

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIDAD DE POSGRADOS**



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA
DE ÁREAS DE RECARGA EN EL ACUÍFERO DE
SAN SALVADOR**

PRESENTADO POR:

MARCIA LIZETH BARRERA DE CALDERÓN

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

MAESTRA EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2010.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

:

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA

SECRETARIO GENERAL

:

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO

:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO

:

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

UNIDAD DE POSGRADOS

JEFA DE UNIDAD

:

MSc. PATRICIA HAYDÉE ESTRADA DE LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIDAD DE POSGRADOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRA EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS

Título

:

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPICA
DE AREAS DE RECARGA EN EL ACUÍFERO DE
SAN SALVADOR**

Presentado por

:

MARCIA LIZETH BARRERA DE CALDERÓN

Trabajo de graduación Aprobado por

:

Docente Director

:

MSc. JULIO RENÉ ACOSTA MARTÍNEZ

San Salvador, Septiembre de 2010.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director

:

MSc. JULIO RENÉ ACOSTA MARTÍNEZ

RESUMEN

La zona del acuífero de San Salvador delimitada por la microcuenca alta del río Acelhuate fue estudiada hidrogeológicamente y caracterizada mediante técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas. Este acuífero es una de las tres fuentes principales de abastecimiento de agua del área metropolitana de San Salvador, las otras dos corresponden a los sistemas de abastecimiento de agua “Zona Norte” y “Las Pavas”

Una unidad acuífera fracturada de lavas basálticas y andesíticas con intercalaciones de piroclastos conectada con una unidad acuífera porosa de piroclastos intercalados con sedimentos y tobas fueron identificados y delimitados en un mapa a partir de los resultados de un modelo litológico y del análisis de informes de perforación de pozos de producción ubicados en la zona. El flujo de agua subterránea ocurre en dos sistemas divididos por una posible falla en dirección NNO-SSE, estos flujos se encuentran fuertemente influenciados por el sistema geológico estructural presente en el área de estudio y traspasan los límites hidrológicos de la microcuenca. Zonas con transmisividades entre 1500 m²/día y 4000 m²/día se ubican en los pozos construidos en fallas geológicas y dentro de la unidad acuífera fracturada; transmisividades menores a 800 m²/día predominan en el acuífero poroso. El análisis hidrogeoquímico sugiere un aporte a la recarga proveniente de los sistemas de conducción de aguas residuales domésticas e industriales en la zona más antigua de la ciudad y los resultados isotópicos permitieron delimitar en un mapa de la microcuenca, las principales zonas de recarga en elevaciones superiores a los 786 msnm.

Partiendo de los resultados obtenidos con la investigación, es requerido el inicio de un programa de monitoreo orientado hacia la evaluación de la calidad del agua del acuífero y su relación con las fuentes potenciales de contaminación, la variación de los niveles potenciométricos de agua en los dos sistemas de flujo identificados, la variación de la composición isotópica en las aguas de importación que llegan a la microcuenca, así como el enriquecimiento de la información del modelo litológico obtenido.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por su amor y acompañamiento en esta nueva etapa de mi vida... como siempre lo ha hecho.

A Sam, mi amado esposo, mis hijos Willito y Samo y mi familia, por su solidaridad, amor, paciencia y confianza depositada.

A mi asesor, Julio Acosta por todo el apoyo y transferencia de conocimientos para lograr los objetivos planteados.

A Ramón Aravena, por compartir sus conocimientos científicos, asesorarme con los resultados y apoyarme en la realización de los análisis de isótopos ambientales en el Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo.

Al Proyecto ACIDI Manejo de Recursos Hídricos en El Salvador y Honduras, por la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos y por todo el apoyo recibido en todo el proceso de formación de la maestría.

A la Unidad de Posgrados de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UES por su apoyo y pronta respuesta a mis solicitudes para la realización del trabajo.

A la ANDA, especialmente a la Subgerencia de Investigación e Hidrogeología y al Laboratorio de Calidad de Agua por todo su apoyo y acompañamiento en la colección de los datos, obtención de información y análisis de las muestras de agua.

A las Unidades Ambientales de las alcaldías municipales de Cuscatancingo, Ciudad Delgado, Mejicanos, Antiguo Cuscatlán, San Marcos, Soyapango, Santa Tecla y Apopa por su confianza, acompañamiento y apoyo en el inventario de fuentes y colección de muestras para la realización de la investigación.

Al SNET por compartir los datos de los registros de variación de niveles en los pozos de monitoreo ubicados en la zona de estudio.

A mis compañeros de la maestría, especialmente a Mario Guevara, Antonio Matus y Cecy de Flamenco por su apoyo en el momento que lo necesité.

A todas las personas de las comunidades visitadas que amablemente accedieron a brindar información y acompañar el trabajo, depositando la confianza en el estudio.

A todos aquellos que aunque no mencione específicamente en los párrafos anteriores, son igualmente importantes y colaboraron para el feliz término de este esfuerzo.

CONTENIDO

1.	ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1	Contexto.....	1
1.2	Planteamiento del Problema	2
1.3	Preguntas de investigación e hipótesis del trabajo.....	3
1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	Objetivo General	4
1.4.2	Objetivos Específicos	4
1.5	Justificación	5
1.6	Beneficios esperados.....	6
1.7	Delimitación y limitaciones de la investigación	7
1.7.1	Delimitaciones	7
1.7.2	Limitaciones	7
1.8	Antecedentes	8
1.8.1	Estudios previos.....	8
1.8.2	Clima	11
1.8.3	Hidrología.....	12
1.8.4	Geología	13
1.8.4.1	Estratigrafía.....	14
1.8.4.2	Geología Estructural	23
2.	MARCO TEORICO.....	26
2.1	El agua subterránea y el ciclo hidrológico.....	26
2.2	Flujo del agua subterránea	27
2.3	La composición del agua subterránea	30
2.3.1	Química del agua subterránea.....	30
2.3.1.1	Disolución de minerales.....	33
2.3.1.2	Procesos de oxidación y reducción	36
2.3.1.3	Intercambio iónico	40
2.3.2	Isótopos ambientales	43

2.3.2.1	Unidades de la composición isotópica del agua	43
2.3.2.2	Fraccionamiento isotópico	44
2.3.2.3	Aplicaciones de isotopos ambientales de la lluvia en estudios hidrogeológicos	48
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	50
3.1	Información geológica	50
3.2	Datos hidrogeológicos	51
3.3	Datos hidroquímicos	53
3.3.1	Metodología de campo	55
3.3.2	Metodología de laboratorio	56
3.3.2.1	Iones mayoritarios y elementos traza.....	56
3.3.2.2	Isótopos ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$	57
4.	RESULTADOS.....	58
4.1	Geología de la cuenca alta del río Acelhuate.....	58
4.2	Litología.....	58
4.3	Hidrogeología del área de estudio.....	69
4.3.1	Unidades hidrogeológicas	70
4.3.1.1	Acuífero fracturado de lavas con intercalaciones de piroclastos.....	71
4.3.1.2	Acuífero poroso en piroclastos, sedimentos y tobas.....	73
4.3.2	Parámetros hidrogeológicos	74
4.3.2.1	Transmisividad (<i>T</i>)	75
4.3.2.2	Capacidad Específica (<i>ce</i>)	76
4.3.2.3	Coefficiente de Almacenamiento (<i>S</i>).....	77
4.3.3	Niveles del agua y Dirección del Flujo	79
4.3.3.1	Dirección del flujo de agua subterránea	79
4.3.3.2	Variación de niveles en los pozos.....	82
4.3.4	Recarga y descarga del agua subterránea	87
4.3.4.1	Recarga natural.....	89
4.3.4.2	Recarga urbana	90
4.3.4.3	Descarga natural	94
4.3.4.4	Descarga antropogénica.....	94

4.3.5	Modelo Conceptual hidrogeológico	94
4.4	Caracterización hidrogeoquímica e isotópica del agua subterránea en la microcuenca alta del río Acelhuate.....	97
4.4.1	Parámetros de campo.....	97
4.4.1.1	Temperatura.....	97
4.4.1.2	Conductividad Eléctrica	99
4.4.1.3	pH	101
4.4.1.4	Oxígeno disuelto.....	101
4.4.2	Química del agua en la zona de estudio	103
4.4.3	Evolución del agua subterránea.....	104
4.4.4	Isótopos ambientales	112
4.4.5	Composición isotópica de la precipitación.....	115
4.4.6	Composición isotópica del agua subterránea.....	116
4.4.7	Principales zonas de recarga acuífera en la microcuenca.....	120
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	123
5.1	Conclusiones.....	123
5.2	Recomendaciones y Trabajo Futuro	128
	Referencias.....	132

ANEXO 1: POZOS CON INFORMACIÓN LITOLÓGICA

ANEXO 2: PERFILES LITOLÓGICOS

ANEXO 3: FUENTES CON INFORMACIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS

ANEXO 4: DATOS DE CAMPO, QUÍMICOS E ISOTÓPICOS

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	2
Figura 1.2 Variación de la precipitación en la zona de estudio (Fuente SNET)	12
Figura 1.3 Precipitación promedio anual en la zona de estudio (1971 - 2001)	13
Figura 2.1 Ciclo Hidrológico.....	26
Figura 2.2 Tubería horizontal llenada con arena para demostrar el experimento de Darcy.	28
Figura 2.3 Diferencias en la concentración de los TDS como una función del tipo de roca y la escorrentía anual.	35
Figura 2.4 Denominaciones para los constituyentes de los procesos redox.....	36
Figura 2.5 Secuencia de procesos importantes de redox a pH=7 en sistemas naturales	39
Figura 2.6 Diferentes procesos de sorción.....	41
Figura 2.7 Fraccionamiento de Rayleigh y efecto continental del ^{18}O	47
Figura 2.8 Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la lluvia de varias ciudades. La línea 2 es la línea meteórica y la 1 tiene la misma pendiente pero con el intercepto en cero	48
Figura 3.1 Mapa de distribución de pozos utilizados para el modelo geológico.....	51
Figura 3.2 Mapa de distribución de puntos utilizados para el mapa piezométrico	52
Figura 3.3 Mapa de distribución de puntos de muestreo químico e isotópico	53
Figura 4.1 Mapa de profundidades de los pozos utilizados para el modelo litológico	59
Figura 4.2 Mapa geológico y ubicación secciones transversales	60
Figura 4.3 Perfil geológico en el sector poniente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)	62
Figura 4.4 Perfil geológico longitudinal central de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2).....	63
Figura 4.5 Perfil geológico longitudinal al suroriente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)	64
Figura 4.6 Perfil geológico longitudinal al suroriente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)	65
Figura 4.7 Perfil geológico longitudinal al suroriente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)	66

Figura 4.8 Perfil geológico transversal en la parte central de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2).....	67
Figura 4.9 Perfil geológico transversal en la parte central de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2).....	69
Figura 4.10 Mapa de trazo del modelo supuesto de las Unidades hidrogeológicas en la microcuenca.....	71
Figura 4.11 Mapa de valores de transmisividad en la microcuenca.....	76
Figura 4.12 Mapa de tendencia de los niveles potenciométricos	80
Figura 4.13 Mapa de pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea	83
Figura 4.14 Gráfico de la variación temporal de los niveles de agua en los pozos.....	85
Figura 4.15 Imagen satelital de la microcuenca y el AMSS	88
Figura 4.16 Foto de laguna de almacenamiento de aguas lluvias en Antigua Cuscatlán.....	93
Figura 4.17 Modelo conceptual hidrogeológico del área de estudio.....	95
Figura 4.18 Mapa de distribución espacial de los datos hidrogeoquímicos e isotópicos obtenidos en la microcuenca.....	98
Figura 4.19 Mapa de variación de la temperatura en las aguas de la microcuenca.....	99
Figura 4.20 Mapa de variación de la Conductividad Eléctrica en las aguas de la microcuenca.....	100
Figura 4.21 Mapa de variación del pH en la microcuenca	102
Figura 4.22 Diagrama de Piper para las muestras de agua de la zona de estudio	104
Figura 4.23 Mapa de diagramas de Stiff en la microcuenca para la 1ª jornada de muestreo	105
Figura 4.24 Mapa de diagramas de Stiff en la microcuenca para la 2ª jornada de muestreo	106
Figura 4.25 Variación de parámetros en diferentes zonas de la cuenca	108
Figura 4.26 Diagramas de composición de los datos variando con cloruros	110
Figura 4.27 Mapas de isocontornos de nitratos, sodio y cloruros en la microcuenca	111
Figura 4.28 Mapa de estaciones con datos isotópicos y Red de Monitoreo Isotópica	112
Figura 4.29 Foto de estaciones con datos isotópicos y Red de Monitoreo Isotópica.....	113
Figura 4.30 Gradiente isotópico por efecto de la altitud en la microcuenca	115
Figura 4.31 Composición isotópica de la precipitación y la GMWL.....	116

Figura 4.32 Composición isotópica del agua subterránea	117
Figura 4.33 Efecto de la evaporación en manantiales de la zona alta de la microcuenca ..	118
Figura 4.34 Mapa de la delimitación de zonas de recarga de acuerdo a composición isotópica del agua subterránea.....	121
Figura 4.35 Mapa de recarga acuífera de la microcuenca	122

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Rango de valores de conductividad hidráulica y permeabilidad	29
Tabla 2.2 Rendimiento Específico (%)	29
Tabla 2.3 Clasificación simplificada del agua subterránea basada en los TDS	32
Tabla 2.4 Principales especies orgánicas disueltas en el agua subterránea.....	32
Tabla 2.5 Características impartidas por la litología en el agua subterránea	34
Tabla 2.6 Valores de CEC para arcillas y materia orgánica según diferentes autores	42
Tabla 3.1 Trabajo realizado para obtener datos geoquímicos	54
Tabla 3.2 Trabajo realizado para obtener datos isotópicos	54
Tabla 3.3 Métodos analíticos utilizados por los laboratorios	56
Tabla 4.2 Variación de la Capacidad Específica en la microcuenca	77
Tabla 4.3 Clasificación de los acuíferos de acuerdo a su Coeficiente de Almacenamiento.	78
Tabla 4.4 Valores estimados del Coeficiente de Almacenamiento	78
Tabla 4.5 Datta logger ubicados en la cuenca y lugares adyacentes (Junio 2007).....	84
Tabla 4.6 Comparación entre las concentraciones de los iones mayoritarios en distintas zonas de la microcuenca (mg/L).....	107
Tabla 4.7 Red de monitoreo para muestreo de isótopos en aguas lluvias dentro de la microcuenca.....	114
Tabla 4.8 Valores de altitud en función de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ para manantiales de la zona alta	118

1. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Contexto

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se encuentra ubicada en los departamentos de San Salvador y La Libertad, los cuales concentran la más alta densidad poblacional de El Salvador; así, San Salvador tiene una densidad poblacional de 1,768 hab/km², mientras que La Libertad tiene 400 hab/km² (Dirección General de Estadística y Censos, Ministerio de Economía, 2008). Es en esta región del país donde se concentra la mayor actividad comercial, industrial y urbana.

La zona de estudio comprende la microcuenca alta y media alta del río Acelhuate (13°38'30" – 13°51'00" latitud Norte y 89°08'00" – 89°18'00" longitud Oeste), río principal que recorre el AMSS y afluente del río Lempa (Figura 1.1). El río Acelhuate recibe las descargas de aguas residuales de todo tipo (en la mayoría de los casos sin tratamiento) a lo largo de su recorrido. El área de estudio es de 228 km², con elevaciones variando entre 356 y 1,952 msnm y una elevación media de 748 msnm.

Los municipios que se encuentran parcial o totalmente comprendidos dentro del área de estudio son: San Salvador, Mejicanos, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, San Marcos, Soyapango, Ciudad Delgado, Apopa y Nejapa en el departamento de San Salvador; y Nueva San Salvador y Antiguo Cuscatlán, en el departamento de La Libertad.

Bajo el territorio de los municipios que conforman el AMSS subyace el acuífero de San Salvador, conformado por dos unidades hidrogeológicas identificadas como Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción y Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media (ANDA, 2008a), las cuales abastecen parcialmente la demanda de agua de dichas zonas; el resto del suministro se provee por medio de la incorporación de dos principales plantas de extracción y tratamiento de agua: Sistema Zona Norte y Sistema Planta Potabilizadora Las Pavas.

Siendo el AMSS la región política, económica y financiera más importante del país y dada la importancia de sus aguas subterráneas, se ha dispuesto desarrollar un estudio en esta

zona, para caracterizar por métodos hidrogeoquímicos (definir iones mayoritarios) e isotópicos las zonas de recarga más importantes de la cuenca.

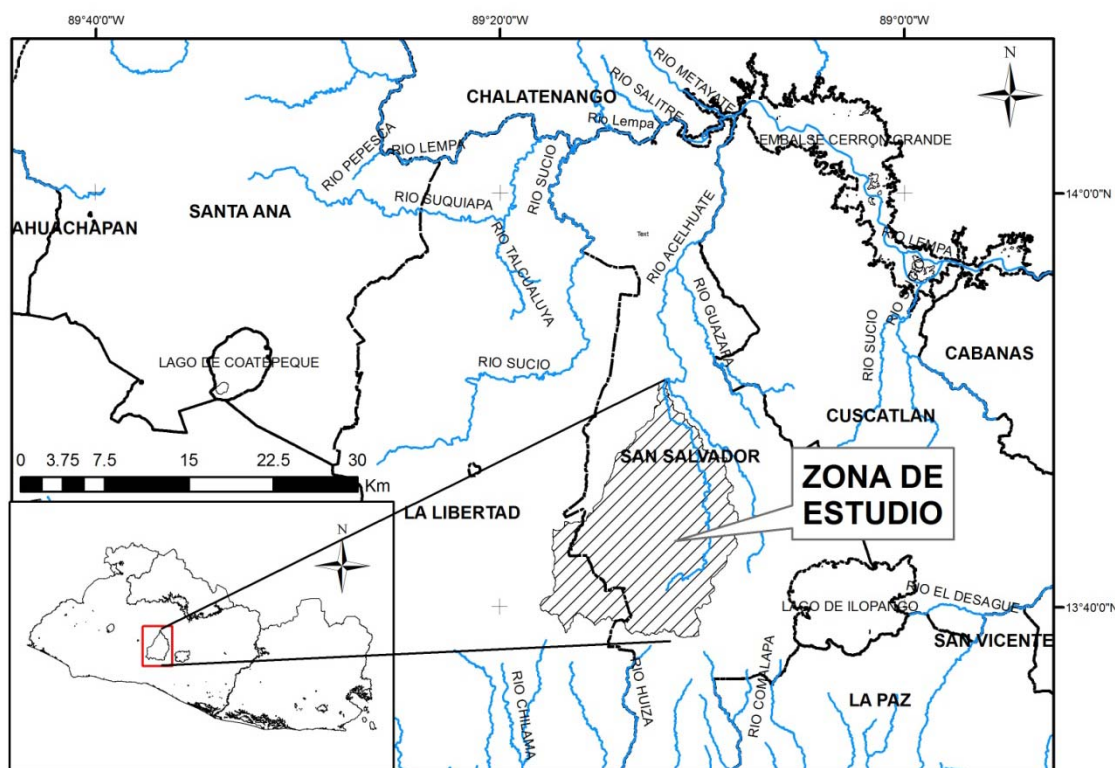


Figura 1.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio

1.2 Planteamiento del Problema

La explotación del acuífero de San Salvador para fines de abastecimiento industrial, urbano y comercial del AMSS ha llevado a la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANANDA) a importar agua de dos importantes fuentes de explotación y suministro del recurso, como son los sistemas Zona Norte y Planta Potabilizadora Las Pavas.

En 2008, de los sistemas administrados por la ANANDA, el 39.3% fue producido por los Sistemas Tradicionales, conformados por pozos de producción y manantiales que están ubicados geográficamente en el Gran San Salvador, el 39.6% por el Sistema Las Pavas y el 21.1% por el Sistema Zona Norte (ANANDA, 2008b). Los porcentajes muestran que los

volúmenes de explotación actuales en el acuífero de San Salvador, no logran satisfacer la demanda local, esta situación se agrava a medida que el desarrollo de las ciudades se expande hacia las zonas sin poblar ubicadas en las partes altas de la cuenca, como son el volcán de San Salvador y el Cerro San Jacinto, impermeabilizando grandes extensiones de suelo que producen reducción de la infiltración de aguas pluviales y por lo tanto de la recarga a los acuíferos. Se considera que el déficit de recarga en la cuenca no se evidencia claramente debido a la presencia de fugas en los sistemas de agua potable y alcantarillado (Coto Salamanca, Et. al, 1994); sin embargo, a la fecha no se han completado estudios al respecto por lo que se desconoce el impacto que dichas fugas están ocasionando en el acuífero.

La falta de identificación de las principales zonas de recarga del acuífero del AMSS, limita a las instituciones responsables de la autorización de permisos de desarrollo urbanístico para condicionar ambientalmente la expansión del desarrollo urbanístico en aquellas zonas que están sosteniendo los ingresos de agua en la cuenca, y el desconocimiento del impacto que las posibles fugas en los sistemas de agua potable y conducción de aguas residuales están ocasionando en el acuífero, ha permitido que a la fecha no se realicen acciones correctivas en el mejoramiento de tales sistemas.

1.3 Preguntas de investigación e hipótesis del trabajo

Para abordar el problema planteado anteriormente, se pretende dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación:

- 1) ¿Cuáles son las principales áreas y/o fuentes de recarga del acuífero del AMSS?
- 2) ¿Existen fugas en el sistema de agua potable que estén contribuyendo significativamente a la recarga del acuífero del AMSS?
- 3) ¿Cuál es la tendencia de los niveles potenciométricos en el acuífero del AMSS?

De las interrogantes anteriores surgen las siguientes hipótesis de trabajo:

- 1) Las principales áreas de recarga del acuífero de San Salvador corresponden con áreas de recarga delimitadas por medio de la geología de la zona en estudios anteriores.
- 2) Las fugas en el sistema de agua potable del AMSS contribuyen significativamente a la recarga del acuífero.
- 3) La profundidad del agua subterránea en el acuífero de San Salvador está aumentando con el tiempo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Realizar la caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica del acuífero del AMSS para delimitar las zonas y fuentes de recarga más importantes.

1.4.2 Objetivos Específicos

- 1) Identificar las áreas y fuentes de recarga más importantes del acuífero del AMSS
- 2) Evaluar cualitativamente, a través del análisis hidrogeoquímico e isotópico, el impacto de las fugas de los sistemas de agua potable en el acuífero de San Salvador
- 3) Estimar por medio de información existente, la tendencia de los niveles potenciométricos de agua subterránea en el acuífero del AMSS
- 4) Elaborar el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero del AMSS, por medio de la elaboración de un modelo litológico e información hidrogeológica procedente de información previa generada de la zona.

1.5 Justificación

El acuífero de San Salvador es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para los municipios que conforman el Área Metropolitana de San Salvador, tanto para uso domiciliario, industrial y comercial. El desbalance hídrico en el acuífero se refleja en un acelerado decrecimiento del nivel potenciométrico del mismo (Coto et. al., 1994), lo que ha provocado que la calidad del servicio de agua potable a los beneficiarios se desmejore con el transcurso del tiempo, reduciéndose así el acceso que la población tiene al recurso agua y produciéndose un incremento en los problemas de higiene y salud de los beneficiarios, afectando la calidad de vida de los mismos.

El desarrollo de la población en los municipios que conforman el AMSS hacia las zonas altas de la región, y con ello la impermeabilización del terreno por el cambio en el uso del suelo es uno de los factores que provocan dicho desbalance hídrico, ya que se reduce la infiltración en las áreas de recarga del acuífero. Sin embargo, este desbalance es contrarrestado parcialmente por supuestos aportes de fugas en los sistemas de distribución de agua potable y drenaje de aguas negras existentes en la zona, los cuales tienen un costo económico y ambiental aún sin cualificar ni cuantificar.

Diversos estudios han sido desarrollados para identificar las áreas de recarga del acuífero de San Salvador, los más recientes corresponden al Mapa de Recarga de Agua Subterránea elaborado en 2005 como parte del proyecto Fortalecimiento de la Gestión Ambiental en El Salvador (FORGAES) y el mapa de recarga potencial de la cuenca del río Acelhuate elaborado por OPAMSS en 2007, estos estudios se han basado en investigaciones hidrogeológicas y características de los suelos, sin tenerse a la fecha un estudio desde el punto de vista hidrogeoquímico e isotópico que contribuya a una investigación más profunda y detallada de las áreas de recarga del mismo.

La hidrogeoquímica al proveer información sobre la distribución de los elementos y su evolución espacial y temporal en el sistema hídrico, ayuda a caracterizar los acuíferos y definir problemas ambientales y planes de remediación. Las técnicas isotópicas y análisis hidrogeoquímicos aportan contribuciones importantes a los estudios hidrogeológicos. Los isótopos ambientales del agua, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, permiten tener información sobre la renovación

de las aguas en los acuíferos (recarga), identificación de aguas antiguas, interconexiones hidráulicas entre varios acuíferos, mezcla de aguas de origen diferente, interacciones rocas CO₂, etc. (Universidad de Piura, s/f).

La determinación de las principales áreas de recarga del acuífero de San Salvador por medio de técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas, proporcionará información de suma importancia a las entidades involucradas con el manejo de los Planes de Desarrollo Territorial de los municipios que contienen a dichas áreas de recarga y a las instituciones que se ven involucradas en la explotación y sostenibilidad de dicho acuífero, ya que podrán incluirse planes de manejo y ordenamiento hídrico que provean protección a las áreas más importantes de la subcuenca y de esta forma contrarrestar el descenso de la renovación del recurso en estas regiones. Adicionalmente el presente estudio proveerá información básica cualitativa sobre el impacto que las fugas en el sistema de agua potable de la zona están ocasionando en el acuífero, de forma tal que la ANDA y otras instituciones relacionadas con el recurso hídrico subterráneo puedan tomar medidas al respecto.

La metodología utilizada para el desarrollo de la investigación permitirá que en estudios posteriores se obtengan datos con mayor variabilidad en el tiempo y establecer así el monitoreo correspondiente; de igual manera podrá utilizarse dicha metodología adaptándola a otras regiones en las que se tenga una problemática similar.

1.6 Beneficios esperados

Con el desarrollo de la investigación se espera establecer una relación espacial entre las zonas de recarga y las aguas subterráneas del acuífero del AMSS, de esta forma las instituciones involucradas con el desarrollo territorial y la protección del recurso hídrico podrán implementar políticas y programas que contribuyan a la sostenibilidad de dicho recurso, y las comunidades podrán identificar aquellas zonas de las que están obteniendo el beneficio hídrico y conjuntamente con las municipalidades establecer programas de protección, conservación y recuperación de las zonas de recarga en el acuífero. Se espera adicionalmente, determinar si el aporte de las fugas en el sistema de agua potable influye en la composición isotópica del acuífero, mostrando que esta situación está ocasionando un

impacto económico y ambiental que debe abordarse a la brevedad posible por parte de la ANDA.

1.7 Delimitación y limitaciones de la investigación

1.7.1 Delimitaciones

El estudio se desarrolla en la zona central de El Salvador, en la cuenca alta y media alta del río Acelhuate(Figura 1.1), el período de estudio comprende desde el mes de marzo hasta el mes de noviembre del año 2009, abarcándose con ello parte de la época seca y la época de lluvia que caracteriza la climatología del territorio salvadoreño. Durante este período se tomó muestras para análisis químico e isotópico de manantiales y pozos profundos distribuidos en la zona de estudio, los pozos muestreados corresponden a aquellos cuya rejilla puede presumirse que se ubica en la misma unidad acuífera, basado en el perfil litológico y el diseño de recubrimiento del pozo. La medición de niveles estáticos en los pozos fue realizada por parte de personal de la ANDA en pozos fuera de funcionamiento o en período de mantenimiento.

1.7.2 Limitaciones

Dentro de las principales limitaciones observadas para realizar la investigación pueden citarse las siguientes:

- a) La aprobación de solicitudes de permisos para la toma de muestras de agua para análisis químico en pozos propiedad del estado requirió de un tiempo considerable y esta espera llevó a la falta de algunas muestras en el período seco.
- b) Los sitios de muestreo han sido seleccionados de forma tal que se encuentren distribuidos espacialmente en la cuenca, no se ha considerado un número muestral estadístico.

- c) Debido al corto período del desarrollo de la investigación no se podrá apreciar la variabilidad temporal para un año hidrológico completo en los sitios de muestreo, por lo tanto no se considera dicha variabilidad en el análisis de resultados.

1.8 Antecedentes

1.8.1 Estudios previos

En los últimos veinte años la concentración y distribución espacial de la población cambió dramáticamente a raíz de los cambios en la economía y los efectos de la guerra que provocaron un significativo desplazamiento de población rural hacia las zonas urbanas del país, sobre todo hacia el AMSS (Barry, 1994)

El incremento en la densidad poblacional del AMSS y el crecimiento económico de las ciudades que la conforman, ha generado un aumento en la demanda de agua potable, parte de la producción de agua potable para esta región proviene del acuífero de San Salvador, el cual en el año 1994 representaba el 37% del abastecimiento total de agua distribuida en la zona (Barry, 1994).

Se han desarrollado diversos estudios relacionados con la hidrogeología de la zona de estudio, entre ellos se pueden citar los siguientes:

- 1) Estudio sobre aguas subterráneas en la zona metropolitana de San Salvador. PNUD, 1972.

El proyecto evaluó tanto los recursos hidráulicos superficiales como subterráneos en las cuencas de los ríos más próximos a la zona metropolitana de San Salvador, con el fin de establecer las zonas más favorables para su explotación, que garantizaran el abastecimiento de agua a la capital dentro de un período determinado. La creación de un servicio permanente gubernamental de investigación de aguas a nivel nacional y el entrenamiento del personal nacional, obtuvieron la mayor atención del proyecto, entendiéndose que las investigaciones llevadas a cabo por el programa debían servir especialmente como punto de partida para extender las actividades de investigación y

evaluación de los recursos hidráulicos a todo el territorio del país (PNUD, 1972) citado en (Coto Salamanca, Et. al, 1994, pág. 5)

- 2) Documento básico No. 9 de identificación de proyectos. Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos, PLAMDARH, 1981.

Estableció un modelo de simulación digital para el acuífero de San Salvador, con el objeto de calibrar y simular su explotación, para diagnosticar acerca de la planificación de su aprovechamiento, llegando a conclusiones sobre su explotación, descenso de los niveles freáticos, parámetros hidrogeológicos y efectos locales del comportamiento del acuífero. Adicionalmente, se creó un organismo encargado de la planificación del uso del agua en forma única y centralizada, la Oficina Especializada del Agua (OEDA); sin embargo, no existe una planificación real de la explotación y aprovechamiento racional del recurso agua (Coto Salamanca, Et. al, 1994, pág. 5)

- 3) Informe Final preparado para el Ministerio de Obras Públicas: Programa inicial para evaluar la factibilidad de recarga artificial mediante pozos de infiltración en el Área Metropolitana de San Salvador. EYCO S.A. de C.V., 1991.

El documento tuvo como objeto evaluar la capacidad de infiltración en estratos sub-superficiales mediante la perforación de pozos verticales de una profundidad promedio de 30 m a fin de propiciar una mayor recarga, a partir de los caudales de escorrentía superficial que se evacuan a través de los colectores pluviales y lograr un mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos (EYCO S.A. de C.V., 1991)

Para lograr el objetivo del trabajo se realizaron 58 sondeos eléctricos verticales (SEV) en 23 sitios de estudio y se perforaron 20 pozos de profundidad media en 20 sitios seleccionados de acuerdo a los resultados de los SEV, las características geológicas y el espacio disponible, la profundidad promedio de dichos pozos fue de 34.70 m, en cada pozo se llevó a cabo una prueba de infiltración mediante inyección directa de agua, midiéndose niveles dinámicos con cinta eléctrica, hasta lograr el nivel de equilibrio y la determinación del caudal de inyección correspondiente, con los datos

obtenidos se evaluaron los siguientes parámetros hidrogeológicos: capacidad específica (Ce), transmisividad (T), y permeabilidad (K).

Como resultado se obtuvo que las zonas ubicadas en el occidente y algunas del centro de la zona de estudio ofrecían condiciones favorables para la infiltración hacia las formaciones subsuperficiales de caudales entre 10 y 20 L/s/pozo, mientras que en el oriente de la zona de estudio las condiciones resultaron poco favorables, considerándose que podrían infiltrarse caudales menores de 5 L/s/pozo; sin embargo, se recomendó implementar cualquier medida tendiente a incrementar la recarga dada la situación crítica de disponibilidad – explotación en dicha zona (EYCO S.A. de C.V., 1991).

- 4) Trabajo de graduación Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA): Evaluación de la explotación y disponibilidad de agua subterránea y análisis de pruebas de bombeo en el acuífero del AMSS. Coto, *Et.al.*, 1994.

Se evidenció y cuantificó el desequilibrio del acuífero del AMSS en aproximadamente 1m/año, por medio de la evaluación del descenso del nivel freático en pozos ubicados en el área, análisis de pruebas de bombeo y un balance hidrogeológico, atribuyéndose este desequilibrio principalmente a la reducción de áreas de recarga, las cuales fueron identificadas principalmente como el volcán de San Salvador y el cerro San Jacinto cuyo índice de infiltración fue del 40%.

- 5) Trabajo de graduación UCA: Actualización del comportamiento del flujo subterráneo del acuífero metropolitano (San Salvador). Arévalo Romero y Vásquez Naranjo, 2005.

Se comprobó nuevamente la condición de desequilibrio del acuífero del AMSS, estimándose que los descensos se han incrementado a 2.47 m/año para San Salvador y 1.48 m/año para Soyapango. Se concluyó además que los ascensos observados en algunos pozos del AMSS se deben a factores como la reducción de su explotación por la inyección de agua potable de los nuevos sistemas y a las pérdidas en la red de distribución de agua potable.

1.8.2 Clima

Según la clasificación climática de Koppen, se distinguen tres regiones climáticas en la zona de estudio (SNET, 2005a)

1. Sabana tropical caliente: corresponde a la mayor superficie de la cuenca, con elevaciones entre 356 – 800 msnm, abarca el valle de San Salvador y el Cerro San Jacinto y llega hasta el punto de salida de la cuenca ubicado en el municipio de Nejapa. La temperatura media oscila entre los 22 - 27 °C y 22 - 28 °C, en función de la elevación, en las planicies interiores.
2. Sabana Tropical Calurosa: sus elevaciones varían entre los 800 – 1,200 msnm, esta región climática abarca parte de los municipios de antiguo Cuscatlán y Nueva San Salvador, en las faldas del volcán de San Salvador. Las temperaturas medias oscilan entre los 17 – 21 °C. Se distinguen dos zonas: Planicie alta y valles (20 – 22 °C) y faldas de las montañas (17 – 21 °C).
3. Clima Tropical de las Alturas: con elevaciones que varían entre los 1,200 – 1,952 msnm. Esta zona solamente se distingue en la parte alta de la cuenca, en el volcán de San Salvador. La temperatura media es inferior a 22°C en el mes más caluroso, para elevaciones entre 1,200 y 1800 msnm, y entre 10 -16 °C para la elevaciones superiores.

La precipitación en la zona de estudio varía con las dos estaciones que caracterizan el régimen de lluvia en nuestro país: estación seca, entre los meses de noviembre y abril, y estación lluviosa, que inicia en el mes de mayo y finaliza en el mes de octubre (Figura 1.2)

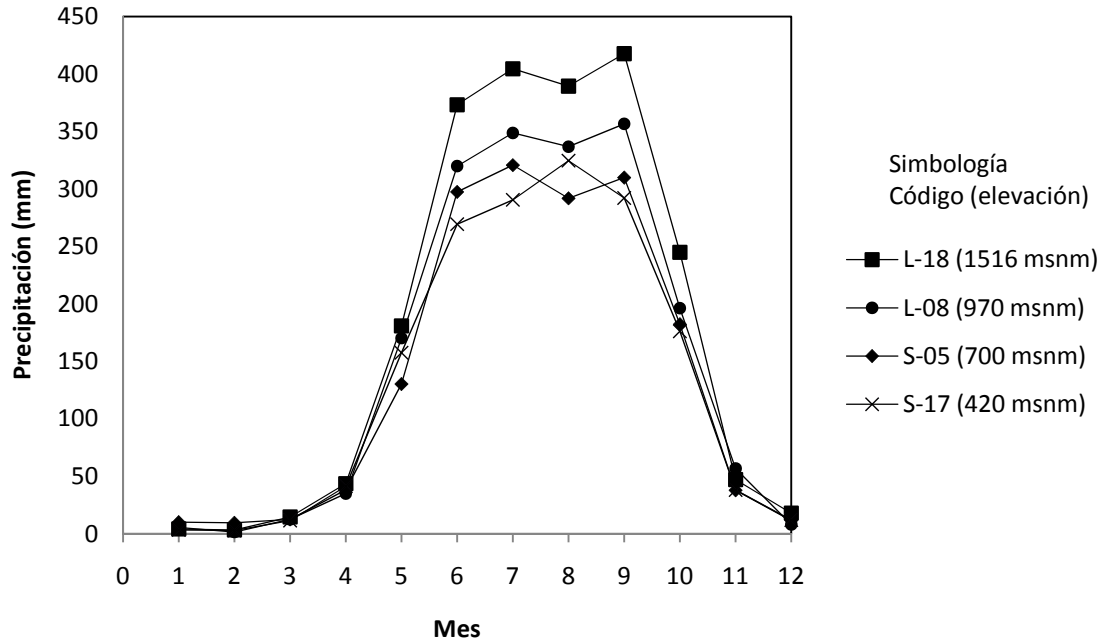


Figura 1.2 Variación de la precipitación en la zona de estudio (Fuente SNET)

La tendencia de la precipitación en la zona de estudio está influenciada por la elevación, variando de manera directamente proporcional; en la zona del Boquerón a 1,516 msnm (Estación L-18) la precipitación promedio alcanza los 2141 mm/año, mientras que en Apopa a los 420 msnm (Estación S-17) los valores promedio son de 1619 mm/año, teniéndose una diferencia de 522 mm/año.

1.8.3 Hidrología

La subcuenca del río Acelhuate tiene un área de 717.35 Km², pertenece a la cuenca del río Lempa cuya superficie es de 17,978.51 Km² (SNET, 2005) y es una cuenca trinacional que abarca los países de Honduras y Guatemala, en la parte Alta, y tiene su descarga en El Salvador; pertenece a la región hidrográfica A “Lempa”.

Sobre la base de datos históricos para un período de 30 años, se ha estimado que la subcuenca del río Acelhuate tiene una escorrentía superficial media anual de 371.28 Mm³ y una recarga de acuífero media anual de 228.93 Mm³ de un total de precipitación media anual de 1,232.34 Mm³ (SNET, 2005), estos valores se encuentran controlados por el

régimen de lluvia presente en la subcuenca. Dentro de la zona de estudio la precipitación media anual varía entre 1,500 mm y 2,100 mm (Figura 1.3).

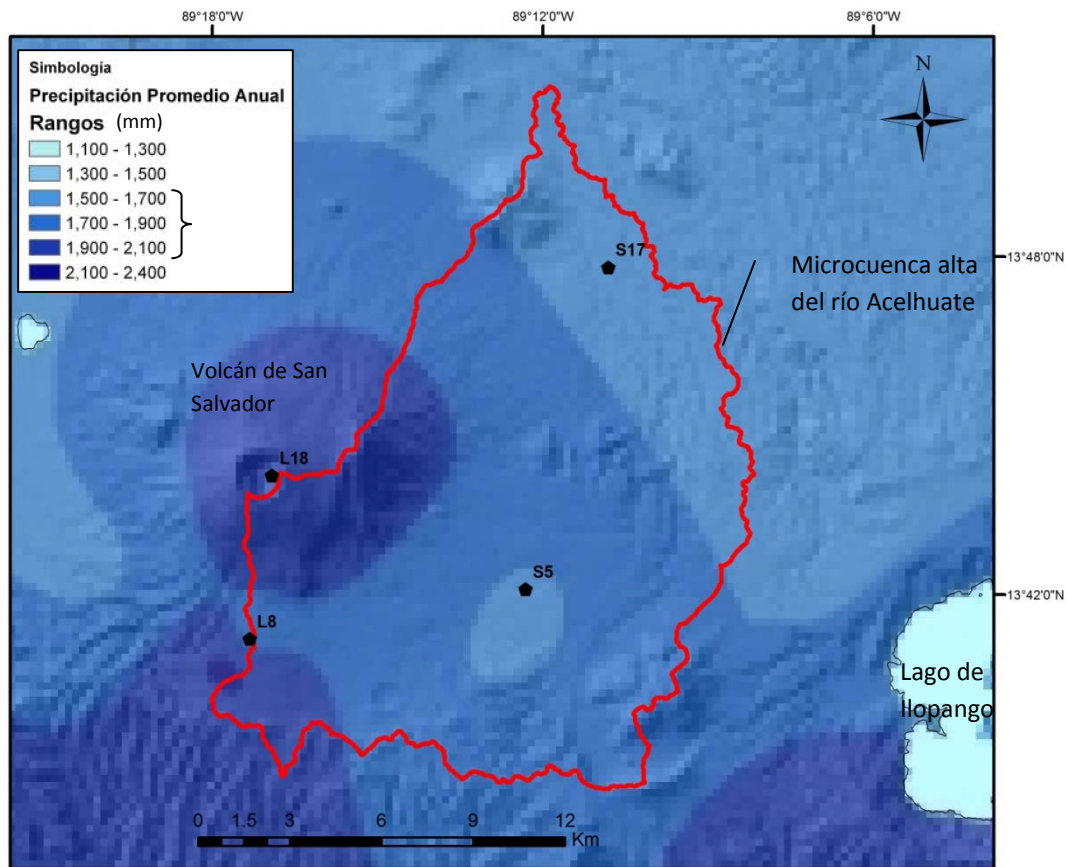


Figura 1.3 Precipitación promedio anual en la zona de estudio (1971 - 2001)
Fuente: SNET (2005)

1.8.4 Geología

La zona de estudio se ubica en una de las estructuras geológico – tectónicas más importantes del país, denominada Graven Central o Depresión Central, que inició su formación entre el Plioceno Inferior y se extendió hasta el Plioceno Medio (Hernández, 2005), dicho Graven se extiende a lo largo del país con rumbo oeste-noroeste y con un ancho de 15 y 30 km (SNET, s/f)

La mayor parte de la geología local corresponde a rocas cuaternarias de los períodos Pleistoceno a Holoceno, las cuales tienen su origen en los centros de actividad volcánica de

la Caldera de Ilopango y el volcán de San Salvador, constituidas por pómez, escorias, lapilli, tobas, piro clastos y flujos de lava andesíticos y basálticos (Gil, 2006). Las rocas volcánicas del terciario constituyen el basamento del acuífero del AMSS (Arévalo Romero & Vásquez Naranjo, 2005).

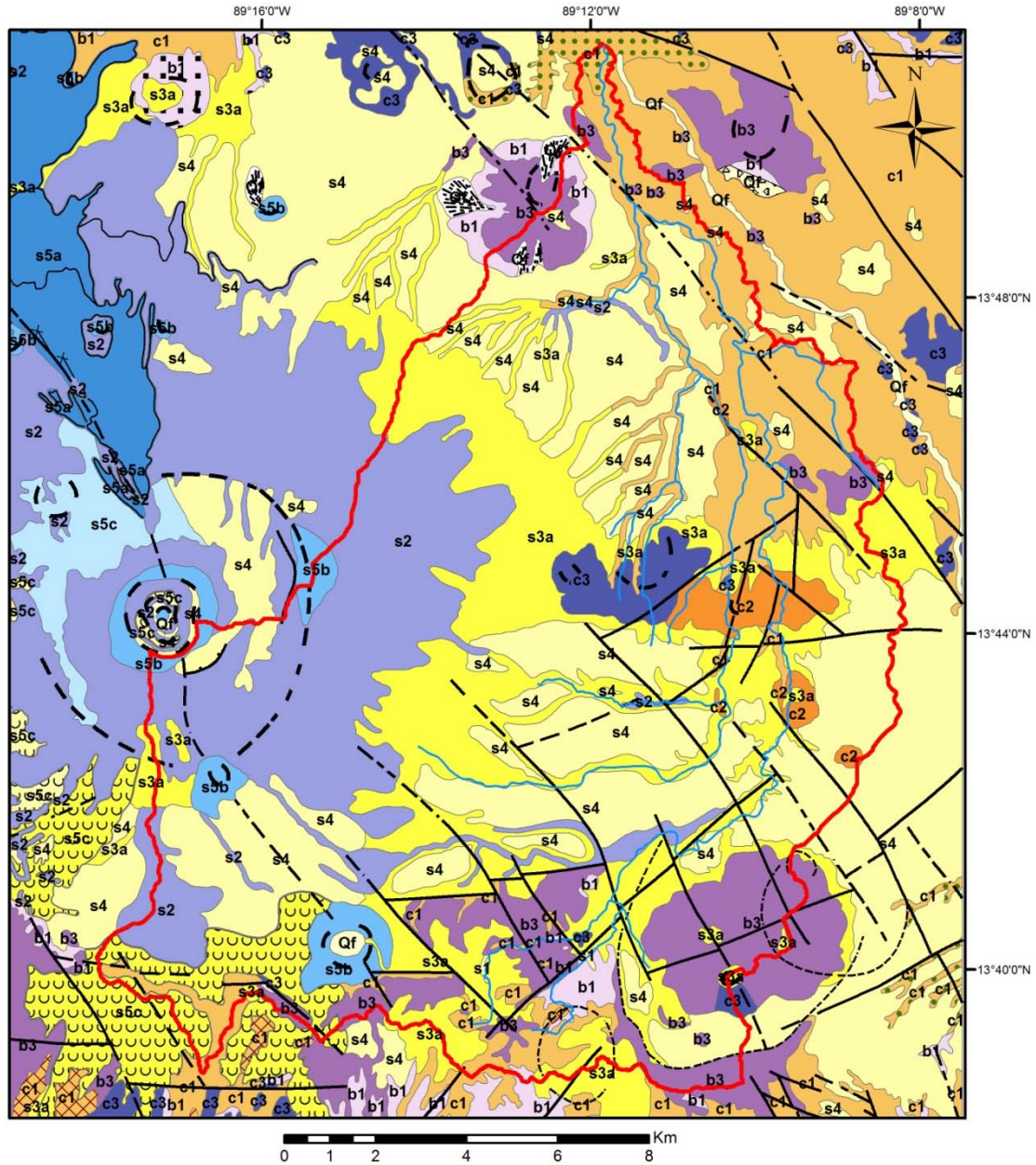
1.8.4.1 Estratigrafía

La secuencia geológica de la zona de estudio, en orden de aparición está compuesta por las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (Figura 1. 1), cuyas características principales se describen a continuación.

Formación Bálsamo. Stirton & Gealey (1949, citado por CEL, 1984) le asigna una edad del Plioceno – Pleistoceno, mientras que Weisemann et al. (1978 citado por CEL, 1984) la ubica en el Mioceno – Plioceno.

Esta formación consiste principalmente de sedimentos piroclásticos diagenéticamente bien consolidados, en su mayor parte andesíticos. Los fragmentos gruesos de los aglomerados están recogidos en una matriz tobácea, compacta de grano muy fino. El diámetro de los xenolitos varía entre unos pocos centímetros hasta los 20 cm., aunque ocasionalmente se pueden encontrar bloques mayores de un metro de diámetro (PNUD, 1972).

Estratos de tobas y tufitas se intercalan frecuentemente con los aglomerados; capas de arena de origen fluvio lacustre son generalmente raras. Interestratificados con las series piroclásticas se encuentran gran cantidad de flujos de lava andesítica y basáltica, cuyos espesores oscilan entre unos metros y más de cien (PNUD, 1972).



SIMBOLOGIA

ZONA DE ESTUDIO

DESCRIPCIÓN

- Cráter, caldera
- Dique básico
- Escarpe de colada
- Estructura anular
- - - Falta supuesta
- Falta visible
- - - Fotolineación: estratificación

SIGNATURAS

- Epiclastitas volcánicas (fluviales)
- Escorias y cinder
- ××××× Ignimbritas

Miembro geológico, descripción

- Qf San Salvador, Depósitos sedimentarios del Cuaternario, Depósitos acuáticos con intercalaciones de piroclastitas
- Qf San Salvador, Depósitos sedimentarios del Cuaternario, Depósitos coluviales sin ...
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli,
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, sobre s3'a
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, sobre s4
- s5b San Salvador, Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder),
- s5a San Salvador, Efusivas básicas - intermedias,
- s4 San Salvador, "Tierra blanca": piroclastitas ácidas y apiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas (s3'b),
- s3a San Salvador, Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café"),
- s2 San Salvador, Efusivas básicas -intermedias, piroclastitas subordinadas,
- s1 San Salvador, Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas -intermedias,
- c3 Cuscatlán, Efusivas-básicas-intermedias,
- c2 Cuscatlán, Efusivas ácidas y intermedias ácidas (ocurrencias aisladas en parte eventualmente =ch2),
- c1 Cuscatlán, Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas,
- b3 Bálsamo, Efusivas básicas-intermedias,
- b1 Bálsamo, Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas -intermedias intercaladas.,

Figura 1. 1 Geología de la zona de estudio. Fuente: Mapa Geológico de El Salvador (1972), Esc. 1:100,000

Dürr (1960, citado en CEL, 1984) estima el espesor de la sección en 500 m, Schimdt-Thomé (1975:213-214, citado en CEL, 1984), hasta 100 m en el área de San Salvador. En algunos lugares se notan suelos rojos de meteorización, característicamente de color rojizo (suelo rojo de la Cumbre) que pueden alcanzar espesores de unos 15 m. y que representan un período de relativa calma tectónica – volcánica, con alternancia de períodos húmedos y secos (PNUD, 1972).

Dentro del área de estudio, el afloramiento de estos materiales se da en la cordillera del Bálsamo, el cerro San Jacinto y el volcán de Guazapa, en los extremos norte y sur de la cuenca.

Se distinguen dos miembros geológicos en la zona de estudio:

Miembro b1

Wiesemann *et al.* (1978, citado en CEL, 1984) define la unidad como una sección constituida por epiclastitas volcánicas, piroclastitas e ignimbritas; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas, “Fascies Claro” (con lapilli de pómez) y limo rojo; alteración hidrotermal localmente.

Las zonas mejor identificadas se encuentran en el occidente del país, en la cordillera del bálsamo y en los alrededores del lago de Coatepeque, así como en Ilobasco y Jutiapa, en el costado sur de la presa Chorrera del Guayabo.

Se distinguen escasos afloramientos en la zona de estudio y están ubicados en las faldas del cerro San Jacinto y del cerro de Nejapa, al sureste y noroeste, respectivamente.

Miembro b3.

Según Wiesemann (1975, citado en CEL, 1984), este miembro está formado por rocas efusivas básicas-intermedias, localmente con alteración hidrotermal, silificación y presencia de limos rojos; el cual constituye al miembro superior de la Formación Bálsamo.

William & Meyer Abich (1953, citado en CEL, 1984) consideran que en el Cerro San Jacinto este miembro consiste de andesitas piroxénicas o dacitas básicas, por su parte Schimdt-Thomé (1975, citado en CEL, 1984) lo define como un stock volcánico de varios domos con pocas estructuras de cráteres preservados.

Formación Cuscatlán. Wiesemann (1978, citado en CEL, 1984) la define como una secuencia volcano – sedimentaria del Plio – Pleistoceno, dividida en tres miembros que son c1, c2 y c3.

La sección volcánica está constituida por tobas ácidas en la base, seguidas por lavas ácidas intermedias y andesitas – basaltos en la parte superior (CEL, 1984).

La secuencia sedimentaria está limitada a cuencas intermontanas, las cuales incluyen horizontes de diatomita, epiclastitas y areniscas, intercaladas localmente por capas carbonosas y tobas (CEL, 1984, pág. 56).

Esta formación subyace a la formación San Salvador, sus afloraciones en el área de estudio se distinguen en las faldas del volcán de Guazapa, en los cerros El Carmen y El Colis (Ayutuxtepeque y Ciudad Delgado) así como pequeñas zonas en la cordillera del Bálsamo, en el parteaguas sur de la cuenca.

Tres miembros geológicos se aprecian en la zona de interés.

Miembro c3

Wiesemann (1975, citado en CEL, 1984) lo define como una unidad constituida por rocas de origen volcánico, de tipo andesítico y basáltica, en parte contemporánea con el miembro c2.

Es el miembro superior de la formación Cuscatlán, las coladas de lava constituyen la parte principal de esta unidad, aunque se han reportado conos de cinder y escorias como parte de la misma (CEL, 1984).

Afloraciones de este miembro se presentan en los cerros El Cármen y El Colis, los cuales aparecen constituidos principalmente por estas rocas; en la falda Sur del cerro San Jacinto aflora una pequeña porción de este miembro, en la zona del municipio de San Marcos.

Miembro c2

Miembro intermedio de la formación Cuscatlán, Wiesemann (1975, citado en CEL, 1984) lo define como una sección de rocas volcánicas efusivas de tipo ácido y ácido-intermedio, de ocurrencia aislada. En Ciudad Delgado afloran riocitas de matriz vítrea y fenocristales de plagioclasa, piroxenos rómbicos y minerales opacos (CEL, 1984). En el área de estudio, la mayor afloración de este miembro corresponde al cerro de Milingo, también en el municipio de Ciudad Delgado; una pequeña afloración puede apreciarse en el cerro Santa Rosa, cercano al casco urbano de la ciudad de Soyapango. Schmidt-Thomé (1975, citado en CEL, 1984), clasifica a los cerros de Mariona y cerro Santa Rosa como stock volcánicos, masivos y de grano grueso, las coladas de lava son laminares de grano fino.

Miembro c1

Miembro inferior de la formación Cuscatlán al que se le asigna una edad del Plioceno superior (CEL, 1984). Aunque este miembro está compuesto por unidades tanto sedimentarias como volcánicas, en la zona de estudio solamente se tienen afloraciones de las unidades volcánicas, representadas por las Tobas fundidas de Zaragoza en el sur de la cuenca (la parte alta) y las tobas de nubes ardientes que aparecen en el norte de la misma.

Las tobas fundidas de Zaragoza afloran desde Zaragoza a la ciudad de La Libertad, y tienen unos 12 Km de largo por 3 Km de ancho. La sección tiene un espesor que va de los 30 m a los 100 m. Su tonalidad es gris oscuro, contiene plagioclasa An 45-55, así como piroxeno y magnetita. Se considera que la alcalinidad de estas tobas sugiere un magma granodiorítico o cuarzdiorítico (CEL, 1984).

William y Meyer-Abich (1953, citado en CEL, 1984) consideran que estas tobas se originaron producto del fallamiento que corre de oriente a poniente, es decir paralelas a la dislocación principal del bloque del Bálsamo.

Las tobas al norte del lago de Ilopango son de la misma etapa volcano tectónica que las tobas fundidas de Zaragoza (CEL, 1984).

Se extienden al norte hasta el volcán de Guazapa, de las cuales aparecen pequeñas afloraciones en el parteaguas noreste de la cuenca, en la parte baja de la misma. Están caracterizadas por la abundancia de bombas de pómez, lapilli de pómez, pisolitas, fragmentos angulares de lavas dacíticas vítreas y andesitas principalmente, entre una masa fina de cenizas no estratificadas. El espesor de los depósitos es variable, pero ninguno supera los 50 m (CEL, 1984).

Otros afloramientos, se presentan entre Ciudad Delgado y Apopa, Weyl (1953, citado en CEL, 1984) observó 4 a 5 estratos separados por horizontes de descomposición. El pómez está constituido de 75% a 99% vidrio y de 25% a 1% minerales, estos son: Plagioclasa An 30-50, hornblenda, hyperstena, augita, magnetita y zircón; y la define como andesítica; William y Meyer- Abich (1953, citado en CEL, 1984) la definen como una dacita rica en hornblenda. En esta zona, este miembro geológico conforma el canal natural del río Mariona y sus afluentes, así como del río Tomayate y del río Acelhuate en la parte baja de la cuenca.

Formación San Salvador

Ubicada en el Pleistoceno superior reciente por Stirton & Gealey (1949); Dürr (1960) y Wiesemann (1975), todos citados en CEL, (1984), corresponde a la formación más reciente que forma el macizo volcánico de San Salvador, rellena la depresión San Salvador – Ilopango y sobreyace parcialmente a la formación Bálsamo (PNUD, 1972)

Pueden distinguirse estas rocas, entre fascies de diferente naturaleza: flujos de lava andesítica y basáltica, cúpulas de lava dacítica y andesítica vítrea, depósitos de avalanchas

ardientes, tobas pumíticas, escorias, cenizas, polvo volcánico e intercalaciones de sedimentos fluvio – lacustres (PNUD, 1972).

Los materiales predominantes en la zona de estudio están constituidos por la Serie del Boquerón Picacho formada por los productos eruptivos eyectados del complejo volcánico de San Salvador, durante el Pleistoceno; y por la Serie de Ilopango formada por la cenizas pumíticas de edad más reciente que las anteriores, producto del vulcanismo de Ilopango (PNUD, 1972).

Afloran en la zona de estudio los miembros geológicos s1, s2, s3a, s4, s5a, s5b y s5c de los nueve miembros que conforman a la Formación San Salvador.

Miembro s1.

Descrita por Wiesemann (1975, citado en CEL, 1984), como una secuencia de piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas básicas – intermedias. Se distinguen dos pequeñas afloraciones en la parte alta de la cuenca, en los cauces de los ríos Acelhuate e Ilohuapa, cuyo apareamiento podría asociarse con la erosión de materiales más recientes de la formación San Salvador.

Estos materiales fueron originados producto de varios focos eruptivos actualmente hundidos en la caldera de Coatepeque (PNUD, 1972).

Miembro s2

Constituido por los productos eruptivos eyectados por el complejo volcánico de San Salvador, y compuesta por flujos de lava andesítica y basáltica intercalados con depósitos piroclásticos o tobas de color café (PNUD, 1972).

Se presentan al menos dos capas entre 5 y 10 m de espesor de rocas andesitas basálticas de grano fino a medio en forma de lajas, escoriáceo en la base y el techo (Schmidt-Thomé, 1975). La parte central es densa y compacta, teniendo sin embargo diaclasas de

enfriamiento (PNUD, 1972). Fairbrothers, Carr & Mayfiel (1978, citado en CEL, 1984) dividen la sección de lavas en Serie Superior ricas en hierro y Serie Inferior ricas en aluminio, separadas por una capa de ceniza de 100 m. Las lavas son grises a oscuras, porfídicas, de tipo basaltos pilotaxíticos, basaltos andesíticos y andesitas con fenocristales de plagioclasa (An 96 a An 53), augita, olivino y magnetita titanífera. Se considera que de acuerdo a su composición química, las lavas de la Serie Inferior son clasificadas como basaltos y andesitas calco – alcalinas y las de la Serie Superior como andesitas toleíticas

Miembro s3a

El miembro corresponde a piroclastitas y epiclastitas volcánicas, llamadas “Tobas color café” cuyo espesor máximo es de 25 m. Cerca del volcán de San Salvador, se intercalan en ellas capas de escoria negra de más de 2 m de espesor. Las tobas con menores espesores se encuentran cerca del volcán y aumentan su espesor rápidamente a medida se alejan del mismo. Se distinguen también horizontes desarrollados en las tobas, de capas de suelo principalmente limoso, color café de más de 1.5 m de espesor (Schmidt-Thomé, 1975).

Estas tobas conforman en parte a los piroclásticos que se intercalan entre la Serie Superior e Inferior del miembro s2, varios geólogos asumieron que provenían de una erupción del volcán de San Salvador (CEL, 1984), de acuerdo a Meyer – Abich (1956), reubican la serie en el volcán de Ilopango.

Miembro s4

Wiesemann (1975, citado en CEL, 1984) lo describe como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, localmente efusivas ácidas.

Nombrado informalmente como “tierra blanca”, tienen su origen en la erupción de la ahora caldera de Ilopango. En esta zona los espesores tienen más de 50 m. Hacia el norte y al este, los depósitos mantienen su espesor, pero en la ciudad de San Salvador (dentro de la zona de estudio) el espesor promedio es de 4 m, aunque hay zonas en las laderas del Boquerón, donde los espesores tienen solamente 1 m y otras en el centro de la ciudad, en

zonas de valles fósiles que superan los 15 m. Se identifican horizontes de tierra negra intercalados (Schmidt-Thomé, 1975).

Esta serie está caracterizada por los productos de erupciones de un magma rico en sílice, de composición dacítica. La actividad explosiva del volcán de Ilopango produjo sobre todo una enorme cantidad de cenizas blancas y pómez, casi siempre sin estratificación aparente; los estratos se caracterizan a su vez por abundancia de bombas y lapilli de pómez así como fragmentos angulares de lava, mezclados con cenizas de granulometría variable (PNUD, 1972).

Steen McIntyre (s/fecha, citado en CEL, 1984) reconoce dos miembros, el inferior correspondiente a una capa basal de lapilli pumítico y ceniza gruesa vidriosa de 40 cm seguido por una ceniza vidriosa fina a gruesa de tono ligeramente oscuro de un espesor de 6 m; el miembro superior corresponde a una ceniza vidriosa fina a gruesa de tono ligeramente oscuro de 9 m espesor, separado de la parte inferior por una capita de cristales bien clasificados y ceniza fina.

Según Weyl (1955, citado en CEL, 1984) el principal constituyente es vidrio, además de plagioclasas frescas (An 35 – An 55), hornblenda verde ocasionalmente hornblenda café, hiperstena, clinaugita, magnetita. Las capas de pómez las clasifica a partir de análisis químicos como procedentes de un magma cuarzo – diorítico a leuco-cuarzo-diorítico.

En la cuenca, este miembro se distribuye principalmente en el sector oriente, nororiente y en las faldas del volcán de San Salvador (al nororiente), se evidencia que ha existido erosión de dicho miembro ya que se marcan los cauces de ríos y quebradas en los cuales la presencia de miembros más antiguos predomina.

Miembro s5b

Wiesemann *Et.al.* (1978, citado en CEL, 1984), lo describe como una acumulación de escorias, tobas de lapilli y cinder.

En la zona de estudio, las afloraciones de este miembro se concentran en cuatro cráteres, de los cuales los tres más importantes son El Boquerón, El Picacho y el Plan de La Laguna, todos se encuentran alineados a lo largo del sistema de fracturas NNO-SSE que pasa por El Boquerón; se identifica en esta zona un pequeño cono de escorias producto de la erupción de 1917 en el Volcán de San Salvador. El cráter del Plan de La Laguna produjo el otro grupo de conos de escoria primariamente negra (Schmidt-Thomé, 1975).

La composición de las rocas del picacho es andesítica, porfidítica hialopilitica con fenocristales de plagioclasa. El cono de escorias en el Boquerón es de andesitas con fenocristales de labradorita, olivino y augita (CEL, 1984).

Miembro s5c

Descrito como cenizas volcánicas y tobas de lapilli, de edad holocénica, este miembro se encuentra depositado sobre el miembro s3a en la zona de la Cordillera del Bálsamo en los municipios de Santa Tecla y Antiguo Cuscatlán. Parte de este miembro bordea en el oriente, a las escorias negras del Plan de La Laguna.

Miembro Qf

Son los depósitos más recientes debidos a las actividades humanas. Se considera principalmente piroclásticos jóvenes y material epiclástico que ha sido artificialmente trabajado (Schmidt-Thomé, 1975).

Consiste de depósitos sedimentarios del cuaternario constituidos por secciones acuáticas intercalaciones de rocas piroclásticas, en el centro del cráter del Plan de La Laguna; y por Conos de Deyección en las faldas del cerro de Nejapa.

1.8.4.2 Geología Estructural

La zona de estudio se encuentra ubicada en la estructura tectónica sobresaliente de la región, el Graven Central Centroamericano; el cual, a lo largo del territorio nacional

varía en su ancho entre 15 y 30 Km y se extiende con rumbo preferencial ONO-ESE (SNET, s/f),

La alta densidad de fallas presentes en la cuenca hace que se considere compleja (Campos, 1965). Se reconocen sistemas principales de fallas cuyos rumbos son E-O, NNE-SSO y NNO-SSE (Figura 1. 1); Grebe (1963, citado por Schmidt Thomé, 1975) considera que los centros de erupción más jóvenes se encuentran localizados donde se da la intersección de los sistemas de fallas E-O y NNO-SSE.

Sistema E-O

Se ubican en la parte sur de la zona de estudio, donde limitan la formación Bálsamo con la formación San Salvador, en los límites del graben, en la cordillera del Bálsamo (Figura 1. 1).

Se considera que este sistema es el más antiguo y que ha tenido un efecto de descenso en los terrenos, indicando la existencia de fallas gravitacionales; en la zona de estudio, se encuentran escalonadas y acompañadas por grietas paralelas a lo largo de las cuales hacen contacto los estratos de San Salvador con los del Bálsamo (PNUD, 1972)

Sistema NNE-SSO

Se considera que obedece probablemente a un desplazamiento tectónico, acompañado en ocasiones de actividad volcánica (PNUD, 1972). Las fallas de este sistema se identifican en la zona norte de la cordillera del Bálsamo (Figura 1. 1).

Sistema NNO-SSE

Corresponde al más reciente de los sistemas de fallas y se considera que probablemente ha controlado las erupciones históricas del volcán de San Salvador y que probablemente las

fallas paralelas y escalonadas de este sistemas hayan ocasionado la inclinación de Oeste a Este que presenta la depresión San Salvador-Ilopango (PNUD, 1972). La fractura más larga es la que atraviesa el volcán de San Salvador (Figura 1. 1), sobre su traza se han formado gran número de conos de escoria y cráteres de explosión tales como la Laguna Caldera, y los Chintos, pasa también por el cráter del Boquerón, el cono de escoria El Carmen y el cráter de explosión del Plan de La Laguna en Antiguo Cuscatlán (PNUD, 1972). Esta falla se identifica porque a través de ella y de bocas situadas a 1350 y 1450 msnm fluyó la lava del 6 de junio de 1917.

Algunas fallas de este sistema con modificaciones N-E, controlan los cauces de los ríos Tomayate, Acelhuate y otros (PNUD, 1972).

Otra falla de este sistema recorre desde la falda Oeste del cerro El Carmen y se prolonga hacia el NNO, y controlaría el tramo recto del río Sucio (afluente del río Lempa), entre las Mercedes y El Jocote.

2. MARCO TEORICO

2.1 El agua subterránea y el ciclo hidrológico

A la circulación interminable del agua a través del océano, la atmósfera y la tierra se le conoce como ciclo hidrológico; este se considera como un sistema abierto energizado por la radiación solar (Weight, 2004). El agua es evaporada del océano y de grandes cuerpos de agua, formando nubes que son arrastradas por el viento hacia los cuerpos continentales, dichas nubes se condensan gradualmente dando paso a la precipitación (lluvia o nieve), una parte regresa directamente al océano por medio de la escorrentía superficial, otra es almacenada en capas de hielo en los glaciares, otra parte es regresada a la atmósfera por la evapotranspiración o sublimación y el resto se infiltra y agrega a los cuerpos de agua subterránea, retornando finalmente al océano (Figura 2.1). El 97% de la cantidad total del agua en la tierra está contenida en los océanos; las capas de hielo y los glaciares contienen el 2%; el agua subterránea contiene el 1% de la cantidad total de agua; los ríos y lagos contienen el 0.009% mientras que el 0.001% está presente en la atmósfera (Appelo & Postma, 2005)

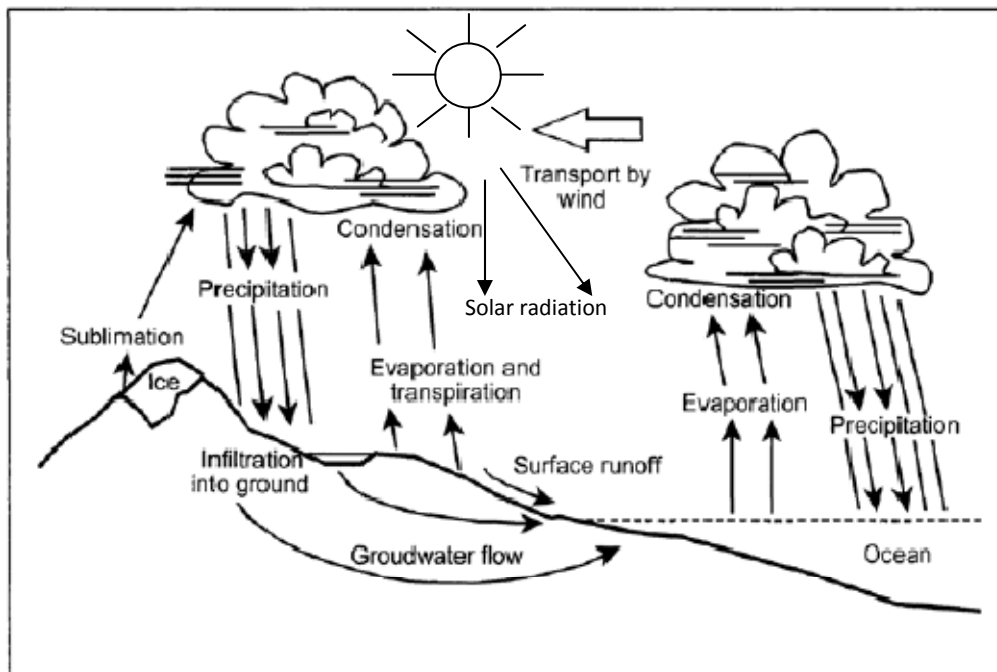


Figura 2.1 Ciclo Hidrológico
Modificado de (Weight, 2004)

Todos los procesos involucrados en el ciclo hidrológico contienen información codificada sobre el agua que es descifrada en parte por medio de los estudios hidroquímicos para luego ser trasladada en términos que puedan ser utilizados para el manejo de los recursos hídricos (Mazor, 2004).

El fraccionamiento isotópico, desde la formación de las nubes hasta su precipitación y sucesivos procesos de evaporación y condensación; el traslado de agua de mar por medio del viento en forma de aerosoles que deposita sales en el suelo y luego son lavados en el terreno por la lluvia; el N₂ y O₂ atmosféricos, CO₂ y gases nobles que son disueltos por la lluvia, así como la adición de tritio, ¹⁴C y ³⁶Cl, son incorporados en el ciclo hidrológico y alcanzan el agua subterránea. De igual forma se introducen contaminantes como los componentes de sulfuro contenidos en la lluvia ácida y otra diversidad de contaminantes producidos por el hombre y arrastrados en el proceso de infiltración para recargar el agua subterránea (Mazor, 2004). De ahí la importancia de conocer los procesos del ciclo hidrológico y descifrar la información sobre el agua, que se encuentre codificada en ellos.

2.2 Flujo del agua subterránea

Los estudios de flujo de agua subterránea se basan en la Ley de Darcy, quien en 1856 encontró al experimentar con un filtro de arena contenido en un tubo horizontal (Figura 2.2), que la descarga (Q) en un medio poroso es proporcional a la diferencia en la altura de agua o carga hidráulica (h), entre los extremos, e inversamente proporcional a la longitud del flujo neto (L), conociéndose además que el flujo es también proporcional a la sección transversal de la tubería (A); la constante de proporcionalidad es la Conductividad Hidráulica (K) (Fetter, 1980).

$$Q = -KA\left(\frac{h_a - h_b}{L}\right) \quad (2.1)$$

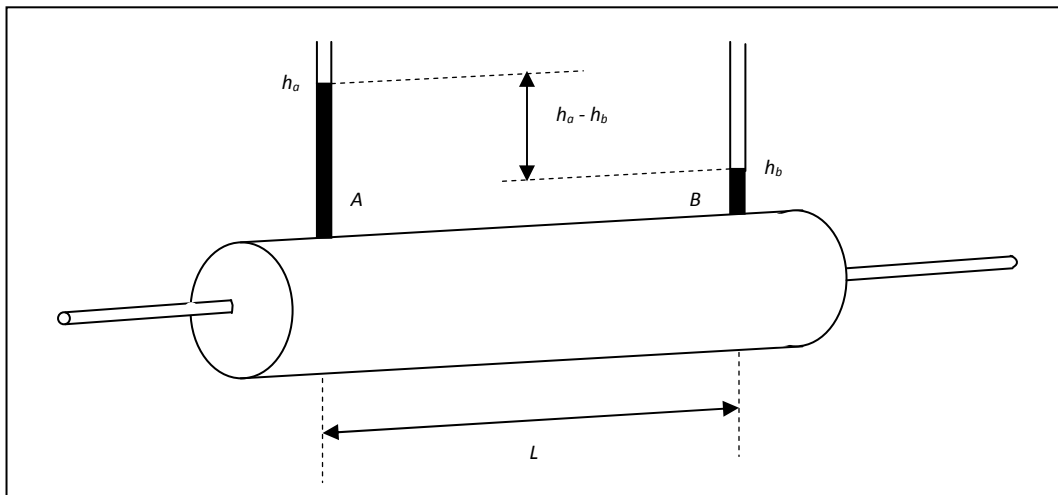


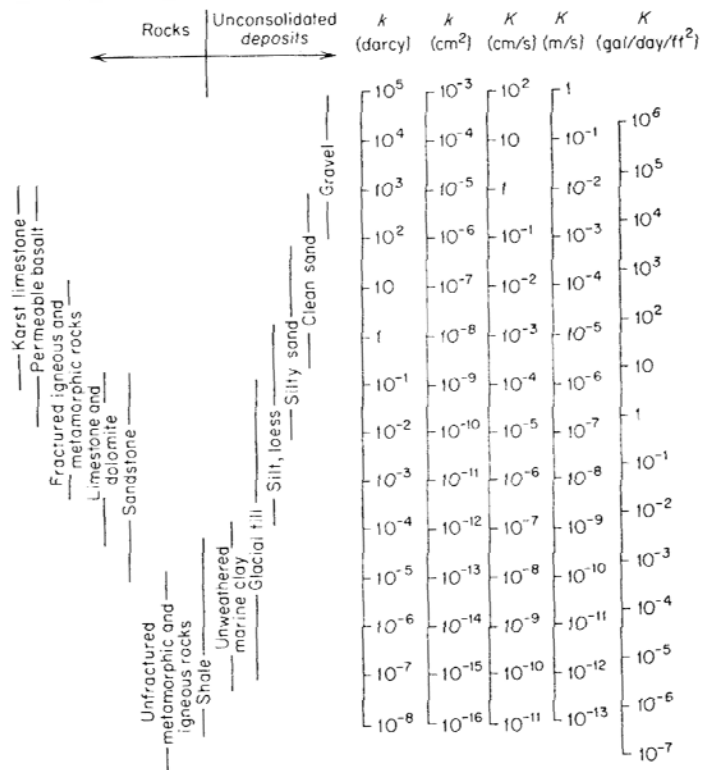
Figura 2.2 Tubería horizontal llena de arena para demostrar el experimento de Darcy
Fuente: (Fetter, 1980, pág. 82)

La ecuación (2.1) es aplicable para flujo laminar con valores del número de Reynolds que varían entre 1 y 10, es decir, para el movimiento muy lento del agua subterránea. En la mayoría de condiciones, la velocidad de flujo es lo suficientemente baja para la aplicabilidad de la Ley de Darcy (Fetter, 1980).

Parámetros como la *porosidad eficaz* (n_e) que se define como el volumen disponible para el flujo respecto de su volumen total (Sanchez F. J., 2007); el *rendimiento específico* (S_y) que es la tasa de volumen de agua que drena de una roca saturada debido a la atracción de la gravedad del volumen total de la roca (Fetter, 1980); la *conductividad hidráulica* que es la facilidad de una roca para permitir el paso de un fluido a través de ella y que depende tanto del medio como del fluido que lo atraviesa y la *permeabilidad intrínseca o específica*, llamada comúnmente permeabilidad que es una función solamente del medio (Freeze & Cherry, 1979) constituyen las más significantes propiedades hidrogeológicas que dominan las condiciones del flujo en los acuíferos.

Los materiales de la tierra tienen amplios rangos de propiedades hidrogeológicas, la conductividad hidráulica y la permeabilidad varían hasta en 13 órdenes de magnitud (Tabla 2.1), de igual forma, existen valores asociados con las formaciones para el Rendimiento específico (Tabla 2.2). Siendo algunos valores aplicables a dos o más tipos de formaciones, se debe tener especial cuidado y suficiente información sobre la geología local para la estimación de estos parámetros utilizando la información aquí presentada.

Tabla 2.1 Rango de valores de conductividad hidráulica y permeabilidad



Fuente: (Freeze & Cherry, 1979, pág. 29)

Tabla 2.2 Rendimiento Específico (%)

Material	Rendimiento Específico		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Arcilla	5	0	2
Arcilla arenosa	12	3	7
Limo	19	3	18
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	26
Arena gruesa	35	20	27
Arena gravosa	35	20	25
Grava fina	35	21	25
Grava media	26	13	23
Grava gruesa	26	12	22

Fuente: (Fetter, 1980, pág. 79)

La combinación de las formaciones geológicas con diferentes valores para las propiedades antes mencionadas dan lugar a los acuitardos, acuíferos y acuicludos, y estos a su vez, al combinarse en diferentes capas superpuestas unas sobre otras ofrecen el grado de confinamiento al acuífero.

2.3 La composición del agua subterránea

Como se mencionó al inicio de este capítulo, el viaje del agua a través del ciclo hidrológico contiene importante información codificada en sus procesos. La composición química del agua lluvia que precipite en cierta región, adicionada a otros componentes que se encuentren en el ambiente, llámese suelo- aire, y que puedan ser disueltos por esta agua serán la base de la química del agua que se infiltre; posteriormente, en su viaje por las formaciones geológicas, en un inicio por la zona no saturada y luego por la zona saturada, esta agua disolverá en alguna medida y dependiendo del tipo de roca, disolverá especies presentes en la misma, brindando la facilidad de poder caracterizarla químicamente y deducir a partir de esa información, en alguna manera cuáles podrían ser los procesos involucrados en el viaje de dicha agua hasta el punto de muestreo y análisis.

2.3.1 Química del agua subterránea

Se considera que el agua lluvia en su viaje inicial desde las masas oceánicas consiste de un agua de mar diluida (Appelo & Postma, 2005). Durante su transporte sobre la tierra, las masas de aire y las nubes llevarán polvos y gases continentales de origen natural y/o industrial que modificarán la composición del agua lluvia, aumentando las concentraciones de tales especies a medida que se aleja de las costas. Estudios citados por Appelo & Postma (2005), han demostrado que las concentraciones de Na^+ , K^+ y Mg^{2+} , son en un principio provenientes del agua de mar, mientras que el Ca^{2+} es proveniente de polvo contenido en la atmósfera. Por otra parte, los NO_3^- y SO_4^{2-} son provenientes de gases disueltos procedentes de la industria y el tráfico terrestre, produciendo fuertes ácidos como

el nítrico (HNO_3) y el sulfúrico (H_2SO_4), cuya disociación baja el pH del agua lluvia a valores de 4 causando la llamada “lluvia ácida”. Importante de mencionar es el hecho de que cada zona podrá presentar variaciones en cuanto a los aportes de las diferentes especies al agua lluvia, por lo que la información aquí presentada debe ser tomada de acuerdo a las limitaciones de cada sitio.

Cuando el agua alcanza la superficie del terreno e inicia su proceso de infiltración, inicialmente dependiendo de la acidez que lleve, reaccionará con algunas especies depositadas en el suelo mediante la deposición seca, tales como Cloruro (asociado con altas tasas en los aerosoles), Aluminio, Cadmio, Plomo, Cobre, Zinc y otros elementos traza (Appelo & Postma, 2005) de mucha importancia en el estudio de la contaminación de aguas subterráneas.

Adicionalmente, el agua en su contacto inicial con el suelo interactúa con el CO_2 producto de la respiración de las plantas y de la descomposición de la materia orgánica presente en el suelo, este CO_2 biogénico se disuelve en el agua infiltrada, produciendo ácido carbónico que lenta y continuamente disuelve minerales contenidos en la roca, repitiendo el proceso hasta agotar dicho CO_2 (Mazor, 2004), siguiendo su viaje hasta alcanzar la zona saturada.

El agua subterránea puede tener una diversidad de especies disueltas en ella como resultado de su interacción química y bioquímica con el medio. La concentración de los sólidos totales disueltos (TDS, por sus siglas en inglés) en el agua subterránea es determinada por el peso del residuo sólido obtenido por evaporación de la medida del volumen de una muestra filtrada y secada. Una clasificación del agua subterránea utilizando los TDS es presentada en la Tabla 2.3.

A lo largo del tiempo se han logrado identificar las especies que comprenden más del 90% del total de sólidos disueltos en el agua, estos ocurren principalmente en forma iónica (Freeze & Cherry, 1979), y son obtenidos de los diferentes procesos que sigue el agua a lo largo del ciclo hidrológico (Tabla 2.4).

Tabla 2.3 Clasificación simplificada del agua subterránea basada en los TDS

Categoría	Sólidos Totales Disueltos (mg/L o gr/m ³)
Agua dulce	0-1,000
Agua salobre	1,000-10,000
Agua salina	10,000 – 100,000
Salmuera	Más de 100,000
Agua potable	< 500
Agua de mar	35,000

Adaptado de: Freeze & Cherry, 1979 (pág. 84) y Ruppe & Ginn (2008)

Tabla 2.4 Principales especies orgánicas disueltos en el agua subterránea

Constituyentes mayoritarios (Concentraciones > 5mg/L)	
Bicarbonato (HCO ³⁻)	Calcio (Ca ²⁺)
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Sodio (Na ⁺)
Cloruro (Cl ⁻)	Magnesio (Mg ²⁺)
Nitratos (NO ₃ ⁻)	Acido carbónico (CO _{2(aq)})
Sílice (SiO ₂)	
Constituyentes minoritarios (0.01 – 10 mg/L)	
Boro (B)	Potasio (K ⁺)
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	Estroncio (Sr ²⁺)
Fluoruro (F ⁻)	Hierro (Fe ²⁺)
Algunos elementos traza (< 0.1 mg/L)	
Aluminio (Al ³⁺)	Plomo (Pb ²⁺)
Arsénico (As)	Manganeso (Mn ²⁺)
Bromo (Br ⁻)	Fosfato (PO ₄ ³⁻)
Cromo (Cr)	Zinc (Zn ²⁺)
Cobre (Cu ⁺)	

Adaptado de Fetter (1980) y Appelo & Postma (2005)

El análisis químico de las aguas por lo general se realiza mediante un laboratorio de alta credibilidad en el medio, para verificar la credibilidad de los resultados siempre es necesario presentar el correspondiente valor de la Electroneutralidad o Balance Iónico, se recomienda en la literatura hidrogeológica valores máximos de 5% (Appelo & Postma, 2005 y Mazor, 2004) , aunque hasta un 10% puede ser discutido y justificado. Sin embargo dependerá de cada estudio los valores máximos que se acepten como validos al respecto.

Los principales procesos que pueden disolver especies químicas en el agua subterránea son: disolución mineral y precipitación, reacciones de oxidación y reducción, intercambio iónico y adsorción e hidrólisis (Ruppe & Ginn, 2008). Por considerarse de mayor influencia en el presente estudio, serán tratados en este documento solamente los primeros tres procesos.

2.3.1.1 Disolución de minerales

El agua lluvia llega a la superficie del terreno con cierta acidez causada por su misma naturaleza y acentuada por los gases producto de la contaminación antropogénica, en su proceso de percolación en la zona no saturada y viaje a través de la zona saturada entra en contacto con diferentes tipos de roca que imparten una caracterización de acuerdo a los minerales disueltos contenidos en la misma y de acuerdo al grado de disolución que estos tengan al contacto con el agua. La Tabla 2.5 presenta las características que la litología imprime en la composición del agua subterránea.

Un estudio realizado por Wallin (1980), presentado en Appelo & Postma (2005) en el cual se relaciona la escurrentía media anual en cauces para pequeñas cuencas, con los sólidos totales disueltos en el agua (TDS), permite observar el comportamiento que los diferentes tipos de acuíferos tienen en su interacción con el agua subterránea en el tiempo (Figura 2.3).

Considerando la proporcionalidad inversa entre la escurrentía media anual y el tiempo de residencia, dos tendencias pueden apreciarse de la gráfica, la primera muestra que las calizas, el granito, la arena y la grava tienen muy poca influencia de la cantidad de escurrentía y por lo tanto del tiempo de residencia del agua en el acuífero, lo contrario sucede con las arcillas mezcladas con areniscas, calizas, areniscas, esquistos y gneis, los cuales muestran una fuerte dependencia de la cantidad de escurrentía, es decir, a mayores tiempos de residencia, la cantidad de minerales disueltos aumenta. Las diferencias se relacionan con la tasa de disolución de estos minerales. Las gravas se caracterizan por estar formadas de rocas de cuarzo insoluble altamente resistente a la disolución, lo cual imparte características químicas al agua subterránea, con pocos minerales disueltos a partir de la roca principalmente controlados por la química del agua lluvia y la evapotranspiración. Las

calizas y las rocas volcánicas contienen más minerales solubles con la disminución de la escorrentía y por lo tanto con el aumento del tiempo de residencia, aunque solamente es ligeramente superior a la de las arenas y gravas, indicando que la tasa de disolución es rápida comparada con el tiempo de residencia (Appelo & Postma, 2005), lo anterior es concordante con los valores de conductividad hidráulica presentados en la Tabla 2.1, que ubica a estos tipos de roca con valores de conductividad hidráulica de media a alta y por lo tanto con velocidades similares.

Tabla 2.5 Características impartidas por la litología en el agua subterránea

Roca	Composición del agua subterránea
Arenisca	Baja salinidad (300-500 mg/L); HCO_3^- anión mayor, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} en similares cantidades; buen sabor.
Caliza	Baja salinidad (500-800 mg/L); HCO_3^- anión mayor, Ca^{2+} catión dominante; buen sabor.
Dolomita	Baja salinidad (500-800 mg/L); HCO_3^- anión mayor, Ca^{2+} igual a Mg^{2+} ; buen sabor.
Granito	Muy baja salinidad (300 mg/L), HCO_3^- anión mayor, Na^+ y Ca^{2+} cationes mayores; muy buen sabor.
Basalto	Baja salinidad (400 mg/L); HCO_3^- anión mayor, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} igualmente importantes; buen sabor.
Esquisto	Baja salinidad (300 mg/L); HCO_3^- anión mayor, Ca^{2+} , y Na^+ cationes mayores; buen sabor.
Marga	Salinidad media (1200 mg/L); HCO_3^- y Cl^- aniones mayores, Ca^{2+} , y Na^+ cationes mayores; sabor pobre pero potable.
Arcillas y rocas sedimentarias de arcilla	Con frecuencia contienen rocas de sal y yeso. Alta salinidad (900-2000 mg/L); Cl^- es el catión mayor; sabor pobre, ocasionalmente no potables.
Yeso	Alta salinidad (2000-4000 mg/L); SO_4^{2-} anión dominante; Ca^{2+} catión dominante, seguido por Na^+ y Mg^{2+} , sabor amargo, no potable.

Traducido de (Mazor, 2004, pág. 51)

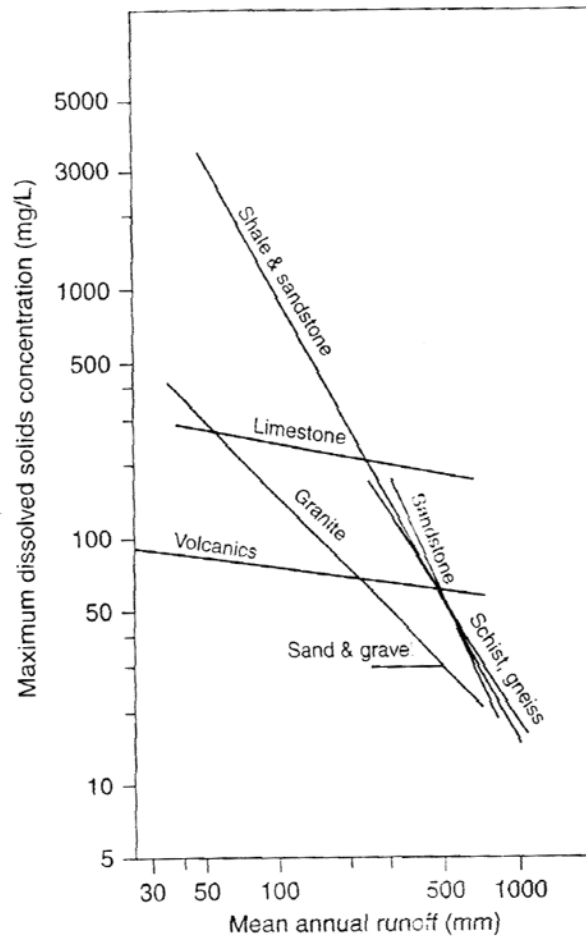


Figura 2.3 Diferencias en la concentración de los TDS como una función del tipo de roca y la escorrentía anual.
Fuente: Appelo & Postma (2005)

Analizando el comportamiento de los granitos, areniscas, esquistos y gneis, existe una proporcionalidad inversa entre de la cantidad de TDS y la escorrentía media anual, sugiriendo tasas de disolución bajas comparadas con el tiempo de residencia y que los niveles de concentración están fuertemente influenciados por dicha permanencia del agua en el estrato rocoso (Appelo & Postma, 2005). Para estas rocas, los valores de conductividad hidráulica se encuentran entre los valores más bajos de la Tabla 2.1, sin embargo cuando el grado de fracturamiento podría modificar considerablemente el comportamiento de estas rocas en relación al tiempo de residencia. Debe notarse que en el

caso de las calizas, estas podrían aproximarse al equilibrio, mientras que en las rocas silicatos debe considerarse la disolución cinética (Appelo & Postma, 2005, pág. 55).

Puede darse también la precipitación de minerales en el suelo o en los acuíferos. La intemperización de los silicatos generalmente da lugar a la formación de minerales de arcilla (Appelo & Postma, 2005), tal es el caso de algunos estratos arcillosos encontrados en la geología local.

En climas áridos, la evaporación puede dejar precipitados un grupo de minerales en el suelo, se incluyen yeso, calcita y sales (Appelo & Postma, 2005).

2.3.1.2 Procesos de oxidación y reducción

Un proceso redox consiste en la transferencia de electrones entre constituyentes disueltos, gaseosos o sólidos involucrados en el ambiente del agua subterránea. Por definición oxidación es pérdida de electrones y reducción es ganancia de electrones. no existe liberación de electrones en la reacción, el número de electrones liberados es igual al número de electrones ganado (Freeze & Cherry, 1979). De lo anterior, una sustancia con facilidad para aceptar electrones es oxidante y una sustancia que tiene facilidad para donar electrones será reductora (Figura 2.4) este comportamiento puede invertirse si la sustancia se encuentra con otra que libera o acepta electrones con mayor facilidad (Sanchez F. , 2005)

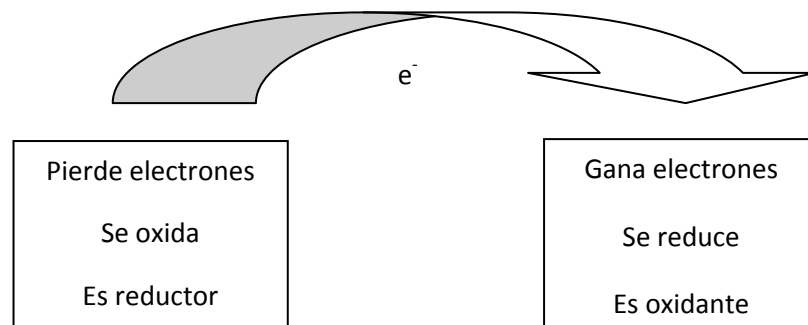


Figura 2.4 Denominaciones para los constituyentes de los procesos redox

Los procesos redox se encuentran presentes en el transporte del agua desde el inicio de su etapa de infiltración, ejerciendo control sobre las concentraciones de algunas especies en el agua subterránea, tales como O_2 , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , H_2S , CH_4 , NO_3^- , etc., por lo que determina contaminantes filtrados producto de la agricultura, la minería, botaderos de basura, fugas de los sistemas de aguas negras, depósitos industriales y otros (Appelo & Postma, 2005).

Una medida de la tendencia de oxidación o reducción de una solución es denominada mediante el parámetro pe (Freeze & Cherry, 1979), el cual por definición es:

$$pe = -\log [e] \quad (2.2)$$

pe , es una cantidad adimensional que describe la actividad relativa de los electrones, similar al pH , el cual describe la actividad para el protón de hidrógeno H^+ (Freeze & Cherry, 1979). pH y pe son funciones de la energía libre de Gibbs involucrada en la transferencia de 1 mol de protones o electrones. La energía libre de Gibbs de una reacción puede ser relacionada al voltaje de una reacción redox en una celda electroquímica por la relación (Appelo & Postma, 2005):

$$\Delta G = nFE \quad (2.3)$$

Donde E es el potencial o fuerza electromotriz en Volt, F es la constante de Faraday (96.42 kJ/Volt-mol) y n es el número de electrones transferidos en la reacción.

Cálculos de la termodinámica permiten relacionar los parámetros utilizados en el cálculo de las reacciones redox. Se relacionan, la energía libre de Gibbs, el potencial redox (Eh) que puede ser medido mediante equipo y se define como la energía ganada en la transferencia de 1 mol de electrones de un oxidante a H_2 , la h en el Eh indica que el potencial es en la escala del hidrogeno y E simboliza la fuerza electromotriz en Volt (Freeze & Cherry, 1979) y pe , (actividad del electrón) definida anteriormente.

Para una reacción a 25 °C en las cuales las medias reacciones son expresadas en términos de la transferencia de un electrón simple, la relación Eh y pe viene dada por:

$$Eh = \frac{2.303RT}{F} pe \quad (2.4)$$

Donde R es la constante de los gases (8.314×10^{-3} kJ/deg/mol), T es la temperatura absoluta, F es la constante de Faraday y n es el número de electrones en la media reacción. A 25 °C, la expresión se puede expresar:

$$Eh = 0.059pe \text{ (Volt)} \quad (2.5)$$

La forma en que se obtienen estas relaciones y la teoría básica de las reacciones redox es presentada por Appelo & Postma (2005) y por Freeze & Cherry (1979).

Diagramas Redox

Para mostrar la movilidad de elementos minoritarios y elementos traza se utilizan los “Diagramas redox”, que consisten en mostrar la ocurrencia, tanto de las especies disueltas como de las especies minerales como una función de pe (o Eh) y el pH . Estos diagramas permiten visualizar rápidamente (y conociendo las características del acuífero) las especies que podrían estar presentes bajo las condiciones analizadas, aunque deben realizarse cálculos más detallados para confirmar aspectos críticos. Appelo & Postma (2005) desarrollan los cálculos para los diagramas de estabilidad del arsénico, nitrógeno, azufre, carbono y hierro, y discuten los procesos involucrados en ellos.

Secuencia de redox en las aguas subterráneas

Partiendo de los diagramas de redox, puede presumirse cuál es el orden de las reacciones de oxidación y reducción que ocurrirán en el agua subterránea, resultando que éstas siguen una secuencia de reducción que va de valores altos de pe a valores bajos del mismo. La Figura 2.5 muestra la secuencia predominante de las medias reacciones principales que ocurren para un pH 7. En la parte superior aparecen los principales procesos de reducción y en la

parte inferior los principales procesos de oxidación. Se da inicialmente el decaimiento de la materia orgánica con el consecuente consumo de oxígeno, si el oxígeno es consumido completamente y todavía la materia orgánica está presente en el medio, otros aceptadores de electrones tales como NO_3^- , Mn^{+4} , Fe^{+3} , SO_4^{2-} y CH_4 , inician su intervención determinada por la intensidad del pe , igual secuencia siguen las reacciones de oxidación, su apareamiento se da acorde al agotamiento de los donadores de electrones que se van transformando a formas más estables después de haber participado en la reacción. Es importante mencionar que una reacción de reducción procederá con una reacción de oxidación que se encuentre localizada (origen de la flecha) a valores inferiores de pe . Por ejemplo, la reducción del SO_4^{2-} puede ser combinada con la oxidación de la materia orgánica, pero no con la oxidación del Fe^{+2} (Appelo & Postma, 2005).

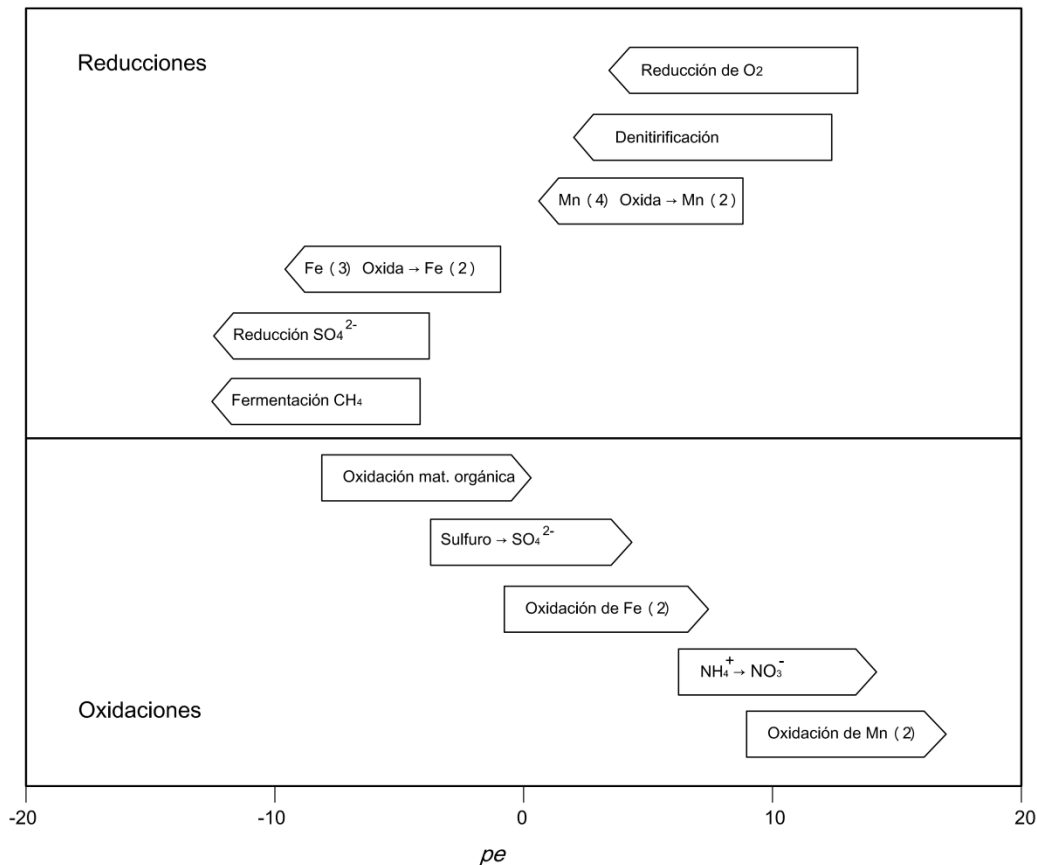


Figura 2.5 Secuencia de procesos importantes de redox a pH=7 en sistemas naturales Traducido de Appelo & Postma (2005)

La secuencia de las reacciones redox involucran materia orgánica, y están mediadas microbiológicamente, esto significa que aunque las reacciones son termodinámicamente espontáneas, requieren el efecto catalizador de los microorganismos para ser consideradas como un componente significativo del ambiente del agua subterránea, por lo tanto deben tenerse en cuenta si se quiere entender las causas y efectos de los procesos redox (Freeze & Cherry, 1979).

2.3.1.3 Intercambio iónico

Ciertas sustancias sólidas se caracterizan por tener un desbalance eléctrico, el equilibrio lo alcanzan rodeándose de cationes o aniones según sea la carga faltante; ya que los iones retenidos lo están débilmente, cuando entran en contacto con el medio acuoso, puede darse el reemplazo valencia a valencia, por otros iones del mismo signo, a este proceso se le denomina *intercambio iónico*. Se dice que los iones están *adsorbidos* por un sólido cuando la adherencia se da a la superficie del sólido, mientras que el término *absorbido* es referido para denotar que el ión está dentro de la superficie del sólido; los procesos anteriormente descritos pueden entenderse mejor mediante la Figura 2.6. Para que el intercambio iónico se lleve a cabo, deben existir iones adsorbidos en el sólido.

En el ambiente de las aguas subterráneas los coloides que característicamente exhiben un comportamiento de intercambio iónico acentuado son las arcillas, lo cual está relacionado con su gran área superficial de contacto con el medio, siendo mayor el intercambio cuando se encuentran en tamaño coloidal (10^{-3} a 10^{-6} mm). Por lo general las arcillas presentan carga negativa, y los materiales adsorbidos son positivos, intercambiando cationes. Otros minerales de grano más grueso son envueltos por una película de materia orgánica y oxihidroxidos de hierro, y pueden cambiar aniones o cationes.

La naturaleza de la carga superficial es una función del pH. A bajos pH prevalece la carga positiva, mientras que a pH altos la superficie está cargada negativamente. En valores de intermedios, la carga será cero, esta condición se conoce como el *punto de carga cero*, concluyéndose que la tendencia de la adsorción de cationes o aniones depende del pH (Freeze & Cherry, 1979).

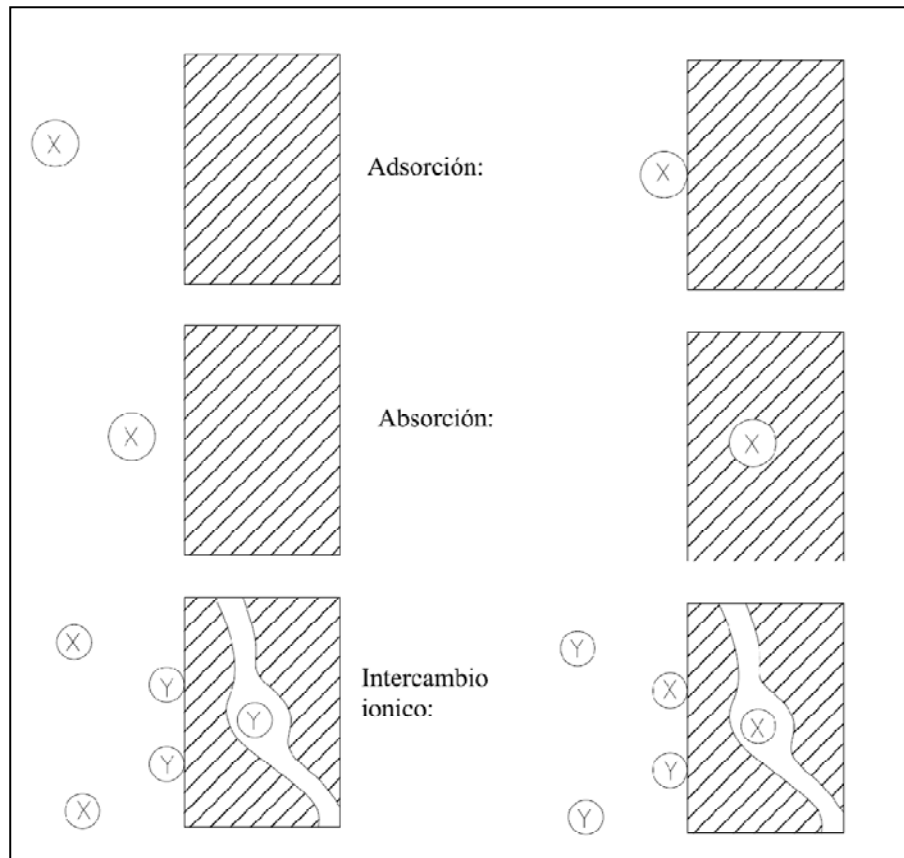


Figura 2.6 Diferentes procesos de sorción
Fuente: (Appelo & Postma, 2005)

Van Olphen (1963) citado en Freeze & Cherry (1979) define la *capacidad de intercambio catiónico* (CEC) como el exceso de iones opuestos en la zona adyacente de la superficie o capa cargada que puede ser cambiada por otros cationes. Normalmente es expresada como el número de mili equivalentes que pueden ser cambiados en una muestra de masa seca de 100 gramos. La Tabla 2.6 presenta valores de la capacidad de intercambio catiónico para algunos minerales y materia orgánica según diferentes autores.

La teoría y cálculos del intercambio iónico y su influencia en el agua subterránea es desarrollado por Appelo & Postma (2005) y Freeze & Cherry (1979), también White (2009) (White, 2009) discute ampliamente la mineralogía de las arcillas y los procesos de intercambio iónico en el medio acuático.

Tabla 2.6 Valores de CEC para arcillas y materia orgánica según diferentes autores

Mineral o sedimento	CEC meq/100g		
	(Appelo & Postma, 2005)	(Custodio & Llamas, 2001)	(White, 2009)
Caolinita	3-15	3-15	1-10
Halloysita	5-10		
Montmorillonita	80-120	80-150	
Vermiculita	100-200	100-150	120-200
Glauconita	5-40		
Illita	20-50	10-40	10-40
Clorita	10-40		<10
Goethita y Hematita	Hasta 100 (pH>3)		
Bentonita		Aprox. 100	
Esmectita			80-150
Materia orgánica (C)	150-400 (pH=8)		

En el agua subterránea, los procesos de intercambio catiónico son de interés para deducir lo que sucederá cuando cierta concentración catiónica se mueva hacia zonas con una capacidad significativa de intercambio. Los estratos que pueden alterar la química del agua subterránea por intercambio catiónico pueden poseer otras importantes propiedades geoquímicas (Freeze & Cherry, 1979). Las concentraciones de equilibrio catiónico dependen tanto de las concentraciones catiónicas del agua que entra en contacto con los espacios entre poros donde el intercambio ocurre y de la fracción mol adsorbida por las superficies de los poros antes de entrar en contacto con nuevos poros. Cada vez que el agua se moviliza cambia sus condiciones de equilibrio como respuesta a la nueva condición inicial.

Las reacciones de intercambio catiónico más importantes en sistemas de agua subterránea son aquellos que involucran cationes monovalente y divalente, tales como $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$, $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$, $\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ y $\text{K}^+ - \text{Mg}^{2+}$. (Freeze & Cherry, 1979), en zonas donde se da el contacto agua dulce – agua salada, el catión intercambiable que domina en agua dulce es Ca^{2+} , mientras que en agua salada domina el catión Na^+ .

Los procesos de intercambio iónico tienen una serie de aplicaciones prácticas en el campo de la hidrogeología, dado que regulan el transporte de contaminantes químicos en acuíferos y suelos (Appelo & Postma, 2005), adicionalmente puede dar aportes importantes en investigaciones sobre intrusión salina, reducción de la permeabilidad por arrastre de

coloides e incluso es utilizada en el sistema de tratamiento de aguas contaminadas para potabilizarlas.

2.3.2 Isótopos ambientales

Varios de los elementos que existen en la naturaleza tienen diferentes números de masa, la cual está determinada por variaciones en el número de neutrones del núcleo atómico que acompañan al protón. Por ejemplo, el átomo de hidrógeno (tiene un protón) y se conoce sin neutrón, con un neutrón y con dos neutrones. Esta variación en el número de neutrones es conocida como *isotopos*. La palabra isótopo deriva del griego *isos*= igual, y *topos*=lugar, refiriéndose al lugar en la tabla periódica (Mazor, 2004).

Se conoce que el hidrógeno ocurre en la naturaleza con masas atómicas ^1H y ^2H (deuterio) y ^3H (tritio), mientras que el oxígeno se encuentra con ^{18}O , ^{17}O y ^{16}O . De estos, el ^1H , ^2H , ^{18}O , y ^{16}O no participan en transformaciones nucleares y por lo tanto se denominan *isotopos estables*. Al contrario existen los *isótopos radioactivos* como el ^3H y el ^{14}C (radiocarbono) y el ^{36}Cl que decaen con el tiempo y pueden ser usados para datar (Appelo & Postma, 2005).

2.3.2.1 Unidades de la composición isotópica del agua

La concentración de los isótopos estables se da normalmente como la tasa de la menor abundancia isotópica sobre la mayor abundancia isotópica y es expresada relativa a un estándar, llamado para el agua Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW).

La abundancia isotópica en VSMOW es para $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2.005 \times 10^{-3}$ y $^2\text{H}/^1\text{H} = 1.56 \times 10^{-4}$, lo que significa que hay aproximadamente 2 átomos de ^{18}O por cada 1000 átomos de ^{16}O , similarmente hay 15.6 átomos de ^2H por cada 1000 átomos de ^1H (Appelo & Postma, 2005).

Para expresar la composición isotópica del agua se utiliza la notación δ expresada en permil (‰), la cual denota las desviaciones de la tasa isotópica de la muestra con respecto al estándar (VSMOW):

$$\delta\text{‰} = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \cdot 1000 \quad (2.6)$$

Donde R representa la tasa isotópica.

La notación δ es utilizada para el isótopo menos abundante, en tal caso debe utilizarse $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Valores inferiores a VSMOW serán negativos y superiores serán positivos.

2.3.2.2 Fraccionamiento isotópico

El agua se compone de diferentes combinaciones isotópicas en sus moléculas, las más comunes de interés geoquímico son $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ (común), $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$ (rara) y $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ (rara); se consideran la primera como molécula ligera y las últimas dos como moléculas de agua pesadas (Mazor, 2004).

El particionamiento de isotopos entre dos sustancias o dos fases de la misma sustancia con diferentes proporciones es llamado *fraccionamiento isotópico*. Los principales fenómenos que producen fraccionamiento isotópico son las reacciones de intercambio isotópico y los procesos cinéticos que dependen principalmente de las diferencias en la tasas de reacción de las moléculas isotópicas (Hoefs, 2009). La geoquímica del fraccionamiento isotópico es discutida con mayor amplitud por Hoefs (2009) y White (2009)

La fuerza de fraccionamiento entre una fase inicial (reactante, R_A) y una fase final (producto, R_B) puede ser expresada mediante el factor de fraccionamiento de la siguiente forma (Hoefs, 2009):

$$\alpha_{A-B} = \frac{R_A}{R_B} \quad (2.7)$$

El factor de fraccionamiento es generalmente cercano a la unidad. En los últimos años se ha reemplazado el factor de fraccionamiento por el *factor de enriquecimiento* ε , el cual Hoefs (2009) define así:

$$\varepsilon = \alpha - 1 \quad (2.8)$$

Y la tasa de separación viene dada por:

$$\Delta_{A-B} = \delta_A - \delta_B \quad (2.9)$$

Para los dos compuestos A y B, los valores δ y el factor de fraccionamiento α están relacionados por:

$$\delta_A - \delta_B = \Delta_{A-B} \approx 10^3 \ln \alpha_{A-B} \quad (2.10)$$

La diferencia radica en que, los valores δ son medidos en el laboratorio a partir de muestras tomadas en el campo, sin embargo, para obtener α deben realizarse cálculos experimentales.

Durante el recorrido del agua a través de los procesos de evaporación y condensación hasta que se integra al agua subterránea, ocurre un fraccionamiento isotópico cuyo estudio es muy útil para investigaciones hidrogeológicas.

En el proceso de evaporación, las moléculas de agua ligera se evaporan más eficientemente que las pesadas, dando origen a un fraccionamiento isotópico. Esto genera un vapor de agua enriquecido con moléculas ligeras, produciendo valores negativos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. El agua que originó la evaporación, por el contrario se vuelve enriquecida con moléculas pesadas,

reflejando valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. A medida que las nubes son removidas por el viento, el fraccionamiento isotópico se vuelve más eficiente, generando un agua enriquecida isotópicamente (valor positivo de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) en el cuerpo de agua donde ésta evaporación ocurre, si este es pequeño, por ejemplo tanques de evaporación, pequeñas lagunas, etc.; el proceso anterior es una aplicación de los procesos de Rayleigh.

Cuando se da la formación de nubes en el océano, estas se vuelven empobrecidas isotópicamente en relación al agua de mar, si estas nubes empobrecidas isotópicamente vuelven a generar precipitación y se continúan moviendo tierra adentro, el proceso será repetitivo, generando un incremento en el fraccionamiento con la distancia desde la región de evaporación, estas variaciones obedecen a la influencia del *efecto continental*. La topografía también desempeña un papel importante ya que existe un aire ascendente en las montañas que produce enfriamiento y condensación del vapor de agua, decreciendo el vapor remanente. Así la precipitación de unas nubes que han pasado sobre una cadena montañosa será isotópicamente más ligera que la precipitación de una cadena montañosa al lado del océano. Los procesos anteriores se ilustran en la Figura 2.7

Dansgaard (1964, citado por Appelo y Postma, 2005) demostró que la composición isotópica de la precipitación depende de la temperatura de evaporación del agua del océano y aún más de la temperatura de condensación a la cual se forman la lluvia y la nieve. El *efecto de la temperatura* es en gran medida responsable por las variaciones isotópicas en las aguas subterráneas (Mazor, 2004). Esto también puede ser apreciado en las variaciones estacionales, ya que la composición isotópica puede variar ampliamente si existen estaciones frías y cálidas.

El *efecto latitudinal* indica que la lluvia es generalmente más empobrecida en latitudes altas y más frías. La *cantidad* de precipitación influencia la composición isotópica, generando lluvias más empobrecidas isotópicamente durante los eventos de mayores cantidades precipitadas.

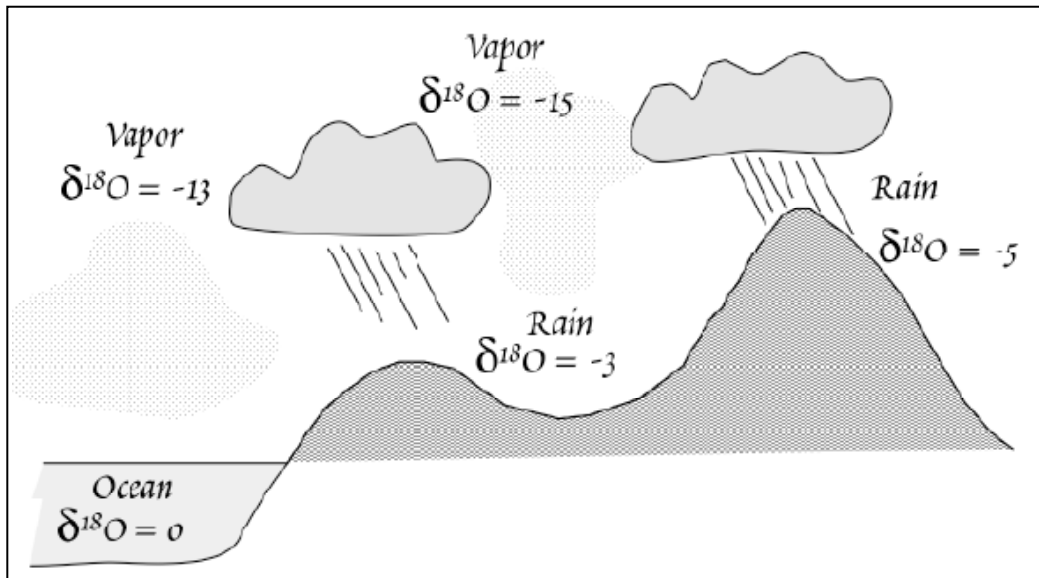


Figura 2.7 Fraccionamiento de Rayleigh y efecto continental del ^{18}O
 Fuente: (White, 2009, pág. 376)

La Figura 2.8 muestra la composición isotópica de la lluvia para varios lugares de la tierra por medio de la relación entre los valores $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. El comportamiento de los datos permite establecer una relación lineal dada por la relación:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2.11)$$

El resultado de la composición isotópica para cada uno de estos lugares es la combinación de los efectos descritos anteriormente. Es notorio en primera instancia el efecto de la temperatura, ya que la precipitación más empobrecida isotópicamente se encuentra en los icebergs mientras que en la ciudad costera de Bombay se dan las composiciones isotópicas más enriquecidas.

2.3.2.3 Aplicaciones de isótopos ambientales de la lluvia en estudios hidrogeológicos

Los isótopos ambientales son ampliamente utilizados ya que proveen información valiosa codificada en el ciclo hidrológico. El uso de estos trazadores permite a los hidrólogos e hidrogeólogos obtener indicadores efectivos sobre procesos a escala, partiendo de datos a pequeña escala (Kendall & Caldwell, 1988).

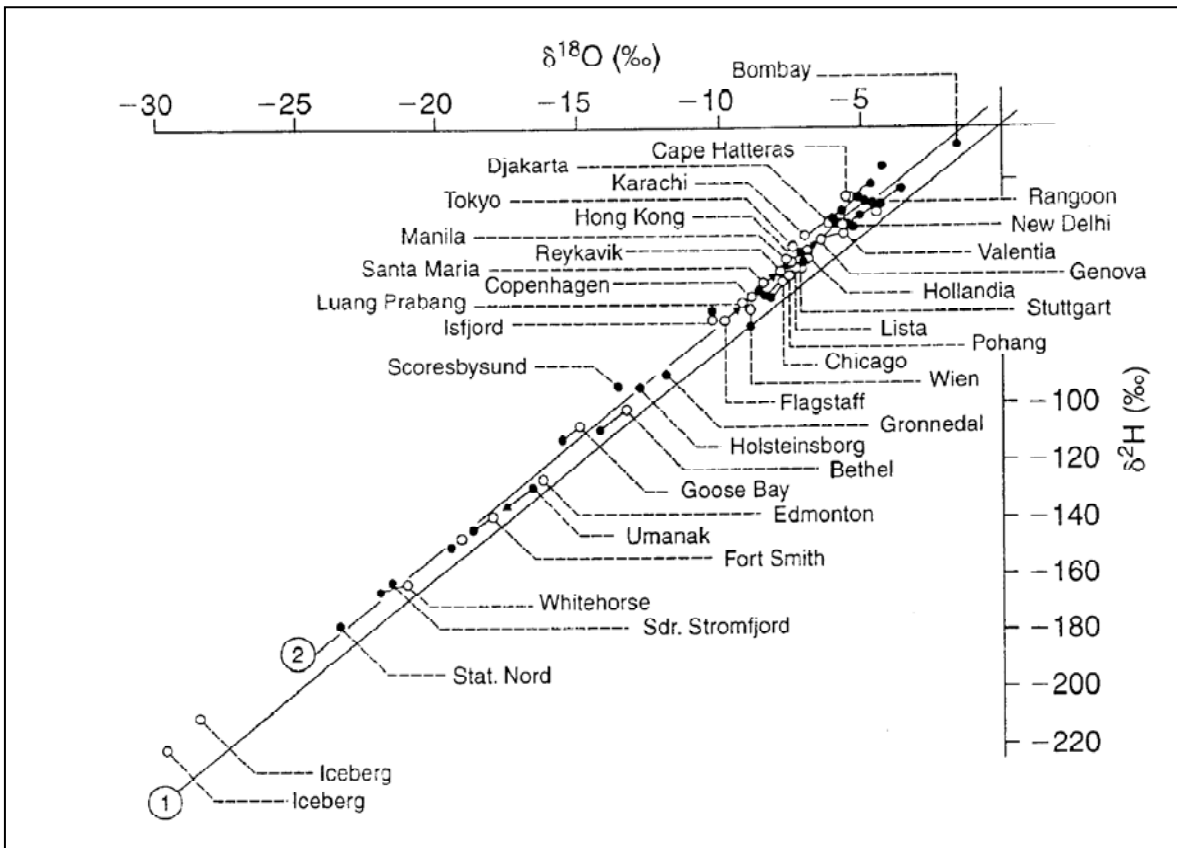


Figura 2.8 Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la lluvia de varias ciudades. La línea 2 es la línea meteórica y la 1 tiene la misma pendiente pero con el intercepto en cero
Fuente: Dansgaard (1964) citado por Appelo y Postma (2005)

Actualmente, en las investigaciones hidrogeológicas son usados principalmente como trazadores para determinar la proveniencia del agua subterránea, procesos de mezcla y/o interconexiones entre aguas subterráneas y cuerpos de agua superficial tales como ríos, lagos y lagunas.

Diversos casos de aplicación del uso de los isótopos ambientales en América Latina son presentados en OIEA (2009)¹.

¹ Muchos otros estudios relacionados con la temática pueden ser accedidos desde el sitio web de dicha organización <http://www.iaea.or.at>

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para llevar a cabo la investigación, fue necesario utilizar información geológica e hidrogeológica, así como herramientas geoquímicas e isotópicas. Con la geología y la hidrogeología local se elaboró el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del AMSS, y las herramientas geoquímicas e isotópicas fueron usadas para determinar la proveniencia de las principales fuentes de recarga del acuífero.

3.1 Información geológica

Los datos geológicos fueron recopilados de dos fuentes principales: los informes de perforación proporcionados por el Proyecto FORGAES que fue coordinado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Unión Europea; y los registros litológicos propiedad de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). Para la utilización de los datos se realizó la selección correspondiente.

Se obtuvo información geológica de 69 pozos, de los cuales 54 fueron utilizados para la elaboración del modelo geológico (Anexo 1), descartándose el resto por considerarse que la información estaba incompleta, se desconocía exactamente su ubicación geográfica, no estaba escrita en lenguaje técnico o daba lugar a diferentes interpretaciones que podían generar sesgo en la construcción de dicho modelo.

La información geológica fue procesada utilizando el programa Rockworks 2006 para obtener el modelo correspondiente. Para cada pozo utilizado se elaboró su columna estratigráfica (Anexo 2) con la distribución de los pozos en la zona de estudio, se seleccionaron secciones transversales que permitieran apreciar mejor la estratigrafía del subsuelo en la cuenca (Figura 3.1).

3.2 Datos hidrogeológicos

La información hidrogeológica fue obtenida de la ANDA, de estudios previos realizados en la zona y de información levantada en campo para el desarrollo de la investigación.

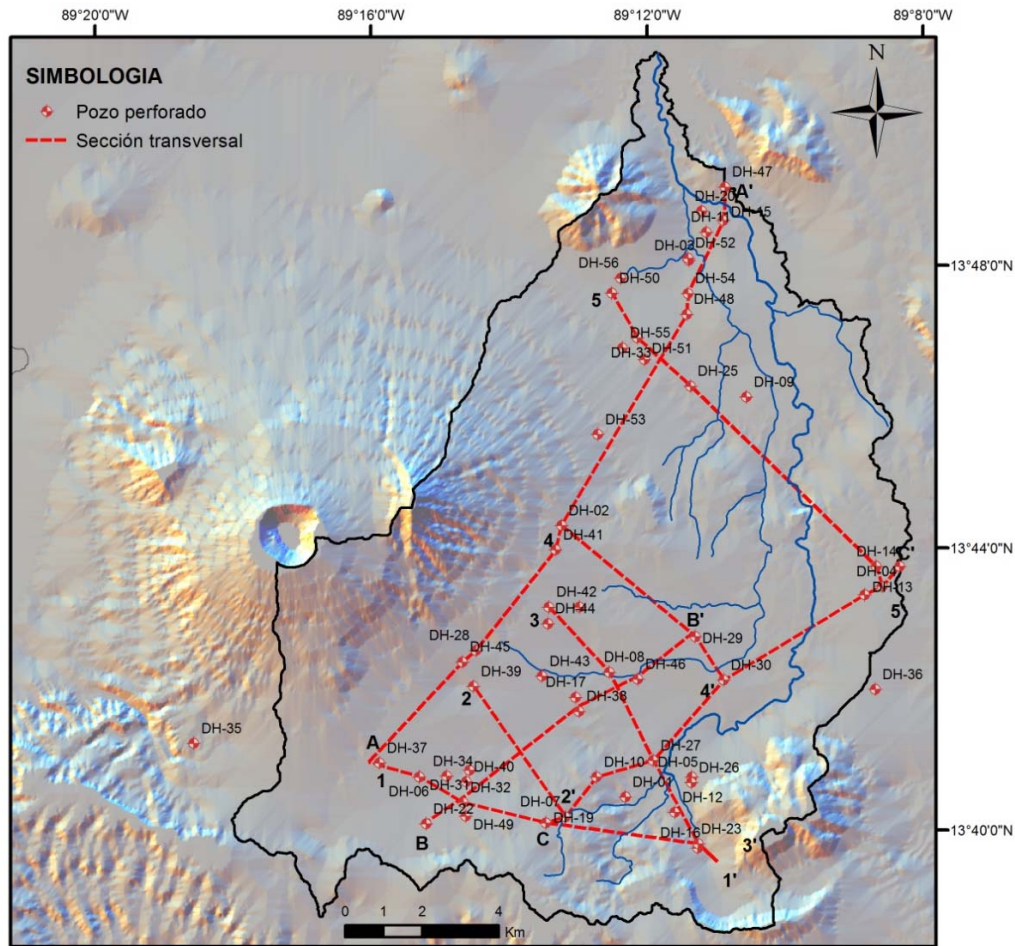


Figura 3.1 Mapa de distribución de pozos utilizados para el modelo geológico

Los parámetros hidrogeológicos tales como la conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, detalles de construcción del pozo, y datos de explotación fueron obtenidos de los informes de perforación de los pozos y de estudios previos realizados en la zona.

Para mostrar la tendencia de la distribución de los niveles piezométricos del acuífero y de la dirección de flujo en el mismo, se elaboró el mapa piezométrico considerando principalmente el período comprendido entre los años 1996 y 2009 (solamente en 3 pozos los datos pertenecen a los años 1985 y 1986), para lo cual se utilizó información de 53 pozos perforados profundos, 8 pozos excavados (someros y de gran diámetro) y 38 manantiales (Figura 3.2).

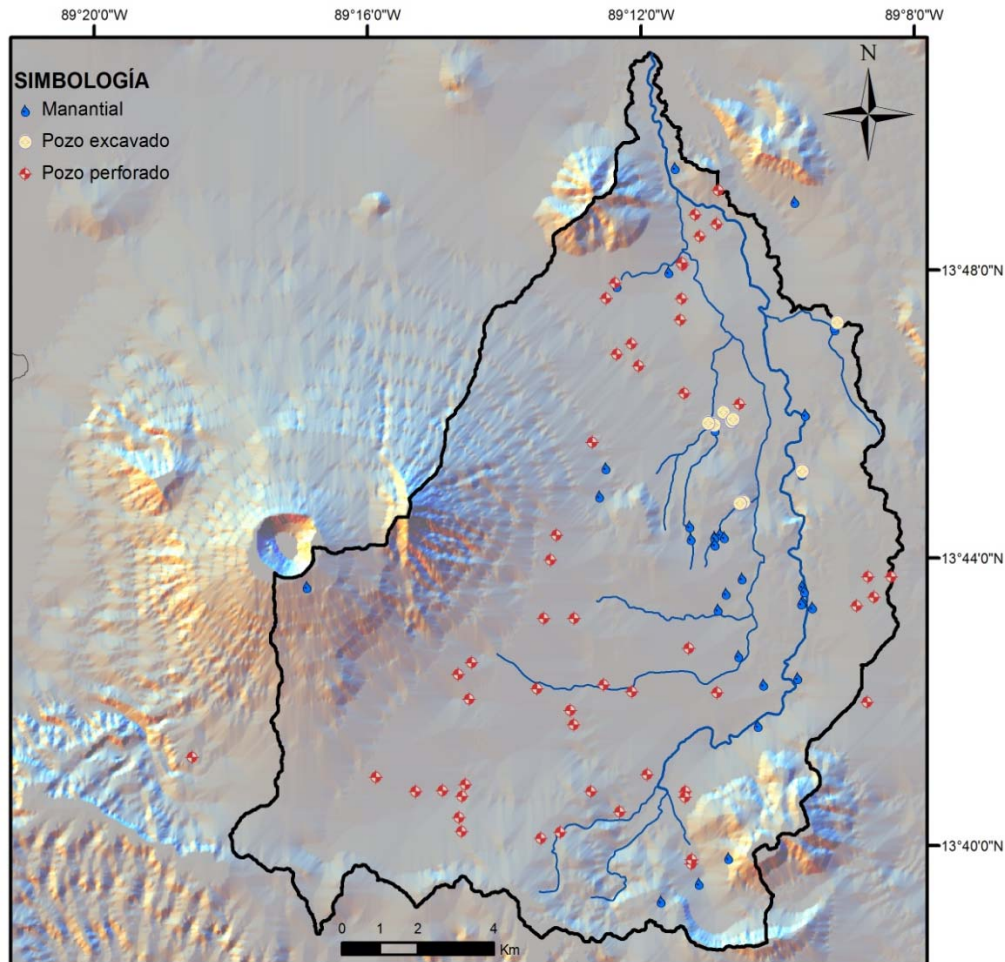


Figura 3.2 Mapa de distribución de puntos utilizados para el mapa piezométrico

La influencia estacional de algunos puntos en el acuífero fue obtenida de datos de registro de niveles en 5 pozos profundos de la zona (Figura 3.2), los cuales forman parte de la red de monitoreo de aguas subterráneas del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), el período de registro comprende como máximo dos años (2007-2009)

3.3 Datos hidroquímicos

Los análisis químicos se obtuvieron a partir de 36 muestras de agua distribuidas en 13 pozos perforados, 6 manantiales y 2 sistemas de agua potable. Los primeros dos grupos fueron tomados de agua cruda, mientras que el último se obtuvo de agua tratada (Figura 3.3).

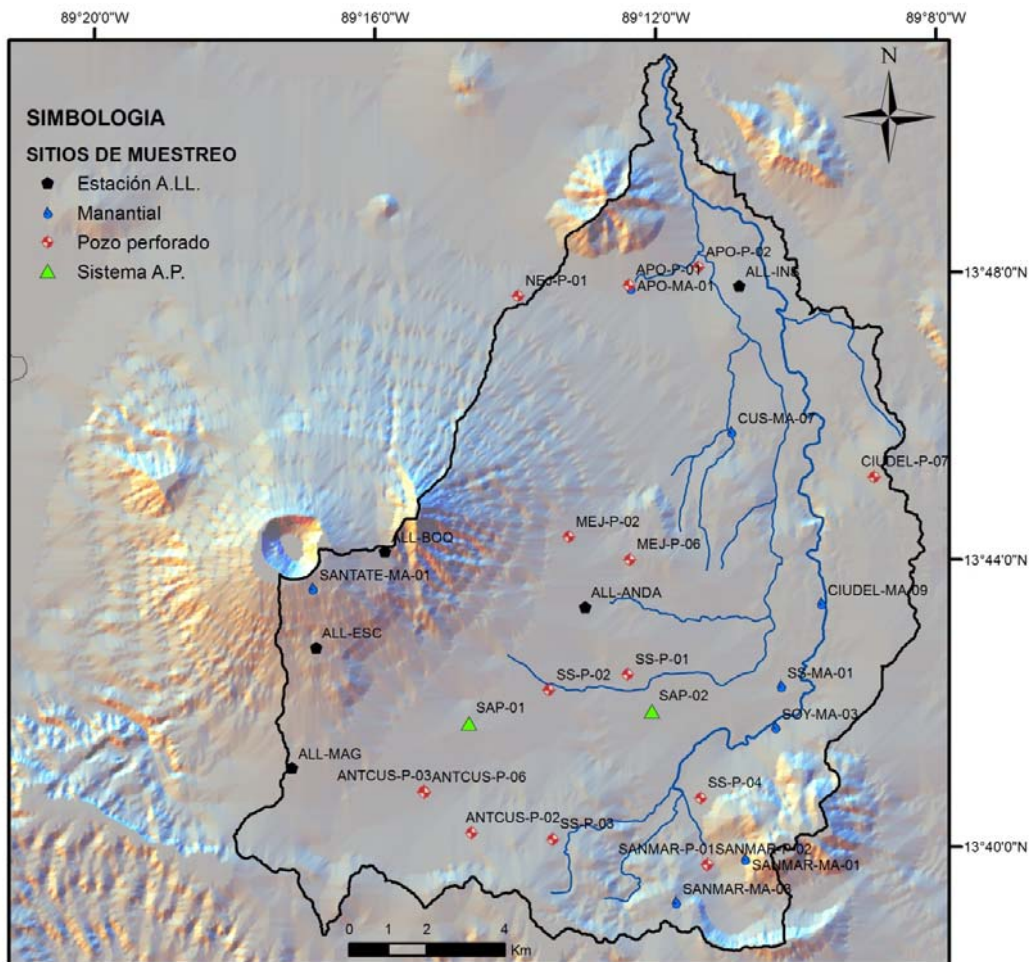


Figura 3.3 Mapa de distribución de puntos de muestreo químico e isotópico

Los sitios de muestreo fueron seleccionados entre los pozos inventariados por la ANDA y un inventario de 62 fuentes realizado como parte de la investigación. El criterio tomado para seleccionar estos puntos de muestreo fue la distribución espacial y en el caso de los pozos, también se tomó en consideración que la rejilla o el grupo de rejillas se ubicara en un estrato litológicamente similar.

Las muestras para análisis químico fueron obtenidas durante dos campañas de muestreo y complementadas mediante datos de estudios previos (Amaya Heske & Jiménez García, 2007). Se midieron datos de campo en cada punto de toma de muestra, y en 44 puntos de los 62 inventariados (Anexo 4), la Tabla 3.1 resume la forma en que fue distribuido este trabajo de campo así como el tipo de muestra que se tomó en cada caso.

Tabla 3.1 Trabajo realizado para obtener datos geoquímicos

Campaña de muestreo	Período	Tipo de muestra de agua			Iones mayores	Datos de campo
		Superficial	Subterránea	Tratada A.P.		
Inventario	Abr – jun 2009	30	14			44
1	Jun – sep 2009	6	9	2	17	17
2	Oct. – nov 2009	6	8	2	16	16
3	2006-2007		3		3	1

Para los análisis isotópicos se tomaron 26 muestras, distribuidas entre agua superficial, agua subterránea, aguas lluvias y sistemas de importación de agua potable, según se resume en la Tabla 3.2. Un total de 4 sistemas de captación de aguas lluvias distribuidos a diferentes elevaciones en la cuenca fueron instalados en conjunto con la ANDA, se tenía uno ya existente en la zona del boquerón, en la parte más alta de la cuenca, sumando 5 unidades que permitieron la colección de muestras de lluvia mensual en cada punto y que seguirán siendo utilizadas con fines de investigación por dicha institución (Figura 3.3). La composición isotópica promedio del agua lluvia de la cuenca fue obtenida de registros isotópicos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y de registros de la ANDA.

Tabla 3.2 Trabajo realizado para obtener datos isotópicos

Campaña de muestreo	Período	Tipo de muestra de agua para isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$			
		Superficial	Subterránea	Tratada A.P.	Agua lluvia
1	Jun. – jul. 2009	7	6		2
2	Sep. – oct. 2009		4	2	5

La medición de datos de parámetros de campo fue realizada para conocer las características in situ de las aguas en estudio y para conocer en alguna medida las tendencias de la misma que ayudaran en la selección de sitios para el muestreo químico. Las muestras para análisis químico se utilizaron para caracterizar químicamente las aguas, su evolución en su paso a través de la roca y alguna influencia del medio con el que han interactuado. Los análisis de isótopos ambientales fueron utilizados para conocer las principales fuentes de recarga del agua subterránea y la posible mezcla entre diferentes fuentes de recarga.

3.3.1 Metodología de campo

En la medición de datos de campo se utilizó una sonda multiparámetro YSI 556 con la cual se midió temperatura del agua, conductividad eléctrica, salinidad, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto, pH y potencial REDOX. La temperatura ambiente fue medida con termómetro ambiental y la alcalinidad total como CaCO_3 fue medida por medio de titulación con un equipo HACH modelo AL-DT (Anexo 4). Debido a que los pozos de muestreo son de producción, las medidas de oxígeno disuelto deben ser tomadas con reservas, debido a la turbulencia causada por el equipo de bombeo.

Las muestras para análisis químico fueron tomadas en dos frascos de polietileno de alta densidad (HDPE) de 450 ml cada uno, y filtradas con filtros millipore tipo HVLP 0.45 μm con la ayuda de una bomba de vacío. La muestra para análisis de cationes mayoritarios fue acidificada con Ácido Nítrico (HNO_3) al 69.8% de pureza, la muestra para análisis de aniones mayoritarios solamente fue filtrada. Ambas muestras fueron conservadas a baja temperatura en un depósito térmico y trasladadas el mismo día al laboratorio para su análisis.

Las muestras para análisis de isótopos ambientales fueron colectadas en frascos de polietileno de alta densidad (HDPE) de 60 ml directamente en el afloramiento de los manantiales o a la salida de los pozos según fuera el caso. No se filtraron estas muestras ni se agregaron preservantes, se procuro la eliminación de burbujas en la muestra y se conservaron en un lugar fresco para ser enviadas luego al laboratorio.

3.3.2 Metodología de laboratorio

3.3.2.1 Iones mayoritarios y elementos traza

Los análisis químicos del agua para iones mayoritarios y elementos traza fueron realizados en dos laboratorios: el Laboratorio de Servicios Analíticos de la Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café (PROCAFE) y el Laboratorio de Control de Calidad y Control de Contaminantes de la ANDA. Este último no realiza análisis de Sodio y Potasio por lo que para todas las muestras estos parámetros fueron analizados en el Laboratorio de PROCAFE. La Tabla 3.3 resume el método utilizado por cada laboratorio para los análisis.

Tabla 3.3 Métodos analíticos utilizados por los laboratorios

Lab.	Método de análisis	Alcalinidad	Dureza total	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ NO ₃ ⁻	SiO ₂
PROCAFE	Absorción atómica			X	X	X	X					
	Volumetría								X			
	Argentometría							X				
	Colorimetría										X	X
	Turbidimetría									X		
ANDA	Titulométrico 2340C		X									
	Titulométrico 3500 CaB Edta			X								
	Cálculo				X			X				
	Titulométrico	X							X			
	Turbidimetría									X		
	Colorimetría 4500 SiO ₂											X
	Electrodo de ion selectivo 4500-NO ₃ -D										X	

3.3.2.2 Isótopos ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$

Los análisis de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ fueron realizados en el Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá. El método analítico utilizado fue la Espectrometría de Masas. Los análisis de Deuterio fueron duplicados para todas las muestras, mientras que para $\delta^{18}\text{O}$ se duplicaron 5 muestras; en tales casos, el valor adoptado fue el promedio de ambos datos (Anexo 4).

4. RESULTADOS

4.1 Geología de la cuenca alta del río Acelhuate

Para comprender el comportamiento del sistema de flujo del agua subterránea y los procesos geoquímicos que se llevan a cabo en la misma, se ha realizado la revisión geológica de la superficie y la subsuperficie de la cuenca, distinguiéndose miembros de las formaciones Cuscatlán, Bálsamo y San Salvador y un sistema de fallas locales que influyen tal comportamiento. Dentro del contexto geológico de la zona de estudio, en general y para el interés de esta investigación, los materiales geológicos presentes en la cuenca pueden agruparse en tres grupos: las lavas basálticas o andesíticas, los piroclastos y los sedimentos aluviales o eluviales; aflorando las primeras principalmente en las partes altas de la subcuenca y los otros dos predominantemente en la parte media y baja. En tal revisión no se logró identificar el basamento del acuífero, puede suponerse que este se encuentra a profundidades superiores a los 250 m en la zona baja de la cuenca y a más de los 150 m en la zona alta y media de la misma. (Figura 4.1), habiéndose considerado para ello los informes de perforación de los pozos incluidos en la investigación según se relató en el numeral 3.1

4.2 Litología

Para caracterizar litológicamente la zona de estudio, se utilizó 53 informes de perforación de pozos distribuidos en la cuenca, los datos fueron procesados utilizando el programa Rockworks 2006 con una grid a cada 50 m, luego, se generaron 8 secciones transversales a las cuales se integró la información de la geología estructural disponible en el mapa geológico nacional (Figura 4.2)

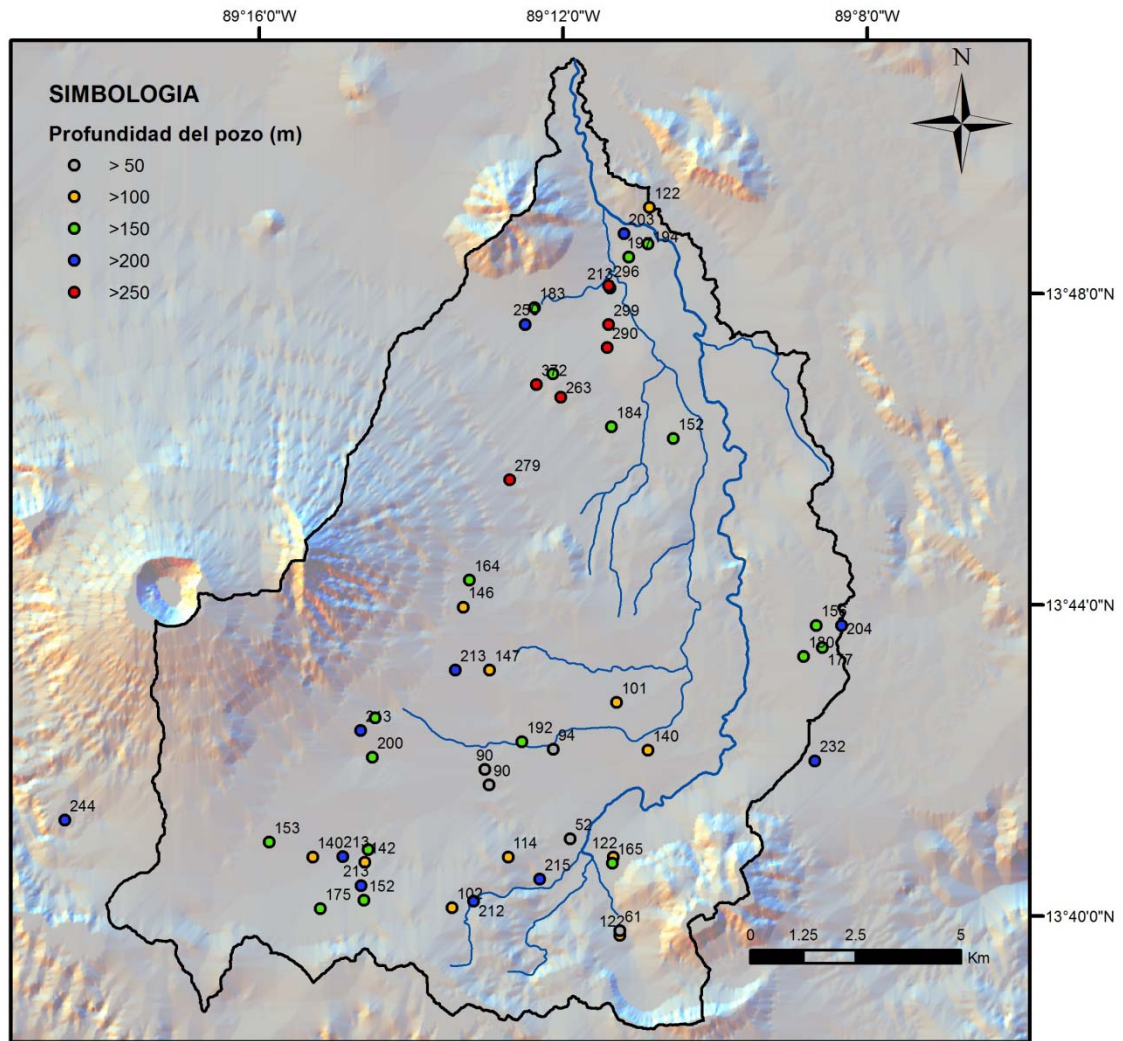
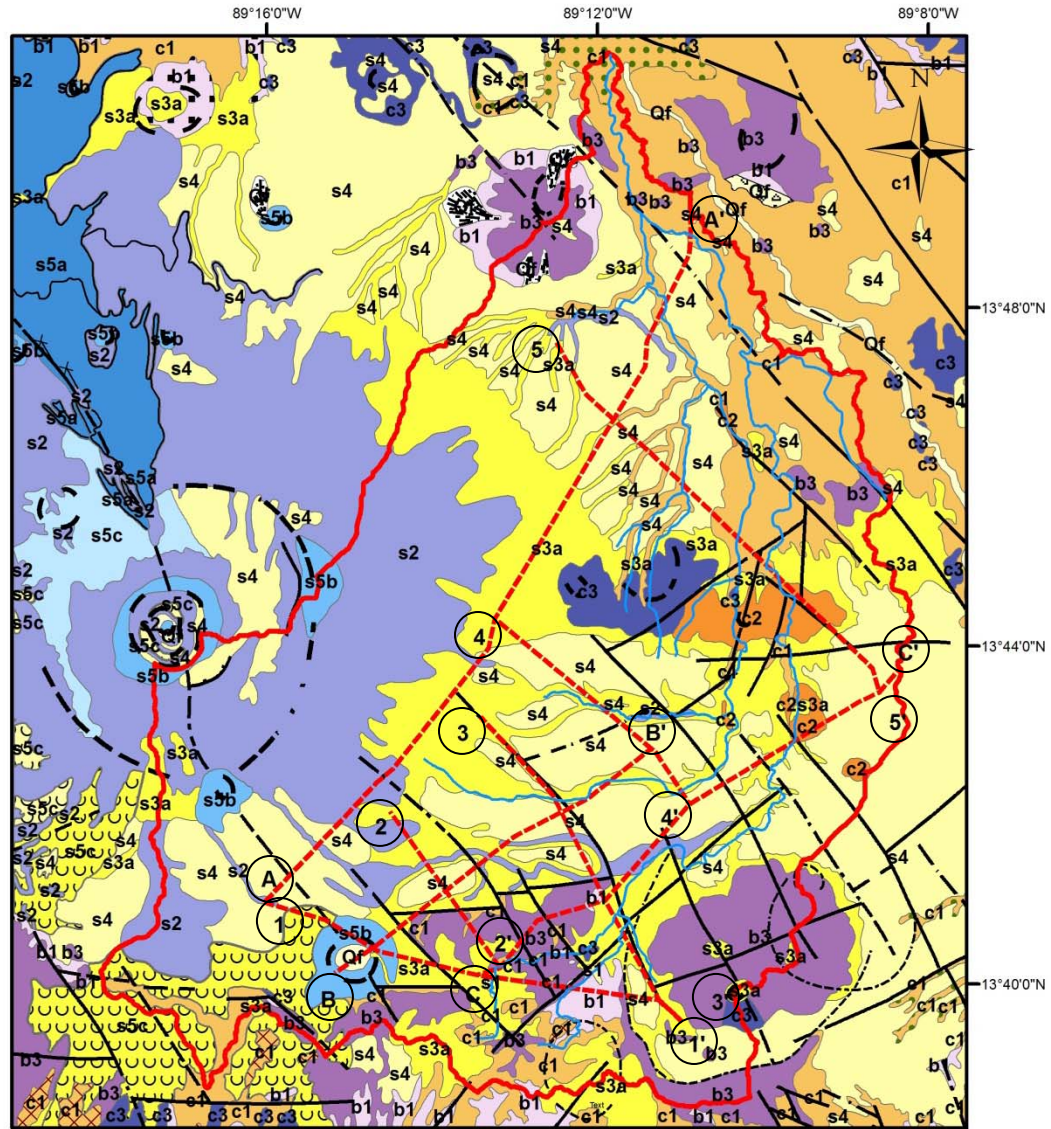


Figura 4.1 Mapa de profundidades de los pozos utilizados para el modelo litológico

En la orientación suroeste – noreste, la parte alta de la microcuenca presenta un apareamiento de las lavas andesíticas y basálticas fracturadas producto de la formación San Salvador, que se ve interrumpido por el sistema de fracturas NNO-SSE dando lugar a la presencia de tobas y piroclastos posiblemente de la misma formación, así como a algunos sedimentos depositados en tales fracturas que generan una discontinuidad en la estratificación de los materiales.



SIMBOLOGIA

- Sección transversal
- Zona de Estudio
- DESCRIPCIÓN**
- Cráter, caldera
- Dique básico
- Escarpe de colada
- Estructura anular
- Falla supuesta
- Falla visible
- Fotolineación: estratificación
- SIGNATURAS**
- Epicalstas volcánicas (fluviales)
- Escorias y cinder
- Ignimbritas

Miembro geológico, descripción

- Qf San Salvador, Depósitos sedimentarios del Cuaternario, Depósitos acuáticos con intercalaciones de piroclastita
- Qc San Salvador, Depósitos sedimentarios del Cuaternario, Depósitos coluviales sin ...
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli,
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, sobre s3'a
- s5c San Salvador, Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, sobre s4
- s5b San Salvador, Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder),
- s5a San Salvador, Efusivas básicas - intermedias,
- s4 San Salvador, "Tierra blanca": piroclastitas ácidas y apiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas
- s3a San Salvador, Piroclastitas ácidas, epicalstas volcánicas ("tobas color café"),
- s2 San Salvador, Efusivas básicas -intermedias, piroclastitas subordinadas,
- s1 San Salvador, Piroclastitas ácidas, epicalstas volcánicas, localmente efusivas básicas -intermedias,
- c3 Cuscatlán, Efusivas-básicas-intermedias,
- c2 Cuscatlán, Efusivas ácidas e intermedias ácidas (ocurrencias aisladas en parte eventualmente =ch2),
- c1 Cuscatlán, Piroclastitas ácidas, epicalstas volcánicas,
- b3 Bálsamo, Efusivas básicas-intermedias,
- b1 Bálsamo, Epicalstas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas -intermedias intercaladas.,

Figura 4.2 Mapa geológico y ubicación secciones transversales

En la zona baja también aparecen, aunque en menor proporción las lavas andesíticas y basálticas posiblemente producto de la misma formación, las cuales se encuentran en los primeros 50 metros del subsuelo, hacia las zonas más profundas, les subyacen las tobas y piroclastos posiblemente correspondientes a la formación Cuscatlán, la capa de piroclastos en esta zona tiene espesores que superan los 100 m y no permiten apreciar el basamento (Figura 4.3). Esta sección transversal permite observar que las fallas supuestas en el Mapa Geológico de El Salvador, de orientación NNO-SSE en la parte inferior de la microcuenca, son existentes y se extienden hasta la zona de los pozos DH-15 y DH-53 (Figura 4.3) ubicados al poniente de la misma.

En la parte central longitudinal de la microcuenca siguen apareciendo las lavas andesíticas y basálticas en el sector sur, pero sus espesores en esa zona son menores y se aprecia una intercalación mayor de materiales piroclásticos y de tobas, posiblemente correspondientes al miembro S3a, de la formación San Salvador. En el sector central de la sección B-B' analizada (Figura 4.4) las tobas predominan en los primeros metros de profundidad principalmente en el sector que se extiende desde el Estadio Flor Blanca hasta Industrias La Constancia; en las zonas más profundas aparecen los piroclastos y sedimentos aluviales siempre intercalados con las tobas antes mencionadas. Esta sección también permite apreciar el dominio del sistema de fallas sobre la litología de la microcuenca, se puede decir que las fallas supuestas en el Mapa Geológico de El Salvador e interceptadas por la sección 2-2' son existentes ya que el modelo permite apreciar las discontinuidades en los estratos y la dirección del desplazamiento de algunos materiales en las zonas de fallas.

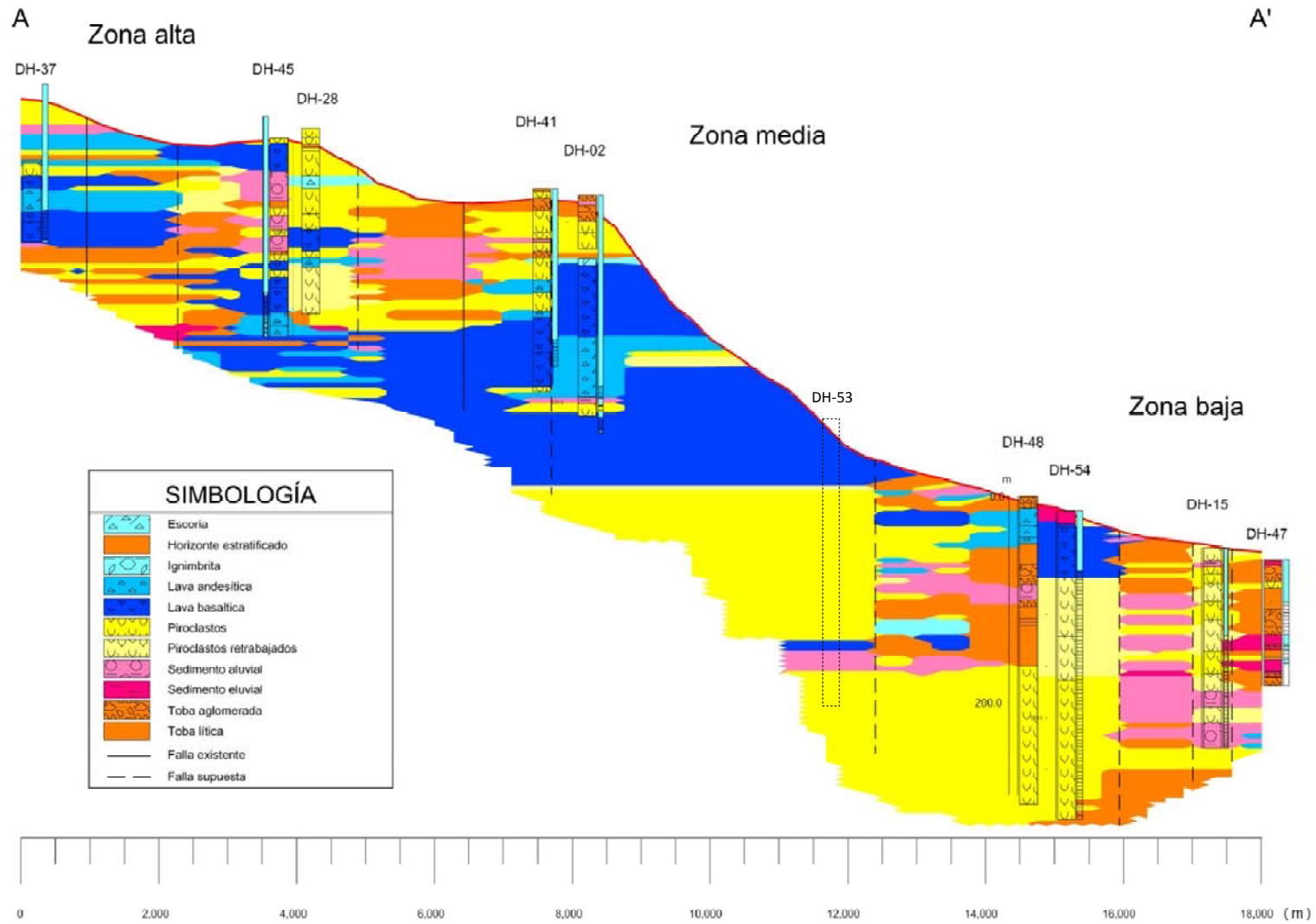


Figura 4.3 Perfil geológico en el sector poniente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)

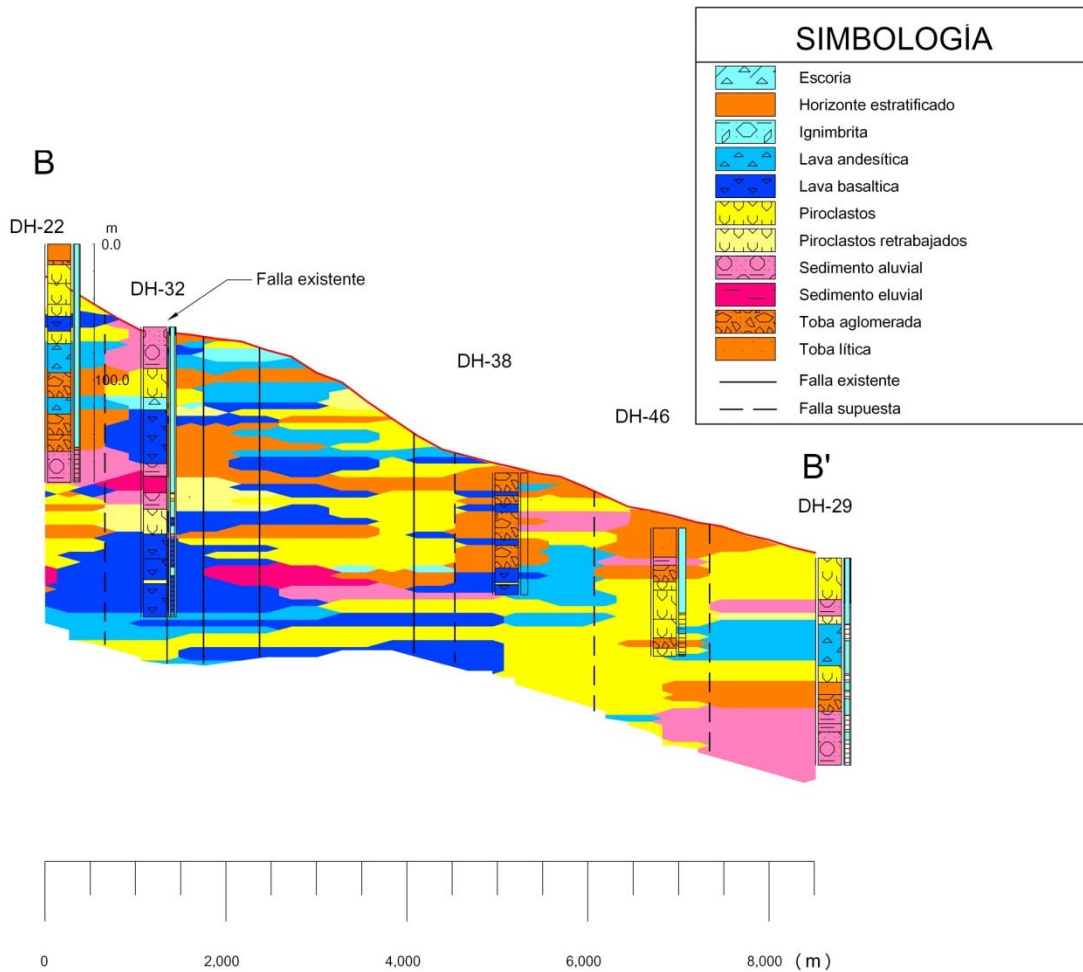


Figura 4.4 Perfil geológico longitudinal central de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)

En el sector suroriente de la microcuenca se presentan similarmente las lavas andesíticas-basálticas intercaladas con algunos estratos piroclásticos en las partes altas de la microcuenca (Figura 4.5) para el perfil C-C', en la zona de la colonia La Cima, donde según el mapa geológico aparecen lavas del miembro b3 de la formación Bálsamo. Hacia las zonas medias, desde la colonia Centroamérica hasta la zona de las Industrias La Constancia, comienzan a aflorar los materiales granulares tales como las tobas y piroclastos posiblemente de la formación San Salvador, aunque en profundidad la litología cambia y aparece una gruesa capa de sedimentos aluviales que podrían superar los 100 m de profundidad; en la zona de Soyapango, en las colonias Las Margaritas, los materiales predominantes se vuelven más variados y se aprecia una intercalación de materiales

piroclásticos, con tobas y sedimentos aluviales, aunque una gruesa capa de piroclastos predomina en profundidad. El drástico cambio que se aprecia en la litología de la zona de los DH-13, DH-04 y DH-14 podría relacionarse a la baja densidad de los datos en la zona de transición entre el DH-30 y los antes mencionados, por lo que el uso de estos resultados debe incluir tales consideraciones. En esta zona se puede apreciar según el modelo, que la influencia del sistema de fallas en la litología en el sector suroriente es menor que en los otros dos sectores, posiblemente debido a la granulometría del material y a los grandes espesores del mismo tal como antes se mencionó.

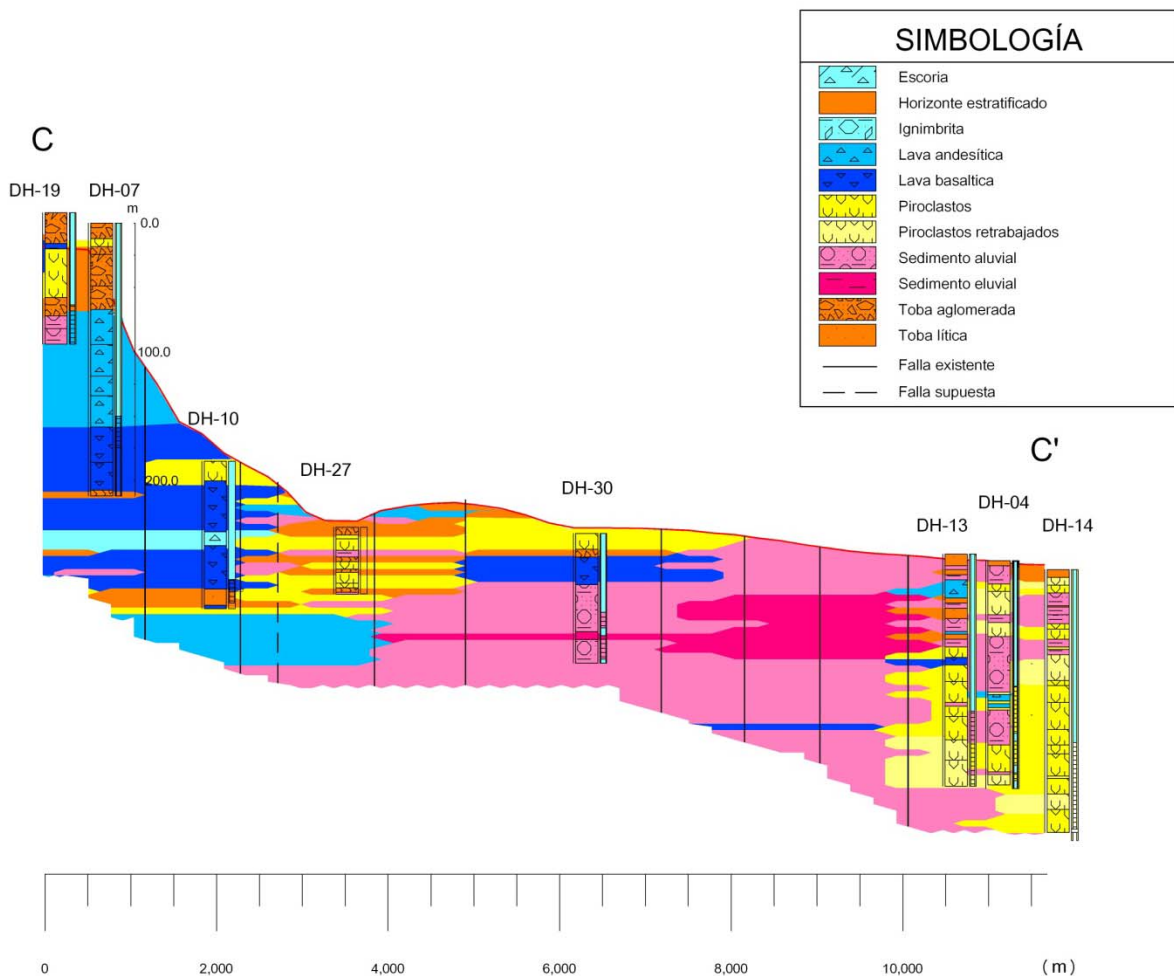


Figura 4.5 Perfil geológico longitudinal al suroriente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)

La litología del subsuelo de la parte alta de la cuenca se representa por medio de la sección 1-1' en posición paralela a la cordillera del Bálsamo, lavas basálticas y andesíticas intercaladas y con porosidad secundaria importante predominan en los primeros 100 a 200 metros de profundidad, posiblemente correspondientes a las lavas de la formación Bálsamo en la mayoría de la zona seccionada y en menor medida a las de la formación San Salvador en el sector poniente, específicamente en la zona del Plan de la Laguna. Hacia el poniente, en la zona de San Marcos la geología cambia y aparecen los piroclastos intercalados con sedimentos y algunas tobas posiblemente de la formación San Salvador (Figura 4.6), correspondiente a materiales granulares con mayor tamaño de grano que las lavas.

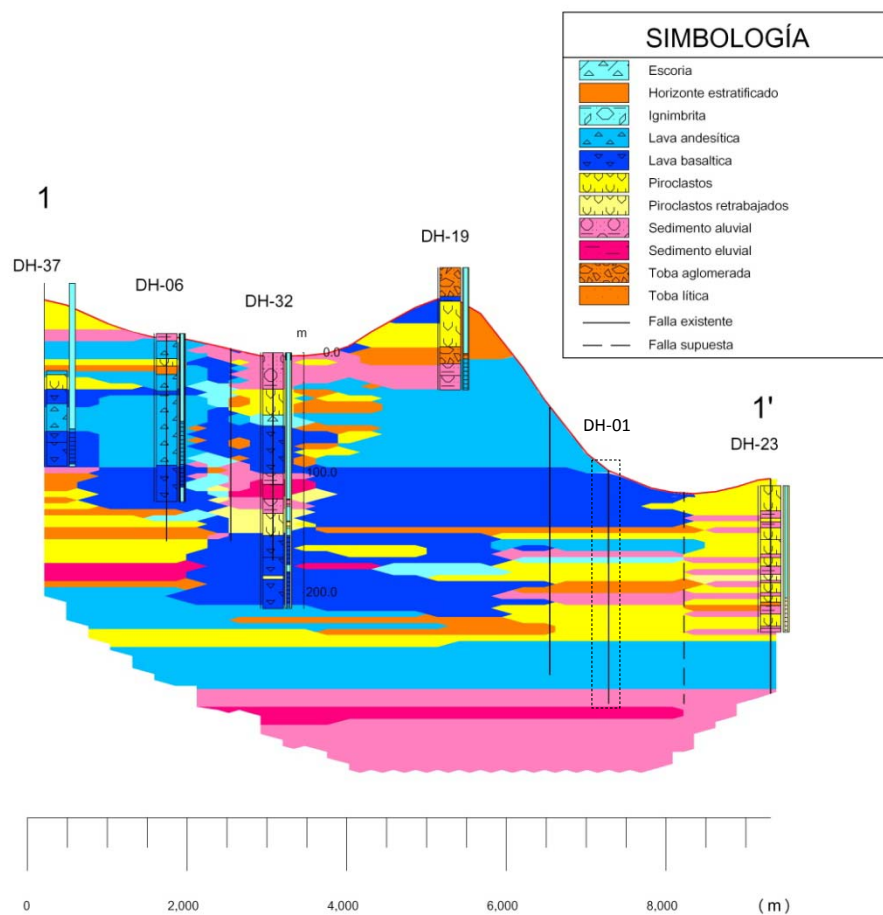


Figura 4.6 Perfil geológico longitudinal al suroriente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)

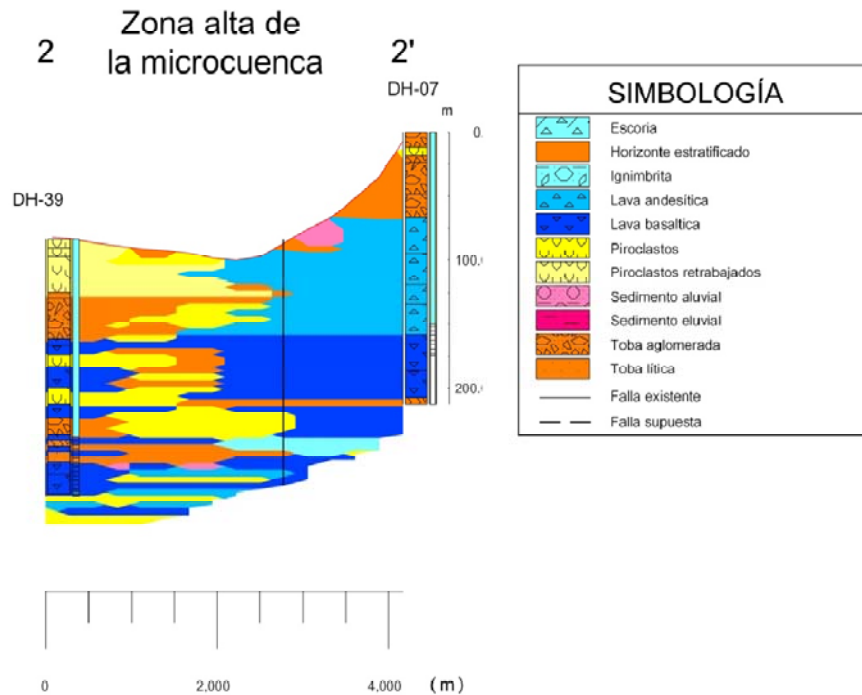


Figura 4.7 Perfil geológico longitudinal al suroriente de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)

La sección 2-2' permite observar la estratificación intercalada de lavas principalmente basálticas con piroclastos y tobas posiblemente de la formación San Salvador en los primeros metros de profundidad y de la formación Bálsamo a profundidades mayores. Hacia el suroriente la predominancia de las lavas posiblemente del Bálsamo se hace presente por debajo de las tobas del s3a posiblemente de la formación San Salvador, en el sector de la colonia La Cima; el espesor de la capa de lavas varía aproximadamente en 150 m de profundidad (Figura 4.7).

Las secciones 3-3' y 4-4' de la Figura 4.8 reafirman la predominante existencia de las lavas andesíticas - basálticas fracturadas e intercaladas en las faldas del volcán de San Salvador, donde los espesores de estas superan los 150 m (Figura 4.8). El pozo DH-42 de la colonia Miralvalle presenta en los primeros 120 m una intercalación de materiales con

granulometría diversa, piroclastos, tobas e incluso sedimentos se hacen presentes en la estratificación encontrada. Hacia las zonas más planas como el sector de Metrocentro, aparecen lavas andesíticas en un estrato similar al de la zona de Miralvalle, la diferencia entre los tipos de lavas puede obedecer a la interpretación del geólogo durante la clasificación de los materiales, ya que la falla supuesta del Mapa Geológico de El Salvador coincide con el desplazamiento de ambos bloques de lava, pudiendo sugerirse que la falla es existente en esta zona.

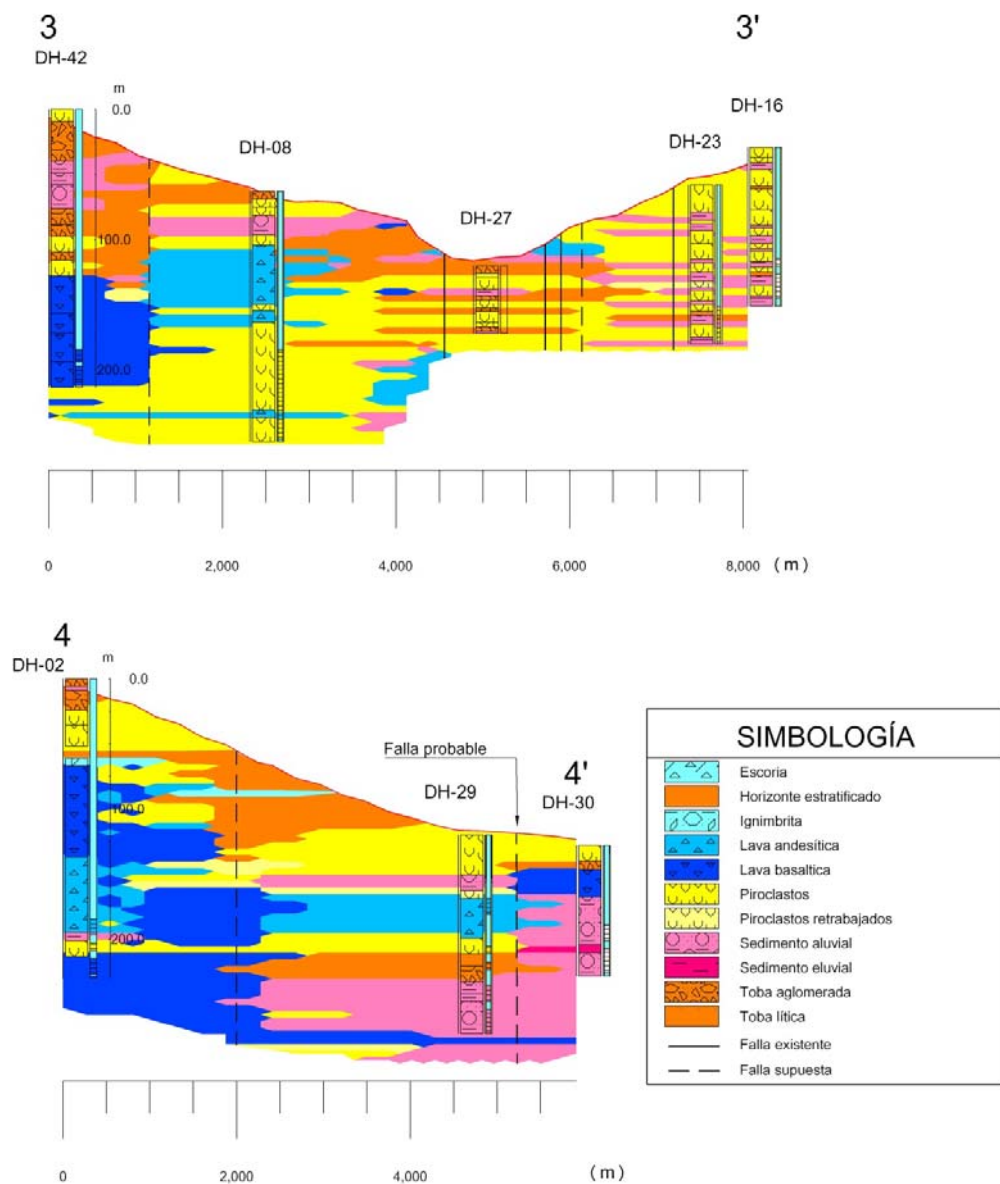


Figura 4.8 Perfil geológico transversal en la parte central de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)

Entre la zona de las Embotelladoras La Constancia y Las Cascadas, puede apreciarse la presencia de un estrato de lava andesítica o basáltica que varía entre 20 y 30 m de espesor y presenta un desplazamiento vertical (Figura 4.8). Esta condición podría considerarse como la presencia de una falla en dicho sector o la prolongación de alguna falla del conjunto NNE-SSO, ya que al observar el comportamiento del bloque de sedimentos que subyacen dichas capas, éstos también se encuentran desplazados en proporciones similares, la profundidad de la falla podría superar los 150 m de profundidad.

En la zona baja de la microcuenca la sección 5-5' muestra la presencia de lavas de tipo andesítico - basáltico en los primeros metros de profundidad, principalmente en la zona de Apopa, estas lavas posiblemente sean predominantes de la formación San Salvador y en menor medida de la formación Bálsamo en las zonas más profundas (Figura 4.9). En la zona de Soyapango aparecen pequeños lentes de lava Andesítica en profundidad, intercalada con capas de sedimentos aluviales y piroclastos principalmente. En profundidad la presencia de material de granulometría fina como las tobas aparecen predominando en la litología de la zona noroeste de Apopa posiblemente correspondientes al miembro s3a, también se aprecia la gruesa capa de piroclastos pero con menor espesor que el mostrado en la Sección A-A' (Figura 4.3) pudiendo considerarse que este aumenta hacia el noreste de Apopa a medida que las tobas disminuyen.

La predominancia del sistema de fallas NNE-SSO no es tan marcada en el sentido transversal de la microcuenca como la del sistema NNO-SSE en el sentido longitudinal de la misma; sin embargo, puede considerarse la existencia de dos nuevas fallas en esta zona, la primera corresponde al desplazamiento vertical hacia abajo del bloque poniente de las capas de lava basáltica y de piroclastos cercanos al DH-25 , que podría alinearse con el río Mariona; la otra corresponde también a un desplazamiento vertical hacia abajo del bloque poniente de las lavas y tobas existentes entre la Hda. Apachulco y RANSA (Figura 4.9).

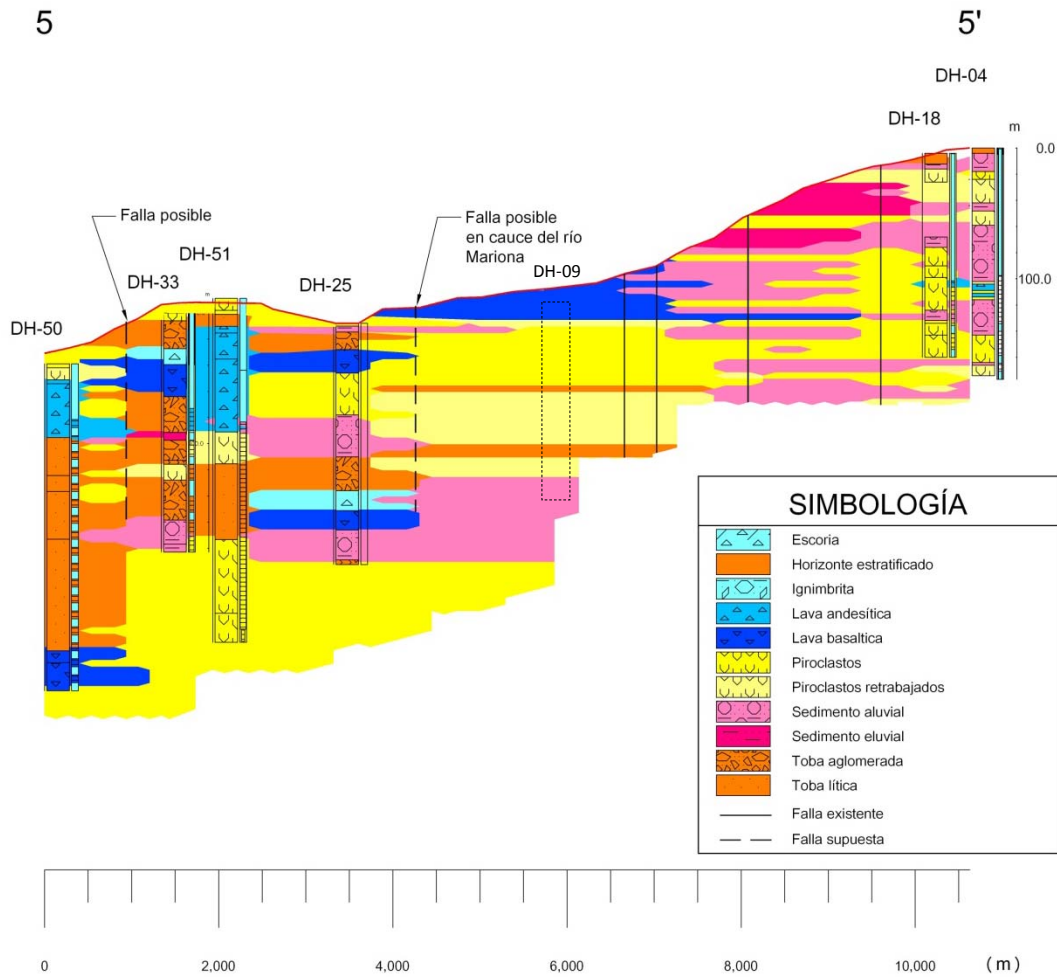


Figura 4.9 Perfil geológico transversal en la parte central de la microcuenca (ver ubicación en Figura 4.2)

4.3 Hidrogeología del área de estudio

Para caracterizar el acuífero de San Salvador, fue necesario profundizar en el comportamiento del sistema de flujo del agua subterránea dentro de la cuenca, para lo cual fue parte importante obtener el modelo geológico descrito antes.

4.3.1 Unidades hidrogeológicas

El análisis de la compleja litología presentada en el apartado anterior y de los informes de perforación de los pozos utilizados para tal fin, permite identificar de una forma general, dos sistemas acuíferos interconectados entre sí y que se encuentran en los materiales producto del vulcanismo joven existente en la zona.

Una unidad hidrogeológica está representada por el acuífero fracturado correspondiente a las lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones principalmente de piroclastos que se ubica en el sector sureste de la cuenca, bordeando las faldas del volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, la variación de la litología de este acuífero aporta una gran heterogeneidad de sus propiedades hidráulicas debido a la variabilidad estratigráfica y al complejo sistema de fracturas y fallas que predomina en la zona. Todas estas condiciones, influyen fuertemente en eventos de transporte de contaminantes Weissmann y Foggs (1999) citado en Díaz (2003). Estaciones de bombeo del sistema de producción local de la ANDA se encuentran ubicadas en esta zona, tales como San José de la Montaña, las plantas de bombeo de la Colonia Escalón, Pje. Verde, El Espino, Antiguo Cuscatlán, La Sultana y otros.

El otro sistema corresponde al acuífero poroso formado por estratos intercalados de piroclastos, sedimentos principalmente aluviales y tobas fracturadas, cuya litología también aporta heterogeneidad en sus propiedades hidráulicas. En esta zona se ubican importantes industrias que explotan el agua subterránea que aporta este sistema.

Como un intento de enriquecer la información existente sobre la delimitación de los sistemas acuíferos en la zona de estudio, se realizó un trazo aproximado de los límites que podrían estar teniendo los sistemas antes mencionados (Figura 4.10), para realizar el trabajo, el análisis de los resultados del modelo geológico fue llevado a cabo en conjunto con los datos de los informes de perforación de pozos principalmente en cuanto a las ubicaciones de las rejillas, los registros eléctricos y los parámetros hidrogeológicos obtenidos a partir de la prueba de bombeo.

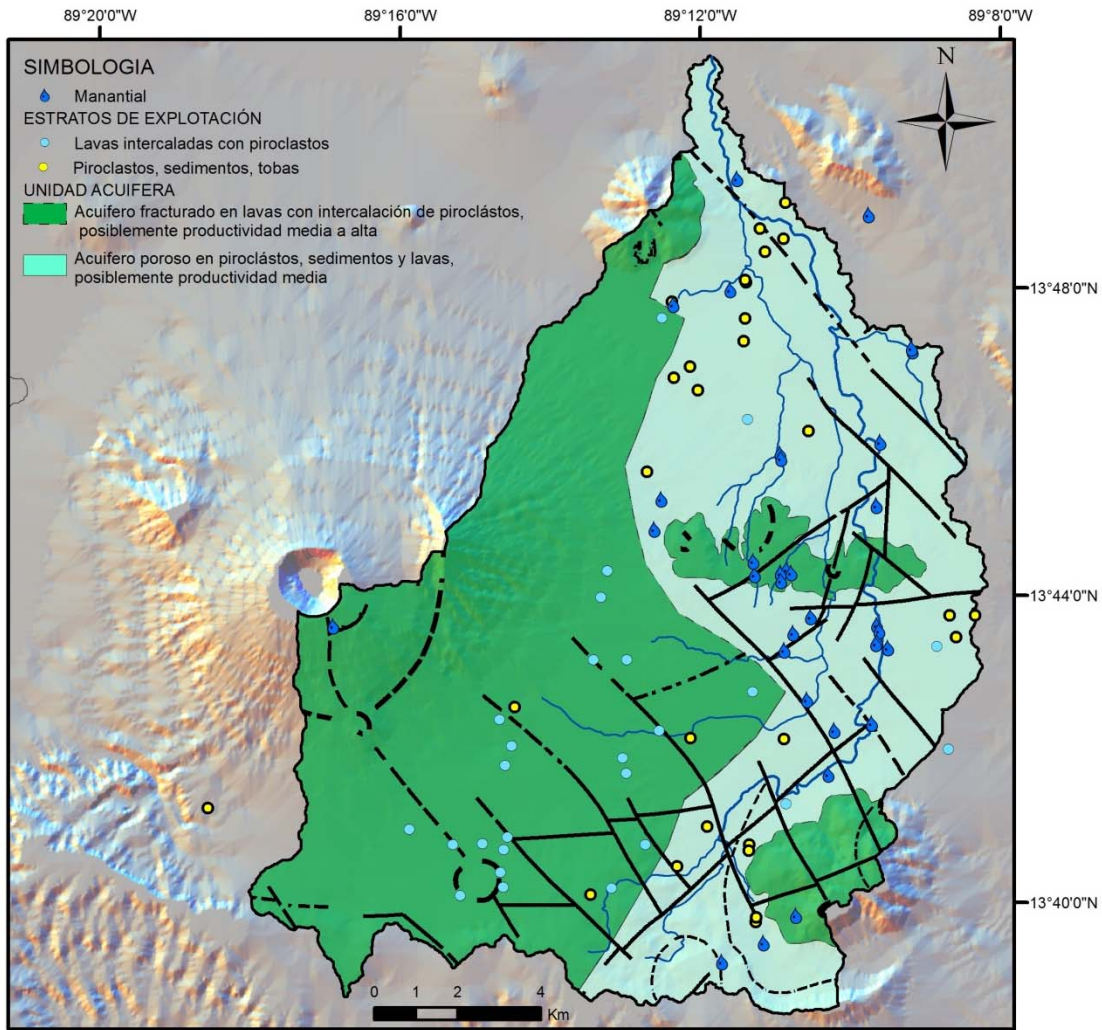


Figura 4.10 Mapa de trazo del modelo supuesto de las Unidades hidrogeológicas en la microcuenca

4.3.1.1 Acuífero fracturado de lavas con intercalaciones de piroclastos

Este sistema se ubica en la parte alta y media alta de la cuenca al suroeste de la misma, su explotación ocurre principalmente en el valle de San Salvador, en los municipios de Santa Tecla, San Salvador, Antiguo Cuscatlán, parte de Mejicanos y Apopa.

Las profundidades de explotación de este acuífero varían entre los 90 y los 200 m (Figura 4.1), concentrándose alrededor de los 150 m en la zona de Antiguo Cuscatlán, en la colonia Escalón las profundidades alcanzan los 200 m y en los pozos cercanos al Boulevard

de Los Héroes como los del Estadio Flor Blanca, Metrocentro y Externado de San José las profundidades son menores a los 100 m, posiblemente porque los estratos de lavas con intercalaciones de piroclastos se encuentran en su extremo menos espeso.

La complejidad de este sistema acuífero, aporta heterogeneidad de las propiedades hidráulicas. La transmisividad de los piroclastos varía de acuerdo a su composición granulométrica y a las modificaciones postdiagenéticas², estos materiales, al combinarse con los flujos de lava cuya capacidad para transmitir agua depende primariamente de su porosidad secundaria cuando de lavas densas se trata, o de su porosidad primaria en el caso de lavas escoriáceas que se caracterizan por su alta permeabilidad y buena capacidad de almacenar y transmitir agua (PNUD, 1972) determinarán la capacidad productiva del acuífero.

La combinación de los materiales piroclásticos no consolidados y los flujos de lava con fracturamiento e interconexión elevada da como resultado un acuífero de alta producción, mientras que si alguno de los factores anteriores varía presentándose mayor consolidación de los piroclastos, menor fracturamiento en las lavas, menor interconexión entre el fracturamiento, variación en los espesores de los estratos, etc., la producción del acuífero se verá reducida, en todo caso, el valor de la transmisividad representa un promedio de los estratos atravesados. Valores de transmisividad de 1,000 m²/día han sido estimados en la zona de Antiguo Cuscatlán (PNUD, 1972), en el pozo 3 El Espino la transmisividad alcanzó los 4,053 m²/día (Drillmasters, 2001); Valores de 2000 m²/día se estiman en el Centro del Valle de San Salvador (PNUD, 1972), el pozo 1 de Metrocentro presentó una transmisividad de 1,561 m²/día (Rivera-Harrouch, S.A. de C.V., 1994); sin embargo, también se han identificado pozos con bajas transmisividades en la cercanías de Antiguo Cuscatlán, el pozo de Madreselva se reportó un valor de 36 m²/día (COMFISA, DE C.V., 1993) y el pozo de la Cima II se reportó 10 m²/día (Pozos y Riego, S.A. de C.V., 1991), posiblemente su baja productividad se relaciona a la existencia de una zona elevada y la profundidad de perforación de los mismos no permitió alcanzar los estratos más productivos.

² Después de su formación

Otro aspecto importante que influencia la productividad del acuífero fisurado es el fallamiento geológico. Los pozos más productivos se encuentran localizados sobre fallas geológicas reconocidas desde los años 70 (Pozo 3 El Espino y Metrocentro 1), en este caso, en una misma planta de bombeo pueden existir pozos con variaciones importantes de su producción, como es el caso de las plantas de bombeo El Espino y Antiguo Cuscatlán.

4.3.1.2 Acuífero poroso en piroclastos, sedimentos y tobas

Esta unidad acuífera se distribuye en el norte y oriente de la zona de estudio y en ella afloran el mayor número de manantiales identificados en este estudio.

Al igual que el acuífero fracturado, esta unidad presenta condiciones de anisotropía y heterogeneidad en sus propiedades hidráulicas. El grado de consolidación de los piroclastos y su composición granulométrica pueden aportar mayores productividades a los estratos, sin embargo la alternancia con rocas extrusivas pliocénicas de origen piroclástico como aglomerados y tobas que tienen permeabilidades muy bajas debido a su alta proporción de compuestos arcillosos y a su avanzado grado de consolidación pueden reducir tales productividades (PNUD, 1972). En zonas donde el acuífero se encuentra principalmente ubicado en los estratos sedimentarios alternados con piroclastos como es el caso del pozo de Industrias La Constancia y de Industrias La Cascada, la producción alcanzada es mayor.

En la Figura 4.10 pueden identificarse tres zonas de productividad distinta en este acuífero, el sector de San Marcos presenta valores de transmisividad alta, siendo los más productivos, el pozo 2 del Milagro reportó una transmisividad de $577 \text{ m}^2/\text{día}$ (Drillmasters, S.A. de C.V., 2001) y el de La Cima III, un valor de $805 \text{ m}^2/\text{día}$ (Rivera-Harrouch, S.A. de C.V., 1994). Hacia la zona oriental, la existencia de una zona de producción media en materiales sedimentarios se encuentra en el sector de Las Margaritas, en Soyapango, los valores de transmisividad obtenidos se dan por la asunción de un coeficiente de almacenamiento igual a 0.10; sin embargo, se conoce a la fecha que algunos de estos pozos han quedado en desuso debido a su rendimiento antieconómico que podría estar asociado a la elevada impermeabilización por el desarrollo urbano del sector; puede considerarse que

esta zona tiene una productividad baja. En el sector de Apopa, al norte de la zona de estudio, el acuífero se vuelve semiconfinado por la capa de tobas aglomeradas, presentando características hidrogeológicas variables, dependiendo del espesor de los estratos de piroclastos y tobas, los primeras como materiales productivos y los segundos de baja permeabilidad.

La zona del Horst³ El Cármen-Milingo tiene una transmisividad baja constituida por la formación antigua del horst (PNUD, 1972), entre el río Mariona y el río Tomayate el pozo 1 de Lirios del Norte, presentó una transmisividad de 15 m²/día (Técnica Industrial Agropecuaria, S.A. de C.V., 1992), puede considerarse la existencia de una barrera hidrogeológica negativa en dicha zona (PNUD, 1972; Coto Salamanca, Et. al, 1994) .

El sistema de fallas en el acuífero poroso influencia también la productividad del acuífero, en la zona, los pozos de la zona de San Marcos, se encuentran ubicados estratégicamente muy cercanos o sobre las fallas NNE-SSO o NNO-SSE. De igual forma, el afloramiento de manantiales explotados para el suministro de agua potable tales como Amatepec y Caites del Diablo se encuentran ubicados a lo largo de estas fallas, no es menos importante la cantidad de manantiales que aparecen en los municipios de Ciudad Delgado, Cuscatancingo y Mejicanos, que pueden ser considerados como las principales zonas de descarga de la microcuenca, aunque no sean aprovechados, conservados y protegidos de una manera sostenible tanto por los propietarios como por las entidades competentes.

4.3.2 Parámetros hidrogeológicos

Como se mencionó anteriormente, la complejidad litológica y la geología estructural de la zona de estudio imprime heterogeneidad y anisotropía en sus parámetros hidrogeológicos, presentando variaciones importantes en zonas regionalmente similares en superficie, de ahí que pueden existir pozos muy productivos cerca de otros relativamente menos productivos.

³ Un Horst o pilar tectónico muestra un movimiento hacia arriba en su interior, es decir el sector central está construida por rocas más antiguas que el sector lateral

4.3.2.1 Transmisividad (*T*)

La transmisividad es un parámetro hidrogeológico que 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. (Custodio & Llamas, 2001)

Para presentar un panorama general de la variación de la transmisividad en los acuíferos de la zona de estudio se recopiló información de 40 pozos a partir de estudios anteriores e informes de perforación de los mismos que son presentados en la Figura 4.11, pudiéndose reconocer algunas zonas de comportamiento similar según se resume en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Variación de la transmisividad en la microcuenca

Sector en la microcuenca	Transmisividad promedio (m ² /día)
Centro y norte del Valle de San Salvador	1000 - 2000
Antiguo Cuscatlán	100 - 4000
San Marcos, Col. Militar, Col. La Cima	300 - 1000
El Angel, Apachulco, La Junta, Apopa	600
Sur del Valle de San Salvador	200
Las Margaritas, Soyapango	< 179
El Angel-Apopa, Col. Chintuc	35-50
Lirios del Norte	< 15

Modificado de (PNUD, 1972)

La variación de la transmisividad en la microcuenca se ve influenciada fuertemente por la geología estructural de la misma, la Figura 4.11 permite apreciar que los pozos alineados o cercanos a las fallas son los que presentan valores mayores de transmisividades, posiblemente porque son pasos preferenciales del flujo subterráneo en el acuífero.

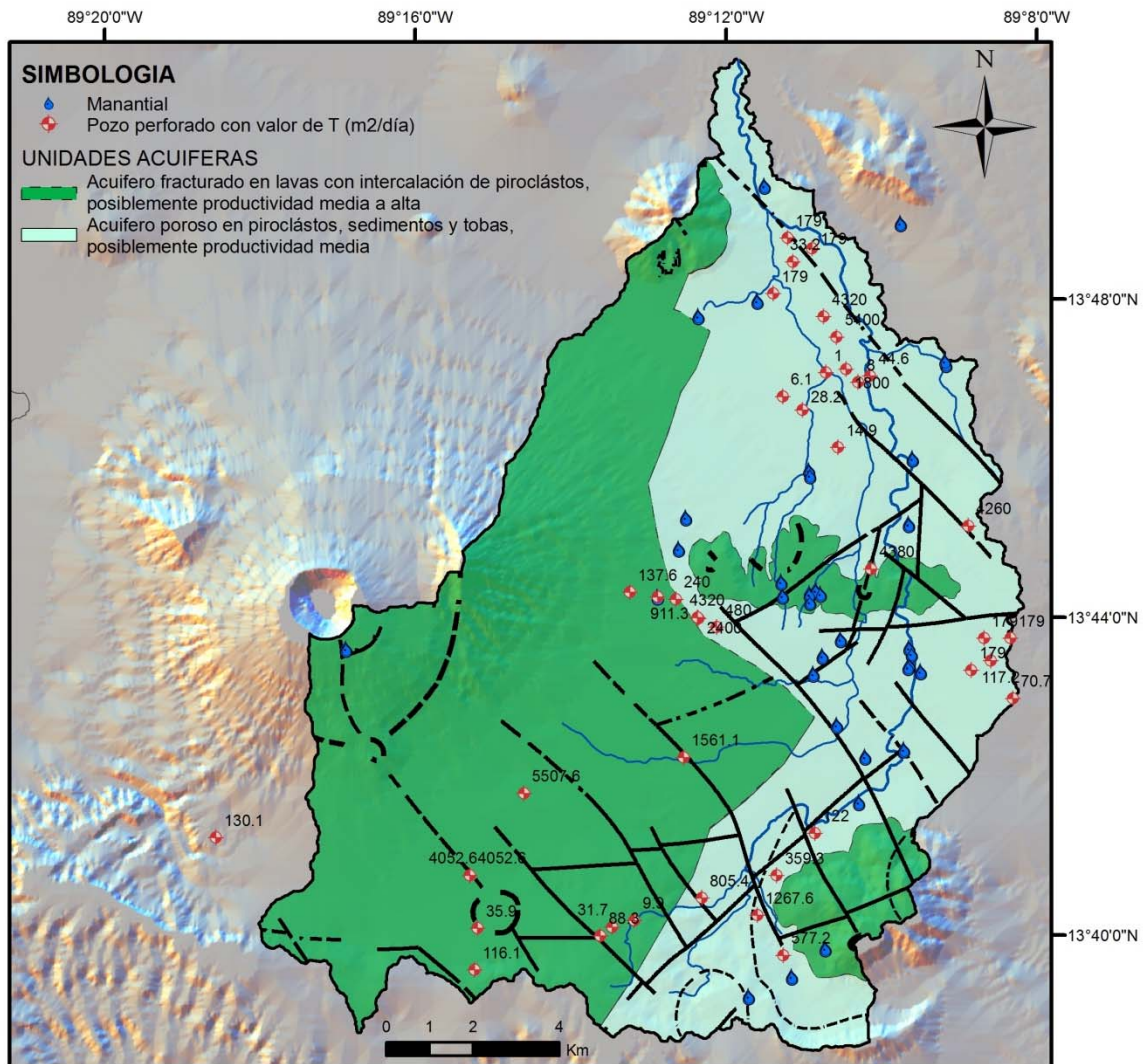


Figura 4.11 Mapa de valores de transmisividad en la microcuenca

4.3.2.2 Capacidad Específica (*ce*)

La capacidad específica expresa la relación entre el caudal extraído (Q) de un pozo y el abatimiento (s) observado en el mismo, el cual se debe en parte a las pérdidas de carga atribuidas al acuífero y a las pérdidas de entrada del agua al pasar por las rejillas (PNUD, 1972).

Valores de Capacidad Específica para diferentes pozos en la microcuenca han sido recopilados, estos han sido calculados considerando despreciables las pérdidas de entrada en la rejilla por lo que deberán tomarse con las reservas del caso; sin embargo, permiten tener una aproximación al comportamiento de dicho parámetro en la zona de estudio.

Tabla 4.2 Variación de la Capacidad Específica en la microcuenca

Sector en la microcuenca	Capacidad Específica (lt/s/m)
Centro del Valle de San Salvador, Antigua Cuscatlán, San Marcos	10-80
Apopa, Ciudad Delgado, Mariona	1-5
Las Margaritas, Soyapango	< 4

Modificado de (PNUD, 1972)

En general, el comportamiento de los valores de la capacidad específica presenta una relación directamente proporcional con el de la transmisividad para las zonas analizadas, puede apreciarse de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 que las zonas más productivas en la microcuenca son el Centro del Valle de San Salvador, Antigua Cuscatlán y San Marcos, las cuales se encuentran en el acuífero fracturado o cercanas al límite entre ambos, principalmente en las zonas de mayor densidad de fallas en el terreno.

4.3.2.3 Coeficiente de Almacenamiento (S)

Este parámetro es un índice de la capacidad de almacenamiento de las formaciones acuíferas y se define como *el volumen de agua liberado por una columna de base unidad y de altura todo el espesor del acuífero cuando el nivel piezométrico desciende una unidad* (Sanchez F. J., 2007)

Los valores del coeficiente de almacenamiento son menores en los acuíferos confinados que en los semiconfinados o que en los libres. La Tabla 4.3 presenta una clasificación de los acuíferos acorde a su valor del Coeficiente de Almacenamiento.

Tabla 4.3 Clasificación de los acuíferos de acuerdo a su Coeficiente de Almacenamiento

Tipo de Acuífero	Coeficiente de Almacenamiento
Acuífero libre	$3.1 \times 10^{-1} - 10^{-2}$
Acuífero semiconfinado	$10^{-3} - 10^{-4}$
Acuífero confinado	$10^{-4} - 10^{-8}$

Fuente: Sanchez F.J. (2007)

Debido a la complejidad de la geología de la zona, se hace difícil proporcionar valores confiables del coeficiente de almacenamiento en la microcuenca, ya que los métodos que se aplican para su determinación exigen condiciones de homogeneidad, isotropía, horizontalidad de los estratos, etc. Con las limitaciones anteriores se presenta en la Tabla 4.4 algunos valores del coeficiente de almacenamiento que proporcionan una idea del comportamiento del acuífero en la microcuenca.

Tabla 4.4 Valores estimados del Coeficiente de Almacenamiento

Pozo	Coeficiente de Almacenamiento
San Marcos, Antiguo Cuscatlán, Metrocentro, Col. San Pedro,	$<10^{-6}$
Apopa, Mariona	$10^{-2} - 10^{-4}$

Modificado de: (PNUD, 1972)

Los valores anteriores muestran una tendencia al semiconfinamiento en la zona de Apopa y Villa Mariona, lo cual ha sido discutido anteriormente y se relaciona con el grado de confinamiento impartido por las tobas aglomeradas existentes en la zona y que puede pertenecer al miembro c3 de la formación Cuscatlán.

En cuanto a la tendencia de acuíferos confinados que se obtuvieron en la zona de San Marcos, Antiguo Cuscatlán, zona de Metrocentro y Col. San Pedro, se dificulta determinar cuáles capas imparten dicha condición de confinamiento o si estos valores son el resultado

de la heterogeneidad y anisotropía de la zona; sin embargo, extensas capas de lava consolidada pueden confinar los sectores donde el acuífero está siendo explotado.

Los valores anteriores también se encuentran relacionados con las zonas hidrogeológicamente más productivas del acuífero de San Salvador, de forma tal que tomando en consideración los parámetros hidrogeológicos anteriormente presentados puede sugerirse que la zona más productiva del acuífero se da en condiciones de confinamiento del mismo.

4.3.3 Niveles del agua y Dirección del Flujo

4.3.3.1 Dirección del flujo de agua subterránea

Debido a la falta de datos de un monitoreo permanente de los niveles del agua en los pozos existentes inventariados, se elaboró un mapa de la tendencia de los niveles potenciométricos en la cuenca (Figura 4.12), tomando como base los datos registrados en los informes de perforación de pozos y en las operaciones de mantenimiento por parte de la ANDA.

Dos sistemas principales de flujo ocurren en la microcuenca y se encuentran dominados por una posible falla con dirección NNE - SSO rellena con piroclastos, sedimentos y tobas y que podría formar parte del sistema de fallas NNE-SSO (Figura 4.12). La profundidad a la cual la falla divide el flujo no pudo ser determinada, sin embargo, con los resultados obtenidos, el acuífero actualmente explotado se divide en los sistemas de flujo siguientes:

Sistema de Flujo Oeste con dirección principal surponiente-norte, corresponde a la circulación del agua desde el volcán de San Salvador y el sector suroeste de la cordillera del Bálsamo recorriendo las faldas del Volcán de San Salvador y que permite la explotación del acuífero en los sectores productivos del municipio de Mejicanos (Colonias La Gloria, San Pedro), así como la zona de Antiguo Cuscatlán, la Colonia Escalón, y que circula hacia la planicie de Apopa, donde existe una importante cantidad de pozos tanto de la industria como residenciales.

Zonas de descarga importantes de este sistema corresponden a los nacimientos localizados en las laderas de los ríos Chagüite y Mariona, así como a los del río El Angel en el municipio de Apopa, uno de los cuales es utilizado para abastecimiento de agua a varios caseríos del sector.

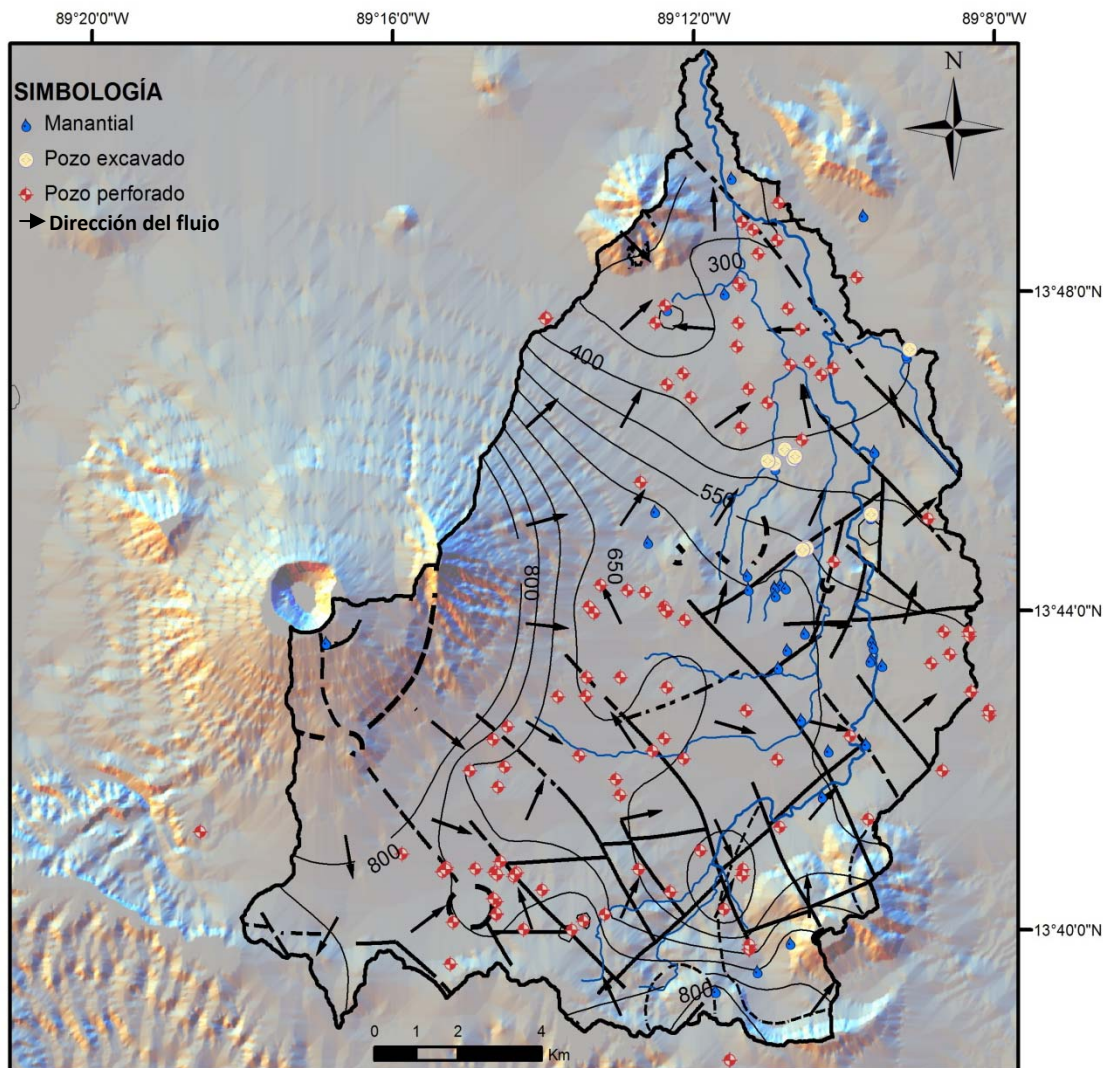


Figura 4.12 Mapa de tendencia de los niveles potenciométricos

Se distinguen en este sistema de flujo, zonas en las cuales las curvas potenciométricas muestran un descenso o un desplazamiento hacia mayores elevaciones posiblemente por las tasas de extracción de los pozos existentes en estos sectores o por influencia del sistema de

fallas presente en la zona; puede apreciarse en la Figura 4.12 que existe una importante cantidad de sistemas de bombeo en estas zonas, faltando algunos pozos el mapa por lo que no se presenta la totalidad de los sistemas existentes.

En el sector bajo de la microcuenca, en el municipio de Apopa, también se aprecia una tendencia del movimiento de la curva potenciométrica 400 msnm, la cual puede estar asociada tanto con un ascenso en los niveles de la zona producto de recargas artificiales como por un descenso por sobreexplotación en la zona. Se conoce que en la última década, la zona se ha convertido en un polo de desarrollo industrial.

Sistema de Flujo Este cuyo recorrido inicia con una dirección sur-norte y cambia su dirección a suroeste-noreste. Este sistema recorre las zonas altas del cerro San Jacinto, abarca la cabecera del río Acelhuate en el sector este de la cordillera del Bálsamo delimitada dentro de la zona de estudio, posiblemente recargando las zonas productivas de San Marcos y descargando en importantes manantiales usados para abastecimiento en el Sistema de la ANDA, como son Caites del Diablo, La Danta, Lamatepec y La Chacra. Descargas importantes de este sistema de flujo ocurren en las márgenes de los ríos Acelhuate, Urbina y San Antonio, identificados en el municipio de Cuscatancingo dentro de este estudio.

Según los resultados obtenidos este sistema traspasa el límite oriente de la microcuenca y dada la ocupación del suelo por el urbanismo en la zona alta de la microcuenca, puede decirse que es el que más riesgo de reducción de la recarga representa, de ahí que algunos pozos en la zona de Soyapango, entre ellos los de las Margaritas y Montes de San Bartolo se encuentran en desuso por falta de productividad.

Puede observarse un descenso del nivel potenciométrico provocado por el bombeo de los pozos en la zona de la Residencial Modelo, Col. Militar y Col. California de San Marcos. Según los datos analizados, este sistema de flujo es el que abastece en parte la zona de producción de las colonias Las Margaritas y Montes de San Bartolo en Soyapango; sin embargo, deben hacerse estudios abarcando una extensión más hacia el oriente para determinar con base a mayor información el comportamiento hidrogeológico de este sector.

4.3.3.2 Variación de niveles en los pozos

En el año 2006, como parte del proyecto FORGAES se instalaron 11 data loggers en pozos existentes o nuevos perforados en las cuencas del río Acelhuate con el objetivo de monitorear el comportamiento de la variación de los niveles en el acuífero; 8 de estos dispositivos fueron instalados en pozos que se ubican dentro de la microcuenca en estudio y 3 al exterior del límite oriente de la misma (Figura 4.13). Los datos son manejados por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y por ANDA en aquellos pozos de su propiedad

De los 11 puntos que pueden ser de interés dentro del área de estudio solamente se logró recuperar datos de 5 pozos y para diferentes períodos que varían sus fechas de inicio entre el año 2007 y el año 2009 (Figura 4.13). En el resto de sitios, algunos de los puntos actualmente han quedado sin funcionamiento debido a robo de los equipos.

La zona monitoreada se enmarca principalmente en la parte alta y media de la microcuenca, solamente un punto se ubica en la zona baja de la misma y no se tienen puntos de monitoreo en el sector noreste del volcán de San Salvador, donde se presume existe un flujo radial importante hacia la zona baja en el municipio de Apopa.

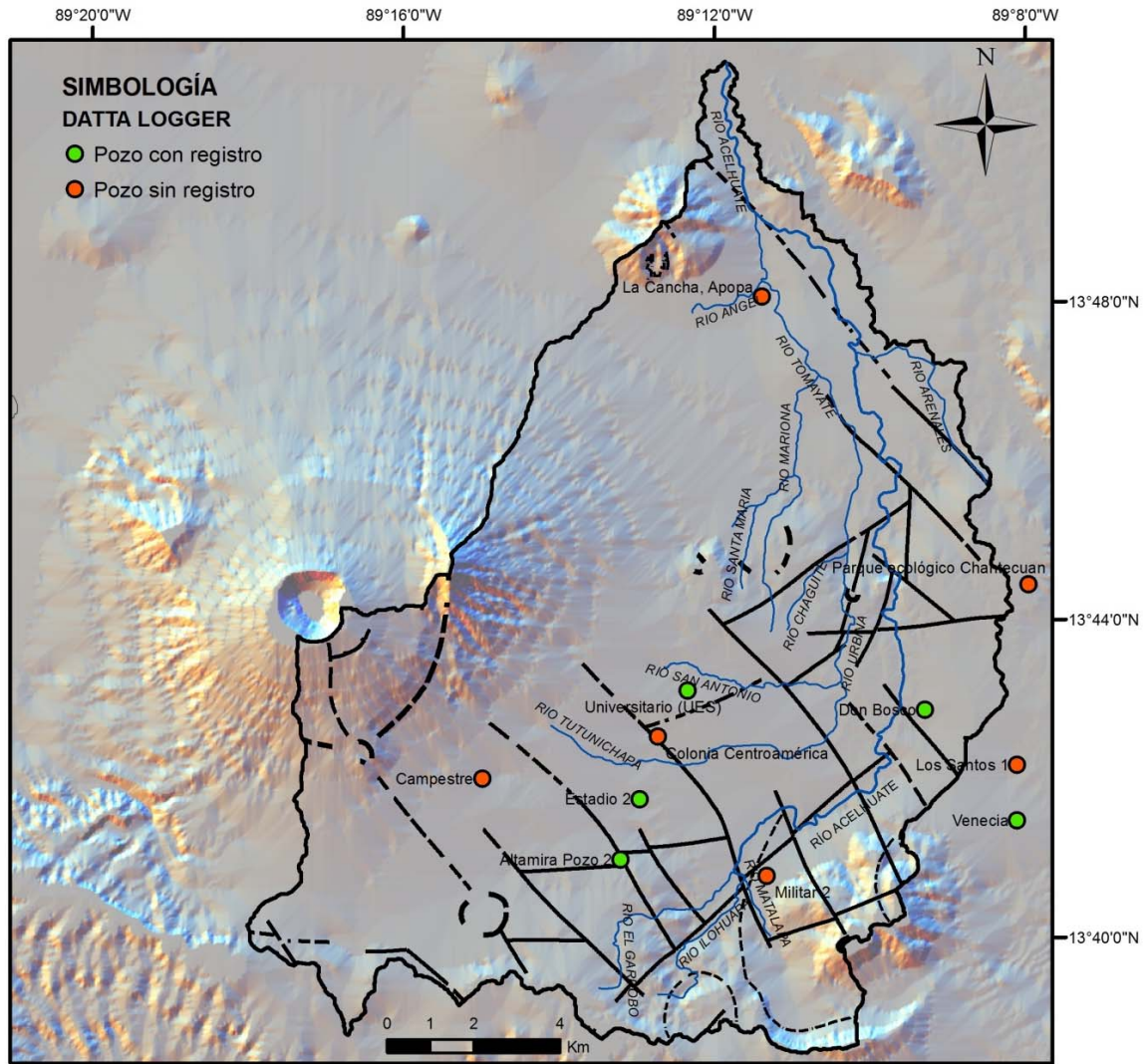


Figura 4.13 Mapa de pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea

La Figura 4.14 presenta las gráficas de la tendencia del comportamiento de los niveles de agua en los 5 pozos antes mencionados. Los datos obtenidos para la zona de Soyapango (pozo Venecia y Universidad Don Bosco) corresponden a los últimos 5 meses del año 2009 y abarcan los últimos meses de la época lluviosa y el inicio de la época seca en el país, en este período el pozo de la Universidad Don Bosco refleja un ascenso de 0.60 m, que podría estar asociado tanto con la variación de niveles estacionales o con una tendencia del ascenso del nivel piezométrico en el sector, por la carencia de un registro temporal más amplio, ninguna de las dos condiciones anteriores puede ser afirmada. Puede notarse sin

embargo que en relación al valor registrado al inicio de la instalación del Datta Logger en junio de 2007 (Figura 4.14) el nivel ascendió 2.30 m.

El pozo Venecia no presentó variación durante el período registrado, su valor se mantuvo en 82.96m. Sin embargo, en relación al registro del nivel estático en la fecha de instalación del equipo en Junio de 2007 hubo una reducción de 4.79 m, este resultado es coincidente con otros estudios de la zona; en el año 1994 se estimó un descenso de 1 m/año en los niveles del agua para la zona de Soyapango (Coto Salamanca, Et. al, 1994) y en el año 2005 el descenso fue recalculado, resultando de 1.48 m/año para la misma zona (Arévalo Romero & Vásquez Naranjo, 2005), debido a la falta de información, ambos estudios no consideraron las variaciones estacionales en los puntos analizados, por lo que estos valores deben ser tomados con las restricciones del caso.

Tabla 4.5 Datta logger ubicados en la cuenca y lugares adyacentes (Junio 2007)

UGAR	PROPIETARIO	X	Y	ELEV	PROF	N_EST
Don Bosco	Universidad Don Bosco	483261.61	288175.158	635.0		69.43
Los Santos 1	Soyapango	485394.13	286895.52	624.0	91.4	67.07
Parque ecológico Chantecuan	Soyapango	485663.86	291086.898	608.0	61.0	46.19
Venecia	Alcaldía Soyapango	485396.42	285611.02	628.0	91.4	78.17
Colonia Centroamérica	ANDA	477071.68	287559.139	701.7		59.57
Universitario (UES)	ANDA	477757.65	288627.936	712.0	200.0	91.33
La Cancha, Apopa	ANDA	479486.44	297765.547	455.0	100.0	30.46
Altamira Pozo 2	ANDA	476206.73	284695.913	751.0	100	54.79
Campestre	ANDA	472999.39	286576.625	857.3	190.4	160.7
Militar 2	ANDA	479593.04	284327.354	652.0	200	42.69
Estadio 2	ANDA	476652.73	286102.926	727.0		70.74

Fuente: SNET

En la zona media de la microcuenca, en el municipio de San Salvador, el pozo Universitario (UES) refleja un comportamiento de estabilidad en el nivel del agua durante el período Jun/2007- Dic/2009, este pozo ha permanecido sin operación al menos los últimos dos años y no se tiene registro de pozos adyacentes. Mayor investigación sobre el comportamiento del acuífero en la zona es requerida para evaluar los niveles en el mismo.

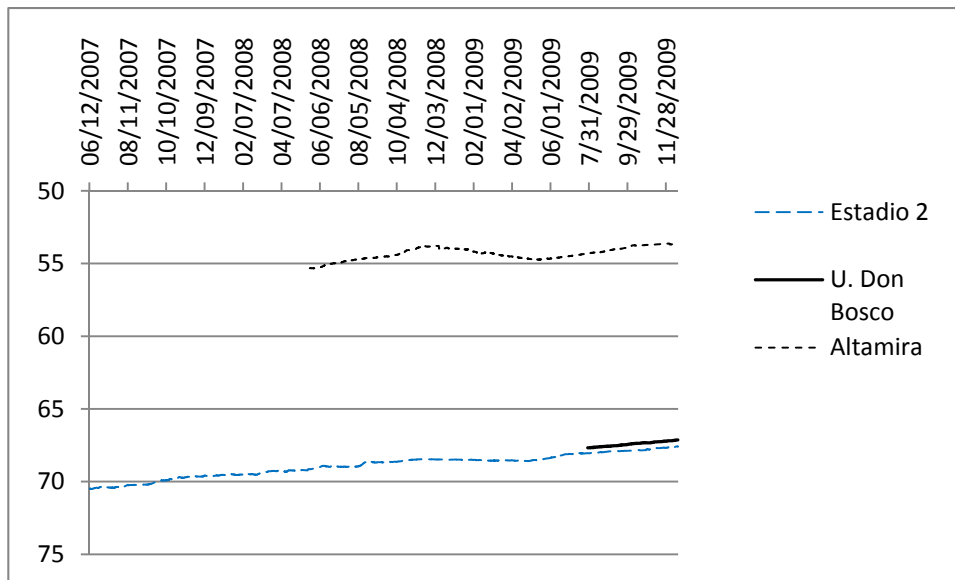


Figura 4.14

Gráfico de la variación temporal de los niveles de agua en los pozos

El Pozo de Altamira permite apreciar el efecto estacional de la precipitación en la variación de los niveles de agua para el período May/2008- Dic/2009, el mayor nivel del agua se da en el mes de diciembre alcanzando los 53.79 m de profundidad con relación a la boca del pozo, dos meses después de finalizada la época de lluvia; mientras que el menor nivel lo alcanza en el mes de mayo de 2008 con una profundidad de 55.31 m. Los datos indican que durante el período registrado, el pozo tuvo una tendencia al incremento en los niveles ya que en el mes de diciembre de 2009, el nivel del agua se encontró a una profundidad de 55.63 m, 0.16 cm arriba que en el año 2008. Igual comportamiento se refleja en el mes de mayo, en 2009 la mayor profundidad fue de 54.73 m, 0.58 m arriba del año anterior.

Este pozo presenta una condición diferente del resto de registros obtenidos, existe una variación estacional para el período analizado y un incremento en los niveles del agua, dicha condición podría asociarse con la ubicación del pozo respecto a la geología estructural que ejerce dominio en sistemas de flujo en la microcuenca, el pozo Altamira se encuentra ubicado en la intersección de dos fracturas de los sistemas estructurales principales en la zona de San Salvador, las fallas E-O y NNO-SSE (Figura 4.13), adicionándose a esto que la falla NNO-SSE se encuentra direccionada hacia el cráter del volcán de San Salvador, por donde podría estar circulando su recarga principal y por lo

tanto presentando esa variación estacional aquí discutida. Dada la condición anterior, podría considerarse que en períodos copiosos, el pozo reflejará aumento en los niveles del agua, el caso contrario será reflejado en períodos lluviosos de menor precipitación anual, esta condición podrá ser verificada dando seguimiento al análisis de los registros de niveles de agua subterránea.

El registro de niveles de agua en el pozo Estadio 2 refleja una tendencia a la alza en el nivel piezométrico para el período Jun/2007 – Dic/2009. Este pozo se encuentra cercano a la prolongación de una falla del Sistema NNO-SSE (Figura 4.13) que según el modelo geológico de la zona se extiende hasta dicho sector (Figura 4.4); el pozo ha estado sin operación al menos durante el período registrado. El comportamiento en el ascenso del nivel del agua puede estar asociado a recargas locales artificiales por fugas en los sistemas públicos de agua potable y alcantarillado, a una reducción de la explotación en la zona por desuso de algunos pozos y/o a la invariabilidad en las condiciones de la zona de recarga junto a un aumento de la precipitación anual en los años de registro. Los datos reflejan que no existe un efecto estacional definido en el pozo, por lo que también puede considerarse recargas con tiempos de tránsito mayores ya que no existe un sistema de fracturas directamente conectado que aceleren el flujo hacia el pozo impregnando ese efecto estacional.

En general, los datos de registros obtenidos no permiten establecer una tendencia del comportamiento de los niveles del agua subterránea en la microcuenca, de los datos analizados puede sugerirse que en la zona media de la microcuenca, en el acuífero fracturado, aquellos pozos que se encuentren ubicados en fallas geológicas definidas podrían estar presentando un efecto estacional asociado a cortos tiempos de tránsito que también aumentan el riesgo de contaminación en dichos puntos y que podrían variar directamente proporcional a la precipitación anual de períodos lluviosos anteriores, mientras que en los pozos ubicados en zonas que no están directamente conectados al sistema de fallas geológicas principales en la microcuenca, el tiempo de tránsito es mayor y por lo tanto el efecto estacional no es notorio, presentándose una tendencia a la alza o a la baja en los niveles atendiendo a su fuente de recarga.

Es importante considerar el hecho de que en octubre de 2009, el presidente de la ANDA, Ing. Francisco José Gómez, declaró que el 50% del agua producida para el Área Metropolitana de San Salvador, se pierde en fugas del sistema de agua potable (La Prensa Gráfica, 2009a), por lo que un porcentaje no cuantificado de este porcentaje podría estar recargando el acuífero y por lo tanto, tendencias a la alza en algunos de los pozos registrados podrían asociarse en alguna medida con dicha condición.

En cuanto a las aguas subterráneas de la zona de Soyapango, según la Figura 4.12, los dos pozos registrados pertenecen al Sistema de Flujo Este, sin embargo debido al corto período de registro no es posible inferir sobre las diferencias entre ambos y el comportamiento del acuífero en la zona. Solamente se recalca la condición de descenso en el pozo Venecia que se encuentra comprendido dentro de la microcuenca del río Las Cañas, afluente del río Acelhuate, aguas abajo de la salida de la microcuenca en estudio; en esta microcuenca, se ha dado un incremento en las construcciones de la zona alta durante la última década. Estudios más extensos se requieren para estudiar el comportamiento en los niveles del agua subterránea de este sector.

4.3.4 Recarga y descarga del agua subterránea

El sistema de recarga y descarga en la microcuenca obedece a patrones comunes de otras cuencas, la recarga se da en las partes altas o en zonas con mayor capacidad de infiltración y las descargas en las partes bajas, por medio de aportes en los ríos y afloraciones en manantiales dentro de la misma. Debido a que el Área Metropolitana de San Salvador se encuentra asentada en la mayor parte de la microcuenca (Figura 4.15), la influencia antropogénica modifica en alguna medida el comportamiento del sistema de recarga y descarga del agua subterránea.

Las fuentes de recarga natural, basadas en Wilson *et al.* (1980) citado en Díaz (2003) incluye precipitación directa, ingreso del flujo subsuperficial y recarga por infiltración

desde los ríos dentro de la cuenca. La descarga natural está principalmente asociada con la descarga de los acuíferos hacia los ríos y manantiales.

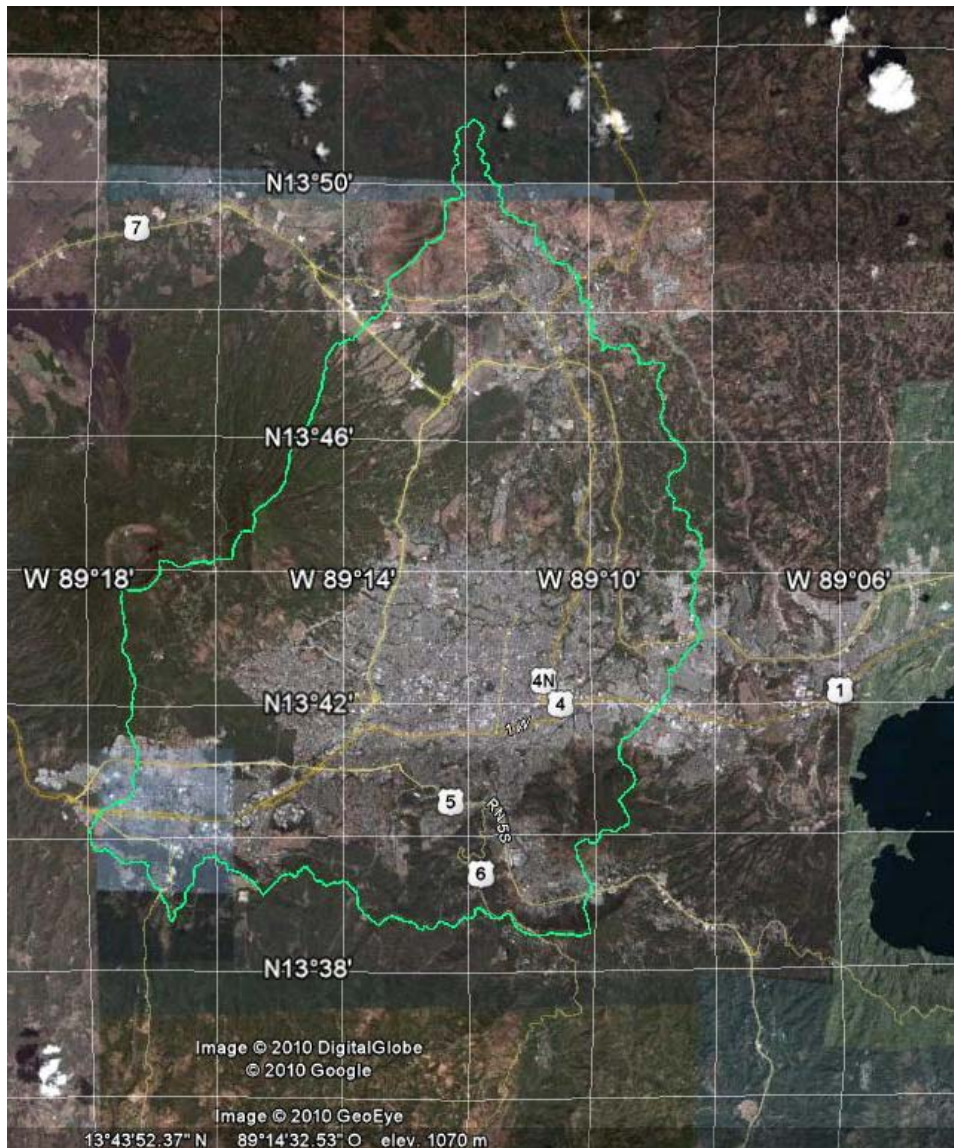


Figura 4.15 Imagen satelital de la microcuenca y el AMSS

Las descargas del sistema ocurren naturalmente como aporte a los caudales de los ríos y afloraciones en manantiales. Descargas antropogénicas se dan por medio de las abstracciones en los pozos pertenecientes al sistema de abastecimiento de agua de la ciudad. La producción total de la ANDA para el año 2008 en el sistema tradicional de la

Región Metropolitana fue de 75.01 millones de metros cúbicos entre pozos y manantiales, siendo los pozos los principales sistemas de producción.

4.3.4.1 Recarga natural

La recarga natural es abordada en el presente estudio como el agua recargada en aquellas zonas que no han sufrido alteraciones por efecto del desarrollo poblacional dentro de la microcuenca, pueden considerarse aquí, el volcán de San Salvador, y las partes altas de los cerros tales como San Jacinto y Milingo.

Recarga directa por la precipitación

Según Lerner, *et al.*(1990) citado en Díaz (2003 la precipitación directa es la recarga debido a la infiltración de la lluvia en el punto de impacto. Esta condición está asociada a la capacidad de infiltración de los suelos que a su vez depende del uso del suelo, de la pendiente, de la porosidad primaria y secundaria de las formaciones así como de la textura de los suelos.

La zona alta del volcán de San Salvador y parte baja de la ladera nororiente conforman las zonas de mayor recarga potencial dentro de la microcuenca (Gil, 2006), se considera que en la zona alta del volcán de San Salvador, la recarga potencial puede ser entre el 20.8% y el 35.4% de la precipitación promedio anual, mientras que en la parte baja de la ladera nororiente los valores pueden variar entre el 8.5% y el 20.8% de la precipitación (Gil, 2006), como se observa en la Figura 1.3.

La escorrentía que se produce en estas zonas, escurre hacia las zonas bajas, y en aquellos sectores en que las condiciones de los suelos tienen un mayor grado de capacidad de infiltración tales como zonas altamente fracturadas o fallas geológicas importantes, la recarga puede aumentar localmente.

Recarga de los ríos

El aporte desde los ríos existentes en la microcuenca puede suceder en aquellas zonas en que las fallas geológicas se alineen con el cauce de los ríos o que atraviesen dicho curso, esta condición es válida cuando el nivel del agua está lo suficientemente alejado del lecho del río para que el aporte ocurra.

La zona de estudio posee una distintiva geología estructural conformada por tres sistemas de fallas principales por lo que la recarga bajo esta condición podría estar ocurriendo en las zonas altas de la microcuenca. Estudios de aforos diferenciales son requeridos, entre otros, para verificar tales aportes al acuífero.

Es importante mencionar aquí que las aguas superficiales de la cuenca del río Acelhuate y en general de El Salvador se encuentran contaminados, principalmente debido a las altas concentraciones de Coliformes fecales, turbidez, color aparente, carga orgánica biodegradable y bajos niveles de oxígeno disuelto (MARN, 2009), por lo que la contribución a la recarga del acuífero por medio del aporte de los ríos puede representar un alto riesgo a la salud de los usuarios del agua en la zona.

4.3.4.2 Recarga urbana

La recarga urbana puede originarse a partir de fallas o deficiencias en las estructuras que el ser humano ha construido y utiliza para realizar las actividades relacionadas con el agua, así como por inapropiadas prácticas en el uso del recurso hídrico. En la microcuenca alta del río Acelhuate, pueden identificarse como fuentes de recarga urbana las fugas en los sistemas de agua potable, alcantarillado de aguas negras y alcantarillado pluvial así como el sobre riego de jardines y parques.

Recarga por fugas en los sistemas de agua potable

Para finales del año 2009 se estimaba que el 50% del suministro de agua del AMSS se perdía en fugas del sistema de agua potable (La Prensa Gráfica, 2009a), estas fugas pueden estar dispersas o localizadas en las uniones de las tuberías, en las válvulas, en los accesorios, en tanques de almacenamiento fracturados o cualquier parte que conforma los

sistemas de impelencia, almacenamiento y distribución de agua potable, de igual manera se considera parte de las fugas a las conexiones ilegales. Se estima que en el año 2008 la producción total para el Gran San Salvador fue de 191.8 Mm³ (ANDA, 2008b), es decir 6.06 m³/s, de los cuales un porcentaje todavía desconocido estaría aportando a la recarga del acuífero.

La Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés) considera que un sistema de agua potable tiene niveles de pérdidas medias, cuando el porcentaje de pérdidas en el mismo oscila entre el 8% y el 15% (Gerlingen, D. Weimer, 2001). En febrero de 2010 la ANDA, con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) inició el plan piloto para la detección de fugas a través del ultrasonido (actualmente el plan se encuentra en ejecución).

Recarga por fugas en el sistema de drenaje de aguas residuales

Cuando el agua fresca es suministrada, su consumo genera un caudal residual medio del 80% del caudal medio diario (ANDA, 1989), estas aguas dentro del AMSS son descargadas hacia los ríos o quebradas principales de la microcuenca en su mayoría por medio de un sistema de tuberías de cemento o concreto reforzado de más de 50 años de antigüedad. Menos de cinco plantas de tratamiento de aguas negras residenciales existen en casos puntuales en algunas zonas residenciales recientes dentro del área de estudio.

En las tuberías de drenaje antiguas de aguas negras domiciliarias son evacuados también los caudales de aguas residuales industriales y del comercio.

Debido a que los sistemas de aguas residuales en la zona de estudio funcionan por gravedad, puede considerarse que cuantitativamente no son significativas ya que teóricamente no son sometidas a presiones que aumenten las fugas, sin embargo, pueden convertirse en una de las principales fuentes de contaminación de los ambientes urbanos (Díaz, 2003). No se tiene conocimiento de estimaciones sobre las tasas de fugas en los sistemas de aguas residuales del AMSS.

Recarga por fugas en el sistema de alcantarillado pluvial

Al igual que en el drenaje de aguas residuales, las aguas pluviales de la ciudad son conducidas por medio de un sistema de alcantarillado cuyas tuberías son rígidas de cemento o concreto reforzado, la diferencia estriba en que los caudales manejados en estos sistemas superan significativamente a los primeros.

En los últimos dos años, se ha presentado el fenómeno de aparición de enormes fugas en el sistema de drenaje pluvial que ha hecho colapsar vías principales dentro de la ciudad, las fallas presentadas han estado asociadas a colapso de bóvedas, colectores principales o pozos; estos hundimientos son llamados popularmente “megahoyos” y las autoridades los atribuyen al vencimiento de la vida útil de la red de aguas lluvias desde hace 10 años (La Prensa Gráfica, 2009b). Pese a que el sistema de drenaje pluvial fue diseñado para funcionar por gravedad, existen zonas dentro de la ciudad que trabajan a tubo lleno e incluso a presión, en las zonas aledañas al costado poniente de la Universidad de El Salvador, las tapaderas de los pozos de aguas lluvias son disparadas por la sobrepresión en los sistemas bajo condiciones de eventos con intensidades de lluvia que superan la capacidad de transporte de la alcantarilla; las condiciones de presión en tales sistemas puede generar incremento en las tasas de fuga existentes y/o colapso de los mismos ya que no son diseñados para tales condiciones.

Los “megahoyos” pueden convertirse en zonas de recarga artificial localizada, mientras que las fugas a lo largo de las alcantarillas representan recargas dispersas, ambas pueden aportar contaminantes al sistema, ya que arrastran todo tipo de material que se encuentra depositado en las calles, hidrocarburos, lixiviados de depósitos de basura y otros pueden ser conducidos por este medio hacia el acuífero de San Salvador. No se tienen estimaciones sobre las tasas de fugas en el sistema de alcantarillado pluvial de la ciudad.

Recarga artificial con sistemas de infiltración

Debido a la topografía existente en la zona industrial Plan de La Laguna, Antiguo Cuscatlán, los desarrolladores implementaron un sistema de drenaje pluvial cuyo punto de

descarga principal es un sistema de infiltración artificial conformado por lagunas de almacenamiento y pozos de infiltración de gran diámetro que son administrados por ASEVILLA (Figura 4.16). El exceso de agua en el sistema es bombeado hacia el sistema de drenaje convencional de la ciudad.



Figura 4.16 Foto de laguna de almacenamiento de aguas lluvias en Antiguo Cuscatlán

Este es el único caso conocido en el AMSS en el cual la escorrentía generada por el desarrollo urbano de la ciudad es regresada al acuífero. Un monitoreo sobre la calidad del agua de infiltración y estructuras de pretratamiento deben ser consideradas como parte del sistema.

4.3.4.3 Descarga natural

De acuerdo al inventario de fuentes realizado en este estudio y la ubicación de las mismas en el territorio del AMSS, puede decirse que la descarga natural del agua subterránea en forma de manantiales ocurre principalmente en zonas de contacto de diferentes miembros geológicos en las márgenes medias del río Acelhuate, en el río Chagüite, Mariona, El Angel y Arenales; otros manantiales se encuentran ubicados en zonas de fallas geológicas dentro de la cuenca (Figura 4.11). También, la presencia de manantiales de muy poco caudal como La Pedrera en San Marcos y Ojo de Agua en El Boquerón, que podrían estar asociados a un flujo subsuperficial lento en dicho sector. Otras descargas del acuífero como aporte al caudal base de los ríos no fueron identificados en esta investigación.

4.3.4.4 Descarga antropogénica

Corresponde principalmente a las abstracciones de los pozos de producción. En el Gran Salvador, para el año 2008 la ANDA tuvo una producción total de 75.1 millones de metros cúbicos, este valor considera también la producción de los manantiales que podría oscilar un 5% del total. Se carece de datos sobre la producción de los pozos propiedad de la industria, el comercio o particulares en la zona de estudio.

4.3.5 Modelo Conceptual hidrogeológico

Sobre la base de los datos geológicos e hidrogeológicos, se propone un modelo conceptual hidrogeológico del área de estudio. Los principales componentes del modelo se enfocan en la ocurrencia del agua subterránea, la recarga y la descarga del sistema. La simplicidad del modelo pretende presentar de una forma clara el comportamiento del agua subterránea dentro de la microcuenca y el ambiente urbano con el que interactúa.

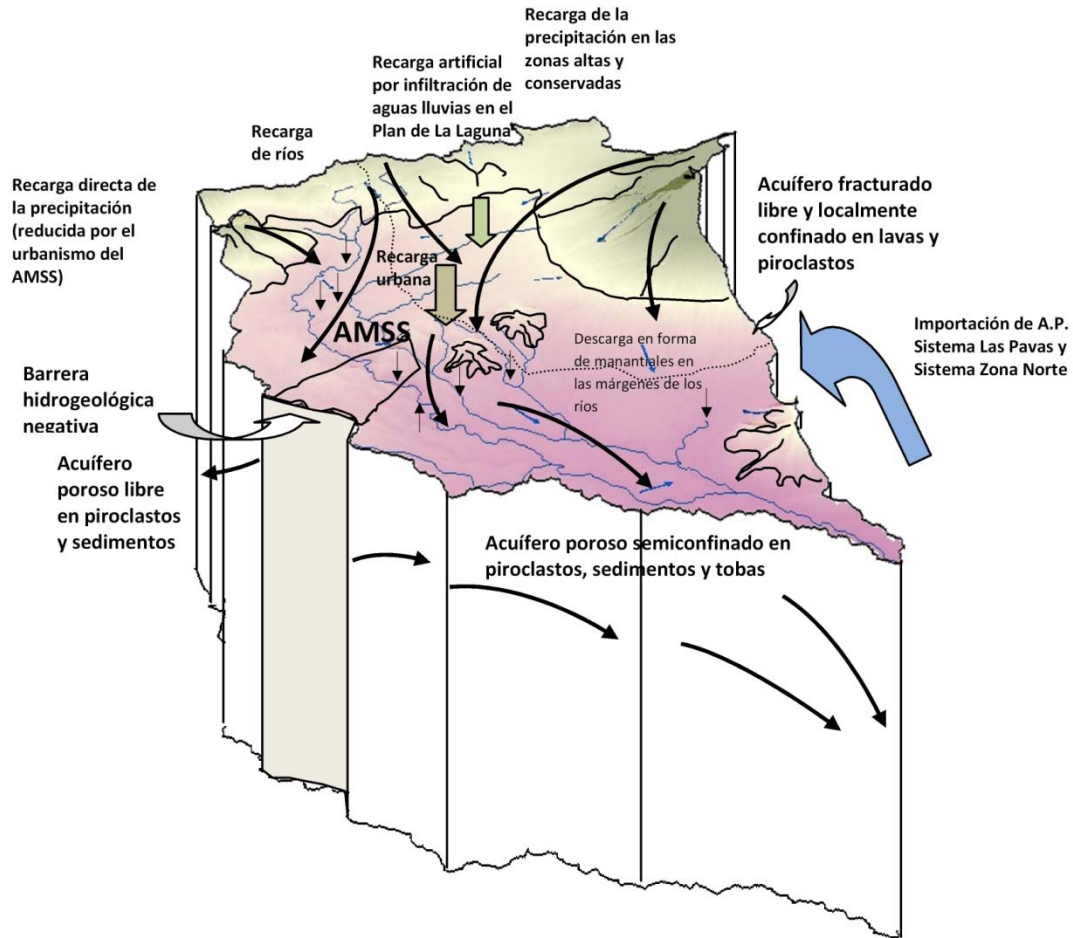


Figura 4.17 Modelo conceptual hidrogeológico del área de estudio

La ocurrencia del agua subterránea dentro del área de estudio se encuentra asociada a dos grupos de estratos geológicos y recibe un fuerte dominio del complejo sistema geológico estructural existente en la microcuenca. Un acuífero fracturado libre, localmente confinado, circula a través de los estratos de lavas basálticas y andesíticas intercaladas con materiales piroclásticos en la zona alta de la microcuenca, el comportamiento del flujo en estos materiales se ve fuertemente influenciado por las fallas geológicas existentes, en donde se dan los puntos de mayor productividad del acuífero y donde probablemente la influencia estacional se marque con mayor claridad. La otra unidad corresponde a un acuífero poroso libre o semiconfinado que se mueve a través de materiales piroclásticos intercalados con tobas y sedimentos en la zona media y baja de la microcuenca, el flujo también se ve influenciado por la geología estructural predominante en la región, aunque en menor

medida, este acuífero es menos productivo que el primero, solamente algunos sectores específicos pueden resultar altamente productivos en el sector de Apopa.

La tendencia del movimiento del flujo distingue dos rutas principales divididas por una barrera geológica negativa en la zona del horst El Carmen- Milingo: la primera corresponde al Flujo Oeste que se mueve con dirección surponiente - norte y que baja desde el volcán de San Salvador, el cual se une con el agua proveniente del sector poniente de la cordillera del Bálsamo y se mueve hacia las zonas bajas en Apopa, Ciudad Delgado y Nejapa. Este flujo atraviesa las dos unidades acuíferas definidas anteriormente. El Flujo Este inicia su recorrido en el sector este de la cordillera del Bálsamo y cerro San Jacinto tomando un giro determinado por la barrera geológica negativa, hacia el sector oeste de la cuenca fuera de los límites de la misma.

Parte de las entradas de agua a la cuenca están representadas por la importación de los sistemas de abastecimiento de agua potable Las Pavas y Zona Norte que representan más del 50% del total suministrado por la ANDA. La recarga producto de las fugas en el sistema de agua potable no puede despreciarse; otras fuentes de recarga urbana están representadas por las fugas en los sistemas de drenaje de aguas negras y drenaje pluvial, así como por la recarga artificial de la zona industrial en el Plan de La Laguna.

Las descargas naturales principales en la microcuenca se encuentran determinadas por el afloramiento de manantiales en las márgenes de los ríos, cuyo apareamiento se asocia en alguna medida con las fallas geológicas predominantes en el área. La descarga artificial está representada por las abstracciones de los pozos de explotación tanto del sistema público como privado para uso industrial, comercial y domiciliar. Estos puntos de salida de agua se encuentran distribuidos en toda la microcuenca.

4.4 Caracterización hidrogeoquímica e isotópica del agua subterránea en la microcuenca alta del río Acelhuate

Para caracterizar química e isotópicamente las aguas subterráneas de la microcuenca se utilizaron 36 muestras de agua tomadas en distintas jornadas de muestreo, de las cuales 20 corresponden a muestras de agua subterránea tomada en 13 pozos perforados, 12 son de agua superficial tomada en 6 manantiales y 4 pertenecen a muestras de agua potable tomada en grifos de abastecimiento que corresponden a los sistemas de importación de agua potable que complementan el servicio en el AMSS, 2 muestras más corresponden a datos de agua de pozo obtenidos de estudios anteriores. Los datos isotópicos suman 26 muestras de las cuales 7 son de manantiales, 10 de pozos, 2 de los sistemas de importación y 7 de aguas lluvias distribuidas en 5 estaciones de captación con dos puntos y dos muestras cada una (Ver Figura 3.3). Los datos de campo suman en total 61 puntos diferentes. La Figura 4.18 muestra la distribución espacial de los datos químicos, isotópicos y de campo.

4.4.1 Parámetros de campo

4.4.1.1 Temperatura

Los valores de temperatura medidos en las fuentes de agua de la microcuenca varían entre 19.1°C y 33.8°C (Figura 4.19) presentándose la mayoría de los datos entre los 24°C y 30°C. La temperatura ambiente media de la microcuenca varía entre los 16.28°C en la Estación El Boquerón y los 23 °C en la estación Ilopango (SNET, S/f). Puede considerarse que en su mayoría las aguas de los pozos y manantiales se encuentran influenciadas por el vulcanismo activo del estrato volcán de San Salvador y en alguna medida por Ilopango.

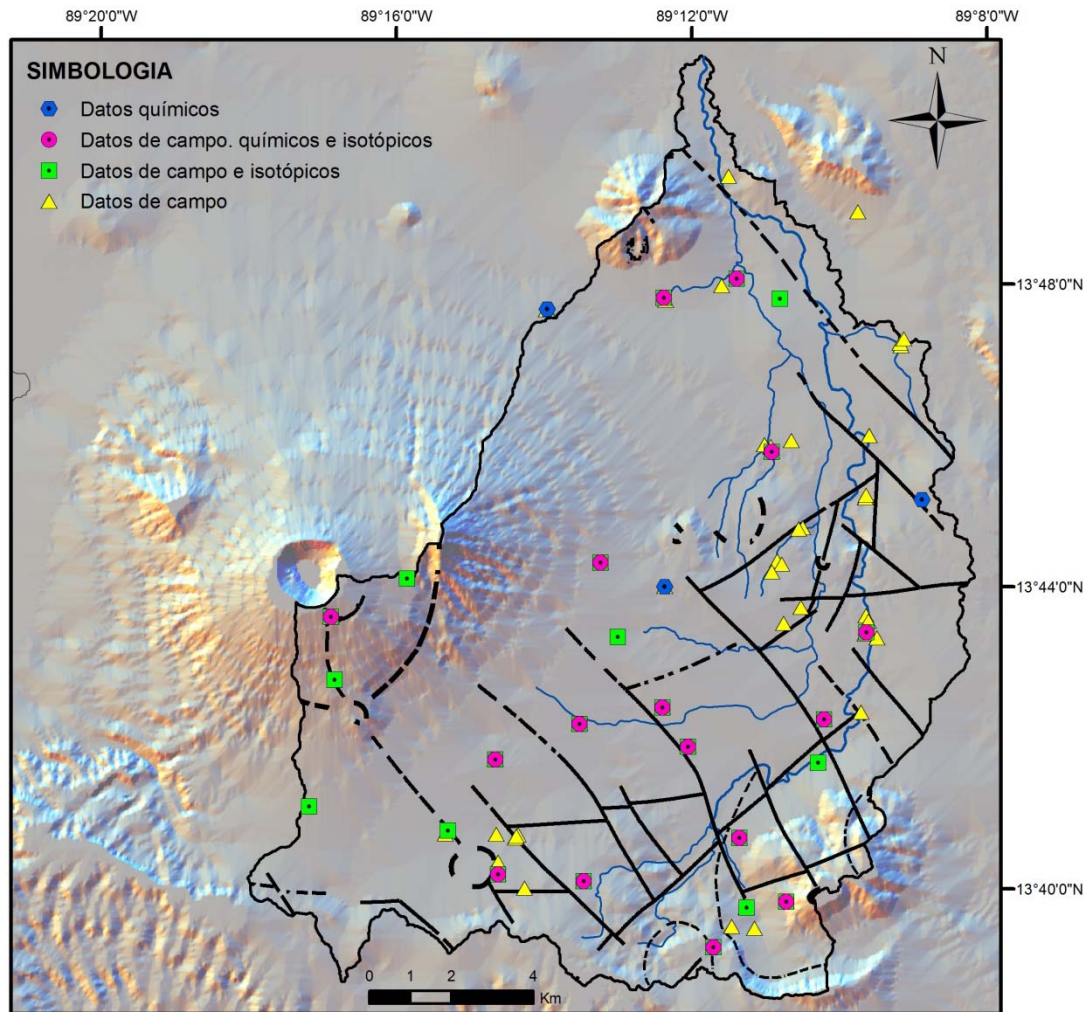


Figura 4.18 Mapa de distribución espacial de los datos hidrogeoquímicos e isotópicos obtenidos en la microcuenca

Especial atención merecen las fuentes de los pozos El Espino, Jardines de La Hacienda, San José de la Montaña en Antiguo Cuscatlán y El Arenal en Ciudad Delgado, así como los manantiales Caites del Diablo y Tecotrine en las riberas del río Acelhuate, cuyas temperaturas superan los 30°C (Figura 4.19) y que podrían corresponder a un flujo con mayor influencia volcánica que el resto de las aguas muestreadas. Las aguas de los pozos de Antiguo Cuscatlán son captadas en el acuífero fracturado libre entre 90 m y 140 m de profundidad.

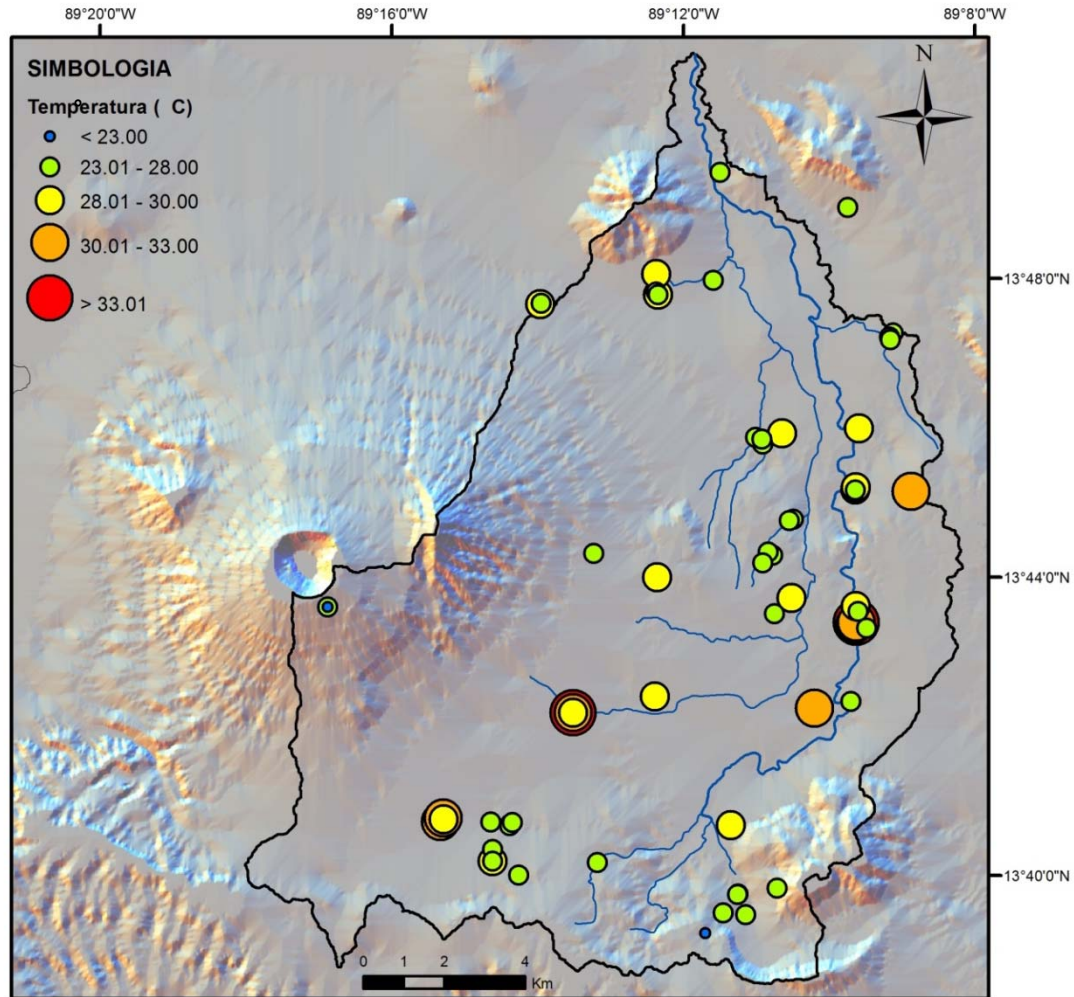


Figura 4.19 Mapa de variación de la temperatura en las aguas de la microcuenca

4.4.1.2 Conductividad Eléctrica

Los valores de la conductividad eléctrica medidos en las muestras de agua variaron entre 53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1057 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.20). Conductividades superiores a los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ presentan una tendencia similar al flujo oeste presentado en el modelo conceptual de la microcuenca (Figura 4.17). Estas muestras pertenecen a los pozos El Espino, San José de La Montaña, Externado de San José y a los manantiales La Ocha, Caites del Diablo, Tecotrine y al pozo somero La Bomba en el municipio de Cuscatancingo. Estos manantiales fueron identificados anteriormente dentro de la zona de descarga natural de la microcuenca. Los valores de CE bajos ($< 100 \mu\text{S}/\text{cm}$) se presentan en los manantiales de las zonas altas de la

microcuenca y en los pozos y manantiales ubicados en la falda norte del volcán de San Salvador, asociándose con tiempos de tránsito cortos ya que presentan bajas concentraciones de iones mayoritarios disueltos, asimilándose a la composición del agua lluvia. El valor de CE < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ medido en el Manantial de Tecotrine podría asociarse a una alta tasa de dilución con flujo subsuperficial de terrenos cercanos, ya que fue tomado en época de lluvia y con registros de lluvia en las horas previas a la toma de la muestra.

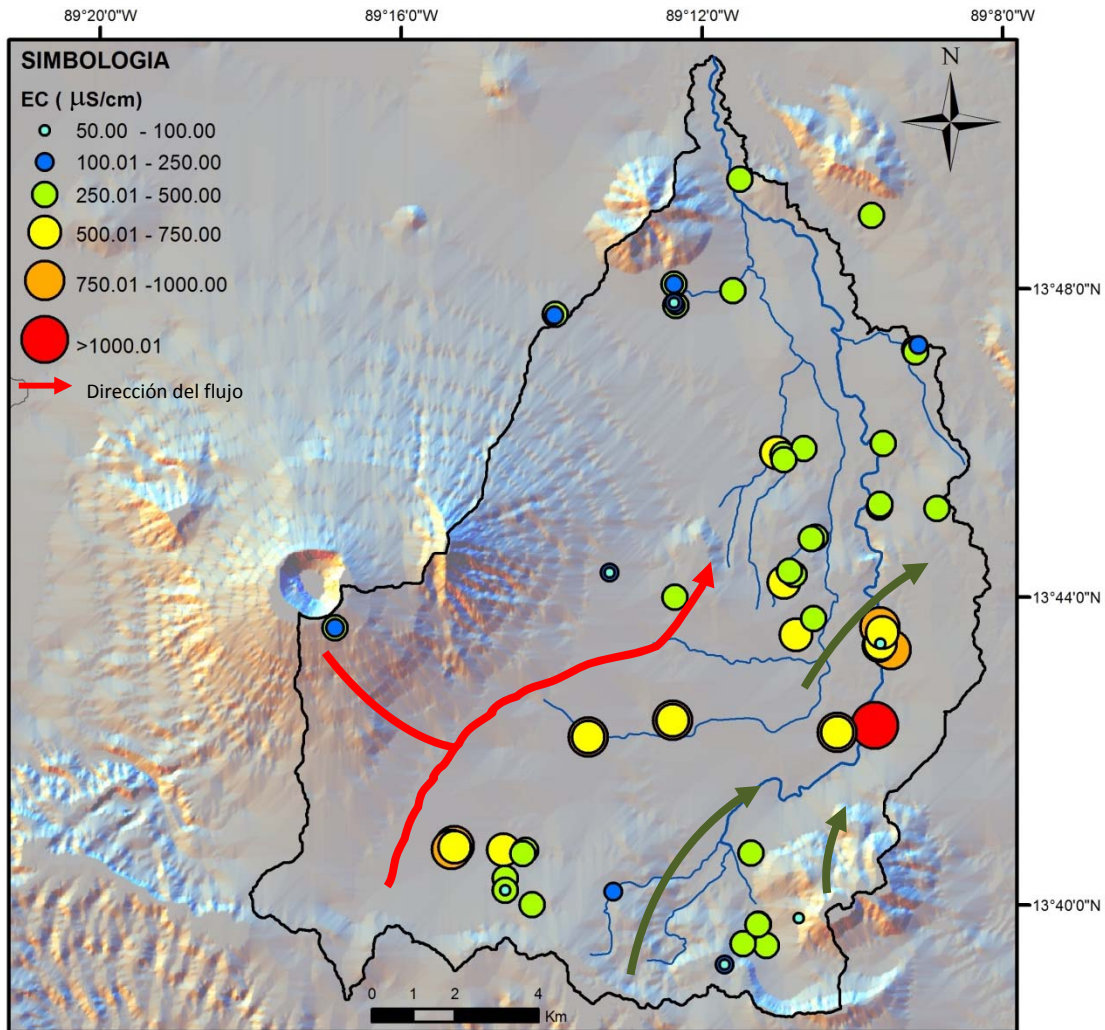


Figura 4.20 Mapa de variación de la Conductividad Eléctrica en las aguas de la microcuenca

4.4.1.3 pH

El pH del agua es un parámetro que ejerce control sobre los procesos que se llevan a cabo en el agua subterránea, así dependiendo del valor del pH en el agua pueden o no disolverse algunos minerales contenidos en la roca y formar parte de la huella química de la misma. Además controla las especies que se encontrarán disueltas en el agua, como resultado de las reacciones REDOX, la presencia de metales trazas también se encuentra dependiendo del valor de pH en el agua.

Los valores de pH medidos resultaron en general en pH neutro, lo cual es característico de aguas subterráneas con recargas recientes, valores de pH menores de 4 fueron medidos solamente en el manantial La Pedrera de San Marcos, que también presentó bajas concentraciones de iones disueltos. Valores con $4 < \text{pH} < 5$, que varían estacionalmente a valores $5 < \text{pH} < 6$, fueron identificados en manantiales de las márgenes de los ríos Acelhuate, Chagüite y Mariona, posiblemente debido a reacciones REDOX que pudieran existir en esta zona. En la parte alta de la microcuenca, en Antiguo Cuscatlán, también se identificaron algunos pozos con valores de $5 < \text{pH} < 6$ lo cual podría asociarse al poco recorrido del agua hacia estos puntos, estando posiblemente influenciados por la composición del agua lluvia. Hacia la zona central y baja de la microcuenca los valores de pH predominantes se encuentran arriba de 6, posiblemente por la evolución del agua en su viaje hacia aguas abajo, donde suceden procesos de disolución de silicatos, que a su vez consumen acidez, convirtiéndolas en aguas neutras.

4.4.1.4 Oxígeno disuelto

Solamente pueden ser objeto de análisis los valores de oxígeno disuelto medido en las muestras de agua tomadas en los manantiales y pozos excavados, ya que fue medido directamente, sin sufrir alteración en el momento de la medición. Los valores resultantes de las muestras de agua subterránea de los pozos perforados no se consideran representativos de las condiciones del acuífero ya que se ven influenciados por un aumento en el oxígeno

disuelto debido al bombeo de la producción y a la descarga en los grifos durante la toma de la muestra.

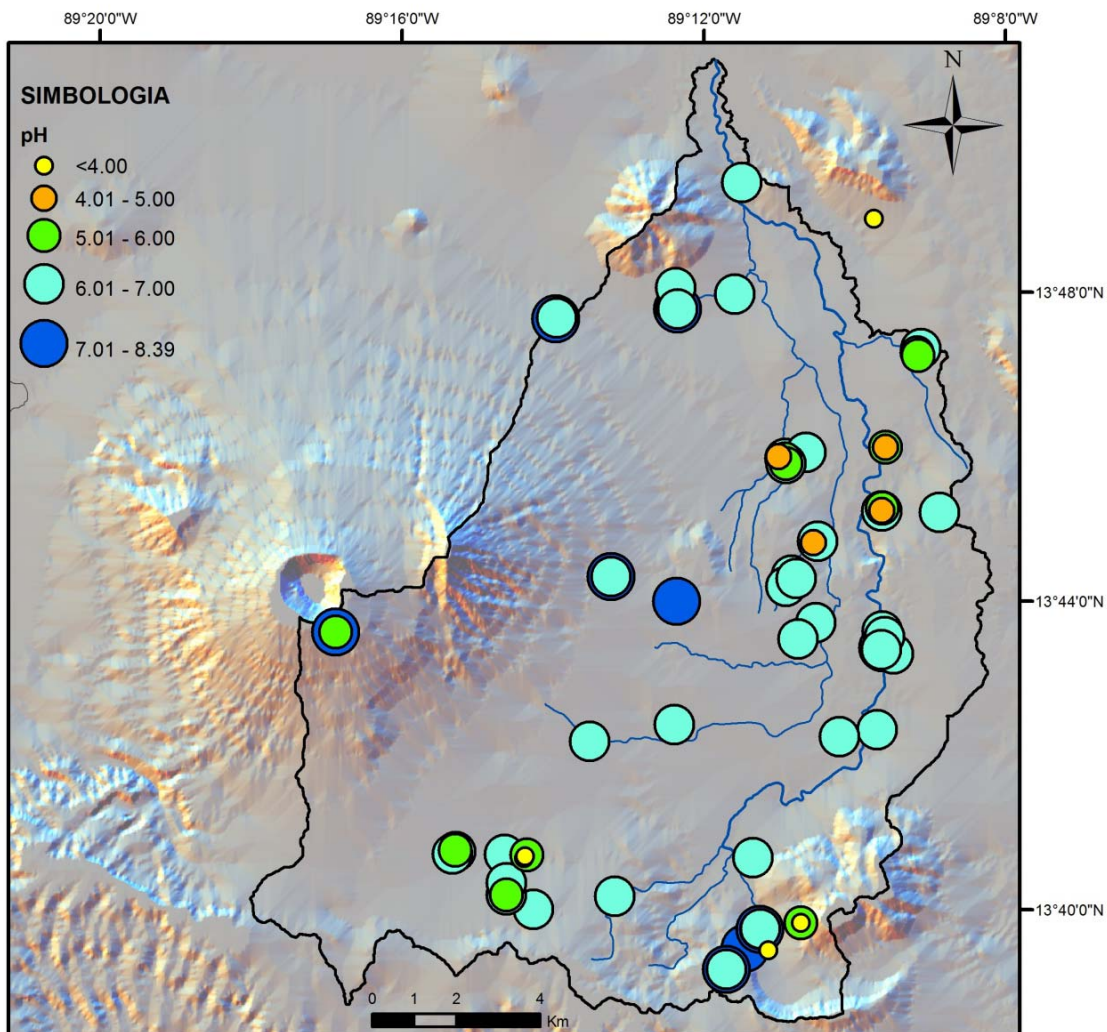


Figura 4.21 Mapa de variación del pH en la microcuenca

Los valores de oxígeno disuelto medidos en los manantiales son en su mayoría menores a 4 mg/L y muestran que existen condiciones de reducción del oxígeno posiblemente por la oxidación de la materia orgánica, la cual podría estar presente en la unión entre estratos geológicos de acuerdo a la Figura 4.2. La misma materia orgánica también podría estar presente por la filtración de aguas grises y letrinas cercanas al afloramiento de dichas fuentes, ya que en esas zonas las comunidades adyacentes, mayoritariamente carecen del

servicio de alcantarillado sanitario y disposición de aguas grises y no se tienen delimitadas las zonas mínimas de protección de fuentes.

4.4.2 Química del agua en la zona de estudio

Los resultados que se analizan en este apartado corresponden a muestras tomadas de junio a noviembre de 2009 en dos jornadas de muestreo tal y como se explicó en capítulo 3. Muestras de tres puntos adicionales han sido tomadas con el objetivo de enriquecer la información disponible y corresponden, al período dic/2006 – enero/2007, se asume que el comportamiento químico de las aguas ha variado poco en el tiempo.

Utilizando un diagrama de Piper para clasificar las aguas (Figura 4.22), se obtiene que el 83% de las muestras analizadas son aguas del tipo bicarbonatadas (> 60%) y pueden ser sódicas, cálcicas o magnésicas con proporciones similares entre 20% y 50% para estos aniones, indicando que su huella química proviene principalmente de la roca basáltica del acuífero fracturado tal y como se ha visto en el apartado de la geología. Del 17% restante, es decir 6 muestras, 2 corresponden al manantial SANTATE-MA-01, ubicado en El Boquerón y puede tipificarse como bicarbonatada-cálcica-magnésica con tendencia a sulfatada para ambas jornadas de muestreo. La muestra SANMAR-MA-01 que corresponde a un manantial ubicado a media altura de una ladera en el cerro San Jacinto se puede clasificar como bicarbonatada sódica y presenta características similares a los del agua lluvia. De manera similar se comporta la muestra de la primera jornada tomada en SANMAR-MA-03, ubicada cerca del parteaguas superior de la cuenca en la zona de Los Planes de Renderos. Las muestras de la fuente SS-MA-01 cambiaron de bicarbonatada sódica-cálcica a bicarbonatada magnésica-cálcica, entre la primera y la segunda jornada de muestreo, presentando una variación estacional. También, la muestra del sistema de importación de agua potable, SAP-01, proveniente del sistema Las Pavas, y captada en el río Lempa, presenta un cambio entre la primera y la segunda jornada de muestreo, cambia de bicarbonatada cálcica-sódica a bicarbonatada magnésica-cálcica. La uniformidad en la caracterización de la composición química de las aguas en la microcuenca permite respaldar el planteamiento de la existencia de que el acuífero fracturado y el acuífero poroso se encuentran interconectados entre sí.

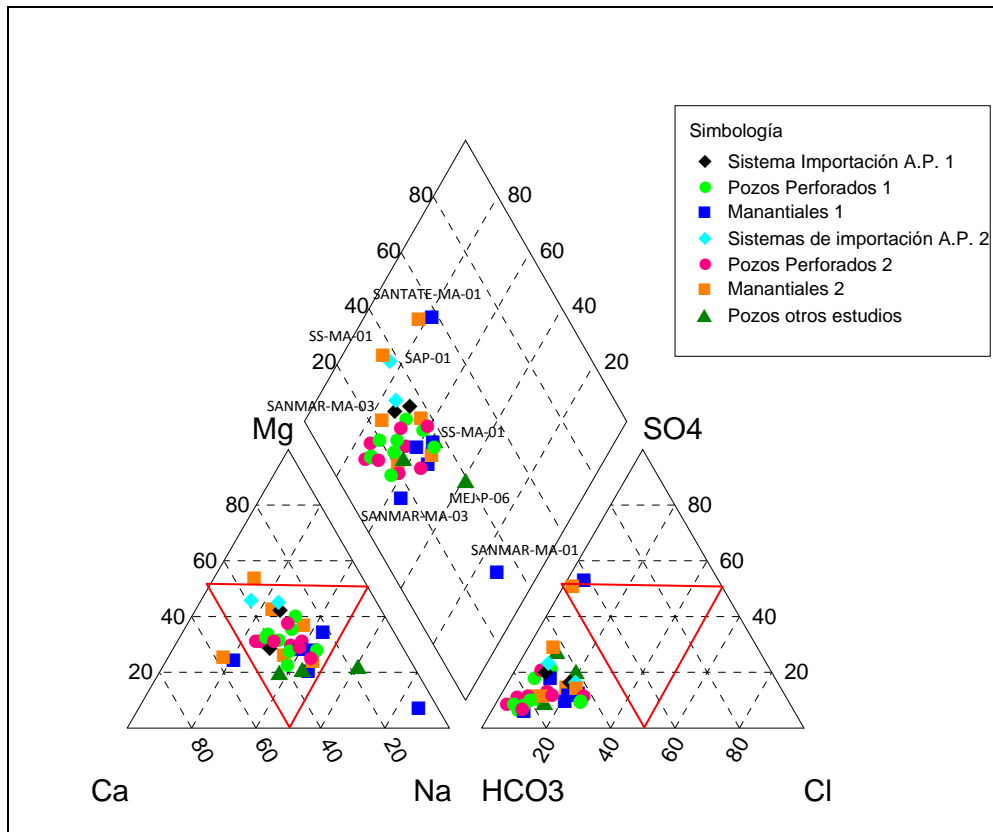


Figura 4.22 Diagrama de Piper para las muestras de agua de la zona de estudio

4.4.3 Evolución del agua subterránea

Puede notarse en la Figura 4.22, que los manantiales de la parte alta de la cuenca son principalmente los que difieren de la mayoría de las muestras analizadas en cuanto al tipo de aguas que representan (Figura 3.3). El manantial SANTATE-MA-01, es la única muestra que tiene tendencia a sulfatada, posiblemente la proporción de sulfatos se debe a la influencia volcánica del Estratovolcán de San Salvador, ya que se encuentra muy cercana al cráter; este manantial estaría representando en alguna medida las características adoptadas por el agua infiltrada en la zona del volcán de San Salvador, que podría constituir parte de la recarga que circula por el sistema de flujo Oeste.

Los manantiales SANMAR-MA-01 Y SANMAR-MA-03 también presentaron proporciones mayores de sodio en relación al resto de cationes durante la primera jornada de muestreo, pudiendo considerarse representativas de las aguas recargadas en el Flujo Este de la cuenca.

Aguas con mayores concentraciones de iones disueltos se aprecian en la zona media-alta de la microcuenca, bajo la zona más antigua de la ciudad de San Salvador (Figura 4.23 y Figura 4.24)

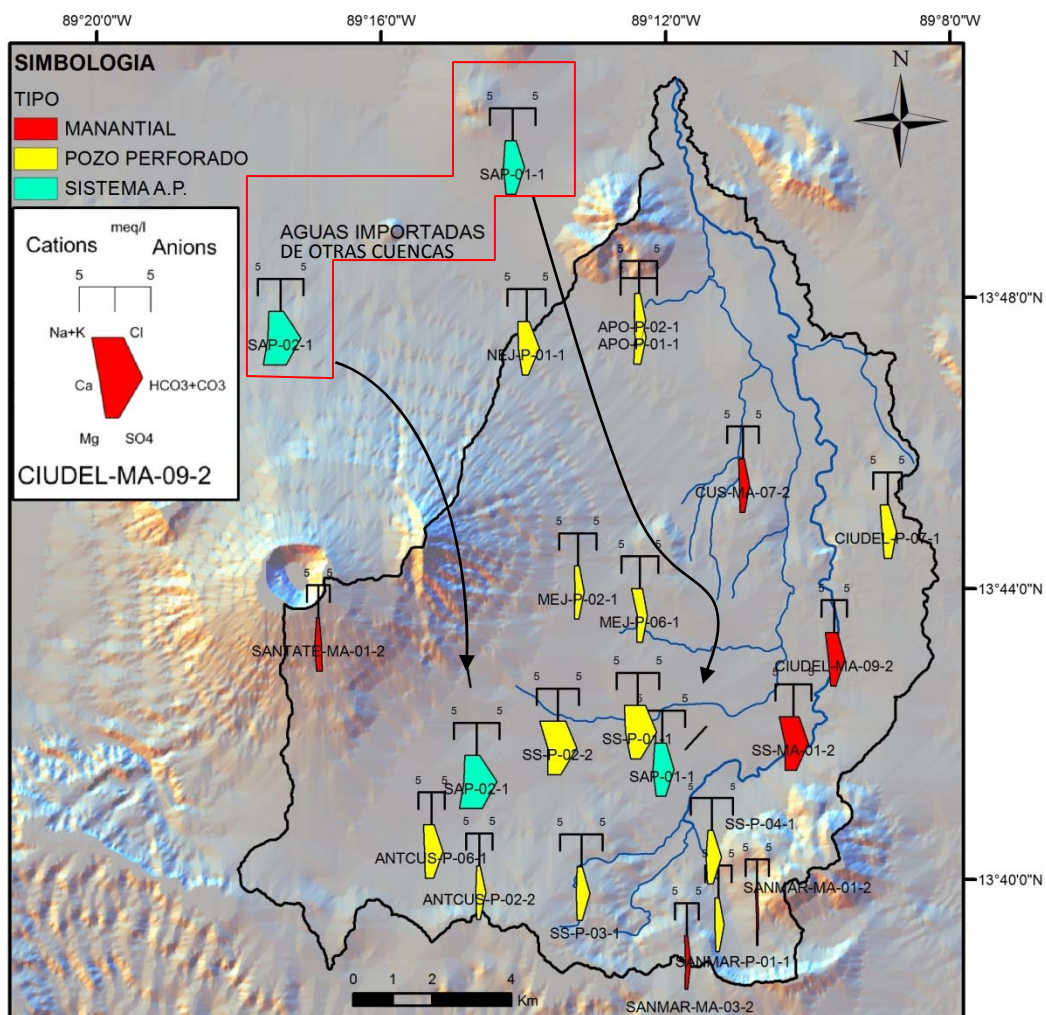


Figura 4.23 Mapa de diagramas de Stiff en la microcuenca para la 1ª jornada de muestreo
 CIUDEL-P-07, MEJ-P-06 Y NEJ-P-01 corresponden a muestras de Dic/06-En/07

La tendencia de las aguas en ambos sistemas de flujo es de aguas con bajas concentraciones de iones disueltos en la zona alta, aumentando hacia la zona céntrica de la ciudad y una reducción gradual de los mismos a medida el flujo avanza hacia aguas abajo en la microcuenca. El manantial SS-MA-01 durante la segunda jornada de muestreo presenta una caracterización muy similar a la del sistema de importación SAP-01, también durante la segunda jornada de muestreo, solamente que más diluida y posiblemente por fugas asociadas al mismo sistema que se encuentran influenciando fuertemente las aguas surgiendo en este manantial. Hacia las zonas bajas, en el manantial CIUDEL-MA-09 el agua resultó más diluida, posiblemente por influencia del flujo subsuperficial debido a la época de lluvia en zonas aledañas a la fuente.

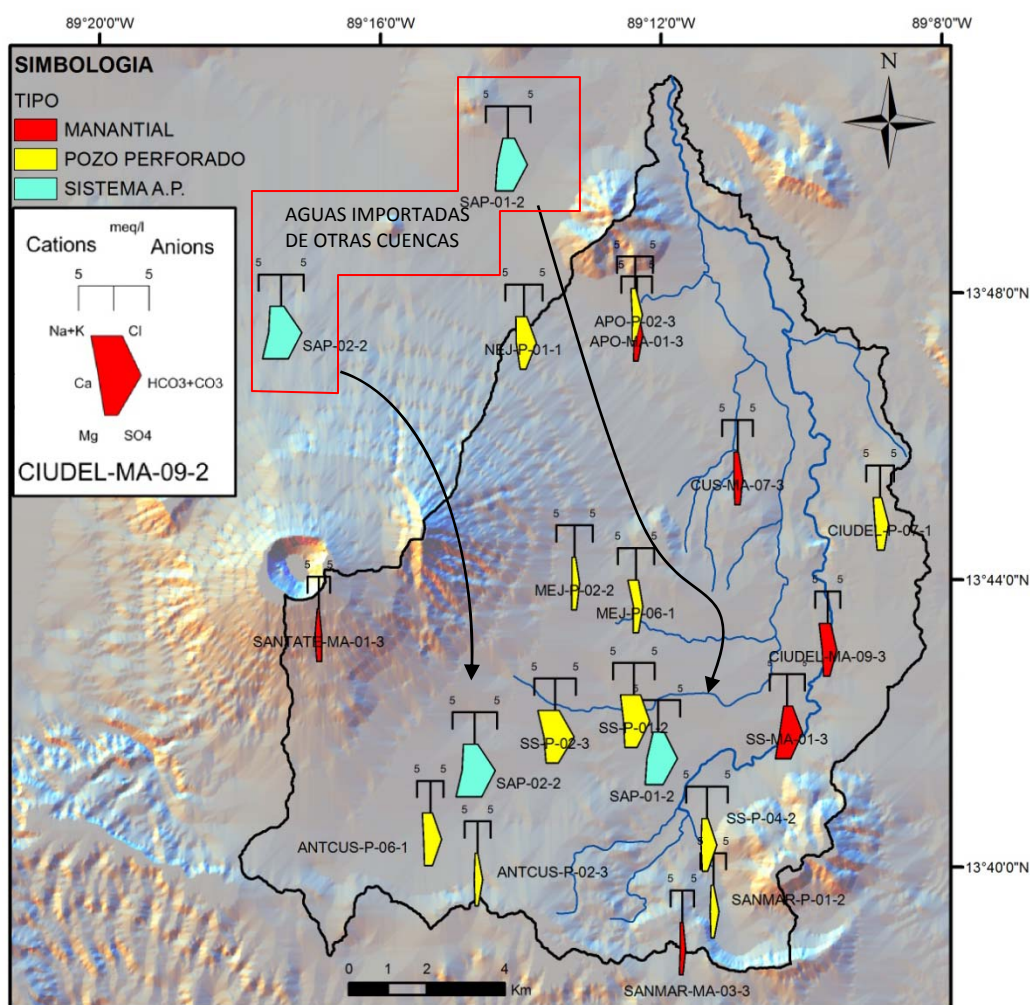


Figura 4.24 Mapa de diagramas de Stiff en la microcuenca para la 2ª jornada de muestreo
 CIUDEL-P-07, MEJ-P-06 Y NEJ-P-01 corresponden a muestras de Dic/06-En/07

En ambas jornadas de muestreo las muestras APO-P-01 Y MEJ-P-02, que se encuentran al pie del volcán de San Salvador, en los límites entre la zona urbana y la zona rural y poco desarrollada se caracterizan por ser aguas bicarbonatadas-magnésicas, adoptando esta característica posiblemente a lo largo de su corto recorrido por los flujos de lava basáltica y andesítica propios del sector. El agua del Sistema Zona Norte SAP-02 presenta una caracterización similar, pero más concentrada que las otras, lo cual es lógico ya que se ha determinado que la zona de recarga de esta fuente de abastecimiento se encuentra en el sector poniente del volcán de San Salvador (Arévalo Herrera, 2005) pero su recorrido puede ser más largo, haciendo que el agua disuelva más iones en su paso por la roca.

En el sistema de Flujo Oeste las aguas de la zona alta se presentan con bajas concentraciones iónicas relativas a las de la zona media alta de la cuenca (ANTCUS-P-06 y SS-P-02) como se aprecia en la Figura 4.24. Hacia las zonas bajas, la caracterización química se mantiene pero las concentraciones de algunos iones se diluyen hasta en 2.8 veces, lo cual podría estar asociado al aporte de la recarga proveniente principalmente del volcán de San Salvador (Figura 4.12).

La tabla Tabla 4.6 presenta una comparación entre las concentraciones extremas de los iones mayoritarios de la parte alta, media y baja de la microcuenca para ambos sistemas de flujo. La Figura 4.25 presenta la variación de las concentraciones en cada zona de la cuenca.

Tabla 4.6 Comparación entre las concentraciones de los iones mayoritarios en distintas zonas de la microcuenca (mg/L)

Ión	Flujo Oeste			Flujo Este		
	Zona alta	Zona media	Zona baja	Zona alta	Zona media	Zona baja
Ca ²⁺	22-33	11-52	13-40	1-16	22-56	35-44
Mg ²⁺	7-10	8-28	9-16	1-12	10-40	13-19
Na ⁺	11-16	15-86	20-40	12-17	17-77	50-70
K ⁺	5	2-15	4-14	1-4	3-14	9-10
SO ₄ ²⁻	8-70	10-36	13-34	3-9	9-45	26-62
Cl ⁻	3-8	5-62	6-23	4-8	3-60	16-42
HCO ₃ ⁻	70-139	80-272	93-200	23-89	118-261	180-238
NO ₃ ⁻ -NO ₃ ⁻	11-18	6-26	4-15	4-12	9-29	43

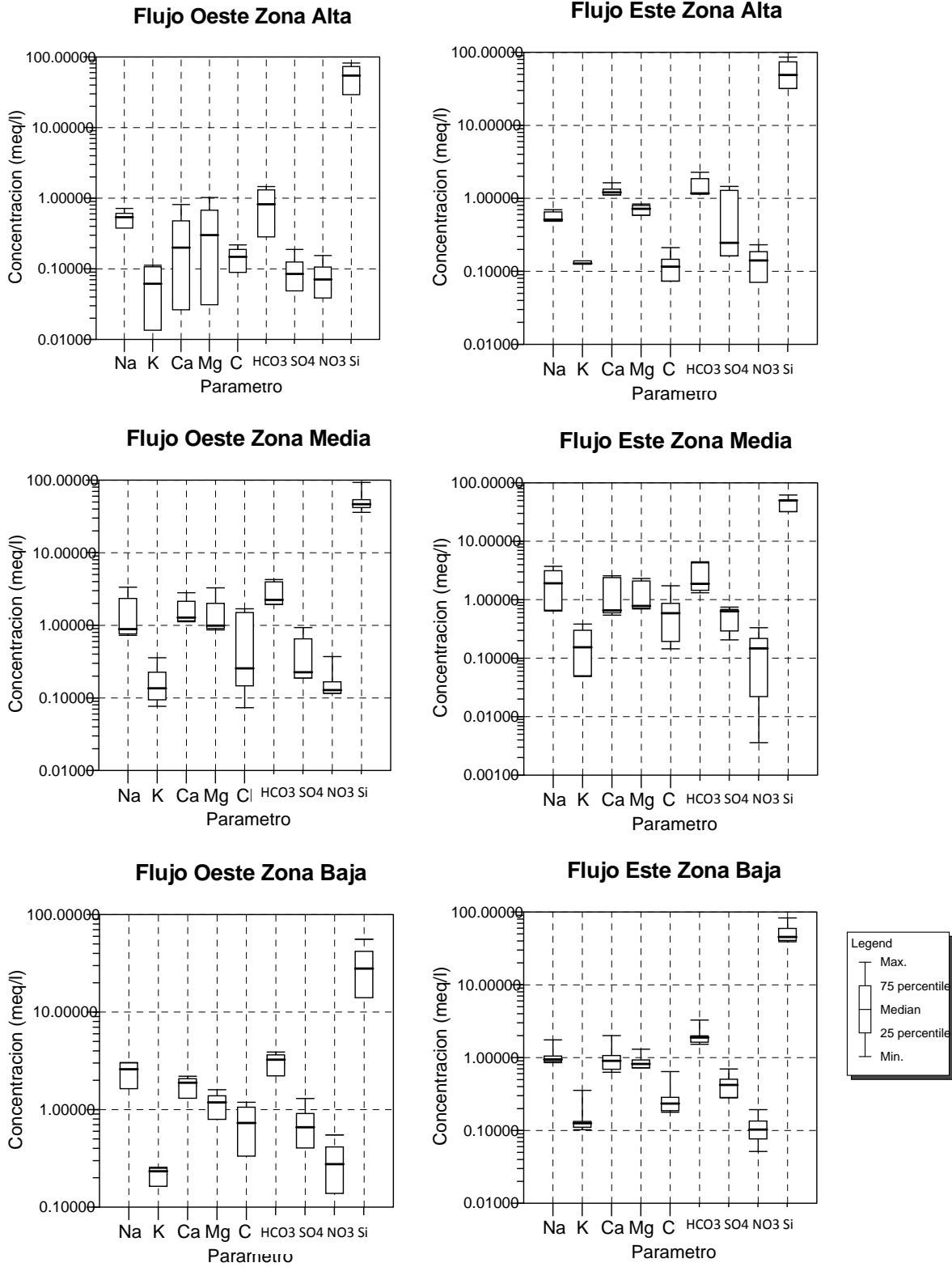


Figura 4.25 Variación de parámetros en diferentes zonas de la cuenca

Un grupo de aguas puede distinguirse entre los datos analizados, a este grupo corresponden los pozos ANTCUS-P-02, APO-P-01, APO-P-02, APO-MA-01, CUS-MA-07, MEJ-P-02, SANMAR-P-01, SANMAR-MA-01, SANMAR-MA-03, SANTATE-MA-01, SS-P-03 y SS-P-04, ubicados en las orillas de la ciudad y en las planicies inmediatas a las zonas de laderas donde todavía la influencia del urbanismo no se hace presente a gran escala. Las muestras de este grupo presentan concentraciones de cloruros por debajo de los 0.35 meq/L o 12.52 mg/L (Figura 4.26). El resto de las muestras, principalmente se encuentran ubicadas en la zona media de la microcuenca, y no pueden ser integradas a este grupo, el enriquecimiento del agua en la concentración de los iones SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} , puede estar asociado a fugas en el sistema de agua potable, mientras que el enriquecimiento del agua con los iones NO_3^- , Cl^- y Na^+ puede asociarse con fugas en el sistema de alcantarillado de aguas negras de la ciudad, ya que geográficamente, esta zona de enriquecimiento iónico se encuentra en el sector más antiguo, donde estos sistemas tienen alrededor de 50 años de antigüedad (Joya, Villalta, & Montiel, 2003). Una tendencia de proporcionalidad directa se observa entre el Cl^- y el Na^+ para las aguas enriquecidas iónicamente, así como con los nitratos.

La influencia de un aporte de aguas con mayor cantidad de iones disueltos es observada también en el gráfico de la conductividad eléctrica, donde se aprecia un grupo de aguas con valores de conductividad menores a los 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.26), cuya huella química es producto del recorrido del agua por el acuífero fracturado de roca basáltica y andesítica con intercalación de piroclastos. Otro grupo de aguas con valores que varían entre los 500 y los 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ posiblemente podrían estar asociados al aporte de fugas en el sistema de alcantarillado de aguas negras y en el sistema de agua potable ya que no presentan una tendencia definida ni uniforme en su comportamiento.

Dada la falta de tendencia de este grupo de muestras con valores más altos de conductividad puede decirse que aunque exista aporte por fugas en los sistemas de agua potable, estos no imprimen características químicas dominantes en estas aguas, la variabilidad en las concentraciones iónicas de las mismas puede obedecer al aporte de fugas del sistema de aguas negras, ya que este puede presentar grandes variaciones químicas en

tiempo y espacio corto, dependiendo del tipo de descarga de aguas residuales que se dé en ese momento.

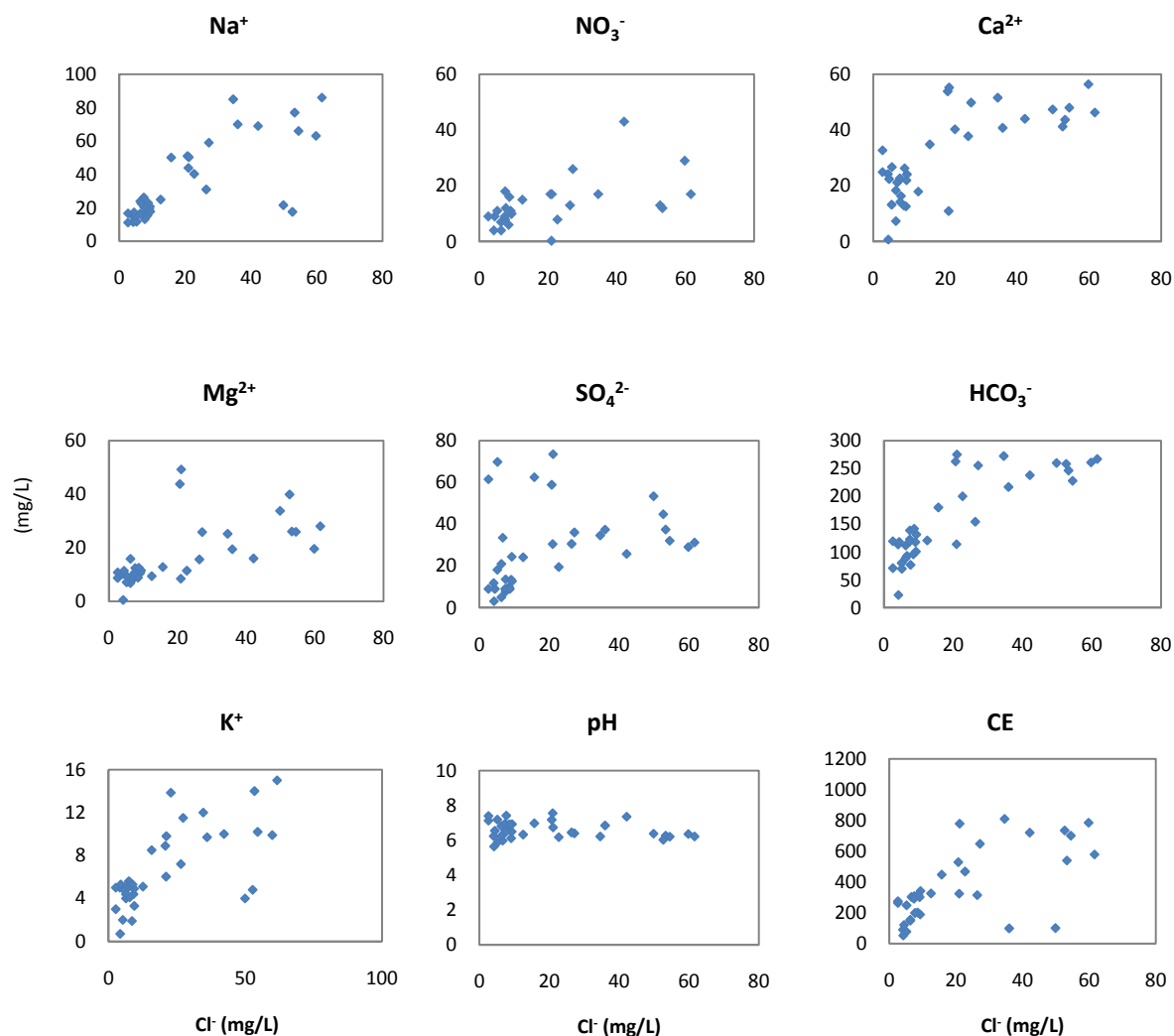


Figura 4.26 Diagramas de composición de los datos variando con cloruros

El aporte del sistema de alcantarillado de aguas negras puede ser observado en el mapa de isocontornos de nitrato, cloruros y sodio presentado en la Figura 4.27, donde las mayores concentraciones se aprecian en la zona media de la cuenca para los tres parámetros, se da el mayor enriquecimiento iónico de las muestras analizadas, y posiblemente el aporte de las fugas de este sistema sea mayor que en el resto de la microcuenca. Para los tres parámetros se aprecia también que los menores valores de las concentraciones se encuentran en la zona alta de la microcuenca debido a que el flujo inicia su recorrido hacia zonas acuíferas más

profundas y explotadas aguas abajo, y en este sector la interacción recarga-urbanismo todavía no se hace presente. En las zonas bajas de la microcuenca, en la falda nororiente del volcán de San Salvador, también se hace presente una reducción de las concentraciones que se asocia a un aporte mayor del flujo en este sector cuyo desarrollo urbanístico es menor en relación a la zona sur oriente del mismo y donde los municipios de Santa Tecla, Antiguo Cuscatlán, San Salvador y Mejicanos tienen zonas urbanas más desarrolladas.

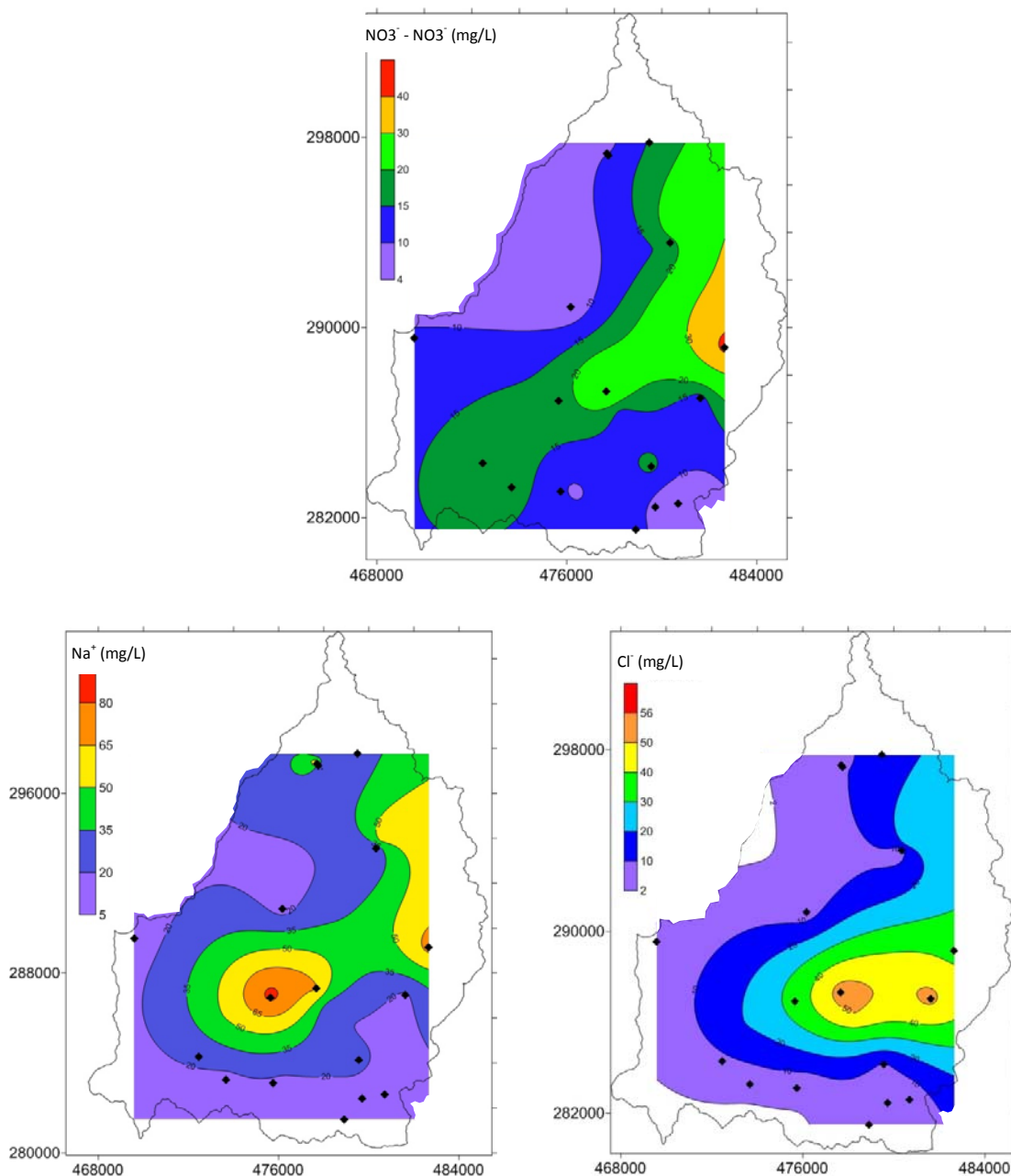


Figura 4.27 Mapas de isocontornos de nitratos, sodio y cloruros en la microcuenca

4.4.4 Isótopos ambientales

Para evaluar el origen de las aguas subterráneas se utilizaron los isótopos ambientales de Oxígeno 18 y Deuterio. En la zona de estudio, el gradiente isotópico en la precipitación se debe principalmente al efecto de la altitud, el cual también está relacionado inversamente con la temperatura.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) monitoreó los isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la precipitación de una estación montada en el Aeropuerto Internacional de Ilopango a 615 msnm, durante 16 años, la serie de datos comprende entre 1968 y 1984, con algunos meses sin registro en ese período. Adicionalmente se cuenta con datos de isótopos en la estación pluviométrica San Andrés a 460 msnm, para el período mayo 2006 - noviembre 2008. Estas dos estaciones se encuentran fuera de la microcuenca (Figura 4.28).

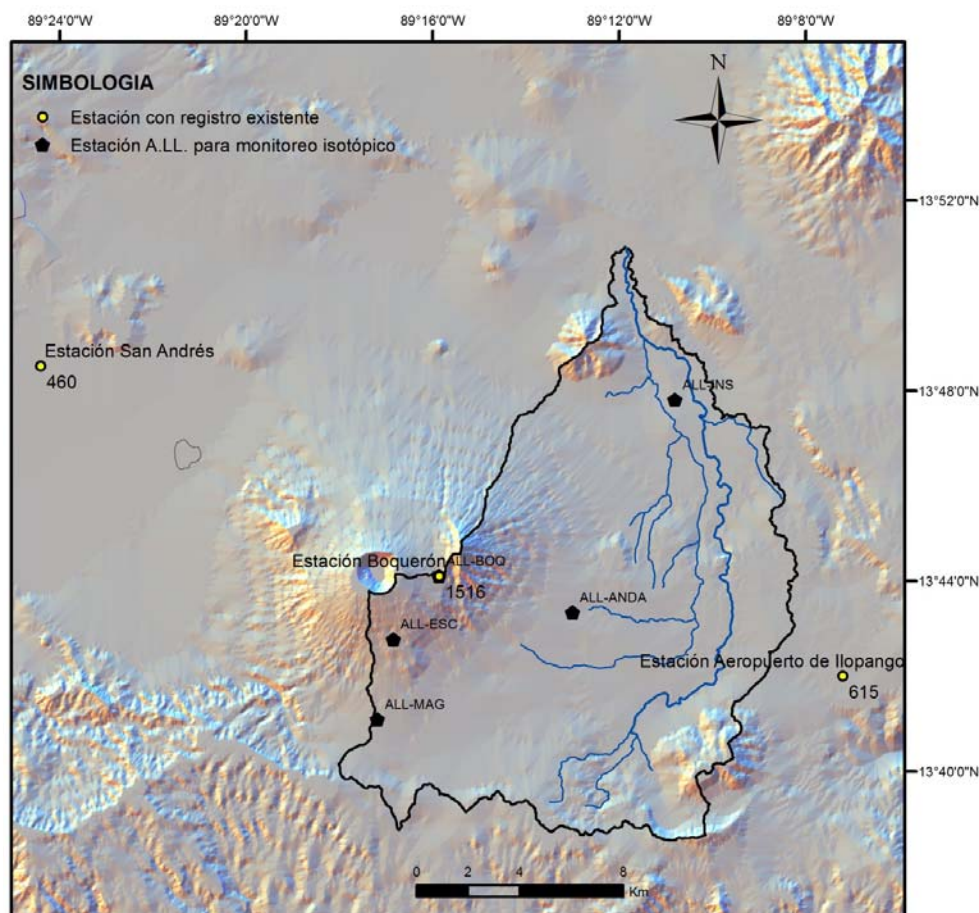


Figura 4.28 Mapa de estaciones con datos isotópicos y Red de Monitoreo Isotópica

Registros de la Estación Boquerón se tienen entre enero de 2006 y diciembre de 2008, esta estación se ubica dentro de la microcuenca, en la parte más alta, a 1516 msnm (Figura 4.28). Tanto la Estación San Andrés como la Estación El Boquerón son monitoreadas por la ANDA, la Estación del Aeropuerto de Ilopango se encuentra sin monitoreo en la actualidad.

Como parte del trabajo realizado, en conjunto con la ANDA, una red de monitoreo para muestreo de isótopos en aguas lluvias fue instalado en la microcuenca, este consistió en la construcción de cuatro estaciones adicionales a la estación El Boquerón (Figura 4.29), con estos puntos de recolección de muestras, el gradiente isotópico dentro de la microcuenca puede obtenerse con mayor exactitud. La ubicación geográfica de las estaciones es presentada en la Figura 4.28 y la Tabla 4.7 presenta los datos de coordenadas y elevaciones de cada estación.



Figura 4.29 Foto de estaciones con datos isotópicos y Red de Monitoreo Isotópica

Tabla 4.7 Red de monitoreo para muestreo de isótopos en aguas lluvias dentro de la microcuenca

Estación	Ubicación	X (m)	Y (m)	h (msnm)
ALL-BOQ	Estación meteorológica Boquerón SNET (existente)	471432.182	290468.677	1516
ALL-ESC	Centro Escolar Amigos del Volcán	469667.598	288011.377	1350
ALL-ANDA	ANDA, Ex - IVU	477747.923	288845.510	702
ALL-MAG	MAG, Santa Tecla	469049.174	284912.406	963
ALL-INS	Fábrica Insinca, Apopa	480471.281	297374.520	420

Para el presente estudio, el gradiente isotópico ha sido estimado a partir de los datos de registro de isótopos de la precipitación en las estaciones San Andrés, Aeropuerto de Ilopango y El Boquerón. El valor de los isótopos para cada estación corresponde al valor prorrateado con la precipitación del mes, la cual fue medida para las dos últimas Estaciones. La precipitación utilizada para obtener los valores prorrateados en la estación San Andrés fue la precipitación promedio mensual de dicha estación para 32 años de registro completados estadísticamente por parte de SNET. Para la estación Aeropuerto de Ilopango, se descartaron aquellos años cuyos registros carecían de datos para los meses más copiosos del año en la zona, ya que por ser los mayores volúmenes de lluvia, probablemente sean los que principalmente influyen la composición isotópica del agua subterránea.

La composición isotópica promedio de las tres estaciones de aguas lluvias fue relacionada con la altitud por medio de la siguiente función:

$$\delta^{18}\text{O} = -2.135 \ln(\text{altitud}) + 6.8746 \quad (4.1)$$

La función presenta una buena correlación con un valor de $R^2=0.9678$ (Figura 4.30), este resultado servirá más adelante como una herramienta para identificar la recarga de las aguas subterráneas en la microcuenca. El $\delta^{18}\text{O}$ en la lluvia de la zona podría variar entre -6‰ a -9‰ VSMOW

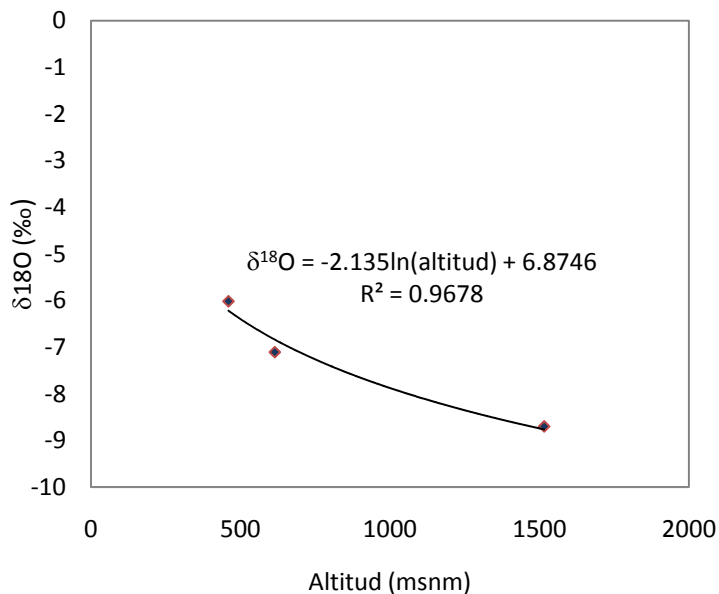


Figura 4.30 Gradiente isotópico por efecto de la altitud en la microcuenca

4.4.5 Composición isotópica de la precipitación

Los datos registrados de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la lluvia se distribuyen a lo largo de la Línea Meteorológica Global (GMWL, por sus siglas en inglés) según se muestra en la Figura 4.31, los datos registrados en la Red de Monitoreo montada en este estudio también se distribuyen a lo largo de la GMWL; sin embargo, no pueden deducirse tendencias ya que solamente representan un mes de muestreo para 3 estaciones y 2 meses para las otras dos (Ver Anexo 4).

La composición isotópica ponderada promedio de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la precipitación de la zona, según los registros varía entre -6.01‰ a -8.70‰ para el $\delta^{18}\text{O}$ y de -38.65‰ a -47.55‰ para el $\delta^2\text{H}$. La variación entre los valores extremos puede estar asociada principalmente a la influencia estacional y a variaciones en las temperaturas a lo largo del año.

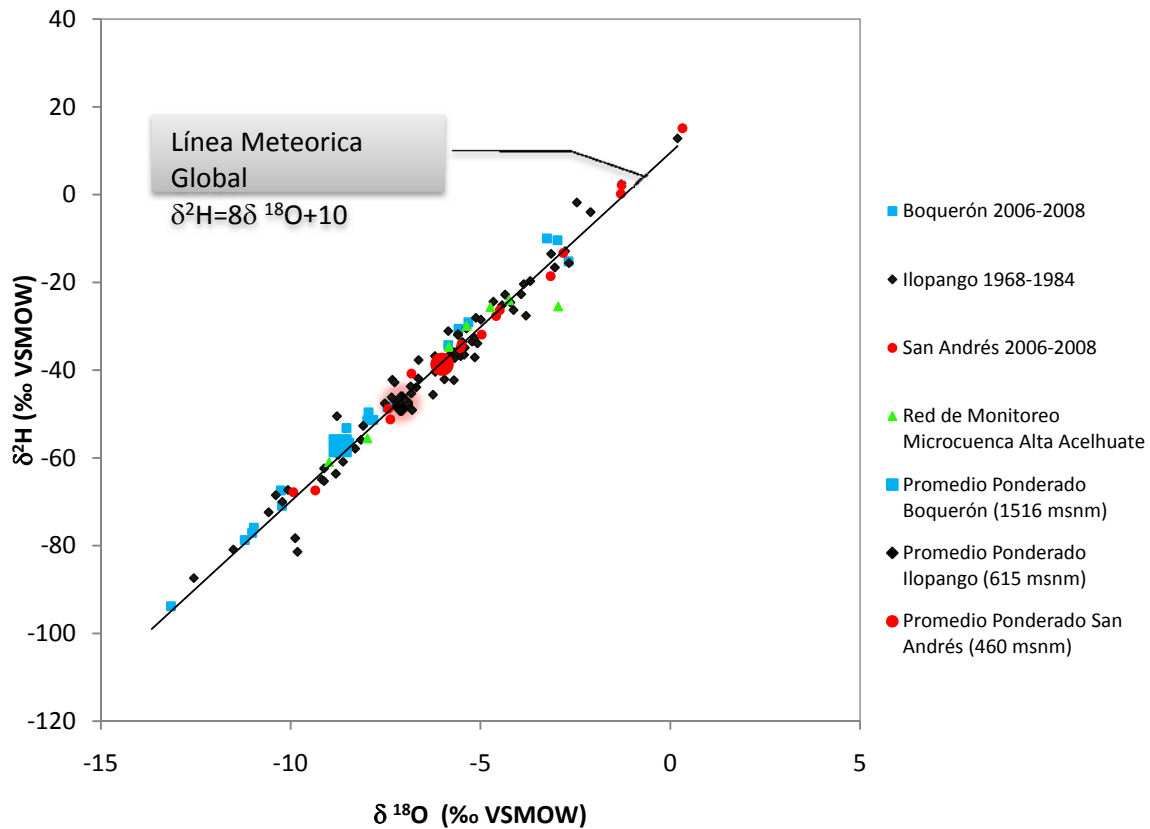


Figura 4.31 Composición isotópica de la precipitación y la GMWL

4.4.6 Composición isotópica del agua subterránea

Un total de 17 muestras de agua de pozos y manantiales fueron muestreadas para hacer un análisis de isotopos del agua subterránea dentro de la microcuenca. Además se analizaron dos muestras correspondientes a los sistemas de importación de agua potable, una del sistema Las Pavas, cuya toma del río Lempa se encuentra en el municipio de Talnique a 275 msnm y el sistema Zona Norte que comprende un conjunto de pozos y manantiales distribuidos en elevaciones que varían entre 400 y 450 msnm y cuya zona de recarga se estima que se encuentra en el costado poniente del volcán de San Salvador (Arévalo Herrera, 2005).

En general las aguas muestreadas presentan una composición isotópica que varía entre -5.43‰ a -7.45‰ para el $\delta^{18}\text{O}$ y de -39.22‰ a -49.95‰ para el $\delta^2\text{H}$ (Figura 4.32). Se observa una alineación paralela de las muestras en relación a la GMWL, indicando posiblemente el efecto de la evaporación en el proceso de infiltración del agua al acuífero.

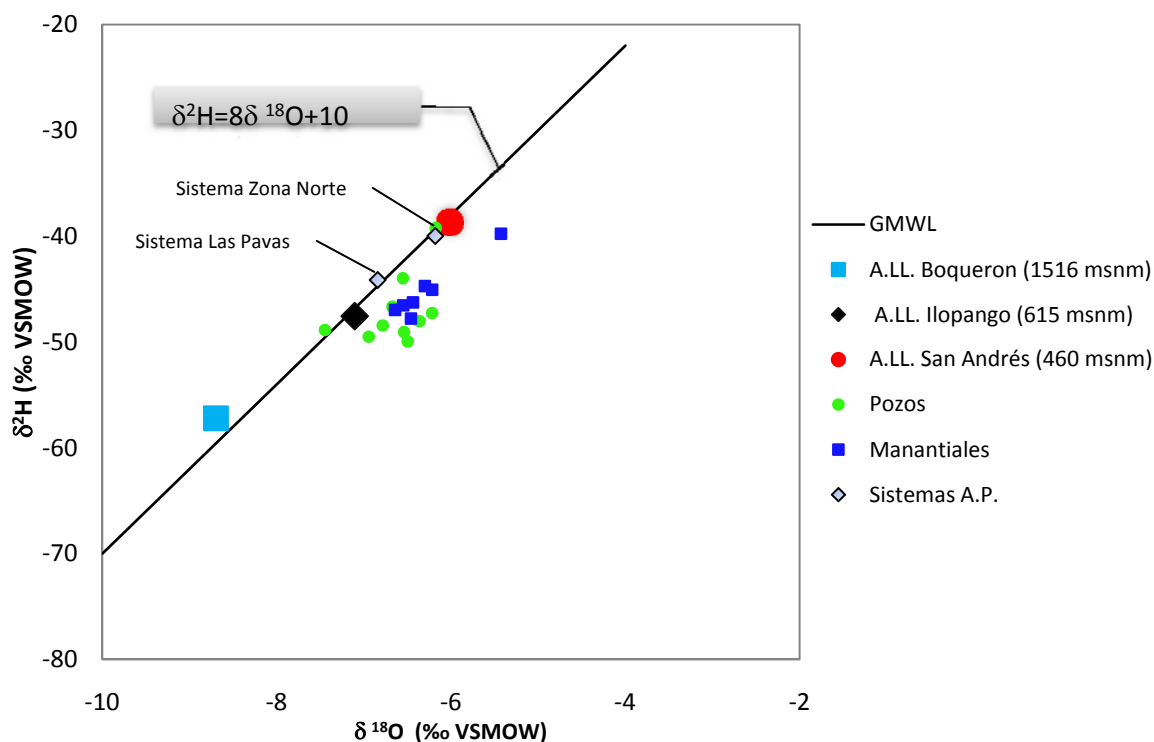


Figura 4.32 Composición isotópica del agua subterránea

El efecto del proceso de evaporación en el enriquecimiento isotópico de la recarga en las zonas altas de la microcuenca puede evidenciarse analizando las composiciones isotópicas de los tres manantiales ubicados en estas zonas: SANTATE-MA-01, a 1709 msnm en el volcán de San Salvador; SANMAR-MA-01, a 786 msnm en el cerro San Jacinto y SANMAR-MA-03, a 873 msnm en los Planes de Renderos (Figura 3.3). Si se agrega los valores de $\delta^{18}\text{O}$ vs altitud en la gráfica de la Figura 4.30, puede observarse un distanciamiento con la curva que describe el comportamiento de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ con la altitud para la microcuenca (Figura 4.33), mostrando una tendencia diferente a la del agua lluvia en esas zonas.

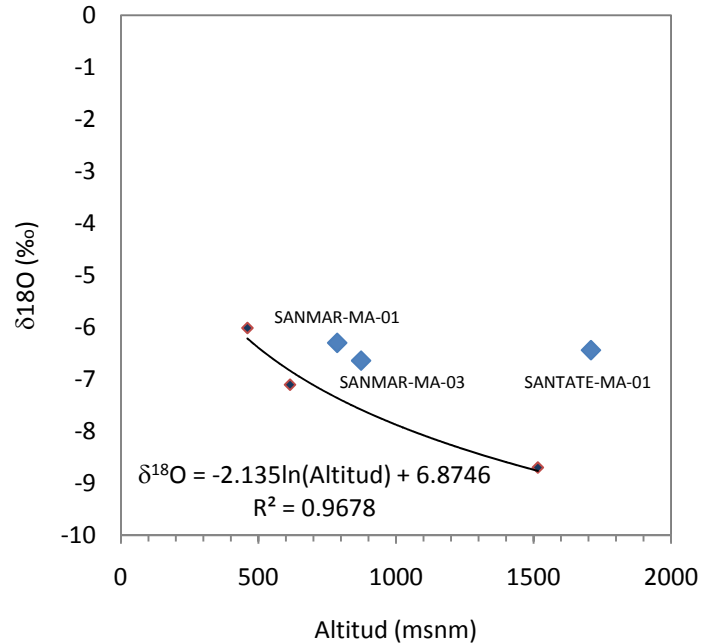


Figura 4.33 Efecto de la evaporación en manantiales de la zona alta de la microcuenca

Evaluando la ecuación para los valores de $\delta^{18}\text{O}$, se puede determinar el valor correspondiente de la altitud según el comportamiento de la precipitación en la zona (Tabla 4.8). Los resultados indican que para los dos manantiales de la zona de San Marcos, existe una reducción alrededor del 40% en el valor de la altitud que correspondería si no hubiese un enriquecimiento isotópico en las aguas de la recarga posiblemente producto de la evaporación; las aguas infiltradas en esta zona y aflorando en forma de manantiales proporcionan un valor de la altitud que varía entre 478 y 562 msnm ya afectadas posiblemente por los procesos de evaporación presentes en el sector.

Tabla 4.8 Valores de altitud en función de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ para manantiales de la zona alta

Fuente	CODIGO	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Altitud evaluada en la ecuación (msnm)	Altitud real (msnm)	Factor
Ojo de Agua	SANTATE-MA-01	-6.44	511	1709	30%
Aguachía	SANMAR-MA-03	-6.64	562	873	64%
La Pedrera	SANMAR-MA-01	-6.3	478	786	61%

Para el manantial del volcán de San Salvador, SANTATE-MA-01 los resultados indican que el enriquecimiento isotópico producto de los procesos de evaporación es mayor que en las otras zonas, probablemente esto sea vinculante a que este manantial es captado en un tanque de almacenamiento expuesto directamente al sol, aunque no abierto a la atmósfera y por lo tanto puede haber una evaporación mayor que en los otros manantiales en los cuales la muestra fue tomada en el afloramiento. Para este manantial, la muestra fue tomada en un grifo inmediato al tanque ya que no es posible tomarla directamente del afloramiento del agua. El proceso de almacenaje del agua aunque sea por un leve período puede afectar los resultados puntuales en un enriquecimiento isotópico mayor, tal y como ha sido calculado, ya que el valor de la altitud resultó de 511 msnm, el 30% del valor de la altitud real que es de 1709 msnm. La pérdida de isótopos ligeros en los tanques de almacenamiento de agua dependerá de las condiciones mismas de los depósitos, así, la cobertura vegetal, la hermeticidad del depósito, y la variación de la radiación solar podrán ser determinantes en composiciones isotópicas ligeramente enriquecidas.

Un promedio de $\delta^{18}\text{O} = -6.42\text{‰}$ resulta de la composición isotópica de los pozos y manantiales, exceptuando los tres manantiales de las zonas altas y el P-2 Col. Militar (SS-P-04), La Cancha P-1 (APO-P-02) y el manantial Chagüite 2 (CUS-MA-07) que corresponden a los tres puntos que se encuentran fuera del grupo en la Figura 4.32. El valor correspondiente de la altitud evaluada en la ecuación (4.1) en función de $\delta^{18}\text{O}$ es de 506 msnm, este valor se encuentra comprendido entre las composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales de las zonas altas que fueron calculadas en la Tabla 4.8, indicando que las aguas subterráneas de la zona adquieren una huella isotópica similar al de las aguas infiltradas en las zonas altas de la microcuenca y que por lo tanto las elevaciones de las zonas con mayor aporte a la recarga dentro de la microcuenca pueden iniciar alrededor de los 786 msnm, sin que ello descarte una recarga artificial por fugas en el sistema de agua potable y aguas negras, ya que un enriquecimiento isotópico de las aguas subterráneas puede ocurrir por mezcla con aguas procedentes de las zonas de recarga local.

La composición isotópica del sistema Zona Norte (Figura 4.32) resultó con un valor de -6.18‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de -39.98 para el $\delta^2\text{H}$, por lo que se encuentra ligeramente enriquecido con relación al valor promedio de las aguas subterráneas analizados en este estudio, con la

diferencia de que no se aprecia el efecto de la evaporación, ya que el punto se ubica sobre la línea meteórica, indicando que importantes volúmenes de recarga podrían darse a elevaciones inferiores que los de la microcuenca alta del río Acelhuate. Para el caso, en la zona conocida como “El Playón”, una investigación más profunda de la zona debe ser realizada para evaluar esta condición. La existencia de recarga del agua subterránea por fugas en el sistema de agua potable y de aguas negras provenientes del sistema Zona Norte no puede ser demostrado ni descartado utilizando los isótopos estables ya que las huellas isotópicas de ambas aguas son similares.

Adicionalmente, la composición isotópica del sistema Las Pavas, resultó dentro del rango de los valores promedio del grupo de muestras de agua subterránea en la microcuenca, pero ubicada sobre la línea meteórica, por lo que utilizando los isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ con los datos analizados no es posible demostrar ni descartar la existencia de recarga de agua subterránea en la microcuenca proveniente de las fugas en este sistema de importación de agua a la ciudad. Un monitoreo estacional de la composición isotópica de este sistema es requerido para evidenciar el comportamiento de la huella isotópica a lo largo del tiempo, ya que por ser una fuente de captación de agua superficial que corresponde a la cuenca más grande del país y que además es transfronteriza, la variación de la huella isotópica en el tiempo en el punto de captación podría ser más evidente que la del sistema Zona Norte.

4.4.7 Principales zonas de recarga acuífera en la microcuenca

De acuerdo a los resultados de las composiciones isotópicas del agua subterránea y al análisis realizado en el apartado 4.4.6 se propone en la Figura 4.34, el mapa donde se delimitan las principales zonas de recarga del agua subterránea en la microcuenca.

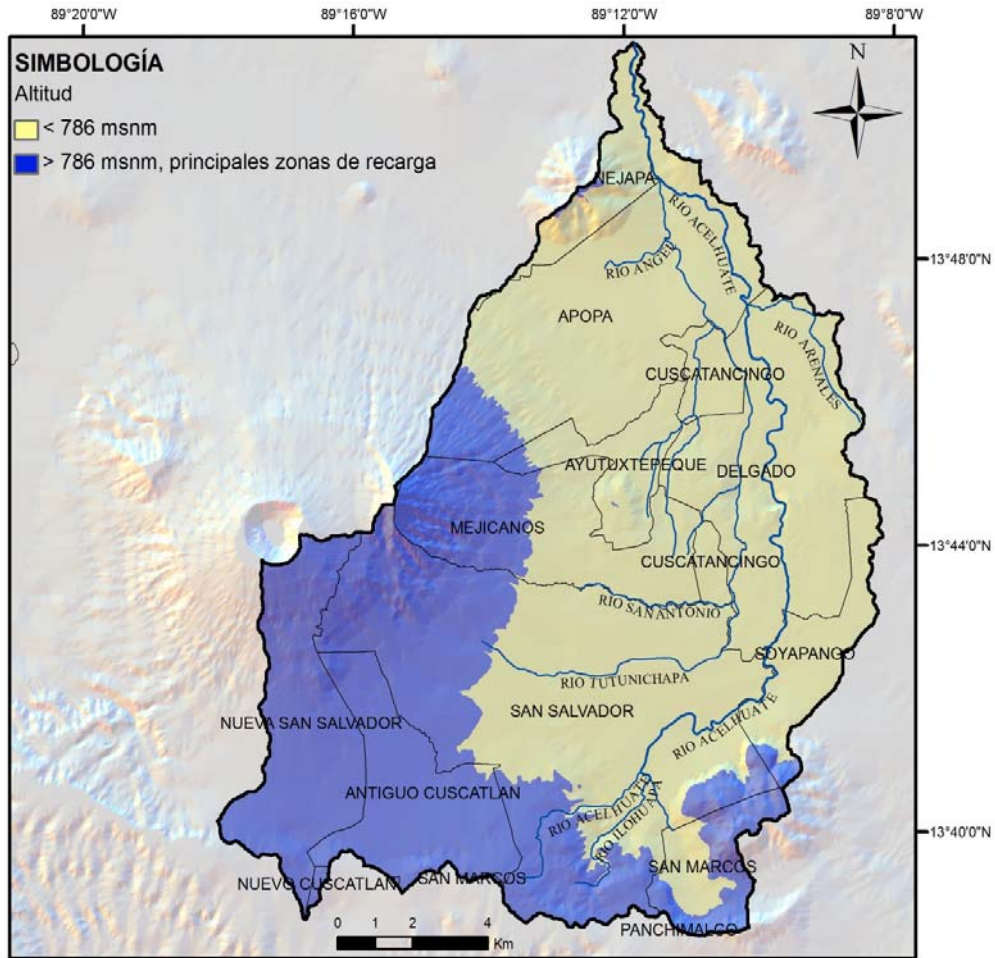


Figura 4.34 Mapa de la delimitación de zonas de recarga de acuerdo a composición isotópica del agua subterránea en la microcuenca

Según la Figura 4.34 las principales zonas de recarga se ubican en el volcán de San Salvador, la cordillera del Bálsamo y el cerro San Jacinto, dentro de los municipios de Santa Tecla (Nueva San Salvador), Antigua Cuscatlán, San Salvador, Mejicanos, Ayutuxtepeque, Apopa, San Marcos y Soyapango. Oficialmente se utiliza el Mapa de Recarga Acuífera de El Salvador (SNET, 2005b), basado en el método RAS, que considera las condiciones físicas de la zona de estudio para la estimación de la recarga. Valores de recargas entre 251 mm/año y 350 mm/año predominan en las faldas del volcán de San Salvador, cordillera del Bálsamo y cerro San Jacinto (Figura 4.35), coincidiendo con las zonas determinadas utilizando las técnicas isotópicas (Figura 4.34).

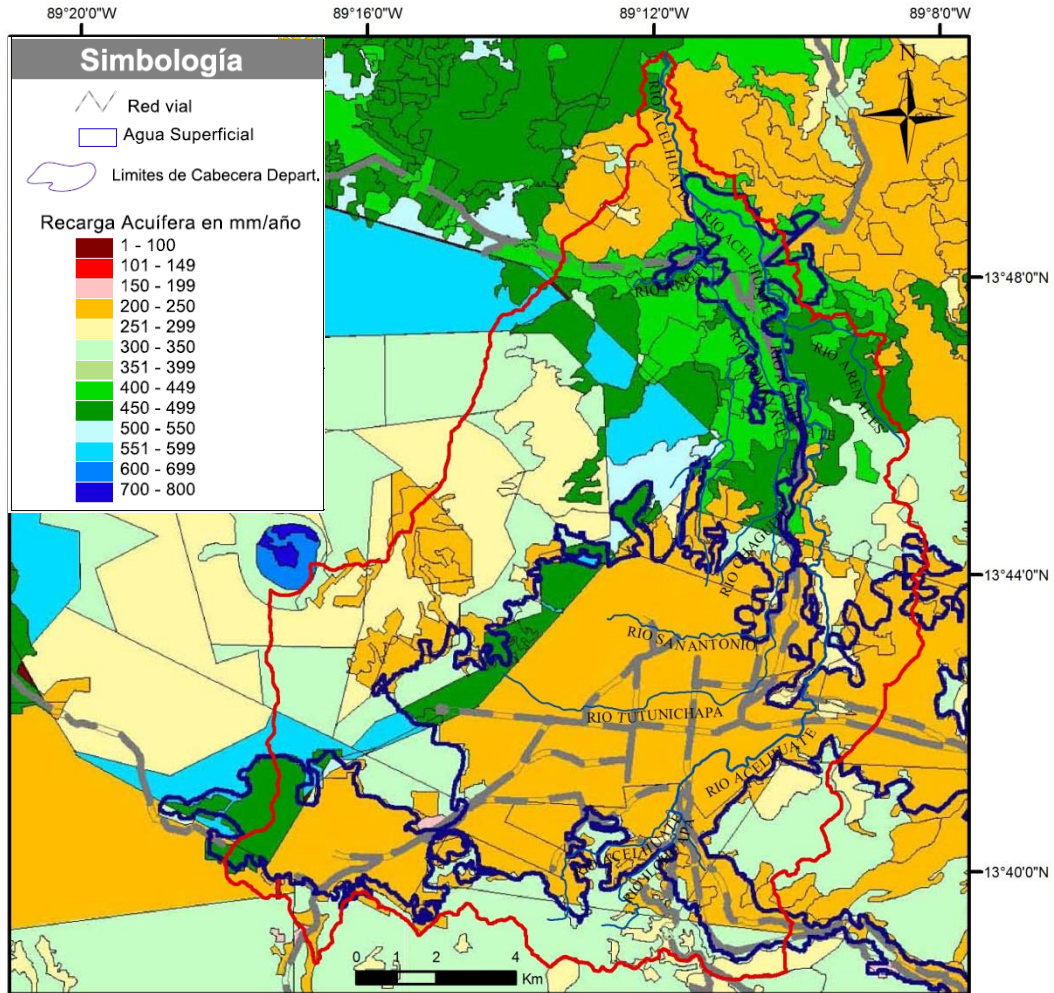


Figura 4.35 Mapa de recarga acuífera de la microcuenca
Fuente: (SNET, 2005b)

Considerando los resultados de ambos mapas (Figura 4.34 y Figura 4.35) puede sugerirse para garantizar la sostenibilidad de los acuíferos, que los planes de ordenamiento territorial consideren como zonas de recarga acuífera a aquellos sectores cuyas elevaciones superen los 786 msnm o cuyas recargas superen los 251 mm/año. El uso de sistemas de drenaje sostenible en zonas urbanas puede ser implementado en construcciones nuevas o ampliaciones como una medida a corto plazo.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

Partiendo de los datos geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos analizados en la presente investigación puede llegarse a las siguientes conclusiones:

El modelo geológico elaborado para la zona de estudio permitió inferir algunas fallas no visibles en el mapa geológico nacional, como lo son una falla posiblemente alineada con el río Tutunichapa, entre los pozos SS-P-19 y SS-P-20, otra entre los pozos APO-P-13 y APO-P-10 y una última entre los pozos APO-P-09 y CIUDEL-P-06, posiblemente alineada con el cauce del río Mariona, así como la comprobación de la presencia de fallas que aparecen como supuestas en el mapa geológico, mediante la evidencia de la diferencia de niveles entre bloques. También se evidenció con este modelo, la extensión de algunas fallas existentes, principalmente en el sector de Apopa.

La compleja geología existente en la microcuenca, la continuidad de los niveles potenciométricos y de la similitud entre las características químicas de las aguas en los acuíferos permite diferenciar dos sistemas acuíferos interconectados entre sí, el acuífero fracturado de lavas andesíticas o basálticas con intercalaciones de piroclastos y el acuífero poroso de piroclastos, sedimentos y tobas. Los límites del acuífero fracturado se extienden más allá de los límites geológicos superficiales definidos en el mapa geológico nacional.

Tanto el acuífero fracturado como el acuífero poroso son heterogéneos y anisótropos y se encuentran fuertemente dominados por el sistema geológico estructural que predomina en el sector sureste de la microcuenca. Las transmisividades presentaron valores entre 1000 m²/día y 2000 m²/día en el centro y norte del valle de San Salvador; entre 100 m²/día y 4000 m²/día en Antiguo Cuscatlán; entre 300 m²/día y 1000 m²/día en

San Marcos; valores menores a 200 m²/día en Soyapango y Apopa y en Mariona el valor fue de 15 m²/día.

Dos sistemas de flujo posiblemente dominados por una falla inferida mediante el modelo geológico, que está alineada con el sistema de fallas NNO-SSE fueron identificados mediante el análisis de la tendencia de los niveles potenciométricos recopilados y los datos físico-químicos medidos en campo. El Sistema de Flujo Oeste que comprende la mayor parte del acuífero fracturado y cuya circulación se orienta inicialmente de forma radial desde el volcán de San Salvador, con un aporte importante de un pequeño sistema de flujo proveniente del límite oeste de la microcuenca, en la cordillera del Bálsamo, unidas estas dos corrientes, continúan su recorrido hacia aguas abajo con una dirección sur – norte siguiendo la tendencia topográfica de la zona hacia la planicie de Apopa. El Sistema de Flujo Este que inicia su recorrido en el sector sureste de la microcuenca y que luego toma una dirección suroeste-noreste, fluye desde el cerro San Jacinto y la zona de los Planes de Renderos hacia el sector de Soyapango, trascendiendo los límites hidrológicos de la microcuenca en el sector oriente. El Sistema de Flujo Este presentó un gradiente hidráulico de 0.010 m/m en la zona del valle de San Salvador y Soyapango; en el Sistema de Flujo Este los valores del gradiente variaron de 0.09 m/m en las faldas del volcán de San Salvador y se redujeron a 0.04 m/m en la parte baja de la microcuenca, en el municipio de Apopa.

Las principales zonas de descarga natural en ambos sistemas de flujo fueron localizadas en zonas de fallas y de contactos geológicos en las márgenes de los principales ríos de la ciudad. El Sistema de Flujo Este posee importantes zonas de descarga en forma de manantiales que son explotados para el abastecimiento de agua de la ciudad, como lo son Caites del Diablo, La Danta, Lamatepec y La Chacra; los ríos que reciben otras descargas importantes son Acelhuate, Urbina y San Antonio en el municipio de Cuscatancingo. El Sistema de Flujo Oeste tiene sus principales zonas de descarga natural en los nacimientos localizados en las laderas de los ríos Chagüite y Mariona, así como en el

río El Angel, en el cual se utilizan algunos manantiales como fuentes de abastecimiento locales.

De acuerdo a los resultados del diagrama de Piper, aguas del tipo bicarbonatadas – sódicas – cálcicas ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$) y bicarbonatadas – cálcicas – sódicas ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$) predominan en la zona media y baja de la microcuenca, principalmente en las aguas que circulan o ya han pasado bajo la zona urbanizada de la ciudad; los tipos bicarbonatadas – cálcicas – magnésicas ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$) y bicarbonatadas – magnésicas – cálcicas ($\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$) predominan al pie de las faldas del volcán de San Salvador y del cerro San Jacinto, en las partes altas de la microcuenca. La proporción en las concentraciones de Mg^{2+} , Na^+ y Ca^{2+} en estas aguas varía entre el 20% y el 50% , dependiendo del día de muestreo.

De acuerdo a los datos químicos analizados, un enriquecimiento iónico del agua subterránea ocurre en la zona media alta de la microcuenca, bajo el sector más antiguo de la ciudad de San Salvador, donde las tuberías de agua potable, aguas negras y aguas lluvias tienen más de 50 años de antigüedad. Debido a que las aguas del sistema de importación de agua potable “Zona Norte” resultaron del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$ y en el sistema “Las Pavas” resultaron del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$ y $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$, para el período analizado, no se tienen evidencias de que las fugas en el sistema de agua potable impriman características químicas en las aguas del acuífero; sin embargo, debido a que las mayores concentraciones de NO_3^- , Cl^- y Na^+ se ubican en esta zona de enriquecimiento iónico, puede inferirse que un posible aporte de fugas en el sistema de aguas negras o una recarga por el ingreso de flujo a través de las fallas alineadas con quebradas que conducen las descargas de aguas residuales de todo tipo generadas en la ciudad, en su mayoría sin tratamiento, esté imprimiendo un cambio en el tipo de aguas indicando al Na^+ como catión dominante en el flujo bajo la ciudad y después de su paso por ella. Las muestras ubicadas en las orillas del desarrollo urbanístico, aguas arriba del AMSS, no evidencian influencia del incremento en las concentraciones de NO_3^- , Cl^- y Na^+ .

Partiendo del análisis de la variación de niveles potenciométricos en 5 pozos de monitoreo puede decirse que el pozo Altamira 2 que se encuentra en el acuífero fracturado y está ubicado sobre fallas geológicas, presenta un efecto estacional de la variación de niveles piezométricos posiblemente asociado a cortos tiempos de tránsito por el paso preferencial del flujo a través de dichas estructuras y que podrían variar directamente proporcional a la precipitación del período lluvioso previo; el pozo Estadio 2 que presentó tendencia a la alza de los niveles potenciométricos, está comprendido dentro de la zona gobernada por el Sistema de Flujo Oeste, pudiendo asociarse con la conservación de las zonas altas del volcán de San Salvador que aportan la mayor parte de la recarga al sistema y/o con la recarga antropogénica producto de las fugas en los sistemas de agua potable y aguas negras de la ciudad; sin embargo, las condiciones del Sistema de Flujo Este son diferentes y aunque no se obtuvo una tendencia definida para los pozos analizados en esta zona debido a que el tiempo de registro fue menor de un año; entre junio de 2007 y diciembre de 2009 el nivel piezométrico en el pozo Venecia descendió 4.79 m, previniendo que en el sector donde se encuentra el pozo, al oeste de la microcuenca, específicamente en el municipio de Soyapango, el efecto del urbanismo y una posible sobreexplotación de los recursos subterráneos aguas arriba podría estar produciendo un descenso importante en los niveles de agua del acuífero que llevaría a dejar sin funcionamiento varios pozos y por consiguiente sin abastecimiento a los usuarios de los mismos.

El aporte a la recarga acuífera producto de fugas en los sistemas de agua potable y alcantarillado de aguas negras puede impactar en la calidad y la cantidad del agua subterránea de la zona. Desde el punto de vista de la cantidad el impacto puede darse porque no se logra percibir que existe un posible desbalance hidrológico en la cuenca y por lo tanto no se cuantifica el impacto del desarrollo urbano en la disponibilidad de agua dentro de la zona porque los niveles de los pozos de producción se mantienen e incluso en algunos casos su tendencia es a la alza. Esta tendencia al ascenso de niveles en algunos pozos puede relacionarse directamente con los datos de fugas en el sistema de agua potable y aguas negras, generando un efecto de “sostenibilidad irreal” en el acuífero, para lo cual se

debe invertir grandes cantidades de dinero en la importación de aguas que prácticamente fungen como recarga artificial de alto costo.

En cuanto a la calidad del agua, el impacto puede ser debido a la carga contaminante que puede aportarse con la recarga a través de fallas alineadas con ríos y quebradas que conducen las aguas residuales, en su mayoría sin tratamiento, producida en la ciudad; las tuberías de aguas negras que transportan los vertidos de las aguas residuales desde su punto de origen hasta los ríos y quebradas y las tuberías de aguas lluvias, que transportan los contaminantes arrastrados desde las calles y diversos espacios tales como derrames de hidrocarburos, lixiviados de botaderos de basura, y otros. Las mayores concentraciones de nitratos, cloruros y sodio dentro de la microcuenca se registraron en las zonas donde el incremento de las concentraciones iónicas fue evidenciado. En estos lugares los NO_3^- llegaron a concentraciones hasta de 43 mg/L, los Cl^- hasta de 61 mg/L, y el Na^+ hasta de 86 mg/L; por lo que puede decirse que en la zona más antigua del AMSS es dónde se evidencia el mayor aporte de contaminación por aporte del sistema de conducción de aguas negras, ya que estos parámetros son indicativos del aporte de dichas aguas, siendo que posteriormente la tendencia en las concentraciones se reduce posiblemente por dilución producto del aporte de la recarga en las zonas del volcán de San Salvador.

El análisis isotópico del agua lluvia, el agua subterránea y el agua de los sistemas de importación, junto con el comportamiento químico de dichas aguas, permite evidenciar que las principales zonas de recarga dentro de la microcuenca se encuentran aproximadamente a partir de los 786 msnm, pero no se descarta que un enriquecimiento isotópico de estas aguas esté ocurriendo producto de la mezcla con las aguas de los sistemas de importación de “Las Pavas” y “Zona Norte” ya que estos sistemas presentan composiciones isotópicas similares a las aguas subterráneas analizadas dentro de la microcuenca.

5.2 Recomendaciones y Trabajo Futuro

Realizar un levantamiento geológico de mayor detalle en la subcuenca del río Acelhuate, aumentando la escala de 1:100,000 a 1:50,000 o menor, para tal proyecto se requiere como uno de los elementos a considerar, que los informes de perforación de pozos sean realizados por personal con formación en el área y de ser posible entregar parte de los recortes de perforación al departamento de pozos de la ANDA para verificar los resultados presentados por los usuarios del acuífero.

Reforzar y aumentar la escala del modelo litológico obtenido en esta investigación apoyándose en la nueva información geológica generada con los informes de perforación de pozos, estudios geofísicos y otra información de que se disponga en las instituciones competentes. La compilación de esta información junto con nuevos datos hidrogeológicos recopilados permitirá trazar con mayor exactitud el límite entre el acuífero fracturado y el acuífero poroso existente en la microcuenca.

Durante la ejecución de las operaciones de mantenimiento de los pozos de la ANDA, realizar pruebas de bombeo en pozos seleccionados dentro de la microcuenca para obtener a partir de dicha información los parámetros hidrogeológicos que permitan zonificar mejor los sistemas acuíferos existentes, de igual manera exigir como requisito a los propietarios de nuevos pozos la realización de dichas pruebas y los cálculos correspondientes por métodos hidrogeológicamente aceptados.

Implementar un proyecto de instalación de tubo de registro de niveles en los pozos de explotación en el acuífero y exigirlo para los nuevos pozos a perforar, en carácter obligatorio. La funcionalidad de este elemento para control de niveles debe ser verificada previa a la recepción de los trabajos. Con este accesorio instalado en los pozos se podrá

tener un mejor registro de la variación de niveles estáticos y dinámicos en las aguas subterráneas de la zona y analizar con mayor exactitud la tendencia del comportamiento del acuífero y en consecuencia la toma de medidas oportunas para corregir y/o controlar los problemas que pudiesen presentarse en un futuro.

Tomar en consideración para los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios que comprenden las zonas de recarga natural dentro de la microcuenca, en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico, la existencia de dos sistemas de flujo con características hidrogeoquímicas e isotópicas similares pero cuyas zonas de recarga natural son independientes, debe conducir a generar acuerdos o convenios intermunicipales para la protección de dichas zonas, considerando alternativas de protección y conservación como pago por servicios ambientales, sistemas de drenaje sostenible y otros. Especial atención requiere el Sistema de Flujo Oeste que aporta agua subterránea a los municipios de San Marcos, parte de San Salvador, parte de Ciudad Delgado y Soyapango.

Las acciones a tomar en la reducción de los porcentajes de fugas en el sistema de agua potable deben considerar el efecto que causará en el balance de agua en la microcuenca, ya que esta condición podría generar un descenso significativo en los niveles potenciométricos de los pozos, principalmente en las zonas más antiguas de la ciudad donde se evidenció un aporte de los sistemas, generando un problema de desabastecimiento en los usuarios de los sistemas locales y un incremento en los costos de producción para la ANDA ya que se requeriría un aumento en los caudales de importación hacia la ciudad. Medidas a corto plazo que promuevan el drenaje sostenible podrían contrarrestar este efecto.

La reactivación y ampliación del sistema de monitoreo instalado con el Programa FORGAES debe ser tomada como una medida a corto plazo por parte de las autoridades competentes, ya que estos pozos son una herramienta que permite registrar el

comportamiento de los sistemas acuíferos en el tiempo además de ser puntos idóneos para la toma de muestras en estudios hidrogeológicos futuros. Pozos de monitoreo son requeridos en la falda nororiente del volcán de San Salvador, en el sector sur de la microcuenca, en la zona baja de la misma, puede considerarse el municipio de Apopa.

Una investigación para evaluar los efectos de la contaminación en los acuíferos por los sistemas de conducción de aguas residuales es requerida. Este trabajo requerirá un monitoreo más amplio dentro de la microcuenca, este debe abarcar los aforos diferenciales, los iones mayoritarios y los datos de campo, las sustancias químicas orgánicas e inorgánicas que podrían provenir del aporte a la recarga por del sistema de conducción de aguas residuales de la ciudad a fin de establecer el impacto que estas podrían estar causando en el acuífero y de esta forma puedan sustentarse las medidas requeridas al respecto. Esta investigación también podría establecer la interacción existente entre el acuífero y los ríos y quebradas que conducen las aguas de alcantarillado descargadas en ellos con destino al río Lempa y luego al mar. La zonificación de las áreas mayormente impactadas permitirán la implementación de planes de acción de forma que se prioricen las zonas a ser intervenidas para evitar estos impactos.

Los puntos de muestreo para caracterizar la hidrogeoquímica del agua de los acuíferos deben seguirse monitoreando y ampliarse la cantidad de puntos para obtener una mayor densidad de datos en la microcuenca, esto permitirá evaluar el comportamiento de las aguas en un período más largo y ampliar la caracterización propuesta en este estudio.

El monitoreo isotópico de aguas lluvias en la red de monitoreo instalada como parte de esta investigación en coordinación con la ANDA debe ser continuado y la búsqueda del financiamiento para el análisis de dichas muestras es requerido de forma tal que se tengan datos disponibles para trabajos futuros relacionados con esta área de la hidrogeoquímica. La disponibilidad de los datos a los investigadores en las áreas relacionadas es necesaria

para mejor entendimiento del funcionamiento de los procesos del ciclo hidrológico que ocurren dentro de la microcuenca.

Se requiere de un monitoreo de isótopos ambientales de forma mensual en el sistema Las Pavas, para poder establecer el comportamiento estacional del sistema, ya que la toma de esta agua corresponde a las aguas superficiales del río Lempa y por lo tanto su composición será variable dependiendo de las condiciones de los aportes al flujo que tenga la cuenca aguas arriba del punto de toma, así como de los volúmenes de evaporación que ocurran en diferentes épocas del año. Muestras mensuales en el punto de toma (río Lempa) y en un punto de la red de distribución local proveniente del sistema son requeridos para evaluar el comportamiento de la composición isotópico durante el traslado del agua entre cuencas. Cualquier otro sistema de trasvase de aguas superficiales a la microcuenca debe ser monitoreado de forma similar.

El monitoreo isotópico de las aguas subterráneas debe continuarse y ampliarse a más pozos distribuidos en la microcuenca, de tal forma que se permita seguir estudiando el comportamiento del acuífero e identificando así las zonas de recarga en el mismo.

REFERENCIAS

- Amaya Heske, E. S., & Jiménez García, R. E. (2007). *Determinación de la interconexión hidráulica entre el acuífero Metropolitano y el acuífero de Nejapa*. San Salvador.
- ANDA. (2008a). Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador. El Salvador.
- ANDA. (2008b). *Memoria de Labores 2008*. San Salvador.
- ANDA. (1989). *Normas Técnicas para el Diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado de aguas negras*. San Salvador.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution 2nd edition*. Amsterdam, the Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- Arévalo Herrera, D. (2005). *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero Opico-Quezaltepeque, a través de datos geofísicos, pozos y análisis hidrogeoquímicos*. Costa Rica: Tesis Universidad de Costa Rica.
- Arévalo Romero, D., & Vásquez Naranjo, B. (2005). *ACTUALIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DEL ACUÍFERO METROPOLITANO*. UCA, San Salvador, San Salvador.
- Barry, D. (1994). El Acuífero de San Salvador. *Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente, PRISMA No. 7 Julio-Septiembre*, 1-6.
- Campos, J. H. (1965). *Estudio hidrogeológico comparativo de las cuencas de los ríos Sucio y Acelhuate y su influencia en la investigación del agua subterránea*.
- CEL. (1984). *Léxico Estratigráfico de El Salvador*. El Salvador.
- COMFISA, DE C.V. (1993). *Reporte Final Pozo No. 2 "Urbanización Madreselva", Santa Elena, Antiguo Cuscatlán*. San Salvador.
- Coto Salamanca, M. (Et. al, 1994). *Evaluación de la explotación y disponibilidad de agua subterránea y análisis de pruebas de bombeo en el acuífero del AMSS*. Tesis UCA, San Salvador.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrogeología Subterránea (Vol. I)*. Barcelona, España: Omega S.A.
- desconocido. (1972). *Cuencas de los ríos Acelhuate y Sucio*.
- Díaz, S. I. (2003). *Impact of urban recharge on long - term management of Santiago Norte Aquifer, Santiago - Chile*. Waterloo, Ontario, Canada.

- Dirección General de Estadística y Censos, Ministerio de Economía. (2008). *VI Censo de Población y V de Vivienda 2007*. San Salvador.
- Drillmasters, S. d. (2001). *Rehabilitación de 85 pozos de la red Nacional de ANDA. Informe Final Pozo El Espino III, Santa Tecla, La Libertad*. San Salvador.
- Drillmasters, S.A. de C.V. (2001). *Rehabilitación de 85 pozos de la Red Nacional de ANDA Contrato No. 69/2000, Informe Final Pozo No. 2 El Milagro, San Marcos, S.S.* San Salvador.
- EYCO S.A. de C.V. (1991). *Programa Inicial para evaluar la Factibilidad de Recarga Artificial mediante Pozos de Infiltración en el Area Metropolitana de San Salvador, Informe Inicial. Ministerio de Obras Públicas Contrato No. 26/90*. San Salvador.
- Fetter, C. (1980). *Applied Hydrogeology* (Fourth Edition ed.). Estados Unidos de América: Prentice Hall.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. United States of America: Prentice Hall, Inc.
- Gerlingen, D. Weimer. (2001). *Water Loss Management and Techniques*. Alemania: German National Report.
- Gil, L. (2006). *Estudio Recarga OPAMSS*. San Salvador.
- Hernández, W. (2005). *Nacimiento y Desarrollo del Río Lempa*. SNET, San Salvador.
- Hoefs, J. (2009). *Stable Isotope Geochemistry* (Sixth ed.). Berlin: Springer.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones*. Madrid: W.G. Mook.
- Joya, E., Villalta, F., & Montiel, G. (2003). *Diseño de la red de alcantarillado sanitario y propuesta para el tratamiento de las aguas residuales de la zona urbana de la ciudad de el Puerto el Triunfo, Usulután*. San Miguel: Universidad de Oriente.
- Kendall, C., & Caldwell, E. A. (1988). *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. (E. S. B.V., Ed.) Obtenido de <http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/isopubs/itchch2.html#2.1>
- La Prensa Gráfica. (28 de octubre de 2009a). *\$65 millones pierde ANDA por las fugas subterráneas*. Recuperado el 23 de junio de 2010, de [laprensagrafica.com](http://www.laprensagrafica.com): <http://www.laprensagrafica.com/el-salvador/social/69082--65-millones-pierde-anda-por-las-fugas-subterraneeas-.html>

La Prensa Gráfica. (3 de octubre de 2009b). *Megahoyos hunden San Salvador*. Recuperado el 25 de junio de 2010, de laprensagrafica.com: <http://www.laprensagrafica.com/el-salvador/social/63523-megahoyoshunden-san-salvador.html>

MARN. (2009). *Informe de la calidad de los ríos de El Salvador año 2009*. San Salvador: Servicio Hidrológico Nacional.

Mazor, E. (2004). *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology* (Third Edition ed.). United States of America: Marcel Dekker, Inc.

OIEA. (2009). *Estudios de Hidrología Isotópica en America Latina 2006*. Viena: OIEA.

PNUD. (1972). *Estudio sobre aguas subterráneas en la zona metropolitana de San Salvador*. San Salvador.

Pozos y Riego, S.A. de C.V. (1991). *Informe de Pozo Terminado, Urbanización La Cima 2a Etapa. Finca San Nicolás, Calle a Huizucar*. San Salvador.

Rivera-Harrouch, S.A. de C.V. (1994). *Informe referente a los resultados obtenidos en las pruebas de aforo efectuadas en el pozo de agua potable para la ampliación del "Centro Comercial Metrocentro"*. San Salvador.

Rivera-Harrouch, S.A. de C.V. (1994). *Informe referente a los resultados obtenidos en las pruebas de aforo, efectuadas en el pozo de agua potable, en la finca San Patricio paa la "Urbanización La Cima III", ubicada en esta ciudad*. San Salvador.

Ruppe, L. M., & Ginn, T. R. (2008). Groundwater: Quality. En S. W. Trimble, *Encyclopedia of Water Science* (2nd ed., Vols. I-II). Davis, California, U.S.A.: Taylor & Francis Group, LLC.

Sanchez, F. (Abril de 2005). *Evolución geoquímica del agua subterránea*. Universidad de Salamanca, 6 pp. Recuperado el 15 de enero de 2010, de <http://web.usal.es/javisan/hidro>

Sánchez, F. J. (2007). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*. Universidad de Salamanca. Obtenido de <http://web.usal.es/javisan/hidro>

Sanchez, F. J. (2007). *Conceptos fundamentales de hidrogeología*. Universidad de Salamanca, 8 pp. Obtenido de <http://web.usal.es/~javisan/hidro/hidro.htm>

Schimidt-Thomé, M. (1975). *The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America), a basis for city development and planning*.

Schmidt-Thomé, M. (1975). *The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central América), a basis for city development and planning*.

- SNET. (2005). *Balance Hídrico Integrado y Dinámico en el Salvador. Componente Evaluación de Recursos Hídricos*. San Salvador.
- SNET. (2005). *Mapa de Recarga Acuífera de El Salvador*. San Salvador.
- SNET. (s/f). *Memoria Técnica del Mapa de Escenarios de Amenaza del Volcán de San Miguel*. Recuperado el 5 de enero de 2010, de [snet.gob.sv](http://www.snet.gob.sv):
<http://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/memorias/mtecVSM3.pdf>
- SNET. (S/f). *Perfiles Climatológicos*. Recuperado el 30 de Junio de 2010, de
<http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/perfiles+climatologicos/>
- Técnica Industrial Agropecuaria, S.A. de C.V. (1992). *Informe final del Pozo No. 1 Urbanización Lirios del Norte, Cuscatancingo, Depto. de San Salvador*. San Salvador.
- Weight, W. D. (2004). *Manual of Applied Field Hydrogeology*. McGraw-Hill Co.
- White, M. (Oct. de 2009). *Geochemistry*. Obtenido de
<http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/Chapters/>

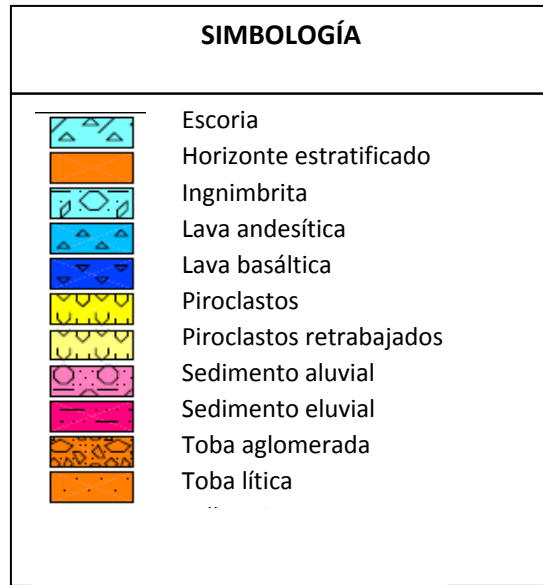
ANEXOS

ANEXO 1

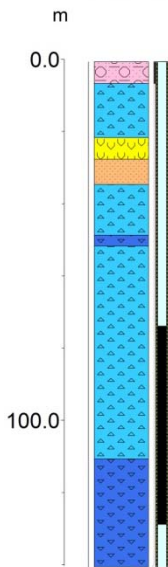
POZOS CON INFORMACIÓN LITOLÓGICA

ID	NOMBRE	CODIGO	COD ROCKWORKS	TIPO	FECHA_INV	X	Y	Z	PROF_POZO
1	El Espino III	ANTCUS-P-13	DH-06	Pozo perforado	08/06/2001	472444.10	284300.15	839.00	140.30
2	Colegio Hermanas Somascas	ANTCUS-P-14	DH-31	Pozo perforado	05/05/2006	473756.27	284474.87	816.00	182.90
3	Industrias St. Jacks	ANTCUS-P-15	DH-32	Pozo perforado	27/08/2001	473590.73	283623.52	823.00	213.36
4	Multiplaza	ANTCUS-P-16	DH-34	Pozo perforado	31/01/2004	473158.71	284312.30	833.00	213.36
5	P-3 La Sultana	ANTCUS-P-17	DH-40	Pozo perforado		473675.00	284170.00	813.20	141.73
6	Asevilla Ant. Cuscatlan	ANTCUS-P-18	DH-49	Pozo perforado		473659.97	283273.34	881.00	152.40
7	Madre Selva	ANTCUS-P-20	DH-22	Pozo perforado	13/08/1993	472623.11	283070.77	913.00	176.83
8	Joya Galana	APO-P-01	DH-56	Pozo perforado	23/10/2008	477702.01	297321.43	445.00	182.88
9	La Cancha	APO-P-02	DH-03	Pozo perforado	12/09/2000	479486.46	297783.99	453.00	213.41
10	Madre tierra II Apopa	APO-P-04	DH-11	Pozo perforado		479937.54	298521.15	435.00	196.64
11	Col. Chintu Apopa	APO-P-05	DH-15	Pozo perforado	21/05/2000	480388.28	298828.11	432.00	194.00
12	La Junta II Apopa	APO-P-06	DH-20	Pozo perforado	05/08/2000	479817.84	299074.38	439.00	203.00
13	El Zapote	APO-P-08	DH-24	Pozo perforado		477400.00	293025.00	580.00	278.89
14	Los Luceros	APO-P-09	DH-25	Pozo perforado	27/06/2000	479525.00	294500.00	460.00	184.40
15	RANSA	APO-P-10	DH-33	Pozo perforado	11/10/2005	478135.30	295758.76	498.00	182.88
16	Chintuc 2 Apopa	APO-P-11	DH-47	Pozo perforado		480425.00	299700.00	420.31	121.92
17	Hda. El Ranchon El Angel	APO-P-12	DH-48	Pozo perforado		479425.00	296375.00	482.00	289.56
18	Hda. Apachulco	APO-P-13	DH-50	Pozo perforado		477473.40	296925.22	459.00	249.93
19	Hda. El Angel	APO-P-14	DH-51	Pozo perforado		478325.00	295200.00	509.00	263.04
20	Hda. El Angel-La Cancha	APO-P-15	DH-52	Pozo perforado		479456.47	297845.47	430.00	295.65
21	El Zapote	APO-P-16	DH-53	Pozo perforado		477109.73	293237.96	619.00	278.89
22	El Angel	APO-P-17	DH-54	Pozo perforado		479455.74	296923.57	467.70	298.70
23	El Angel	APO-P-18	DH-55	Pozo perforado		477750.00	295500.00	514.00	371.86
24	Las Margaritas II	CIUDEL-P-05	DH-13	Pozo perforado	03/10/2002	484076.39	289053.52	629.00	180.00
25	Las Margaritas I	CIUDEL-P-06	DH-18	Pozo perforado	06/11/2000	484377.28	289790.85	620.00	156.00
26	P-1 Lirios del Norte	CUS-P-06	DH-09	Pozo perforado		480985.57	294218.19	480.00	152.44
27	Estacion Ramboe La Gloria	MEJ-P-02	DH-02	Pozo perforado	15/04/2009	476155.29	290860.33	767.00	164.00
28	P-1 San Ramon IVU	MEJ-P-05	DH-41	Pozo perforado		476007.20	290224.36	780.00	146.30
29	P-2 El Milagro	SANMAR-P-01	DH-16	Pozo perforado	14/12/2001	479717.78	282440.46	718.00	122.00
30	Jdines de San Marcos 1	SANMAR-P-04	DH-23	Pozo perforado		479725.00	282550.00	712.00	61.00
31	Colonia Quezaltepec.	SANTATE-P-01	DH-35	Pozo perforado	07/07/2008	466562.62	285169.19	797.00	243.80
32	Jardines del Volcan	SANTATE-P-02	DH-37	Pozo perforado		471406.57	284656.50	881.00	153.00
33	Las Margaritas III	SOY-P-02	DH-04	Pozo perforado	12/08/2000	484527.18	289268.35	624.00	176.82
34	Las Margaritas IV	SOY-P-08	DH-14	Pozo perforado	21/03/2001	484978.15	289790.50	617.00	204.00
35	Textufl	SOY-P-09	DH-36	Pozo perforado		484348.00	286579.31	638.00	231.65
36	San Jose de La Montana	SS-P-02	DH-43	Pozo perforado	04/06/2009	475650.00	286925.00	750.00	182.27
37	P-1 La Cima San Patricio	SS-P-03	DH-19	Pozo perforado	14/04/2002	475748.49	283098.40	870.40	102.00
38	La Cima III	SS-P-08	DH-01	Pozo perforado		477822.62	283772.60	690.90	214.88
39	Col. Militar III	SS-P-09	DH-05	Pozo perforado		479565.96	284293.58	655.55	122.00
40	La Cima II	SS-P-10	DH-07	Pozo perforado		476259.51	283251.58	842.05	211.84
41	P-1 Metrocentro	SS-P-11	DH-08	Pozo perforado	02/06/2006	477404.74	287030.30	707.00	192.07
42	P-3 Col Centroamerica	SS-P-12	DH-10	Pozo perforado		477074.68	284293.58	701.10	114.30
43	Estadio Flor Blanca No. 2	SS-P-14	DH-17	Pozo perforado		476525.00	286375.00	720.00	89.63
44	Hospital Militar	SS-P-15	DH-21	Pozo perforado	27/01/2001	476631.65	288728.18	740.00	147.00
45	P-2 Col. Militar	SS-P-16	DH-26	Pozo perforado		479550.00	284150.00	654.40	164.59
46	P-1 Residencial Modelo	SS-P-17	DH-27	Pozo perforado		478550.00	284725.00	650.00	51.82
47	Hotel El Salvador Sheraton	SS-P-18	DH-28	Pozo perforado		473925.00	287600.00	838.10	179.90
48	Embotelladora La Cascada	SS-P-19	DH-29	Pozo perforado	24/11/2005	479646.97	287962.94	653.00	100.60
49	Industrias La Constancia	SS-P-20	DH-30	Pozo perforado	07/03/2008	480391.24	286825.06	645.00	140.20
50	P-1 Estadio Flor Blanca	SS-P-21	DH-38	Pozo perforado		476620.00	286010.00	715.60	89.61
51	P-3 Col Escalon	SS-P-22	DH-39	Pozo perforado		473860.00	286660.00	802.26	200.00
52	P-1 Col. Miralvalle	SS-P-23	DH-42	Pozo perforado		475827.05	288731.07	770.00	213.36
53	P-2 Pje Verde	SS-P-25	DH-45	Pozo perforado		473575.00	287300.00	850.00	213.36
54	P-3 El Socorro	SS-P-26	DH-46	Pozo perforado		478150.00	286850.00	675.00	94.18

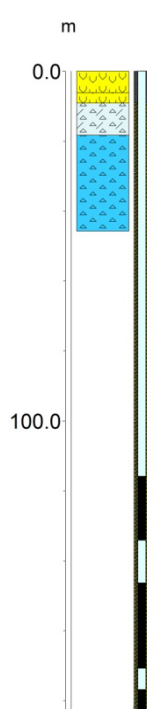
ANEXO 2 PERFILES LITOLÓGICOS



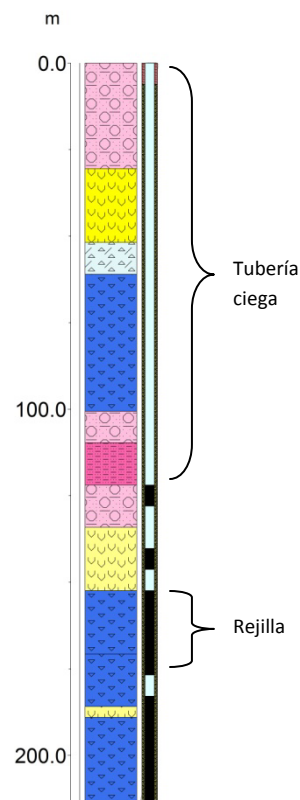
ANTCUS-P-13



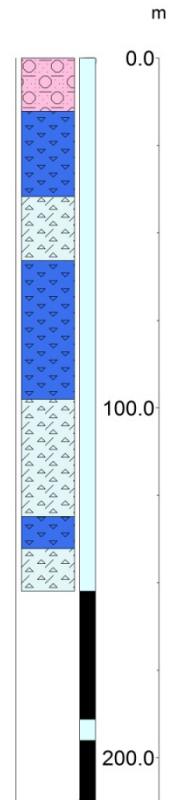
ANTCUS-P-14



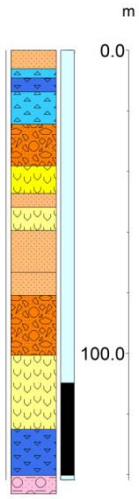
ANTCUS-P-15



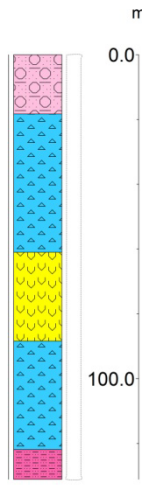
ANTCUS-P-16



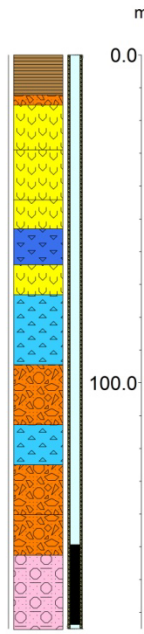
ANTCUS-P-17



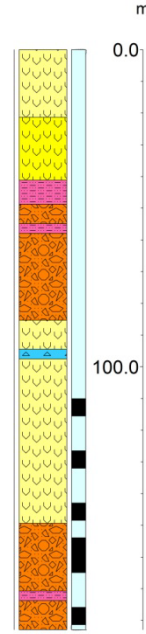
ANTCUS-P-18



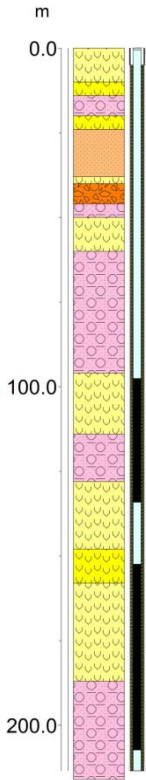
ANTCUS-P-20



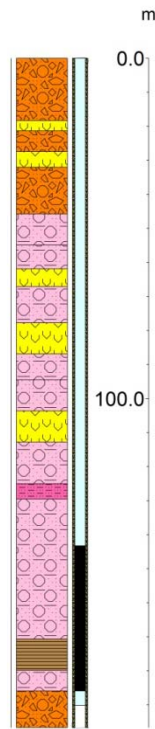
APO-P-01



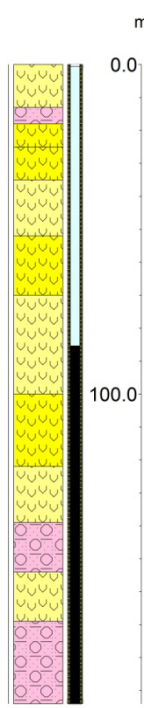
APO-P-02



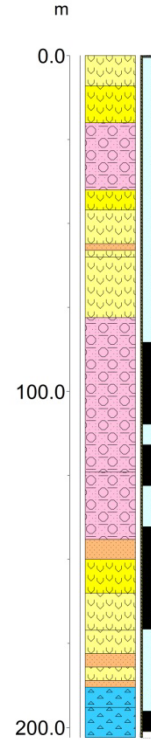
APO-P-04



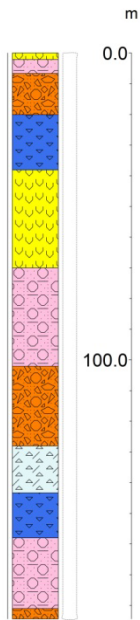
APO-P-05



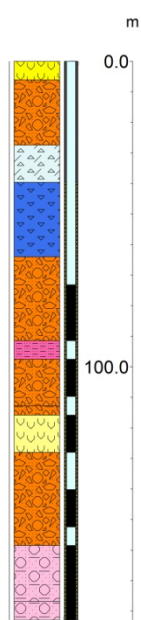
APO-P-06



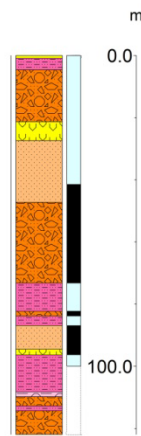
APO-P-09



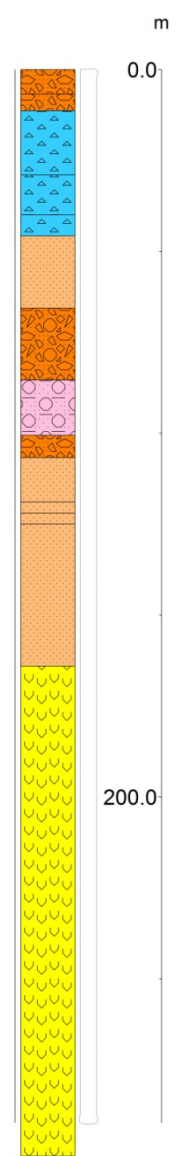
APO-P-10



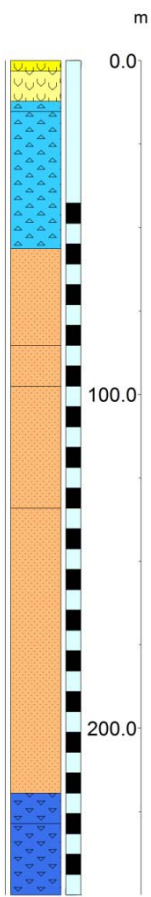
APO-P-11



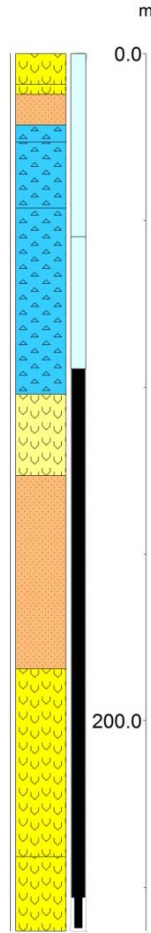
APO-P-12



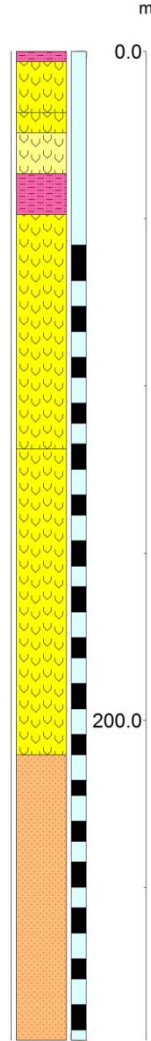
APO-P-13



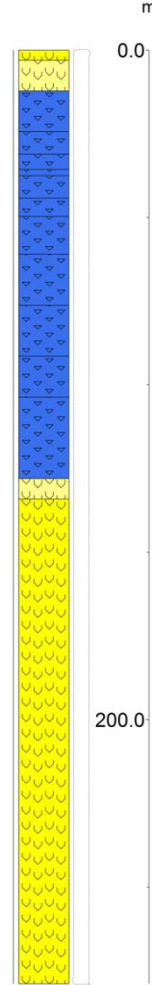
APO-P-14



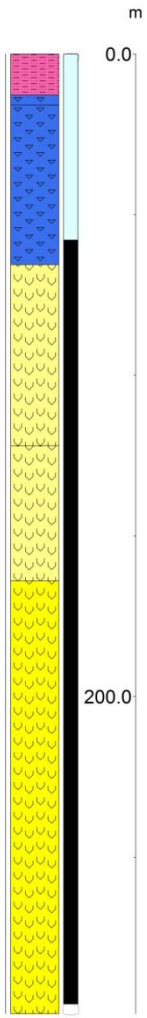
APO-P-15



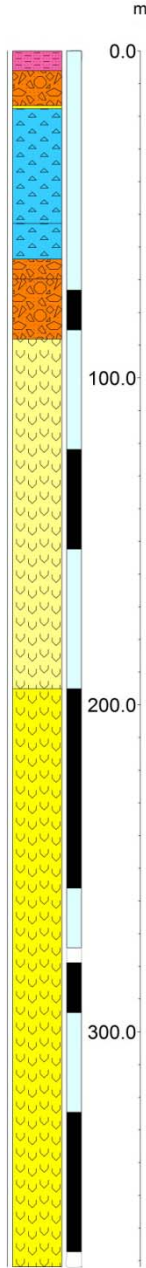
APO-P-16



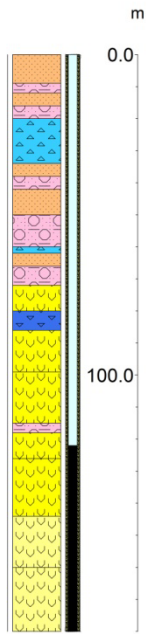
APO-P-17



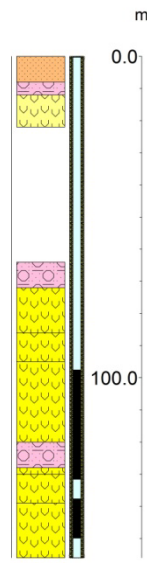
APO-P-18



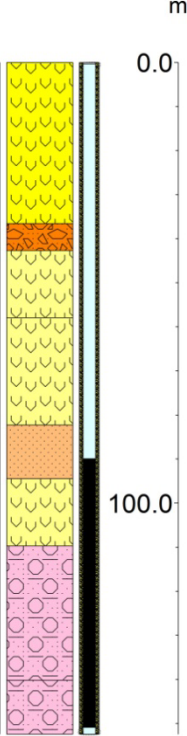
CIUDEL-P-05



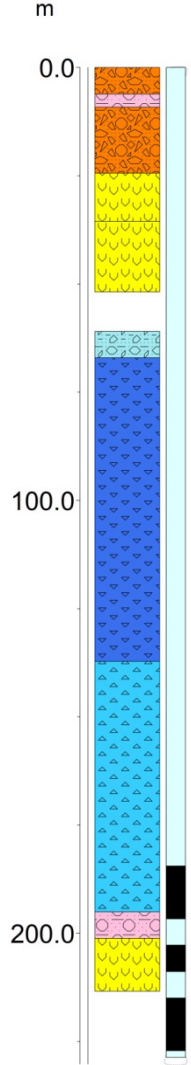
CIUDEL-P-06



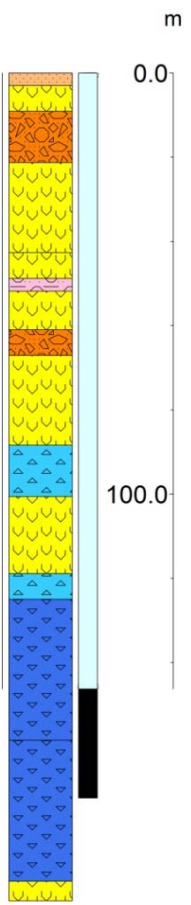
CUS-P-06



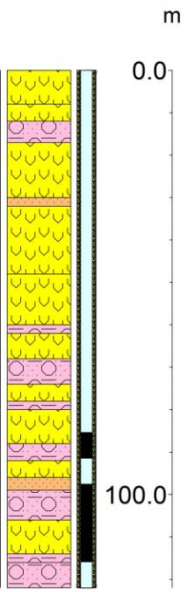
MEJ-P-02



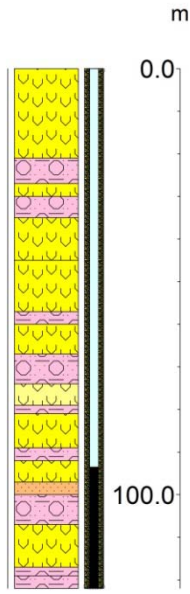
MEJ-P-05



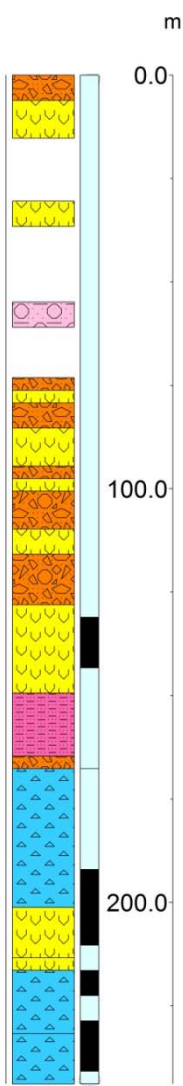
SANMAR-P-01



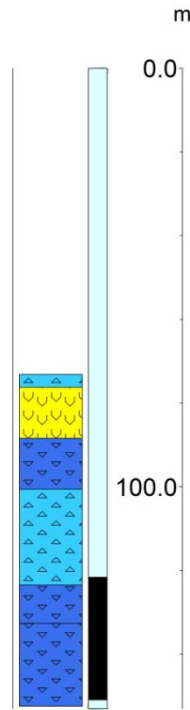
SANMAR-P-04



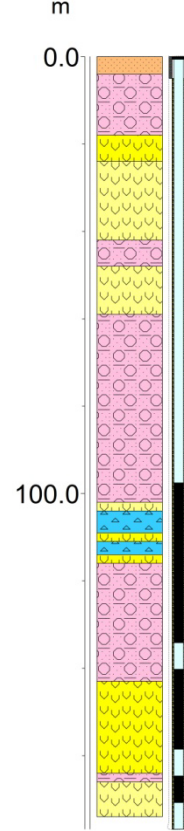
SANTATE-P-01



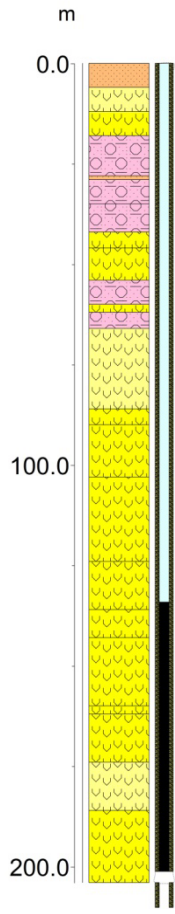
SANTATE-P-02



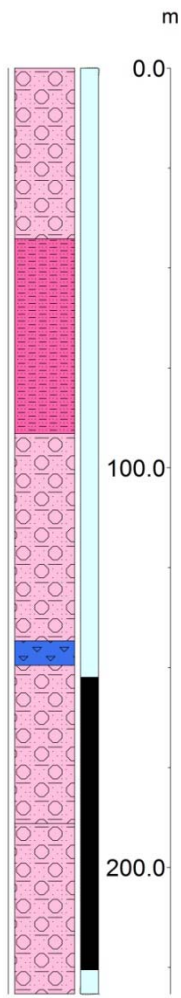
SOY-P-02



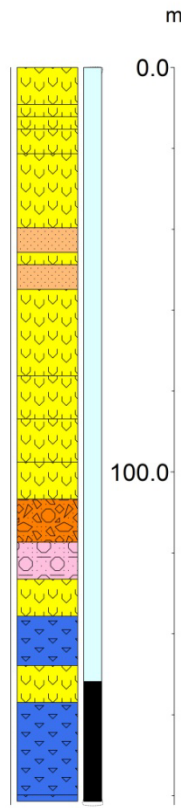
SOY-P-08



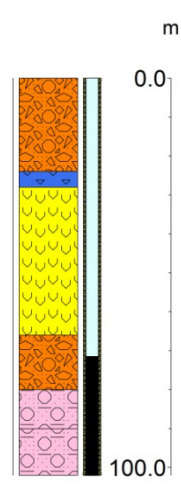
SOY-P-09



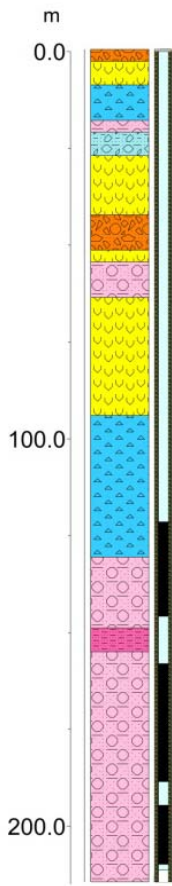
SS-P-02



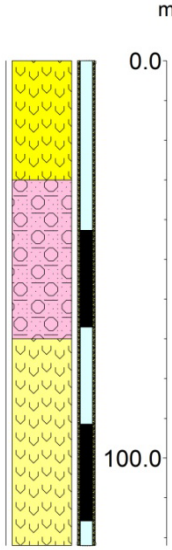
SS-P-03



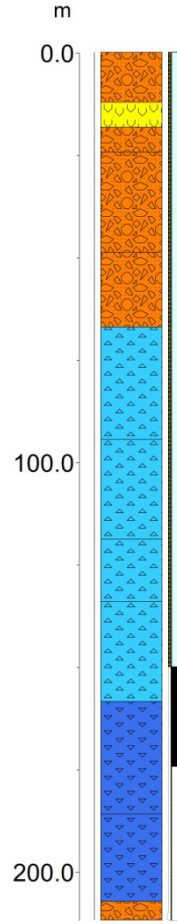
SS-P-08



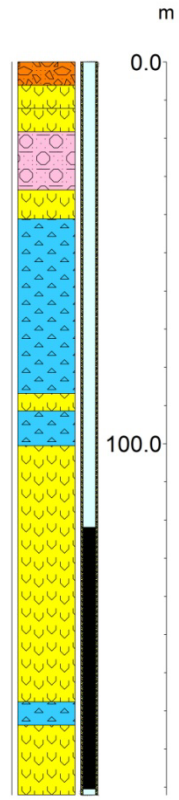
SS-P-09



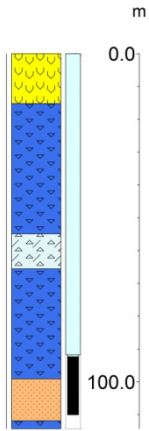
SS-P-10



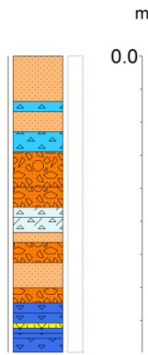
SS-P-11



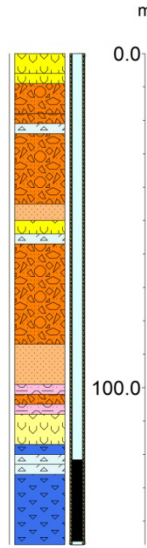
SS-P-12



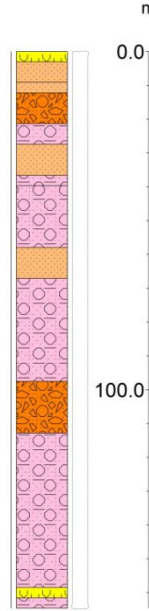
SS-P-14



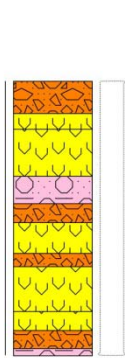
SS-P-15



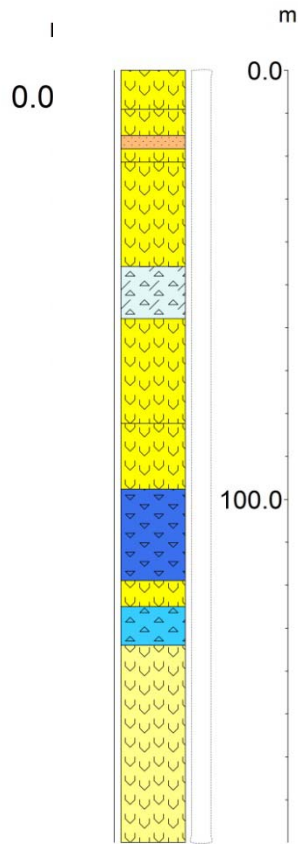
SS-P-16



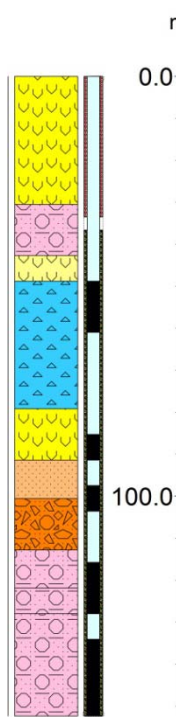
SS-P-17



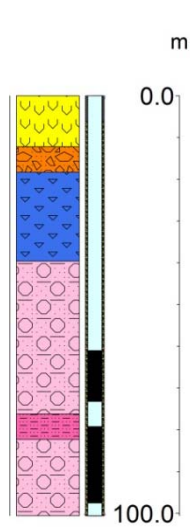
SS-P-18



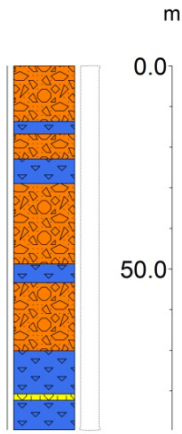
SS-P-19



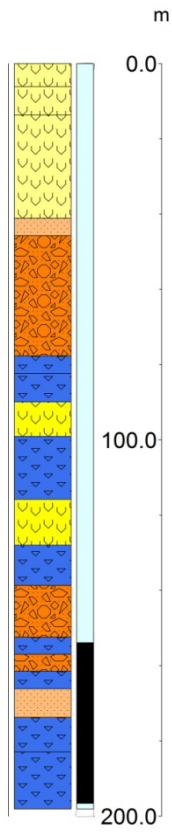
SS-P-20



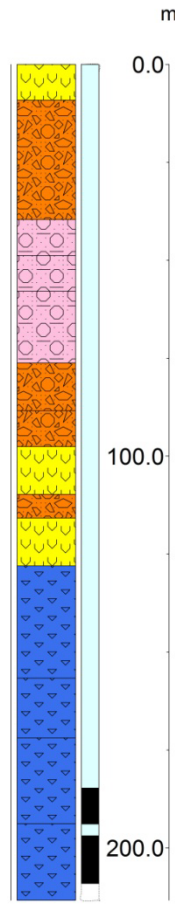
SS-P-21



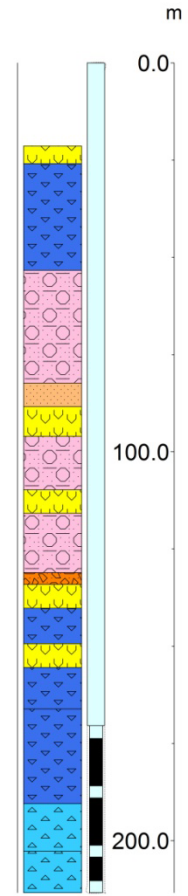
SS-P-22



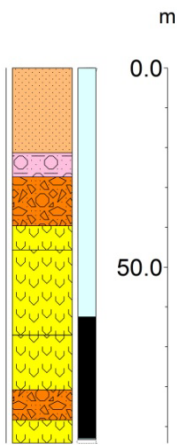
SS-P-23



SS-P-25



SS-P-26



ANEXO 3

FUENTES CON INFORMACIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS

No.	CODIGO	FECHA	TIPO	PROF. (m)	NE (m)	Npiezom (m)	Fuente
1	ANTCUS-P-01	18/03/1999	Pozo perforado	0.00	98.15	716.85	ANDA
2	ANTCUS-P-02		Pozo perforado	207.00	104.57	713.43	Informe Perforación
3	ANTCUS-P-04	20/02/2001	Pozo perforado	0.00	81.38	751.62	ANDA
4	ANTCUS-P-07	27/01/1999	Pozo perforado	0.00	83.51	763.49	ANDA
5	ANTCUS-P-08	16/03/1999	Pozo perforado	114.00	95.10	724.90	ANDA
6	ANTCUS-P-11	30/03/2001	Pozo perforado	0.00	90.53	732.47	ANDA
7	ANTCUS-P-12	20/03/1999	Pozo perforado	0.00	97.23	779.77	ANDA
8	ANTCUS-P-13	08/06/2001	Pozo perforado	140.30	83.21	755.79	ANDA
9	ANTCUS-P-14	05/05/2006	Pozo perforado	182.90	108.20	707.80	Informe Perforación
10	ANTCUS-P-15	27/08/2001	Pozo perforado	213.36	99.10	723.90	Informe Perforación
11	ANTCUS-P-16	31/01/2004	Pozo perforado	213.36	114.00	719.00	Informe Perforación
12	ANTCUS-P-20	22/02/2002	Pozo perforado	175.00	77.72	835.28	Informe Perforación
13	APO-MA-01	20/04/2009	Manantial	0.00	0.00	307.00	Inventario propio
14	APO-MA-02	20/04/2009	Manantial	0.00	0.00	430.00	Inventario propio
15	APO-MA-03	20/04/2009	Manantial	0.00	0.00	391.00	Inventario propio
16	APO-MA-04	20/04/2009	Manantial	0.00	0.00	458.00	Inventario propio
17	APO-P-01	23/10/2008	Pozo perforado	182.88	46.42	398.58	ANDA
18	APO-P-02	12/09/2000	Pozo perforado	213.41	44.51	408.49	Informe Perforación
19	APO-P-05	21/05/2000	Pozo perforado	194.00	34.00	398.00	Informe Perforación
20	APO-P-06	05/08/2000	Pozo perforado	203.00	39.32	399.68	ANDA
21	APO-P-09		Pozo perforado	184.40	60.00	400.00	ANDA
22	APO-P-10	11/10/2005	Pozo perforado	182.88	67.36	430.64	Informe Perforación
23	CIUDEL-MA-01	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	472.00	Inventario propio
24	CIUDEL-MA-02	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	472.00	Inventario propio
25	CIUDEL-MA-03	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	472.00	Inventario propio
26	CIUDEL-MA-04	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	568.00	Inventario propio
27	CIUDEL-MA-05	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	571.00	Inventario propio
28	CIUDEL-MA-06	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	448.00	Inventario propio
29	CIUDEL-MA-07	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	557.00	Inventario propio
30	CIUDEL-MA-07	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	445.00	Inventario propio
31	CIUDEL-MA-08	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	576.00	Inventario propio
32	CIUDEL-MA-09	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	551.00	Inventario propio
33	CIUDEL-MA-10	15/05/2009	Manantial	0.00	0.00	551.00	Inventario propio
34	CIUDEL-P-01	15/05/2009	Pozo excavado	26.36	25.80	511.20	Inventario propio
35	CIUDEL-P-02	15/05/2009	Pozo excavado	30.60	33.70	459.30	Inventario propio
36	CIUDEL-P-04	15/05/2009	Pozo excavado	9.36	6.52	557.48	Inventario propio
37	CIUDEL-P-05	03/10/2000	Pozo perforado	180.00	78.03	550.97	Informe Perforación
38	CIUDEL-P-06	06/11/2000	Pozo perforado	156.00	62.18	557.82	Informe Perforación
39	CUS-MA-01	16/04/2009	Manantial	0.00	0.00	607.00	Inventario propio
40	CUS-MA-02	17/04/2009	Manantial	0.00	0.00	623.00	Inventario propio
41	CUS-MA-03	17/04/2009	Manantial	0.00	0.00	643.00	Inventario propio
42	CUS-MA-04	17/04/2009	Manantial	0.00	0.00	608.00	Inventario propio
43	CUS-MA-05	17/04/2009	Manantial	0.00	0.00	639.00	Inventario propio
44	CUS-MA-06	21/04/2009	Manantial	0.00	0.00	487.00	Inventario propio
45	CUS-MA-07	21/04/2009	Manantial	0.00	0.00	489.00	Inventario propio
46	CUS-P-01	21/04/2009	Pozo excavado	3.28	2.85	483.15	ANDA
47	CUS-P-02	21/04/2009	Pozo excavado	6.77	5.30	486.70	ANDA
48	CUS-P-03	21/04/2009	Pozo excavado	35.00	32.92	463.08	ANDA
49	CUS-P-04	21/04/2009	Pozo excavado	0.00	0.00	503.00	ANDA
50	CUS-P-05	21/04/2009	Pozo excavado	35.70	31.21	462.79	ANDA
51	MEJ-MA-01	15/04/2009	Manantial	0.00	0.00	620.00	Inventario propio
52	MEJ-MA-02	15/04/2009	Manantial	0.00	0.00	613.00	Inventario propio
53	MEJ-MA-03	15/04/2009	Manantial	0.00	0.00	640.00	Inventario propio
54	MEJ-MA-04	16/04/2009	Manantial	0.00	0.00	597.00	Inventario propio
55	MEJ-MA-05	16/04/2009	Manantial	0.00	0.00	627.00	Inventario propio
56	MEJ-MA-06	16/04/2009	Manantial	0.00	0.00	730.00	Inventario propio
57	MEJ-MA-07	16/04/2009	Manantial	0.00	0.00	601.00	Inventario propio

ANEXO 3

FUENTES CON INFORMACIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS

No.	CODIGO	FECHA	TIPO	PROF. (m)	NE (m)	Npiezom (m)	Fuente
58	MEJ-MA-08	16/04/2009	Manantial	0.00	0.00	594.00	Inventario propio
59	MEJ-P-02	27/06/1996	Pozo perforado	164.00	150.00	617.00	Informe de perforación
60	MEJ-P-04	31/08/2009	Pozo perforado	0.00	164.44	615.56	ANDA
61	NEJ-P-02	15/03/2005	Pozo perforado	231.64	137.69	410.31	ANDA
62	SANMAR-MA-01	28/04/2009	Manantial	0.00	0.00	786.00	Inventario propio
63	SANMAR-MA-02	28/04/2009	Manantial	0.00	0.00	752.00	Inventario propio
64	SANMAR-MA-03	28/04/2009	Manantial	0.00	0.00	873.00	Inventario propio
65	SANMAR-P-01	14/12/2001	Pozo perforado	122.00	54.00	687.00	Informe de perforación
66	SANMAR-P-02	11/03/1999	Pozo perforado	83.82	46.94	671.06	Informe de perforación
67	SANTATE-MA-01	06/05/2009	Manantial	0.00	0.00	1709.00	Inventario propio
68	SANTATE-P-01	07/07/2008	Pozo perforado	243.80	110.63	686.37	ANDA
69	SANTATE-P-02	26/11/1998	Pozo perforado	0.00	112.17	768.83	ANDA
70	SOY-MA-01	22/04/2009	Manantial	0.00	0.00	559.00	Inventario propio
71	SOY-MA-02	22/04/2009	Manantial	0.00	0.00	575.00	Inventario propio
72	SOY-MA-03	22/04/2009	Manantial	0.00	0.00	609.00	Inventario propio
73	SOY-P-02	12/08/2000	Pozo perforado	176.82	69.51	554.49	ANDA
74	SOY-P-03	27/03/2001	Pozo perforado	0.00	90.53	569.47	ANDA
75	SOY-P-04	03/04/2009	Pozo perforado	0.00	74.70	555.30	ANDA
76	SOY-P-05	03/04/2009	Pozo perforado	0.00	78.55	552.34	ANDA
77	SOY-P-06	03/04/2009	Pozo perforado	0.00	68.75	556.25	ANDA
78	SOY-P-07	03/04/2009	Pozo perforado	0.00	64.93	557.07	ANDA
79	SOY-P-08	21/03/2001	Pozo perforado	204.00	67.06	549.94	ANDA
80	SS-MA-01	15/07/2009	Manantial	0.00	0.00	591.00	Inventario propio
81	SS-MA-02	30/03/2009	Manantial	0.00	0.00	615.00	ANDA
82	SS-P-03	14/04/2002	Pozo perforado	102.00	48.00	846.00	ANDA
83	SS-P-05	31/08/2009	Pozo perforado	0.00	91.54	682.00	ANDA
84	SS-P-07	31/08/2009	Pozo perforado	0.00	158.00	685.10	ANDA
85	SS-P-10	12/06/2001	Pozo perforado	211.84	143.26	698.79	ANDA
86	SS-P-11	02/06/2006	Pozo perforado	192.07	41.76	665.24	Informe exploración
87	SS-P-13	08/10/2001	Pozo perforado	176.82	176.82	550.18	ANDA
88	SS-P-15	27/01/2001	Pozo perforado	147.00	118.24	621.76	ANDA
89	SS-P-19	24/11/2005	Pozo perforado	100.60	38.70	614.30	Informe de perforación
90	SS-P-20	07/03/2008	Pozo perforado	140.20	39.60	605.40	Informe de perforación
91	SS-P-21	02/06/2001	Pozo perforado	0.00	62.18	653.42	ANDA
92	SS-P-23	06/06/2001	Pozo perforado	0.00	134.72	635.28	ANDA
93	SS-P-28	23/05/2001	Pozo perforado	0.00	85.34	866.66	ANDA

ANEXO No. 4

DATOS DE CAMPO, QUÍMICOS E ISOTÓPICOS

No	Cod. Muestra	Fecha muestra	Codigo Estación	pH	T °C	CE uS/cm	TDS mg/l	Eh mV	OD mg/l	Na mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	SiO2 mg/l	Sum Ions mg/l	18O	2H ‰	E.N. %
50	APO-P-02-2	27/10/2009	APO-P-02	6.33	28.1	282	173		5.53													
51	CIUDEL-MA-11-1	15/05/2009	CIUDEL-MA-11	6.74	28.1	845	520	193.0	5.04													
52	CUS-MA-04-1	17/04/2009	CUS-MA-04	6.83	28.1	437	268		6.23													
53	CUS-MA-06-1	21/04/2009	CUS-MA-06	5.59	27.8	449	286		2.29													
54	CIUDEL-P-02-1	15/05/2009	CIUDEL-P-02	6.08	27.6	191	120	154.8	3.87													
55	CUS-MA-03-1	17/04/2009	CUS-MA-03	6.16	27.5	480	298		3.89													
56	CUS-MA-02-1	17/04/2009	CUS-MA-02	6.37	27.4	466	289		5.33													
57	APO-MA-03-1	20/04/2009	APO-MA-03	6.13	27.2	418	261		2.95													
58	APO-P-01-2	27/10/2009	APO-P-01	6.46	27.0	87	55		3.94													
59	SANMAR-P-02-1	15/07/2009	SANMAR-P-02	6.81	26.9	281	177	105.0	3.92													
60	ANTCUS-P-02-1	13/05/2009	ANTCUS-P-02	6.00	26.8	293	180	203.0	4.61													
61	APO-MA-02-1	20/04/2009	APO-MA-02	6.17	26.8	402	253		5.01													
62	APO-MA-04-1	20/04/2009	APO-MA-04	3.39	26.4	316	200		5.17													
63	CUS-MA-07-1	21/04/2009	CUS-MA-07	5.02	26.3	359	228		4.98													
64	ANTCUS-P-11-1	20/05/2009	ANTCUS-P-11	6.19	26.0	576	367	128.8	5.15													
65	ANTCUS-P-01-1	13/05/2009	ANTCUS-P-01	6.05	25.9	341	220	239.6	6.59													
66	ANTCUS-P-10-1	15/05/2009	ANTCUS-P-10	3.46	25.9	361	230	320.9	6.45													
67	CIUDEL-MA-07-1	15/05/2009	CIUDEL-MA-07	6.00	25.9	326	210	-12.7	0.95													
68	CIUDEL-MA-08-1	15/05/2009	CIUDEL-MA-08	6.64	25.9	704	450	80.6	6.22													
69	CUS-P-02-1	21/04/2009	CUS-P-02	4.10	25.9	559	357		0.40													
70	ANTCUS-P-12-1	20/05/2009	ANTCUS-P-12	6.42	25.8	259	170	255.0	4.68													
71	CIUDEL-MA-05-1	15/05/2009	CIUDEL-MA-05	6.48	25.8	290	190	-219.5	0.75													
72	CIUDEL-MA-06-1	15/05/2009	CIUDEL-MA-06	5.96	25.8	303	190	131.6	2.57													
73	SOY-MA-02-1	22/04/2009	SOY-MA-02	6.85	25.8	1057	677		4.23													
74	ANTCUS-P-09-1	13/05/2009	ANTCUS-P-09	3.95	25.7	327	210	425.8	7.00													
75	ANTCUS-P-08-1	13/05/2009	ANTCUS-P-08	5.27	25.4	332	210	291.9	6.09													
76	CIUDEL-P-03-1	15/05/2009	CIUDEL-P-03	6.38	25.3	393	260	156.7	2.25													
77	SOY-MA-01-1	22/04/2009	SOY-MA-01	6.79	25.2	971	628		6.56													
78	APO-MA-01-2	08/09/2009	APO-MA-01	7.45	25.1	197	270	111.6	7.45													
79	CUS-P-01-1	21/04/2009	CUS-P-01	6.83	25.1	425	275		2.31													
80	MEJ-MA-05-1	16/04/2009	MEJ-MA-05	6.18	25.1	698	453		4.54													
81	APO-MA-01-1	20/04/2009	APO-MA-01	6.67	25.0	276	180		6.62													
82	SANMAR-MA-02-1	28/04/2009	SANMAR-MA-02	2.71	24.8	440	287	337.8	0.16											-6.78	-48.44	
83	CIUDEL-P-04-1	15/05/2009	CIUDEL-P-04	4.71	24.7	356	230	241.2	2.08													
84	SS-RIO-01-1	28/04/2009	SS-RIO-01	7.92	24.6	286	187	136.8	7.60													
85	SANMAR-MA-01-1	28/04/2009	SANMAR-MA-01	3.03	24.3	55	36	96.8	6.81													
86	CUS-MA-05-1	17/04/2009	CUS-MA-05	6.17	24.2	591	390		2.24												-6.46	-47.79
87	SANMAR-MA-03-1	28/04/2009	SANMAR-MA-03	6.13	22.1	92	63	220.9	7.73												-6.55	-46.54
88	SANTATE-MA-01-1	06/05/2009	SANTATE-MA-01	8.39	21.3	284	199	51.5	7.72												-6.36	-48.04
89	SOY-MA-03-1	15/07/2009	SOY-MA-03																			
90	ALL-ANDA-1	01/10/2009	ALL-ANDA																		-4.74	-25.66
91	ALL-BOQ-1	02/07/2009	ALL-BOQ																		-8.99	-61.00
92	ALL-BOQ-2	01/10/2009	ALL-BOQ																		-5.83	-34.68
93	ALL-ESC-1	01/10/2009	ALL-ESC																		-5.37	-29.91
94	ALL-INS-1	02/07/2009	ALL-INS																		-7.98	-55.55
95	ALL-INS-2	01/10/2009	ALL-INS																		-4.25	-24.04
96	ALL-MAG-1	01/10/2009	ALL-MAG																		-2.95	-25.46