

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO LAS MARÍAS,
LOS CÓBANOS, SONSONATE, EL SALVADOR.**

Tesis sometida a consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Geología, para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo
de Recursos Hídricos

CELIA ELIZABETH MONGE GUADRÓN

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica
2014

DEDICATORIA

Agradezco en primera instancia a mi Amado Padre Celestial que hizo posible la consecución de esta meta tan anhelada por mí, por todas las bendiciones que recibí a lo largo de estos años y por cada una de las persona que hicieron tan enriquecedora esta experiencia.

A mi mamá Gladys Guadrón, quien ha sido mi más fiel apoyo y aliento para luchar por la consecución de esta meta, por que sus sabios consejos e inmenso amor me han guiado aún en la distancia, a quien le debo lo que soy.

A mis familias Guadrón Vaquerano, Díaz Ayala y Ramírez Villatoro, cuyas oraciones y soporte me han acompañado siempre.

A mis grandiosas amigas Maritta Alvarado y Michelle Arias, quienes han sido casi hermanas para mí, brindándome su amistad sincera y apoyándome siempre a lo largo de la maestría como en el desarrollo del trabajo de campo de esta investigación, siempre les estaré agradecida y las llevaré en mi corazón.

A mis tan queridos compañeros de maestría, Marta Chávez, Erick Orozco, Pamela García, Ricardo Morales y Jorge Suárez, quienes han sido verdaderos amigos y excelentes anfitriones para mí en este país, jamás les olvidaré y agradezco a todos su disposición para compartir sus conocimientos.

A mi amada familia Moro Rojas quienes me hicieron parte de su familia acogiéndome con especial cariño todo el tiempo que estuve en Costa Rica.

A mis queridos amigos Erick Menjívar, Deyman Pastora y Luis Chávez, quienes sacrificaron su tiempo libre para colaborar con esta investigación, les estoy infinitamente agradecida.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia al Servicio de Intercambio Académico Alemán (DAAD) por haber financiado mis estudios y esta investigación, en especial a M.A. Neddy Zamora, quien ha sido un apoyo esencial en la consecución de esta meta.

A mi directora de tesis M. Sc. Ingrid Vargas, por su apoyo incondicional en todo momento, su valiosa colaboración y sacrificio tanto con el trabajo de campo como el desarrollo de este documento, los aportes de su conocimiento y la confianza depositada en mí.

A M.Sc. Dagoberto Arévalo Herrera, cuya guía, conocimientos y colaboración han sido primordiales en el desarrollo de esta investigación.

A M.Sc. Federico Arellano Hartig, cuyos valiosos conocimientos, experiencia, recomendaciones y acertadas observaciones guiaron el desarrollo de esta investigación.

A la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), por la colaboración institucional brindada y en especial al personal de la Unidad de Investigación e Hidrogeología, quienes me acompañaron y apoyaron en diferentes etapas durante el trabajo de campo de este estudio.

A M.Sc. Rolando Mora, por todo el apoyo recibido a través de su persona y de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, así como la donación de los análisis de suelos realizados por el Laboratorio de Geotecnia. A todo el personal de la Escuela de Geología y del Posgrado de Geología por el aprecio y toda la colaboración recibida.

Al SEP por el apoyo financiero para cubrir los costos de los análisis físico-químicos realizados.

A la Ing. Jacqueline Cativo, por su incondicional apoyo y toda la colaboración recibida a través de su persona y de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

Al Ministerio de Medio Ambiente, por la colaboración e información brindada.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geología de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos”

M. Sc. Héctor Zúñiga Mora
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**

M. Sc. Ingrid Vargas Azofeifa
Directora de Tesis

M. Sc. Dagoberto Arevalo Herrera
Asesor

M. Sc. Federico Arellano Hartig
Asesor

Dr. Mauricio Mora Fernández
Director del Programa de Posgrado en Geología

Celia Elizabeth Monge Guadrón
Candidata

INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	1
1.2. ANTECEDENTES.....	5
1.3. JUSTIFICACION.....	6
1.4. OBJETIVO GENERAL	8
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.6. HIPÓTESIS.....	8
CAPITULO 2. METODOLOGÍA.....	10
2.1. OBJETIVO 1.....	10
2.2. OBJETIVO 2.....	11
2.3. OBJETIVO 3.....	14
2.4. OBJETIVO 4.....	16
CAPITULO 3. GEOLOGÍA	18
3.1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	18
3.2. GEOLOGÍA LOCAL	23
CAPITULO 4. HIDROGEOQUÍMICA.....	28
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	28
4.2. CALIDAD DEL AGUA	31
4.3. REPRESENTACIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	31
CAPITULO 5. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA	36
5.1. GENERALIDADES	39
5.2. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES.....	40
5.3. INTERPRETACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	45
CAPITULO 6. EVALUACIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA.....	50
6.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	54
6.2. CARACTERÍSTICAS GEOELÉCTRICAS	56
CAPITULO 7. HIDROLOGÍA.....	57
7.1. DATOS CLIMATOLÓGICOS	57
7.1.1. PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	57
7.1.2. TEMPERATURA.....	58
7.2. INFILTRACIÓN.....	59
7.3. USO ACTUAL DEL SUELO.....	60

7.4.	AFOROS	61
7.5.	ANÁLISIS DE SUELOS	64
7.6.	HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.....	67
7.6.1.	UNIDADES HIDROGEOLOGICAS.....	67
7.6.2.	LÍNEAS ISOFREÁTICAS Y DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO ..	68
7.7.	EVALUACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA.....	70
7.8.	BALANCE HÍDRICO DE SUELOS	78
7.9.	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	83
7.10.	VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN	84
CAPITULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		90
8.1.	CONCLUSIONES	90
8.2.	RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA		93

ANEXOS

RESUMEN

El área en que se desarrolló la investigación se sitúa en la Zona Occidental de la República de El Salvador, aproximadamente a 11 Km. al suroeste de la Ciudad de Sonsonate. El área de estudio es la Cuenca del río Las Marías y está localizada entre las coordenadas de la proyección cónica conformal de Lambert 266000 – 280000 Norte y 410000 – 417000 Este. La cuenca del río Las Marías pertenece a los Municipios de Acajutla y Sonsonate, ambos del Departamento de Sonsonate, la cuenca comprende un área de 19 km² y desemboca al mar en la playa Los Cóbanos que está situada al este del Puerto de Acajutla.

La caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Las Marías, Los Cóbanos, incluyó el uso de herramientas hidrogeoquímicas y geofísicas, con el objetivo de evaluar la concepción original que se tenía del sistema acuífero aunado a la información litológica de la zona de estudio. Información de campo y la hidrogeofísica posibilitaron plantear un modelo conceptual del acuífero y descartar la inferencia de la cuña salina en el acuífero de estudio.

Resultado de esta investigación se determinó la existencia de dos acuíferos, el primero de ellos es un acuífero somero, de mediana producción, con un espesor variable de hasta 20 metros, y que es el que la población de la zona utiliza como fuente de abastecimiento de agua. Un segundo acuífero fue detectado con los sondeos eléctricos verticales y del cual se sabe que existen pozos perforados privados que abastecen a los hoteles, fincas y propiedades privadas en la zona.

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Pozos excavados utilizados para obtención de muestras	12
Tabla 2.2 Puntos de pruebas de infiltración y muestreo de suelos	14
Tabla 2.3 Sondeos eléctricos verticales realizados	16
Tabla 4.1 Resultados de análisis del agua subterránea	30
Tabla 4.2 Clasificación de aguas naturales muestreadas	33
Tabla 6.1 Relaciones de valores hidrogeoquímicos.....	54
Tabla 6.2 Evaluación de índices hidrogeoquímicos.....	54
Tabla 6.3 Criterios de evaluación de calidad del agua por su salinidad (APHA, 1995).	55
Tabla 6.4 Concentraciones promedio de los constituyentes mayoritarios del agua marina	55
Tabla 7.1 Resultados de las pruebas de infiltración.....	60
Tabla 7.2 Uso de suelo en el área de estudio.....	61
Tabla 7.3 Aforos realizados en el río Las Marías.....	61
Tabla 7.4 Resultados de análisis geotécnicos del suelo.....	64
Tabla 7.5 Resultados de análisis de retención de humedad.....	65
Tabla 7.6 Valores de transmisividad de los pozos en la zona de estudio	68
Tabla 7.7 Componentes del coeficiente de pendiente (Schosinsky y Losilla, 2000).....	72
Tabla 7.8 Componentes del coeficiente de cobertura vegetal (Schosinsky y Losilla, 2000).	74
Tabla 7.9 Balance hídrico de suelos Cuenca del río Las Marías	78
Tabla 7.10 Resumen de resultados del balance hídrico de suelos	80
Tabla 7.11 Comparativo de valores de recarga potencial.....	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Actividades en pozos excavados inventariados.....	11
Figura 2.2 Inventario de pozos excavados	13
Figura 2.3 Ubicación de pruebas de infiltración y puntos de muestreo de suelos	15
Figura 2.4 Ubicación de sondeos eléctricos verticales	17
Figura 3.1 Columna estratigráfica esquemática regional. Tomado de Estévez, 2007.	21
Figura 3.2 Mapa Geológico Regional	22
Figura 3.3 Afloramiento de brecha con clastos de lava.	23
Figura 3.4 Afloramiento de brechas y lavas en la Playa Los Cóbano.....	24
Figura 3.5 Relictos de matriz erosionada y bloques de lava que afloran en el área de estudio.	25
Figura 3.6 Toba lítica con pómez en el margen del río Las Marías.....	26
Figura 3.7 Afloramientos de brechas en la zona de estudio.	27
Figura 4.1 Localización de puntos de muestreo de agua subterránea.....	29
Figura 4.2 Diagrama de Piper de muestras de agua subterránea.....	32
Figura 4.3 Diagrama de Schoeller de las muestras de agua subterránea.....	34
Figura 4.4 Localización de puntos de muestreo y sus respectivos diagramas de Stiff.	35
Figura 5.1 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico. Tomado de: Sánchez San Román, 2004.....	40
Figura 5.2 Disposición de electrodos en sondeos Schlumberger.....	41
Figura 5.3 Realización de Sondeos eléctricos verticales.	41
Figura 5.4 Ubicación de sondeos eléctricos verticales.	43
Figura 5.5 Perfiles geoelectrónicos de sondeos realizados en el área de estudio	44
Figura 6.1 Ilustración de la cuña salina normal en zonas costeras (Modificado de Barlow, 2003).....	51
Figura 7.1 Promedios mensuales Estación Acajutla periodo 1971 – 2000 (MAG)	58
Figura 7.2 Promedios mensuales de temperatura Estación Acajutla periodo 1971- 2000 (MAG)	59
Figura 7.3 Mapa de uso de suelo actual en el área de estudio.....	62
Figura 7.4 Localización de afloros en la cuenca del río Las Marías.....	63
Figura 7.5 Mapa de textura de suelo. Fuente: MARN, 2004.	66
Figura 7.6 Líneas de flujo y equipotenciales en la cuenca del río Las Marías.....	70
Figura 7.7 Distribución del coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente.	73

Figura 7.8 Coeficientes del terreno por pendiente y por cobertura vegetal.	74
Figura 7.9 Fracción que infiltra por textura del suelo	76
Figura 7.10 Coeficiente de infiltración resultante.	77
Figura 7.11 Mapa de Recarga Potencial utilizando los valores promedios de infiltración básica del suelo.	79
Figura 7.12 Mapa de valores de recarga potencial según método RAS.	82
Figura 7.13 Modelo conceptual longitudinal hidrogeológico cuenca del río Las Marías	84
Figura 7.14 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.	85
Figura 7.15 Grado de confinamiento del acuífero somero en el área de estudio.	86
Figura 7.16 Características litológicas de la zona no saturada.	87
Figura 7.17 Distancia al nivel del agua subterránea.	88
Figura 7.18 Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero superficial en la zona de estudio.	89

SIGLAS

ANDA Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados

MARN Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

CAPRE Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana.

CEL Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa.

GEOCEL División Geotermal de CEL

PLAMDARH Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos.

MAG Ministerio de Agricultura y Ganadería

INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

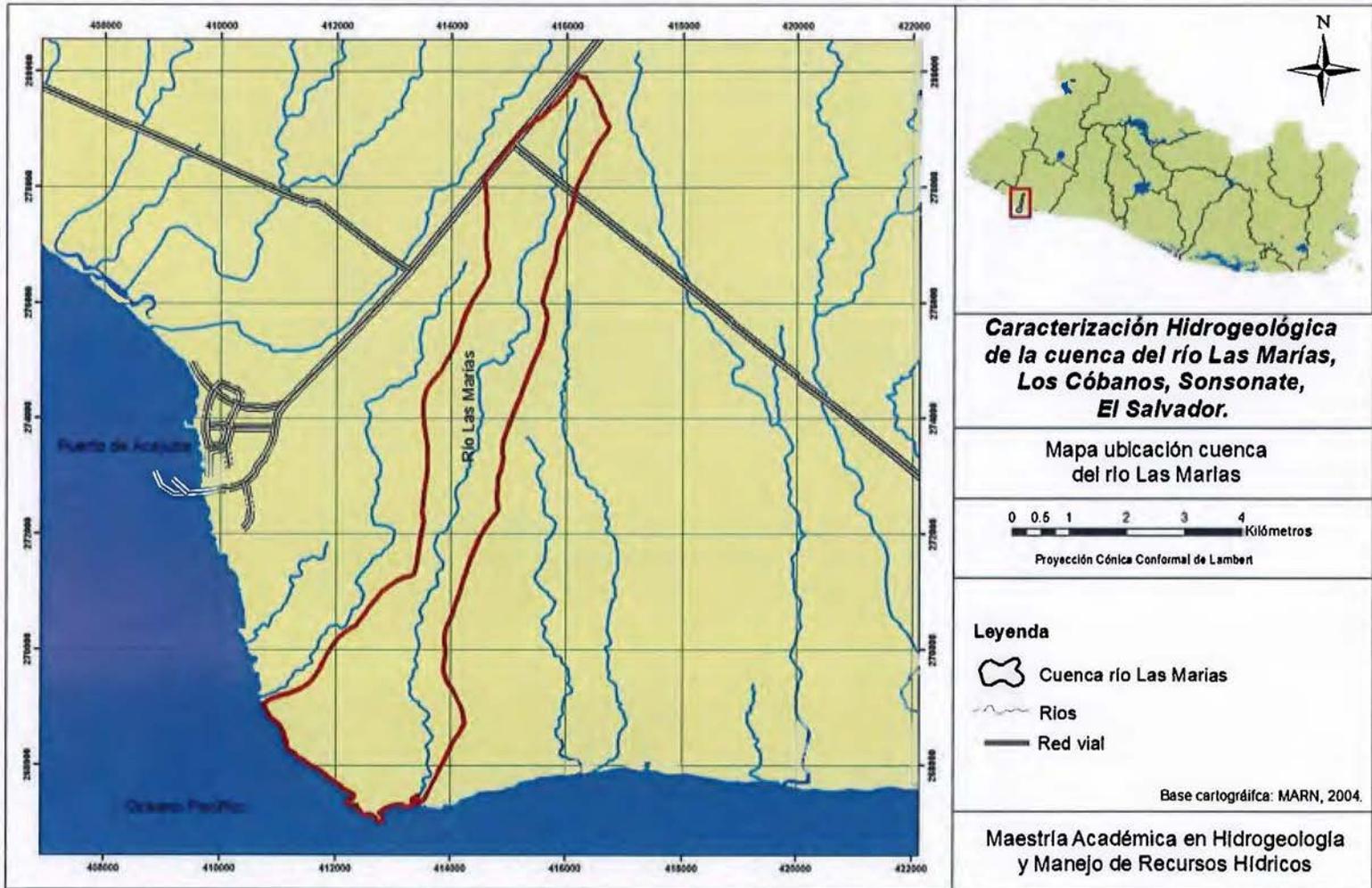
El área en que se desarrolló la investigación se sitúa en la Zona Occidental de la República de El Salvador, aproximadamente a 11 Km. al suroeste de la Ciudad de Sonsonate. El área de estudio es la Cuenca del río Las Marías y está localizada entre las coordenadas Lambert 266000 – 280000 Norte y 410000 – 417000 Este, el detalle de ubicación se muestra en la figura 1.1.

La cuenca de estudio se circunscribe dentro de la Región Hidrográfica "D" según la regionalización hidrográfica de El Salvador, también conocida como Región Hidrográfica Grande de Sonsonate – Banderas, geomorfológicamente la región está conformada por las unidades siguientes, el complejo volcánico Santa Ana – Izalco el cual es parte de la cadena volcánica meridional, la cordillera del Bálsamo o Cadena Costera, y la planicie costera de Sonsonate la cual está formada por los depósitos aluviales recientes transportados provenientes de las dos unidades geomorfológicas anteriores (PLAMDARH, 1981), en dicha unidad se ubica la Cuenca del río Las Marías.

La zona de estudio puede clasificarse como Sabana tropical caliente o Tierra caliente, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen. Los registros de temperatura indican un mínimo de 13 grados Celsius y un máximo de 39.5 grados Celsius registrado en la estación seca durante los meses de Noviembre a Abril, siendo la temperatura promedio de 27 °C (MAG, 2001).

La cuenca del río Las Marías pertenece a los Municipios de Acajutla y Sonsonate, ambos del Departamento de Sonsonate, la cuenca comprende un área de 19 km² y desemboca al mar en la playa Los Cóbanos que está situada al este del Puerto de Acajutla.

Figura 1.1 Delimitación del área de estudio.



La playa Los Cóbano es una extensión de playas doradas de arena de conchas y corales, muy poco usual en el país. La mayor importancia del Complejo Los Cóbano es la gran biodiversidad que esta área natural alberga, incluyendo las únicas formaciones coralinas que se conocen en la Costa del Océano Pacífico, con una extensión de 157 kilómetros de longitud dentro del mar. Este arrecife coralino único en el país y único entre México y Costa Rica, convierten a Los Cóbano en un destino turístico de primera categoría, en especial, para los practicantes del buceo, por ello el área cuenta con gran infraestructura hotelera y de restaurantes junto a la playa, además la zona cuenta con una vasta variedad de plantas y animales marinos que caracterizan a estos hábitat, los cuales a su vez, son fuente de subsistencia para las comunidades costeras que dependen de la pesca artesanal y la base para la industria pesquera. (MARN- USAID, 2007).

El uso de la tierra en la cuenca de estudio es diverso, tal y como se observa en la figuras 1.2 y 1.3; principalmente se dedica a usos agrícolas (cultivos de maíz, sorgo, frijol, caña de azúcar, etc.), ganaderos (establos, pastizales, etc.), parcelaciones habitacionales sin servicios de alcantarillas de aguas negras y lluvias, así como desarrollo turístico (hoteles, campos de golf, villas, etc.).



Figura 1.2 Imagen satelital de la zona costera de la cuenca de estudio.

(Fuente: <http://google.es/>.)



Figura 1.3 Usos de la tierra Cuenca del río Las Marías

Debido a que no existe un ordenamiento en el uso de la tierra y un plan de manejo de los recursos hídricos, las condiciones del ecosistema natural han sufrido un deterioro que podrían poner en riesgo de contaminación las aguas subterráneas y por ende la salud de la población local.

El presente estudio pretende contribuir al conocimiento de las características hidrogeológicas del acuífero superficial que utilizan las personas que viven en la zona como abastecimiento de agua, evaluar las condiciones de calidad del agua subterránea, así como también, identificar la posible cuña de intrusión salina.

1.2. ANTECEDENTES

En 1982 el Gobierno de El Salvador y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) finalizaron la redacción del Plan Maestro de Aprovechamiento y Desarrollo de los Recursos Hídricos (PLAMDARH) dentro del cual se realizó una evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico, la calidad y las demandas de agua potenciales de cada una de las Regiones Hidrográficas de El Salvador, todo ello con el fin de plantear las directrices de acción para los años siguientes en materia hídrico ambiental. Sin embargo, las estrategias no fueron llevadas a la práctica por la guerra civil desatada durante el periodo de 1980 – 1992.

En 1990, GEOCEL desarrolla el “Estudio de la Resistividad Eléctrica del Suelo para la Ubicación de Pozos de Agua en el Área de la Planta Termoeléctrica de Acajutla” con el objetivo de definir sitios de pozos de agua para el abastecimiento de dicha planta. En 1992 la misma institución desarrolló el “Estudio Hidrogeológico para Abastecimiento de Agua a la Central Térmica Acajutla” cuyo objetivo fue evaluar la disponibilidad y condiciones físico - químicas del recurso hídrico para el aprovechamiento del agua subterránea por medio de pozos para suplir la demanda de agua de operación de la Central Térmica de Acajutla. En ambos estudios, se concluye que la zona del Puerto de Acajutla no presenta las condiciones requeridas para la explotación que se pretendían realizar debido a la interferencia con otros pozos existentes y el riesgo de provocar intrusión salina en la zona.

La declaratoria del Complejo Los Cóbanos como la primer área marino costera protegida que se declara en El Salvador, sucede en noviembre de 2007, el área protegida comprende la franja costera desde la propiedad estatal de Santa Águeda o El Zope, ubicada a 2.5 Km. al sur del puerto de Acajutla, municipio del mismo nombre, hasta los manglares de Barra Salada, 20 Km. al sureste, en el municipio de Sonsonate. Incluye la playa y los manglares intermedios, con una extensión terrestre de 576 hectáreas (823 manzanas) y una porción de océano correspondiente a 20,736 hectáreas (29,622 manzanas) (MARN, 2007). El mapa de límites geográficos del Área Natural Marina Protegida de Los Cóbanos se presenta en Anexos.

En cuanto a la contaminación, investigadores de la Universidad Salvadoreña Alberto Masferrer en colaboración con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología El Salvador (CONACYT) desarrollaron una investigación, cuyo objetivo principal fue identificar los desechos que afectan los ecosistemas costero – arrecifal del arrecife rocoso de Los Cóbano para el periodo de septiembre a noviembre de 2007, en el cual señalan que los contaminantes encontrados en la Playa Los Cóbano son aguas residuales provenientes de los complejos turísticos de la zona y la contaminación en los ríos cercanos consiste en sustancias químicas utilizadas para lavar estanques de cultivo de camarones y peces.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El área de estudio de la investigación es la cuenca del río Las Marías, en esta se han identificado pozos excavados a profundidades de aproximadamente 5 metros, distribuidos en toda la cuenca, lo que evidencia la presencia de un acuífero superficial que sirve como fuente de abastecimiento de agua a la población local, este acuífero no ha sido caracterizado anteriormente, por lo que esta investigación versará acerca del conocimiento de las características hidrogeológicas del acuífero superficial y si la información lo permite investigar sobre la presencia de acuíferos más profundos en la zona, además de evaluar las condiciones de calidad del agua subterránea e identificar una posible cuña de intrusión salina.

Actualmente existe mucho interés en esta zona debido a que la Ley de Áreas Naturales Protegidas la declaró como Área Natural Marina Protegida, es por ello que la Universidad Nacional de El Salvador y organizaciones no gubernamentales, en un esfuerzo por proteger la biodiversidad natural del ecosistema del arrecife coralino están promoviendo las investigaciones del área en diferentes campos de manera que estas permitan la difusión de información y educación ambiental para la protección y descontaminación del ecosistema que a la vez permitan el uso sostenible de los recursos para beneficio de la población local. En este sentido, se enmarcará esta investigación, ser parte de las bases científicas que respalden la protección del área y el uso eficiente de los recursos del ecosistema.

La caracterización permitió establecer un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca, definiendo los parámetros geológicos e hidrogeológicos, dirección de flujo subterráneo, identificación de zonas de recarga y descarga.

A través de análisis físico-químicos y bacteriológicos, haciendo una comparación con las normas nacionales e internacionales, se determinó la calidad del agua que sirve de abastecimiento a los pobladores del área, puesto que no cuentan con servicio de agua potable. A la vez, los análisis físico-químicos permitieron realizar una caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea lo que facilitó identificar el origen del agua, mezclas o interconexiones de agua.



Figura 1.4 Pobladores utilizando el agua del río Las Mariás.

La evaluación de la carga salina existente en el acuífero permitirá deducir si existe intrusión salina, y si tales condiciones existen, se definirá el área de mezcla del agua dulce y el agua marina, para ello se utilizarán métodos geofísicos y análisis físico-químicos.

Finalmente, se plantearán recomendaciones en base a la investigación realizada para propiciar una gestión adecuada del recurso hídrico subterráneo en la zona de estudio.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo hidrogeológico conceptual y realizar un análisis de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la cuenca del río Las Marías a través de una evaluación hidrogeológica y geofísica, para brindar recomendaciones que permitan establecer el uso sostenible del recurso hídrico en la zona.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo 1

Caracterizar las condiciones hidrogeológicas y geofísicas del acuífero superficial presente en la cuenca del río Las Marías para elaborar el modelo hidrogeológico conceptual y analizar la vulnerabilidad a la contaminación.

Objetivo 2

Determinar la calidad del agua subterránea en la cuenca para identificar la potabilidad del recurso que abastece a la población de la zona.

Objetivo 3

Cuantificar la recarga hídrica potencial de la cuenca del río Las Marías con el propósito de evaluar si la cuenca es sobre explotada.

Objetivo 4

Evaluar el riesgo de intrusión salina en el área de la costa perteneciente a la cuenca del río Las Marías a partir de métodos geofísicos para conocer el impacto de la extracción por bombeo en el agua subterránea.

1.6. HIPÓTESIS

En la cuenca del río Las Marías existe un acuífero superficial de gran potencial con una recarga principalmente directa, el cual está siendo impactado por el inadecuado manejo de los recursos hídricos, lo que ha generado importantes grados de contaminación e intrusión salina en dicho acuífero que sirve de abastecimiento de agua a la población local.

1.7. LIMITANTES

Conforme se desarrolló la investigación se enfrentaron ciertas limitantes que condujeron la investigación a tomar acciones alternativas a las que inicialmente se plantearon para cumplir con los objetivos que se propusieron al iniciar esta investigación.

Inicialmente se creía que existían muchos pozos perforados dentro del área de estudio, pero en realidad solamente se identificaron 2 pozos perforados dentro de la zona, propiedad de las instalaciones hoteleras y del campo de golf ubicado dentro del área de estudio, al respecto no fue posible obtener la información de dichos pozos debido a que el propietario argumentó no contar con la información técnica de los pozos por haber sido perforados hace más de 25 años. Por lo que debió recurrirse a la inspección de la geología local más la información geofísica para construir el modelo conceptual de la cuenca del río Las Marías y correlacionarlo con el perfil geológico al que se tuvo acceso, el cual es de una propiedad privada en las cercanías de la cuenca Las Marías.

Para realizar las pruebas de bombeo, dado que no se contaba con equipo propio para la realización de las pruebas en los pozos de gran diámetro, se debió contar con la colaboración de los propietarios de los pozos que contaban con equipo de bombeo (3 en total de los pozos inventariados), quienes aportaron el equipo y el suministro energético para realizar las pruebas.

La apertura de los sondeos eléctricos verticales realizados idealmente se trató de cubrir distancias de 500 metros de $AB/2$, pero en algunos casos la amplitud debió ser menor a ello por no contarse con la disponibilidad de entrar en algunas propiedades privadas en las que no fue permitido el acceso.

Las condiciones de inseguridad que se experimentan en El Salvador han repercutido en la disposición y confianza de los pobladores para permitir el acceso a sus propiedades, por el temor que se percibe en la población en algunos lugares no fue posible acceder para realizar sondeos eléctricos, realizar verificación de las estructuras geológicas existentes o el inventario de pozos excavados.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA

Este capítulo comprende una descripción de la metodología empleada, este incluye tanto la recopilación de información disponible como el trabajo de campo realizado en el área de estudio, para la presente investigación se detalla a continuación por objetivos:

2.1. Objetivo 1

Para la caracterización de las condiciones hidrogeológicas del acuífero superficial presente en la cuenca del río Las Marías se hizo un compendio de información existente. La información que se recolectó referente a la zona de estudio comprende los mapas geológico e hidrogeológico de El Salvador ambos a escala 1:100,000 mapas topográficos del área de estudio a escala 1:25,000, también se tuvo acceso a perfiles litológicos de pozos perforados en los alrededores del área de estudio los cuales fueron proporcionados por la Unidad de Investigación e Hidrogeología de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANANDA). La recolección de esta información fue muy importante para conocer y correlacionar la geología regional con la verificación de estructuras geológicas en los afloramientos en el área de investigación.

Además se realizó un inventario de 74 pozos excavados, de los cuales con un GPS se obtuvieron las coordenadas geográficas y elevación de los mismos, además se realizaron las mediciones de profundidad, nivel estático y brocal para conocer sus niveles piezométricos. Los pozos inventariados durante esta investigación son pozos excavados artesanalmente, tienen profundidades de entre los 3 a los 10 metros de profundidad, carecen de rejilla, son parcialmente penetrantes y poseen diámetros desde 1.5 a 3 metros.

En el Anexo se presentan las tablas correspondientes al inventario de pozos, el cual se realizó en dos diferentes etapas, la primera durante los meses de diciembre de 2009 a enero de 2010, y la segunda durante los meses de agosto a septiembre de 2010.

De todos los pozos inventariados se seleccionaron 3 de ellos en diferentes zonas de la cuenca, aquellos que contaban con sistema de bombeo para facilitar las pruebas de

bombeo en pozos de gran diámetro, para obtener parámetros de conductividad y transmisividad del acuífero superficial, los registros de las pruebas de bombeo se muestran en Anexos y a partir del análisis de toda la información se evaluó la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero conforme a la metodología GOD.

2.2. Objetivo 2

Con la finalidad de determinar la calidad del agua subterránea se seleccionaron 10 pozos del inventario de fuentes de abastecimiento de la población, para recolectar muestras de agua, en la figura 2.1 se muestran imágenes de algunos de los pozos muestreados durante la etapa de campo y la ubicación del inventario de pozos realizado se presenta en la figura 2.2.



Figura 2.1 Actividades en pozos excavados inventariados

En cada sitio de muestreo se realizó una purga del pozo previo a la toma de muestras y se realizaron mediciones in situ de pH, temperatura y conductividad eléctrica con kits de campo proporcionados por la Coordinación de la Maestría en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos. A los pozos seleccionados se les realizó el muestreo para efectuarles análisis de Coliformes fecales, *Escherichia coli*, Iones mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-}), turbidez, dureza total y sólidos totales disueltos. Las 10 muestras de agua recolectadas se llevaron al laboratorio PROCAFÉ, el cual está debidamente equipado y acreditado para realizar los análisis de las muestras con el fin de

determinar la potabilidad de las muestras de agua subterránea con base en la normativa vigente en El Salvador, la Norma Salvadoreña Obligatoria para Calidad del Agua Potable NSO 13.07.01.04 (2006) y la Norma Regional de Calidad del Agua CAPRE (1994).

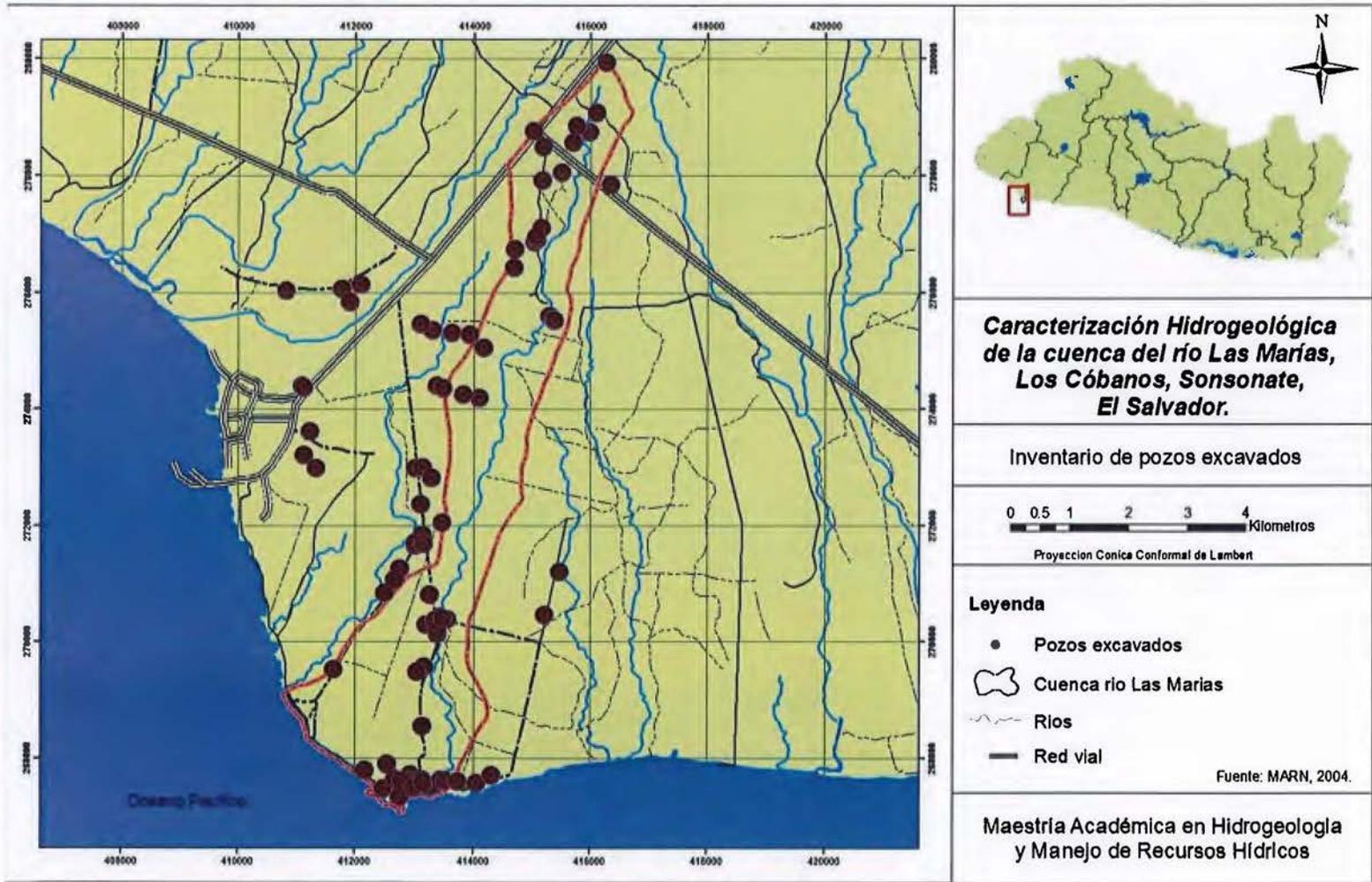
A partir de los resultados obtenidos de las muestras analizadas en laboratorio se realizó una clasificación química del agua conforme a las metodologías de diagramas poligonales de Stiff, Piper y Schoeller.

A continuación, en la Tabla 2.1 se presentan las coordenadas de ubicación de los pozos excavados seleccionados para el muestreo de agua subterránea y su posterior análisis.

Tabla 2.1 Pozos excavados utilizados para obtención de muestras

	Código	Ubicación	Norte	Este
1	PE-B25	Rancho Alfaro	269578.83	413157.04
2	PE-B13	Iglesia Católica	267720.00	412926.00
3	PE-B28	Rancho San Antonio	277097.00	415141.00
4	PE-B22	Potrero Miravalle	275520.77	415380.30
5	PE-B6	Hacienda Corral Nuevo	276861.00	415030.00
6	PE-B18	Establo Los Zometa	274251.00	413816.00
7	PE-B38	Rancho Paja	269342.5	411623.4
8	PE-B37	Lotificación Las Tablas	270439.66	413777.47
9	PE-B27	Pozo Shell	278767.03	415009.13
10	PE-A23	Lotificación Brisas del Pacifico	278745.47	415970.88

Figura 2.2 Inventario de pozos excavados
13



2.3. Objetivo 3

Para cuantificar la recarga hídrica potencial de la cuenca del río Las Marías se realizaron aforos diferenciales en el río, pruebas de infiltración en diferentes puntos que se consideraron representativos de los diferentes usos de la tierra dentro del área de estudio. Se realizó un muestreo de suelos de 8 sitios seleccionados para análisis y clasificación. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de Geotecnia de la Escuela Centroamericana de Geología, donde se realizó determinación de límites de Atterberg, granulometría, propiedades físicas. Además se determinó la capacidad de campo y punto de marchitez permanente en el Laboratorio de Suelos del INTA del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). La tabla 2.2 presenta el listado de los puntos seleccionados para pruebas de infiltración y recolección de muestras de suelo para análisis en laboratorio, y en la figura 2.3 se muestra la ubicación de los mismos.

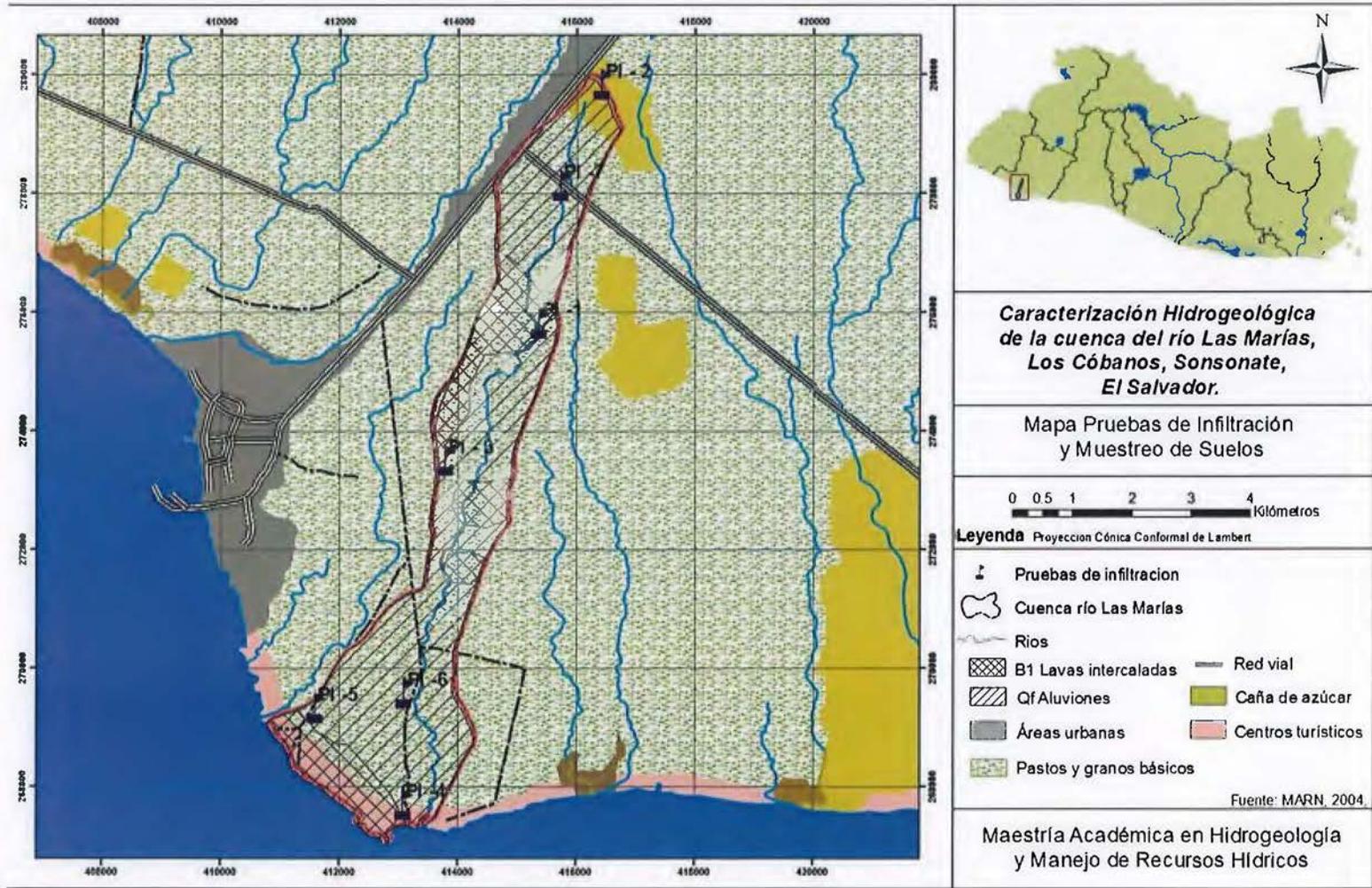
Tabla 2.2 Puntos de pruebas de infiltración y muestreo de suelos

Código	Norte	Este	Ubicación	Uso del suelo
PI - 1	275822	415399	Potrero Miravalle	Zacate
PI - 2	280037	416446	Rancho San Antonio	Caña de azúcar
PI - 3	273516	413816	Cooperativa	Granos básicos
PI - 4	267706	413101	Entrada a Los Cóbano	Semi - urbano
PI - 5	269342	411623	Hda. Rancho Paja	Pastos
PI - 6	269584	413119	Rancho José Alfaro	Pastos
PI - 7	278137	415758	Potrero Las Marías	Pastos
PI - 8	275039	414191	Lotificación Las Marías	Semi- urbano

Los registros de las pruebas de infiltración y sus gráficas respectivas se presentan en Anexos para su consulta.

Se obtuvieron además, los registros pluviométricos, evapotranspiración y de temperatura de la estación climatológica Acajutla (T06) del periodo 1971 - 2000, cuyos promedios mensuales se muestran en las figuras 7.1 y 7.2. Todo ello con el objeto de recolectar la información necesaria para hacer un balance hídrico aplicando la metodología de Schosinsky.

Figura 2.3 Ubicación de pruebas de infiltración y puntos de muestreo de suelos.
15



2.4. Objetivo 4

La evaluación del riesgo de intrusión salina en el área de la costa se realizó con base en el análisis de sondeos eléctricos verticales en conjunto con los análisis fisicoquímicos realizados. Para ello se realizaron 12 sondeos geoelectrónicos en los sitios que se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Sondeos eléctricos verticales realizados

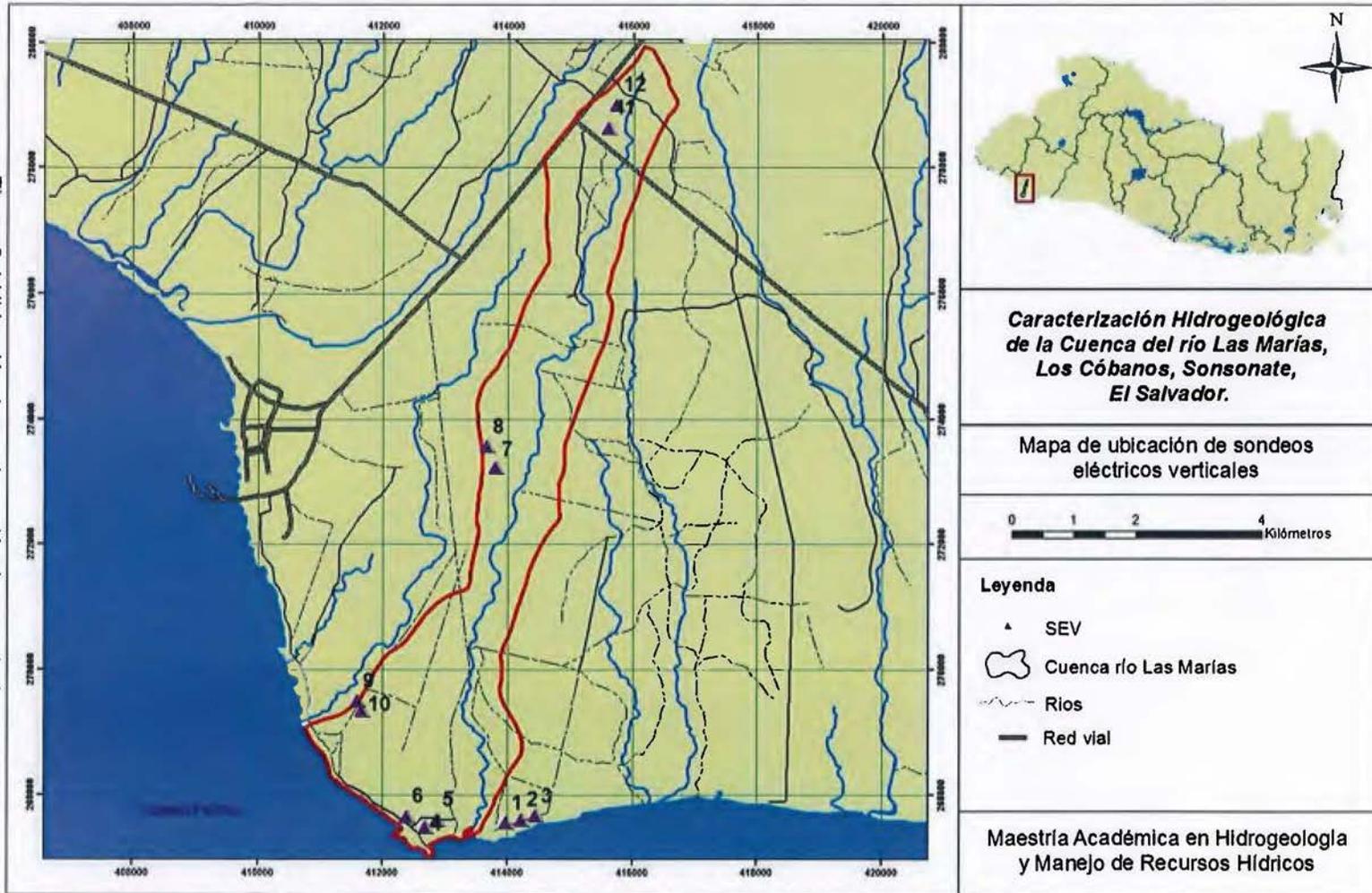
No. Sondeo	AB/2 (m)	Norte	Este
SEV 01	260	267554.17	413956.15
SEV 02	260	267602.54	414196.87
SEV 03	500	267672.45	414431.64
SEV 04	180	267484.66	412680.96
SEV 05	260	267603.90	412861.78
SEV 06	260	267663.90	412380.87
SEV 07	260	273239.68	413797.57
SEV 08	260	273568.99	413645.34
SEV 09	500	269501.13	411593.27
SEV 10	125	269356.46	411661.94
SEV 11	260	278639.19	415576.79
SEV 12	260	279010.57	415716.25

La localización de los sondeos geoelectrónicos se observa en la figura 2.4.

Para la elaboración de los mapas y la representación de los resultados obtenidos se utilizó el sistema de información geográfica ArcGIS de la misma forma que para esquematizar el modelo conceptual de la zona de estudio.

Los registros de los sondeos eléctricos verticales realizados y sus respectivos gráficos se presentan en Anexos

Figura 2.4 Ubicación de sondeos eléctricos verticales.



CAPITULO 3. GEOLOGÍA

En el presente capítulo se propone una descripción de la geología del área de estudio, basada en la recopilación de la información bibliográfica, evaluación de estructuras geológicas conforme a los afloramientos observados en la zona de estudio y sus alrededores, correlación de las descripciones litológicas que se obtuvieron de los pozos perforados en la zona, también con base en el Mapa Geológico de El Salvador escala 1:100,000 desarrollado en 1971 por Misión Geológica Alemana en colaboración con el Centro de Investigaciones Geotécnicas del Ministerio de Obras Publicas de El Salvador.

3.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se sitúa en la denominada Región Hidrográfica "D", la cual está definida geomorfológicamente por tres unidades que son: al noroeste el Complejo Volcánico Santa Ana – Izalco, al sur la Planicie Costera de Sonsonate y al este la Cordillera del Bálsamo (PLAMDARH, 1981).

El Complejo Volcánico Santa Ana – Izalco es parte de la cadena volcánica meridional de formación cónica, con un rumbo Este – Oeste. Este grupo de volcanes están formados por materiales del Cuaternario encontrándose en estas las rocas volcánicas jóvenes, tales como flujos de lava con una alta permeabilidad (Ibid).

La llamada Planicie Costera de Sonsonate, está caracterizada por rocas de origen volcánico, cubriendo un 75% del área se tiene depósitos sedimentarios del Cuaternario y un 25% por rocas volcánicas del Terciario. Los centros de origen de los materiales volcánicos del Terciario se desconocen, en parte fluyeron por fisuras, mientras que las rocas volcánicas del Cuaternario fueron expulsadas por los centros volcánicos ubicados al norte del área de investigación. Se dice que las rocas volcánicas han sido transportadas por las corrientes de agua de las partes altas a las bajas, donde han sido depositados dando origen a los estratos de la Planicie Costera. (PLAMDARH, 1981)

Stirton y Gealey (1949) describen la Cordillera del Bálsamo como un enorme bloque dislocado que se inclina suavemente hacia el Océano Pacífico. Indican además, que la

mayor parte de esta región consiste en rocas volcánicas terciarias (Plioceno), esencialmente de lavas andesíticas y basálticas, y de corrientes lodosas volcánicas con grandes bloques rodados.

El área de investigación está situada en la Planicie Costera de Sonsonate, la cual según descripción del PLAMDARH (1981) está formada por depósitos aluviales recientes transportados por las corrientes de agua, provenientes del Complejo Volcánico Santa Ana – Izalco y en parte de la Cordillera del Bálsamo, la llanura está compuesta por gravas, arenas, limos y arcillas que descansan sobre tobas.

Tectónicamente la Planicie Costera se originó por un sistema transversal con una transcurrencia que intercepta la Fosa Central y la divide en varios segmentos también transversales, el área se ha desarrollado en un sistema tectónico de este tipo, dando lugar a una amplia extensión de hundimiento y separación de la continuidad de la unidad geomorfológica Cadena Costera (Estévez, 2007).

La Región Hidrográfica “D” presenta características morfológicas propias de los fenómenos tectónicos volcánicos como levantamientos, erupciones volcánicas, hundimientos que han sucedido a través de diferentes edades geológicas. (PLAMDARH, 1981).

Según el Mapa Geológico de El Salvador desarrollado en 1971 por Misión Geológica Alemana regionalmente se distinguen dos formaciones geológicas: la Formación San Salvador que comprende el periodo holoceno al Pleistoceno inferior perteneciente a la Era Cuaternaria y la Formación Bálsamo que comprende el periodo Plioceno al Mioceno perteneciente a la era Terciaria. En la figura 3.1. se muestra la geología regional.

Formación San Salvador

Los materiales que afloran en el área investigada correspondientes a la Formación San Salvador, han sido descritos como depósitos sedimentarios, piroclastos retrabajados andesíticos y epiclastitas volcánicas (tobas color café) (CEL, 1984). Provenientes del volcán de Izalco se componen de rocas pequeñas, fragmentos de pómez, dacita y

andesita. De estructura suelta y textura clástica en el caso de los piroclastos, en cambio las tobas poseen una estructura semicompacta y arenosa (Machuca, 2003).

Formación Bálsamo

Está conformada por lavas andesíticas y basálticas, las lavas andesíticas con plagioclasas, presentan diaclasas y procesos de meteorización, las hay tanto escoriáceas como de textura masiva.

Las lavas basálticas presentan estructura compacta y microgranuda, las cuales se describen como una capa de basalto columnar (Machuca, 2003).

Las tobas terciarias están por lo regular fundidas, englobando materiales como clastos, cenizas y bloques en una matriz de ceniza o polvo volcánico (Machuca, 2003), se han descrito como tobas brechosas, tobas interestratificadas y pequeños flujos de lavas, cuyo origen se asocia al relicto volcánico El Mojón (CEL, 1984).

La secuencia estratigráfica que se muestra a continuación representa la geología regional, la cual fue elaborada con información litológica de pozos perforados en Acajutla, para el Estudio Hidrogeológico del Área De Planta de Almacenamiento y Distribución de Combustibles Derivados del Petróleo en Acajutla (Estévez, 2007).

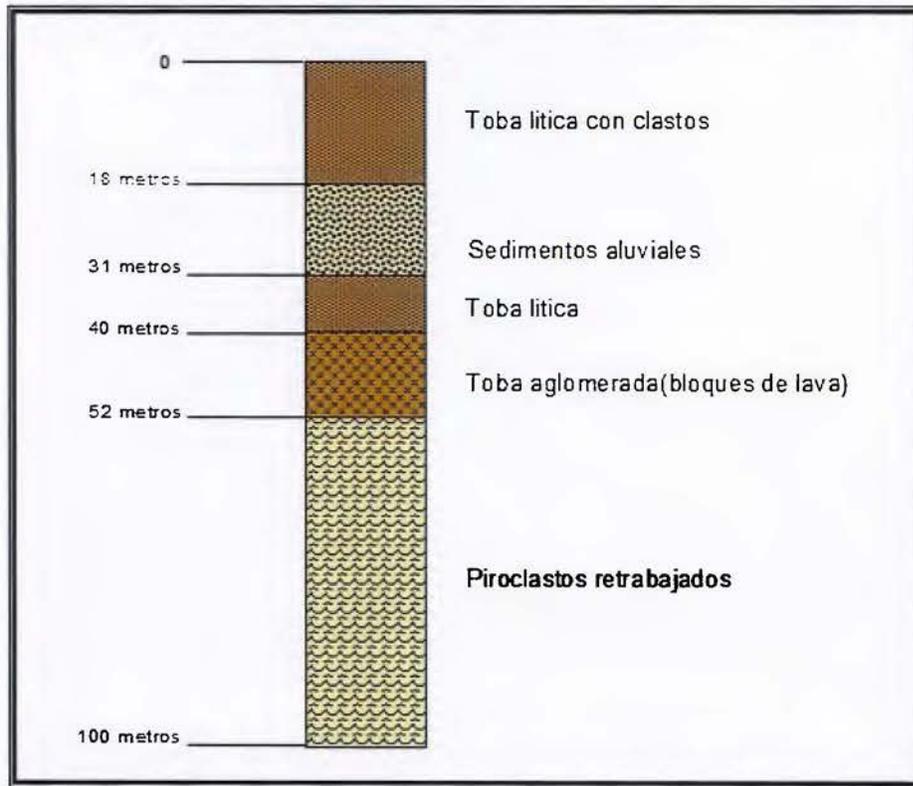


Figura 3.1 Columna estratigráfica esquemática regional. Tomado de Estévez, 2007.

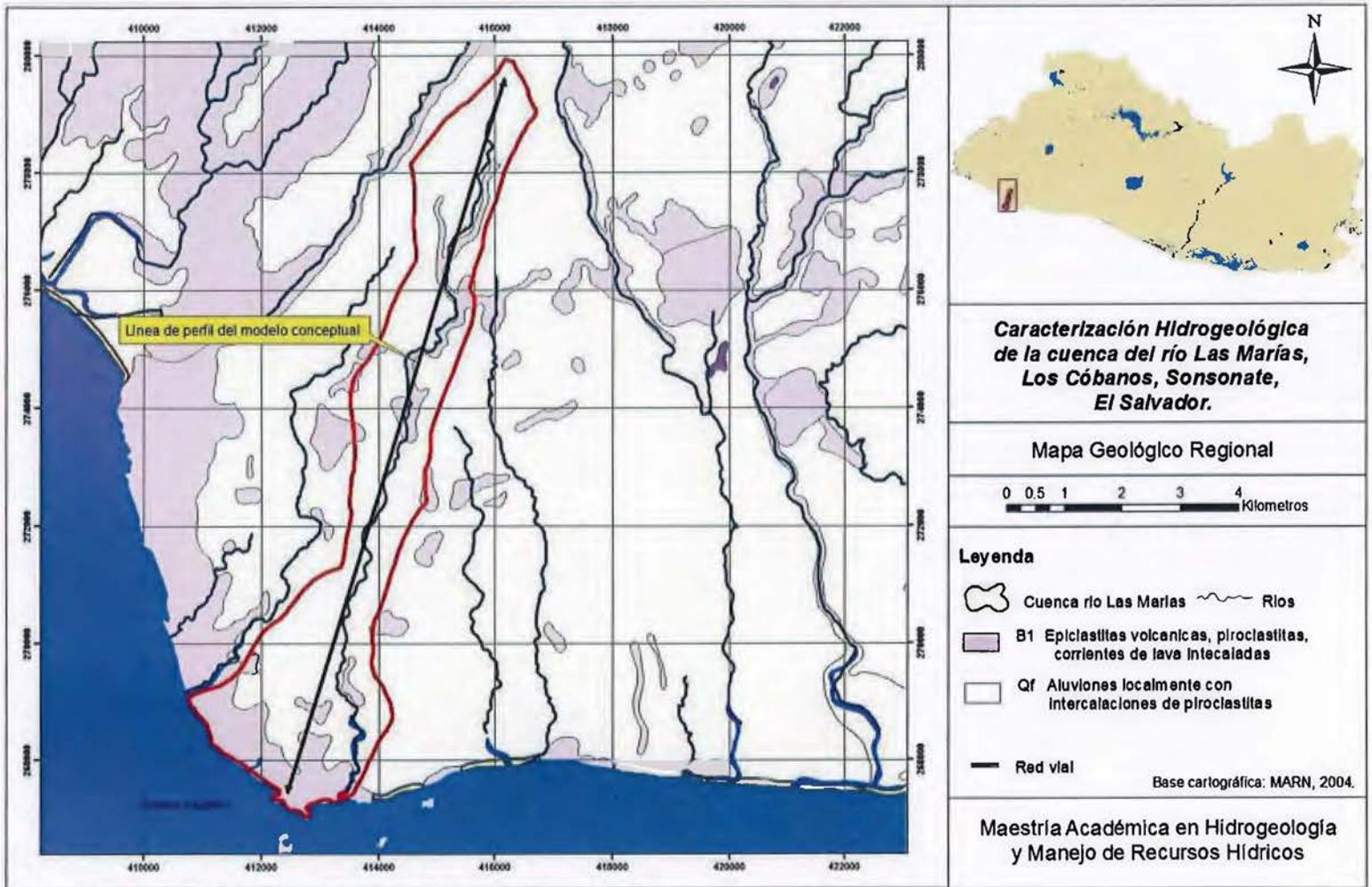


Figura 3.2 Mapa Geológico Regional.

3.2. GEOLOGÍA LOCAL

La verificación de la geología específica de la cuenca del río Las Marías se desarrolló mediante inspecciones de estructuras en campo en diferentes etapas con la experticia de las geólogas Ingrid Vargas Azofeifa, Marita Alvarado Velas y Michelle Arias Fernández, contando para ello con el Mapa Geológico de El Salvador como base, el cual señala que en el área de estudio se tienen los estratos de la Formación Bálsamo (Wieseman, 1975) que comprende el período Plioceno al Mioceno perteneciente a la Era Terciaria, y los estratos de la formación San Salvador, que comprende el período Holoceno al Pleistoceno inferior de la Era Cuaternaria. (Ibid).



Figura 3.3 Afloramamiento de brecha con clastos de lava.

El afloramiento de brechas que se observa en la figura 3.3 presenta clastos de lava andesítica color gris con plagioclasas, los clastos son centimétricos inmersos en una matriz rojiza debido a rastros de meteorización. Este es el afloramiento más representativo encontrado en el área por su tamaño.

Las brechas volcánicas vuelven a encontrarse en algunos afloramientos masivos en la playa Los Cóbanos, en la parte baja de la cuenca del río Las Marías, este consiste en un aglomerado brechoso de lavas con textura fina andesítica color gris. En algunos sectores la brecha se observa de color rojizo conteniendo fragmentos de lava porfírica color gris subangulares y otros color rojizo, porfíricos vacuolares de composición andesítica. Algunas imágenes de estos se muestran a continuación en la figura 3.4.



Contacto de brechas y lavas Playa Los Cóbanos.



Brecha volcánica con fragmentos de lava.



Lava masiva que sobreyace la autobrecha.



Lava andesítica con vacuolas.

Figura 3.4 Afloramiento de brechas y lavas en la Playa Los Cóbanos.

Como se observa en las imágenes de la figura 3.4 se tiene una autobrecha en la base en ella están inmersos fragmentos de lava de composición andesítica escoriácea, algunos color gris y otros rojizos, tamaño centimétrico. La sobreyace una lava masiva con algunas zonas escoriáceas de colores negros y rojizos, algunas tienen vacuolas alineadas en dirección Nor-Este.

En el área de estudio se encuentran también algunos cerros relictos evidencia de la Formación El Bálsamo, estos son lomas onduladas compuestos con bloques subangulares a angulares. Los bloques que afloran en superficie donde la matriz ha sido erosionada, son lavas basálticas - andesíticas sobresalen fenocristales de plagioclasa en las que se observan dos tipos de textura, unas escoriáceas y otras masivas. Como se observa en las figura 3.5 que se muestra a continuación.



Figura 3.5 Relictos de matriz erosionada y bloques de lava que afloran en el área de estudio.

Dentro del área de estudio y en sus alrededores también se evidencia la presencia de tobas, las cuales aparecen como depósitos soldados y algunos afloramientos en las márgenes del río Las Marías. Los depósitos en el cauce del río Las Marías consisten en rocas meteorizadas, heterogéneas, compuesta por líticos tobáceos centimétricos de color beige predominantemente, existen otros líticos color rojizo de textura porfirítica en menor cantidad, además contienen fragmentos de pómez meteorizada, como se muestra en la figura 3.6. Por lo que se considera que esta roca es una toba lítica con pómez en la cual es común encontrar pequeños pozos excavados en la margen del río Las Marías realizados por los vecinos de la zona, cuya profundidad no excede 1 metro y de los cuales se abastecen de agua para su consumo.



Pozo excavado en toba en margen del río.



Toba lítica con pómez.

Figura 3.6 Toba lítica con pómez en el margen del río Las Marías.

Hacia el oeste del área de estudio sobre la carretera La Hachadura se observa un afloramiento de toba lítica retrabajada, casi no tiene fragmentos de pómez, sin embargo tiene líticos centimétricos, grises y rojizos, subredondeados, se observan algunos fragmentos tabulares vítreos (negros) como se observa en la figura 3.7 existe un contacto visible entre los depósitos, lo cual puede ser indicio de dos eventos diferentes.

En el mismo afloramiento se identifica un contacto el cual es un depósito brechoso color gris negruzco, este es un depósito masivo compuesto por una matriz de ceniza con líticos

subangulares y algunos parches vítreos negros, este depósito no tiene pómez pero si fragmentos escoriáceos.



Figura 3.7 Afloramientos de brechas en la zona de estudio.

De las inspecciones realizadas en campo se pudo constatar que la geología local está compuesta por rocas volcánicas de dos formaciones: las brechas y lavas andesíticas que se encuentran en forma de cerros relictos y al sur de la cuenca del río Las Marías corresponden a la formación Bálsamo, mientras que las tobas líticas con pómez que cubren la mayor parte de la cuenca pertenecen a la formación San Salvador.

CAPITULO 4. HIDROGEOQUÍMICA

En el presente capítulo se presentan los resultados e interpretación de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos realizados a las muestras de agua subterránea recolectadas, con el fin de utilizarlos junto con la geología e hidrogeología para entender la dinámica del acuífero, así como evaluar la condición de calidad de los recursos hídricos subterráneos, ya que los pozos analizados en el área de estudio son explotados principalmente con el objetivo de abastecer a la población local de la Cuenca Las Marías.

En las muestras de agua subterránea recolectadas se analizaron los iones mayores fundamentales que caracterizan la geoquímica natural del agua, con objeto de mostrar las características químicas principales del agua y realizar una clasificación química de ellas, además se muestra la representación gráfica de la composición química aplicando los diagramas de Piper, Stiff y Schoeller.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los resultados de los análisis microbiológicos y los análisis fisicoquímicos realizados se muestran en la Tabla 4.1 Resultados de análisis del agua subterránea. Aplicando el principio de electroneutralidad se calculó el balance de cargas entre aniones y cationes, para comprobar la validez y exactitud de los análisis realizados.

El principio de electroneutralidad, es el cálculo del porcentaje de error resultante de la concentración de aniones y cationes, medido en miliequivalentes por litro (meq/L), expresado de la siguiente forma:

$$epm = \frac{(\sum z_a m_a - \sum z_c m_c) \times 100}{(\sum z_a m_a + \sum z_c m_c)}$$

Se considera aceptable obtener hasta un 5% de error en los resultados de laboratorio, y como se observa en la Tabla 4.1 los resultados obtenidos en este estudio son menores al 5%, por lo que se consideran que los resultados son satisfactorios. En la figura 4.1 se muestra la localización de los pozos seleccionados para el muestreo de agua subterránea.

Figura 4. 1 Localización de puntos de muestreo de agua subterránea.

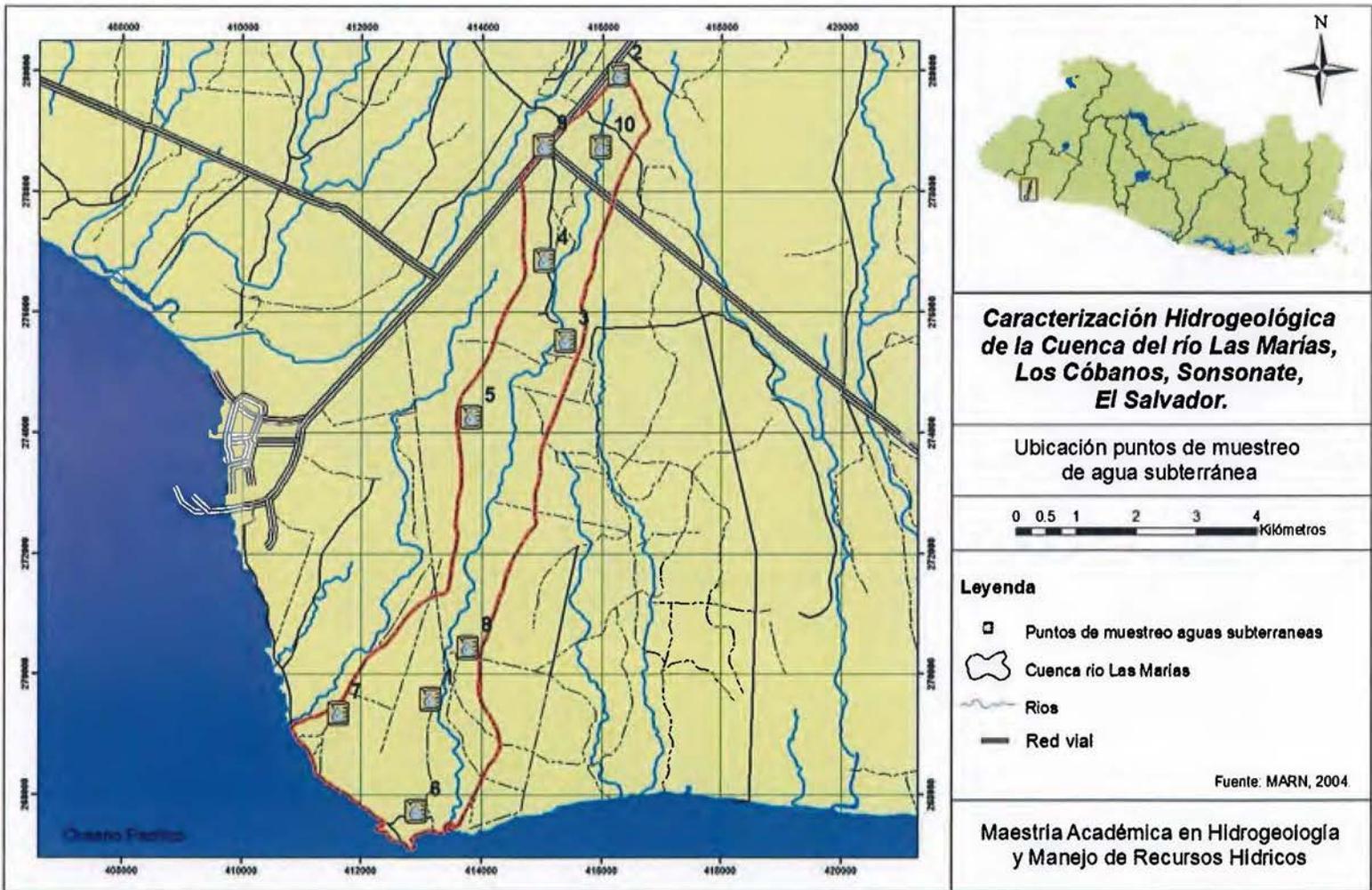


Tabla 4.1 Resultados de análisis del agua subterránea

Muestra No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pozo	PE-B25	PE-B13	PE-B28	PE-B22	PE-B6	PE-B18	PE-B38	PE-B37	PE-B27	PE-A23
Coliformes fecales (NMP)	1600	140	9000	30	30	130	2	110	4	140
Escherichia coli (NMP)	1600	4	350	30	17	130	2	110	4	26
Temp. (°C)	27,6	29,7	28,7	28,8	27,4	27,4	29,0	28,2	32	27,8
pH	7,8	7,5	7,46	7,45	7,70	7,49	7,84	7,5	7,42	7,47
CE (µS)	780	390	630	230	210	368	390	290	460	210
Turbidez (UNT)	2,42	< 1,0	< 1,0	4,2	18,2	1,2	< 1,0	2,4	1,8	1,8
Dureza total (mg/l)	401,4	121,4	435,8	88,9	116,1	216,9	152,5	111,1	202,3	124,3
STD (mg/l)	1206,0	480,0	1120,0	360,0	250,0	724,0	560,0	242,0	480,0	312,0
Ca ²⁺ (mg/l)	80,0	37	102,0	19,3	32,8	52,1	38,0	30,0	53,0	31,3
Na ⁺ (mg/l)	113,0	50,2	37,0	21,0	12,9	35,2	95,0	35,9	47,5	23,1
Mg ²⁺ (mg/l)	49,0	13,3	44,0	9,9	8,3	21,1	14,0	8,8	17,0	11,2
K ⁺ (mg/l)	8,0	4,1	2,7	0,6	5,7	1,5	3,6	0,6	4,6	2,0
Fe ²⁺ (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,15	0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cl ⁻ (mg/l)	184,4	60,3	141,8	39,8	9,2	39,2	68,1	26,2	31,9	12,8
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	337,5	179,0	262,5	52,1	151,5	229,0	238,5	172,5	262,5	187,5
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	69,8	19,1	103,8	45,2	13,0	29,6	44,7	22,3	59,6	16,3
NO ₃ ⁻ (mg/l)	9,27	2,7	10,0	4,64	0,4	13,2	1,8	0,3	0,7	1,4
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0,23	0,34	0,11	0,11	0,46	0,11	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1
E. N (%)	3,76	3,27	0,37	3,77	0,22	3,77	3,64	2,98	1,71	3,21

4.2. REPRESENTACIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

A continuación se presentan los diagramas de Piper, Stiff y Schoeller con el propósito de realizar una interpretación geoquímica de las aguas subterráneas de la Cuenca del río Las Marías.

El diagrama de Piper se utiliza para mostrar las concentraciones de iones mayores en el agua, en un diagrama trilinear que representa los porcentajes de composición de cationes y aniones. Cada vértice de triángulo representa el 100% de concentración de uno de los tres constituyentes del triángulo de aniones y cationes. La figura de diamante entre los dos triángulos se utiliza para representar la composición del agua con respecto a ambos, cationes y aniones.

El resultado en el triángulo de los cationes se proyecta hacia el diamante con una línea paralela al lado del magnesio y el resultado del triángulo de aniones se proyecta con una línea paralela al lado del sulfato, así la intersección de ambas líneas se dibuja sobre la figura de diamante y de esta manera se obtiene la clasificación del agua basado en los iones dominantes. La ventaja de este diagrama es la posibilidad de representar varios análisis en un mismo gráfico y evaluar sus semejanzas (Fetter, 2001).

De acuerdo al diagrama mostrado en la figura 4.2, se observa que las aguas subterráneas del área de estudio presentan por el lado de los cationes una composición cálcica – magnésica, por el lado de los aniones se presentan como bicarbonatadas, y algunas con tendencias sulfatadas, por lo que se observa que la composición química característica del agua subterránea de la zona es bicarbonatada cálcicas lo cual denota aguas jóvenes o recientes de poca evolución química, mientras que las muestras cloruradas obedecen a efectos locales debidos a la actividad antropogénica y agropecuaria que se desarrolla en la zona.

La clasificación de las aguas de cada pozo muestreado se presenta según la Tabla 4.2.

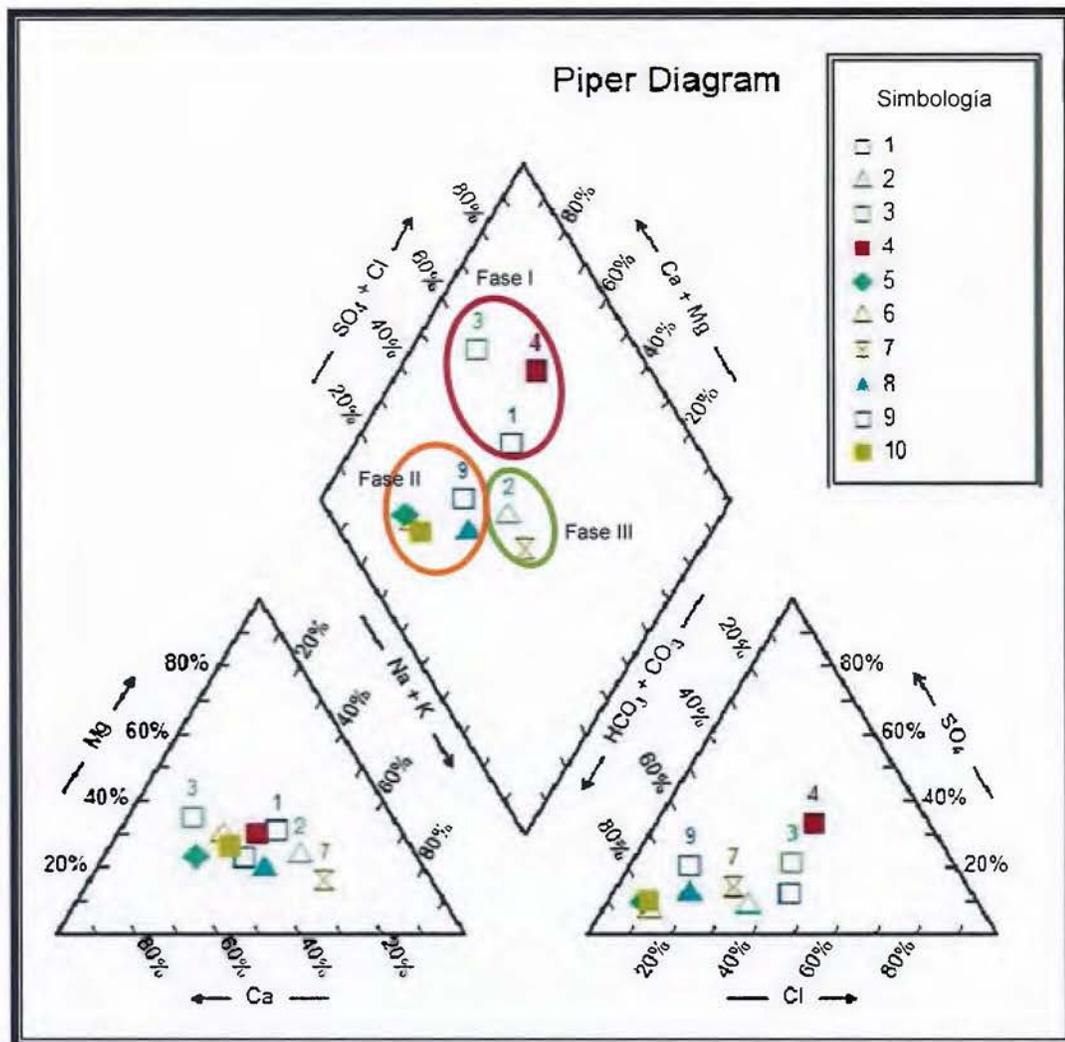


Figura 4.2 Diagrama de Piper de muestras de agua subterránea.

En el diagrama de Piper se pueden reconocer tres fases; la primera en la que se agrupan las muestras 1, 3 y 4 es una fase clorurada, en la cual por encontrarse las últimas en la porción superior de la cuenca se descarta la mezcla con agua marina, y por encontrarse las tres muestras en áreas de potreros se considera que esta condición ha sido influenciada por contaminación con los desechos del ganado.

En una segunda fase se distinguen las muestras bicarbonatadas cálcicas, en las que se ubican las muestras 5, 6, 8, 9 y 10, esta condición es característica de las aguas jóvenes

lo cual puede inferirse de que el acuífero es somero y la recarga del mismo es local. Y una tercera fase de las muestras 2 y 7 que se observan como bicarbonatadas sódicas.

Tabla 4.2 Clasificación de aguas naturales muestreadas

	Código	Clasificación
1	PE-B25	Bicarbonatada clorurada sódica
2	PE-B13	Bicarbonatadas sódica
3	PE-B28	Bicarbonatada clorurada cálcica
4	PE-B22	Clorurada cálcica
5	PE-B6	Bicarbonatada cálcica
6	PE-B18	Bicarbonatada cálcica
7	PE-B38	Bicarbonatada sódica
8	PE-B37	Bicarbonatada cálcica
9	PE-B27	Bicarbonatada cálcica
10	PE-A23	Bicarbonatada cálcica

La clasificación del diagrama de Schoeller fue propuesta en 1955, en ella se tienen en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion en los diagramas de columnas verticales, usualmente se representan los valores en miliequivalentes por litro (meq/l), en una escala logarítmica de distintos aniones y cationes, o la sumatoria de ellos, de manera que se facilite la asociación por similitudes en la composición química del agua y pueda entenderse su evolución.

El diagrama de Schoeller que se muestra en la figura 4.3, se obtuvo de graficar los resultados de cationes y aniones del análisis de las muestras de agua subterránea recolectadas. Como se observa la muestra No.4 claramente puede distinguirse en el diagrama de Schoeller puesto que presenta una composición clorurada cálcica que la diferencia de las bicarbonatadas cálcicas y algunas sódicas.

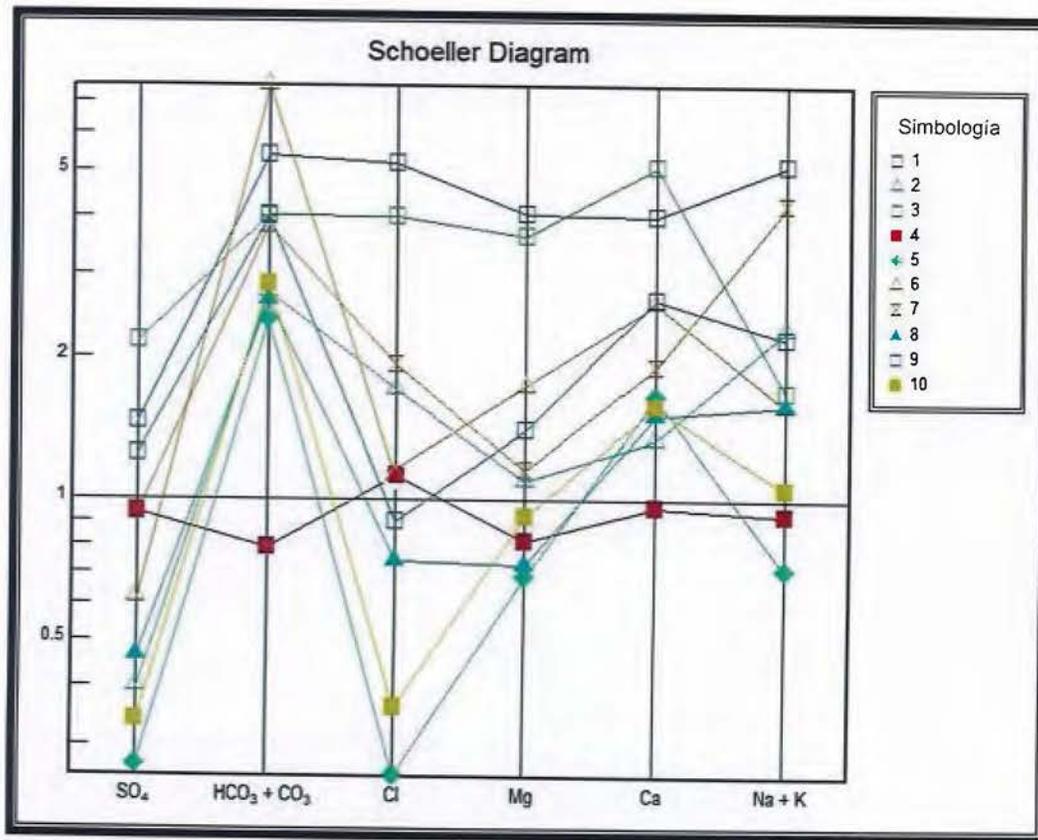
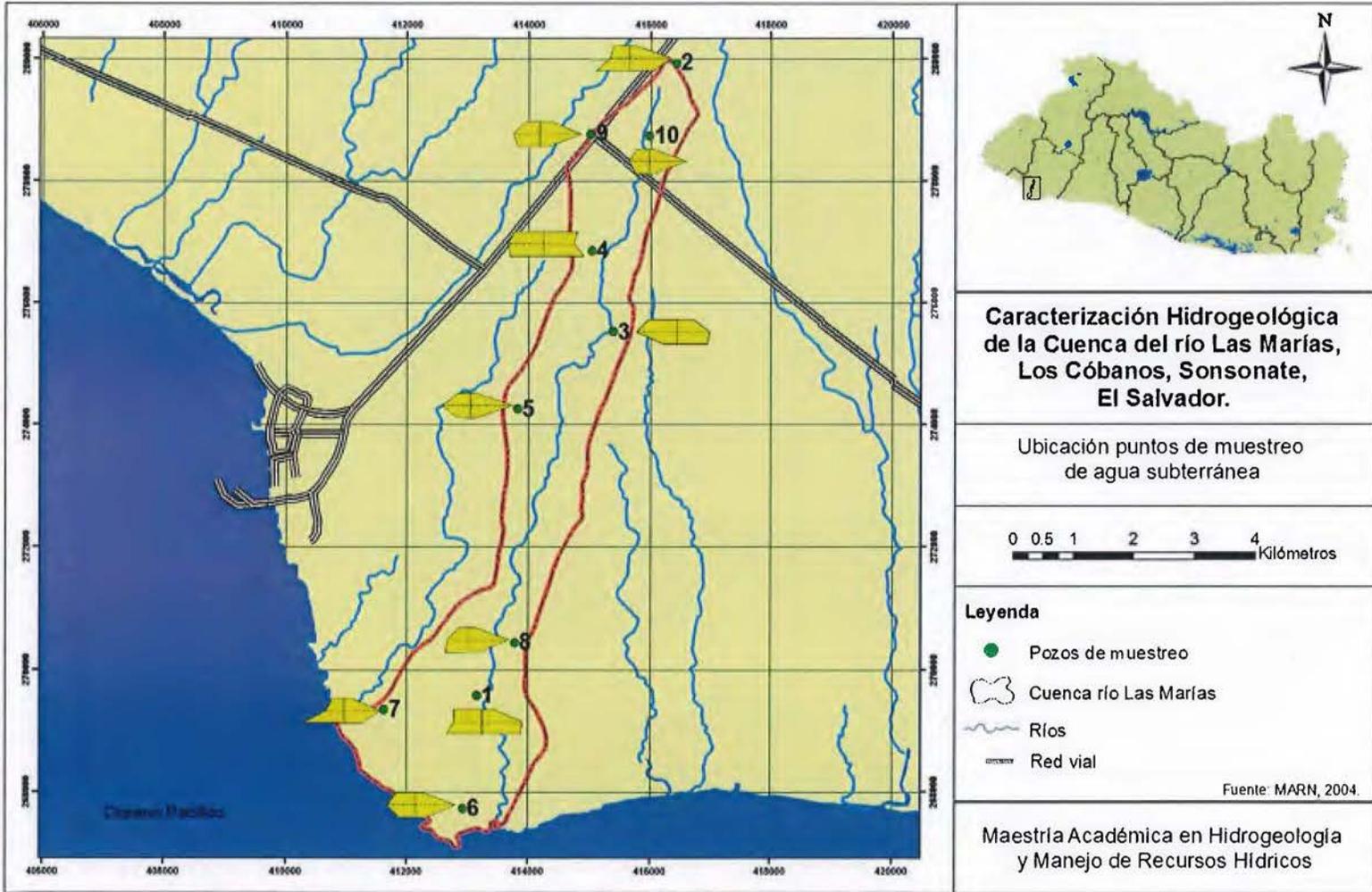


Figura 4.3 Diagrama de Schoeller de las muestras de agua subterránea.

El diagrama de Stiff es una representación poligonal de la concentración de cationes y aniones, los cationes son dibujados sobre ejes horizontales al lado izquierdo del eje vertical mientras que los aniones son dibujados al lado derecho del eje vertical. Estos diagramas son muy útiles para hacer comparaciones visuales rápidas entre muestras de aguas de diferentes fuentes. La distancia horizontal desde el eje vertical está basada en el número de miliequivalentes por litro de cada anión o catión (Fetter, 2001).

En la figura 4.4 se muestran los diagramas de Stiff ubicados en los puntos de muestreo, en esta figura se puede observar que la composición regular de las aguas es bicarbonatada cálcica y que, las muestras que presentan otras características se debe a la actividad antropogénica, específicamente agropecuaria principalmente por el uso intensivo de cloruro de sodio para la alimentación del ganado y fertilizantes así como de la disposición muy cercana de las letrinas respecto de los pozos en las áreas semiurbanas.

Figura 4.4 Localización de puntos de muestreo y sus respectivos diagramas de Stiff.



4.3. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua se evaluó conforme a sus características fisicoquímicas y microbiológicas, y la aptitud de uso para la que se requiere. De tal manera que dependiendo del uso, las normativas establecen valores recomendados y valores máximos admisibles de la concentración en el agua para diferentes parámetros. Dado que el agua extraída de los pozos es la principal fuente de abastecimiento de la población local, es necesario que cumpla con ciertos requisitos que garanticen la salud humana.

Para evaluar la aptitud del agua para consumo humano los resultados de los análisis se evaluaron a la luz de la Norma Regional de Calidad del Agua CAPRE (1994) y la Norma Salvadoreña Obligatoria para Calidad del Agua Potable NSO 13.07.01.04 (2006) establecida por el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS). Los parámetros contemplados por dichas normativas se presentan en el Anexo de este documento.

Como se observa de los resultados de los análisis, todas las muestras sobrepasan los límites máximos permisibles bacteriológicos, en especial las muestras No.1 y No.3 que presentan valores muy altos respecto de los estándares. Es importante notar que el sitio de la muestra No.3 está ubicado en una zona de establo de ganado (lechería) en la que muy probablemente los excrementos del ganado sean la fuente de contaminación del agua, en similar condición se encuentra muestra No.1 es un área de potrero con una casa donde se localiza la letrina a muy pocos metros del pozo lo cual podría ser un fuerte foco de contaminación para el pozo, esto basado en que ambos pozos presentan resultados de nitratos (NO_3^-) en concentraciones superiores al promedio esperado para agua subterránea.

Las condiciones de acidez (pH) son aceptables en todas las muestras, ya que se encuentran en el rango de 7,42 a 7,84.

En el caso de la turbidez, la mayoría de las muestras cumplen con los requisitos requeridos excepto la muestra No.5, que es la única que presenta un valor de 18 UNT y por tanto excede el límite de máximo permisible establecido tanto por la norma CAPRE como por la Norma Salvadoreña.

La dureza en la mayor parte de las muestras es menor a los 400 mg/l establecidos por la norma CAPRE, sin embargo los valores resultantes de las muestras No.1 y No.3 son relativamente altos, pero dado que la Norma Salvadoreña establece un valor máximo permisible de 500 mg/l se considera que el valor es aceptable.

Debido a la actividad antropogénica en la zona costera se sospechó también de la existencia de contaminación del acuífero por intrusión salina, por lo que para ello se consideró importante tomar en cuenta las concentraciones de sólidos totales disueltos (STD). Las muestras No.1 y No.3 sobrepasan los límites de los sólidos totales disueltos establecidos por las dos normativas citadas. Usualmente se define como agua dulce o fresca aquellas aguas cuyas concentraciones de sólidos totales disueltos no exceden los 1000 mg/l, mientras que aquellas con concentraciones de sólidos totales disueltos mayores a 1000 mg/l se consideran aguas salobres o aguas salinas (Barlow, 2003). Tomando en cuenta lo anterior se considera que las muestras No.1 y No.3 son aguas salobres, esto considerando que estas dos muestras fueron tomadas de las áreas de potrero indica la afectación del agua por las actividades ganaderas.

Así mismo, la concentración del calcio en las dos muestras (1 y 3) es ligeramente superior a las demás, la norma CAPRE ha establecido como valor recomendado 100 mg/l, pero en ambos casos el valor es inferior a los 410 mg/l que se consideran como valor promedio para clasificarla como agua marina.

Las concentraciones de sodio de las muestras se encuentran dentro del rango de 12,9 a 113 mg/l, encontrándose todas debajo del valor máximo permisible de las normativas de referencia de este documento.

Los resultados de las concentraciones de magnesio se encuentran en el rango de 8,3 a 49 mg/l, las cuales se consideran aceptables por estar debajo del valor máximo permisible, pero llaman la atención nuevamente que los valores de las muestras 1 y 3 sean los más altos, indicando esto que estos puntos están siendo afectados por la actividad agropecuaria.

El análisis de potasio en las muestras de agua subterránea presenta valores dentro del rango de 0,6 a 8,0 mg/l, los cuales son menores al valor de 10 mg/l establecido como máximo permisible.

En el caso del hierro, la muestra No.5 presenta una concentración de 0,5 mg/l superando de esta manera, el valor máximo permisible es de 0,3 mg/l establecido en las normativas citadas. Por ser la única muestra que presenta esta característica se considera que podría proceder de ataque de silicatos ferríferos (Custodio y Llamas, 1976)

Los valores de sulfato se encuentran dentro del rango 13,0 a 103,8 mg/l, y aunque se encuentra por debajo del límite máximo de 250mg/l permisible de las normativas de referencia, las muestras 1, 3, 4 y 7 son las que presentan valores considerables de sulfato, pudiéndose inferir que por ser estos sitios potreros y establos, son las actividades agropecuarias las que influyen en los constituyentes del agua.

En el caso de los nitratos, se consideran como sustancias de alto riesgo para la salud por lo que dentro de las sustancias no deseadas por la norma regional CAPRE se recomiendan valores menores a 25 mg/l y la norma salvadoreña indica valores menores a 45 mg/l. Las concentraciones de nitratos en el agua subterránea muestreada se sitúan bajo el valor máximo permisible, y aunque están dentro del rango de 0,3 mg/l a 13,2 mg/l, los valores de nitratos para el caso de las muestras 1,3 y 6 se consideran importantes dado que las mismas muestras tienen resultados altos de coliformes fecales, por lo que se considera importante resaltar que estos son indicios de que las actividades agropecuarias en el caso de las muestras 1 y 3, y la densidad de las letrinas en el área semiurbana de la muestra 6 son las probables causas de contaminación.

CAPITULO 5. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

Las técnicas geofísicas permiten distinguir formaciones geológicas o capas del subsuelo, midiendo algún parámetro físico tal como la conductividad. En esta investigación se utilizaron los sondeos eléctricos verticales con dos objetivos, el primero de ellos era determinar si existe intrusión marina en la zona costera y el segundo es distinguir las diferentes capas de subsuelo. Por lo que en este capítulo se muestran los resultados de 12 sondeos eléctricos verticales realizados con la colaboración y equipo de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), y se presenta también la interpretación y análisis de dichos sondeos.

5.1. GENERALIDADES

El método de resistividad eléctrica es el método más utilizado para determinar la intrusión salina. La resistividad eléctrica es un procedimiento geofísico que induce corrientes eléctricas artificiales en el terreno y las diferencias de potencial resultantes se miden en la superficie, se utiliza para el estudio de las discontinuidades horizontales y verticales de las propiedades eléctricas del suelo, así como en la investigación de cuerpos tridimensionales con anomalías de conductividad eléctrica (Kearey, Brooks & Hill, 2002).

Así al introducir una corriente de intensidad I en el suelo en los puntos A y B, y se calcula la resistencia R, que el material presenta el paso de la corriente, y que está representado por la diferencia de potencial ΔV entre dos puntos M y N, de donde se puede obtener el valor de la resistividad, utilizando la formula siguiente:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \times \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}$$

Entre las diversas técnicas geoelectricas se tienen los sondeos eléctricos verticales los cuales por la sencillez de la metodología y relativa economía son ampliamente usados.

5.2. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Se recurrió a la aplicación de la geofísica, específicamente a la aplicación de sondeos eléctricos verticales (SEV), utilizando el equipo de resistividad McOHM 2115A, propiedad de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

Los sondeos eléctricos verticales utilizan electrodos de corriente AB y de potencial MN, los cuales se mantienen a un mismo espaciamiento relativo de un punto central fijo respecto del cual el espaciamiento se expande progresivamente, esta técnica se utiliza ampliamente para definir capas de estratos porosos basados en las lecturas de resistividad (Kearey, Brooks & Hill, 2002).

La interpretación conjunta de los datos geofísicos y geológicos proporciona predicciones cada vez más confiables de las características materiales y geométricas de las formaciones infrayacentes. (Arias et al, 2003).

En el esquema simplificado que se muestra en la figura 6.1, se observa como a medida que la distancia AB se incrementa, la profundidad de investigación es mayor (Sánchez San Román, 2004).

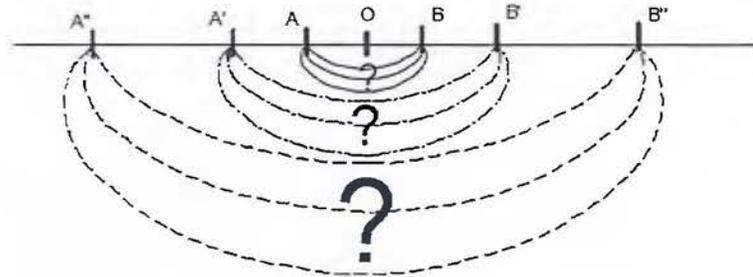


Figura 5.1 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico. Tomado de: Sánchez San Román, 2004

El dispositivo utilizado en esta investigación fue el arreglo Schlumberger, dispositivo tetraelectrónico lineal que utiliza una configuración simétrica de los electrodos AMNB, donde la distancia entre los detectores MN es mucho menor que la de los electrodos inyectoros AB, el sondeo consiste en separar progresivamente A y B, y mantener los electrodos detectores M y N fijos en un punto central.

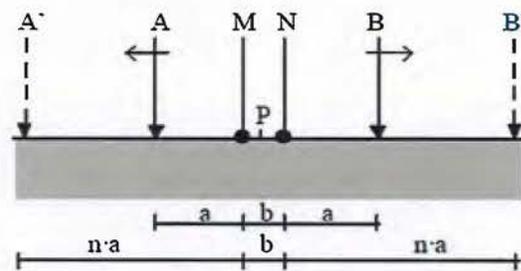


Figura 5.2 Disposición de electrodos en sondeos Schlumberger



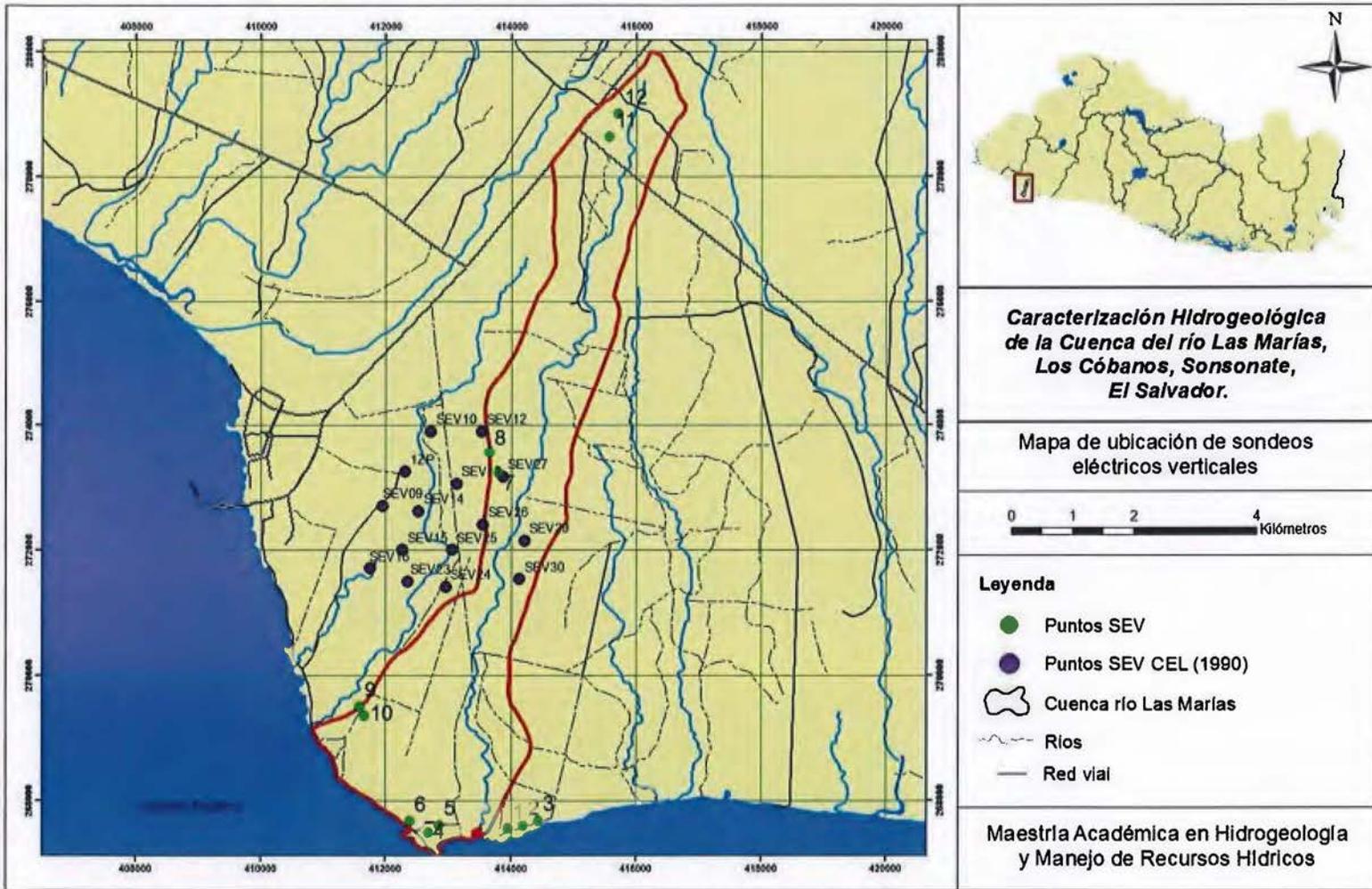
Figura 5.3 Realización de Sondeos eléctricos verticales.

Se realizaron 12 sondeos cuya disposición obedece a los sitios de mayor interés y donde las condiciones lo permitieran, dado que en muchos casos no fue posible realizar los

sondeos sobre las zonas proyectadas por ser propiedades privadas a las que no se permitió el acceso.

La separación de electrodos (AB/2) utilizada en la mayoría de casos fue 260 metros, según las condiciones particulares de cada sitio, la disposición espacial de los sondeos geoelectricos se muestra en la figura 5.4. En la misma figura se presentan los sondeos realizados por CEL en el año 1990, estos fueron realizados con el objetivo de encontrar un área propicia para la perforación de pozos profundos para el abastecimiento de agua, por lo que algunos de ellos se muestran están fuera del área de estudio pero se tomaron en cuenta para la correlación de capas en la zona de interés.

Figura 5.4 Ubicación de sondeos eléctricos verticales.
43



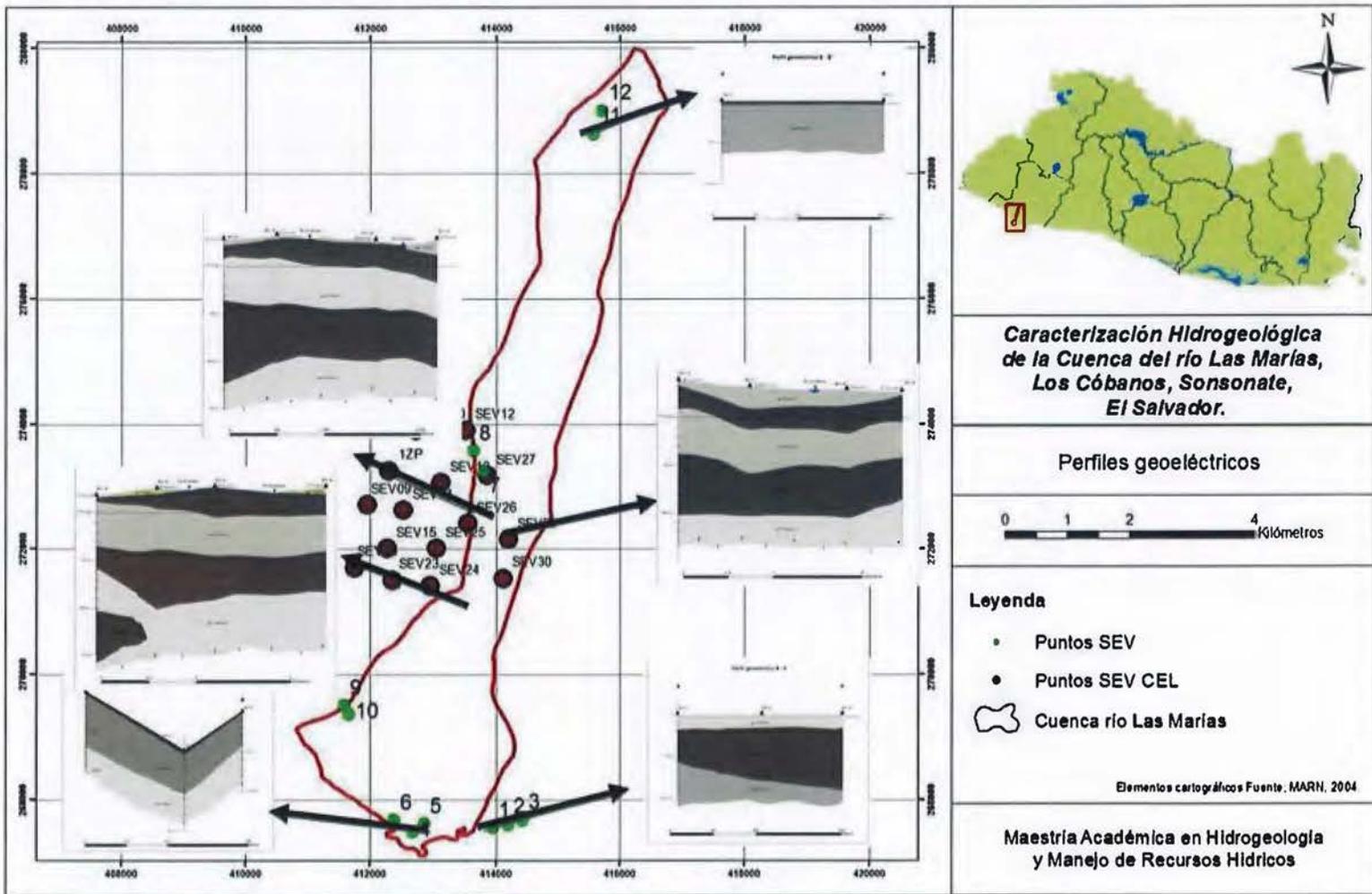


Figura 5.5 Perfiles geoelectricos de sondos realizados en el área de estudio.

En la tabla 2.5 se presentaron las coordenadas Lambert de la localización de los sondeos eléctricos verticales realizados y las aberturas respectivas con las que se trabajaron. Cada uno de los 12 sondeos realizados se analizó y se interpretó para determinar las capas del subsuelo y sus respectivas resistividades, los datos obtenidos y los modelos geoelectricos se presentan en Anexos.

5.3. INTERPRETACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Con la información de los sondeos eléctricos verticales realizados se construyeron 5 perfiles geoelectricos correspondientes a la zona de estudio y además se reinterpretaron los sondeos eléctricos verticales realizados por GEOCEL (1990) con el objetivo de determinar, junto con la información litológica de los pozos perforados cercanos, las capas del subsuelo en la zona de estudio, con la reinterpretación de los sondeos de GEOCEL se elaboraron 3 perfiles geoelectricos más para refinar y corroborar los resultados. En la Figura 5.5 se muestran los perfiles construidos y su ubicación sobre el área de estudio.

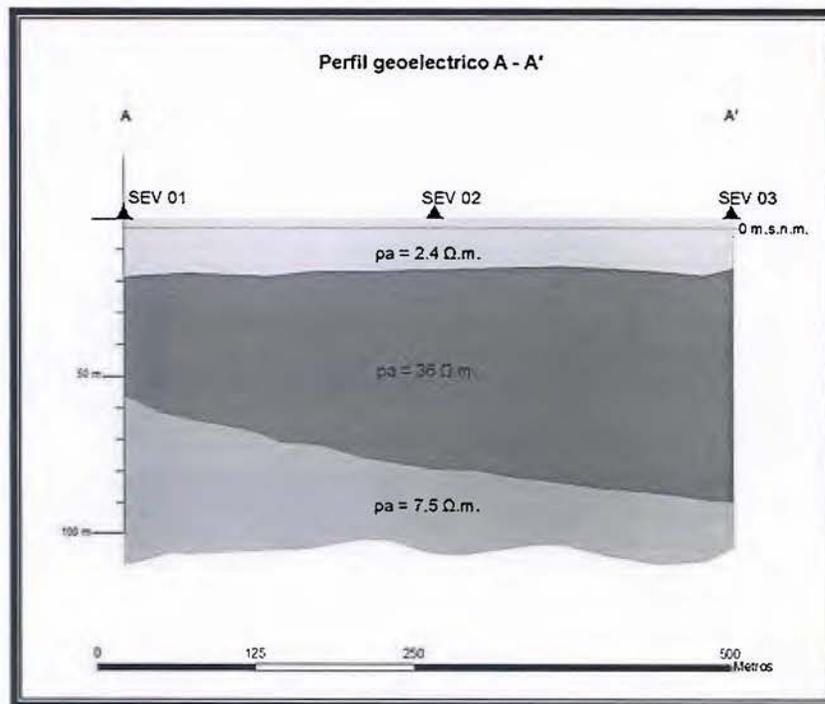


Figura 5.6 Perfil geoelectrico A-A'

Como se observa del perfil A - A' (Figura 5.6) tiene un primera capa de resistencia de $2.4 \Omega\text{m}$ cuyo espesor es de aproximadamente 18 m, en esta se encuentra el nivel freático del acuífero somero en el que se ubican todos los pozos excavados de los que se abastecen de agua los pobladores de la cuenca del río Las Marías. La siguiente capa posee una resistividad aparente de $36 \Omega\text{m}$ y espesor aproximado de 40 metros, la cual puede asociarse a la capa de tobas. Luego se tiene una capa con una resistividad aparente de $7.6 \Omega\text{m}$, la cual se encuentra a una profundidad de 60m, se considera una capa muy conductiva por lo que se puede interpretar como la zona en la que se encuentra un segundo acuífero en sedimentos aluviales y piroclastos.

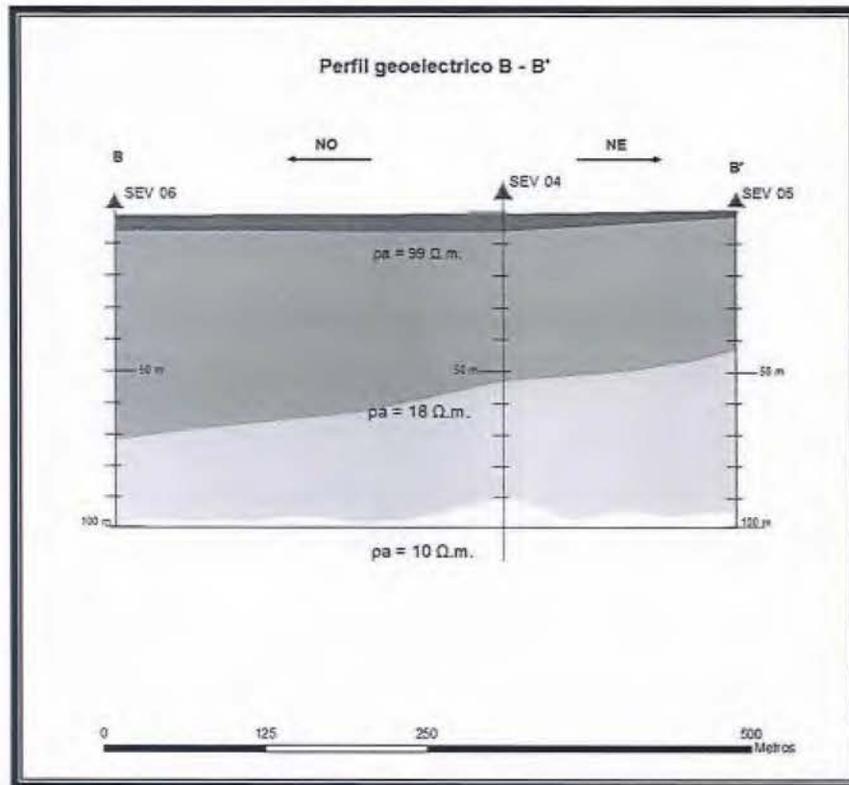


Figura 5.7 Perfil geoelectrico B-B'

En el perfil B -B' se observa una primera capa de muy poco espesor (3 - 4 m) con una resistividad aparente muy alta de $98.6 \Omega\text{m}$, luego se distingue una capa de un espesor de aproximadamente 50 m en el que la resistividad aparente disminuye considerablemente a $18 \Omega\text{m}$ la cual puede asociarse a las tobas en la zona saturada, y finalmente una capa de

espesor indefinido con un valor de resistividad aparente de $10 \Omega\text{m}$, el cual puede indicar la presencia del nivel freático del acuífero profundo.

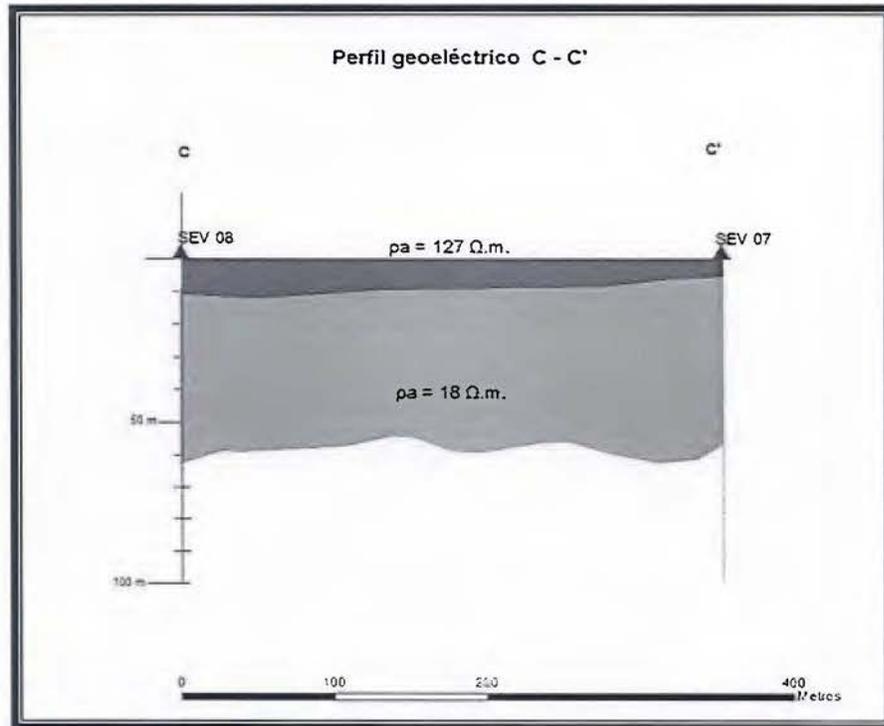


Figura 5.8 Perfil geoelectrico C-C'

En el perfil C – C' se observa una delgada capa con un valor de resistividad aparente de $127 \Omega\text{m}$, con un espesor de 8 a 10 metros, y luego se encuentra una capa de resistividad aparente $18 \Omega\text{m}$ con un espesor indefinido, el cual puede asociarse a las tobas saturadas.

En el perfil D –D' (Figura 5.9) observamos mucha similitud al perfil descrito anteriormente, se tiene una capa con una resistividad de $118 \Omega\text{m}$, con un espesor de aproximadamente 10 – 15 metros, y luego una capa de resistividad aparente de $30 \Omega\text{m}$, con un espesor indeterminado.

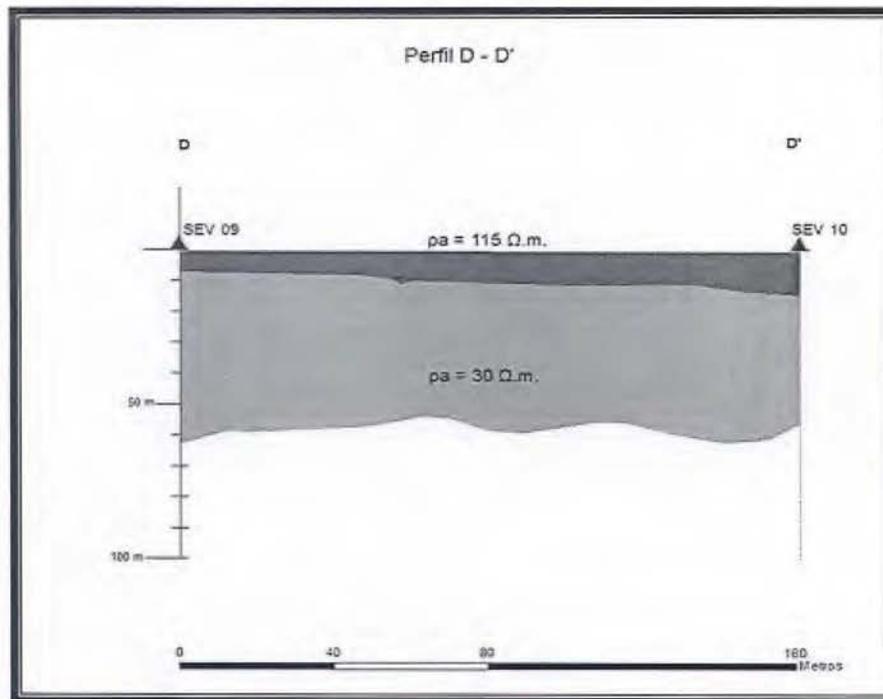


Figura 5.9 Perfil geoelectrico D-D'

En el perfil E – E' se observa una delgada capa de resistividad aparente de $105 \Omega.m$, la cual puede comprender de 10 a 8 metros de profundidad y luego se tiene una capa con una resistividad aparente de $30 \Omega.m$ de espesor indeterminado.

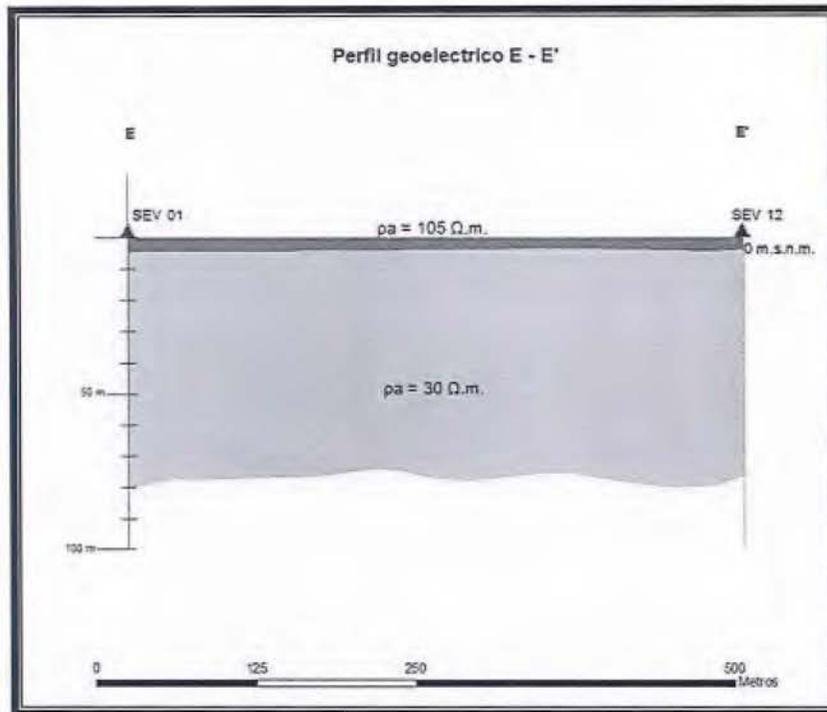


Figura 5.10 Perfil geoelectrico E-E'

Los perfiles geoelectricos elaborados con la información de los sondeos eléctricos verticales realizados por GEOCEL se presentan en los Anexos de este documento.

CAPITULO 6. EVALUACIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA

En el presente capítulo se describe la concepción teórica de la intrusión salina, la metodología utilizada para evaluar la condición actual en la Playa Los Cóbanos

En El Salvador el tema de intrusión salina en acuíferos costeros no ha sido tratado comúnmente, dado que el área de investigación ha estado estancada a raíz de la guerra civil en los años 80`s y el periodo de postguerra. La primera investigación acerca del tema de la que se tienen referencias fue realizado en la zona Oriental del país, el resultado fue el Taller Centroamericano de Geofísica Aplicada al Estudio de las Intrusiones de la Aguas Salinas en la Zona Costera de la Bahía de Jiquilisco (2001), organizado por el Proyecto FIAS-ANDA, Proyecto Agua y Saneamiento (AGUASAN) de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), Cooperación Francesa (CCCAC), Universidad de El Salvador (UES), Université Paris 7 Denis Diderot, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 Laboratoire de Géophysique Appliquée (P. Mechler), Université de La Rochelle y Université de Reims, el cual tenía entre sus objetivos la aplicación de los métodos geofísicos al estudio de la intrusión salina en la zona del bajo Lempa. En la zona de estudio no existen antecedentes similares a los del taller referido.

Intrusión de agua salada o marina, según Custodio y Llamas (1983), es el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce. Dicha condición se presenta usualmente en los acuíferos costeros, donde siempre existe una condición conocida como cuña de agua salada o cuña de intrusión salina, la cual no es más que el contacto entre el agua dulce del acuífero y el agua salada del mar, originada por la diferencia de densidades entre ellas.

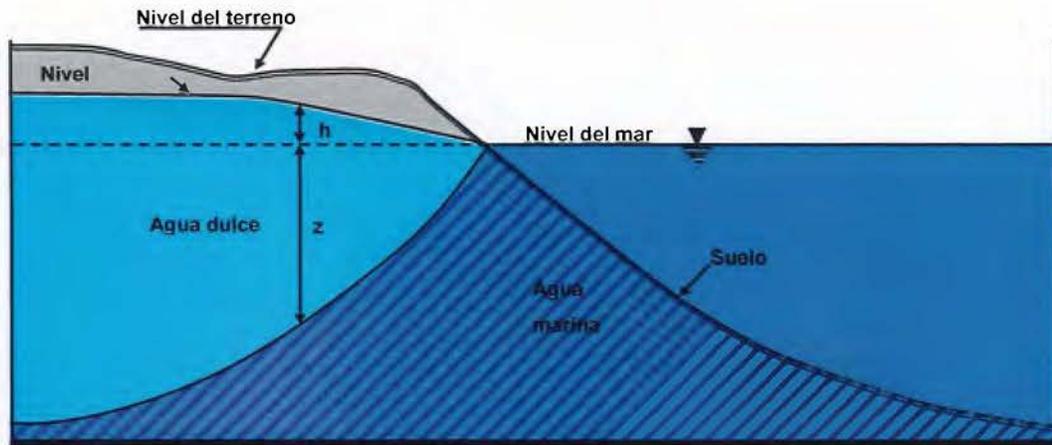


Figura 6.1 Ilustración de la cuña salina normal en zonas costeras (Modificado de Barlow, 2003)

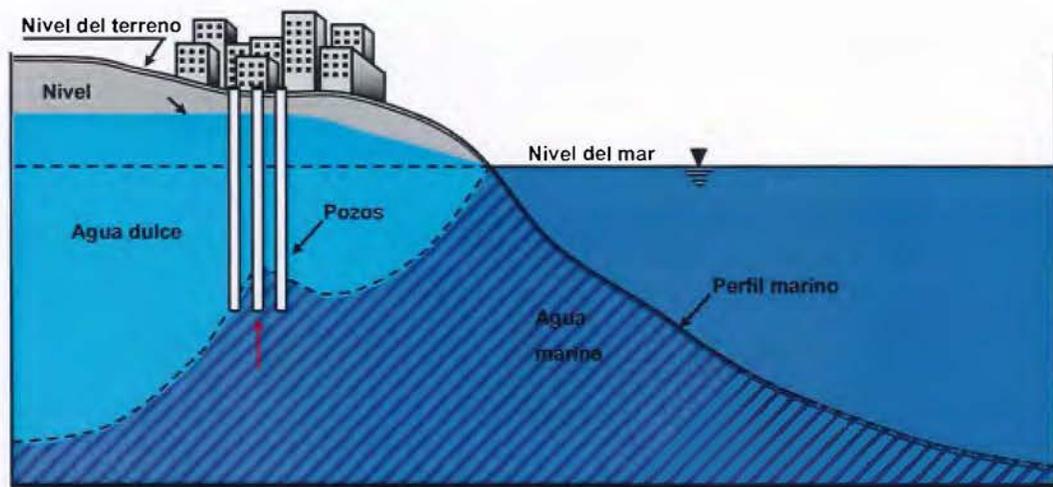


Figura 6.2 Ilustración de la cuña de intrusión salina provocada por una alta explotación en zonas costeras (Modificado de Barlow, 2003)

Cuando la explotación de agua subterránea en zonas costeras excede la capacidad del acuífero, entonces el área de contacto entre el agua dulce y agua salada, conocida como zona de mezcla avanza tierra adentro, permitiendo que toda la cuña salina se desplace tierra adentro, lo que causará contaminación de las zonas activas de captación del acuífero. (Custodio y Llamas, 1983).

Pulido Bosch (2001), lo describe como sobreexplotación de un acuífero, indicando que tal situación ocurre cuando la extracción de agua del acuífero es superior a la correspondiente a su alimentación.

Para entender el comportamiento de la cuña de intrusión salina, Ghyben (1889) y Herzberg (1991), plantearon las siguientes hipótesis básicas:

- El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- No existe flujo de agua salada.
- La interfaz es un plano, no existiendo la zona de mezcla.

La concepción de equilibrio de agua dulce y agua marina en una zona costera conforme a los supuestos básicos de Ghyben y Herzberg, se muestra en la figura 6.3.

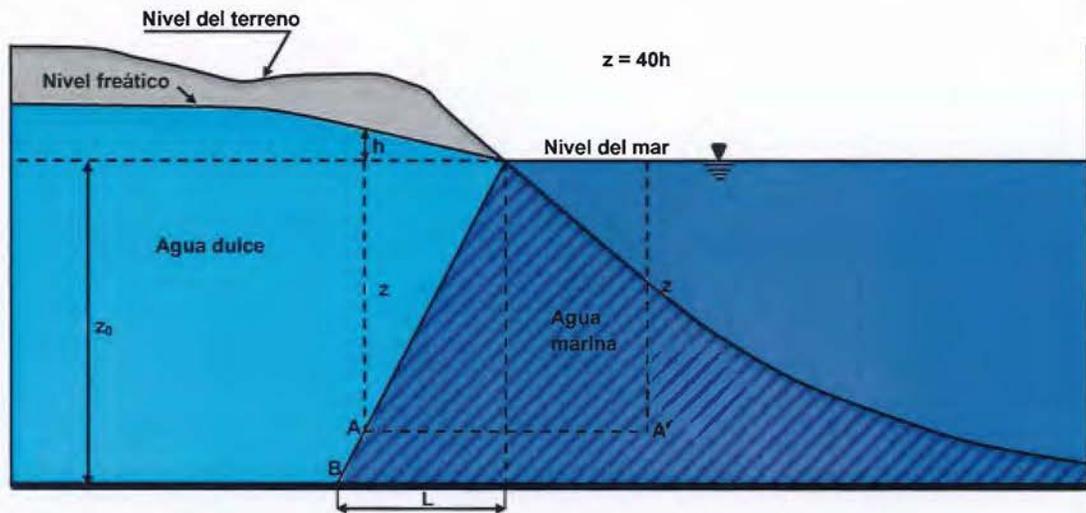


Figura 6.3 Equilibrio de acuerdo a los supuestos básicos de Ghyben y Herzberg.

Con base en estas simplificaciones, se plantearon que en un punto cualquiera de la interfase debe equilibrarse la presión del agua dulce y la del agua salada, así se tiene la ecuación siguiente:

$$(h_d + z) \cdot \gamma_d = z \gamma_s$$

Donde:

h_d = cota sobre el nivel del mar del agua dulce en la vertical del punto A.

z = profundidad bajo el nivel del mar del punto A.

γ_d = peso específico del agua dulce

γ_s = peso específico del agua salada, la cual varía entre 1,020 a 1,030 $\frac{g}{cm^3}$

Debido a que la Ley de Ghyben-Herzberg no describe correctamente la posición de la interfaz cerca de la descarga del acuífero en el mar, ya que debe existir un gradiente piezométrico en el agua dulce, por la circulación con velocidades crecientes y la aparición de componentes verticales en la zona de la cuña de agua salada por la sucesiva menor sección de salida para el agua dulce, Hubbert (1940) en Custodio (1983), planteó que suponiendo que no exista una zona de mezcla de aguas y que el agua salada permanece estacionaria puede calcularse la posición de la interfaz en un cierto punto aplicando la Ley de de Ghyben-Herzberg si se toma como cota del agua dulce para el cálculo la que corresponde al potencial sobre ella, es decir si se toma para el cálculo de la interfaz en A la cota en B, situada en la equipotencial que pasa por A' (Figura 6.4).

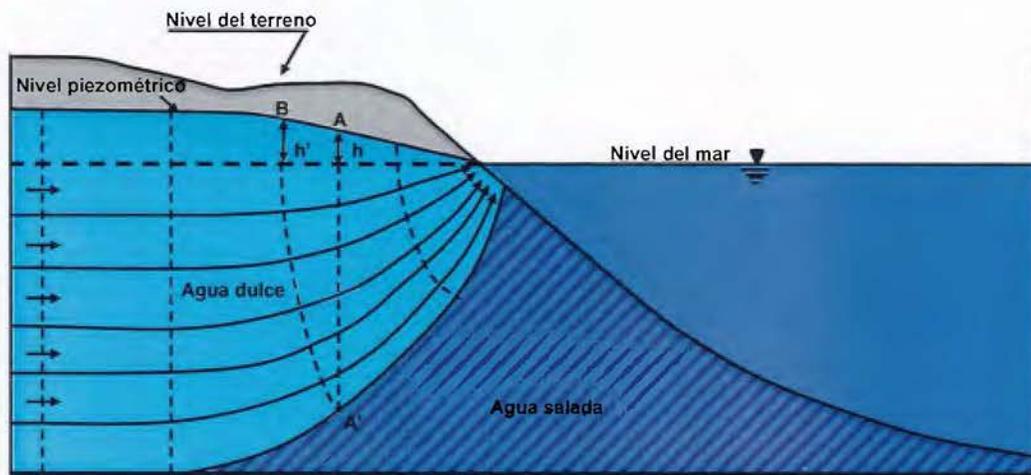


Figura 6.4 Ilustración interfaz agua dulce-agua marina de (Modificado de Hubbert, 1940)

6.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Como parte del análisis para determinar si existe intrusión salina en el área de estudio, se tomaron como referencia los índices hidrogeoquímicos de la Tabla 6.1. y en la Tabla 6.2. se presentan los valores resultantes de la evaluación de dichos índices hidrogeoquímicos para cada una de las muestras de agua subterránea.

Tabla 6.1 Relaciones de valores hidrogeoquímicos

Índice Hidrogeoquímico	Rango de valores
Relación $\frac{Mg}{Ca}$	Aguas continentales 0.3 a 1.5
	Agua marina ≈ 5
	Altos valores de Cl y Mg/Ca, son indicios de contaminación
Relación $\frac{rCl^-}{rHCO_3^-}$	Aguas continentales 0.1 a 5
	Intrusión salina 20 a 50

Tabla 6.2 Evaluación de índices hidrogeoquímicos

No.	Código	Relacion Mg/Ca	Relacion Cl ⁻ /HCO ₃ ⁻
1	PE-B25	0.61	0.55
2	PE-B13	0.36	0.34
3	PE-B28	0.43	0.54
4	PE-B22	0.51	0.76
5	PE-B6	0.25	0.06
6	PE-B18	0.40	0.17
7	PE-B38	0.37	0.29
8	PE-B37	0.29	0.15
9	PE-B27	0.32	0.12
10	PE-A23	0.36	0.07

Conforme a la relación analizada de magnesio (Mg) y calcio (Ca), se observa que los valores resultantes de cada una de a las muestras corresponden a aguas continentales, dado que se obtuvieron valores entre 0.25 y 0.61, por lo que los índices de la evaluación de las relaciones de referencia se encuentran considerablemente lejanos al rango de agua marina que podrían indicar mezclas de agua marina.

Al evaluar la relación entre cloruro (Cl^-) y bicarbonato (HCO_3^-) en las muestras de agua subterránea se obtuvieron valores en el rango entre 0.06 a 0.76, por lo que se concluye que son valores muy lejanos a los que indicarían intrusión salina en el acuífero.

Para determinar el avance de la salinidad en un acuífero costero, se utiliza también la conductividad eléctrica (CE) expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ya que es un parámetro representativo de la salinidad. (Gaona 1976, en Medina et al, 2002). La Asociación Americana de Salud Pública (APHA), estableció en 1995 los criterios para la evaluación de la calidad de agua conforme a la conductividad eléctrica de la misma, los cuales se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Criterios de evaluación de calidad del agua por su salinidad (APHA, 1995).

Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Clasificación
100 a 2000 a 18 °C	Agua dulce
2000 a 5000 18 °C	Agua Salobre
5000 a 45000 18 °C	Agua de mar
45000 a 100000 a 18 °C	Salmuera

Otras concentraciones promedio que se utilizan con índices de los constituyentes mayoritarios del agua marina se muestran en la Tabla 6.4. (Hem, 1989).

Tabla 6.4 Concentraciones promedio de los constituyentes mayoritarios del agua marina

Constituyentes	Concentración (mg/L)	Constituyentes	Concentración (mg/L)
Cloro	19,000	Bicarbonato	142
Sodio	10,500	Bromuro	67
Sulfato	2,700	Estroncio	8
Magnesio	1,350	Sílice	6.4
Calcio	410	Boro	4.5
Potasio	390	Fluoruro	1.3

De las concentraciones encontradas en las muestras de agua subterránea analizadas de la Tabla 4.1, las concentraciones de cloro, sodio, sulfato, magnesio, calcio y potasio se encuentran muy por debajo de los valores indicativos de intrusión salina, sin embargo varias muestras presentan valores superiores al promedio, lo cual es indicativo de que existe contaminación in situ.

6.2. CARACTERISTICAS GEOELÉCTRICAS

Según las diferencias existentes de las resistividades de un acuífero según este en contacto con agua dulce o salada es posible identificar intrusión salina en un acuífero (Astier, 1982).

Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan inherentemente una conductividad apreciable, pues siempre tienen disueltas algún tipo de sales, generalmente NaCl. Usualmente las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a 20 Ωm , y las aguas marinas tienden a presentar valores tan bajos como 0.2 Ωm .

Los sondeos eléctricos verticales permitieron solucionar la incógnita sobre la condición de intrusión salina en el área de estudio, puesto que no se identificó ningún cambio brusco de resistividades mediante los sondeos eléctricos verticales que indicara la existencia de una cuña de intrusión marina. Lo cual fue corroborado con los índices hidrogeoquímicos y los valores de los constituyentes del agua que se diferencian mucho de los índices del agua marina. Por lo que, la hipótesis planteada de la salinización del acuífero somero por intrusión salina quedó descartada por estas pruebas.

CAPITULO 7. HIDROLOGÍA

En el presente capítulo se realiza una descripción de las características hidrológicas del área de la cuenca del río Las Marías, tales como meteorología, aforos, uso de la tierra, pruebas de infiltración, etc.

7.1. DATOS CLIMATOLÓGICOS

Los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial corresponden a la estación meteorológica Acajutla (T06), localizada en el Municipio de Acajutla aproximadamente a 4 kilómetros de la cuenca del río Las Marías. La estación se sitúa en las coordenadas 13° 568" Norte y 89° 833" Este, los datos de precipitación, evapotranspiración y temperatura fueron obtenidos para el periodo de 1970 – 2001.

7.1.1. PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Se reportan los promedios mensuales de precipitación de la Estación Acajutla (T06) para el periodo 1970 – 2001. El promedio anual de precipitación es de 1739mm. Las lluvias se caracterizan por ser de corta duración. El invierno comprende los meses de Mayo a Octubre, siendo el mes más lluvioso Septiembre, y el periodo de estiaje comprende los meses de Noviembre a Abril, siendo Febrero el mes más seco, como se observa en el gráfico de la figura 7.1.

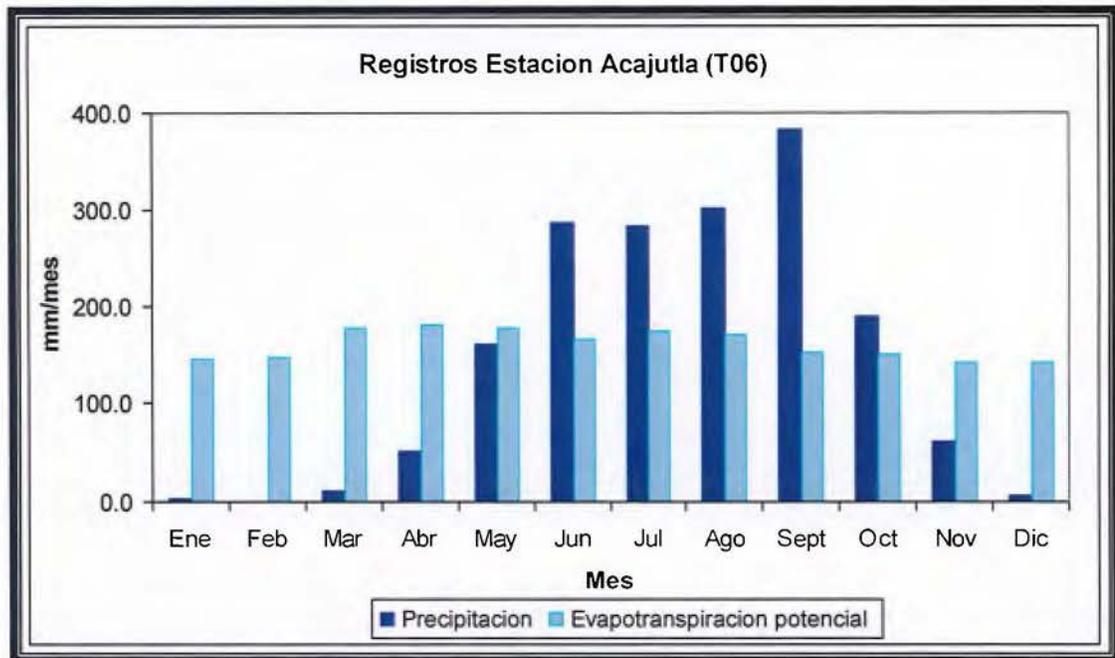


Figura 7.1 Promedios mensuales Estación Acajutla periodo 1971 – 2000 (MAG)

7.1.2. TEMPERATURA

Los valores de temperatura también corresponden a los registros de los promedios mensuales de la Estación Acajutla (T06). Por estar ubicada en una zona costera la temperatura que la cuenca experimenta es en general cálida a lo largo del año, la temperatura ambiente media mensual de la zona es de 27 °C, sin presentar variaciones significativas mensualmente. La temperatura mínima oscila los 17 °C y la temperatura máxima los 38 °C.

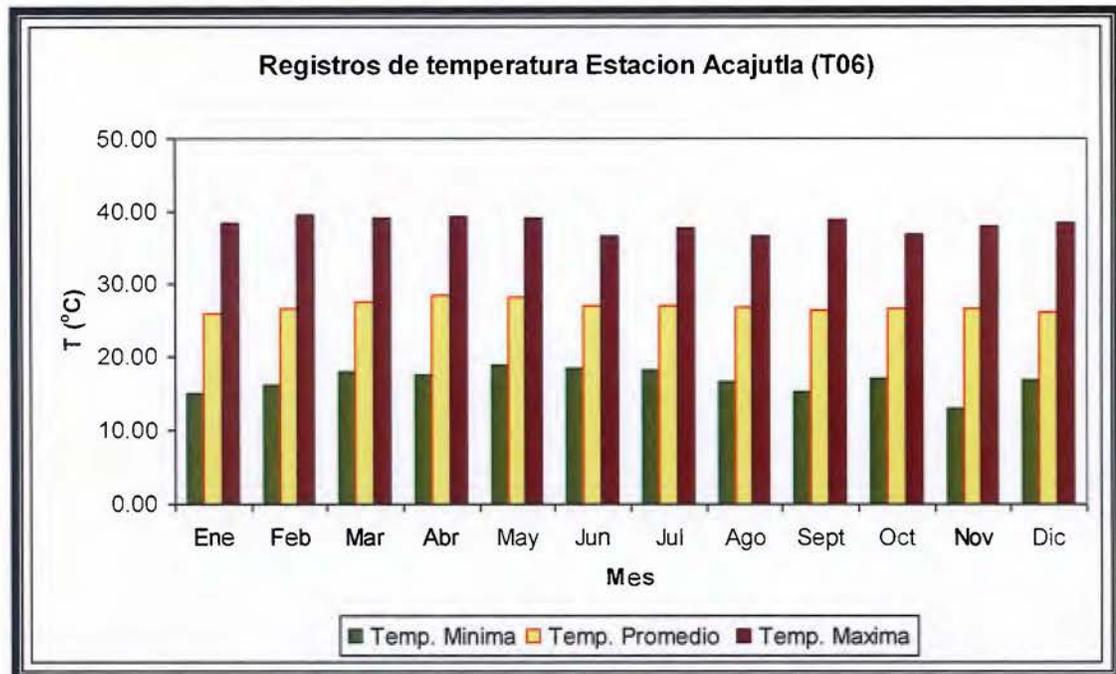


Figura 7.2 Promedios mensuales de temperatura Estación Acajutla periodo 1971- 2000 (MAG)

7.2. INFILTRACIÓN

Para determinar la capacidad de infiltración de los suelos en el área de estudio se recurrió a la metodología de anillos concéntricos o método de Müntz, que consiste en utilizar dos cilindros abiertos por las dos bases, uno de diámetro menor al otro, los cuales se colocan en forma concéntrica al hincarlas parcialmente en el terreno hasta una profundidad de 10 cm. Se coloca un volumen de agua dentro de los cilindros midiendo el tiempo que tarda en infiltrarse el agua.

Se realizaron en total 8 pruebas de infiltración distribuidas a los largo de la cuenca, de manera que se realizara al menos uno por cada tipo uso de la tierra, la distribución de las mismas se observa en la figura 2.3. del capítulo de Metodología. En la tabla 7.1 se muestra una tabla con los resultados de las pruebas, las tablas de datos de campo se muestran en anexos.

Tabla 7.1 Resultados de las pruebas de infiltración.

Prueba No.	Coordenadas		Ubicación	Coeficiente de Infiltración (mm/d)
	Norte	Este		
1	415399	275822	Potrero Miravalle	414
2	416447	280038	Rancho San Antonio	468
3	413817	273516	Cooperativa	126
4	413101	267706	Los Cóbano	692
5	411623	269342	Hacienda Rancho Paja	202
6	413120	269584	Hacienda Alfaró	426
7	415759	278138	Potrero Las Marías	473

7.3. USO ACTUAL DEL SUELO

El uso actual de la tierra es primordialmente uso agropecuario, la mayor parte del territorio es utilizado para pastos, caña de azúcar y en menor medida granos básicos. Algunas de estas tierras también se dedican al pastoreo de ganado. Hacia el sur de la cuenca del río las Marías se combinan el turismo y la vivienda semiurbana.

Para efectos de este estudio el área se subdividió en tres tipos de uso del suelo primordiales con el objeto de calcular la recarga potencial. Los cuatro usos que se establecieron son:

- Semiurbano: corresponde a las zonas en las que se han establecido pequeños núcleos de población que no cuentan con servicios de abastecimiento de agua, ni alcantarillado sanitario pero que se mezclan con las actividades turísticas en la zona, en esta categoría se incluyen además los ranchos privados, villas y hoteles.
- Caña de azúcar: es el área en la porción superior de la cuenca donde ha habido un uso intensivo de la tierra para el cultivo de caña de azúcar con fines comerciales.
- Pastos y granos básicos: son áreas dedicadas al pasto para la crianza de ganado, en las que a la vez se dedican pequeñas porciones para el cultivo de granos básicos de subsistencia.

Para la actualización del mapa de uso de suelos se utilizaron imágenes aéreas del año 2010, sobre las cuales se diferenciaron los diferentes usos del suelo para realizar una representación gráfica de los elementos por medio de polígonos. En el cuadro siguiente se muestran los datos del área cubierta por cada uno de los tipos de uso definidos junto con su distribución porcentual en el área.

Tabla 7.2 Uso de suelo en el área de estudio.

Uso del suelo	Área (Km)	Porcentaje
Semiurbano	3.24	16.36 %
Caña de azúcar	0.49	2.53 %
Pastos y granos básicos	15.85	80.91 %

7.4. AFOROS

Se realizó un campaña de aforos diferenciales del río Las Marías, idealmente se planteó realizarlos a cada kilómetro pero en algunos lugares no se pudo realizar el aforo por obstáculos que obstruían el cauce (árboles caídos, acumulación de desechos, etc.) por lo que en algunos tramos la distancia es mayor, en la Figura 7.4 se presenta la ubicación de los mismos.

Tabla 7.3 Aforos realizados en el río Las Marías

Aforo No.	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas		Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
		Norte	Este			
PA01	79	416110	279245	257.78		
PA02	70	415803	278116	283.85	26.7	Efluente
PA03	59	414651	275008	584.37	300.52	Efluente
PA04	30	414102	272452	479.20	-105.17	Influente
PA05	16	413280	269556	96.9	-382.3	Influente
PA06	4	413659	268016	143.45	46.55	Efluente

Figura 7.3 Mapa de uso de suelo actual en el área de estudio.
62

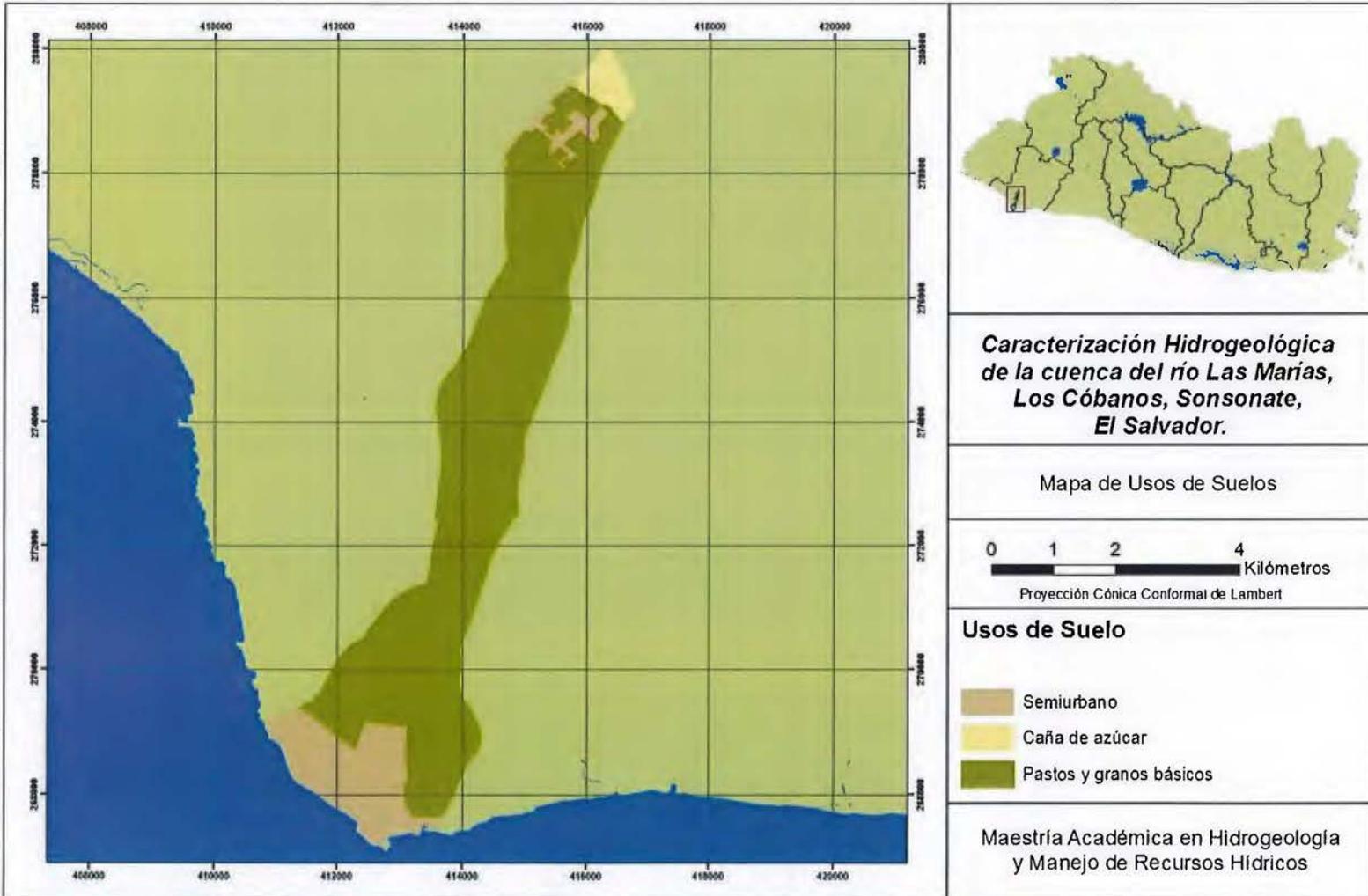
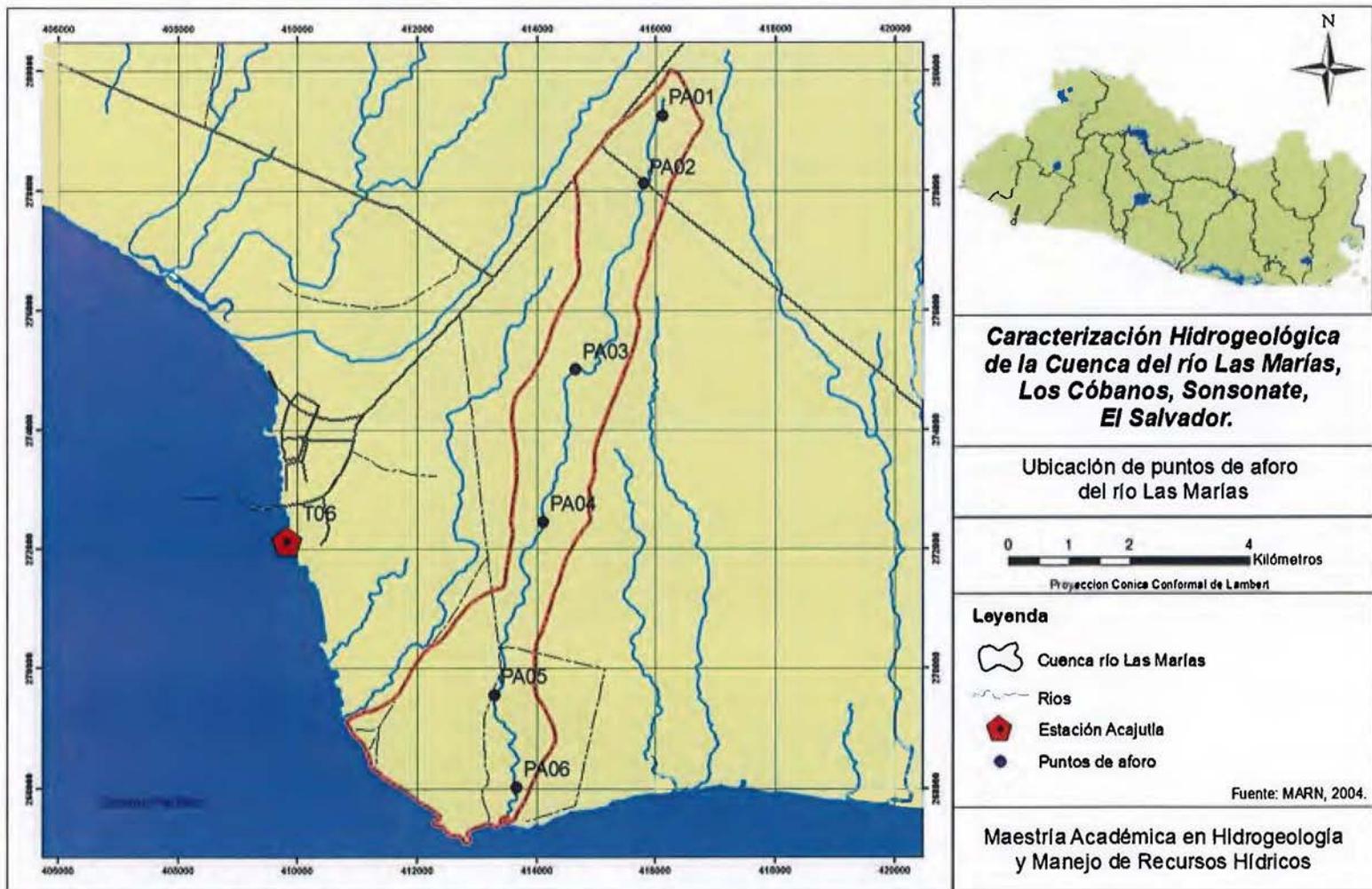


Figura 7.4 Localización de afloros en la cuenca del río Las Marías.
63



7.5. ANÁLISIS DE SUELOS

Para realizar análisis de suelos se tomaron muestras en cada sitio donde se efectuaron pruebas de infiltración, las cuales fueron debidamente empacadas y selladas para ser analizadas por granulometría en el Laboratorio de Geotecnia de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, mientras que las pruebas de retención de humedad y densidad aparente se realizaron en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica.

Los resultados de los análisis geotécnicos de suelos se presentan en la tabla 7.4, estos reflejan que cuatro de las muestras son arcillas y las otras tres son limos, con características de plasticidad de intermedia a muy alta. Los análisis detallados se presentan en el Anexo H – Análisis Geotécnicos.

Tabla 7.4 Resultados de análisis geotécnicos del suelo.

Muestra No.	Norte	Este	Plasticidad	Contenido			Clasificación SUCS
				de Humedad (%)	Límite líquido	Límite plástico	
1	411623	275822	Alta	20.93	63.0	29.9	CH Arcilla gruesa con arena
2	413120	269584	Alta	45.06	58.8	30.5	MH Limo elástico
3	415759	278138	Alta	25.09	57.0	36.2	MH Limo elástico con arena
4	413101	267706	Intermedia	8.9	46.9	24.5	CL Arcilla delgada con arena
5	413817	273516	Alta	29.5	50.6	26.7	CH Arcilla gruesa con arena
6	414191	275038	Alta	62.95	70.0	39.1	MH Limo elástico con arena
7	416447	280038	Muy alta	53.45	82.9	39.7	OH Limo orgánico

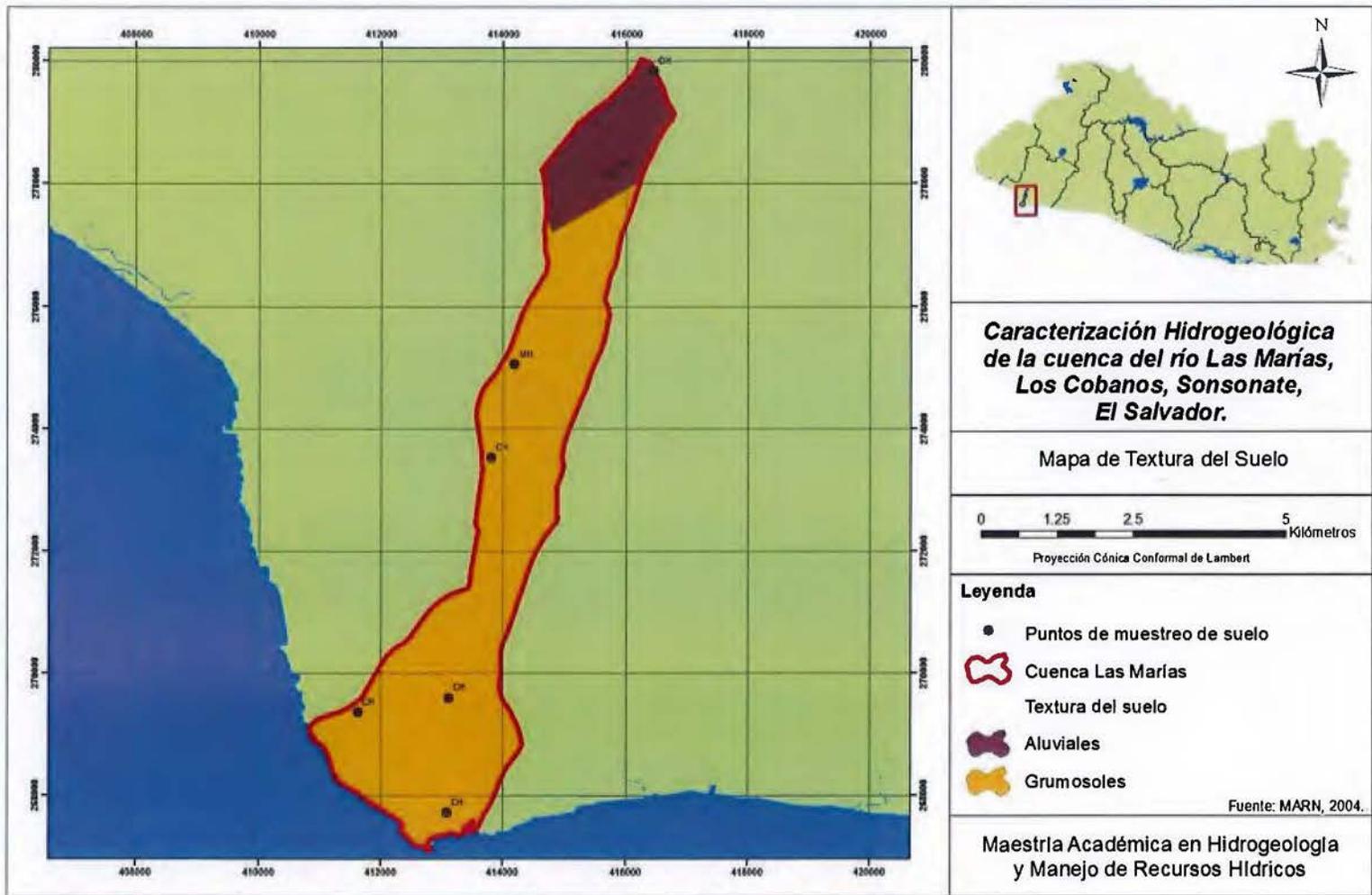
En la tabla 7.5 se presentan los resultados de los análisis de retención de humedad de las muestras de suelo.

Tabla 7.5 Resultados de análisis de retención de humedad

Muestra No.	Norte	Este	Ubicación	Capacidad de campo (CC)	Punto de marchitez (PMP)	Densidad aparente
1	411623	275822	Hacienda Rancho Paja	42.81	21.79	1.14
2	413120	269584	Hacienda José Alfaro	43.27	22.01	1.13
3	415759	278138	Potrero Las Marias	41.09	20.85	1.09
4	413101	267706	Los Cóbanos	39.15	22.14	1.07
5	413817	273516	Cooperativa	40.67	22.09	1.06
6	414191	275038	Lotificación Las Marias	43.85	21.66	1.12
7	416447	280038	Rancho San Antonio	41.88	22.25	1.16

Para la caracterización del coeficiente de textura del suelo se utilizó el Mapa Pedológico de El Salvador, el cual fue elaborado en escala 1:100,000 dado que no existe más detalle y debido a la dificultad de transportar las muestras desde El Salvador hacia Costa Rica no se pudo realizar una distribución más densa para obtener un mayor detalle de la textura del suelo. Por lo que se optó por utilizar el Mapa Pedológico de El Salvador, en él se observan dos clases de textura para el área de estudio, los suelos aluviales y los suelos grumosoles, tal y como se observa en la figura 7.3.

Figura 7.5 Mapa de textura de suelo. Fuente: MARN, 2004.



7.6. HIDROGEOLOGÍA

Las principales características hidrogeológicas de la cuenca del río Las Marías que definen el comportamiento del sistema acuífero presente en esta área se exponen a continuación, así como la dirección de flujo y las unidades hidrogeológicas que definen su potencial hídrico.

7.6.1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

I. Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media

Esta unidad en el área de estudio consiste principalmente de materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (tobas), corresponde al miembro Qf de la formación San Salvador. La distribución granulométrica que varía de fina a gruesa condiciona las conductividades hidráulicas que pueden variar de medianas a bajas conforme al grado de compactación de los materiales (ANDA – COSUDE, 2008).

En esta unidad, se encuentra el acuífero somero no confinado, lo cual se evidencia por el nivel freático de los pozos excavados, el cual oscila desde 0.5m hasta aproximadamente 8 m de profundidad.

II. Unidad Rocas No Acuíferas

De acuerdo al Mapa Hidrogeológico de El Salvador los materiales de esta unidad en el área de estudio son bloques macizos de brechas, lavas andesíticas intercalados con tobas brechosas que presentan conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o alto grado de compactación o cementación, por lo que se han considerado como el basamento de los acuíferos, el espesor de esta unidad puede superar los 100m (ANDA-COSUDE, 2008). Esta unidad corresponde a los materiales volcánicos del terciario, específicamente se asocia a la formación Bálsamo.

Aunque en el área de estudio no existen suficientes pozos perforados para tener certeza sobre fracturamiento en estas rocas terciarias, es razonable suponer que existe y que ello permite flujos subterráneos, dado que en los pozos perforados dentro del área se evidencia la existencia un segundo nivel acuífero. De similar manera ocurre con pozos

perforados en la zona de Acajutla, la cual está ubicada 5 km al Oeste en donde existen muchos pozos de alta producción que se han localizado en lo que se ha denominado Unidad Rocas No Acuíferas.

7.6.2. TRANSMISIVIDAD

La transmisividad del acuífero superficial fue determinada a partir de la información de pozos excavados dentro del área de estudio que contaban con equipo de bombeo. Las condiciones de estos pozos es que son pozos excavados, sin tubería revestimiento ni rejilla, son parcialmente penetrantes en el acuífero, puesto que no exceden los 6 m de profundidad.

La propuesta inicial de tesis fue la determinación de la transmisividad a partir de los datos de bombeo con la metodología de Schosinsky para pozos de gran diámetro, pero al realizar las pruebas de bombeo en los sitios habilitados se constató que el abatimiento de los pozos ocurría en pocos minutos, ya que la columna de agua no es muy profunda por las mismas condiciones de construcción de los pozos y además se verificó mediante cálculos realizados aplicando la metodología de Schosinsky que el efecto de almacenamiento en los pozos es despreciable y se sugiere la aplicación de la metodología de Jacob. Considerando todo lo anterior, se procedió al análisis de los datos con el método de Jacob y para el análisis se decidió utilizar los datos de las pruebas de recuperación de los pozos dado que se cuenta con un mayor rango de registros en el tiempo. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6 Valores de transmisividad de los pozos en la zona de estudio

Pozo	Norte	Este	Nivel Estático	Q(l/s)	T(m ² /d)
1	276956	415060	2.84	1.95	106.3
2	269578	413157	3.1	0.73	52.5
3	267720	412926	3.33	0.46	15.3

Se debe considerar que estos valores son puntuales debido a que no se pudo contar con un equipo propio para poder realizar un mayor número de pruebas, de manera que estas

se realizaron en los sitios en los que se contaba con equipo de bombeo y la colaboración de los propietarios para poder utilizarlos, por lo que la distribución en el área de estudio fue una prueba en la parte superior de la cuenca, una en la parte media y una en la parte baja cercana a la costa, del pozo que abastece a 21 familias en la zona más baja de la cuenca.

Considerando que los datos obtenidos son relativos y puntuales, se interpreta que la transmisividad del acuífero superficial es de mediana producción en la parte alta de la cuenca y disminuye hacia la parte baja, lo cual es acorde al perfil litológico del área puesto que se observa una disminución en el espesor de la capa acuífera hacia el sur del área de estudio.

7.6.3. LÍNEAS ISOFREÁTICAS Y DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

Esta zona ha sido poco explotada en cuanto al recurso hídrico subterráneo, de hecho el acuífero utilizado por la población para su abastecimiento es el acuífero somero, en la zona existen algunos pozos perforados pero debido a que son privados no se tuvo acceso a la información litológica de los mismos. Por ello se recurrió a utilizar la información de los niveles piezométricos de los pozos excavados recolectada durante la campaña de agosto – septiembre 2010.

Los pozos excavados en la zona de estudio poseen profundidades menores a los 10 m, no cuentan con revestimiento alguno, algunos poseen brocal hecho de ladrillo, la mayoría no tienen tapadera y están expuestos a la intemperie, por lo que se observó en muchos de ellos la presencia de basura o animales dentro de los mismos. La extracción de agua en general se realiza por medio de un balde sujeto a un lazo atado a una base de madera.

Las líneas isofreáticas trazadas con la información recopilada muestran una tendencia general Noreste – Suroeste del movimiento del agua subterránea en el acuífero superficial. Las líneas de flujo que se muestran en la figura 7.6 indican una tendencia a seguir el drenaje natural del río Las Marías.

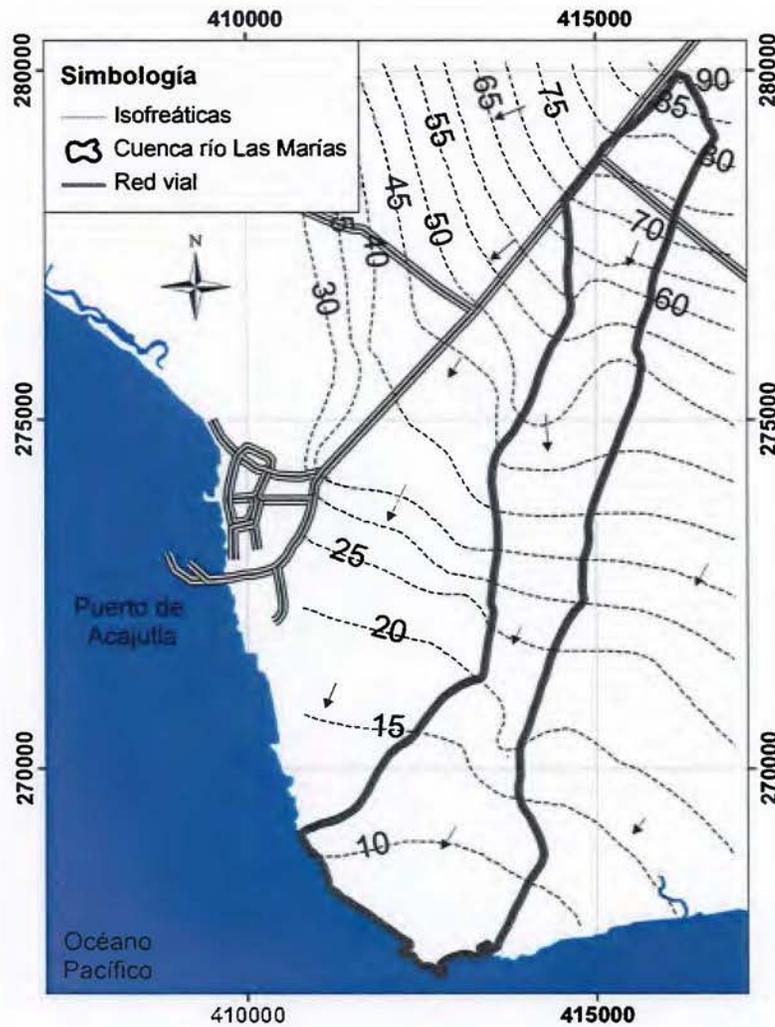


Figura 7.6 Líneas de flujo y equipotenciales en la cuenca del río Las Marias.

7.7. EVALUACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA

La estimación de la recarga hídrica potencial de la cuenca del río Las Marias se realizó mediante un balance hídrico de suelos aplicando la metodología de Schosinsky, la cual plantea que la recarga al acuífero se lleva a cabo si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas, el agua sobrante es la que recarga la acuífero, la cual se calcula con la siguiente ecuación (Schosinsky, 2007):

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR$$

Donde: R_p : recarga potencial mensual en mm/mes

P_i : precipitación infiltra mm/mes

H_{Si} : humedad del suelo al inicio del mes en mm

H_{Sf} : humedad del suelo al final del mes en mm

ETR : evapotranspiración real en mm/mes

En el cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente, se consideran los siguientes factores: la precipitación mensual, retención pluvial mensual en el follaje y el coeficiente de infiltración.

Para el cálculo de la retención mensual de lluvia por follaje se aplican los siguientes criterios:

- Lluvias menores a 5 mm mensuales, no generarán infiltración ya que se considera que en un mes de lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky, 2006). Así si la precipitación es menor o igual a 5 mm, entonces la retención es igual a la precipitación, expresado como una igualdad se tiene: $Ret = P$.
- Se considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12% de la precipitación mensual (Butler, 1957 en Schosinsky, 2006), pero en bosques muy densos, la retención de la lluvia se considera en un 20% (Linsley et al., 1958 en Schosinsky, 2006), así para estos casos se aplica que si el producto de la precipitación (P) y el coeficiente de retención del follaje (C_{fo}) es mayor o igual a 5 mm/mes, el valor obtenido es igual a la retención pluvial (Ret).

El coeficiente de infiltración (C_i) es calculado como la sumatoria de los aportes por efecto de la pendiente del terreno, la textura del suelo y la cobertura vegetal, tal como se indica en la siguiente ecuación

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc}$$

Donde: K_p : fracción que infiltra por efecto de pendiente. (Tabla 7.1)

K_v : fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal. (Tabla 7.2)

K_{fc} : fracción que infiltra por textura del suelo.

En la tabla 7.1 se citan los valores de los coeficientes asociados a diferentes rangos de la pendiente del terreno.

Tabla 7.7 Componentes del coeficiente de pendiente (Schosinsky y Losilla, 2000).

Pendiente		Kp
Muy plana	0.02% - 0.05%	0.30
Plana	0.3% - 0.4%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	Mayor de 7%	0.06

En la figura 7.5 se muestra la distribución del coeficiente de por efecto de la pendiente del terreno, como se observa el coeficiente dominante es el correspondiente al rango de la pendiente de 1 a 2%.

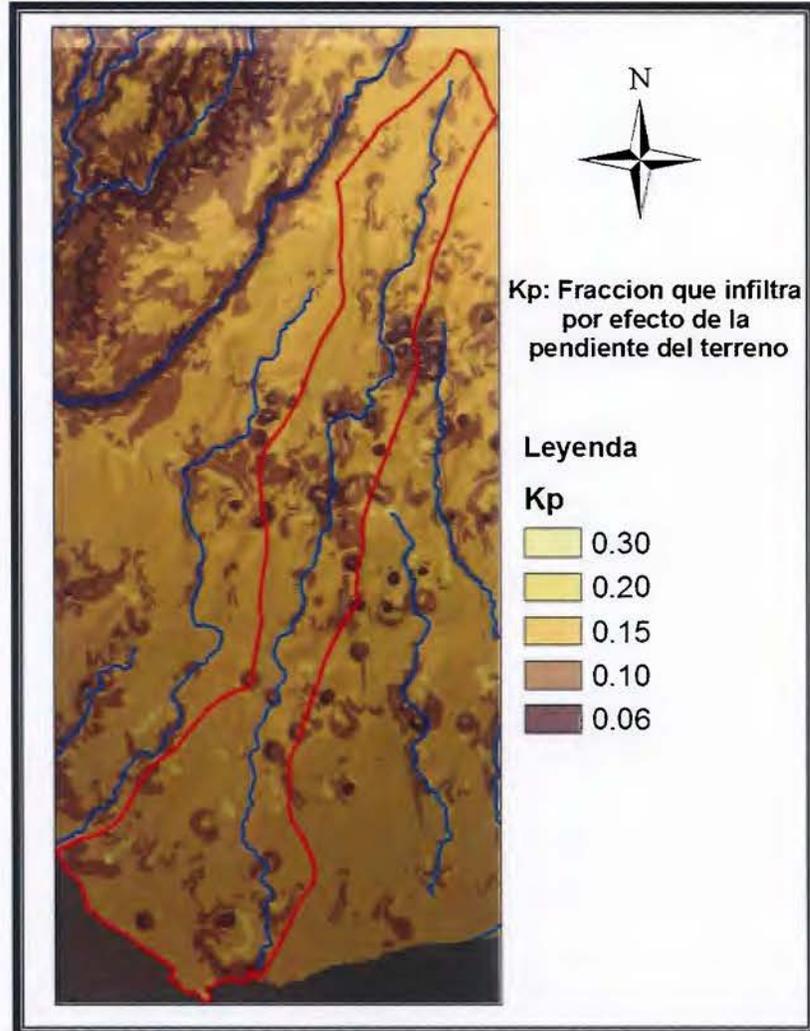


Figura 7.7 Distribución del coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente.

La fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal existente en la zona se definió conforme a los valores de los coeficientes definidos por Schosinsky y Losilla (2000), que se muestran en la tabla 7.2 y la distribución de los mismos en la zona de estudio se muestra en la figura 7.6.

Tabla 7.8 Componentes del coeficiente de cobertura vegetal (Schosinsky y Losilla, 2000).

Cobertura vegetal	Kv
Cobertura con zacate menos del 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más del 75%	0.21

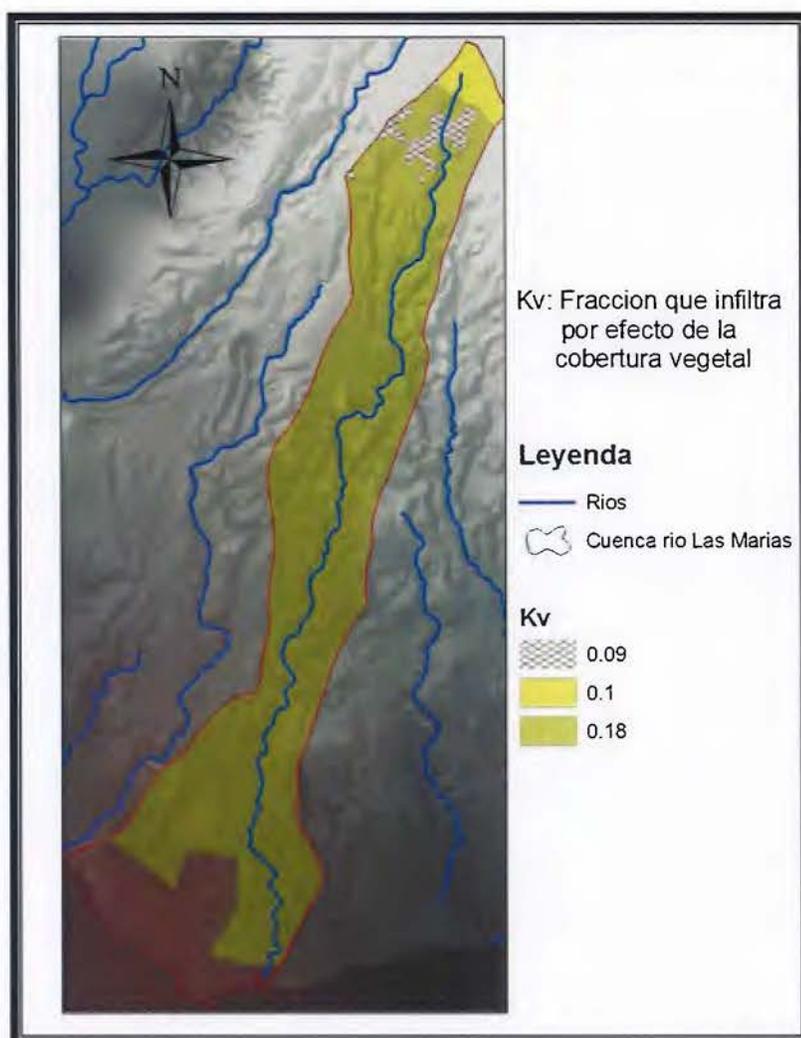


Figura 7.8 Coeficientes del terreno por pendiente y por cobertura vegetal.

El coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (K_{fc}), es uno de los factores más influyentes en la infiltración de la lluvia en el suelo, que está dado por la ecuación siguiente (Schosinsky y Losilla, 2000):

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

Donde: K_{fc} : coeficiente de infiltración

f_c : infiltración básica del suelo

Para aplicar esta ecuación se debe tener en cuenta que el valor de f_c debe encontrarse en el rango de 16 – 1568 mm/día, para valores menores a 16 mm/día $K_{fc} = 0.0148 f_c / 16$, y para valores mayores a 1568 mm/día $K_{fc} = 1$.

Para realizar la distribución de K_{fc} se recurrió en primera instancia a utilizar los valores obtenidos de las pruebas de infiltración pero dado que estas son puntuales se realizaron diferentes distribuciones espaciales en un intento por mejorar el detalle de las texturas de suelo (las diferentes distribuciones se muestran en Anexos), de las sumatorias de los valores de los coeficientes para el cálculo del coeficiente de infiltración se observó al comparar los resultados que las distribuciones eran muy homogéneas existiendo pequeñas diferencias por la geometría de las distribuciones elegidas, por lo que se decidió utilizar la distribución existente del mapa de textura del suelo es decir se calculó un valor promedio de f_c para suelos aluviales y otros para suelos grumosoles para realizar el cálculo de la recarga potencial, según la distribución que se muestra en la Figura 7.7.

Además se realizaron los cálculos por cada tipo de textura definido mediante los análisis de suelo, ello con el objeto de permitir que se realice un nuevo cálculo de existir una actualización en el futuro del mapa de textura del suelo con mayor detalle.

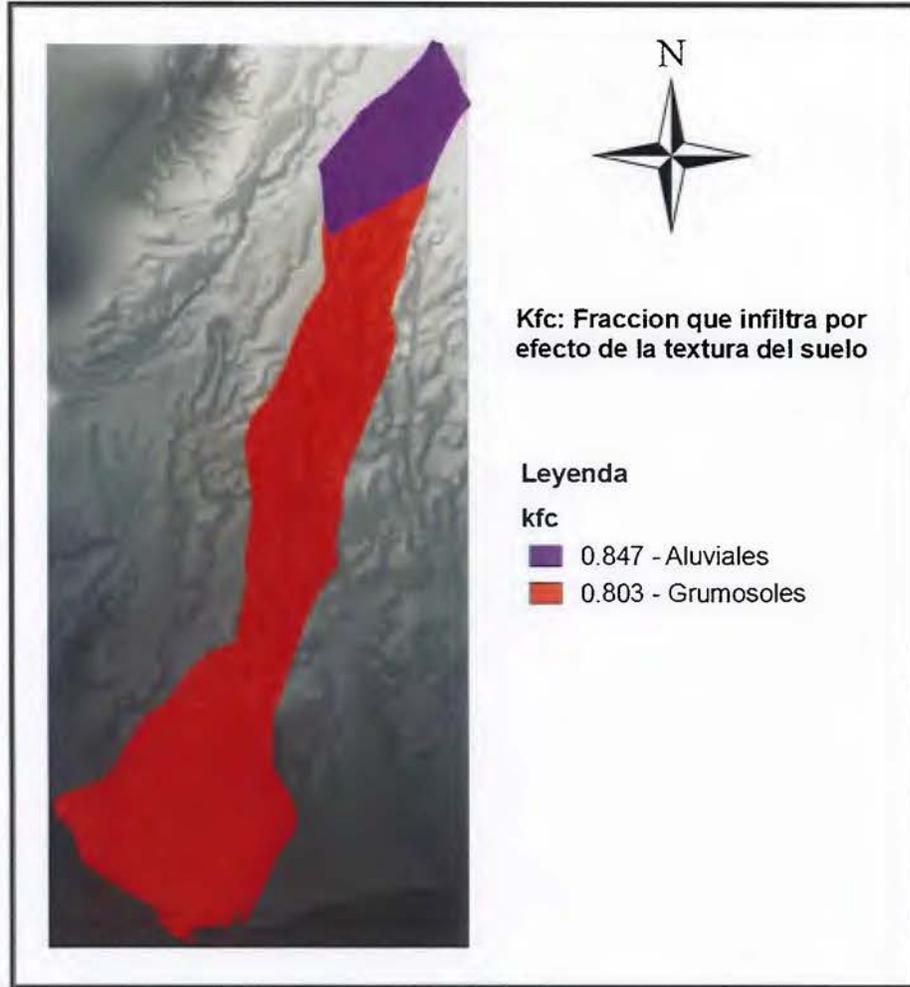
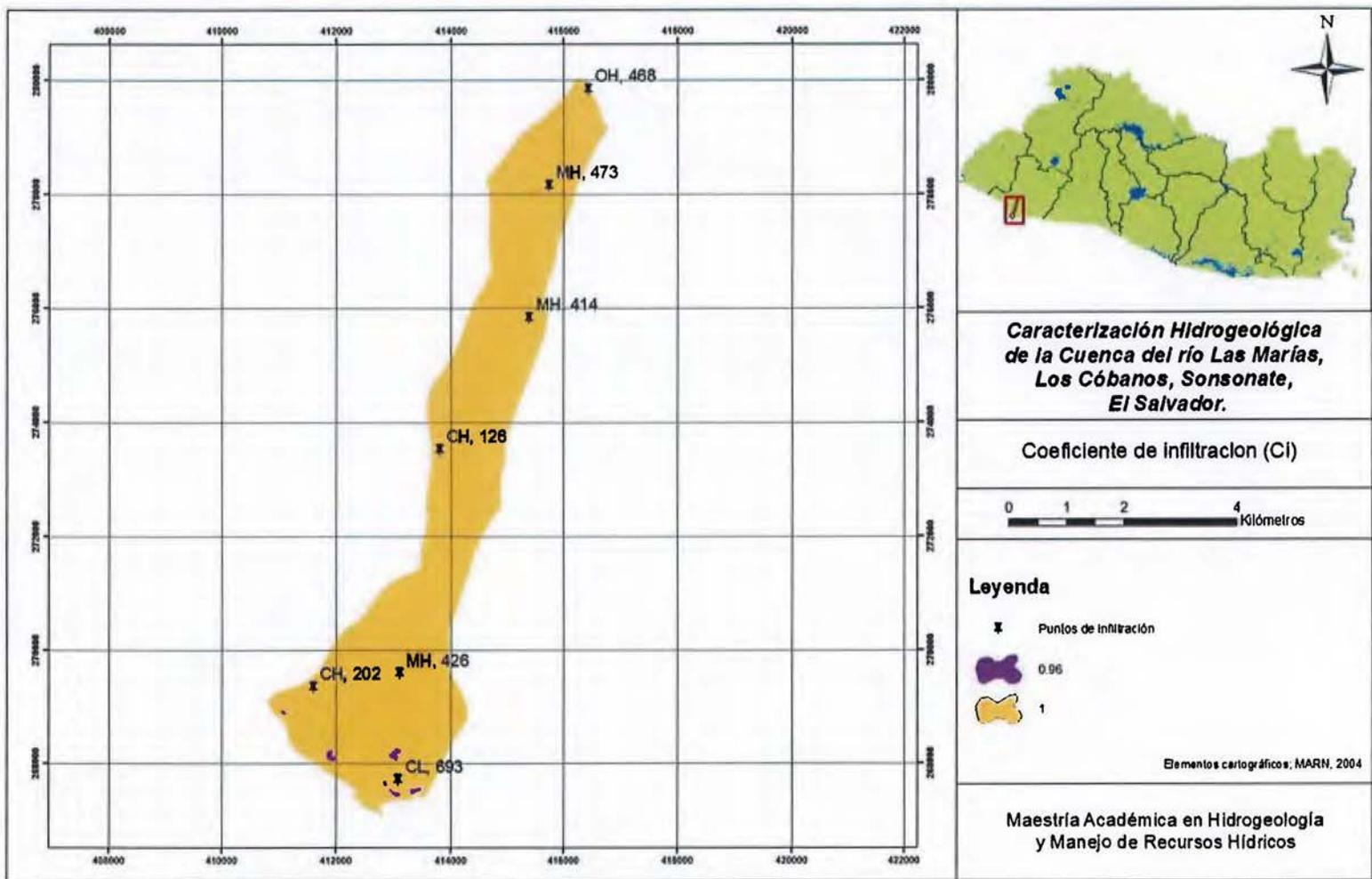


Figura 7.9 Fracción que infiltra por textura del suelo

De la sumatoria de los coeficientes por pendiente del terreno, cobertura vegetal y textura del suelo, se obtuvo como resultado dos valores de coeficientes de infiltración muy similares lo que se explica por las condiciones arcillosas predominantes en la textura del suelo y las condiciones de pendiente bastante homogéneas del terreno. En la figura 7.8 se presenta el coeficiente de infiltración resultado de la sumatoria de los diferentes coeficientes anteriormente definidos.

Figura 7.10 Coeficiente de infiltración resultante:
77



El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente se calcula con la ecuación siguiente (Schosinsky, 2006):

$$P_i = (C_i) \times (P - \text{Ret})$$

Donde: P_i : es la precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes

C_i : coeficiente de infiltración

P : precipitación mensual en mm/mes

Ret : retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes

Luego de calcular la infiltración mensual al suelo, es necesario conocer los valores de retención de humedad del suelo, los cuales son la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, así como la densidad aparente de las muestras, cuyos valores se obtuvieron directamente del laboratorio de suelos. Todos estos valores se muestran en la tabla de resultados de análisis de suelos.

7.8. BALANCE HÍDRICO DE SUELOS

El cálculo de la recarga hídrica por los valores promedios de infiltración se muestra en la Figura 7.9 y sus resultados en la Tabla 7.3, en ella se observa que la recarga potencial (R_p) en el área de suelos aluviales es de 258.3 milímetros anuales, mientras que en suelos grumosos la recarga potencial (R_p) es de 279.5 milímetros por año.

Tabla 7.9 Balance hídrico de suelos Cuenca del río Las Marías

Suelos	Fc (mm/día)	Ret (mm/año)	Esc (mm/año)	ETR (mm/año)	Rp (mm)
Aluviales	470.5	219.2	0	928.5	258.3
Grumosos	376.6	219.2	0	1240.43	279.5

* Fc = Infiltración; RET= Retención de la vegetación; ESC= Ecurrimiento superficial; Rp= Recarga potencial al acuífero

** ETR = Evapotranspiración real

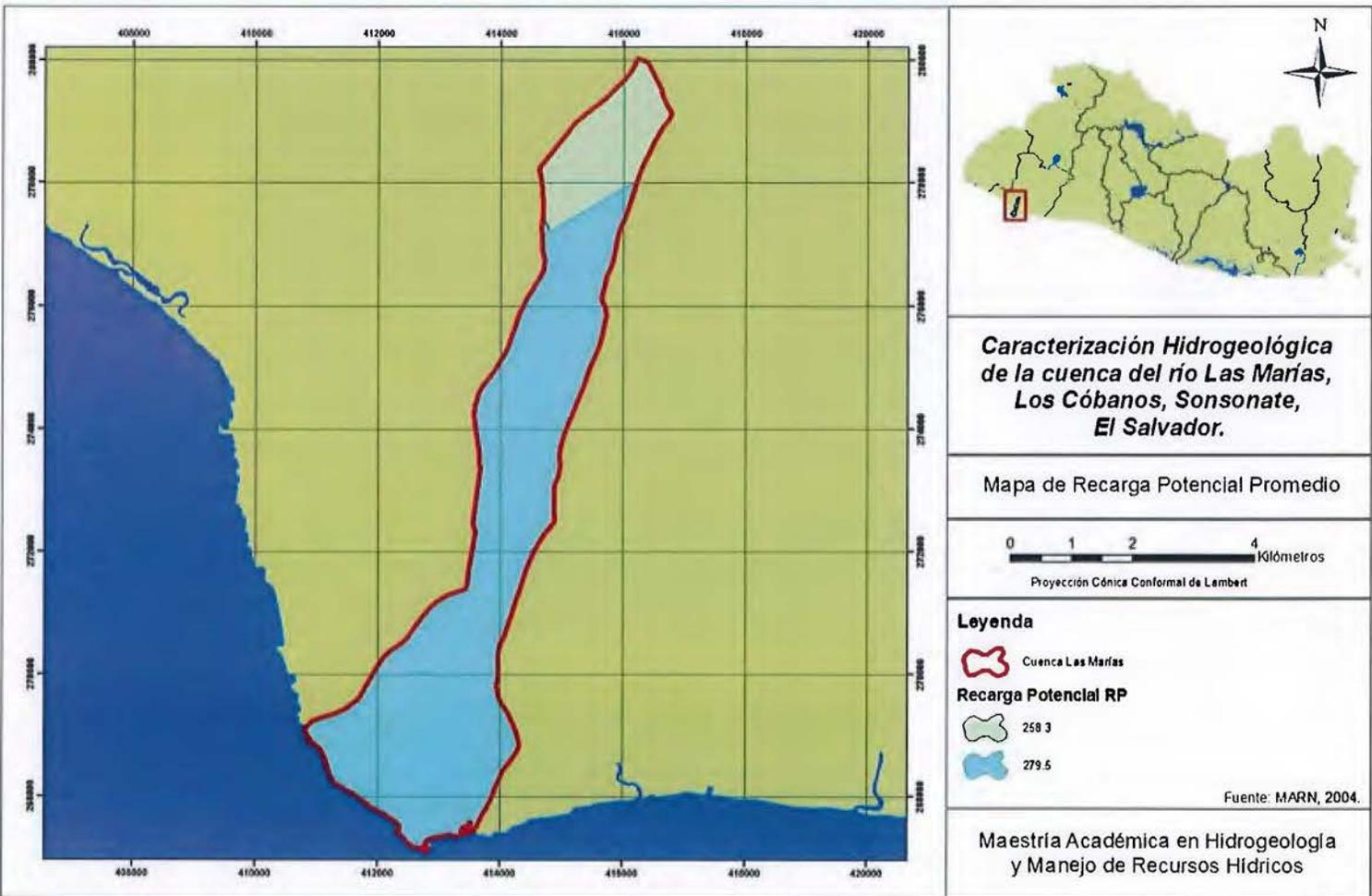


Figura 7.11 Mapa de Recarga Potencial utilizando los valores promedios de infiltración básica del suelo.

En la tabla 7.10 se muestran los resultados de la cuantificación de los caudales que genera cada componente en la cuenca del río Las Marías. La recarga al acuífero somero por infiltración representa un 16.4% de la precipitación anual sobre la cuenca.

Tabla 7.10 Resumen de resultados del balance hídrico de suelos

Suelos	Área (Km ²)	Recarga		Volumen	Volumen	Vol. ETR. (l/s)	Porcentaje recarga %
		(l/s)	(mm)	Escorrentía (l/s)	Retenido (l/s)		
Aluviales	3.01	24.67	258.3	0	20.92	88.69	14%
Grumosoles	16.93	150.05	279.5	0	117.57	665.93	86%
TOTAL	19.94	174.72		0	138.49	754.617	
%	100	16.4%			13%	70.6%	100%

Del cálculo de recarga por cada tipo de suelo multiplicado por el área correspondiente, se tiene que de los suelos aluviales el volumen de recarga asciende a 778,118.47 m³/año y de los grumosoles el volumen de recarga asciende a 4,731,978.7 m³/año, así en total la recarga potencial de la cuenca es de 5,510,097.1 m³/año, lo cual es equivalente a una recarga potencial promedio de 174.72 l/s en la microcuenca. Considerando un caudal de extracción de 1200 l/d en cada pozo, se tiene un caudal de explotación de agua de la microcuenca de 88,800 l/d, equivalente a 1.03 l/s. Al comparar los valores de extracción versus la recarga potencial calculada, se observa que las extracciones de agua para consumo no son significativas en el volumen de recarga, por lo que puede concluirse que el acuífero superficial no está siendo sobre explotado, en consecuencia la salinidad del agua del acuífero no se debe a intrusión salina, como inicialmente fue supuesto en esta investigación.

El balance hídrico se realizó además para cada tipo de textura de manera que reflejara las condiciones más específicas determinadas por los análisis de suelos para cada tipo de uso de la tierra dentro del área de investigación, a continuación se muestra la Tabla 7.5 los resultados obtenidos con los datos de campo para cada tipo de textura, así mismo se muestran a modo comparativo los valores del método para determinar la Recarga de Agua Subterránea (RAS) desarrollado por el Ing. Martin Junker para FORGAES (2005) el cual está basado en la metodología de Schosinsky y Losilla (2000) con diferencias en los

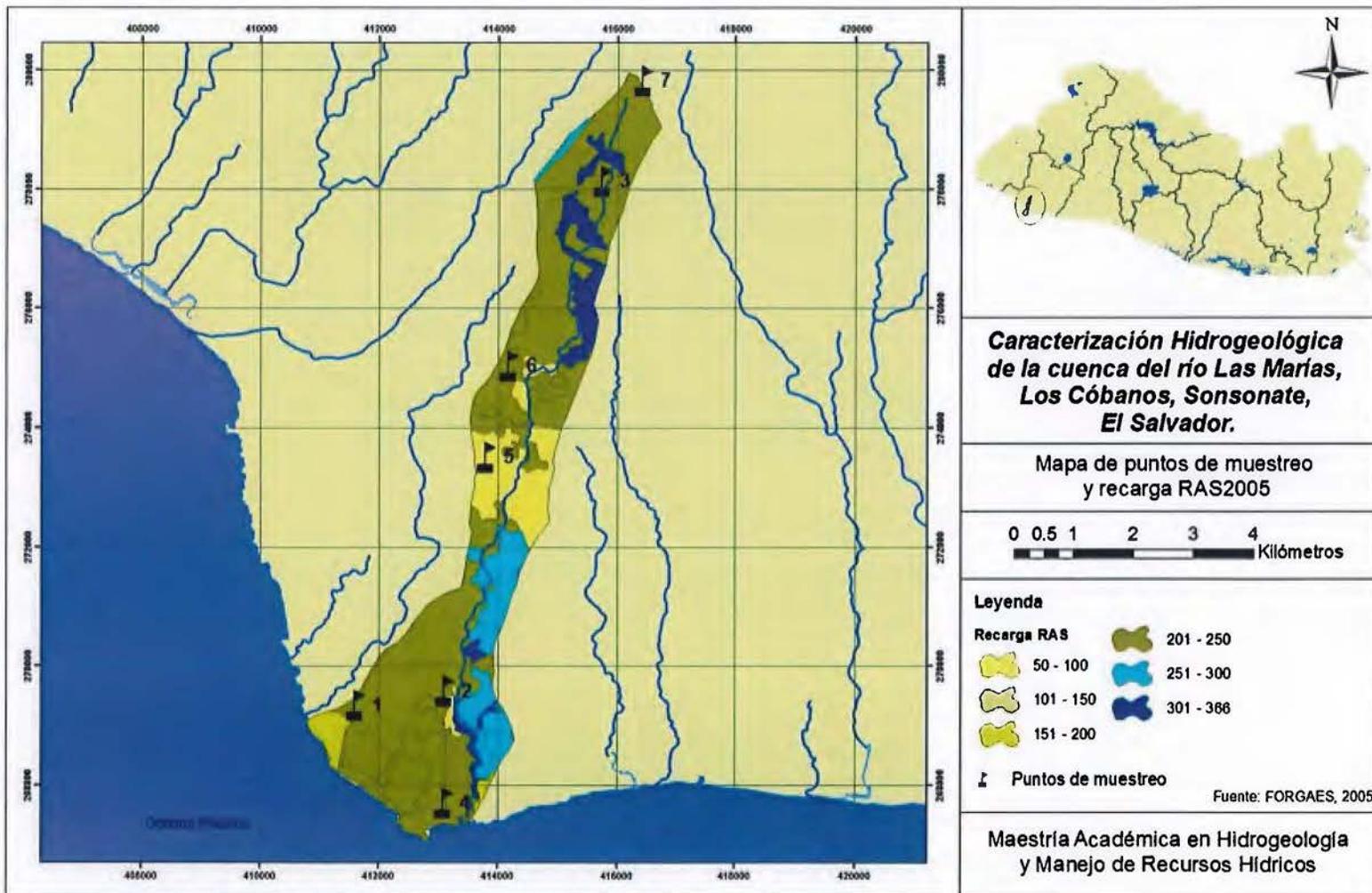
valores de los coeficientes que se asignan para el cálculo de la recarga. De igual manera en la Figura 7.10 se muestra la localización de los puntos de muestreo sobre el mapa de valores de RAS, y el detalle de cada balance se presenta en Anexos.

Tabla 7.11 Comparativo de valores de recarga potencial.

No.	Uso del suelo	Textura Suelos	Rp (mm)	Valor de recarga Método RAS (mm)
1	Pastos – Rancho Paja	Arcilla gruesa	261	201 – 250
2	Pastos – Hda. Jose R. Alfaro	Limo elástico	268	201 – 250
3	Pastos – Potrero Las Marías	Limo con arena	282	201 – 250
4	Semiurbano – Los Cóbano	Arcilla delgada con arena	312	201 – 250
5	Cultivos – Cooperativa	Arcilla gruesa	114	50 – 100
6	Pastos – Lot. Las Marías	Limo elástico con arena	282	201 – 250
7	Caña de azúcar – Hda. San Antonio	Limo orgánico	277	201 – 250

Como se observa en la Tabla 7.11 los valores de recarga calculados para cada tipo de textura son ligeramente mayores a los rangos de valores dados por el método RAS, lo que se debe a la diferencia de los valores de los coeficientes utilizados, ya que la metodología RAS tiene una amplia variedad de coeficientes.

Figura 7.12 Mapa de valores de recarga potencial según método RAS.
82



7.9. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Se entiende como modelo hidrogeológico conceptual una simplificación del sistema realizado a partir de la evaluación de las características hidrogeológicas, geofísicas y geoquímicas del área de estudio, que se presenta en dos o tres dimensiones.

El modelo conceptual del sistema acuífero de la zona de estudio, se determinó principalmente a partir de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales, los cuales se modelaron considerando también la geología de campo, los niveles estáticos medidos en los pozos excavados y la litología de los pozos perforados a los que se pudo acceder. De esta investigación se corroboró la existencia de dos acuíferos, uno superficial de mediana producción, con un espesor variable de hasta 20 metros, y que es el que la población de la zona utiliza como fuente de abastecimiento de agua. Un segundo acuífero más profundo fue detectado con los sondeos eléctricos verticales y del cual se sabe que existen pozos perforados privados que abastecen a las empresas hoteleras y ranchos privados del área.

El acuífero somero presente en la zona de estudio, se ubica en los sedimentos aluviales (limos, cenizas, arenas) intercalados con piroclastos (tobas retrabajadas, bloques de lava andesítica basáltica) que se observan aflorando en superficie, puede alcanzar un espesor de hasta 20 metros según la interpretación de los sondeos eléctricos verticales con resistividades que van de 6 – 15 Ω m. Se determinó que este acuífero es libre, ya que no se reconoce ningún estrato confinante y por los valores de transmisividad determinados de las pruebas en pozos excavados.

La dirección preferencial del flujo subterráneo presenta una orientación noreste en la dirección del drenaje del río las Marías cambiando hacia el suroeste aparentemente influenciado por la explotación de pozos en la zona de Acajutla.

La evidencia del acuífero profundo se obtuvo tanto de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales como de niveles freáticos de pozos perforados en los alrededores cercanos, el nivel freático de este acuífero tiene una profundidad de aproximadamente 30 metros en la zona.

En la figura 7.13 se muestra una ilustración del modelo conceptual hidrogeológico en la cuenca del río Las Marías.

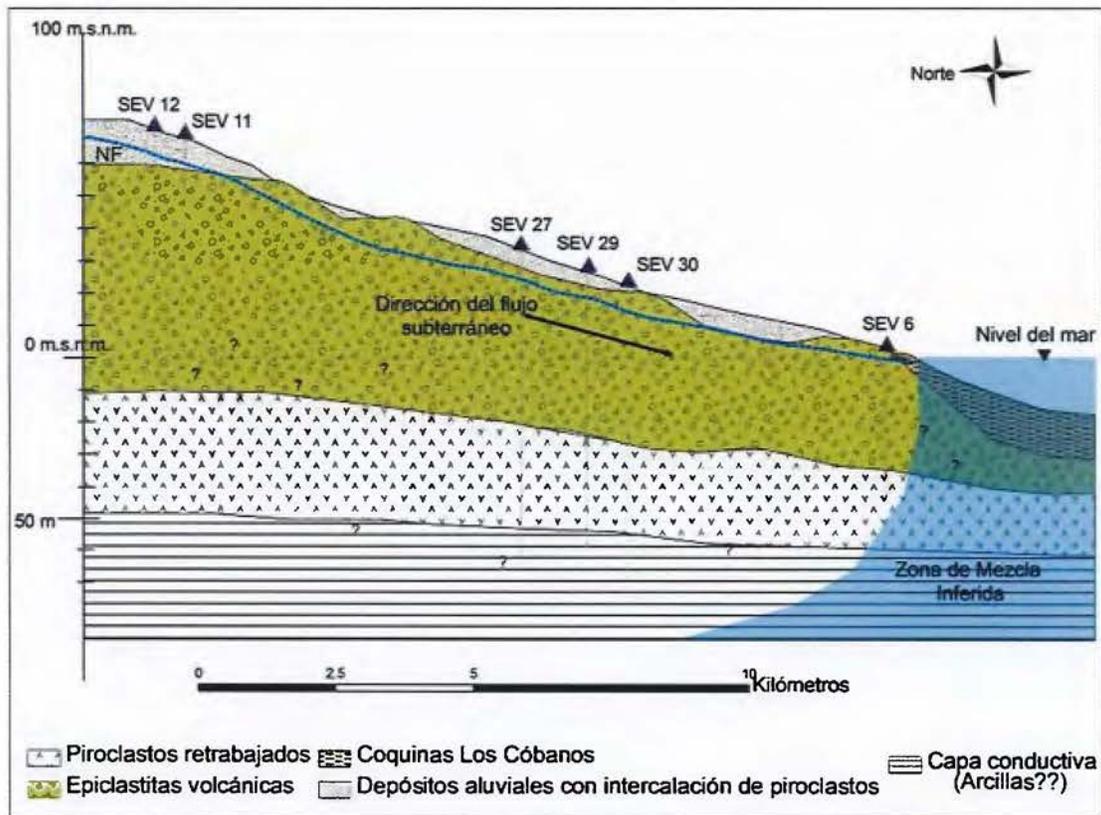


Figura 7.13 Modelo conceptual longitudinal hidrogeológico cuenca del río Las Marías

7.10. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN

La vulnerabilidad del acuífero superficial se determinó utilizando la metodología GOD, la cual consiste en evaluar tres parámetros básicos que son, el grado de confinamiento de hidráulico, la ocurrencia del sustrato suprayacente y la distancia al nivel del agua subterránea.

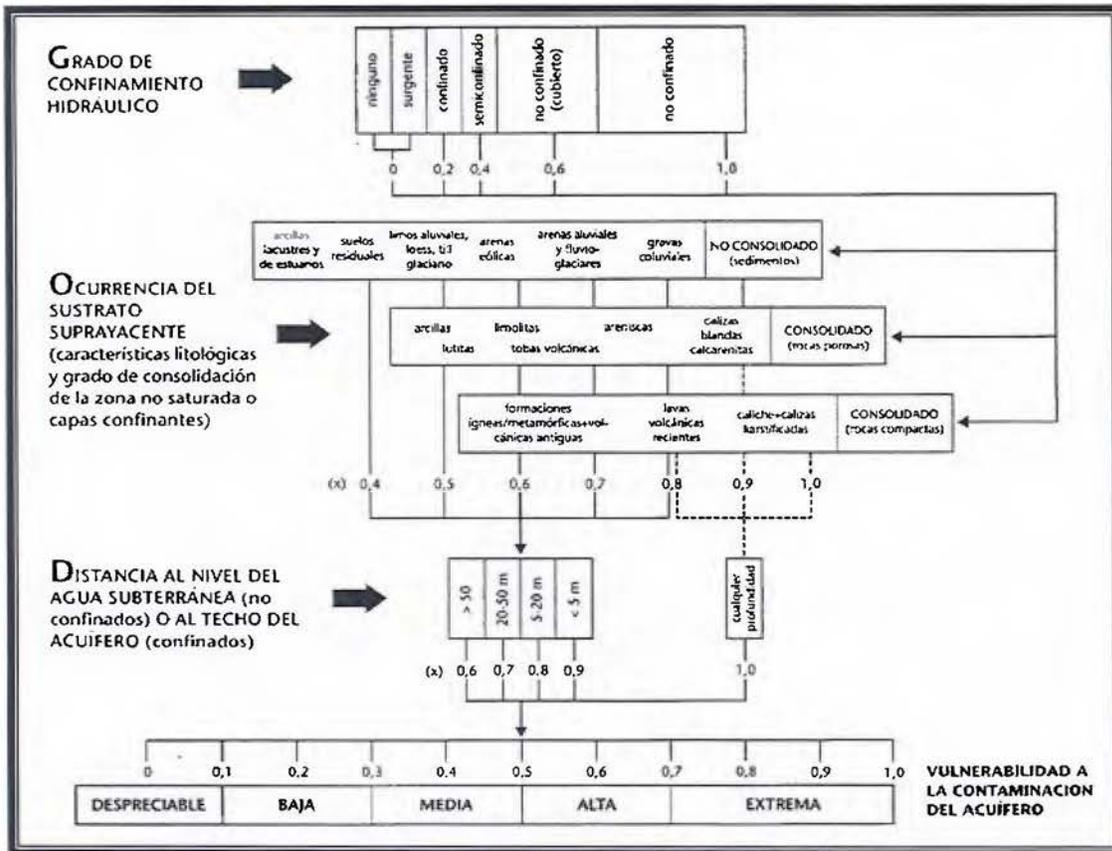


Figura 7.14 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

Dadas las condiciones de no confinamiento del acuífero somero del área de estudio, el parámetro del grado de confinamiento se consideró igual a 1.0, como se muestra en la figura 8.2. En el caso de la ocurrencia del sustrato, dado que la litología de la zona es básicamente tobas líticas y tobas retrabajadas el valor asignado fue de 0.6, tal y como se muestra en la figura 8.3. Ya que la distancia al nivel del agua subterránea en el acuífero superficial es menor a 5 metros el coeficiente correspondiente es 0.9, como se observa en la figura 8.4. Por tanto, de la multiplicación de estos parámetros se determinó que la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero superficial es alta, este resultado se representa gráficamente en la figura 8.5, lo cual quedó demostrado con los resultados de análisis del agua subterránea en los que se muestran altos grados de contaminación microbiológica.

Figura 7.15 Grado de confinamiento del acuífero somero en el área de estudio.

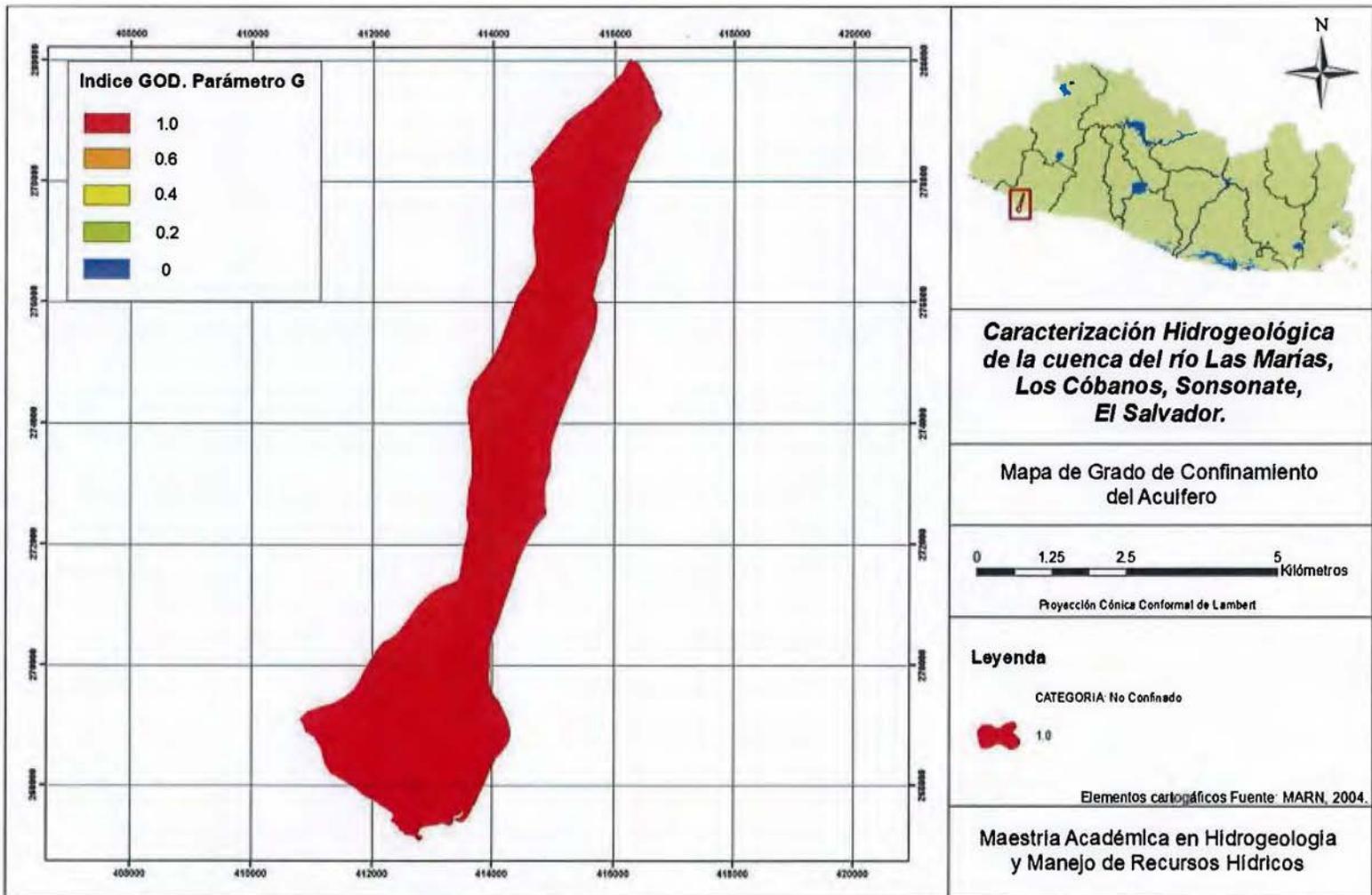


Figura 7.16 Características litológicas de la zona no saturada.
87

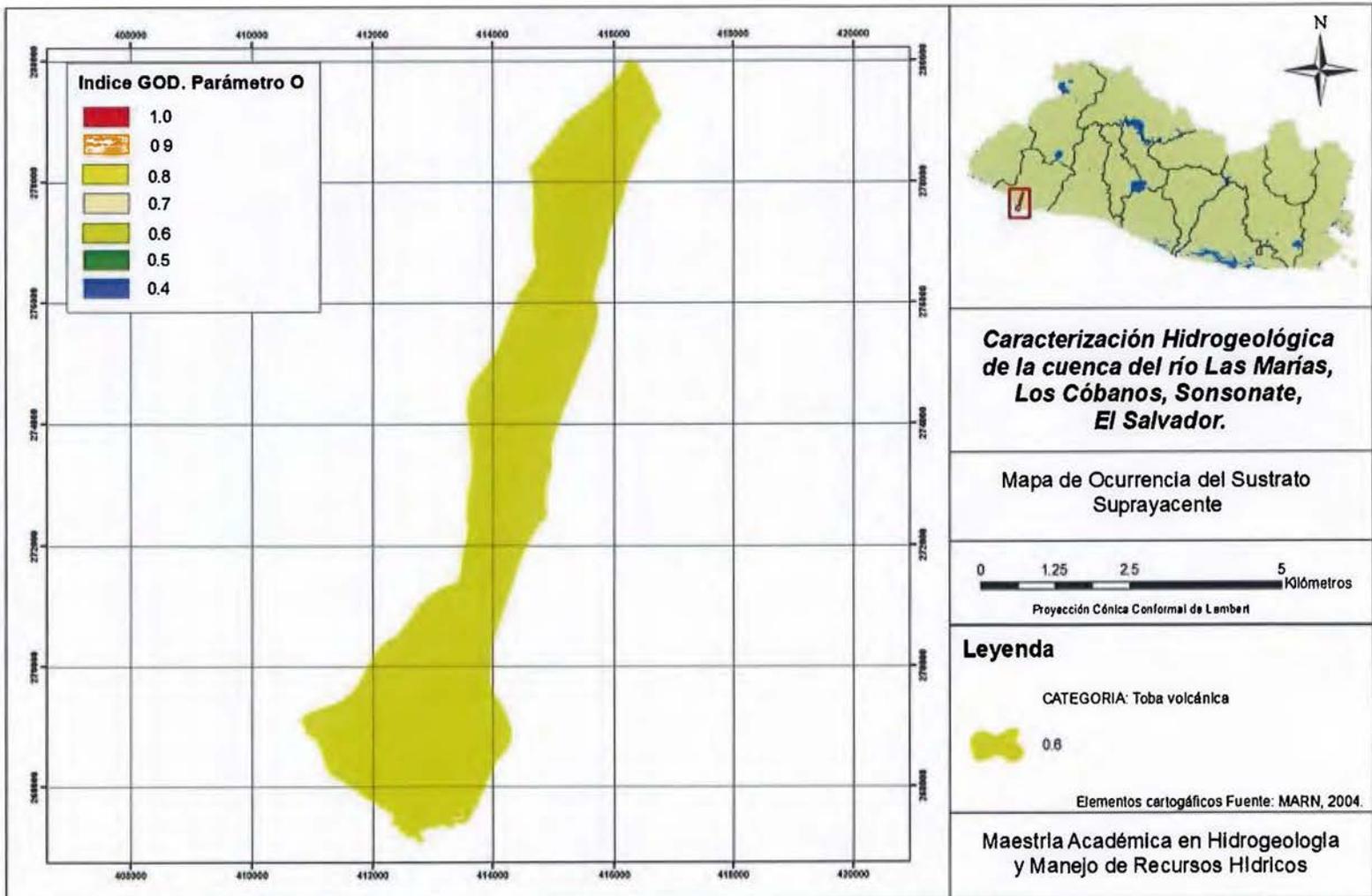


Figura 7.17 Distancia al nivel del agua subterránea.
88

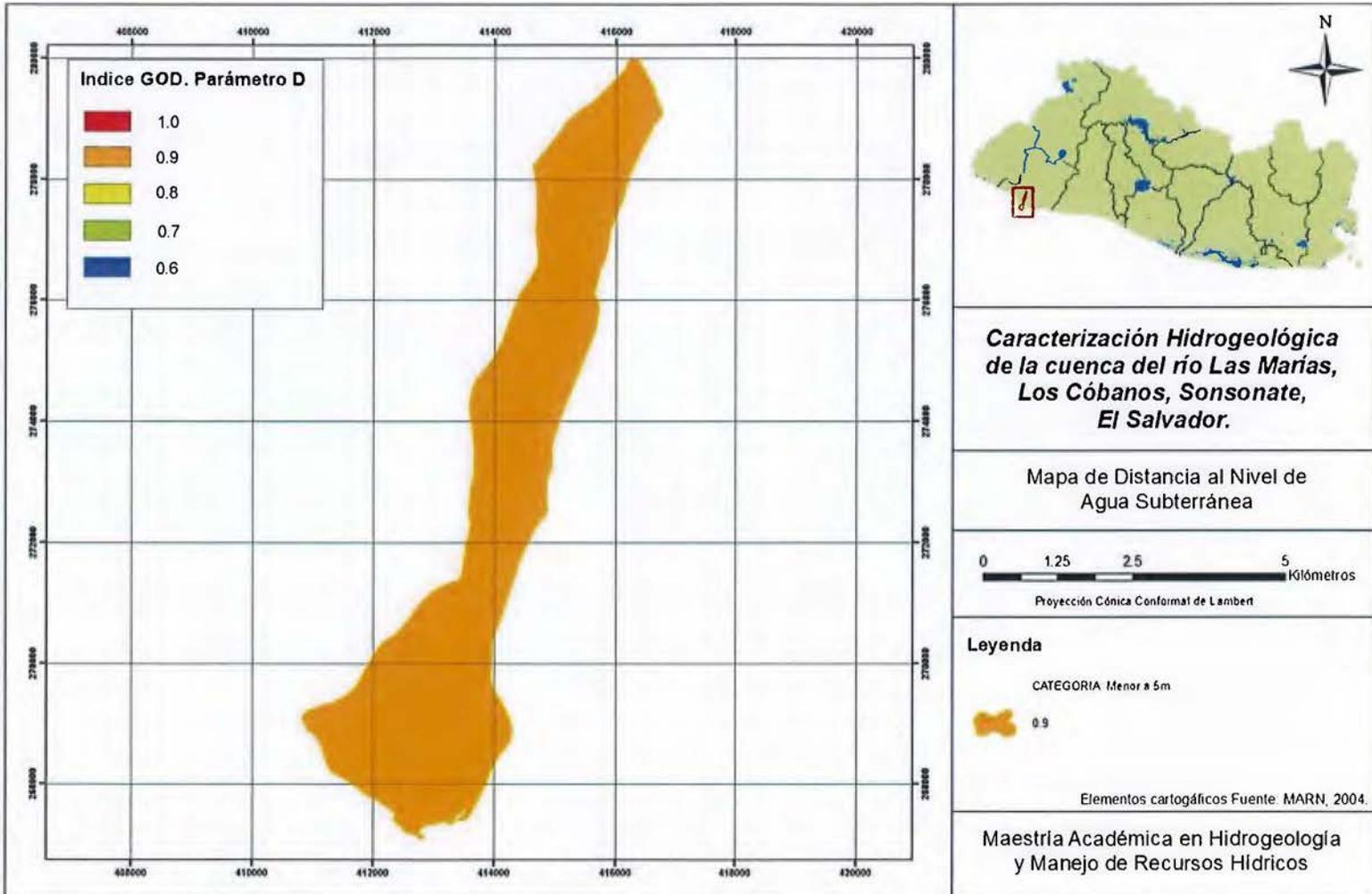
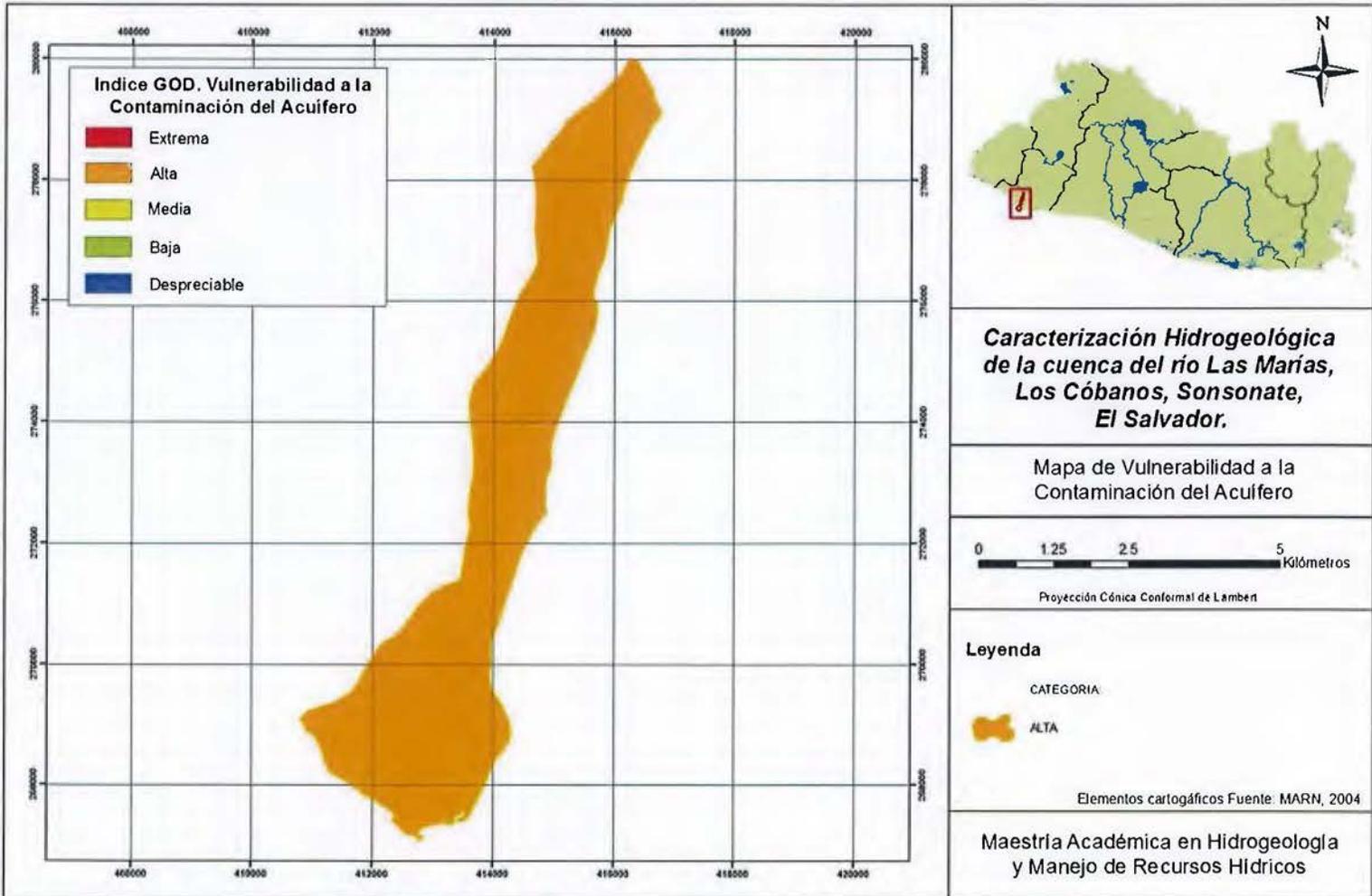


Figura 7.18 Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero superficial en la zona de estudio.



CAPITULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

Se verificó por medio de los análisis de laboratorio que el agua subterránea del acuífero somero no cumple las condiciones de potabilidad requeridas por la Norma Regional de Calidad del Agua CAPRE (1994) y la Norma Salvadoreña Obligatoria para Calidad del Agua Potable NSO 13.07.01.04 (2006) para el consumo humano, puesto que todas las muestras presentaron contaminación microbiológica por Coliformes fecales y Eschericia Coli. Estos resultados corroboran a la vez el alto grado de vulnerabilidad del acuífero superficial a la contaminación, debido a la poca profundidad del agua subterránea y que el acuífero no esté confinado. El riesgo a la contaminación se ve incrementado por el hecho de que en la zona no se cuenta con sistemas adecuados de letrinas.

Los resultados de resistividad obtenidos de la prospección geofísica próxima a la costa, en donde se obtuvo una profundidad teórica de 100m, no reflejan que se haya interceptado la cuña de intrusión salina para lo que se considera el acuífero somero, lo que coincidió con los resultados hidrogeoquímicos, los cuales indican que los valores de los constituyentes mayoritarios del agua y la conductividad eléctrica se encuentran dentro de los rangos de aguas continentales.

Los valores altos de conductividad, cloruros y sólidos totales disueltos en las muestras 1, 3 y 4 las cuales se ubican en potreros, indican contaminación por la actividad agropecuaria, la cual puede deberse al uso intensivo de agroquímicos para pastos, granos y otros cultivos, junto con las prácticas de manejo del suelo en la crianza de ganado (no existencia de prácticas de manejo adecuado de los desechos y la de dar sal al ganado).

Los resultados de los sondeos realizados en 1990 por GEOCEL en los que se utilizó una apertura AB/2 de 500 m se logró prospectar hasta una profundidad teórica de 150 m a 200 m, encontrándose una capa por debajo de los 120 m con una resistividad entre los 4 a 9 Ω m, la cual podría interpretarse como una capa arcillosa o una zona de mezcla entre el agua dulce y el agua salada, sin embargo no es posible concluir categóricamente puesto que en la zona no existen registros de perforación hasta esa profundidad.

El balance hídrico realizado con la metodología de Schosinsky dio como resultado un valor medio de 270 mm/año equivalente a 174 litros/seg, al comparar este valor con el de la metodología RAS en el Mapa de Recarga Nacional en el que se obtienen valores de 201 a 250 mm/año. El método utilizado muestra un valor de recarga ligeramente mayor dado que se realizó el cálculo con los valores obtenidos directamente del trabajo de campo para la obtención de los coeficientes que requiere el método.

Conforme a los resultados del balance hídrico elaborado con la metodología de Schosinsky se obtuvo que de los 1739 mm de precipitación anual, el 70.6% equivalente a 1217 mm corresponde a evapotranspiración real, el 13% (226 mm) pertenece a la retención por la vegetación y el restante 16.4% (278 mm) representa la recarga acuífera de la zona. Como se puede notar no se tiene un valor de escurrimiento dado que la zona es muy plana y cuando el suelo alcanza la saturación la zona se encuentra anegada lo que mantiene aún las condiciones de humedal y su biodiversidad.

8.2. RECOMENDACIONES

Clausurar los pozos 1, 3, y 4 puesto que son los que presentan mayores concentraciones de contaminación, y buscar nuevas fuentes de agua para el abastecimiento de estas áreas, así como implementar medidas de control de manejo de desechos del ganado para evitar que sigan siendo focos de contaminación.

Desarrollar un plan de educación y gestión integral con los habitantes del área para mejorar las condiciones de saneamiento y manejo de desechos que sea acorde a las condiciones del sitio, que integren de forma óptima las actividades humanas y la protección de la biodiversidad existente en la zona.

Promover entre la población buenas prácticas de higiene y un plan de reubicación de letrinas de forma que estas queden en una posición topográfica lo suficientemente alejadas de los pozos de abastecimiento de agua.

Perforar pozos exploratorios que superen los 150 metros de profundidad, uno en la parte alta de la cuenca, en la parte media y en la parte cercana a la costa, con el objeto de

corroborar los datos geofísicos e identificar las características litológicas, hidráulicas y de calidad del acuífero profundo para realizar una caracterización del mismo y determinar la profundidad de la cuña de intrusión salina.

Actualizar el detalle de investigación en los diferentes ámbitos de interés, para ello es necesario renovar y mejorar la escala cartográfica de los mapas de geología, hidrogeología, uso de suelo, etc.

Realizar un estudio geotécnico intensivo, con una densidad de muestreo que permita identificar las clases y texturas de suelo con mayor detalle con el objetivo de tener mayor conocimiento del terreno y mejorar la precisión de la distribución de los diferentes tipos de suelos, lo cual es importante para plantear y proponer planes de uso del suelo acorde a la capacidad del mismo.

Efectuar un análisis de plaguicidas en el agua de los pozos excavados es primordial dado que en la zona se evidencia un uso intensivo de agroquímicos y la profundidad del nivel freático del acuífero superficial en algunas zonas es de apenas de 50 cm y la vulnerabilidad del acuífero superficial es alta. Es necesario invertir en planes de formación de la población en el manejo de agroquímicos.

Elaborar planes de gestión del recurso hídrico que involucre a las personas e instituciones del área para proteger y asegurar la calidad del recurso del acuífero somero que es la fuente de abastecimiento de agua de la población en la zona.

BIBLIOGRAFÍA

APHA (American Public Health Association), 1995: Standard Methods for the examination of water and wastewater. – 769 págs. 19th Edition, New York,

Arias, M. E., Vargas, A. & Guerin, R. 2003: Geofísica aplicada al problema de la intrusión salina en los acuíferos costeros de Costa Rica. López – Geta, et. al Editores.

Astier, J. L., 1982: Geofísica aplicada a la Hidrogeología. – 339 Págs. Editorial Paraninfo S. A. Segunda Edición. España.

Barlow, P., 2003: Ground Water in Freshwater – Saltwater Enviroments of the Atlantic Coast. U.S. Geological Survey Circular 1262.

CAPRE 1994. Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano.- 27 Págs. Comité Coordinador Regional de instituciones de agua potable y saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana., San José, Costa Rica.

CEL (Comisión Ejecutiva del Río Lempa), 1984. Léxico Estratigráfico de El Salvador. El Salvador. 95 Págs.

Custodio, E & Llamas, M., 1976: Hidrología Subterránea. Tomo II, Ediciones Omega, S. A. España. 2290 Págs.

Estévez, 2007. Estudio Hidrogeológico del Área Planta de Almacenamiento y Distribución de Combustibles Derivados de Petróleo Acajutla, Departamento de Sonsonate. El Salvador.

Fetter, C. W., 2001: Applied Hydrogeology. – 598 págs. 4th Edition, Prentice Hill. New Jersey.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M., 2002: Groundwater Quality Protection. A guide for Water utilities, municipal authorities and environmental agencies.- 115 págs, The World Bank, Washington D.C.

Fundación PRISMA, 2001: Estudio de la Intrusión de Aguas Salinas en la Zona Costera de la Bahía de Jiquilisco. - 23 Págs. El Salvador.

González, L. y Hasbún, A., 2008: Estudio de los Ecosistemas Lacustre en el Lago de Ilopango y Costero – Arrecifal del Arrecife Rocosos Los Cóbanos. - 8 Págs. CONACYT y Universidad Salvadoreña Alberto Masferrer. El Salvador.

Hem, J.D., 1989. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. - 263 Págs. Third Edition. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254.

Kearey, P., Brooks, M. & Hill, I., 2002: An Introduction to Geophysical Exploration. Third edition, Blackwell Science Ltd. United States of America.

Machuca, W. E. 2003. Estudio Hidrogeológico del área del Cantón Punta Remedios – Playa Los Cóbanos, J/Acajutla, Departamento de Sonsonate. Unidad de Gestión Hídrica. Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

Medina, M., Saavedra, R., Montaña, M. & Gurrola, J., 2002: Vulnerabilidad a la Intrusión Marina de Acuíferos Costeros en el Pacífico Norte Mexicano; un Caso, el Acuífero Costa Hermosillo, Sonora, México. – Revista Latinoamericana de Hidrogeología, Numero 2, México.

PLAMDARH, 1981. Documento Básico No. 6. Recursos y Demandas Potenciales en la Región "D". El Salvador.

Pulido Bosch, A., 2001: Sobreexplotación de Acuíferos y Desarrollo Sostenible. Problemática de la Gestión del Agua en Regiones Semiáridas. Instituto de Estudios Almerienses, España.

Schosinsky, G. y Losilla, M., 2000: Modelo Analítico para Determinar la Infiltración con Base en la Lluvia Mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23: 43 – 55.

Schosinsky, G. 2002. Pruebas de Bombeo en Pozos de Gran Diámetro. *Revista Geológica de América Central*, 27: 85 – 95.

Schosinsky, G. 2006. Cálculo de la Recarga Potencial de Acuíferos Mediante un Balance Hídrico de Suelos. *Revista Geológica de América Central* 34 – 35: 13 – 30.