidad sobre roca pura, son suelos muy complejos. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar o sea que la erosión ocurre en laminas y no en forma de cárcavas, son suelos arcillosos como los latosoles pero muy superficiales. Las texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos sobre la roca dura. El uso potencial es muy pobre de bajo rendimiento. Sin embargo, en algunos lugares muy pedregosos por la gran cantidad de piedras reduce la erosión, por lo cual pudieran generar buenos rendimientos por mata si el cultivo se hace con chuzo.
- Latosoles arcillo rojizos, suelos arcillosos de color rojizo en lomas y montañas. Son bien desarrollados con estructura en forma de bloques con un color generalmente rojo aunque algunas veces se encuentran amarillentos o cafésos. Esta coloración se debe principalmente

a la presencia de minerales de hierro de distintos tipos y grados de oxidación. La textura superficial es franco arcilloso y el subsuelo arcilloso. La profundidad promedio es de un metro, aunque en algunos sitios se observa afloración de roca debido a los procesos de erosión. La fertilidad puede ser alta en terrenos protegidos pudiendo utilizarse maquinaria agrícola cuando la pendiente es moderada. Son suelos aptos para casi todos los cultivos.

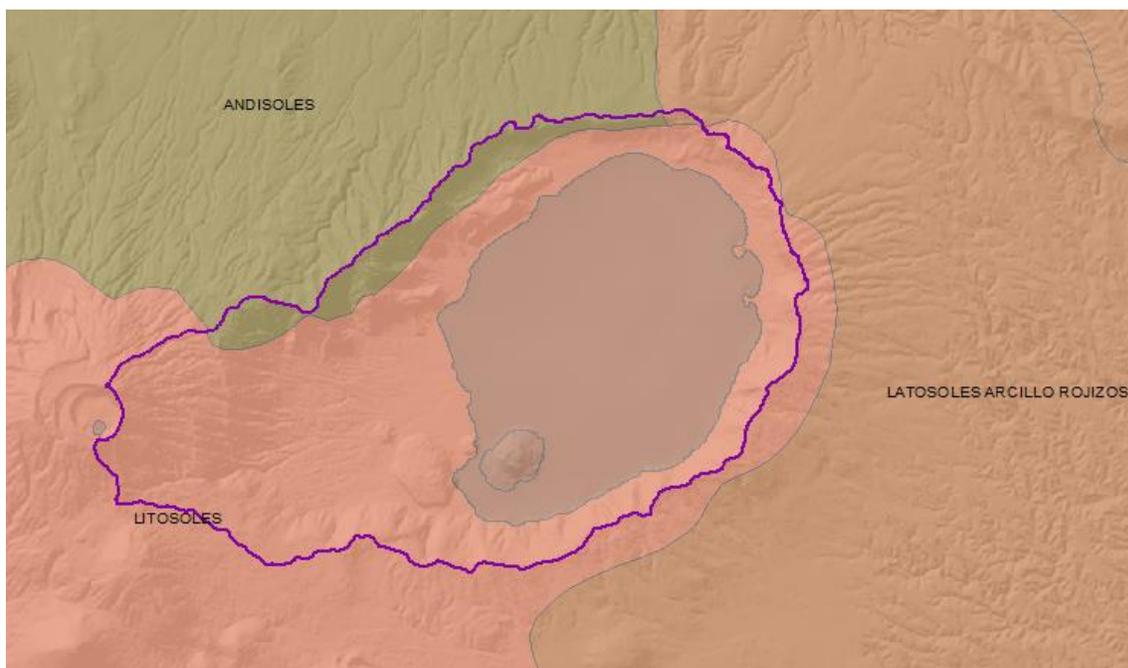


Figura 1.5. Tipos de suelo según Mapa Pedológico.
Fuente: MAG-UES, 1974.

1.9.7 Estratigrafía

Conforme el Desarrollo de los Recursos Geotérmicos del Área Centro-Occidental de El Salvador. Prefactibilidad Geotérmica del Área de Coatepeque. Reconocimiento Geotérmico, CEL, Geotérmica Italiana (1992), se determinó que la secuencia estratigráfica y las condiciones físicas del subsuelo en el interior de la caldera de Coatepeque han estado fuertemente controladas por: el colapso caldérico, la intensa tectonización, la formación de un relleno compuesto (piroclastitas sin-caldera, materiales de deslizamiento y vulcano sedimentarios) y, por la alteración hidrotermal que ha modificado sustancialmente la litología primaria y sus características físicas. Por esta razón es muy difícil obtener, a través de investigaciones de superficie como la geofísica, informaciones precisas sobre la estratigrafía profunda. Por lo que, con base en la interpretación integrada la estratigrafía del subsuelo de la caldera puede subdividirse en tres partes principales que desde la superficie son:

- Depósitos post-caldera, se trata de una secuencia de lavas, materiales de deslizamiento y sedimentos lacustres que afloran en el fondo de la caldera. Sus características de permeabilidad varían entre muy permeables hasta impermeables. Dentro de esta secuencia se tiene la hipótesis de la presencia de acuíferos termales y fríos de origen superficial y/o de infiltración. Su espesor estimado puede ser de 200 a 400 metros.

- Formaciones del relleno de la caldera, es un conjunto heterogéneo de piroclastitas y lavas intensamente tectonizadas y fracturadas, afectadas por una alteración hidrotermal muy extendida de tipo argilítico y fílitico, se estima que tienen una baja permeabilidad, por lo que podría constituir una excelente cobertura y un espesor estimado puede ser de 1,200 a 1,500 metros.
- Serie lávica pre-caldera, los productos del paleovolcán Coatepeque deberían representar el substrato profundo intensamente tectonizado y fracturado de la caldera y constituir el reservorio geotérmico principal. La presencia en las piroclastitas de la unidad de Arce de numerosos líticos de lava andesítica con una fuerte alteración hidrotermal de tipo propilítica confirmaría la existencia de un acuífero geotérmico desarrollado en épocas relativamente recientes dentro de esa secuencia. Esta serie formada por lavas, aglomerados volcánicos y, en menor proporción, escorias, presenta una cierta permeabilidad secundaria por fracturación. La profundidad mínima del techo de tales formaciones está ubicada alrededor de 1,700 metros.

1.9.8 Hidrología

Partiendo del Modelo de Elevación digital (DEM) escala 1:25,000, con tamaño de celda de 10x10, se procedió a delimitar el área de estudio, que corresponde a la cuenca del Lago de Coatepeque, como se observa en la Figura 1.6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Esta cuenca se encuentra en los municipios de Santa Ana y El Congo, del departamento de Santa Ana y el municipio de Izalco del departamento de Sonsonate.



Figura 1.6. Ubicación de la cuenca del Lago de Coatepeque.
Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

La cuenca del Lago de Coatepeque se encuentra en la región hidrográfica Lempa, la cuenca es de tipo endorreica, ya que no tiene drenaje superficial, el espejo de agua posee una superficie de 24.5 km² y la cuenca en su totalidad un aproximado de 64.25 km².

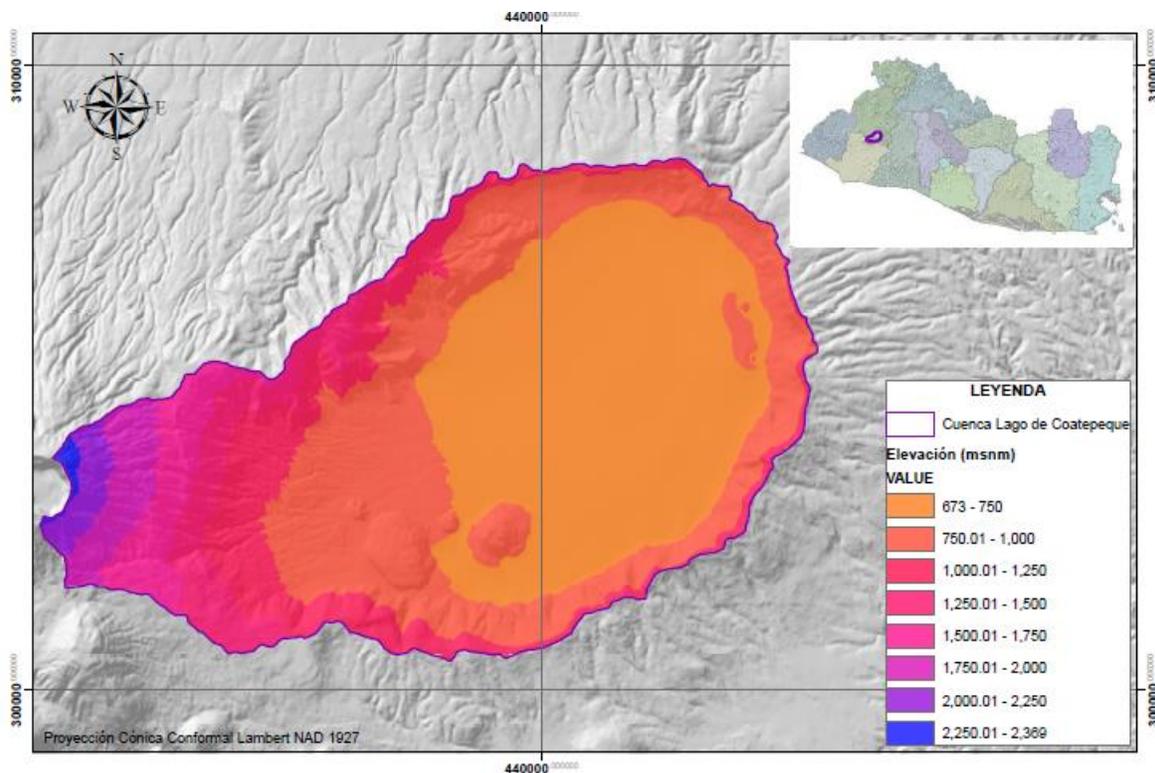
1.9.8.1 Características fisiográficas de la Cuenca

Se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG), usando los softwares ArcGIS y QGIS, para definir algunas características fisiográficas de la cuenca de estudio y del Lago de Coatepeque, los resultados se muestran en la Tabla 1.3 y las elevaciones y pendientes de la cuenca se muestran en la Figura 1.7 y en la Figura 1.8 respectivamente.

Tabla 1.3. Características fisiográficas de la cuenca del Lago de Coatepeque

PARÁMETRO	VALOR	PARÁMETRO	VALOR
Área total cuenca (Km ²)	64.25	Área del lago (Km ²)	24.50
Perímetro de la cuenca (Km)	35.87	Perímetro del lago (Km)	24.86
Factor de forma	0.54	Longitud del lago (Km)	6.84
Coefficiente de compacidad	1.26	Ancho del lago (Km)	4.95
Elevación máx de cuenca (msnm)	2,369.00	Elevación máx del lago (msnm)	743.97
Elevación mín de cuenca (msnm)	673.00	Elevación mín del lago (msnm)	624.38

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría y de MARN, 2020.

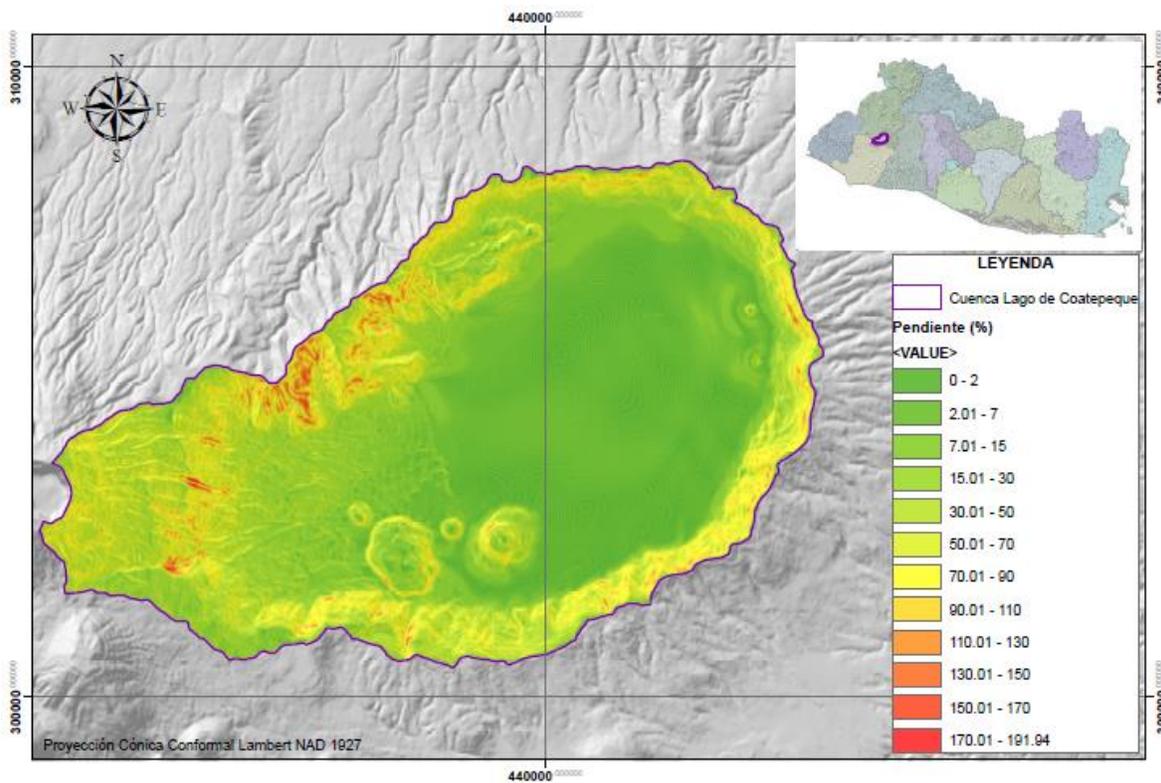


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MAestrÍA EN GESTIÓN DE
RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS
UNIDAD DE POSGRADOS

ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLÓGICO
CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA
DEL LAGO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

Metzi Elizabeth Rivera de Montes

Figura 1.7. Elevaciones de la cuenca del Lago de Coatepeque.
Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 MAESTRÍA EN GESTIÓN DE
 RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS
 UNIDAD DE POSGRADOS

ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLÓGICO
 CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA
 DEL LAGO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

Metzi Elizabeth Rivera de Montes

Figura 1.8. Pendientes dentro de la cuenca del Lago de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

La curva hipsométrica (Figura 1.9) de la cuenca del Lago de Coatepeque muestra que se encuentra en fase de vejez, es decir es una cuenca sedimentaria.

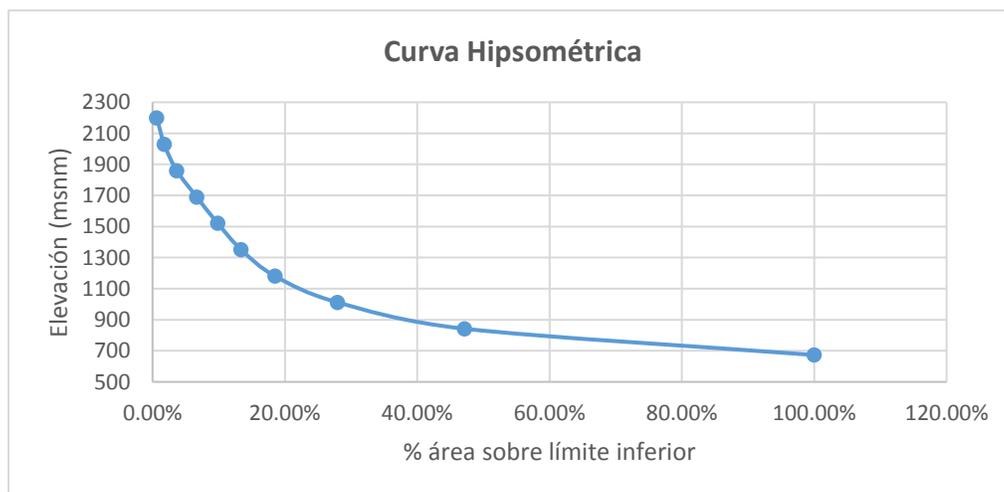


Figura 1.9. Curva hipsométrica de la cuenca del Lago de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

1.9.9 Hidrogeología

Según el Mapa Hidrogeológico de El Salvador, ANDA y COSUDE (2008), como se muestra en la Figura 1.10, la cuenca del Lago de Coatepeque se encuentra en una 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. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente). Una parte de la unidad se identifica como Acuífero bajo capa de cobertura.

Conforme al Anexo 1. Inventario de Aguas superficiales y subterráneas, del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH), MARN (2015), la cuenca del Lago de Coatepeque se ubica en la Masa de agua subterránea ESA-03, que incluye 8 acuíferos, en este caso la cuenca de estudio se ubica en la MASub ESA-03-05, que a partir de puntos de agua con información disponible se dedujo que la Transmisividad se encuentra en el rango de 69 a 3,726 m²/d y el Almacenamiento de 2.03E-03. En la Figura 1.11 se muestran líneas de dirección del flujo subterráneo en el lado sureste de la cuenca del Lago de Coatepeque que indican que existe transferencia hacia la Masa de agua subterránea ESA-06.

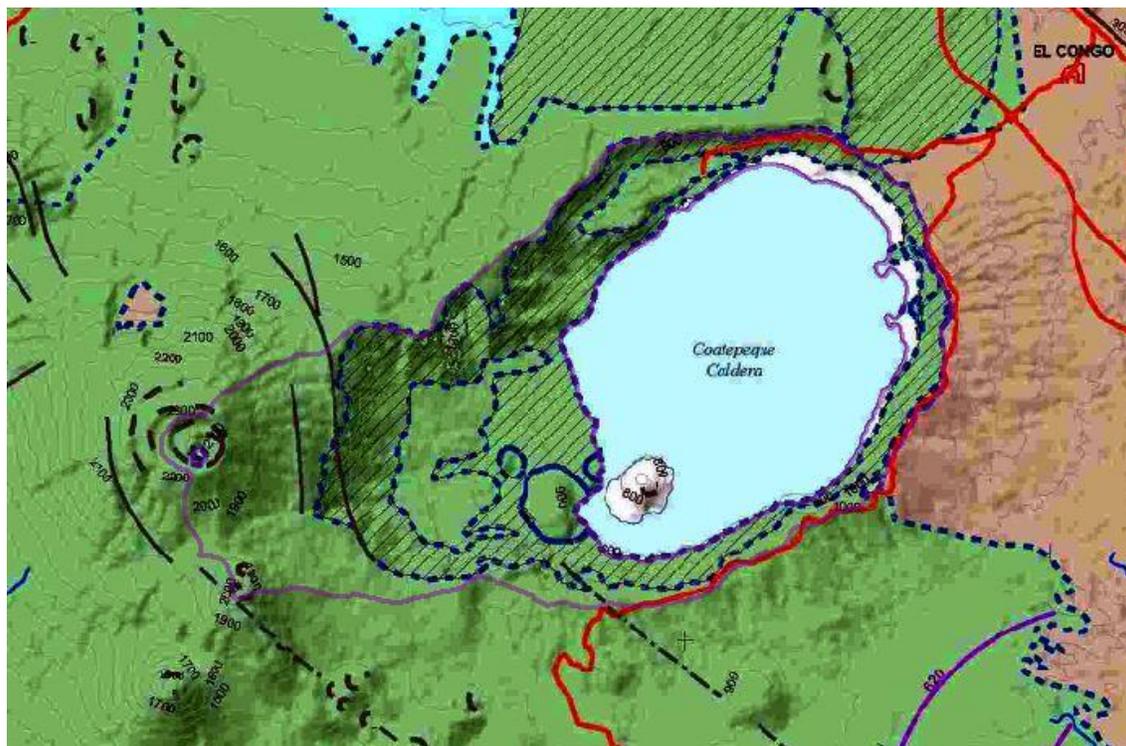


Figura 1.10. Unidad acuífera presente en la cuenca.
Fuente: ANDA, 2008.

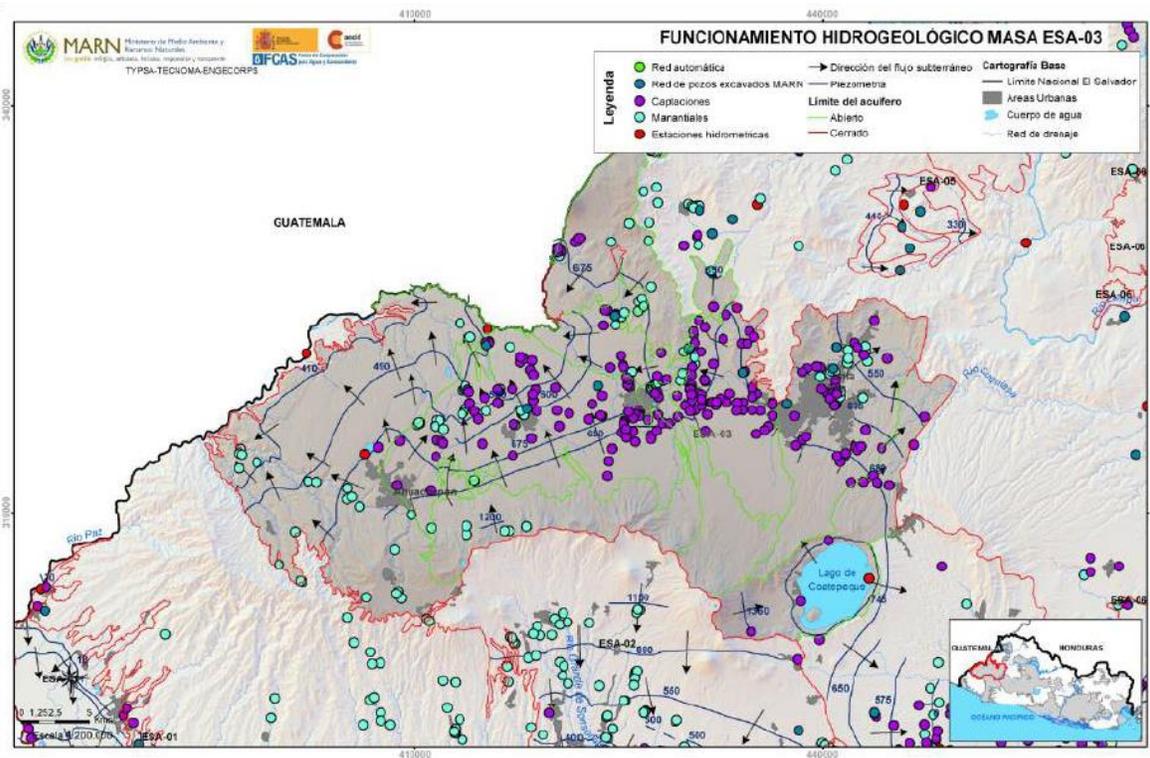


Figura 1.11. Funcionamiento hidrogeológico MASub ESA-03.

Fuente: MARN, 2015.

1.9.10 Hidrogeoquímica e Isotopos

En Estudio de la caracterización hidrogeoquímica de las tres áreas prioritarias: a) Zapotitán-Opico, b) Subcuenca Río Apanchacal (Santa Ana) y c) Subcuenca Río Grande de San Miguel (específicamente el Acuífero San Miguel), preparado para el Programa de Descontaminación de Áreas Críticas, MARN, Stimson (2005), se estableció lo siguiente:

El lago de Coatepeque está ubicado aproximadamente 15 km hacia el sur de Santa Ana y 20 km hacia el noroeste del valle de Zapotitán. La ubicación de los pozos, manantiales y localidades en el lago muestreados como parte del estudio, están ilustrados en la Figura 1.12. Se muestrearon tres ubicaciones en el lago, para tener un concepto de la variabilidad de la química en el lago. Se recolectaron muestras de dos pozos en la cuenca del lago, uno en el borde norte (Pozo 1), y otro en el borde sureste (Pozo 2). También se muestrearon varios manantiales en las cuencas de Santa Ana (Manantiales 82 y 83), Zapotitán (Manantiales 6, 7, 10, 11 y 17; Figura 1.12) y en el área de Caluco (Manantiales 101 a 104), hacia el sur del lago. Los resultados de los análisis de isotopos se muestran en la Tabla 1.4.

Una consideración clave para el estudio de Marchand (2005) era determinar si existían fugas de agua subterránea hacia otras cuencas hidrogeológicas colindantes, para explicar el descenso del agua del lago a través de las últimas décadas. Utilizando métodos hidrogeoquímicos, existe la posibilidad de encontrar la “huella digital” en la composición química del agua del lago que se mezcla con aguas subterráneas de otras cuencas, si no hay una dilución muy fuerte por otras fuentes de agua, como la

infiltración. Eso se debe a que el Lago Coatepeque tiene una composición muy única, en particular en términos de su composición de iones mayores, B y Si.

El flujo de agua subterránea puede ocurrir a través de medios porosos o fracturados, pero en gran escala, el flujo de aguas subterráneas en rocas fracturadas normalmente se puede considerar como un medio poroso, y la cuenca hidrográfica se puede considerar de las mismas dimensiones de la cuenca hidrogeológica (Freeze y Cherry, 1979; Domenico y Schwartz, 1999). El flujo de agua subterránea puede ocurrir a través de estas fracturas gruesas y también a través de una malla de fracturas numerosas, las cuales tienen menor capacidad de transmisión de flujo, pero la malla en su totalidad representa un mayor conducto de flujo que fracturas grandes. Por ende, se abordaron dos formas de investigar la posible fuga de agua subterránea del acuífero:

1. El muestreo de pozos en el borde del lago, para determinar si agua del lago está entrando en estos pozos, y
2. El muestreo de manantiales afuera de la cuenca para ver si hay indicaciones químicas de que el agua del lago está mezclando con estas fuentes.

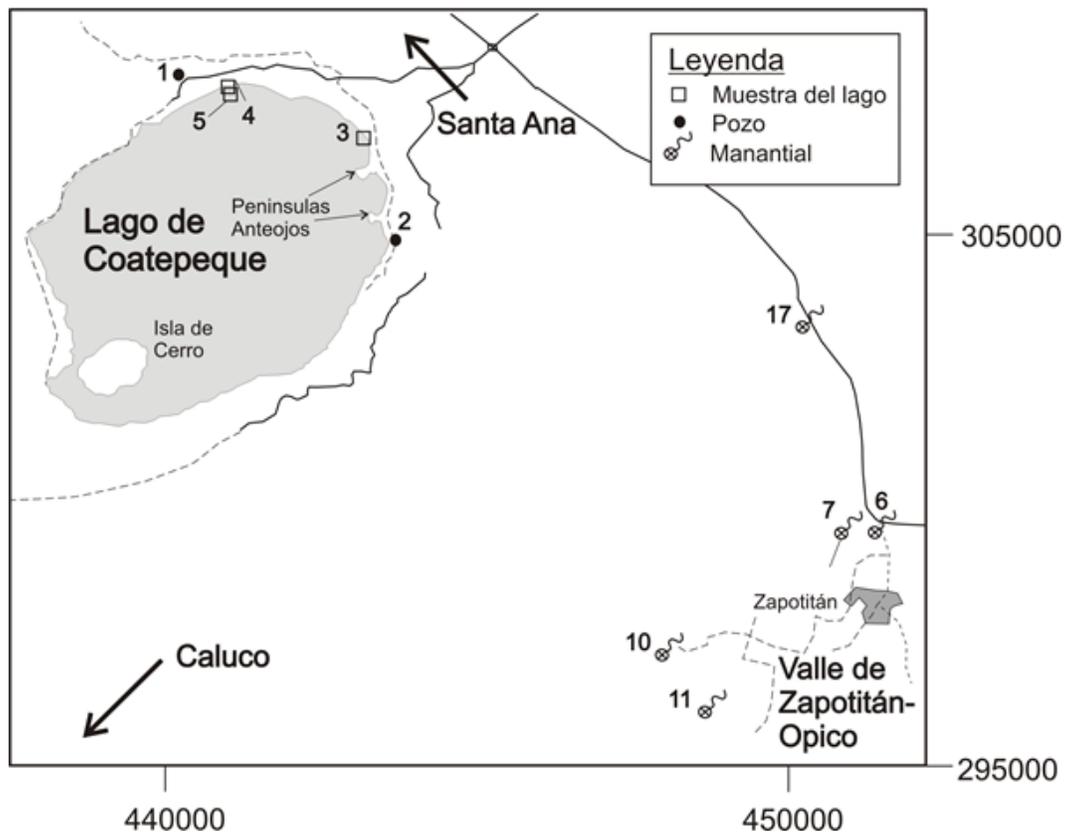


Figura 1.12. Ubicación de los pozos, manantiales y localidades en el lago muestreados en la cercanía del Lago de Coatepeque para análisis isotópico.

Fuente: MARN, Stimson, 2005.

En la Figura 1.13 se muestra el Diagrama de Piper con los resultados del muestreo hidrogeoquímico realizado, donde se observa que la diferencia entre los Pozos 1 y 2 es notable y muy consistente. El pozo 2 tiene valores de CE ($2940 \mu\text{S cm}^{-1}$) igual al Lago Coatepeque, y su pH (7,8) es elevada, como

es el del lago (8,7). La concentración relativa de iones mayores de lago (un agua sumamente magnésica-sulfatada) es de la misma composición iónica del pozo 2. Las concentraciones de Cl (277 mg L^{-1}), SO_4 (228 mg L^{-1}) y B ($2,2 \text{ mg L}^{-1}$) en el Pozo 2 es similar a las concentraciones en el lago (290 mg Cl L^{-1} , $210 \text{ mg SO}_4 \text{ L}^{-1}$, y $2,2 \text{ mg B L}^{-1}$).

Tabla 1.4. Datos isotópicos para muestras de lago, manantiales y pozos de la cuenca de Lago Coatepeque, Zapotitán, Santa Ana y Caluco.

Número de muestra	Nombre	Tipo de fuente	Localidad ^a	Profundidad m	Fecha de muestreo	¹⁸ O (‰ SMOW)	² H (‰ SMOW)
1	Cantón Perejillos	pozo profundo	C	42	29/06/2005	-4.6	-34.6
2	Guineo Escuela	pozo profundo	C	41	29/06/2005	+0.8	-3.9
3	Hotel Torremolinos	lago	C	NA	29/06/2005	+1.4	+0.4
6	Termos del Río	manantial termal	Z	NA	29/06/2005	-4.2	-34.2
7	Finca Chorrorrón	manantial	Z	NA	ND ^b	-5.6	-40.2
9	Planta Tres Ceibas	pozo profundo	Z	17	30/06/2005	-7.3	-49.9
11	Piscina de Presa	manantial	Z	NA	30/06/2005	-6.3	-41.1
17	Man. La Joya	manantial	C	NA	06/07/2005	-6.5	-43.8
19	Piedra Pacha No. 2	pozo profundo	A	176	06/07/2005	-7.2	-48.4
20	Trebol No. 5	pozo profundo	A	108	ND	-7.7	-51.6
21	Aragua No. 1	pozo profundo	A	108	06/07/2005	-6.7	-46.9
82	COEX	manantial	A	NA	14/07/2005	-7.1	-47.4
83	Apanteos	manantial	A	NA	14/07/2005	-7.4	-49.2
101	Hda Comalapa	manantial	L	NA	13/07/2005	-7.5	-51.2
102	Finca El Milagro	manantial	L	NA	ND	-7.9	-53.5
103	El Milagro Ceiba	manantial	L	NA	13/07/2005	-7.6	-50.6
105	Caluco, El zapote	manantial	L	NA	13/07/2005	-8.1	-53.7

^a Áreas: C = Coatepeque, A = Santa Ana, M = San Miguel, Z = Zapotitán, y L = Caluco

^b ND = no disponible, no aplicable

Fuente: MARN, Stimson, 2005.

La ausencia de elevadas concentraciones de sílice en el pozo 2 ($26 \text{ mg SiO}_2 \text{ L}^{-1}$) se asemejan a la poca concentración de Si en el agua del lago ($4 \text{ mg SiO}_2 \text{ L}^{-1}$). El Pozo 1 tiene una composición química más típica del agua subterránea en las áreas prioritarias (CE de $1510 \mu\text{S cm}^{-1}$, pH de 6,8, y concentraciones de Cl, SO_4 , Si y B de 100 mg Cl L^{-1} , $122 \text{ mg SO}_4 \text{ L}^{-1}$, $69 \text{ mg SiO}_2 \text{ L}^{-1}$ y $0,8 \text{ mg B L}^{-1}$). La composición de iones mayores es más cálcica y bicarbonatada.

La composición isotópica de agua es otro indicador de especial utilidad en estudios de la mezcla de aguas (Gonfiantini, 1986). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, medidas en unidades de ‰ desviación de un estándar, SMOW (Agua oceánica media estándar), normalmente son negativos para la precipitación (Freeze y Cherry, 1979). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ disminuyen, de forma paralela, con la menor temperatura de condensación de precipitación, que disminuye con mayor latitud o altitud de precipitación. Esta relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se llama la recta global de agua meteórica que tiene la ecuación aproximada de $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$. El agua subterránea que no ha sufrido evaporación o calentamiento (aguas termales), tendrá la composición isotópica de la precipitación que infiltró, que tiene una estrecha relación con la altitud de la zona de recarga. La mayoría de las aguas subterráneas de varios pozos de Santa Ana, Zapotitán y Caluco plotean cerca de la recta global con valores de $\delta^{18}\text{O}$ de -41,1 a -53,7 ‰ y valores de $\delta^2\text{H}$ de -6,3 a -8,1 ‰, donde el error de análisis es $\pm 0,2 \text{ ‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 2,0 \text{ ‰}$ para $\delta^2\text{H}$. El agua de Lago Coatepeque, sin embargo, tiene una composición muy influenciada por la evaporación de la superficie libre del agua y fuentes volcánicas, que explica su composición muy enriquecida ($\delta^{18}\text{O}$ de +1,4 ‰ y $\delta^2\text{H}$ de +0,4 ‰), por debajo de la recta meteórica.

Las muestras de los Pozos 1 y 2 se ubican cerca de una línea de mezcla entre el agua subterránea y el agua del lago (Figura 1.14). El Pozo 2 tiene una composición similar a la del lago, mientras que el Pozo 1 tiene una composición media entre los dos extremos.

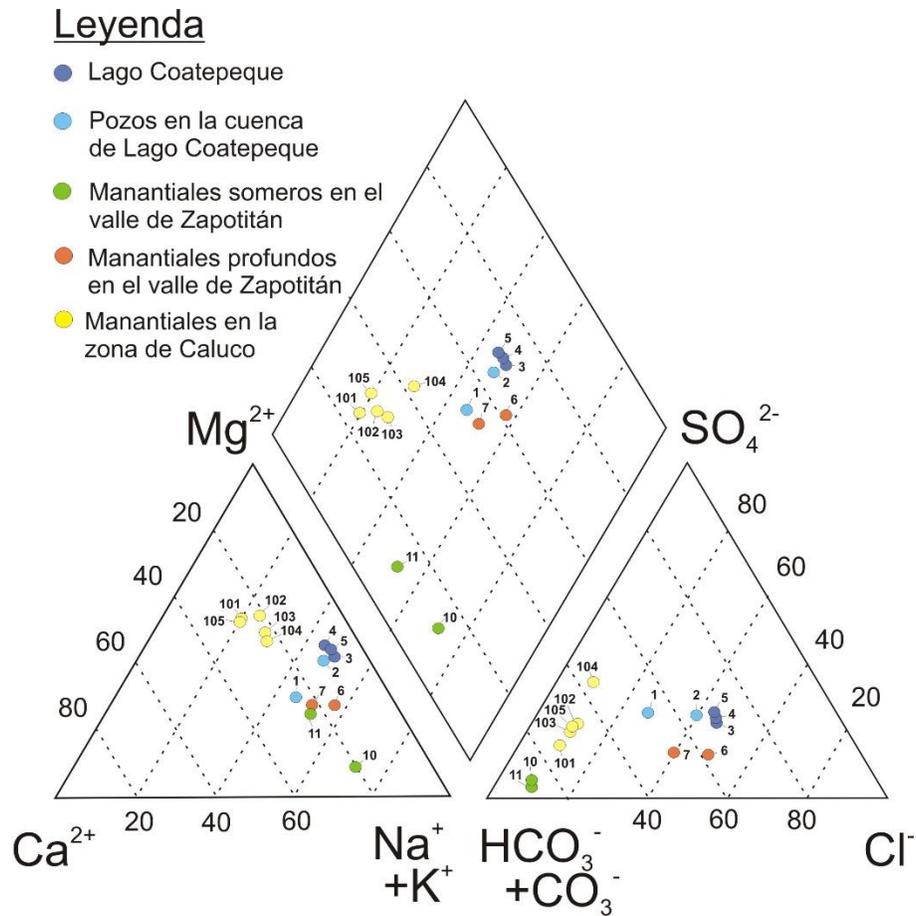


Figura 1.13. Diagrama de Piper de resultados de muestreo.

Fuente: MARN, Stimson, 2005.

Esta información indica que una mayor cantidad de agua del acuífero, donde la composición del agua es semejante a otras aguas subterráneas del país (cálcica, bicarbonatada, con bajas concentraciones de iones, y alta concentración de sílice), está entrando más en el Pozo 1 que en el Pozo 2. El agua subterránea del Pozo 2 parece tener como fuente principal la del lago. Si no existe una divisoria de aguas en el borde de cráter sureste de la cuenca del lago, es comprensible que el gradiente inclinaría del lago hacia el pozo, y casi toda el agua del pozo vendría del lago.

De los manantiales en Santa Ana, Caluco y Zapotitán muestreados, la mayoría tienen valores mínimos de CE ($< 400 \mu\text{S cm}^{-1}$) y concentraciones bajas de Cl ($< 10 \text{ mg L}^{-1}$), SO_4 ($< 15 \text{ mg L}^{-1}$) y B ($< 0,2 \text{ mg L}^{-1}$), que son similares a otras aguas subterráneas no contaminadas en las áreas prioritarias, que están referidas en el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Son aguas más cálcica-magnésicas-bicarbonatadas que se plotean en el diagrama de Piper junto con otras aguas subterráneas de Santa Ana y Zapotitán (Figura 1.13). También la composición isotópica de esas aguas es muy

empobrecida y se plotea sobre la recta mundial (Figura 1.14), indicando su origen como recarga de precipitación.

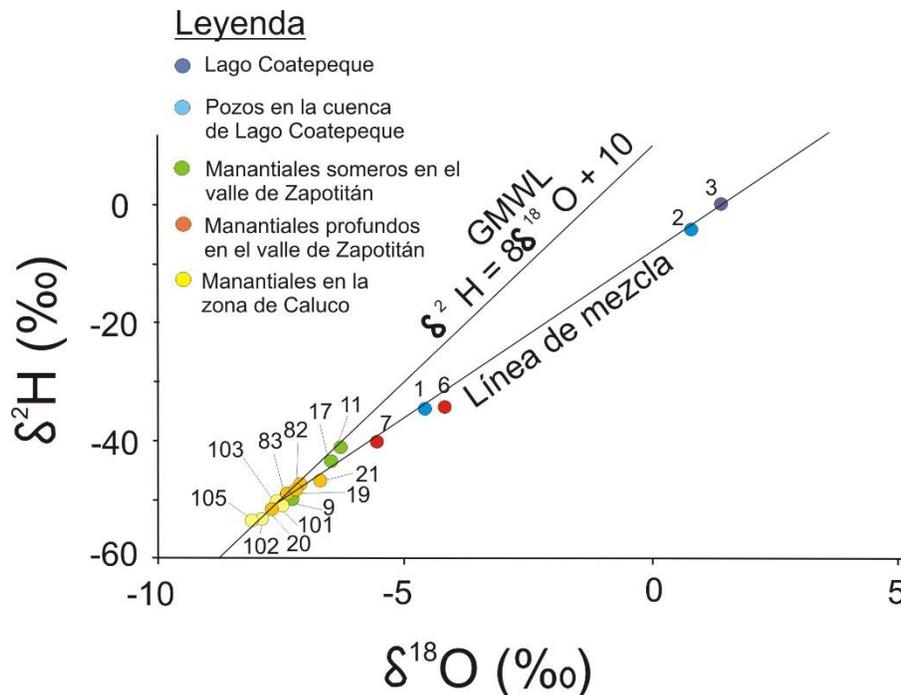


Figura 1.14. Composición isotópica (‰ de ^2H , ^{18}O) del agua subterránea y superficial en el área del Lago Coatepeque.

Fuente: MARN, Stimson, 2005.

Dos manantiales (Manantial 6 y 7) en el área de Zapotitán, justamente donde existe la mayor posibilidad de fuga por razón de la menor altura del borde sureste del cráter, demuestran una química con mayor concentración de varios indicadores del agua del lago, incluyendo CE (1600 a 2150 $\mu\text{S cm}^{-1}$), concentración de Cl (140-222 mg L^{-1}), SO_4 (64-78 mg L^{-1}) y B (1,3-2,6 mg L^{-1}). La composición de estos manantiales es más magnésica-sódicas-cloruradas, y son similares al agua del lago (Figura 1.13). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se plotean sobre una línea de mezcla entre el agua del lago y el agua subterránea típica (Figura 1.14). Basado en los valores de estos parámetros, el aporte del agua del lago al Manantial 6 (Termos del Río) es mayor que al Manantial 7 (El Chorrerrón). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ indican por ejemplo que el Manantial 6 tiene un 35% de agua del lago, mientras que el Manantial 7 tiene 20% de agua del lago.

Es evidente que el agua de los manantiales tiene otro aporte, por fracturas profundas, de agua termal, ya que tienen temperaturas elevadas (30,8 y 35,4 $^{\circ}\text{C}$). También la concentración de Si es elevada en estos dos manantiales (88 a 103 $\text{mg SiO}_2 \text{ L}^{-1}$), mientras que la concentración de Si en el lago son mínima (4 $\text{mg SiO}_2 \text{ L}^{-1}$). Eso indica que el agua de los manantiales tiene mayor tiempo de residencia y temperatura para llegar a disolver cantidades de sílice en solución.

1.9.11 Calidad del agua del lago de Coatepeque

Conforme la Evaluación de la calidad del agua del Lago de Coatepeque, donde se realizó campaña de muestreo de 5 puntos (Figura 1.15) en fecha 10 de marzo de 2021 por el Área de Calidad de Agua de la Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, algunos de los resultados son los siguientes:

- El Índice de Calidad de Agua CCME-WQI, clasifica el agua del lago de Coatepeque, como de calidad “Regular”, lo que indica limitación en el desarrollo de vida acuática.
- El estado de eutrofización valorado a través del Índice de eutrofización (IE), clasifica al lago de Coatepeque como Oligotrófico, indicando que la presencia de nutrientes en el lago al momento de muestreo es baja.
- El estado trófico evaluado a través del Índice del Estado Trófico (IET), clasifica como Hipertrófico las aguas del lago de Coatepeque debido a los niveles de producción vegetal excesiva.

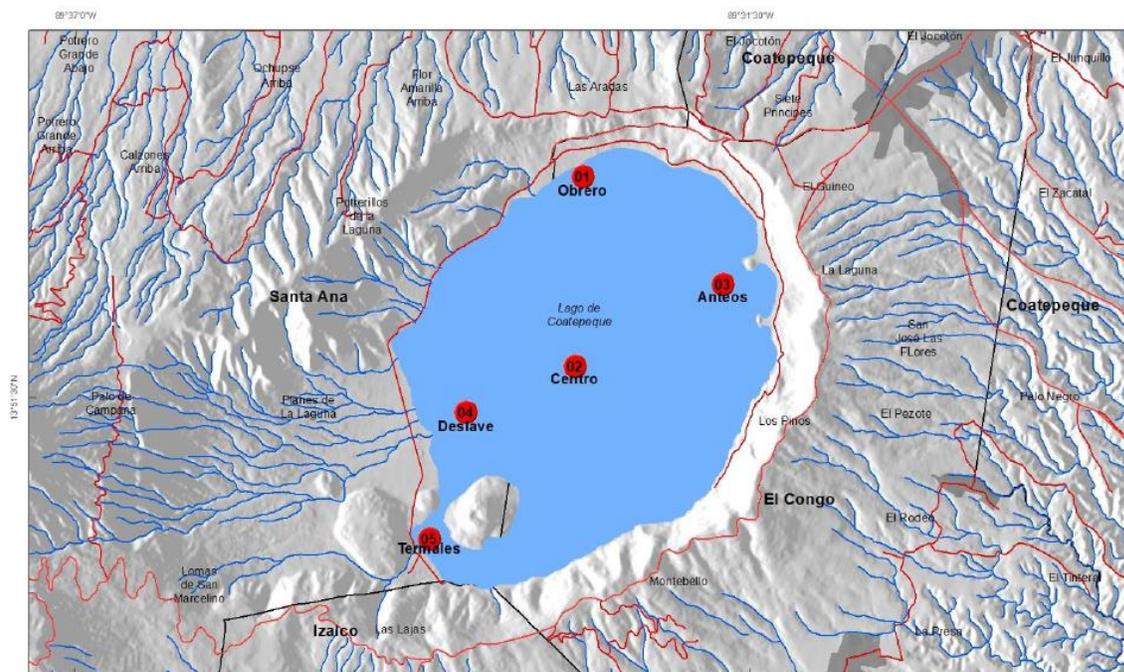


Figura 1.15. Sitios de evaluación de la calidad del agua en el lago de Coatepeque.

Fuente: MARN, 2021.

2 MARCO TEORICO

2.1 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

Custodio y Llamas (2001) definen un modelo de un acuífero como el procedimiento, ya sea analítico, matemático o analógico, que permita realizar la simulación de su comportamiento. Un modelo es más representativo del sistema real cuando es capaz de reproducir más fielmente su comportamiento, es decir, reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que los relacionan.

Conforme Anderson & Woessener (2015) un modelo es una representación simplificada del complejo mundo natural. Un modelo conceptual de un sistema de agua subterránea simplifica y resume lo que se sabe sobre la hidrogeología en forma de texto, diagramas de flujo, secciones transversales, diagramas de bloques y tablas, es una expresión del estado pasado y actual del sistema basado en información de campo del sitio y conocimiento disponible de sitios similares.

Se define un modelo conceptual como una representación cualitativa de un sistema de agua subterránea que se ajusta a los principios hidrogeológicos y se basa en criterios geológicos, geofísicos, información hidrológica, hidrogeoquímica y otra información auxiliar.

Un modelo conceptual diseñado para la mayoría de los modelos de flujo de agua subterránea, como mínimo, incluye información sobre límites; hidroestratigrafía y propiedades hidrogeológicas; direcciones de flujo y fuentes y sumideros; y una estimación basada en campo de los componentes del balance de agua subterránea. Además, cualquier información que ayude a definir y restringir la conceptualización, como la información sobre la química del agua, se utiliza cuando está disponible.

2.1.1 Límites

Las condiciones hidrológicas a lo largo de los límites del modelo conceptual determinan las condiciones de contorno matemáticas del modelo numérico.

Los límites incluyen características hidráulicas tales como divisorias de aguas subterráneas y características tales como masas de agua superficial y rocas relativamente impermeables.

2.1.2 Hidroestratigrafía y propiedades hidrogeológicas

El material geológico en el interior del modelo conceptual debe ser descrito de manera comprensiva y práctica. Tradicionalmente, un sistema de aguas subterráneas se caracteriza como un acuífero o una secuencia de acuíferos y lechos de confinamiento. Un acuífero es una unidad geológica, o una serie de unidades geológicas conectadas hidráulicamente, que almacena y transmite importantes cantidades de agua subterránea.

Un lecho de confinamiento es una unidad geológica, o una serie de unidades geológicas conectadas, de permeabilidad relativamente baja que puede almacenar pero no transmitir cantidades significativas de agua.

Los geólogos dividen las rocas en tres categorías generales según su génesis: sedimentarias, ígneas y metamórficas. Las rocas ígneas se subdividen en rocas intrusivas formadas debajo de la superficie terrestre y rocas extrusivas formadas en la superficie terrestre. En el campo, los geólogos agrupan las rocas en formaciones según las características físicas (litología), incluida la mineralogía y la extensión lateral. Los hidrogeólogos refinan tales agrupaciones en unidades hidroestratigráficas basadas en la naturaleza y conectividad de las aberturas (espacio vacío) en la roca, que determinan las propiedades de transmisión y almacenamiento. El espacio vacío se caracteriza por la porosidad y la permeabilidad.

Un modelo litológico consiste en una representación bidimensional o tridimensional de unidades litológicas que conforman un sistema acuífero.

Conforme Custodio y Llamas (2001) las características permiten definir, predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a determinadas acciones exteriores. Estas características son las siguientes:

2.1.2.1 Porosidad

La porosidad de un material es la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total.

En la porosidad influyen varios factores, entre los que distinguiremos los siguiente:

- a) Forma de los granos que determina la forma y dimensiones de los poros.
- b) Disposición de los granos.
- c) Tamaño del grano.

La porosidad primaria se refiere al espacio vacío presente cuando se formó la roca; la porosidad secundaria se refiere a las aberturas (por ejemplo, fracturas, canales de solución) creadas después de que se formó la roca. La porosidad efectiva, es una medida del espacio vacío interconectado, es importante en el seguimiento de partículas.

2.1.2.2 Permeabilidad o conductividad hidráulica

Se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada.

Los factores que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos son los propios del acuífero y dependen del tamaño de los poros. Los extrínsecos son los que dependen del fluido y son fundamentalmente su viscosidad y su peso específico.

Con base al valor de Conductividad Hidráulica es posible clasificar a los acuíferos. A continuación, se muestra la Tabla 2.1. de Clasificación.

Tabla 2.1. Clasificación de acuíferos.

K (m/día)	10 ⁴	10 ³	10 ²	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
TIPO DE TERRENO	Grava Limpia	Arena limpia, mezcla de grava y arena.			Arena fina, arena arcillosa, mezcla de arena, limo y arcilla, arcilla estratificada			Arcillas meteorizadas		no	
CALIFICACIÓN	Buenos acuíferos				Acuíferos pobres			Impermeables			

CAPACIDAD DE DRENAJE	Drenan bien	Drenan mal	No drenan
-----------------------------	-------------	------------	-----------

Fuente: Custodio y Llamas, 2001.

2.1.2.3 Transmisividad

Se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada.

Tabla 2.2. Valores de transmisividad.

T (m²/día)	CALIFICACIÓN ESTIMADA	POSIBILIDADES DEL ACUÍFERO
T<10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10<T<100	Baja	Pozos entre de 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100<T<500	Media a alta	Pozos entre de 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500<T<1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T>1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

Fuente: IGME, 1984.

2.1.2.4 Coeficiente de almacenamiento

Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica.

En los acuíferos libres es igual a la porosidad eficaz, es decir, al volumen de agua gravífica extraído de una unidad de acuífero saturado. En los acuíferos confinados influyen los efectos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua. El coeficiente de almacenamiento presenta los siguientes valores típicos:

Tabla 2.3. Coeficientes de almacenamiento según tipo de acuífero

ACUÍFERO	S	DESCRIPCIÓN
Acuífero libre	$3 \cdot 10^{-1}$ a 10^{-2}	El agua proviene del vaciado de los poros
Acuífero semiconfinado	10^{-3} a 10^{-4}	El agua proviene de descompresión y de los rezumes desde las capas confinantes
Acuífero confinado	10^{-4} a 10^{-5}	El agua proviene de descompresión

Fuente: Sánchez San Román, USAL, 2017.

2.1.3 Dirección del flujo y fuentes y sumideros

El flujo de agua subterránea dentro del dominio del problema del modelo conceptual se representa mediante líneas o flechas de flujo de agua subterránea esquemáticas en mapas potenciométricos o secciones transversales hidrogeológicas. Las direcciones generales de flujo se determinan a partir de mapas de contorno del nivel freático y la superficie potenciométrica, si está disponible, o de información sobre niveles de agua, límites y ubicaciones de áreas de recarga y descarga.

Se deben ubicar y describir las fuentes y sumideros importantes de agua dentro del dominio del problema. La adición de agua comúnmente incluye precipitación que se infiltra en la superficie de la tierra que cruza el nivel freático para convertirse en recarga de agua subterránea. En algunos contextos

hidrogeológicos, el sistema de aguas subterráneas puede recargarse con la escorrentía de las laderas o los frentes de las montañas, la filtración de los sumideros y los cuerpos de agua superficiales, incluidos los lagos y los ríos, así como embalses, canales y estanques de detención.

Los sumideros de agua incluyen cualquier característica que elimine el agua subterránea del sistema, como la descarga difusa a los humedales, los cuerpos de agua superficiales y los océanos, descarga a los tubos de drenaje y túneles, y punto de descarga a pozos de bombeo y manantiales.

Cuando el nivel freático está cerca de la superficie terrestre, la pérdida de agua también puede ocurrir por evapotranspiración, que incluye la evaporación directamente desde la zona saturada y la transpiración de las plantas cuyas raíces penetran el nivel freático. También se deben describir las fuentes y sumideros de agua de los bordes exteriores del dominio del problema (límites perimetrales).

Un mapa de isopiezas refleja la forma de la superficie freática o piezométrica, según se trate de un acuífero libre o confinado por medio de líneas piezométricas. La superficie freática es una superficie real, que constituye el límite superior de la parte saturada del acuífero libre, mientras que, en el acuífero confinado o semiconfinado, la superficie piezométrica es una superficie virtual, definida por la altura a la que llegaría la columna de agua si existiera un piezómetro en cada punto.

2.1.4 Componentes del balance de agua subterránea

El balance hídrico es la herramienta para la determinación del potencial hídrico del acuífero. Dicho balance es la cuantificación tanto de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios, en un área determinada, cuenca, y la interrelación entre ellos, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área.

Se basa en la ecuación de continuidad:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación de Almacenamiento}$$

El Balance hídrico considera las siguientes entradas: Precipitación, Retornos de la demanda e Importaciones superficiales de otra cuenca; las salidas consideradas son las siguientes: Evapotranspiración real, Evaporación de cuerpos de agua, Evaporación en áreas urbanas, Esguimiento superficial y Demanda interna y externa en la cuenca; y como variación de almacenamiento: Recarga de acuíferos y Variación de nivel en cuerpos de agua (lagos, lagunas, embalses).

Para un balance de agua subterránea, el flujo de entrada incluye la recarga de la precipitación u otras fuentes de recarga, la filtración de los cuerpos de agua superficiales, el flujo hacia el sistema de agua subterránea desde el lecho rocoso o las unidades hidrogeológicas fuera de los límites del modelo, la recarga del riego, la inyección de agua a través de pozos, y cualquier otra adición de agua al sistema. La salida incluye la descarga de agua subterránea a cuerpos de agua superficiales, la evapotranspiración, el bombeo, el flujo de manantial, la descarga a través de las paredes de filtración a lo largo de las laderas y cualquier otra pérdida de agua del sistema.

2.1.5 Información complementaria

Aunque el modelo conceptual se basa principalmente en datos geológicos e hidrológicos, otros tipos de datos, como la química del agua, la geofísica, los suelos, la vegetación y los hábitats ecológicos, también pueden ser útiles para desarrollar el modelo conceptual.

Los datos de la química del agua pueden ayudar a identificar el agua subterránea de composición geoquímica similar y el agua que ingresa al acuífero desde un sistema de flujo diferente.

La geofísica también puede ubicar una interfaz de agua dulce y agua salada, que podría usarse como límite para un modelo conceptual de flujo de agua subterránea. Ciertos tipos de vegetación y hábitats ecológicos están asociados con áreas de descarga de aguas subterráneas en arroyos y lagos y suelos hídricos a menudo son indicativos de un nivel freático históricamente cerca de la superficie terrestre.

2.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LAGO

Conforme Anderson & Woessener (2015) los lagos pueden clasificarse en términos generales como lagos de drenaje, que tienen entradas significativas de agua superficial y/o tienen una corriente de salida, y lagos de filtración, que no tienen corrientes de entrada o salida significativas. Los lagos también se pueden clasificar según el régimen de aguas subterráneas como recarga, descarga y flujo continuo (Figura 2.1). Un lago de recarga, agrega agua al sistema de aguas subterráneas por medio de una descarga.

El lago actúa como un sumidero, y un lago de flujo intercambia agua con el sistema de aguas subterráneas como entrada y salida. Sin embargo, el intercambio de agua entre el sistema de aguas subterráneas y un lago suele ser más complejo en espacio y tiempo que las tres categorías básicas.

En términos generales, los lagos se pueden simular en un modelo de agua subterránea especificando el nivel del lago (llamado modelo de nivel de lago fijo) o permitiendo que el modelo calcule el nivel del lago (llamado modelo de nivel de lago fluctuante). Un nivel de lago fijo se puede representar con cabezas especificadas ajustadas a la elevación de la superficie del lago o, más comúnmente, usando el mismo tipo de condiciones de contorno dependientes de la cabeza que se usan para los arroyos.

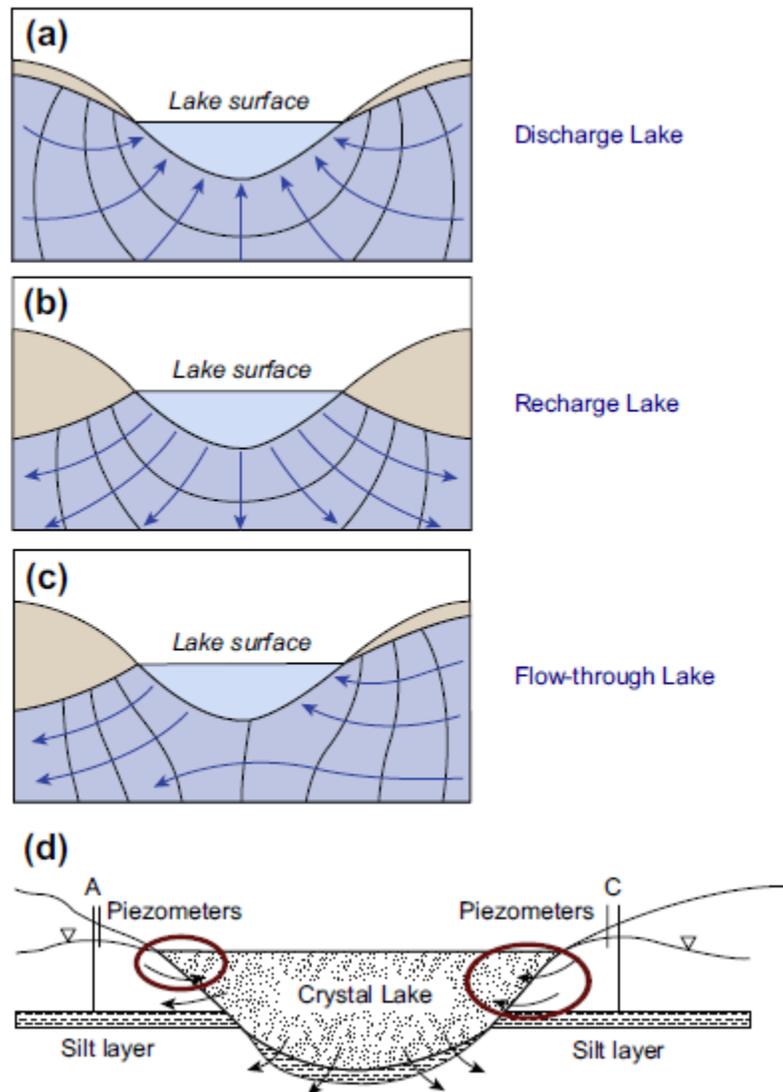


Figura 2.1. Lagos clasificados por régimen de flujo de agua subterránea. (a) Un lago de descarga recibe afluencia de agua subterránea. (b) Un lago de recarga, recarga el sistema de agua subterránea. (c) Un lago de flujo continuo recibe entrada de agua subterránea a través de parte del lecho del lago y recarga el sistema de agua subterránea a través del resto del lecho del lago. (d) Un lago con un régimen de flujo complejo tiene pocas condiciones de descarga (flechas en un círculo), condiciones de flujo intermedio y recarga profunda.

Fuente: Anderson & Woessener, 2015.

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN

La información necesaria para la realización de esta investigación se obtuvo a partir de trabajos previos realizados en la zona de estudio, información de pozos existentes que contengan registros litológicos propiedad de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), información por parte de empresas privadas o personas naturales e información existente propiedad del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

A continuación, se explica cómo se obtuvieron los datos para cada una de las áreas de estudio:

- Geología

Los datos geológicos se obtuvieron del mapa geológico, léxico estratigráfico, trabajos de investigación y columnas litológicas de pozos perforados en el área de estudio.

- Hidrogeología

Los datos hidrogeológicos se adquirieron por medio de información de ubicación geográfica de fuentes de agua (pozos y manantiales), informes de pruebas de bombeo previamente realizadas y Mapa de las unidades hidrogeológicas de El Salvador a escala 1:100,000, que se obtendrán de ANDA.

- Climatología

Los datos climáticos que se utilizaron consisten en datos de precipitaciones, humedad relativa y temperatura de las estaciones con influencia en la zona de estudio, que se obtendrán del MARN.

- Topografía

Modelo de Elevación Digital de El Salvador y Batimetría del Lago de Coatepeque.

3.2 INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA

Consiste en la identificación en campo de pozos (perforados y excavados) y manantiales, medición de niveles piezométricos en pozos y aforo de manantiales.

Para el aforo de manantiales se han considerado dos métodos:

- Método 1: Caudal=Volumen/Tiempo ($Q=V/T$).

Este método es más utilizado en afloramientos de salida horizontal, en los cuales el agua sale a través de un chorro o se puede encauzar para formar un chorro.

El equipo requerido para llevar a cabo este método es: recipiente de capacidad conocida, con abertura tal que pueda captar el agua de un chorro sin pérdidas significativas y un cronómetro.

Se debe encauzar el agua a manera de crear un chorro, con el cual se pueda llenar el recipiente.

Al tener los implementos listos se procede a llenar el recipiente con el agua que vierte el chorro y se toma el tiempo en que tarda en llenarse el recipiente. La capacidad del recipiente se anota en la unidad de medida que posee (galones, litros, barriles, etc), el tiempo que tardó en llenarse el recipiente en unidades de minutos y segundos y se procede al cálculo del caudal utilizando la expresión $Q=V/T$ (lt/s); se repite el procedimiento 3 o más veces y luego los valores de caudal obtenido se promedian.

- Método 2: Caudal=Velocidad*Área ($Q=vA$).

Este método es aplicable en manantiales en los que el agua corre a través de un canal, en el que se puede determinar y medir una sección perpendicular al flujo.

Equipo necesario: cinta métrica (de varios metros de ser posible), flotador (cualquier objeto liviano que tenga la capacidad de flotar) y cronómetro.

Primero se debe seleccionar un lugar en el canal, por el que fluye el agua, en el que se pueda medir una sección perpendicular al flujo; se toman todas las medidas necesarias para obtener el área. El esquema de la sección se dibuja, se debe anotar el área en metros cuadrados. Luego se selecciona el lugar del cual se soltará el flotador (aguas arriba de la sección medida) y se mide la distancia (X) entre el punto seleccionado y el lugar de la sección, anotando este valor en metros.

Se suelta el flotador desde la distancia X y se toma el tiempo (tal como lo proporcione el cronómetro), que tarda en cruzar la sección medida, se anota el tiempo y posteriormente se convierte a segundos. Con los datos obtenidos a partir de la fórmula $Q=X*A/T$ se obtiene el caudal en m^3/s . Se repite el procedimiento 4 veces y se obtiene el promedio.

3.3 LÍNEAS PIEZOMÉTRICAS

Para obtener las líneas piezométricas del sistema acuífero, se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG), usando el software ArcGIS, mediante funciones de interpolación para interpolar los niveles piezométricos de los pozos, elevación de manantiales y elevación del nivel de agua del Lago de Coatepeque.

3.4 MODELO LITOLÓGICO

Por medio de la correlación de la geología en superficie, observaciones realizadas en campo y las columnas litológicas de los pozos perforados y puntos de control, con el software RockWorks se elaboró el modelo litológico de la zona de estudio, esto con el fin de determinar si una unidad litológica tiene continuidad espacial, ya sea en profundidad o en extensión, para ello se elaboraron perfiles de diferentes zonas de la cuenca.

Los puntos de control se crearon con base en la geología superficial del mapa geológico del país y el orden de la estratigrafía de los miembros geológicos, correlacionados con las columnas litológicas de pozos perforados disponibles, se estimaron los espesores de cada miembro geológico. La cantidad de puntos de control será tal que todos los miembros geológicos sean representados y que permita darles continuidad en el modelo litológico.

3.5 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

Se calcularon las características hidrogeológicas (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) del sistema acuífero a partir de los informes de pruebas de bombeo de pozos previamente realizadas, se utilizó el software AquiferTest, para determinar el tipo acuífero se tomó como base la litología y los datos ploteados de la prueba de bombeo de los pozos y para determinar el gradiente hidráulico, a partir de las líneas piezométricas generadas y su distribución, se calculó como la diferencia del nivel piezométrico entre dos curvas entre la distancia que existe entre estas, en el sentido del flujo de agua.

3.6 BALANCE HÍDRICO DE SUELOS

Se utilizó la metodología de Schosinsky para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.

Se debe realizar el balance hídrico de suelos, con base en los datos de precipitación, evapotranspiración, propiedades físicas del suelo y se calcula la recarga potencial que llega al acuífero; luego, se evalúa la cantidad de agua que entra al sistema y el volumen de agua que sale de él (pozos de bombeo, caudal base de ríos, manantiales, entre otros).

3.6.1 Datos de entrada

Se necesitan los siguientes datos de entrada:

- **Fracción de lluvia interceptada por el follaje**

La metodología menciona que lluvias menores a 5 mm mensuales, no generan infiltración alguna ya que se considera que, en un mes con lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo debido a que el 12% (20% para bosques densos) de la lluvia total es retenida por el follaje. La retención por el follaje se determina de la siguiente manera:

$$\text{Si } P \leq 5 \text{ mm/mes, Ret}=P$$

$$\text{Si } P * C_{fo} \geq 5 \text{ mm/mes, Ret}=P * C_{fo}$$

$$\text{Si } P \geq 5 \text{ mm/mes, pero } P * C_{fo} \leq 5 \text{ mm/mes entonces Ret}=5$$

Donde P es la precipitación mensual (mm/mes), Ret es la retención del follaje al mes (mm/mes) y Cfo es el coeficiente de retención (adimensional).

- **Infiltración**

Para evaluar la infiltración de la lluvia que penetra al suelo, se debe determinar la precipitación mensual de la zona, los valores de infiltración básica de los diferentes suelos, la cobertura vegetal y la pendiente del terreno.

$$I = 0.88 * C_i * P$$

$$C_i = K_P + K_V + K_{FC}$$

Donde I es la infiltración en mm/mes, C_i representa el coeficiente de infiltración (adimensional), P es la precipitación en mm/mes, K_p es la fracción que infiltra por efecto de la pendiente (adimensional), K_v es la fracción que infiltra por la cobertura vegetal (adimensional) y K_{FC} es la fracción que infiltra por la textura del suelo.

El coeficiente de infiltración es el factor por el cual se debe multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo.

La Tabla 3.1 muestra los diferentes valores de los coeficientes de pendiente y cobertura vegetal.

Tabla 3.1. Valores para los coeficientes de pendiente y cobertura vegetal.

POR PENDIENTE	K_p
Muy plana 0.02%-0.06%	0.30
Plana 0.3%-0.4%	0.20
Algo plana 1%-2%	0.15
Promedio 2%-7%	0.10
Fuerte mayor de 7%	0.06
POR COBERTURA VEGETAL	K_v
Cuerpos de agua*	0.00
Cobertura con zacate menos 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más de 75%	0.21
Café*	0.19
Lava reciente*	0.30
Áreas Turísticas y Arqueológicas*	0.10
Terrenos principalmente agrícolas*	0.15
Espacios con vegetación escasa*	0.15

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000, * tomado de Junker, 2006.

Donde: K_p es el factor por pendiente y K_v es el factor por cobertura vegetal.

El coeficiente de infiltración por textura de suelo (K_{FC}) es uno de los factores que más influye en la cantidad de agua que infiltra en el suelo. Está dado por:

$$K_{FC} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154*fc - 0.723$$

Donde fc es la infiltración básica del suelo (mm/día). La ecuación fue obtenida a partir de métodos empíricos (Schosinsky & Losilla, 2000).

Para la aplicación de esta ecuación, el rango de fc debe encontrarse entre los 16 mm/día y los 1568 mm/día. Por lo que el valor de K_{FC} está condicionado por:

$$\text{Si } 16 \text{ mm/día} \leq fc \leq 1568 \text{ mm/día; } K_{FC} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154*fc - 0.723$$

$$\text{Si } fc \leq 16 \text{ mm/día; } K_{FC} = 0.0148*fc/16$$

$$\text{Si } fc \geq 1568 \text{ mm/día; } K_{FC} = 1$$

El valor de fc corresponde a la permeabilidad del suelo saturado en los primeros 30 cm de profundidad, esto en consideración a que es el espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia.

Sin embargo, existen valores propuestos para el coeficiente de infiltración por textura de suelo (K_{FC}), basados en la textura de suelo.

Tabla 3.2. Valores para coeficiente de infiltración por textura de suelo.

POR TEXTURA DE SUELO	K_{fc}
Arcilla compacta impermeable	0.1
Combinación de limo y arcilla	0.2
Suelo Limo arenoso no muy compacto	0.4

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000.

Donde: K_{fc} es el coeficiente de infiltración por textura de suelo.

El valor de C_i , en ningún caso podrá ser mayor a 1, si así fuese, se le asigna el valor de 1.

- **Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo y Densidad del suelo**

El Punto de Marchitez y Capacidad de Campo se pueden obtener a partir de análisis de muestras de suelo. En cuanto a la profundidad de raíces, se puede determinar por medio de tablas dependiendo del tipo de cultivo o por observación en visitas de campo. En caso de no contar con dichos parámetros, Schosinsky propone valores basados en la textura de suelo.

Tabla 3.3. Punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC) y densidad del suelo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos.

TEXTURA DEL SUELO	% DE PESO DE SUELO SECO		
	PMP	CC	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)
Arenoso	2-6	6-12	1.55-1.80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1.40-1.60
Franco	8-12	18-26	1.35-1.50
Franco- arcilloso	11-15	23-31	1.30-1.40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1.25-1.35
Arcilloso	15-19	31-39	1.20-1.30

Fuente: Schosinsky, 2006.

Tabla 3.4. Profundidad de raíces de diferentes cultivos.

CULTIVO	PR (m)
Café*	0.9-1.5
Bosques	2.0-3.0
Zacate	0.3-0.5
Granos básicos**	0.8-1.2
Pastos	1.0-2.0

Fuente: Schosinsky, 2006, * tomado de Junker, 2006, ** tomado de USDA-NRCS, 2016.

Donde: PR es la profundidad de raíces.

- **Precipitación**

Se utilizaron datos de precipitación mensual provenientes de estaciones pluviométricas cercanas a la zona, luego para la distribución de la precipitación, con las estaciones cercanas completadas se obtendrán los polígonos de Thiessen y las isoyetas del área de estudio, se superponen para obtener las isoyetas dentro de cada polígono de Thiessen de la cuenca.

Los polígonos de Thiessen distribuyen en el área de estudio la lluvia y las isoyetas corrigen el valor de precipitación puntual por la variación topográfica y accidentes orográficos. Por lo anterior, este método se conoce como Thiessen Modificado, para ello se obtuvieron los coeficientes de distribución de la precipitación en el terreno: alfa (coeficiente del método de Thiessen), beta (relación entre la precipitación media obtenida por el método de las isoyetas dentro del polígono correspondiente y la precipitación media anual de la estación) y lambda (coeficiente del método de Thiessen modificado), para la cuenca completa.

El valor de alfa para cada polígono se obtiene de la relación entre el área del polígono y el área total de la microcuenca en análisis; el valor de lambda se obtiene de la multiplicación de alfa y beta para cada estación.

- **Evapotranspiración**

Se utilizaron datos de temperatura media mensual, humedad relativa mensual y radiación solar mensual de estaciones meteorológicas, para determinar la evapotranspiración potencial se utilizará el método de Hargreaves, luego se distribuirá la evapotranspiración en el área de estudio por medio del método Thiessen Modificado.

La fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) para evaluar la Evapotranspiración Potencial necesita solamente datos de temperaturas y de Radiación Solar. La expresión general es la siguiente:

$$ET_r = 0.0023 * Ra(T-t)^{0.5} * (tm + 17.8)$$

Donde ET_r es la evapotranspiración potencial diaria en mm/día, $T-t$ es la diferencia entre la media mensual de temperaturas máximas y de las mínimas en °C, tm es la temperatura media del aire en °C y Ra es la radiación solar extraterrestre en mm/día.

Para el cálculo de la evaporación en el Lago de Coatepeque, se tomó como información base, la evapotranspiración de referencia sobre los cuerpos de agua afectándolos por un Coeficiente de Evaporación, el cual varió de época lluviosa a época seca. De esta manera, se aplicó un factor de 1.15 de noviembre a abril y de 1.10 de mayo a octubre, de acuerdo a coeficientes para cuerpos de agua sugeridos por la FAO.

El trazado de los polígonos de Thiessen e Isoyetas, tanto para precipitación como evapotranspiración, se realizó mediante funciones de interpolación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), usando el software ArcGIS.

3.6.2 Cálculos del Balance Hídrico de Suelos

Una vez obtenidos los datos de entrada se procedió por medio de una hoja de cálculo desarrollada por Schosinsky al cálculo de los siguientes parámetros: ESC (escorrentía), P_i (precipitación que infiltra al suelo), ETR (Evapotranspiración potencial real), HS (humedad del suelo inicial y final) y C (coeficiente de humedad) son realizados para cada mes, para obtener el valor de la recarga potencial al acuífero se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_p = P_i + HS_i - HS_f - ETR$$

Donde R_p es la recarga potencial mensual (mm/mes). P_i es la precipitación que infiltra (mm/mes), H_{Si} es la humedad del suelo al inicio del mes (mm/mes), H_{Sf} es la humedad del suelo al final del mes (mm/mes) y ETR es la evapotranspiración real (mm/mes).

3.6.3 Cálculo de Volumen de Agua del Lago de Coatepeque

Se utilizó la batimetría y el registro de los niveles de agua del Lago de Coatepeque por cada mes, para el cálculo del volumen se realizará mediante funciones de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), usando el software ArcGIS. Luego para calcular la variación del volumen de agua que almacena el Lago de Coatepeque se realiza una resta del volumen máximo y el volumen mínimo obtenidos.

3.7 ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Se integró toda información piezométrica, geológica e hidrogeológica recolectada, el modelo litológico elaborado, el balance hídrico y las características hidrogeológicas obtenidas.

4 RESULTADOS

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

4.1.1 Geología de la cuenca

En el apartado 1.9.5 del presente documento se describen los miembros geológicos de la formación San Salvador que se encuentran en la cuenca de estudio, conforme al Mapa Geológico de El Salvador (Misión Geológica Alemana, 1978), en la Tabla 4.1 se observa que la cuenca presenta rocas piroclásticas en 25.54% del área total de la cuenca.

Tabla 4.1. Miembros geológicos presentes en la cuenca.

MIEMBRO	EDAD	CLASIFICACIÓN	ÁREA (km ²)	% ÁREA
s1	Pleistoceno	Rocas piroclásticas	16.41	25.54%
s2	Pleistoceno	Rocas efusivas	7.29	11.35%
s3a	Holoceno	Rocas piroclásticas	6.82	10.61%
s3b	Holoceno	Rocas efusivas	2.14	3.33%
s5b	Holoceno	Rocas efusivas	0.37	0.58%
s5c	Holoceno	Cenizas volcánicas	6.71	10.45%
		Agua	24.50	38.13%
		TOTAL	64.25	100.00%

Fuente: Elaboración propia con datos de Misión Geológica Alemana, 1978.

4.1.2 Precipitación

En el apartado 1.9.2 del presente documento se mencionan las estaciones pluviométricas que tienen influencia en la cuenca de estudio, en la Figura 4.1 se muestra la distribución de los polígonos de Thiessen y las isoyetas.

A partir de la información proporcionada por el MARN, de datos de precipitación de las estaciones pluviométricas del período de 1981 - 2020, se procedió a determinar la precipitación promedio de la cuenca en estudio, tal como se describió en el apartado 3.6.1 del presente documento, los resultados se muestran en la Tabla 4.2 y la memoria de cálculo se muestra en el Anexo 1.

Tabla 4.2. Precipitación mensual por estación pluviométrica y resultado para la cuenca del Lago de Coatepeque.

ID	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A18	4.3	7.5	20.8	68.0	255.7	379.5	379.1	424.9	396.8	291.6	63.3	13.8
A19	2.4	3.8	15.2	53.1	207.2	277.2	316.5	317.3	295.1	244.8	47.1	7.7
A21	1.1	4.8	10.9	60.5	212.3	308.8	291.9	342.1	294.0	233.4	36.4	5.4
	2.3	4.5	14.2	54.4	204.7	286.4	302.5	323.4	294.9	235.6	44.4	7.7

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN, 2021.

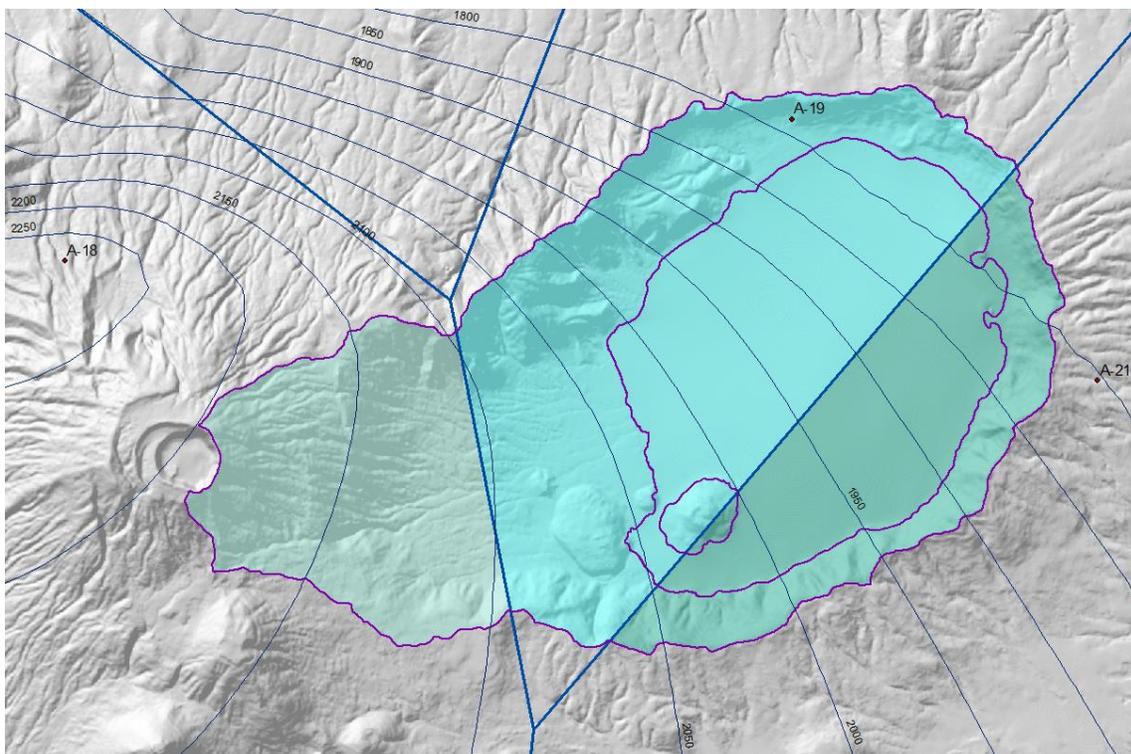


Figura 4.1. Polígonos de Thiessen e Isoyetas de precipitación con influencia en la cuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN, 2021.

4.1.3 Evapotranspiración

De igual forma que la precipitación, a partir de la información publicada por el MARN, de datos de temperatura máxima, media y mínima de las estaciones meteorológicas del período de 1981 - 2010, se procedió a determinar la evapotranspiración potencial promedio de la cuenca en estudio y la evaporación para el cuerpo de agua, tal como se describió en el apartado 3.6.1 del presente documento, los resultados se muestran en la Tabla 4.3 y en la Tabla 4.4, la distribución de los polígonos de Thiessen y las isoyetas se muestra en la Figura 4.2 y la memoria de cálculo se muestra en el Anexo 1.

Tabla 4.3. Evapotranspiración mensual por estación meteorológica y resultado para la cuenca del Lago de Coatepeque.

ID	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A37	137.5	143.3	182.4	186.3	175.5	156.6	165.3	163.6	147.2	138.7	126.0	128.2
A18	80.8	89.8	117.2	122.0	117.9	107.0	111.8	112.2	98.9	86.7	75.0	74.6
	102.9	113.2	147.2	152.8	147.2	133.2	139.4	139.6	123.4	109.4	95.3	95.1

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN, 2022.

Tabla 4.4. Evaporación mensual para el Lago de Coatepeque.

ID	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	118.3	130.2	169.2	175.7	161.9	146.5	153.3	153.6	135.8	120.3	109.6	109.3

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN, 2022.



Figura 4.2. Polígonos de Thiessen e Isolinias de evapotranspiración con influencia en la cuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN, 2022.

4.1.4 Suelos

En el apartado 1.9.6 del presente documento se describen los tipos de suelo que se encuentran en la cuenca de estudio, conforme al Mapa Pedológico de El Salvador (MAG, 1974), en la Tabla 4.5 se observa que la cuenca presenta litosoles en 53.45% del área total de la cuenca.

Tabla 4.5. Tipos de suelo presentes en la cuenca según mapa pedológico.

TIPO DE SUELO	TEXTURA	ÁREA (km ²)	% ÁREA
Latosoles Arcillo Rojizos	Franco arcillosos	0.13	0.20%
Andisoles	Franco	4.45	6.93%
Litosoles	Franco arenosos	34.34	53.45%
	Agua	24.50	38.13%
	Isla	0.83	1.29%
	TOTAL	64.25	100.00%

Fuente: Elaboración propia con datos de MAG, 1974.

Según el Mapa de tipos de suelos de El Salvador (MAG, 1966), los suelos en el área de la cuenca en estudio son de varios grupos: Regosoles, Aluviales, Latosoles Arcillo Rojizos y Litosoles, como se muestra en la Figura 4.3, los cuales se pueden clasificar en varios tipos de textura, sin embargo, el cuadrante topográfico en el cual se ubica la cuenca del Lago de Coatepeque, no cuenta con la explicación de los tipos de suelos, por lo que, con la información de los suelos de los cuadrantes adyacentes que fue posible identificar las diferentes texturas presentes en la cuenca del Lago de Coatepeque, asignando las equivalencias de los nombres de suelos en los cuadrantes 2257 I y 2257 II, en los que se ubica la cuenca, con aquellos equivalentes y algunos con continuidad desde los cuadrantes 2357 III y 2357 IV, los tipos de suelos presentes en la cuenca de estudio se muestran en la Tabla 4.6, donde se observa que la cuenca presenta textura Franco arenoso fino en un 31.62% del

área total, también se muestran los espesores de los tipos de suelo, presentando la cuenca un espesor ponderado de 0.39 m.

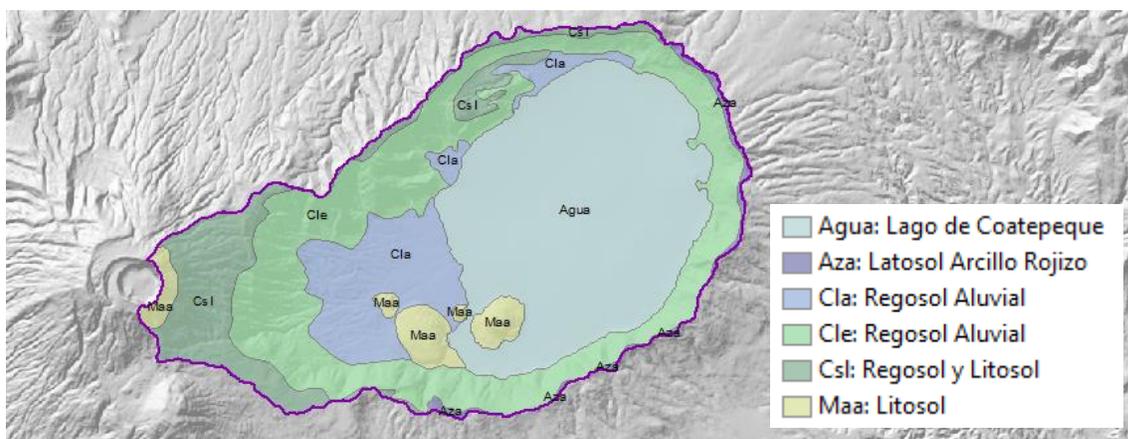


Figura 4.3. Tipos de suelo en la cuenca del Lago de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia con datos de MAG, 1966.

Tabla 4.6. Tipos de suelos de la cuenca del Lago de Coatepeque y sus características.

CÓDIGO	TIPO DE SUELO	TEXTURA	ÁREA (km ²)	% ÁREA	ESPESOR (m)
Aza	Latosol Arcillo Rojizo	Franco arcilloso	0.88	1.37%	0.75
Csl	Regosol y Litosol	Franco arenoso	7.65	11.90%	0.25
Maa	Litosol	Franco arenoso	2.94	4.57%	0.25
Cla	Regosol Aluvial	Franco	7.97	12.40%	0.25
Cle	Regosol Aluvial	Franco arenoso fino	20.32	31.62%	0.50
Agua	Lago de Coatepeque		24.50	38.13%	
TOTAL			64.25	100.00%	

Fuente: Elaboración propia con datos de MAG, 1966.

Conforme al Mapa de Uso de Suelo de El Salvador Corine Land Cover 2010 (MAG-UES, 2010), se identifican los usos de suelo en la cuenca de estudio, en cuanto al uso Áreas Turísticas y Arqueológicas se añadió una parte al oeste de la cuenca, tomando como base una imagen satelital para dicha actualización, que se muestran en la Figura 4.4 y en la Tabla 4.7 se observa que el uso del suelo para Café ocupa el 41.57% del área total de la cuenca.

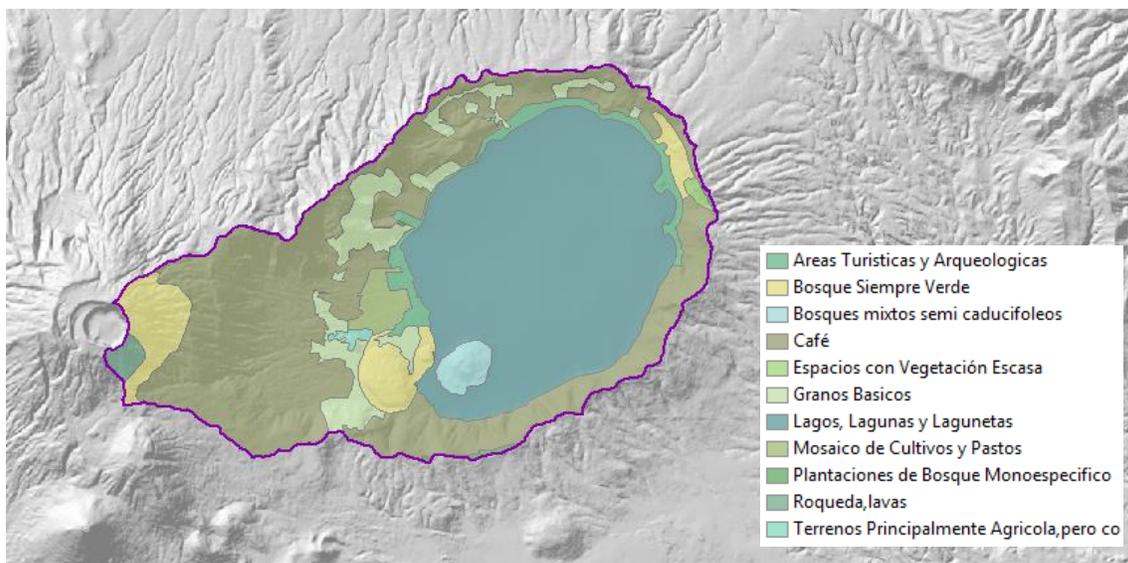


Figura 4.4. Usos de suelo en la cuenca del Lago de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia con datos de MAG-UES, 2010.

Tabla 4.7. Usos de suelo en la cuenca del Lago de Coatepeque.

USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	% ÁREA
Áreas Turísticas y Arqueológicas	1.68	2.61%
Bosque Siempre Verde	3.98	6.19%
Bosques mixtos semi caducifolios	0.88	1.37%
Café	26.71	41.57%
Espacios con Vegetación Escasa	0.18	0.28%
Granos Básicos	4.39	6.83%
Lago	24.5	38.13%
Mosaico de Cultivos y Pastos	1.02	1.59%
Plantaciones de Bosque Monoespecífico	0.15	0.23%
Roqueda, lavas	0.45	0.70%
Terrenos Principalmente Agrícola	0.19	0.30%
TOTAL	64.25	100.00%

Fuente: Elaboración propia con datos de MAG-UES, 2010.

4.2 INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA

Se realizaron visitas de campo, en las cuáles se pudieron identificar pozos excavados y perforados (Tabla 4.8) y manantiales (Tabla 4.9) dentro de la cuenca en estudio.

Tabla 4.8. Listado de pozos identificados en visitas de campo.

ID	LATITUD	LONGITUD
PE1	13°52'18''N	89°31'15''W
PE2	13°52'15''N	89°31'16''W
PE3	13°52'14''N	89°31'16''W
PP4	13°51'09''N	89°31'36''W
PP5	13°51'09''N	89°31'36''W

ID	LATITUD	LONGITUD
PE6	13°52'47.87"N	89°31'21.79"W
PE7	13°53'33.08"N	89°32'51.52"W
PE8	13°51'36.24"N	89°34'21.9"W
PE9	13°50'7.26"N	89°34'5.34"W
PP10	13°53'33.54"N	89°33'4.68"W

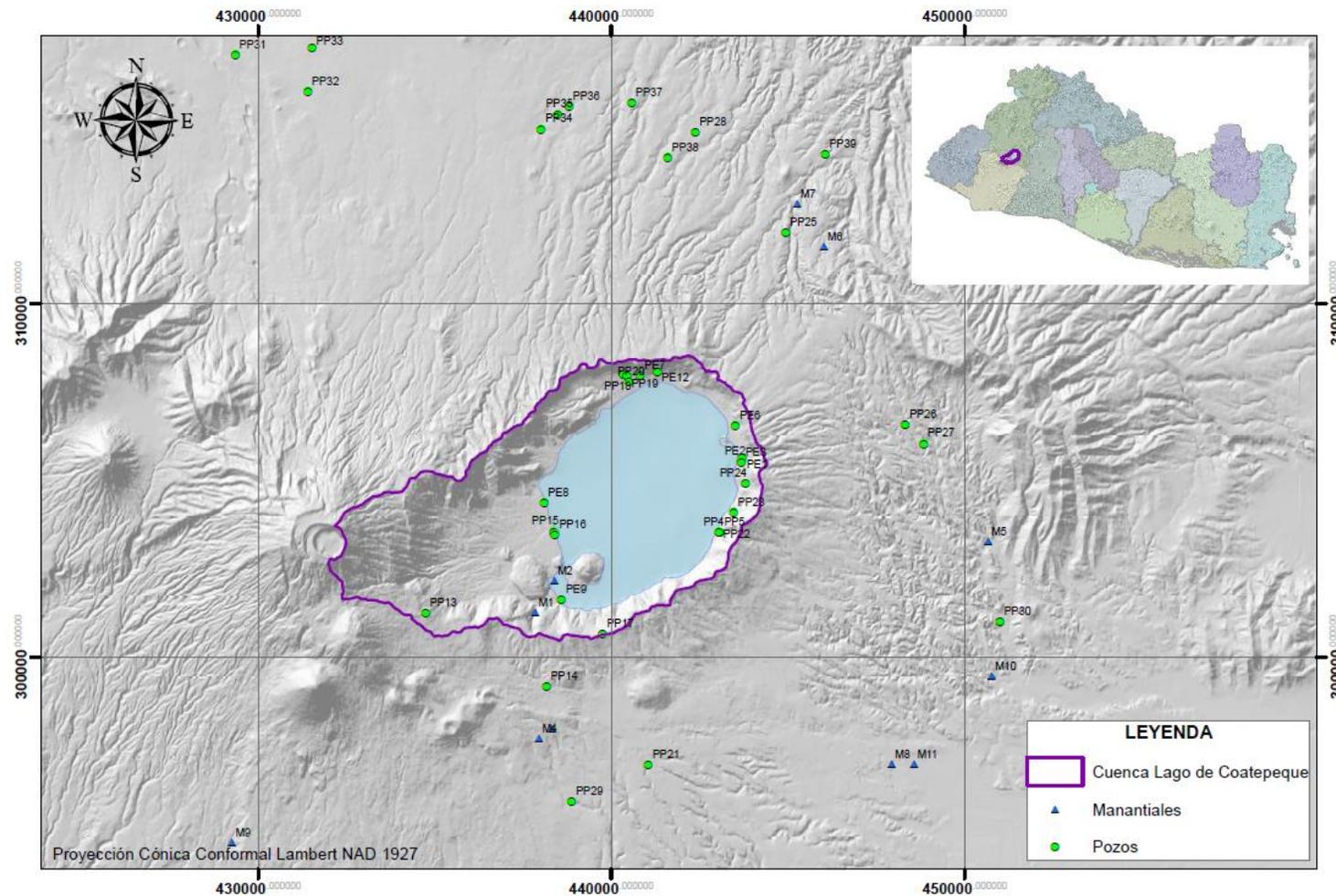
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9. Listado de manantiales identificados en visitas de campo.

ID	LATITUD	LONGITUD
M1	13°49'55.2"N	89°34'30"W
M2	13°50'24"N	89°34'12"W

Fuente: Elaboración propia.

De los pozos y manantiales identificados en visita de campo y los recolectados en diferentes documentos proporcionados, se obtuvo la distribución de pozos y manantiales como se muestra en la Figura 4.5, cuyos datos se muestran en el Anexo 2. El manantial M1 tiene un caudal de 0.085 L/s, resultante de los datos de aforo (Anexo 2).



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 MAESTRÍA EN GESTIÓN DE
 RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS
 UNIDAD DE POSGRADOS

ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLÓGICO
 CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA
 DEL LAGO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

Metzi Elizabeth Rivera de Montes

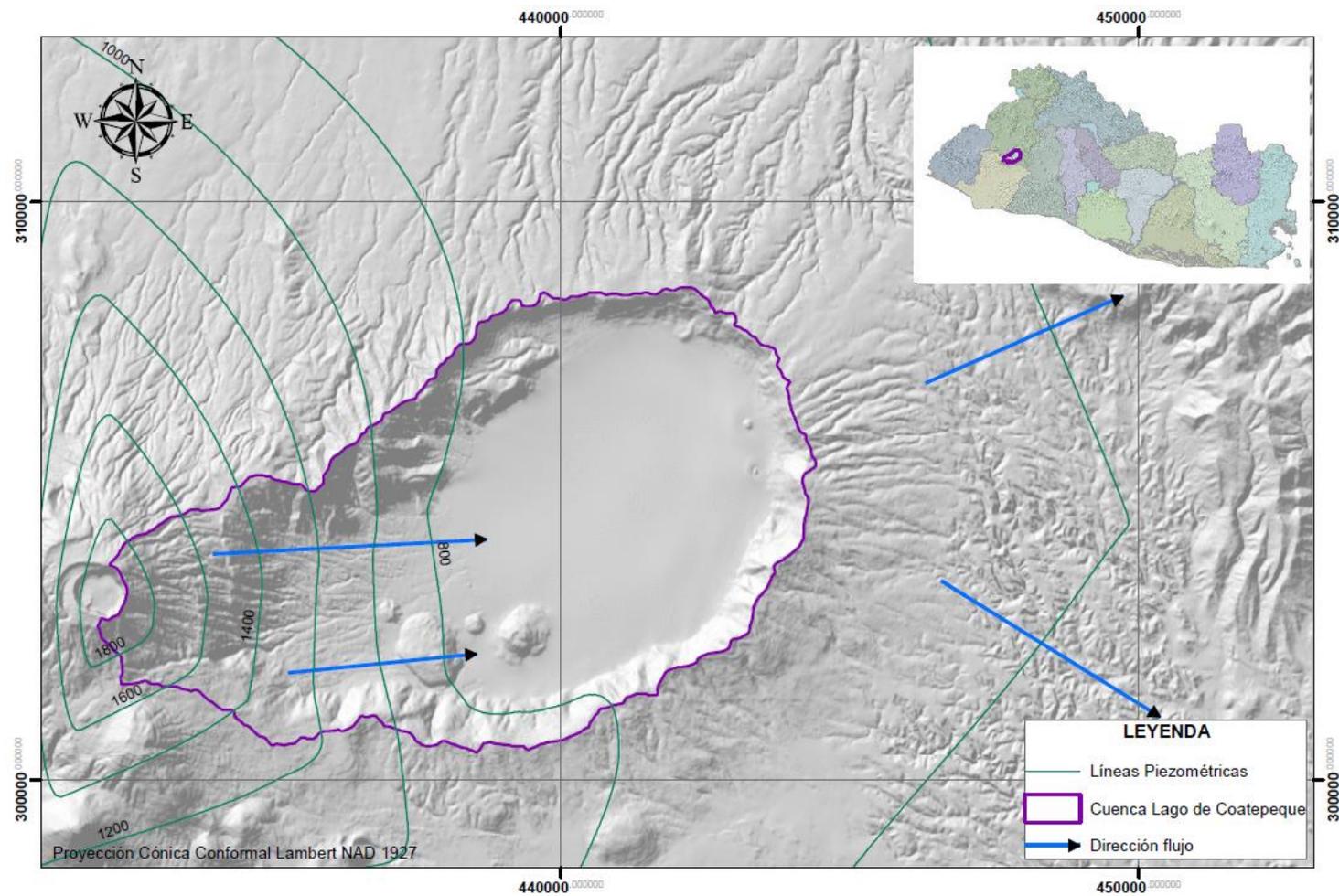
Figura 4.5. Ubicación de pozos y manantiales en el área de estudio y su entorno.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

4.3 LÍNEAS PIEZOMÉTRICAS

Conforme al inventario de fuentes de agua identificadas en el apartado anterior, se procedió a obtener los niveles piezométricos de los mismos (Anexo 3), para posteriormente determinar las líneas piezométricas para la cuenca en estudio y la dirección del flujo subterráneo, el resultado se muestra en la Figura 4.6.

Se observa que el flujo subterráneo viene desde el Volcán Ilamatepec o Santa Ana hacia el cuerpo de agua del Lago de Coatepeque y de éste descarga a la zona de Zapotitán y Santa Ana, también existe un flujo de forma radial, desde el parteaguas de la cuenca, es decir los bordes de la caldera del lago, hacia el cuerpo de agua, sin embargo, son de menor magnitud comparado al flujo desde el Volcán Ilamatepec.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 MAESTRÍA EN GESTIÓN DE
 RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS
 UNIDAD DE POSGRADOS

ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLOGICO
 CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA
 DEL LAGO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

Metzi Elizabeth Rivera de Montes

Figura 4.6. Líneas piezométricas y dirección de flujo subterráneo en la cuenca en estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

4.4 MODELO LITOLÓGICO

A partir de las columnas litológicas (Anexo 4) y el mapa geológico se procedió a clasificar los diferentes estratos de Aglomerado, Arcilla, Lava, Piroclastos, Sedimento y Toba, en miembros geológicos de la formación San Salvador, además, se crearon 100 puntos de control a partir del mapa geológico y su correlación con las columnas litológicas, su distribución se muestra en la Figura 4.7, para construir el modelo litológico con el software Rockworks se utilizaron los datos de las columnas litológicas y los puntos de control, los resultados se muestran en la Figura 4.8 y las secciones en la Figura 4.9 y en la Figura 4.10.

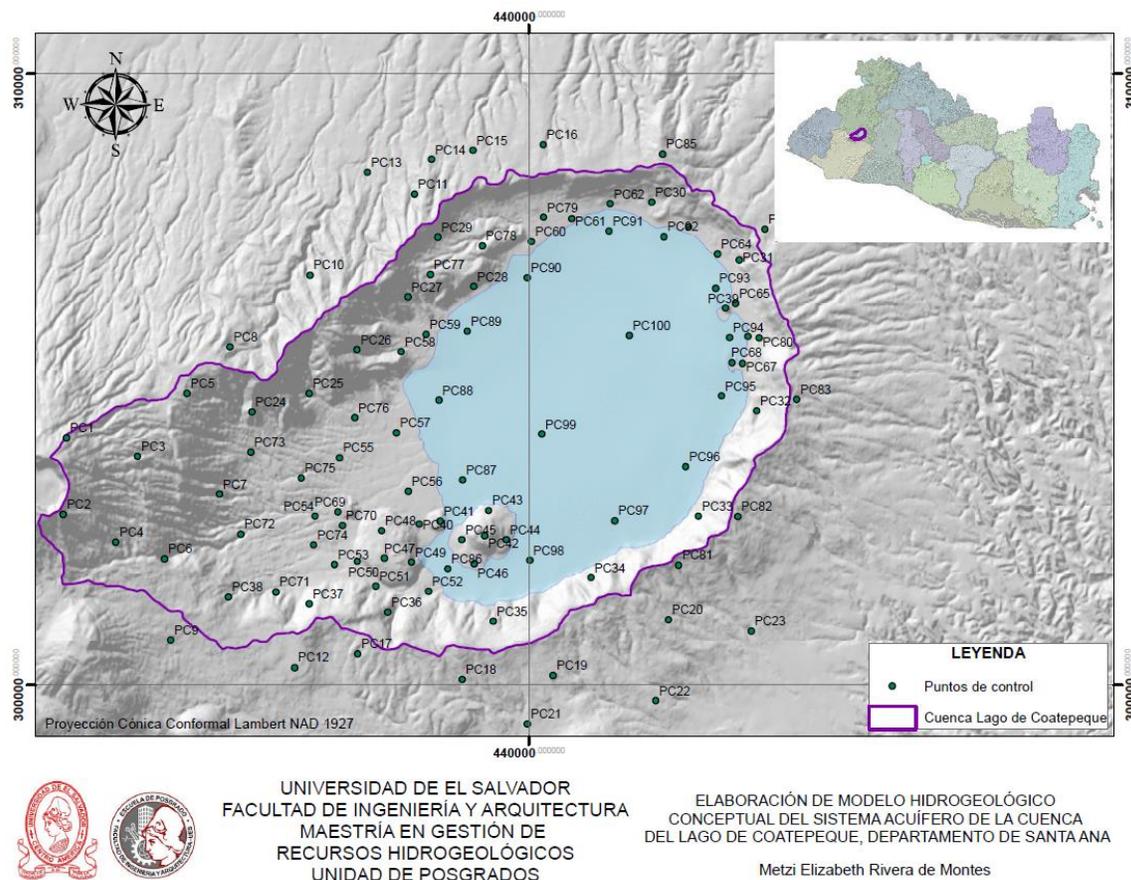


Figura 4.7. Ubicación de puntos de control en la cuenca del Lago de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando el modelo litológico con los perfiles de los pozos del inventario realizado, se determina que, para los pozos perforados el miembro s1 es la capa confinante, debido a su permeabilidad. Además, se aclara que debajo de los miembros geológicos de la formación San Salvador existen otros más antiguos, posiblemente de la formación Cuscatlán y Bálsamo, que constituyen el basamento.

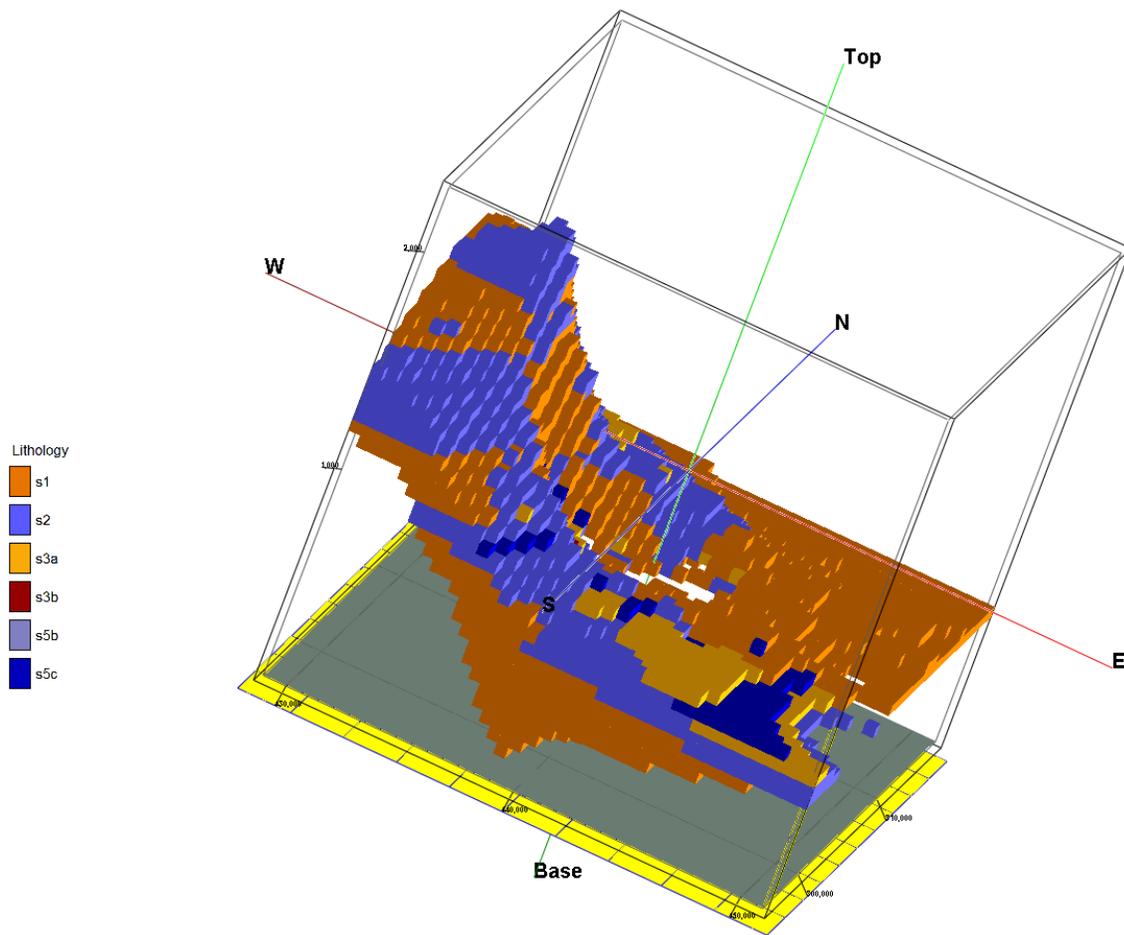


Figura 4.8. Vista 3D del modelo litológico de la cuenca del Lago de Coatepeque.
Fuente: Elaboración propia.

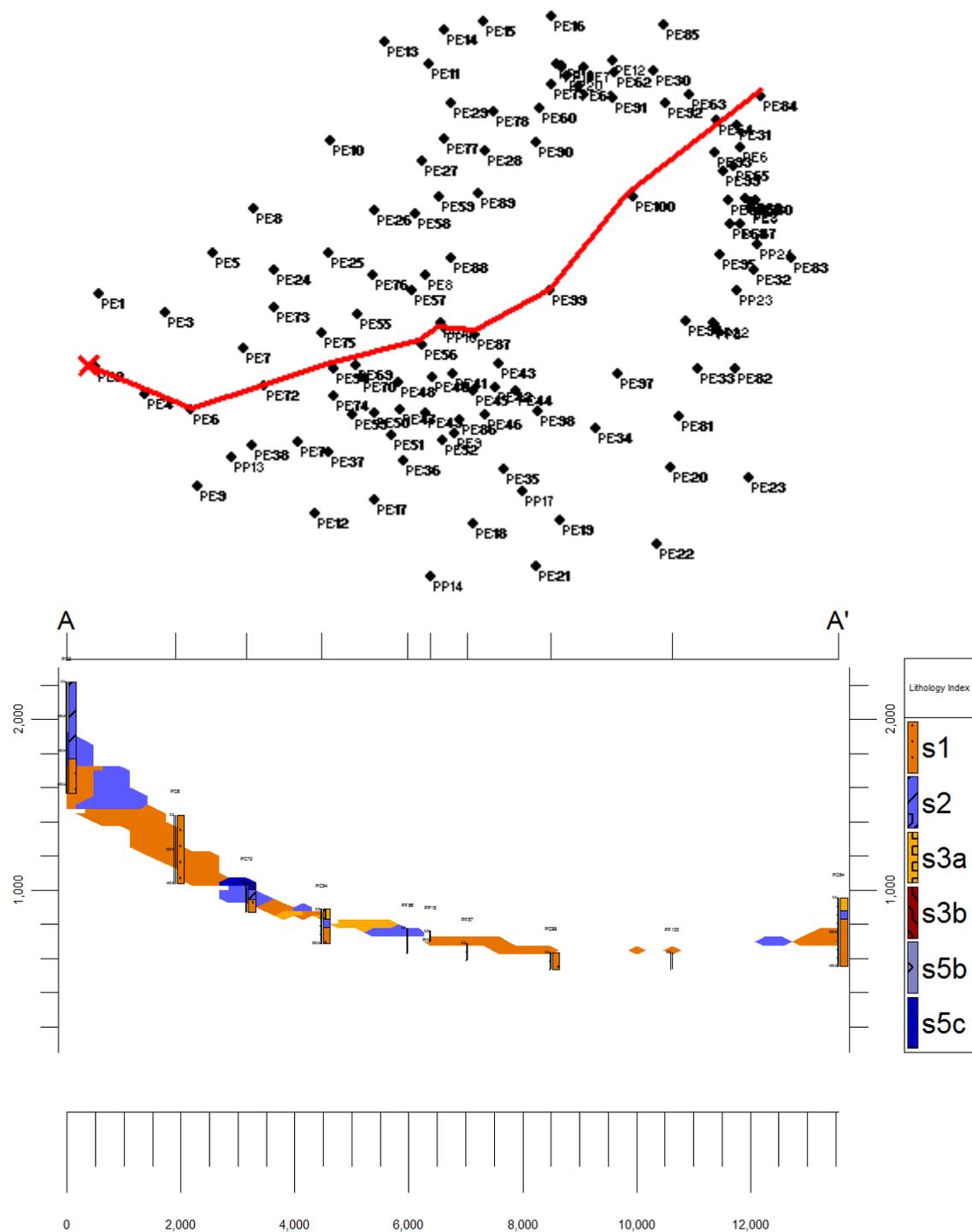


Figura 4.9. Sección longitudinal de la cuenca del Lago de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia.

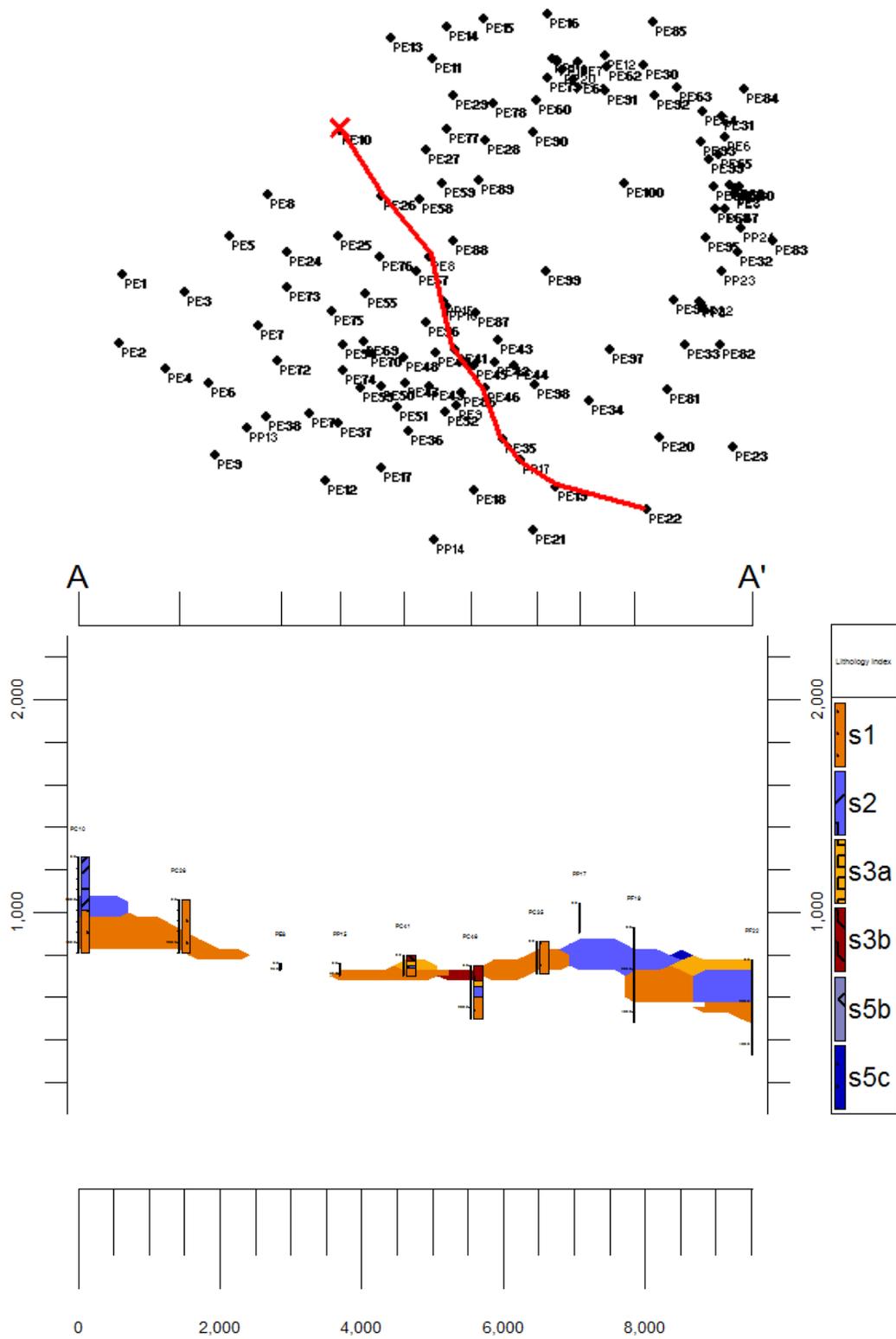


Figura 4.10. Sección transversal de la cuenca del Lago de Coatepeque.
Fuente: Elaboración propia.

4.5 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

4.5.1 Profundidad del agua subterránea

En el inventario de pozos realizado en la Cuenca del Lago de Coatepeque, se han identificado pozos excavados y perforados, los pozos excavados presentan el nivel estático en un rango de 16.2 a 37.5 metros, la profundidad de dichos pozos se encuentra en un rango de 17 a 40 metros; en cuanto a los pozos perforados, estos presentan el nivel estático en un rango de 12.5 a 64 metros, la profundidad de dichos pozos se encuentra en un rango de 54 a 213 metros.

En la zona oeste del Lago de Coatepeque, en los cantones Planes de La Laguna, Lomas de San Marcelino y Las Lajas, tanto los pozos excavados como los perforados, presentan un nivel estático somero, por lo que en los pozos perforados puede que se encuentren dos niveles de agua, primero el del acuífero somero (12.5 a 30 metros) y luego el del acuífero profundo (45 a 64 metros).

A partir de los niveles de agua de los diferentes pozos del apartado 4.2 se procedió a modelar el acuífero en el software Rockworks, el resultado se muestra en la Figura 4.11.

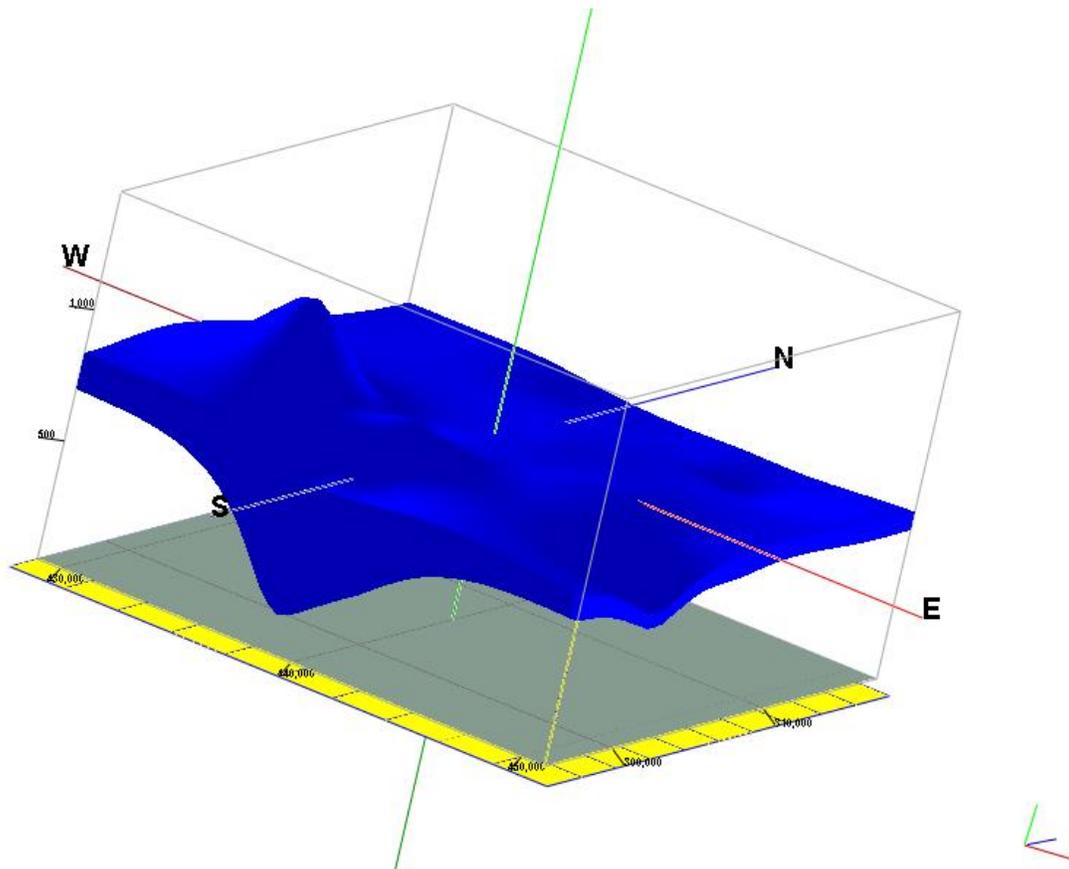


Figura 4.11. Vista en 3D de modelo de acuífero.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

4.5.2 Gradiente hidráulico

A partir de las líneas piezométricas generadas en el apartado 4.3 y su distribución se ha determinado que el gradiente hidráulico varía entre 0.22 y 0.20 en la parte alta y media de la cuenca en estudio, y en la parte baja de la cuenca varía entre 0.09 y 0.13.

En cuanto al flujo que sale de la cuenca hacia Zapotitán y Santa Ana es de 0.04 y 0.02 respectivamente, al ser mayor el gradiente hidráulico hacia Zapotitán se espera que el flujo subterráneo sea mayor que el que sale hacia Santa Ana, debido a la geología estructural de la cuenca del Lago de Coatepeque, como se muestra en el apartado 1.9.4.

4.5.3 Transmisividad

Con la información proporcionada de pruebas de bombeo previamente realizadas, se reprocesaron las que fueron posibles, (Anexo 5) y datos de distintos pozos dentro y alrededor de la cuenca en estudio, se recolectaron datos tanto de transmisividad como del coeficiente de almacenamiento en la Tabla 4.10, donde se observa que los valores de transmisividades son muy diversos, en los pozos dentro de la cuenca de estudio varían entre 34.70 y 621 m²/día, que corresponde a transmisividades clasificadas de Baja a Alta, incluyendo a los pozos alrededor de la cuenca del apartado 4.2 el rango se amplía hasta 1,285.86 m²/día, es decir a transmisividades Muy altas.

4.5.4 Coeficiente de almacenamiento

En la Tabla 4.10 se muestra que los coeficientes de almacenamiento se encuentran en el rango de 1.00E-1 a 6.60E-3, es decir acuífero libre y semiconfinado, los coeficientes de almacenamiento de acuífero semiconfinado corresponden a los pozos perforados que cuentan con una profundidad mayor a 150 metros.

Tabla 4.10. Transmisividades y coeficientes de almacenamiento de pozos.

ID	H	T(m ² /día)	S
PP11	154.00	83.60	6.60E-03
PE12	40.08	164.00	1.10E-02
PP13	213.36	81.97	2.30E-03
PP14	213.66	81.97	2.30E-03
PP17	140.00	179.04	-
PP19	86.35	68.62	-
PP20	74.18	34.70	9.90E-01
PP23	67.72	621.00	1.00E-01
PP27	121.92	202.78	-
PP28	152.40	131.67	1.00E-02
PP30	43.00	196.00	1.00E-01
PP32	112.17	1087.00	-
PP33	139.02	135.78	-
PP35	207.26	1285.86	1.50E-03
PP37	186.69	216.00	1.00E-03
PP39	189.03	72.38	1.00E-01

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

Donde: H es la profundidad del pozo, T es la transmisividad y S es el coeficiente de almacenamiento.

4.6 BALANCE HÍDRICO DE SUELOS

4.6.1 Datos de entrada

4.6.1.1 Factor de pendiente (K_p)

A partir del mapa de pendientes de la cuenca del Lago de Coatepeque del apartado 1.9.8, se reclasificó conforme a los rangos de pendientes (%) de la metodología, como se muestra en el apartado 3.6.1. Los resultados para este factor se presentan en la Tabla 4.11, donde se observa que la mayor parte del área de la cuenca tiene pendiente mayor a 7%, es decir pendiente fuerte.

Tabla 4.11. Factores de pendiente (K_p) de la cuenca de estudio.

TIPO DE PENDIENTE	K_p	ÁREA (km ²)	% ÁREA
Plana	0.2	6.64	10.33%
Algo plana	0.15	2.81	4.38%
Promedio	0.1	13.19	20.53%
Fuerte	0.06	41.61	64.76%
TOTAL		64.25	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.2 Factor de vegetación (K_v)

A partir del mapa de usos de suelos de la cuenca del Lago de Coatepeque del apartado 4.1.4, a cada uso de suelo se le asignó un valor conforme a la metodología, como se muestra en el apartado 3.6.1. Los resultados para este factor se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Factores de vegetación (K_v) de la cuenca de estudio.

USO DE SUELO	K_v	ÁREA (km ²)	% ÁREA
Áreas Turísticas y Arqueológicas	0.10	1.8	2.80%
Bosque Siempre Verde	0.20	3.98	6.19%
Bosques mixtos semi caducifoleos	0.20	0.88	1.37%
Café	0.19	26.71	41.57%
Espacios con Vegetación Escasa	0.15	0.18	0.28%
Granos Básicos	0.15	4.39	6.83%
Lago	0.00	24.5	38.13%
Mosaico de Cultivos y Pastos	0.18	1.02	1.59%
Plantaciones de Bosque Monoespecífico	0.20	0.15	0.23%
Roqueda, lavas	0.30	0.45	0.70%
Terrenos Principalmente Agrícola	0.15	0.19	0.30%
TOTAL		64.25	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.3 Factor de textura de suelo (K_{FC})

A partir de los miembros geológicos presentados en el apartado 4.1.1 se procedió a asignar el factor de textura de suelo conforme la textura de los tipos de suelo del apartado 4.1.4, a cada miembro se le ponderó un valor conforme a la metodología, como se muestra en el apartado 3.6.1. Los resultados se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Factor de textura de suelo (K_{FC}) por miembro geológico.

MIEMBRO GEOLÓGICO	ÁREA (km²)	TIPOS DE SUELOS	TEXTURA	K_{FC}
s1	16.41	Latosol Arcillo Rojizo Regosol y Litosol Regosol Aluvial	Franco arcilloso Franco arenoso Franco arenoso fino	0.31
s2	7.29	Latosol Arcillo Rojizo Regosol y Litosol Litosol Regosol Aluvial	Franco arcilloso Franco arenoso Franco arenoso Franco arenoso fino	0.38
s3a	6.82	Latosol Arcillo Rojizo Regosol y Litosol Litosol Regosol Aluvial	Franco arcilloso Franco arenoso Franco arenoso Franco arenoso fino	0.36
s3b	2.14	Litosol Regosol aluvial	Franco arenoso Franco arenoso fino	0.39
s5b	0.37	Latosol Arcillo Rojizo Regosol y Litosol Litosol Regosol Aluvial	Franco arcilloso Franco arenoso Franco arenoso Franco arenoso fino	0.40
s5c	6.71	Latosol Arcillo Rojizo Regosol y Litosol Regosol Aluvial	Franco arcilloso Franco arenoso Franco arenoso fino	0.45
Agua	24.50			
Total	64.25			

Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.4 Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo y Densidad de Suelo

Partiendo de los miembros geológicos presentados en el apartado 4.1.1. se procedió a determinar el punto de marchitez permanente, capacidad de campo y densidad de suelo, conforme la textura de los tipos de suelo del apartado 4.1.4, a cada miembro se le ponderaron los valores conforme a la metodología, como se muestra en el apartado 3.6.1. Los resultados se presentan en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Punto de Marchitez Permanente (PMP), Capacidad de Campo (CC) y Densidad de Suelo por miembro geológico.

MIEMBRO GEOLÓGICO	% DE PESO DE SUELO SECO		DENSIDAD APARENTE (g/cm³)
	PMP	CC	
s1	6.15	14.29	1.50
s2	6.12	14.21	1.50
s3a	9.09	20.10	1.44
s3b	6.41	14.82	1.49
s5b	6.84	15.65	1.48
s5c	7.86	17.69	1.47

Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.5 Profundidad de Raíces

A partir del mapa de usos de suelos de la cuenca del Lago de Coatepeque del apartado 4.1.4, a cada uso de suelo se le asignó un valor conforme a la metodología, como se muestra en el apartado 3.6.1. Los resultados para este factor se presentan en la Tabla 4.15. Sin embargo, debido a los espesores de

suelo presentados en la cuenca de estudio se tomará el valor del espesor ponderado de suelos de 0.39 m.

Tabla 4.15. Profundidad de raíz (PR) para los usos de suelo de la cuenca de estudio.

USO DE SUELO	PR (m)	ÁREA (km²)	% ÁREA
Áreas Turísticas y Arqueológicas	0.30	1.8	2.80%
Bosque Siempre Verde	3.00	3.98	6.19%
Bosques mixtos semi caducifoleos	2.50	0.88	1.37%
Café	1.50	26.71	41.57%
Espacios con Vegetación Escasa	0.50	0.18	0.28%
Granos Básicos	1.00	4.39	6.83%
Lago	0.00	24.5	38.13%
Mosaico de Cultivos y Pastos	1.00	1.02	1.59%
Plantaciones de Bosque Monoespecífico	2.50	0.15	0.23%
Roqueda, lavas	0.30	0.45	0.70%
Terrenos Principalmente Agrícola	1.00	0.19	0.30%
TOTAL		64.25	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.6 Precipitación y Evapotranspiración

Se utilizaron los resultados del cálculo de la precipitación mensual (apartado 4.1.2) y evapotranspiración mensual (apartado 4.1.3) para la cuenca del Lago de Coatepeque.

4.6.2 Cálculo del Balance Hídrico de Suelos

A partir de la información del apartado 4.6.1 se ponderaron los datos de entrada para los miembros geológicos presentados en el apartado 4.1.1, en la Tabla 4.16 se muestra un resumen de los datos de entrada que se utilizaron para realizar los balances de suelos por miembro geológico conforme la metodología de Schosinsky para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos, descrita en el apartado 3.6.

ID	Kp	Kfc	PMP	CC	DS	Uso Suelo	Área	Kv	PR	
s1	0.06	0.31	6.15	14.29	1.5	Areas Turisticas y Arqueologicas	0.22	0.10	0.18	0.39
						Bosque Siempre Verde	0.47	0.20		
						Café	13.08	0.19		
						Espacios Vegetación Escasa	0.09	0.15		
						Granos Basicos	2.56	0.15		
s2	0.06	0.38	6.12	14.21	1.5	Areas Turisticas y Arqueologicas	0.02	0.10	0.20	0.39
						Bosque Siempre Verde	2.09	0.20		
						Plantaciones de Bosque Monoespecifico	0.12	0.20		
						Café	4.58	0.19		
						Granos Basicos	0.02	0.15		
						Roqueda,lavas	0.45	0.30		
s3a	0.06	0.36	9.09	20.1	1.44	Areas Turisticas y Arqueologicas	1.26	0.10	0.15	0.39
						Bosque Siempre Verde	0.50	0.20		
						Café	2.78	0.19		
						Espacios Vegetación Escasa	0.09	0.15		
						Mosaico de Cultivos y Pastos	1.00	0.10		
						Granos Basicos	1.02	0.15		
						Terrenos Principalmente Agricola	0.17	0.15		
s3b	0.06	0.39	6.41	14.82	1.49	Areas Turisticas y Arqueologicas	0.04	0.10	0.19	0.39
						Bosque Siempre Verde	1.12	0.20		
						Bosques mixtos semi caducifoleos	0.82	0.20		
						Café	0.02	0.19		
						Granos Basicos	0.13	0.15		
s5b	0.06	0.4	6.84	15.65	1.48	Café	0.20	0.19	0.18	0.39
						Granos Basicos	0.14	0.15		
						Terrenos Principalmente Agricola	0.02	0.15		
						Roqueda,lavas	0.01	0.30		
s5c	0.06	0.45	7.86	17.69	1.47	Areas Turisticas y Arqueologicas	0.14	0.10	0.18	0.39
						Bosque Siempre Verde	0.03	0.20		
						Plantaciones de Bosque Monoespecifico	0.02	0.20		
						Café	5.99	0.19		
						Granos Basicos	0.51	0.15		
						Mosaico de Cultivos y Pastos	0.02	0.10		

Tabla 4.16. Resumen de datos de entrada para balance de suelos.

Fuente: Elaboración propia.

Donde: Kp es el factor de pendiente, Kfc es el factor de textura de suelo, PMP es el punto de marchitez permanente, CC es la capacidad de campo, DS es la densidad del suelo, Kv es el factor de cobertura de vegetación y PR es profundidad de raíces en metros.

Conforme con los resultados de la Tabla 4.17, se observa que, dentro de la cuenca del Lago de Coatepeque, se tiene un valor de recarga potencial ponderado de **113.62 mm/año**, con un volumen total de **4.52 Millones de metros cúbicos al año**, también se tiene un valor de escorrentía ponderado de **619.70 mm/año**, con un volumen total de **24.63 Millones de metros cúbicos al año**, que drenan hacia el Lago de Coatepeque, la tablas del cálculo por cada miembro geológico se muestran en el Anexo 6.

Tabla 4.17. Resultados del Balance Hídrico de Suelos de Schosinsky para la cuenca del Lago de Coatepeque.

MIEMBRO GEOLÓGICO	ÁREA (km ²)	RP (mm/año)	ESC (mm/año)	Vol RP (m ³ /año)	Vol ESC (m ³ /año)
s1	16.41	53.42	699.14	876371.38	11469604.75
s2	7.29	164.25	555.14	1197713.94	4048090.81
s3a	6.82	70.96	664.48	484263.53	4534715.80
s3b	2.14	165.00	552.68	353337.15	1183529.56
s5b	0.37	164.57	551.03	61033.36	204358.11
s5c	6.71	229.91	475.35	1543450.07	3191157.38
Agua	24.50				
Total	64.25	113.62	619.70	4516169.44	24631456.40

Fuente: Elaboración propia.

Donde: RP es la recarga potencial acuífera y ESC es la escorrentía.

4.6.3 Condición del Lago de Coatepeque

Conforme monitoreo del nivel de agua del Lago de Coatepeque del año 2012 al 2020, se tiene que el nivel mínimo ha sido de 747.10 msnm y el máximo de 748.88 msnm, sin la elevación de referencia de batimetría del año 2020, como se observa en la Figura 4.12, donde se aprecia como fluctúa el nivel de este a lo largo un año hidrológico.

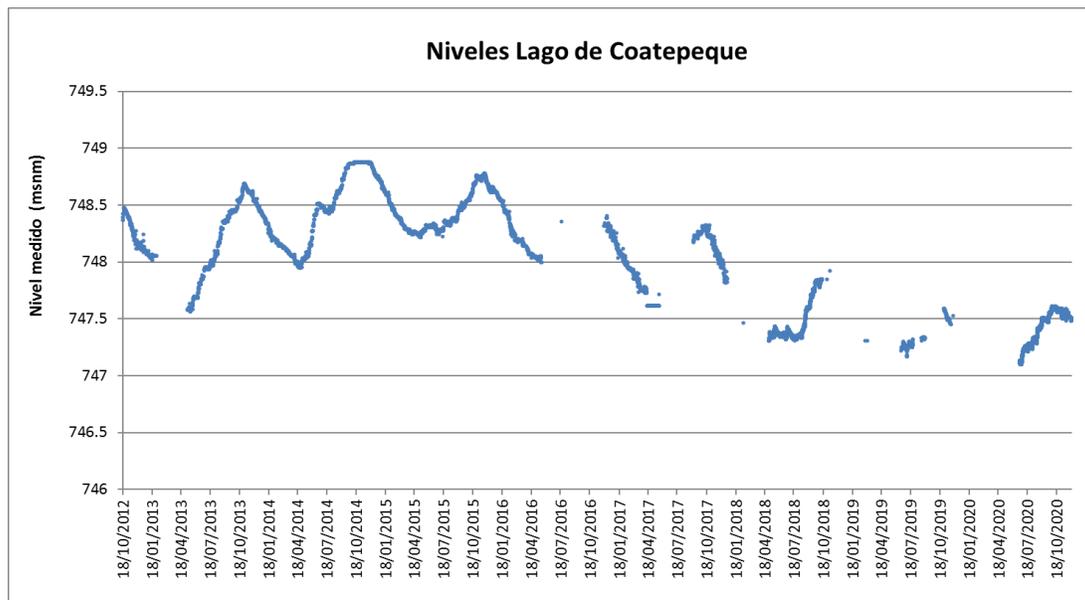


Figura 4.12. Niveles del Lago de Coatepeque.

Para analizar el comportamiento del Lago de Coatepeque se muestran la Tabla 4.18 y Figura 4.13, donde se tomaron en cuenta la precipitación, evaporación del cuerpo de agua y escorrentía ponderada de la cuenca hacia el lago, con respecto a los cambios de nivel del cuerpo de agua promedio del período que cuenta con registro continuo de junio de 2013 a mayo de 2016, es decir se promediaron 3 registros por mes (Anexo 7), referenciados con la elevación de la batimetría del 2020, tomada del Levantamiento Batimétrico del Lago de Coatepeque, en el gráfico se observa que el nivel de agua del lago más alto es alcanzado luego del pico de precipitación, recarga potencial y escorrentía aportada.

Tabla 4.18. Variación del nivel de agua del Lago de Coatepeque con respecto a los parámetros de la cuenca.

MES	P	EV	ESC	RP	N
ENE	2	118	0	0	738.24
FEB	4	130	0	0	738.07
MAR	14	169	4	0	737.96
ABR	54	176	19	0	737.87
MAY	205	162	72	0	737.88
JUN	286	147	101	15	737.93
JUL	303	153	107	20	738.00
AGO	323	154	114	31	738.13
SEP	295	136	104	32	738.32
OCT	236	120	83	15	738.44
NOV	44	110	16	0	738.51
DIC	8	109	1	0	738.40

Fuente: Elaboración propia con datos MARN, 2020 y 2021.

Donde: P es la precipitación, EV es la evaporación del Lago de Coatepeque, ESC es la escorrentía, RP es la recarga potencial acuífera y N es el nivel de agua del Lago de Coatepeque.

El volumen promedio de agua del Lago de Coatepeque de los niveles de agua de la Tabla 4.18 es de 1813.70 MMC, teniendo una variación de volumen de agua máxima de 14.58 MMC, como se muestra en el Anexo 7.

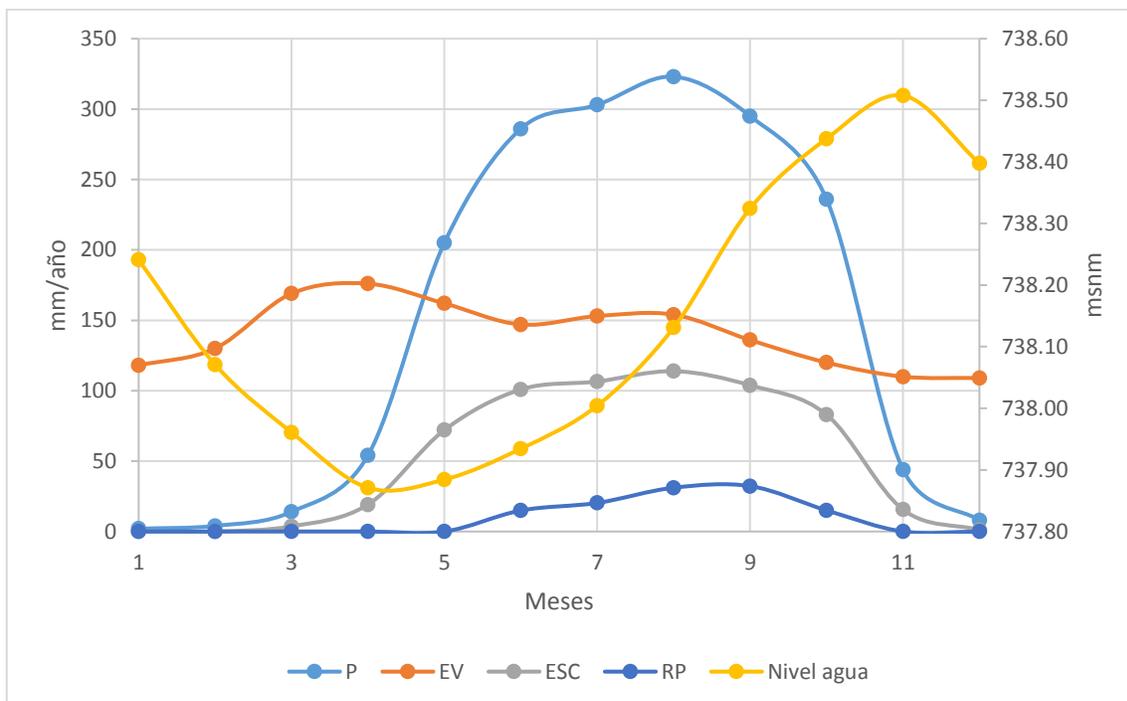


Figura 4.13. Variación del nivel de agua del lago con respecto a la precipitación, evaporación del cuerpo de agua y escorrentía de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia con datos MARN, 2020 y 2021.

4.6.4 Evaluación de Balance Hídrico de la Cuenca

Posterior a la determinación de los apartados anteriores, se procedió a la determinación del potencial hídrico, tomando en cuenta las variables mencionadas en el apartado 2.1.4, por medio de la ecuación de continuidad:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación de Almacenamiento}$$

Para la cuenca del Lago de Coatepeque los términos de la ecuación de continuidad serán los siguientes:

Entradas

La precipitación anual sobre la cuenca en estudio es de 1775 mm, por lo que la precipitación generada sobre el Lago de Coatepeque es de 43.49 MMC, la precipitación en toda la cuenca incluyendo el lago es de 111.46 MMC, la escorrentía de los alrededores del lago que drenan hacia el mismo es de 24.63 MMC y se tiene una recarga potencial de 4.52 MMC al sistema acuífero de la cuenca.

Salidas

La evaporación anual del agua del Lago de Coatepeque es de 1684 mm, por lo que la evaporación anual de agua del lago es de 41.26 MMC. La evapotranspiración de la cuenca es de 1498 mm, equivalente a 59.54 MMC, sumando la evapotranspiración de la cuenca y la evaporación del lago se tienen 100.80 MMC.

En el Informe de MARN (2020), se establece que el total de demanda actual de agua asciende a 2.05 Mm³/año, cuyo aprovechamiento se encuentra concentrado principalmente en el municipio de Santa Ana (63.28%) y en menor proporción en El Congo (36.72%); los resultados indican que aproximadamente el 58.86% de explotación corresponde a los sistemas de agua para las comunidades, el segundo grupo de usuarios predominante en cuanto a las explotaciones son las quintas recreativas, que representa un 26.91% del agua extraída en la cuenca, un tercer grupo lo conforman las viviendas que suman el 8.61% y el 5.62% restante está integrado por centros turísticos, hoteles, instituciones y restaurantes. En la Figura 4.14 se observa la distribución de los sistemas comunitarios de agua alrededor del Lago de Coatepeque.

Las fuentes de agua identificadas son 6, donde una no proviene de la cuenca, la cual abastece los restaurantes de la calle panorámica de acceso al lago, en la parte alta, ya que ellos se abastecen de camiones cisterna. La fuente de mayor explotación es el Lago de Coatepeque, las demandas cuantificadas corresponden a 53.76% y están divididas entre las quintas recreativas, los sistemas de agua potable y las viviendas, en orden de magnitud.

La otra fuente de agua más explotada, son los pozos perforados con un 40.96% del consumo total dentro de la cuenca, esta demanda se concentra principalmente en los sistemas de agua potable (99.5%), el resto corresponde a quintas, restaurantes y vivienda.

Además, se identificó en el informe que parte de los usuarios del agua en la cuenca, se abastecen a través de manantiales (5.12%) y pozos excavados y 1 puntera (0.16%).

Tabla 4.19. Balance hídrico de la cuenca en estudio.

Tipo	Variable	Volumen (MMC)
Entrada	Precipitación sobre la cuenca y el lago	114.04
Entrada	Recarga potencial	4.52
Salida	Evapotranspiración de la cuenca	59.54
Salida	Evaporación del lago	41.26
Salida	Demanda	2.05
	Cambio de almacenamiento	15.71
	Variación de volumen de agua del lago	14.58

Fuente: Elaboración propia.

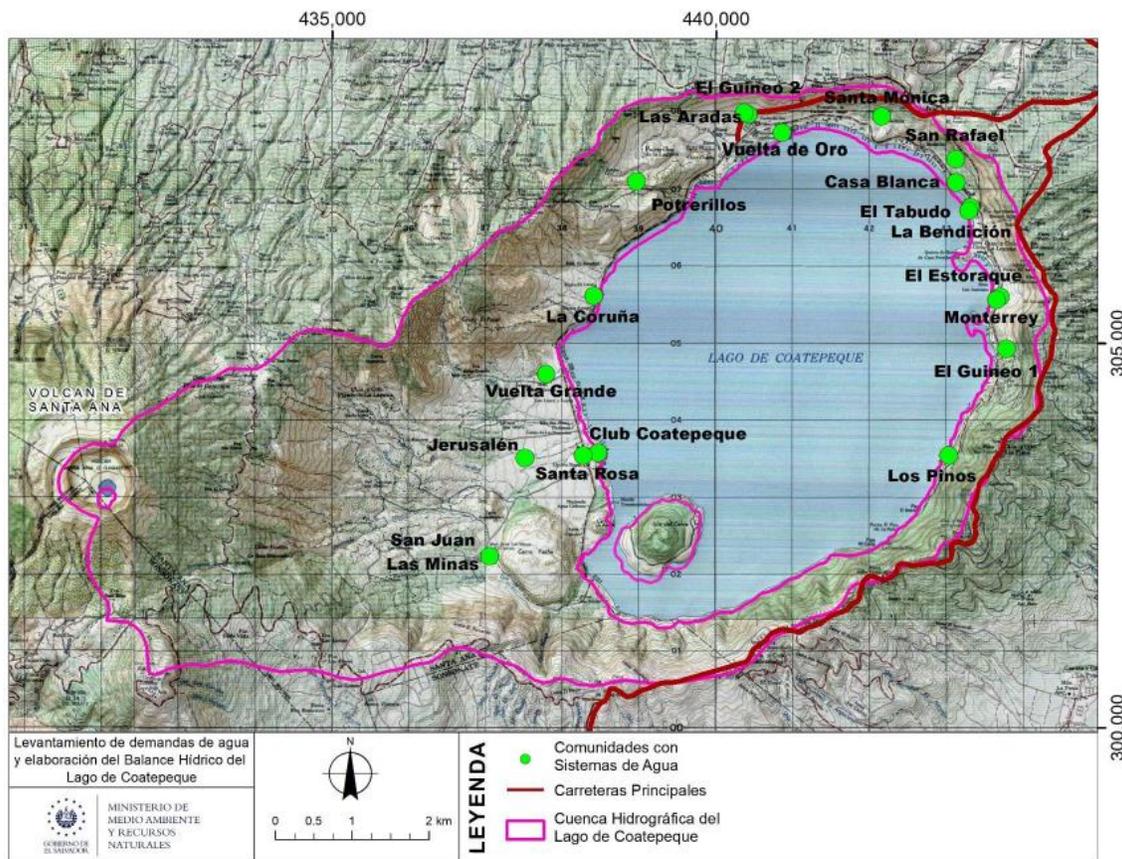


Figura 4.14. Distribución de los sistemas de agua comunitarios en la cuenca del Lago de Coatepeque.
Fuente: MARN, 2021.

Comparando los resultados del Balance Hídrico de la cuenca con estudios previos como se muestra en la Tabla 4.20, se observa que se tiene una variación en cuanto al parámetro infiltración o flujo subterráneo, esto es debido a la metodología utilizada para determinar dicho parámetro y a la limitación de datos, por ello se involucró el parámetro de variación del volumen del Lago de Coatepeque, variando en 1.13 MMC, pudiendo llegar a ser el aporte hacia Zapotitán y Santa Ana hasta de 15.71 MMC.

Tabla 4.20. Comparación de resultados del Balance Hídrico de la Cuenca.

Parámetros (MMC)	FUNDE, 2004	MARN, 2021	Resultados
Precipitación	120.94	111.46	114.04
Evapotranspiración	80.9	63.68	100.8
Infiltración o Flujo Subterráneo	41.34	48	4.52
Consumo de Agua Actual	1.64	1.45	2.05
Variación volumen lago			14.58
Cambio de almacenamiento	-2.94	-1.67	1.13

Fuente: Elaboración propia.

4.7 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL



Figura 4.15. Modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero de la cuenca Lago de Coatepeque.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, inicia con la precipitación que cae sobre la cuenca y el Lago de Coatepeque (114.04 MMC) y con la que cae sobre la cuenca alrededor del lago (68.12 MMC), la recarga potencial que infiltra en los alrededores del lago (4.52 MMC), también presenta la evaporación del agua del cuerpo de agua (41.26 MMC), que se da durante todo el año, la evapotranspiración de la cuenca (59.54 MMC), las demandas de agua de la cuenca (2.05 MMC), y la variación máxima del nivel de agua del Lago de Coatepeque de 14.58 MMC, relacionada a una posible aportación hacia Zapotitán y Santa Ana, por medio de las fallas geológicas o fracturas existentes en la caldera.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. Dentro de la cuenca del Lago de Coatepeque se identificaron 22 pozos y 2 manantiales, a partir de estos se obtuvieron las líneas piezométricas del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, conformadas por líneas entre 600 y 2,000 msnm, el flujo subterráneo viene desde el Volcán Ilamatepec o Santa Ana hacia el cuerpo de agua del Lago de Coatepeque y de éste descarga a la zona de Zapotitán y Santa Ana, también existe un flujo de forma radial, desde el parteaguas de la cuenca, es decir los bordes de la caldera del lago, hacia el cuerpo de agua, sin embargo, son de menor magnitud comparado al flujo desde el Volcán Ilamatepec.
2. A partir de las columnas litológicas de los pozos y puntos de control, se construyó el modelo litológico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, el cual está compuesto por 6 miembros geológicos de la formación San Salvador, debajo de dichos miembros existen otros más antiguos, posiblemente de la formación Cuscatlán y Bálsamo, que constituyen el basamento.
3. El potencial hídrico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, a través del balance hídrico demuestra que las demandas de agua actuales representan el 2% de las entradas determinadas en el presente trabajo, por lo que, se infiere que se tiene un flujo del 12% de las entradas, hacia las masas de agua subterránea de Zapotitán y Santa Ana, por medio de las fallas geológicas o fracturas existentes en la caldera.
4. A partir del análisis de la información obtenida se estima que se encuentren dos niveles de agua, primero el del acuífero somero (12.5 a 30 metros) y luego el del acuífero profundo (45 a 64 metros); se tiene un gradiente hidráulico entre 0.22 y 0.20 en la parte alta y media de la cuenca, y en la parte baja de la cuenca varía entre 0.09 y 0.13, del flujo que sale de la cuenca hacia Zapotitán y Santa Ana se estima es de 0.04 y 0.02 respectivamente, al ser mayor el gradiente hidráulico hacia Zapotitán se espera que el flujo subterráneo sea mayor que el que sale hacia Santa Ana; los valores de transmisividades son muy diversos, en los pozos dentro de la cuenca de estudio varían entre 34.70 y 621 m²/día, que corresponde a transmisividades clasificadas de Baja a Alta, incluyendo a los pozos alrededor de la cuenca, el rango se amplía hasta 1,285.86 m²/día, es decir a transmisividades Muy altas; y los coeficientes de almacenamiento se encuentran en el rango de 1.00E-1 a 6.60E-3, es decir acuífero libre y semiconfinado, los coeficientes de almacenamiento de acuífero semiconfinado corresponden a los pozos perforados que cuentan con una profundidad mayor a 150 metros.

5.2 RECOMENDACIONES

1. En la época seca se deben realizar pruebas de infiltración y de textura del suelo, por cada miembro geológico identificado, para estimar de mejor manera la recarga potencial acuífera.
2. Para establecer la recarga y los puntos de descarga del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, es necesario realizar un análisis isotópico desde el Volcán Ilamatepec desde los pozos dentro y alrededor de la cuenca del lago hasta los manantiales en la zona de Zapotitán y Santa Ana, para estudiar el comportamiento del acuífero e identificar las zonas de recarga y trasvases del sistema acuífero.
3. La metodología de Schosinsky para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos, no es aplicable directamente para el país, por lo que se recomienda adaptar dicha metodología a las características climáticas y biofísicas del país.
4. En los pozos perforados en la cuenca del Lago de Coatepeque, es necesario crear una red de monitoreo piezométrico en dichos pozos, de tal manera que permita evaluar la dinámica del acuífero y su evolución temporal y espacial, de preferencia para cubrir todo el perímetro del lago y en la parte oeste de la cuenca, ya que se encuentran pozos someros y profundos, de los cuales se podrían seleccionar pozos fuera de operación. Además, sería conveniente realizar nuevas perforaciones en la parte alta y media de la cuenca para conocer su litología y variación de nivel freático del sistema acuífero.
5. Ante la falta de la información respecto a los diferentes estratos presentes en la cuenca del Lago de Coatepeque, debido a que son pocos pozos los que cuentan con información de su columna litológica y a que no existen pozos en la parte alta de la cuenca, por lo que, es necesario que se realicen estudios de prospección geofísica, aplicando métodos con los cuáles se puedan identificar los diferentes estratos y sus características.
6. Posterior al modelo hidrogeológico conceptual, se debe elaborar un modelo numérico del sistema acuífero de la cuenca del Lago de Coatepeque, que permita obtener un balance de masas para evaluar la dinámica del acuífero ante el incremento de la explotación. Además, se debe elaborar mapa de vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero, para identificar áreas de protección de acuíferos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados) y Agencia para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, (2008). Mapa Hidrogeológico de El Salvador, escala 1:100,000.
- Anderson, M., & Woessener, W. (2015). Applied Groundwater Modeling: Simulation of flow and advective transport. 2nd Ed. ELSEIVER.
- Baxter, S. (1984). Léxico Estratigráfico de El Salvador. San Salvador: CEL.
- CEL, Geotérmica Italiana (1992). Desarrollo de los Recursos Geotérmicos del Área Centro-Occidental de El Salvador. Prefactibilidad Geotérmica del Área de Coatepeque. Reconocimiento Geotérmico.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). Hidrología Subterránea. Tomo I & II. Barcelona: OMEGA S.A.
- FORGAES y SNET. (2006), Marchand, J., Investigaciones hidrogeológicas, hidrológicas e hidroquímicas en el Lago de Coatepeque.
- FUNDE. (2004), Identificación y Análisis de la Demanda, Oferta y Montos de Pago de los Servicios Ambientales derivados de sistemas de producción sostenible en el sitio potencial del Lago de Coatepeque.
- Gil, L. (2007). Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del Municipio de Nejapa, San Salvador, El Salvador. Maestría Thesis, Universidad de Costa Rica.
- Guevara Retana, J. 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. Maestría Thesis, Universidad de El Salvador.
- Iglesias López y Villanueva Martínez (1984). Pozos y Acuíferos. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Junker, Martín (2006). Método RAS para determinar la recarga de agua subterránea. FORGAES.
- MAG. (1966). Mapa de tipos de suelos de El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- MAG-UES. (1974). Mapa Pedológico de El Salvador. San Salvador: Facultad de Ciencias Agronómicas / Instituto Geográfico, Departamento de Suelos.
- MAG-UES. (2010). Mapa de Uso de Suelos de El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- MARN. (2005), Stimson, J., Estudio de la caracterización hidrogeoquímica de las tres áreas prioritarias: a) Zapotitán-Opico, b) Subcuenca Río Apanchacal (Santa Ana) y c) Subcuenca

Río Grande de San Miguel (específicamente el Acuífero San Miguel), preparado para el Programa de Descontaminación de Áreas Críticas.

MARN. (2006). Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador, Componente Evaluación de Recursos Hídricos. El Salvador.

MARN. (2015). Anexo 1. Inventario de Aguas superficiales y subterráneas, del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH). San Salvador.

MARN. (2020) y MZ Consultores. Levantamiento Batimétrico del Lago de Coatepeque. San Salvador.

MARN. (2021), Calderón, M. y Guevara, M. Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque. San Salvador.

MARN. (2021). Evaluación de la calidad del agua del Lago de Coatepeque. San Salvador.

Misión Geológica Alemana. (1978). Mapa Geológico de El Salvador. San Salvador, El Salvador.

Sánchez San Román, F. J. (2017). Apuntes de Hidrología Superficial y Subterránea. Universidad de Salamanca (USAL).

Schosinsky, G. y Losilla, M., (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central, 23: 43-55.

Schosinsky, G., (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, 34-35: 13-30.

USDA-NRCS. (2016). Part 623 National Engineering Handbook (Vol. 11 Sprinkler Irrigation). Washington, DC, EE.UU.

VMVDU-MARN, (2004): Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial.

7 ANEXOS

ANEXO 1. CÁLCULO DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POR EL MÉTODO DE THIESSEN MODIFICADO

Precipitación promedio para Cuenca del Lago de Coatepeque (Serie temporal 1981-2020).

CALCULO DE COEFICIENTES LAMBDA DEL METODO DE THIESSEN MODIFICADO PARA LA CUENCA DEL LAGO DE COATEPEQUE

AREA DE CUENCA (km²) 64.25

ESTACION	AREA DEL POLIGONO km ²										ALFA
		1750-1800	1800-1850	1850-1900	1900-1950	1950-2000	2000-2050	2050-2100	2100-2150	2150-2200	
A18	14.15							0.19	8.59	5.37	0.2202
A19	33.63	4.21	3.47	3.46	4.05	4.67	5.72	7.77	0.28		0.5234
A21	16.47	1.58	2.57	3.27	3.23	2.79	2.69	0.34			0.2563
SUMA	64.25										1.0000
PRECIPITACION MEDIA		1,775.00	1,825.00	1,875.00	1,925.00	1,975.00	2,025.00	2,075.00	2,125.00	2,175.00	

ESTACION	PREMEDIA POLIGONO	P _i X A _i (MEDIA)	SUMA P _i X A _i	PRECIP ISOYETA	BETA	LAMBDA								
A18	2,305.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	337.25	15,247.25	9,531.75	25,116.25	1,775.00	0.7700	0.1696
A19	1,787.40	7,472.75	6,159.25	6,141.50	7,188.75	8,289.25	10,153.00	13,791.75	497.00	0.00	59,693.25	1,775.00	0.9931	0.5198
A21	1,801.60	2,804.50	4,561.75	5,804.25	5,733.25	4,952.25	4,774.75	603.50	0.00	0.00	29,234.25	1,775.00	0.9852	0.2526

ESTACION	PREMEDIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A18	2,305.30	4.3	7.5	20.8	68.0	255.7	379.5	379.1	424.9	396.8	291.6	63.3	13.8
A19	1,787.40	2.4	3.8	15.2	53.1	207.2	277.2	316.5	317.3	295.1	244.8	47.1	7.7
A21	1,801.60	1.1	4.8	10.9	60.5	212.3	308.8	291.9	342.1	294.0	233.4	36.4	5.4
PRECIPITACION MEDIA		2.3	4.5	14.2	54.4	204.7	286.4	302.5	323.4	294.9	235.6	44.4	7.7

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN, 2021.

Evapotranspiración promedio para Cuenca del Lago de Coatepeque (Serie temporal 1981-2010).

CALCULO DE COEFICIENTES LAMBDA DEL METODO DE THIE SSEN MODIFICADO PARA LA CUENCA DEL LAGO DE COATEPEQUE

AREA DE CUENCA (km²) 64.25

ESTACION	AREA DEL POLIGONO km ²									ALFA
		1300-1350	1350-1400	1400-1450	1450-1500	1500-1550	1550-1600	1600-1650	1650-1700	
A37	8.44						0.44	3.83	4.17	0.1314
A18	55.81	3.27	10.26	10.57	10.24	9.31	3.56	8.56	0.04	0.8686
SUMA	64.25									1.0000
EVAPOTRANSPIRACION MEDIA		1,325.00	1,375.00	1,425.00	1,475.00	1,525.00	1,575.00	1,625.00	1,675.00	

ESTACION	ETPMEDIA POLIGONO	ETP _i X A _i (MEDIA)	SUMA ETP _i X A _i	ETP ISOYETA	BETA	LAMBDA							
A37	1,851.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	693.00	6,223.75	6,984.75	13,901.50	1,647.10	0.8898	0.1169
A18	1,194.00	4,332.75	14,107.50	15,062.25	15,104.00	14,197.75	5,607.00	13,910.00	67.00	82,388.25	1,476.23	1.2364	1.0740

ESTACION	ETPMEDIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A37	1,851.00	137.5	143.3	182.4	186.3	175.5	156.6	165.3	163.6	147.2	138.7	126.0	128.2
A18	1,194.00	80.8	89.8	117.2	122.0	117.9	107.0	111.8	112.2	98.9	86.7	75.0	74.6
EVAPOTRANSPIRACION MEDIA		102.9	113.2	147.2	152.8	147.2	133.2	139.4	139.6	123.4	109.4	95.3	95.1
EVAPORACIÓN LAGO		118.3	130.2	169.2	175.7	161.9	146.5	153.3	153.6	135.8	120.3	109.6	109.3

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN, 2021.

ANEXO 2. INVENTARIO DE POZOS Y MANANTIALES

Inventario de pozos perforados y excavados en la Cuenca del Lago de Coatepeque y sus alrededores.

ID	Coordenada Oeste (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (msnm)	Profundidad (m)	NE (m)	Dentro de la cuenca
PE1	443702.35	305642.30	758.00	31.00	28.00	X
PE2	443672.10	305550.11	754.00	35.00	30.00	X
PE3	443672.03	305519.46	757.00	17.00	16.20	X
PP4	443067.10	303523.27	758.00	86.00	22.00	X
PP5	443067.10	303523.27	758.00	80.00	22.00	X
PE6	443500.48	306560.63	760.00	25.00	23.40	X
PE7	440809.56	307955.89	802.00	31.00	30.40	X
PE8	438087.51	304371.78	758.00	30.00	28.00	X
PE9	438578.30	301636.22	749.00	23.00	22.00	X
PP10	440414.45	307970.95	800.00	150.00	46.00	X
PP11	440330.00	307998.00	810.00	154.00	49.90	X
PE12	441296.70	308056.79	832.00	40.08	37.50	X
PP13	434738.00	301241.00	1426.00	213.36	64.01	X
PP14	438163.00	299177.00	945.00	213.66	64.01	
PP15	438350.00	303550.00	760.00	60.96	15.19	X
PP16	438390.00	303480.00	759.00	54.02	17.98	X
PP17	439744.00	300652.00	1041.00	140.00	12.50	X
PP18	440424.00	307972.00	801.00	60.00	0.00	X
PP19	440435.00	307954.00	800.00	86.35	42.18	X
PP20	440500.00	307800.00	770.00	74.18	38.12	X
PP21	441036.00	296962.00	742.00	500.00	70.00	X
PP22	443038.00	303544.00	745.00	90.00	0.00	X
PP23	443450.00	304100.00	813.00	67.72	35.77	X
PP24	443785.00	304911.00	792.00	80.00	0.00	X
PP25	444930.00	312000.00	745.00	123.44	54.88	
PP26	448311.00	306579.00	715.00	0.00	0.00	
PP27	448830.00	306041.00	676.00	121.92	2.29	
PP28	442372.00	314834.00	710.00	152.40	100.15	
PP29	438869.00	295925.00	753.00	700.00	91.00	
PP30	451000.00	301000.00	504.00	43.00	5.79	
PP31	429347.00	317042.00	741.00	67.50	48.80	
PP32	431400.00	316000.00	779.00	112.17	85.04	

ID	Coordenada Oeste (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (msnm)	Profundidad (m)	NE (m)	Dentro de la cuenca
PP33	431520.00	317240.00	743.00	139.02	48.42	
PP34	438008.00	314939.00	769.00	N.D.	128.76	
PP35	438476.00	315342.00	760.00	207.26	128.73	
PP36	438787.00	315588.00	742.00	N.D.	100.00	
PP37	440564.00	315673.00	726.00	186.69	108.20	
PP38	441587.00	314134.00	758.00	63.00	60.00	
PP39	446050.00	314217.00	645.00	189.03	87.40	

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

Inventario de manantiales en la Cuenca del Lago de Coatepeque y sus alrededores.

ID	Coordenada Oeste (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (msnm)
M1	437837.00	301267.00	888.00
M2	438379.00	302151.00	733.00
M3	438314.00	297981.00	886.00
M4	437940.00	297712.00	931.00
M5	450661.00	303271.00	545.00
M6	446014.00	311613.00	729.00
M7	445249.00	312818.00	703.00
M8	447936.00	296963.00	501.00
M9	429250.00	294750.00	587.00
M10	450756.00	299470.00	516.00
M11	448556.00	296963.00	484.00

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

Aforo de manantial M1

Nº	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)
1	3.70	42.93	0.087
2	3.70	40.99	0.090
3	3.70	41.50	0.089
4	3.70	50.00	0.074

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3. NIVELES PIEZOMÉTRICOS

Niveles Piezométricos de Fuentes de Agua

ID	Coordenada Oeste (m)	Coordenada Norte (m)	Nivel Piezométrico (msnm)
PE1	443702.35	305642.30	730.35
PE2	443672.10	305550.11	724.00
PE3	443672.03	305519.46	741.20
PP4	443067.10	303523.27	736.00
PP5	443067.10	303523.27	736.00
PE6	443500.48	306560.63	737.05
PE7	440809.56	307955.89	771.80
PE8	438087.51	304371.78	730.85
PE9	438578.30	301636.22	727.60
PP10	440414.45	307970.95	754.75
PP11	440330.00	307998.00	760.10
PE12	441296.70	308056.79	794.50
PP13	434738.00	301241.00	1361.99
PP14	438163.00	299177.00	880.99
PP15	438350.00	303550.00	744.81
PP16	438390.00	303480.00	741.02
PP17	439744.00	300652.00	1028.50
PP18	440424.00	307972.00	801.00
PP19	440435.00	307954.00	757.82
PP20	440500.00	307800.00	731.88
PP21	441036.00	296962.00	672.00
PP22	443038.00	303544.00	745.00
PP23	443450.00	304100.00	777.23
PP24	443785.00	304911.00	792.00
PP25	444930.00	312000.00	690.12
PP26	448311.00	306579.00	715.00
PP27	448830.00	306041.00	673.71
PP28	442372.00	314834.00	609.85
PP29	438869.00	295925.00	662.00
PP30	451000.00	301000.00	498.21
PP31	429347.00	317042.00	692.20
PP32	431400.00	316000.00	693.96
PP33	431520.00	317240.00	694.58
PP34	438008.00	314939.00	640.24

PP35	438476.00	315342.00	631.27
PP36	438787.00	315588.00	642.00
PP37	440564.00	315673.00	617.80
PP38	441587.00	314134.00	698.00
PP39	446050.00	314217.00	557.60
M1	437837.00	301267.00	888.00
M2	438379.00	302151.00	733.00
M3	438314.00	297981.00	886.00
M4	437940.00	297712.00	931.00
M5	450661.00	303271.00	545.00
M6	446014.00	311613.00	729.00
M7	445249.00	312818.00	703.00
M8	447936.00	296963.00	501.00
M9	429250.00	294750.00	587.00
M10	450756.00	299470.00	516.00
M11	448556.00	296963.00	484.00
LC	Lago de Coatepeque*		738.00
LI	Laguna de Ilamatepec		2000.00

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados durante la maestría.

*Nota: Se consideraron 2481 puntos del Lago de Coatepeque en su perímetro a una cota de 738 msnm.

ANEXO 4. COLUMNAS LITOLÓGICAS, DISEÑO DE POZOS Y PUNTOS DE CONTROL

Columna Litológica del Pozo PP14.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde	Hasta	PP14
0.00	12.19	Aglomerado
12.19	15.24	Toba
15.24	27.43	Lava
27.43	45.72	Toba
45.72	73.15	Lava
73.15	88.39	Piroclastos
88.39	198.12	Lava
198.12	204.22	Piroclastos
204.22	213.66	Sedimento

Columna Litológica del Pozo PP20.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde	Hasta	PP20
0.00	26.00	Piroclastos
26.00	34.00	Lava
34.00	64.00	Piroclastos
64.00	74.18	Lava

Columna Litológica del Pozo PP25.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde (m)	Hasta (m)	PP25
0.00	48.78	Lava
48.78	60.97	Piroclastos
60.97	70.12	Toba
70.12	76.22	Piroclastos
76.22	88.41	Sedimento
88.41	103.66	Piroclastos
103.66	109.75	Sedimento
109.75	115.85	Toba
115.85	121.95	Piroclastos
121.95	123.44	Sedimento

Columna Litológica del Pozo PP27.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde	Hasta	PP27
0.00	19.82	Toba

19.82	94.51	Sedimento
94.51	103.66	Toba
103.66	121.92	Lava

Columna Litológica del Pozo PP28.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde	Hasta	PP28
0.00	18.29	Toba
18.29	36.58	Piroclastos
36.58	54.88	Toba
54.88	60.97	Piroclastos
60.97	97.56	Lava
97.56	103.66	Toba
103.66	118.90	Sedimento
118.90	121.95	Piroclastos
121.95	126.52	Toba
126.52	132.62	Piroclastos
132.62	146.34	Sedimento
146.34	150.91	Piroclastos
150.91	152.40	Toba

Columna Litológica del Pozo PP39.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde (m)	Hasta (m)	PP39
0.00	3.05	Arcilla
3.05	7.62	Toba
7.62	48.77	Piroclastos
48.77	53.34	Toba
53.34	60.96	Lava
60.96	70.10	Aglomerado
70.10	79.25	Lava
79.25	85.34	Aglomerado
85.34	88.39	Lava
88.39	115.82	Aglomerado
115.82	118.87	Arcilla
118.87	131.06	Aglomerado
131.06	155.45	Lava
155.45	158.50	Toba
158.50	161.54	Lava
161.54	170.69	Toba
170.69	173.74	Lava

173.74	182.88	Sedimento
182.88	189.03	Lava

Diseño del Pozo PP11.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde (m)	Hasta (m)	PP11
0.00	60.00	Ciega
60.00	84.00	Rejilla
84.00	90.00	Ciega
90.00	120.00	Rejilla
120.00	126.00	Ciega
126.00	150.00	Rejilla
150.00	154.00	Ciega

Diseño del Pozo PP15.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde (m)	Hasta (m)	PP15
0.00	20.10	Ciega
20.10	27.40	Rejilla
27.40	31.10	Ciega
31.10	45.70	Rejilla
45.70	48.20	Ciega
48.20	60.40	Rejilla
60.40	60.96	Ciega

Diseño del Pozo PP20.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde (m)	Hasta (m)	PP20
0.00	61.10	Ciega
61.10	73.10	Rejilla
73.10	74.18	Ciega

Diseño del Pozo PP23.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde (m)	Hasta (m)	PP23
0.00	49.50	Ciega
49.50	61.70	Rejilla
61.70	67.72	Ciega

Diseño del Pozo PP30.

Profundidad		Nombre del Pozo
Desde (m)	Hasta (m)	PP30
0.00	25.00	Ciega
25.00	42.00	Rejilla

42.00	43.00	Ciega
-------	-------	-------

Características de puntos de control

Punto control	Coordenada Oeste (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (msnm)	Altura (m)
PF1	432446.52	304040.53	2274	650
PF2	432393.60	302783.76	2218	650
PF3	433610.69	303736.26	1827	450
PF4	433253.50	302333.97	1753	450
PF5	434417.67	304768.14	1684	400
PF6	434047.25	302056.15	1440	400
PF7	434946.84	303114.49	1170	300
PF8	435118.82	305522.20	1554	450
PF9	434153.09	300733.23	1476	450
PF10	436428.51	306699.60	1258	450
PF11	438135.07	308022.52	1108	450
PF12	436177.15	300283.44	1221	450
PF13	437367.78	308379.71	1052	500
PF14	438412.89	308591.38	1056	500
PF15	439087.58	308736.90	1020	500
PF16	440238.52	308829.50	1002	500
PF17	437209.03	300508.34	1115	500
PF18	438915.60	300085.00	992	450
PF19	440397.27	300151.15	930	450
PF20	442289.04	301063.96	895	450
PF21	439973.93	299357.40	830	450
PF22	442077.37	299741.05	778	450
PF23	443638.42	300878.76	698	450
PF24	435476.01	304463.87	1303	250
PF25	436415.28	304768.14	1021	250
PF26	437195.80	305482.52	1060	250
PF27	438029.24	306342.41	917	250
PF28	439100.80	306514.39	793	150
PF29	438518.72	307321.37	1020	300
PF30	442011.23	307890.23	778	150
PF31	443439.98	306950.96	789	150
PF32	443731.02	304477.10	779	150
PF33	442778.52	302757.30	796	150
PF34	441019.04	301751.88	841	150
PF35	439418.31	301037.51	863	150

Punto control	Coordenada Oeste (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (msnm)	Altura (m)
PF36	437698.51	301183.03	972	150
PF37	436415.28	301328.55	1105	300
PF38	435092.36	301434.38	1248	300
PF39	443215.08	306157.20	770	100
PF40	438207.83	302625.01	765	100
PF41	438551.79	302677.93	800	100
PF42	439279.40	302439.80	900	250
PF43	439345.55	302849.91	793	250
PF44	439636.59	302373.65	790	250
PF45	438908.98	302373.65	767	250
PF46	439107.42	301976.78	750	250
PF47	437638.98	302069.38	937	250
PF48	437599.29	302519.18	900	200
PF49	438088.77	302003.24	870	200
PF50	437202.42	302016.47	862	200
PF51	437503.02	301613.53	860	200
PF52	438364.05	301527.92	772	150
PF53	436829.46	301964.48	886	200
PF54	436511.96	302758.23	890	200
PF55	436908.83	303710.73	867	200
PF56	438033.32	303168.34	777	150
PF57	437834.88	304120.84	778	150
PF58	437914.25	305443.76	827	175
PF59	438324.36	305734.80	774	175
PF60	440046.80	307245.57	752	150
PF61	440705.61	307618.64	744	150
PF62	441332.68	307864.70	752	150
PF63	442618.55	307483.70	747	110
PF64	443086.87	307047.14	742	110
PF65	443380.56	306237.51	744	110
PF66	443580.32	305695.11	744	110
PF67	443494.33	305258.55	749	110
PF68	443324.20	305268.34	752	100
PF69	436881.58	302828.35	871	150
PF70	436955.67	302606.10	853	150
PF71	435870.92	301518.23	1016	175
PF72	435295.33	302463.84	1045	175

Punto control	Coordenada Oeste (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (msnm)	Altura (m)
PF73	435459.78	303806.88	1114	175
PF74	436487.62	302285.68	896	100
PF75	436282.05	303382.04	952	100
PF76	437159.14	304368.76	850	100
PF77	438392.54	306712.23	1018	200
PF78	439242.22	307178.19	899	150
PF79	440242.65	307644.14	772	175
PF80	443764.70	305670.69	763	120
PF81	442450.74	301957.49	950	250
PF82	443416.47	302751.24	1075	400
PF83	444382.20	304669.47	997	400
PF84	443866.26	307447.60	955	400
PF85	442186.15	308677.92	1079	400
PF86	438680.42	301891.34	718	100
PF87	438918.54	303346.55	689	100
PF88	438534.89	304656.24	673	100
PF89	438997.92	305780.72	652	100
PF90	439976.88	306653.85	660	100
PF91	441313.02	307421.14	687	100
PF92	442212.61	307328.54	690	100
PF93	443059.28	306481.87	710	100
PF94	443284.17	305674.89	701	100
PF95	443151.88	304722.39	685	100
PF96	442569.80	303571.45	655	100
PF97	441405.63	302685.09	641	100
PF98	440016.56	302036.86	687	100
PF99	440215.00	304100.62	636	100
PF100	441643.75	305714.58	634	100

Estratos de puntos de control

Punto de Control	Inicio	Final	Estrato
PC1	0	450	s2
PC1	450	650	s1
PC2	0	450	s2
PC2	450	650	s1
PC3	0	250	s2
PC3	250	450	s1
PC4	0	250	s2

Punto de Control	Inicio	Final	Estrato
PC4	250	450	s1
PC5	0	400	s1
PC6	0	400	s1
PC7	0	300	s1
PC8	0	250	s2
PC8	250	450	s1
PC9	0	250	s2
PC9	250	450	s1
PC10	0	250	s2
PC10	250	450	s1
PC11	0	250	s2
PC11	250	450	s1
PC12	0	250	s2
PC12	250	450	s1
PC13	0	50	s3a
PC13	50	250	s2
PC13	250	500	s1
PC14	0	50	s3a
PC14	50	250	s2
PC14	250	500	s1
PC15	0	25	s5c
PC15	25	75	s3a
PC15	75	250	s2
PC15	250	500	s1
PC16	0	25	s5c
PC16	25	75	s3a
PC16	75	250	s2
PC16	250	500	s1
PC17	0	25	s5c
PC17	25	75	s3a
PC17	75	250	s2
PC17	250	500	s1
PC18	0	25	s5c
PC18	25	75	s3a
PC18	75	200	s2
PC18	200	450	s1
PC19	0	25	s5c
PC19	25	75	s3a
PC19	75	200	s2
PC19	200	450	s1

Punto de Control	Inicio	Final	Estrato
PC20	0	25	s5c
PC20	25	75	s3a
PC20	75	200	s2
PC20	200	450	s1
PC21	0	25	s5c
PC21	25	75	s3a
PC21	75	200	s2
PC21	200	450	s1
PC22	0	25	s5c
PC22	25	75	s3a
PC22	75	200	s2
PC22	200	450	s1
PC23	0	25	s5c
PC23	25	75	s3a
PC23	75	200	s2
PC23	200	450	s1
PC24	0	250	s1
PC25	0	250	s1
PC26	0	250	s1
PC27	0	250	s1
PC28	0	150	s1
PC29	0	300	s1
PC30	0	150	s1
PC31	0	150	s1
PC32	0	150	s1
PC33	0	150	s1
PC34	0	150	s1
PC35	0	150	s1
PC36	0	150	s1
PC37	0	300	s1
PC38	0	300	s1
PC39	0	25	s3b
PC39	25	45	s3a
PC39	45	55	s2
PC39	55	100	s1
PC40	0	30	s3b
PC40	30	50	s3a
PC40	50	60	s2
PC40	60	100	s1
PC41	0	30	s3b

Punto de Control	Inicio	Final	Estrato
PC41	30	50	s3a
PC41	50	60	s2
PC41	60	100	s1
PC42	0	75	s3b
PC42	75	100	s3a
PC42	100	150	s2
PC42	150	250	s1
PC43	0	75	s3b
PC43	75	100	s3a
PC43	100	150	s2
PC43	150	250	s1
PC44	0	75	s3b
PC44	75	100	s3a
PC44	100	150	s2
PC44	150	250	s1
PC45	0	75	s3b
PC45	75	100	s3a
PC45	100	150	s2
PC45	150	250	s1
PC46	0	75	s3b
PC46	75	100	s3a
PC46	100	150	s2
PC46	150	250	s1
PC47	0	75	s3b
PC47	75	105	s3a
PC47	105	170	s2
PC47	170	250	s1
PC48	0	60	s3b
PC48	60	100	s3a
PC48	100	160	s2
PC48	160	200	s1
PC49	0	60	s3b
PC49	60	100	s3a
PC49	100	160	s2
PC49	160	200	s1
PC50	0	60	s3b
PC50	60	100	s3a
PC50	100	160	s2
PC50	160	200	s1
PC51	0	60	s3b

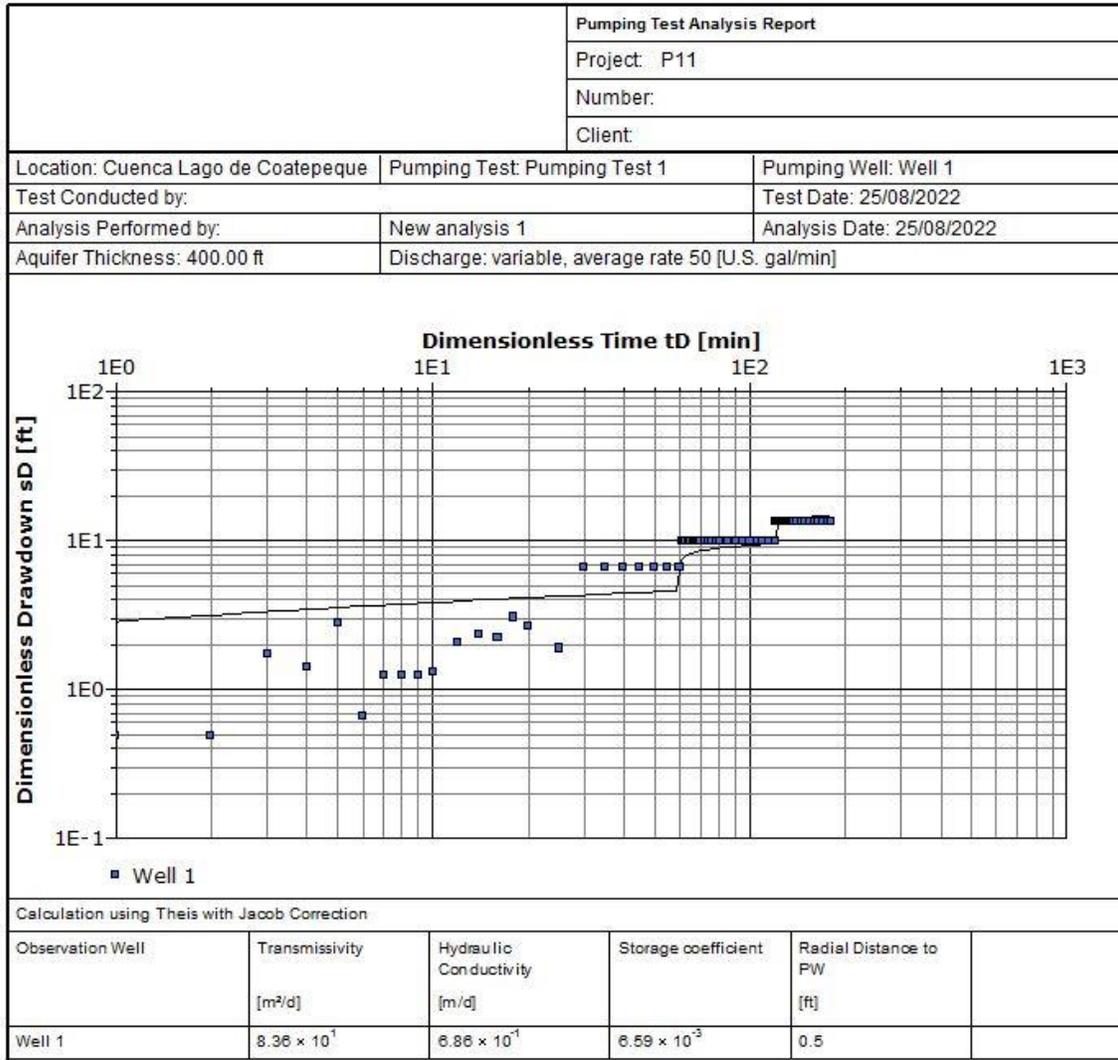
Punto de Control	Inicio	Final	Estrato
PC51	60	100	s3a
PC51	100	160	s2
PC51	160	200	s1
PC52	0	40	s3a
PC52	40	90	s2
PC52	90	150	s1
PC53	0	60	s3a
PC53	60	110	s2
PC53	110	200	s1
PC54	0	60	s3a
PC54	60	110	s2
PC54	110	200	s1
PC55	0	60	s3a
PC55	60	110	s2
PC55	110	200	s1
PC56	0	40	s3a
PC56	40	90	s2
PC56	90	150	s1
PC57	0	40	s3a
PC57	40	90	s2
PC57	90	150	s1
PC58	0	25	s3a
PC58	25	50	s2
PC58	50	175	s1
PC59	0	25	s3a
PC59	25	50	s2
PC59	50	175	s1
PC60	0	25	s3a
PC60	25	75	s2
PC60	75	150	s1
PC61	0	25	s3a
PC61	25	75	s2
PC61	75	150	s1
PC62	0	25	s3a
PC62	25	75	s2
PC62	75	150	s1
PC63	0	20	s3a
PC63	20	50	s2
PC63	50	110	s1
PC64	0	20	s3a

Punto de Control	Inicio	Final	Estrato
PC64	20	50	s2
PC64	50	110	s1
PC65	0	20	s3a
PC65	20	50	s2
PC65	50	110	s1
PC66	0	20	s3a
PC66	20	50	s2
PC66	50	110	s1
PC67	0	20	s3a
PC67	20	50	s2
PC67	50	110	s1
PC68	0	40	s2
PC68	40	100	s1
PC69	0	15	s5b
PC69	15	40	s3a
PC69	40	100	s2
PC69	100	150	s1
PC70	0	15	s5b
PC70	15	40	s3a
PC70	40	100	s2
PC70	100	150	s1
PC71	0	40	s5c
PC71	40	100	s2
PC71	100	175	s1
PC72	0	40	s5c
PC72	40	100	s2
PC72	100	175	s1
PC73	0	40	s5c
PC73	40	100	s2
PC73	100	175	s1
PC74	0	30	s5c
PC74	30	50	s2
PC74	50	100	s1
PC75	0	30	s5c
PC75	30	50	s2
PC75	50	100	s1
PC76	0	30	s5c
PC76	30	50	s2
PC76	50	100	s1
PC77	0	50	s5c

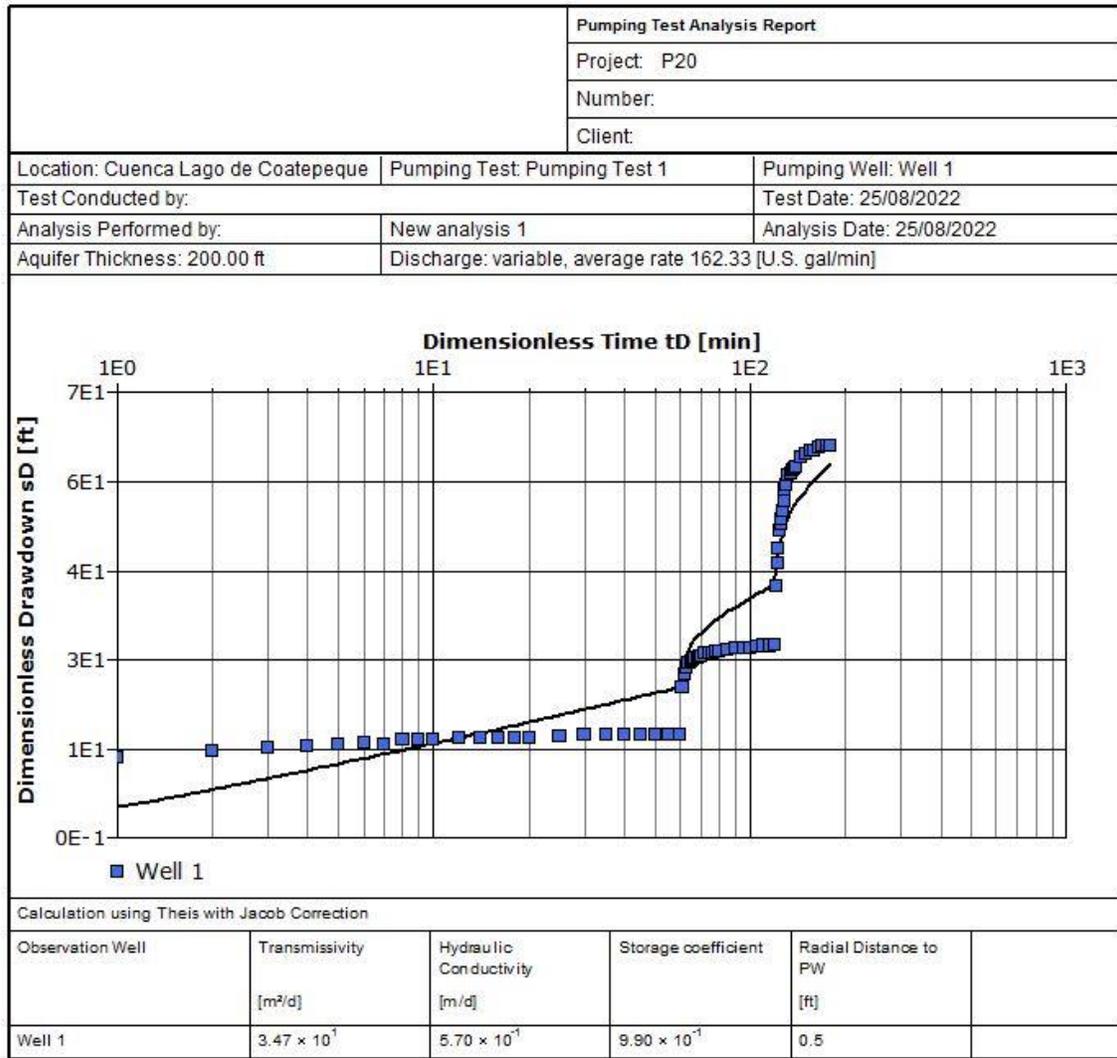
Punto de Control	Inicio	Final	Estrato
PC77	50	100	s2
PC77	100	200	s1
PC78	0	40	s5c
PC78	40	70	s2
PC78	70	150	s1
PC79	0	50	s5c
PC79	50	100	s2
PC79	100	175	s1
PC80	0	35	s5c
PC80	35	70	s2
PC80	70	120	s1
PC81	0	75	s2
PC81	75	250	s1
PC82	0	75	s3a
PC82	75	125	s2
PC82	125	400	s1
PC83	0	75	s3a
PC83	75	125	s2
PC83	125	400	s1
PC84	0	75	s3a
PC84	75	125	s2
PC84	125	400	s1
PC85	0	75	s3a
PC85	75	125	s2
PC85	125	400	s1
PC86	0	100	s1
PC87	0	100	s1
PC88	0	100	s1
PC89	0	100	s1
PC90	0	100	s1
PC91	0	100	s1
PC92	0	100	s1
PC93	0	100	s1
PC94	0	100	s1
PC95	0	100	s1
PC96	0	100	s1
PC97	0	100	s1
PC98	0	100	s1
PC99	0	100	s1
PC100	0	100	s1

ANEXO 5. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO DE POZOS

Análisis prueba de bombeo de pozo PP11.



Análisis prueba de bombeo de pozo PP20.



ANEXO 6. CÁLCULO DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS

Balance Hídrico de Suelos en miembro geológico s1.

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Cuenca del Lago de Coatepeque

Fecha: agosto,2022

Textura de Suelo: S1

Simbología

fb: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

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

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

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kf: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que in filta.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fb [mm/d]	49.00
Kp [0.01%]	0.08
Kv [0.01%]	0.18
Kf [0.01%]	0.3088
I [0.01%] =	0.5488
DS (g/cm ³):	1.50
PR (mm)	390.00
HSi (mm)	83.60
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	14.29	83.60
PM	6.15	35.98
(CC-PM)	8.14	47.62

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	2.25	4.46	14.18	54.41	204.68	288.43	302.52	323.38	294.93	235.84	44.41	7.71	1775.00
Ret (mm)	2.25	4.46	5.00	6.53	24.56	34.37	36.30	38.81	35.39	28.28	5.33	5.00	226.28
Pi (mm)	0.00	0.00	5.04	26.27	98.81	138.27	146.04	156.11	142.37	113.75	21.44	1.49	849.58
ESC (mm)	0.00	0.00	4.14	21.61	81.31	113.79	120.18	128.47	117.16	93.61	17.64	1.22	699.14
ETP (mm)	102.89	113.2	147.15	152.82	147.18	133.22	139.39	139.6	123.43	109.36	95.31	95.08	1498.63
HSi (mm)	36.02	35.98	35.98	35.98	35.98	61.20	83.60	83.60	83.60	83.60	83.60	57.38	
C1	0.00	0.00	0.11	0.55	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	0.00	0.64	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	0.04	0.00	5.04	26.27	98.81	163.49	193.66	203.73	189.99	161.37	69.06	22.89	
ETR (mm)	0.04	0.00	5.04	26.27	73.59	108.95	139.39	139.60	123.43	109.36	47.66	22.85	796.17
HSf (mm)	35.98	35.98	35.98	35.98	61.20	83.60	83.60	83.60	83.60	83.60	57.38	36.02	
DCC (mm)	47.62	47.62	47.62	47.62	22.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.22	47.58	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.92	6.65	16.51	18.94	4.39	0.00	0.00	53.42
NR (mm)	150.47	160.82	189.73	174.17	95.99	24.27	0.00	0.00	0.00	0.00	73.87	119.81	989.14

Balance Hídrico de Suelos en miembro geológico s2.

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Cuenca del Lago de Coatepeque

Fecha: agosto,2022

Textura de Suelo: S2

Simbología

f_b: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

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

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

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kf: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que in filta.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

f_b [mm/d]

65.00

Kp [0.01%]

0.08

Kv [0.01%]

0.20

Kf [0.01%]

0.3816

I [0.01%] =

0.6416

DS (g/cm³):

1.50

PR (mm)

350.00

HSi (mm)

83.13

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 14.21 83.13

PM 6.12 35.80

(CC-PM) 8.09 47.33

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	2.25	4.46	14.16	54.41	204.68	286.43	302.52	323.38	294.93	235.64	44.41	7.71	1775.00
Ret (mm)	2.25	4.46	5.00	6.53	24.56	34.37	36.30	38.81	35.39	28.28	5.33	5.00	226.28
Pi (mm)	0.00	0.00	5.89	30.72	115.56	161.71	170.79	182.57	166.51	133.03	25.07	1.74	993.58
ESC (mm)	0.00	0.00	3.29	17.16	64.56	90.35	95.43	102.01	93.03	74.33	14.01	0.97	555.14
ETP (mm)	102.89	113.2	147.15	152.82	147.16	133.22	139.39	139.6	123.43	109.36	95.31	95.08	1498.63
HSi (mm)	35.80	35.80	35.80	35.80	35.80	77.77	83.13	83.13	83.13	83.13	83.13	60.55	
C1	0.00	0.00	0.12	0.65	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.56	
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	5.89	30.72	115.56	203.67	218.12	229.90	213.83	180.36	72.40	26.48	
ETR (mm)	0.00	0.00	5.89	30.72	73.59	133.22	139.39	139.60	123.43	109.36	47.66	26.48	829.33
HSf (mm)	35.80	35.80	35.80	35.80	77.77	83.13	83.13	83.13	83.13	83.13	60.55	35.80	
DCC (mm)	47.33	47.33	47.33	47.33	5.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.58	47.33	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.13	31.40	42.97	43.08	23.67	0.00	0.00	164.25
NR (mm)	150.22	160.53	188.59	169.43	78.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.24	115.92	933.87

Balance Hídrico de Suelos en miembro geológico s3a.

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Cuenca del Lago de Coatepeque
Fecha: agosto,2022

Textura de Suelo: S3A

Simbología

f: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

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

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

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kf: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que in filta.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de Iluvia

f [mm/d]

60.00

Kp [0.01%]

0.06

Kv [0.01%]

0.15

Kf [0.01%]

0.3609

I [0.01%] =

0.5709

DS (g/cm³):

1.44

PR (mm)

390.00

HSi (mm)

112.88

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 20.10 112.88

PM 9.09 51.05

(CC-PM) 11.01 61.83

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	2.25	4.46	14.18	54.41	204.68	286.43	302.52	323.38	294.93	235.64	44.41	7.71	1775.00
Ret (mm)	2.25	4.46	5.00	6.53	24.56	34.37	36.30	38.81	35.39	28.28	5.33	5.00	226.28
Pi (mm)	0.00	0.00	5.24	27.34	102.84	143.91	152.00	162.48	148.18	118.39	22.31	1.55	884.24
ESC (mm)	0.00	0.00	3.94	20.54	77.28	108.15	114.22	122.10	111.35	88.97	16.77	1.16	664.48
ETP (mm)	102.89	113.2	147.15	152.82	147.16	133.22	139.39	139.6	123.43	109.36	95.31	95.08	1498.63
HSi (mm)	59.84	52.53	51.17	51.05	51.05	80.30	112.88	112.88	112.88	112.88	112.88	87.54	
C1	0.14	0.02	0.09	0.44	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	8.79	1.48	5.37	27.34	102.84	173.16	213.83	224.31	210.02	180.23	84.15	38.04	
ETR (mm)	7.32	1.35	5.37	27.34	73.59	109.64	139.39	139.60	123.43	109.36	47.66	29.25	813.28
HSf (mm)	52.53	51.17	51.05	51.05	80.30	112.88	112.88	112.88	112.88	112.88	87.54	59.84	
DCC (mm)	60.36	61.71	61.83	61.83	32.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.34	53.04	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.89	12.61	22.88	24.75	9.03	0.00	0.00	70.96
NR (mm)	155.93	173.56	203.62	187.31	106.17	23.58	0.00	0.00	0.00	0.00	73.00	118.87	1042.04

Balance Hídrico de Suelos en miembro geológico s3b.

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Cuenca del Lago de Coatepeque
Fecha: agosto,2022

Textura de Suelo: S3B

Simbología

f_i: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

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

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

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Ki: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que in filta.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

f_i [mm/d]

68.00

Kp [0.01%]

0.06

Kv [0.01%]

0.19

Ki [0.01%]

0.3931

I [0.01%] =

0.6431

DS (g/cm³):

1.49

PR (mm)

390.00

HSi (mm)

86.12

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 14.82 86.12

PM 6.41 37.25

(CC-PM) 8.41 48.87

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	2.25	4.46	14.18	54.41	204.88	286.43	302.52	323.38	294.93	235.64	44.41	7.71	1775.00
Ret (mm)	2.25	4.46	5.00	6.53	24.56	34.37	36.30	38.81	35.39	28.28	5.33	5.00	226.28
Pi (mm)	0.00	0.00	5.90	30.79	115.84	162.11	171.21	183.02	166.92	133.36	25.13	1.74	996.04
ESC (mm)	0.00	0.00	3.28	17.09	64.28	89.95	95.00	101.55	92.62	74.00	13.95	0.97	552.68
ETP (mm)	102.89	113.2	147.15	152.82	147.18	133.22	139.39	139.6	123.43	109.36	95.31	95.08	1498.63
HSi (mm)	38.01	37.25	37.25	37.25	37.25	79.50	86.12	86.12	86.12	86.12	86.12	63.80	
C1	0.02	0.00	0.12	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	0.76	0.00	5.90	30.79	115.84	204.36	220.08	231.89	215.79	182.23	74.00	28.09	
ETR (mm)	0.76	0.00	5.90	30.79	73.59	133.22	139.39	139.60	123.43	109.36	47.66	27.33	831.04
HSf (mm)	37.25	37.25	37.25	37.25	79.50	86.12	86.12	86.12	86.12	86.12	63.80	38.01	
DCC (mm)	48.87	48.87	48.87	48.87	6.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.52	48.11	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.27	31.82	43.42	43.49	24.00	0.00	0.00	165.00
NR (mm)	151.00	162.07	190.12	170.90	80.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.18	115.86	940.32

Balance Hídrico de Suelos en miembro geológico s5b.

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Cuenca del Lago de Coatepeque

Fecha: agosto,2022

Textura de Suelo: S5B

Simbología

f: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

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

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

Kp: Factor por pendiente (ver léame)

Kv: Factor por vegetación (ver léame)

Kf: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que in filta.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

f [mm/d]

71.00

Kp [0.01%]

0.06

Kv [0.01%]

0.18

Kf [0.01%]

0.4042

I [0.01%]=

0.6442

DS (g/cm³):

1.48

PR (mm)

390.00

HSi (mm)

90.33

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 15.85 90.33

PM 8.84 39.48

(CC-PM) 8.81 50.85

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	2.25	4.46	14.18	54.41	204.68	286.43	302.52	323.38	294.93	235.64	44.41	7.71	1775.00
Ret [mm]	2.25	4.46	5.00	6.53	24.56	34.37	36.30	38.81	35.39	28.28	5.33	5.00	226.28
Pi (mm)	0.00	0.00	5.91	30.84	116.03	162.38	171.50	183.32	167.20	133.58	25.18	1.75	997.69
ESC (mm)	0.00	0.00	3.27	17.04	64.09	89.68	94.72	101.25	92.34	73.78	13.90	0.96	551.03
ETP (mm)	102.89	113.2	147.15	152.82	147.16	133.22	139.39	139.6	123.43	109.36	95.31	95.08	1498.63
HSi (mm)	41.44	39.48	39.48	39.48	39.48	81.92	90.33	90.33	90.33	90.33	90.33	67.85	
C1	0.04	0.00	0.12	0.61	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59	
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)	1.96	0.00	5.91	30.84	116.03	204.82	222.35	234.17	218.05	184.44	76.03	30.12	
ETR (mm)	1.96	0.00	5.91	30.84	73.59	133.22	139.39	139.60	123.43	109.36	47.86	28.16	833.12
HSf (mm)	39.48	39.48	39.48	39.48	81.92	90.33	90.33	90.33	90.33	90.33	67.85	41.44	
DCC (mm)	50.85	50.85	50.85	50.85	8.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.48	48.89	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.75	32.11	43.72	43.77	24.22	0.00	0.00	164.57
NR (mm)	151.78	164.05	192.09	172.83	82.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.13	115.81	948.89

Balance Hídrico de Suelos en miembro geológico s5c.

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Cuenca del Lago de Coatepeque
Fecha: agosto,2022

Textura de Suelo: S5C

Simbología

f: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raíces.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kf: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que in filta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

f [mm/d]	88.00	
Kp [0.01%]	0.06	
Kv [0.01%]	0.18	
Kf [0.01%]	0.4531	
I [0.01%] =	0.6931	
DS (g/cm ³):	1.47	
PR (mm)	350.00	
HSi (mm)	101.42	
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	17.89	101.42
PM	7.86	45.06
(CC-PM)	9.83	56.36

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	2.25	4.46	14.18	54.41	204.68	286.43	302.52	323.38	294.93	235.64	44.41	7.71	1775.00
Ret (mm)	2.25	4.46	5.00	6.53	24.56	34.37	36.30	38.81	35.39	28.28	5.33	5.00	226.28
Pi (mm)	0.00	0.00	6.36	33.18	124.83	174.69	184.51	197.23	179.88	143.72	27.09	1.88	1073.37
ESC (mm)	0.00	0.00	2.82	14.70	55.28	77.37	81.71	87.35	79.66	63.65	12.00	0.83	475.35
ETP (mm)	102.89	113.2	147.15	152.82	147.18	133.22	139.39	139.6	123.43	109.36	95.31	95.08	1498.63
HSi (mm)	50.95	45.57	45.06	45.06	45.06	96.31	101.42	101.42	101.42	101.42	101.42	80.85	
C1	0.10	0.01	0.11	0.59	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.67	
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)	5.89	0.51	6.36	33.18	124.83	225.94	240.88	253.58	236.23	200.07	83.44	37.66	
ETR (mm)	5.38	0.51	6.36	33.18	73.59	133.22	139.39	139.60	123.43	109.36	47.66	31.77	843.46
HSf (mm)	45.57	45.06	45.06	45.06	96.31	101.42	101.42	101.42	101.42	101.42	80.85	50.95	
DCC (mm)	55.84	56.36	56.36	56.36	5.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.57	50.46	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.36	45.12	57.63	56.45	34.36	0.00	0.00	229.91
NR (mm)	153.35	169.04	197.14	175.99	78.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.22	113.77	956.23

ANEXO 7. MEMORIA DE NIVELES DE AGUA DEL LAGO DE COATEPEQUE

Niveles de agua del Lago de Coatepeque

Año/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	748.06				747.62	747.79	747.97	748.19	748.41	748.53	748.63	748.48
2014	748.3	748.17	748.1	747.99	748.07	748.42	748.46	748.56	748.79	748.87	748.87	748.79
2015	748.62	748.45	748.32	748.26	748.27	748.31	748.3	748.36	748.49	748.63	748.74	748.64
2016	748.52	748.31	748.18	748.08	748.03		748.35					748.29
2017	748.11	747.96	747.83	747.68	747.62				748.23	748.28	748.12	747.92
2018		747.46			747.37	747.36	747.35	747.43	747.72	747.82	747.92	
2019		747.31	747.31			747.26	747.26	747.33	747.34	747.58	747.52	
2020						747.12	747.24	747.35	747.5	747.58	747.55	747.49
N*	748.48	748.31	748.20	748.11	748.12	748.17	748.24	748.37	748.56	748.68	748.75	748.64
N	738.24	738.07	737.96	737.87	737.88	737.93	738.00	738.13	738.32	738.44	738.51	738.40

Fuente: Elaboración propia con datos MARN, 2020.

Donde: N* es el nivel de agua del Lago de Coatepeque sin la elevación de referencia de batimetría y N es el nivel de agua del Lago de Coatepeque referenciado.

Variación de volumen de almacenamiento del Lago de Coatepeque

ID	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N	738.24	738.07	737.96	737.87	737.88	737.93	738.00	738.13	738.32	738.44	738.51	738.40
Volumen (MMC)	1815.12	1812.69	1810.26	1807.83	1807.83	1807.83	1810.26	1812.69	1817.55	1819.98	1822.41	1819.98
Variación	7.29	4.86	2.43	0.00	0.00	0.00	2.43	4.86	9.71	12.15	14.58	12.15

Fuente: Elaboración propia con datos MARN, 2020.