

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



**DESCRIPCIÓN DE LA EVOLUCIÓN HIDROGEOQUÍMICA  
Y DE CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS DE LA  
SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE**

PRESENTADO POR

**RANDY JULIÁN MERLOS ZAMORA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS  
HIDROGEOLÓGICOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2011.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**UNIDAD DE POSGRADO**

JEFA DE UNIDAD :

**MSc. PATRICIA HAYDEÉ ESTRADA DE LÓPEZ**

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS**

Título :

**DESCRIPCIÓN DE LA EVOLUCIÓN HIDROGEOQUÍMICA  
Y DE CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS DE LA  
SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE**

Presentado por :

**RANDY JULIÁN MERLOS ZAMORA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**MSc. LAURA GIL URRUTIA**

San Salvador, Septiembre de 2011.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**MSc. LAURA GIL URRUTIA**

## RESUMEN

Para determinar políticas de gestión para la conservación, preservación y protección del agua subterránea y superficial, se requiere tener claro un modelo conceptual de los acuíferos que conforman un área de interés, sea ésta limitada por fronteras político-administrativo, de cuenca hidrográfica, de usos de suelo, etc.

Considerando lo anterior, la hidrogeoquímica permite verificar un modelo conceptual pre-establecido, o poner al descubierto factores de tipo geológico y químico que puedan replantear los modelos.

Así, se ha estudiado la subcuenca hidrográfica del río Metayate, el cual tiene un modelo conceptual básico elaborado por ANDA, localizado en un área con creciente demanda de agua para consumo humano, agropecuarios, recreacionales, etc.

En primera instancia, se armonizó la información geológica disponible. Las formaciones rocosas más antiguas identificadas fueron Morazán (35,4 a 23,3 millones de años, conformadas por Efusivas intermedias hasta intermedias-ácidas piroclásticas subordinadas, alteración regional por influencia hidrotermal) y Chalatenango (23,3 – 5,2 millones de años, conformada por Efusivas ácidas; piroclásticas ácidas subordinadas, y lavas de intermedias a ácidas) en la parte alta de la subcuenca (elevaciones de 450 a 1,000 msnm), subcuenca media (de 300 a 450 msnm) y baja (de 250 a 300 msnm), los cuales forman una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad, con presencia de rocas fracturadas, y fallas geológicas.

Las rocas más recientes, ubicadas en la parte baja, corresponden a la formación Cuscatlán (1,6 millones a 10,000 años, conformada por depósitos fluviales: cantos rodados, estratos de limos y arcillas) y San Salvador (10,000 a 5,000 años, conformada por depósitos de materiales aluviales del cuaternario), formada por rocas sedimentarias, conformando una unidad hidrogeológica de media a baja permeabilidad.

La composición fisicoquímica del agua permitió determinar la presencia de flujos locales, intermedios y regionales de agua, lo que permitió actualizar el modelo de ANDA de 2009. Se identificaron cuatro acuíferos:

**Acuífero colgado con flujo local:** Poco mineralizado, con predominancia de iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), calcio (Ca) y sodio (Na), sin influencia termal, pH de ligeramente ácido a neutro, con puntos de descarga focalizado en manantiales y drenaje subsuperficial, con rumbo norte a sur, por medio de fallas. Se encuentra en una formación geológica de baja a nula permeabilidad. Los manantiales son captados y usados para consumo por las comunidades locales.

**Acuífero fracturado con flujo local e intermedio:** Acuífero entre la parte inferior de la subcuena alta (hasta 450 msnm) y la parte baja de la subcuena media (hasta 300 msnm). Presenta mayor mineralización que el acuífero colgado con flujo local, sin influencia hidrotermal, con puntos de descarga en el río Metayate, debido al rastro de cloruros existente. La dirección del flujo es de norte a sur y de noreste a suroeste, moviéndose por medio de fracturas en la roca, presentando un grupo con baja concentración de cloruros (Cl) y Na, y otra con altas concentraciones de dichos minerales, así como magnesio (Mg) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), con influencia antropogénica. Se encuentra en una formación geológica con permeabilidad de baja a nula, con topografía plana y ondulada. En ella está la ciudad de Agua Caliente.

**Acuífero poroso con flujo local:** Acuífero somero entre la parte media y baja de la subcuena (300 hasta 250 msnm). Su composición es similar al acuífero fracturado, con baja concentración de Na, Mg, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Cl, con puntos de recarga locales, localizado en formaciones geológicas de media a baja permeabilidad. La topografía es principalmente plana. Esta es una zona de recarga local.

**Acuífero fracturado con flujo regional hidrotermal:** Presentó aguas  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Na}$ , meso e hipertermales, medianamente alcalinas. Pertenecen a la formación Morazán (Oligoceno inferior), yaciendo bajo las formaciones Cuscatlán y Chalatenango. De acuerdo a estudios previos, existe una fuente de calor localizado a gran profundidad, que ocasiona la actividad hidrotermal. Ésta fluye de forma vertical, por medio de fallas (grietas y fisuras irregulares), y se mezcla con agua de la recarga local, principalmente en la zona comprendida entre los caseríos de Agua caliente y Santa Rosa. Se desconoce su extensión y profundidad real.

Respecto a la calidad del agua, el acuífero que presentó más parámetros de calidad el agua que no cumplieron con la norma de agua potable fue el fracturado, debido a la contaminación antropogénica en la ciudad de Agua Caliente (Coliformes fecales, fosfatos, nitrógeno total, y totales) y a presencia elevada de minerales que aportan cloruros, potasio, dureza al agua, etc.

Los principales contaminantes en los acuíferos colgados, fracturados y porosos fueron los microbiológicos (presencia de Coliformes totales y fecales) y los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), los cuales requieren desde un tratamiento simple con cloración, hasta un tratamiento avanzado para hacerlo potable. Muchos casos se deben a que no existen perímetros de protección en los manantiales captados.

Las aguas superficiales de la parte alta tienen una composición química similar a los acuíferos colgados en la parte alta, predominando las aguas  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ , con una baja mineralización (río Agua Fría y Los Micos). Al unirse estos ríos en el río Metayate, la composición del agua cambia a  $\text{Cl-Ca-Mg}$  luego de pasar por la zona de la ciudad de Agua Caliente, probablemente debido a que en esta zona descargan aguas subterráneas del acuífero fracturado, así como actividad antropogénica (contaminación). Aguas abajo, se mantiene una composición  $\text{Cl-Ca}$  en época lluviosa, y  $\text{Cl-Ca-Mg}$  en época seca, antes de desembocar en el embalse Cerrón Grande. El aporte de magnesio del río Talquezalapa es el principal factor de dilución que otorga dicha composición en la parte media y baja de la subcuenca.

La parte alta de la subcuenca se compone de aguas con buena calidad para la vida acuática, sin embargo esta decrece en la parte media y baja, por la actividad antropogénica, agropecuaria y en pequeña cantidad por la actividad hidrotermal en la zona de Santa Rosa, Agua Zarca y El Obrajuelo.

Los principales contaminantes en los acuíferos colgados, fracturados y porosos fueron los microbiológicos (presencia de Coliformes totales y fecales) y los fosfatos, los cuales requieren desde un tratamiento simple con cloración, hasta un tratamiento avanzado para hacerlo potable. Muchos casos se deben a que no existen perímetros de protección en los manantiales captados.

Las principales conclusiones a las que se llegó con este estudio son:

1. Se identificaron cuatro tipos de acuíferos: colgados, fracturados, porosos y fracturados hidrotermales.
2. La evolución del flujo del agua en los acuíferos colgados, fracturados y porosos va de norte a sur, siguiendo el gradiente hidráulico, y experimentando un enriquecimiento mineral. El acuífero fracturado hidrotermal procede de un flujo vertical ascendente, regional, mezclado con aguas pertenecientes a un flujo local.
3. El agua subterránea presentó contaminación con nitratos y Coliformes totales y fecales, principalmente en el acuífero somero poroso, y menor en el acuífero profundo hidrotermal.
4. A excepción del acuífero hidrotermal, el resto de acuíferos presentó contaminación microbiológica.
5. El agua del río Metayate y afluentes principales, presentaron contaminación con Coliformes fecales, la cual en la mayoría de los casos no es apta para el consumo humano sin un tratamiento avanzado, en la parte alta y media, principalmente. Sin embargo, existe una autodepuración del río en la parte baja de la subcuenca.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, quien me dio la fortaleza interior y exterior para alcanzar mis metas.

A Wendy, mi amada esposa, con quien la vida me pago lo tanto que me debía, y cuyo apoyo en la tesis fue determinante para la culminación de ésta.

A mis padres, Leonardo y Deisi, mis hermanos Ariel, Tony y Lili, mis tíos y tías, primos y primas, a mis abuelos, a mis suegros y cuñados, por el calor de familia que siempre me han dado para formarme como persona y como profesional.

A mis a amigos de la Comunidad de la Marmota Moteada: Wendy, Paty, Ada, Roberto, Silvia, Humberto, Elsy y Neto, por permitirme ser parte de sus vidas, por ser mis parientes voluntarios y apoyarme en la investigación de campo.

A la Unidad de Postgrado de la Universidad de El Salvador y al Programa de la Red CARA, que se interesaron y apoyaron técnica y financieramente en mi formación como hidrogeólogo comprometido con las necesidades de nuestro país.

A todas las mujeres y hombres del municipio de Agua Caliente que permitieron el ingreso a sus propiedades para el desarrollo de la investigación, así como a sus conocimientos y comentarios que permitieron dimensionar las necesidades de sus comunidades.

A la ANDA, por el apoyo con información técnica necesaria para la investigación.

A la Unidad de Ejecución de Proyectos de la CEL, por su apoyo técnico y financiero.

A mis compañeros y amigos de la Unidad Ambiental de la CEL, por su apoyo e interés en mi superación.

## CONTENIDO

I.	ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.2.	CONTEXTO .....	2
1.3.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.4.	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	4
1.5.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	5
1.6.	JUSTIFICACIÓN .....	6
1.7.	BENEFICIOS ESPERADOS .....	7
1.8.	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....	8
1.9.	LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
1.10.	ANTECEDENTES .....	9
1.10.1	Ubicación geográfica .....	9
1.10.2	Parámetros climatológicos .....	10
1.10.3	Parámetros hidráulicos .....	12
1.10.4	Geología .....	13
1.10.5	Mineralogía .....	18
1.10.6	Hidrología .....	19
1.10.7	Hidrogeología .....	20
1.10.8	Entorno socioeconómico .....	25
1.10.9	Entorno ambiental .....	26
1.10.10	Calidad del agua .....	29
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA) .....	31
2.1.	CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGIA .....	31
2.1.1.	Ciclo hidrológico .....	31
2.1.2.	Acuíferos .....	32
2.1.3.	Estratos del suelo .....	34
2.1.4.	Parámetros físicos que definen a los acuíferos .....	35

2.2.	CONCEPTOS DE GEOLOGIA .....	38
2.2.1.	Rocas ígneas y volcánicas .....	38
2.2.2.	Rocas metamórficas.....	39
2.2.3.	Rocas sedimentarias .....	40
2.3.	CONCEPTOS DE HIDROGEOQUÍMICA .....	41
2.3.1.	Hidrogenoquímica del agua.....	42
2.3.2.	Composición física del agua.....	43
2.3.3.	Composición química del agua .....	44
2.3.4.	Balace iónico .....	46
2.3.5.	Procesos de disolución y precipitación.....	47
2.3.6.	Procesos de meteorización.....	48
2.3.7.	Sistemas de flujos de agua subterránea .....	48
2.3.8.	Representación gráfica .....	50
2.4.	CONCEPTOS DE CONTAMINACION DE CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL.....	50
2.4.1.	Contaminación de agua subterránea y superficial .....	50
2.4.2.	Procesos de sorción .....	51
2.4.3.	Procesos de precipitación .....	51
2.4.4.	Dilución .....	51
2.4.5.	Procesos de oxidación / reducción.....	51
2.4.6.	Normas de calidad de agua.....	56
III.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS .....	57
3.1.	ENFOQUE METODOLÓGICO.....	57
3.1.1.	Diseño de la investigación para el proyecto .....	57
3.1.2.	Diseño del muestreo de aguas subterráneas y superficiales .....	58
3.1.3.	Parámetros a analizar.....	63
3.1.4.	Monitoreo de parámetros fisicoquímicos .....	63
3.1.5.	Recolección y manipulación de muestras de agua .....	65
3.2.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	68
3.2.1.	Validación de resultados de laboratorio .....	68

3.2.2.	Procesamiento de los resultados .....	69
IV.	RESULTADOS .....	71
4.1.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	71
4.2.	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	74
4.3.	MODELO CONCEPTUAL DE LOS ACUÍFEROS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE .....	77
4.3.1.	Formaciones geológicas y sitio de monitoreo .....	77
4.3.2.	Indicadores fisicoquímicos de los sitios muestreados .....	77
4.3.3.	Caracterización hidrogeoquímica y acuíferos identificados.....	90
4.3.4.	Acuíferos someros colgados en la parte alta de la subcuenca .....	97
4.3.5.	Acuífero somero de tipo fracturado y poroso en la parte media y baja de la subcuenca.....	100
4.3.6.	Acuífero profundo hidrotermal.....	107
4.3.7.	Acuífero del Pozo POE06SM.....	112
4.3.8.	Dinámica del agua subterránea en los acuíferos identificados .....	112
4.4.	CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	116
4.4.1.	Contaminación del agua subterránea en la subcuenca.....	116
4.4.2.	Calidad del agua en acuíferos someros colgados .....	122
4.4.3.	Calidad del agua en acuífero somero poroso.....	125
4.4.4.	Calidad del agua en acuífero somero fracturado .....	128
4.4.5.	Calidad del agua en acuífero profundo hidrotermal .....	134
4.5.	DINÁMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE .....	138
4.5.1.	Evolución de la composición física del agua .....	138
4.5.2.	Caracterización hidrogeoquímica del agua superficial.....	141
4.5.3.	Dinámica del agua superficial en la subcuenca del río Metayate.....	142
4.5.4.	Calidad del agua para consumo humano .....	144
4.5.5.	Índices de calidad ambiental en el río Metayate.....	149
V.	RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	150
5.1.	RESUMEN .....	150

5.2. CONCLUSIONES.....	157
5.3. TRABAJO A FUTURO.....	159
VI. REFERENCIAS .....	161

ANEXO 1: MAPA DE REFERENCIA CON UBICACIÓN DE SITIOS DE MONITOREO

ANEXO 2: REGISTROS DE POZOS Y MANANTIALES EN LA SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE Y ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS HISTÓRICOS

ANEXO 3: ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE CAMPO EMPLEADO

ANEXO 4: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS SITIOS DE MONITOREO

ANEXO 5: CÁLCULO EMPLEADOS PARA LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS

ANEXO 6: DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF POR SITIO

ANEXO 7: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUAS SUPERFICIALES

## LISTA DE TABLAS

### Capítulo 1

Tabla 1.1: Minerales detectados en muestras de suelo provenientes de tres sitios de estudio en la cuenca del río Lempa cercana a la subcuenca del río Metayate (LaGeo, 2007).....	19
---	----

### Capítulo 2

Tabla 2.1: Valores típicos de pH en la naturaleza .....	44
Tabla 2.2: Principales compuestos químicos del agua sin actividad termal.....	45
Tabla 2.3: Error admisible de acuerdo al CE.....	46
Tabla 2.4: Interpretación de los equilibrios de fases de acuerdo a la constante de equilibrio .....	48
Tabla 2.5: Límites máximos para agua.....	56

### Capítulo 3

Tabla 3.1: Sitios de monitoreo y datos de ubicación.....	60
Tabla 3.3. Límites mínimos de detección de los equipos y métodos de laboratorio empleado .....	65

### Capítulo 4

Tabla 4.1: Composición química del agua en época seca .....	71
Tabla 4.2: Composición química del agua en época lluviosa.....	72
Tabla 4.3: Presencia de contaminantes en época seca.....	73
Tabla 4.4: Presencia de contaminantes en época lluviosa .....	74
Tabla 4.5: Validación por medio de % de error y CE de sitios con desviaciones .....	76
Tabla 4.6: Formación y edad geológica de aguas subterráneas muestreadas por sitio.....	78
Tabla 4.7: Cuadro comparativo de los resultados de CE.....	81
Tabla 4.8: Especies minerales según índices de saturación en acuíferos someros colgados	98

Tabla 4.9: Especies minerales según índices de saturación en acuífero somero fracturado .....	103
Tabla 4.10: Especies minerales según índices de saturación en acuífero somero poroso ..	105
Tabla 4.11: Especies minerales según índices de saturación en acuífero hidrotermal .....	110
Tabla 4.12: Índices de calidad ambiental (ICA) en río Metayate y ríos afluentes .....	149

## **Capítulo 5**

Tabla 5.1: Resumen de la caracterización del agua de los sitios de los acuíferos someros colgados .....	152
Tabla 5.2: Resumen de la caracterización del agua de los sitios del acuífero somero fracturado .....	153
Tabla 5.3: Resumen de la caracterización del agua de los sitios del acuífero somero poroso .....	154
Tabla 5.4: Resumen de la caracterización del agua de los sitios del acuífero profundo hidrotermal.....	155
Tabla 5.5: Parámetros del agua subterránea que no cumplieron con la norma de agua potable.....	156
Tabla 5.6: Índices de calidad ambiental (ICA) en el río Metayate y afluentes .....	157

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1.1: Mapa de ubicación del área de estudio .....	10
Figura 1.2: Precipitaciones promedio mensuales registradas en La Palma y Nueva Concepción (Fuente: CEL, 2007).....	11
Figura 1.3: Temperatura promedio mensual en La Palma y Nueva Concepción (Fuente: CEL, 2007) .....	11
Figura 1.4: Humedad relativa mensual en La Palma y Nueva Concepción (Fuente: CEL, 2007).....	12
Figura 1.5: Caudales promedios del río Metayate (Fuente: CEL, 2007).....	12
Figura 1.6: Geología del área de estudio .....	14
Figura 1.7: Detalle del Mapa Hidrogeológico Chalatenango de ANDA, con área de estudio delimitado (Fuente: ANDA, 2009).....	21

### Capítulo 2

Figura 2.1: Ciclo hidrológico y afectación antropogénica .....	31
Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema hidrológico global .....	32
Figura 2.3: Diagrama de la distribución de acuíferos y acuitardos .....	34
Figura 2.4: Diagrama de distribución de los estratos del suelo (Fuente: (Singhal y Gupta, 1999).....	35
Figura 2.5: Medios rocosos y tipos de poros .....	36
Figura 2.6: Sistemas de flujo subterránea: áreas de recarga, descarga e indicadores ambientales asociados (Toch, 2000) .....	49

Figura 2. 7: Concentraciones de $\text{NO}_3^-$ con la profundidad, para diversas fuentes de contaminantes.....	53
---	----

### Capítulo 3

Figura 3.1: Ubicación espacial de los sitios de monitoreo en pozos y manantiales .....	61
Figura 3.2: Ubicación espacial de los sitios de monitoreo en cuerpos de aguas superficial	62
Figura 3.3: Imágenes de equipo de monitoreo empleado.....	64

### Capítulo 4

Figura 4.1: Gráficos de conductividad eléctrica y sólidos disueltos estimado, con sitios que presentaron más de 15% de desviación.....	75
Figura 4.2: Gráfico de CE contra altitud en época seca, agua subterránea .....	79
Figura 4.3: Gráfico CE contra altitud en época lluviosa, agua subterránea .....	80
Figura 4.4: Gráfico Temperatura contra altitud en época seca, agua subterránea.....	83
Figura 4.5: Gráfico Temperatura contra altitud en época lluviosa, agua subterránea .....	83
Figura 4.6: Gráfico pH contra altitud en época seca, agua subterránea .....	85
Figura 4.7: Gráfico pH contra altitud en época lluviosa, agua subterránea.....	85
Figura 4.8. Gráfico cloruros contra altitud en época seca, agua subterránea .....	87
Figura 4.9: Gráfico cloruros contra altitud en época lluviosa, agua subterránea .....	87
Figura 4.10: Gráfico de nitratos contra cloruros en época seca, agua subterránea.....	89
Figura 4.11: Gráfico de nitratos contra cloruros en época lluviosa, agua subterránea.....	89
Figura 4.12: Diagrama de Piper para acuíferos en la parte alta de la subcuenca del río Metayate .....	91

Figura 4.13: Caracterización hidrogeoquímica en parte alta de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa) .....	92
Figura 4.14: Diagrama de Piper para acuíferos en la parte media de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa) .....	93
Figura 4.15: Caracterización hidrogeoquímica en parte media de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa) .....	94
Figura 4.16: Diagrama de Piper para parte baja de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa) .....	95
Figura 4.17: Caracterización hidrogeoquímica en parte baja de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa) .....	96
Figura 4.18: Relación conductividad eléctrica y temperatura en manantiales y pozos con aguas hidrotermales.....	109
Figura 4.19: Acuíferos someros identificados y dinámica de flujo del agua subterránea ..	113
Figura 4.20: Acuífero profundo hidrotermal identificado (proyección). El flujo es vertical ascendente. ....	114
Figura 4.21: Dinámica de flujo de agua subterránea en acuífero someros y profundo hidrotermal .....	115
Figura 4.22: Gráfico de nitrógeno Kjendahl y nitratos en época seca en manantiales y pozos .....	117
Figura 4.23: Gráfico de OD y nitratos en época seca en manantiales y pozos.....	117
Figura 4.24: Gráfico de Nitrógeno total y nitratos en época lluviosa en manantiales y pozos .....	118
Figura 4.25: Gráfico de cloruros y nitratos en época seca en manantiales y pozos .....	119
Figura 4.26: Gráfico de cloruros y nitratos en época lluviosa en manantiales y pozos.....	119
Figura 4.27: Gráfico de Coliformes y nitratos en época seca en manantiales y pozos .....	120
Figura 4.28: Gráfico de Coliformes y nitratos en época lluvia en manantiales y pozos ....	121

Figura 4.29: Gráfico de nitratos y fosfatos en época seca en manantiales y pozos.....	121
Figura 4.30: Gráfico de nitratos y fosfatos en época lluvia en manantiales y pozos.....	122
Figura 4.31: Gráfico Coliformes fecales y totales en acuíferos someros colgados .....	123
Figura 4.32: Gráfico de fosfatos en acuíferos someros colgados .....	124
Figura 4.33: Gráfico de hierro total en acuíferos someros colgados .....	124
Figura 4.34: Gráfico pH en acuíferos someros colgados.....	125
Figura 4.35: Gráfico de Coliformes en acuífero somero poroso .....	126
Figura 4.36: Gráfico de fosfatos en acuífero somero poroso .....	126
Figura 4.37: Gráfico de Temperatura en acuífero somero poroso.....	127
Figura 4.38: Gráfico de CE en acuífero somero poroso .....	127
Figura 4.39: Gráfico de Coliformes en acuífero somero fracturado.....	128
Figura 4.40: Gráfico de fosfatos en acuífero somero fracturado .....	129
Figura 4.41: Gráfico de potasio en acuífero somero fracturado .....	130
Figura 4.42: Gráfico hierro total en acuífero somero fracturado.....	130
Figura 4.43: Gráfico sílice en acuífero somero fracturado .....	131
Figura 4.44: Gráfico de nitrógeno total en acuífero somero fracturado .....	131
Figura 4.45: Gráfico de calcio en acuífero somero fracturado .....	132
Figura 4.46: Gráfico de dureza como CaCO <sub>3</sub> en acuífero somero fracturado .....	132
Figura 4.47: Gráfico de CE en acuífero somero fracturado .....	133
Figura 4.48: Gráfico de Temperatura en acuífero somero fracturado .....	133
Figura 4.49: Gráfico de Coliformes en acuífero profundo hidrotermal .....	134
Figura 4.50: Gráfico de Temperatura en acuífero profundo hidrotermal .....	135
Figura 4.51: Gráfico de CE en acuífero profundo hidrotermal .....	135

Figura 4.52: Gráfico de fosfatos en acuífero profundo hidrotermal.....	136
Figura 4.53: Gráfico de hierro total en acuífero profundo hidrotermal.....	137
Figura 4.54: Gráfico de pH en acuífero profundo hidrotermal .....	137
Figura 4.55: Gráfico CE contra altitud en época seca, río Metayate y ríos afluentes .....	138
Figura 4.56: Gráfico CE contra altitud en época lluviosa, río Metayate y ríos afluentes...	139
Figura 4.57: Gráfico de Temperatura contra altitud en época seca, río Metayate y ríos afluentes .....	139
Figura 4.58: Gráfico de Temperatura contra altitud en época lluviosa, río Metayate y ríos afluentes .....	140
Figura 4.59: Gráfico pH contra altitud en época seca, en río Metayate y ríos afluentes....	140
Figura 4.60: Gráfico pH contra altitud en época lluviosa, en río Metayate y ríos afluentes .....	141
Figura 4.61: Mapa de uso del suelo y diagramas de Stiff del agua en río Metayate y ríos afluentes, época, época seca.....	143
Figura 4.62: Gráfico de Coliformes en río Metayate y ríos afluentes .....	145
Figura 4.63: Gráfico de fosfatos en río Metayate y ríos afluentes .....	146
Figura 4.64: Gráfico de hierro total en río Metayate y ríos afluentes .....	146
Figura 4.65: Gráfico de potasio en río Metayate y ríos afluentes.....	147
Figura 4.66: Gráfico de CE en río Metayate y ríos afluentes .....	148
Figura 4.67: Gráfico de Temperatura en río Metayate y ríos afluentes.....	148

## NOMENCLATURA

ANDA	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados
ASALDI	Asociación Salvadoreña para el Desarrollo Integral
CARA	Central American Water Resource Management Network
CEL	Comisión Hidroeléctrica del Río Lempa
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
DIGESTIC	Dirección General de Estadística y Censos
FISDL	Fondo de Inversión Social para el Desarrollo Local
ICA	Índice de Calidad Ambiental
MGA	Misión Geológica Alemana
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MOP	Ministerio de Obras Públicas
ONG	Organización No Gubernamental
PAES	Programa Ambiental de El Salvador
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales
LN	Latitud norte
LWG	Longitud Oeste del Greenwich
UES	Universidad de El Salvador
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mg/l	Miligramos por litro
ppm	Partes por millón
mmol/l	Milimoles por litro de muestra
meq/l	Miliequivalente por litro de muestra
M	Molaridad, moles por kilogramo de agua
mm	milímetros
N	Normalidad
CE	Conductividad eléctrica

$\mu\text{S/cm}$	Microsiemens por centímetro
OD	Oxígeno disuelto
H <sup>+</sup>	Ión hidronio
pH	Potencial de hidrógeno (logaritmo base 10 de la actividad de iones hidronio)
DBO <sub>5</sub>	Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días

## **I. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1.INTRODUCCIÓN**

La caracterización de cuencas de ríos es más común que la caracterización del agua subterránea, debido a factores tanto económicos como técnicos y sociales, así como políticas de gestión de recursos hídricos y de ordenamiento territorial. Sin embargo, la administración del recurso, tradicionalmente realizada por el Estado, enfrenta una creciente demanda en cantidad y calidad, lo cual vuelve imperativo la realización de estudios hidrogeológicos que integren los conocimientos que aportan la hidrogeoquímica, geofísica, hidráulica, hidrología con el desarrollo sostenible, la equidad de oportunidades entre personas, y las políticas para el manejo del agua subterránea.

En El Salvador, se han realizado estudios de caracterización de acuíferos, proponiendo modelos conceptuales para todo el país, a partir de la información de la geología superficial, con estudios puntuales sobre calidad de agua e hidrogeoquímica. Sin embargo, no describen el sistema de flujo del agua subterránea, el modelo conceptual de acuíferos profundos, y de la evolución del agua subterránea y procesos de contaminación.

El proyecto DESCRIPCIÓN DE LA EVOLUCIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE tiene por objeto verificar los modelos conceptuales de los acuíferos existentes en la subcuenca hidrográfica del río Metayate por medio de la caracterización hidrogeoquímica, y evaluar la calidad del agua para el consumo humano y vida acuática.

Dicha información, permitirá elaborar una línea base de la composición química y sus procesos dinámicos, y de la calidad del agua subterránea y superficial, contribuyendo a políticas orientadas al desarrollo sostenible de los recursos hidrogeológicos.

## **1.2.CONTEXTO**

La cuenca del río Lempa posee un área total de 17,790 km<sup>2</sup> de los cuales, 10,082 km<sup>2</sup> (56%) corresponden a El Salvador. En esta cuenca se desarrollan actividades agrícolas, piscícolas, ganaderas y comerciales, las cuales a su vez generan desechos orgánicos y peligrosos, que en cierta medida están contaminando los acuíferos locales y alterando la composición química. De acuerdo a estudios, el 90% de los 360 ríos de El Salvador están contaminados (PAES, 1998).

La principal actividad, de importancia para la vida de las personas, es el uso del agua del río Lempa y de sus afluentes para consumo humano. La Planta Potabilizadora de Las Pavas supe de agua potable al Área Metropolitana de San Salvador, con la producción hasta de 225 m<sup>3</sup>/s (Fuente: ANDA, 2011).

Otra actividad en la cuenca del río Lempa es la generación hidroeléctrica, la cual supe aproximadamente el 37% de la demanda anual. Dicha generación se realiza por medio de Centrales Hidroeléctricas, cuya presencia se remonta a 1954, con la construcción de la Central Hidroeléctrica 5 de Noviembre, y la posterior construcción de las centrales Guajoyo (1963), Cerrón Grande (1977) y 15 de Septiembre (1983), todas administradas por el Estado de El Salvador por medio de la Comisión Ejecutiva del Río Lempa (CEL).

## **1.3.DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El departamento norteño de Chalatenango representa casi el 10% del territorio nacional, y tiene un limitado potencial para la agricultura. Los tipos de suelo prevalecientes son más apropiados para bosque y cobertura vegetal permanente. En cambio, los tipos de suelo apropiados para cultivos anuales (Tipos II y III) representan solamente el 7.8% del área total de Chalatenango.

Históricamente, en el departamento de Chalatenango los grandes productores acapararon las mejores tierras agrícolas, por lo cual los pequeños productores se vieron obligados a dedicarse a la agricultura de subsistencia en lotes muy pequeños en laderas, con prácticas que resultaban en deterioro progresivo del suelo.

En la zona del río Metayate, el abastecimiento de agua para consumo en las comunidades de la subcuenca de dicho río se realiza por medio de manantiales captados, pozos perforados y excavados, y en menor caso agua superficial (Estévez, 2009). Sin embargo, no existe un estudio hidrogeológico que describa el comportamiento hidrodinámico del agua subterránea en toda la subcuenca, importante para determinar la cantidad de agua disponible para consumo humano, vida acuática, riego, etc.

Fue hasta 2009 que se tiene el Mapa Hidrogeológico de El Salvador, elaborado a partir de la información geológica realizado en los años sesenta y setenta por la Misión Geológica Alemana (MGA), así como algunos registros de perforaciones en propiedad de ANDA, y otros estudios de instituciones. Sin embargo, dada la escala del mismo (1:100,000), no se tiene precisión de los acuíferos identificados (ANDA, 2009). Además, la información proporcionada en dichos mapas han clasificado la mayor parte de la parte media y alta de la subcuenca del río Metayate como una zona con rocas no acuíferas, y poco o nada se informa sobre actividad hidrotermal en la parte media y baja de la subcuenca, previamente documentada en estudios privados y del Estado (ANDA, 2007).

Finalmente, el desarrollo de proyectos hidroeléctricos, urbanizaciones, viales, proyectos de mejoramiento, ampliación e introducción de agua potable y saneamiento básico para los municipios de Nueva Concepción, La Reina y Agua Caliente (FOMILENIO, 2010), que se proyecta en la subcuenca de dicho río, presentan o no una línea base incipiente, limitada a la calidad del agua superficial, con la cual no se permite evaluar los efectos al agua subterránea.

Este estudio permitirá enriquecer el modelo conceptual existente, así como establecer una línea base de la subcuenca del río Metayate, en la cual se desarrollan actividades y evalúan proyectos tales como abastecimiento de agua potable, riego, generación hidroeléctrica y geotérmica, red vial (longitudinal del Norte), urbanístico y agropecuario, algunos en terrenos de valor ambiental en el municipio de Agua Caliente (MOP, 2008). Esta herramienta permitirá realizar gestiones de manejo integrado y de desarrollo sostenible del agua subterránea.

#### **1.4.PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS DE TRABAJO**

Se planearon las siguientes preguntas generadoras, las cuales a su vez permitió elaborar una metodología de trabajo:

*¿Cuáles son las formaciones geológicas de la subcuenca del río Metayate que permiten el almacenamiento y transmisión de agua?*

El conocimiento de esta información permite tener una idea preliminar de la presencia de rocas porosas, fracturadas, impermeables, actividad hidrotermal, así como la edad de los sustratos, con lo cual se puede establecer la presencia de acuíferos someros y profundos.

Se requirió la recopilación de estudios de calidad de agua, hidrología, hidráulica y de hidrogeología previos, así como mapas geológicos, mapas hidrogeológicos, mapas de uso de suelo, mapas pedológicos, mapas de vegetación, en formato electrónico disponibles. Las visitas de campo fueron parte del reconocimiento de la zona, con lo cual se pudo verificar parte de la información recolectada así como verificar el modelo conceptual.

*¿Los sistemas de acuíferos en la zona de estudio corresponden a un flujo local, regional o mezcla de ambos?*

Un flujo local indica aguas de corto tiempo de tránsito, de días, semanas o años, las aguas regionales indican aguas que han tenido un tiempo de tránsito muy largo, de siglos e incluso milenios (paleoaguas), y las aguas intermedias períodos de tránsito que van de años a siglos (Joel Carrillo, 2010).

Al conocer las características hidrogeoquímicas del agua subterránea y superficial de la subcuenca del río Metayate Se cuantificaron parámetros físicos y químicos por medio de campañas de monitoreo en época seca y en época lluviosa en 2009 y 2010, en el sitio y en laboratorios particulares. Para complementar lo anterior, se requirió del diseño, planeación, financiamiento, recolección y análisis de muestras de agua subterránea (pozos perforados, pozos excavados y manantiales) y agua superficial (ríos).

Por medio de programas computacionales, se caracterizó la hidrogeoquímica y la calidad del agua de los acuíferos identificados por medio de un modelo conceptual previo (ANDA, 2007).

*¿Cuál es la calidad del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Metayate?*

La calidad del agua está determinada por la presencia o no de concentraciones de contaminantes inorgánicos, orgánicos y microorganismos que cumplan con una norma de agua conforme a un uso específico.

Se emplean normas de calidad de agua para consumo humano y vida acuática, para evaluar la calidad del agua subterránea y superficial.

### **Hipótesis del proyecto de investigación**

Existen acuíferos someros colgados, porosos y fracturados que proceden de un flujo de agua subterránea local, intermedia y regional con influencia hidrotermal, la cual presenta contaminación asociadas a actividades antropogénicas.

### **1.5.OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

Verificar el modelo conceptual actual de la subcuenca del río Metayate, por medio de la evolución de la composición hidrogeoquímica, y establecer una línea base de la evolución de la calidad del agua subterránea y superficial de dicha subcuenca para consumo humano y vida acuática.

Considerando las preguntas generadoras, se tienen los siguientes objetivos específicos:

1. Documentar la hidrogeología y la calidad del agua en la subcuenca del río Metayate.
2. Caracterizar la hidrogeoquímica del agua subterránea y superficial y su evolución hidrodinámica.

3. Caracterizar la calidad del agua para consumo humano y vida acuática, y describir su evolución en la subcuenca hidrográfica.

## 1.6.JUSTIFICACIÓN

Se tienen las siguientes consideraciones técnicas y sociales en la subcuenca del río Metayate:

- La subcuenca del río Metayate se ubica en una zona con una población de 8,992 habitantes (DIGESTIC y ASALDI, 2006), estimándose que para 2007 la demanda de agua sería de 4.8 L/s en el área urbana (ANDA, 1987). Actualmente, ésta es satisfecha por medio de pozos excavados, pozos perforados, manantiales captados, localizados en rocas con capacidad de retención y entrega de agua de moderada a nula, con un flujo local del agua subterránea.
- Uso del agua y del suelo en la subcuenca del río Metayate en actividades agropecuarias, las cuales han modificado la calidad del agua superficial y subterránea (SNET, 2009; CEL, 2010).
- Hay presencia de actividad hidrotermal, lo cual puede indicar la existencia de sistemas de flujo regional de agua subterránea, afectando los acuíferos fracturados y porosos, condicionando el uso del agua para consumo humano solo por medio de tratamientos convencionales y avanzados (ANDA, 2007).
- Existencia de proyectos hidroeléctricos, urbanísticos y agropecuarios en la zona, los cuales podría tener una influencia en el comportamiento de la dinámica del agua subterránea y superficial.

Por lo anterior, es necesaria la elaboración de estudios hidrogeológicos que caractericen las formaciones acuíferas presentes, su extensión, capacidad, origen, composición hidrogeoquímica del agua y calidad del agua, etc.

Los proyectos de investigación hidrogeoquímica y de calidad el agua ofrecerán los siguientes productos:

- Identificación de los sistemas de acuíferos y los posibles sistemas de flujos del agua subterránea en la subcuenca del río Metayate, conforme a la composición y evolución hidrogeoquímica del agua subterránea y superficial;
- Línea base de la calidad de agua subterránea y superficial en la subcuenca del río Metayate, el cual aportaría información técnica a ser empleada para evaluar las posibles interacciones de los acuíferos de esta zona con los proyectos de abastecimiento de agua;
- Finalmente, la documentación estaría a disposición del gobierno local, instituciones de gobierno, ONG's, universidades, y sociedad civil que estén involucradas en la gestión de los recursos hídricos.

### **1.7.BENEFICIOS ESPERADOS**

Los aportes de la investigación a la zona de la subcuenca del río Metayate, consistirá en obtener una primera descripción del comportamiento hidrogeoquímico del agua subterránea. Esto sería empleado por los gobiernos locales e instituciones que velan por el abastecimiento de agua a la población, para evaluar propuestas de abastecimiento de agua potable y conservación de zonas de recarga, así como instituciones que se encarguen del uso agropecuario e hidroeléctrico de la cuenca del río Lempa y de la subcuenca del río Metayate, dentro de un marco de desarrollo local sustentable. Finalmente, serviría de punto de base para realizar estudios similares en otras subcuencas o profundizar el estudio isotópico en la subcuenca del río Metayate.

El monitoreo de la calidad del agua permitirá a su vez establecer una línea base para que los gobiernos locales establezcan un protocolo de monitoreo del comportamiento de la calidad del agua, gestionen recursos para realizar proyectos de conservación de suelos, de manejo de desechos sólidos comunes y peligrosos, etc.

Los estudios sobre calidad del agua se enfoca en las necesidades de los pobladores locales, en especial de los cantones y caseríos Agua Fría, Casa de Teja, Los Apantes, El Conacaste, El Rosario, Las Puertas, Santa Rosa, El Obrajuelo, Agua Zarca, y comunidades

agropecuarias aledañas a la antigua Hacienda Metayate, así como a la ciudad de Agua Caliente.

Finalmente, la información de campo a recolectar permitirá el uso de equipo de campo y software proporcionado por la Red CARA y el programa de Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos, la UES y las universidades de Alberta, Calgary y Waterloo, en Canadá, así como aplicar los conocimientos impartidos por especialistas de dichos centros de estudios superiores.

## **1.8.ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

La subcuenca del río Metayate comprende dos ríos principales: el río Metayate y Talquezalapa, siendo le segundo afluente del primero en la parte media de la subcuenca. De ambos, el río Talquezalapa se ha considerado como una zona de escurrimiento superficial, estando su subcuenca compuesta por acuíferos someros colgados, con recarga local, y flujos subsuperficiales (ANDA, 2009).

En río Metayate, sin embargo presenta una geología que sugiere la presencia de acuíferos someros fracturados, porosos y colgados (ANDA, 2009), con o sin influencia hidrotermal. Además, está en una zona con actividad agropecuaria y urbana, así como proyectos hidroeléctricos (CEL, 2008).

Por lo anterior, el estudio se limitará a la subcuenca del río Metayate y al agua que aporta el río Talquezalapa a esta subcuenca, pero considerará la composición fisicoquímica y microbiológica del agua que dicho río aporta al Metayate.

En resumen, se establece el siguiente alcance:

- Sitio de estudio: Subcuenca del río Metayate, excluyendo al río Talquezalapa.
- Período de monitoreo en campo: época seca y lluviosa de 2009 y 2010.
- Método de análisis: Muestras representativas y aleatorias del agua.
- Financiamiento y equipo técnico: Recursos propios, de CEL, la Universidad de El Salvador y del proyecto de la red CARA.

## **1.9.LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

Se consideraron las siguientes limitantes:

1. Se empleó el modelo hidrogeológico de ANDA de 2009.
2. Casi ausencia de pozos perforados en la parte alta de la subcuenca, y muy pocos en la parte media y baja, así como pocos perfiles litológicos. Por lo anterior, se emplearon pozos excavados, o artesanales, en uso, y registros de ANDA para la litología.
3. De las condiciones de frontera del sistema, se desconoce la profundidad del basamento.
4. Los métodos de laboratorio empleados para la cuantificación de los parámetros químicos estudiados, sin bien cumplen con la norma de la Standard Methods de 2007, cada uno no está acreditado por el CONACYT.
5. Rechazo a los proyectos hidroeléctricos. Hubo un ambiente de rechazo en las comunidades al desarrollo de proyectos hidroeléctricos, siendo incluso éstas de carácter amenazante a la integridad del personal y equipos de los investigadores, a quienes se les identificó como personas ajenas a las necesidades de dichas comunidades. Esto limitó cada salida al campo.
6. Disponibilidad de fondos en el tiempo previsto para los monitoreos, lo cual requirió de realizar campañas básicas en 2009 y complementarias en 2010.

## **1.10.ANTECEDENTES**

### **1.10.1 Ubicación geográfica**

El área de estudio comprende los municipios de Agua Caliente, Nueva Concepción y La Reina, en el departamento de Chalatenango. Se ubica entre las coordenadas 15°15'00" y 14° 05'00" LN y 89°11'00" y 89°15'30" LWG. La elevación máxima es de 1,025 msnm (Cerro Piñuelas) y la menor de 243 msnm (desembocadura del río Metayate en el embalse Cerrón Grande).

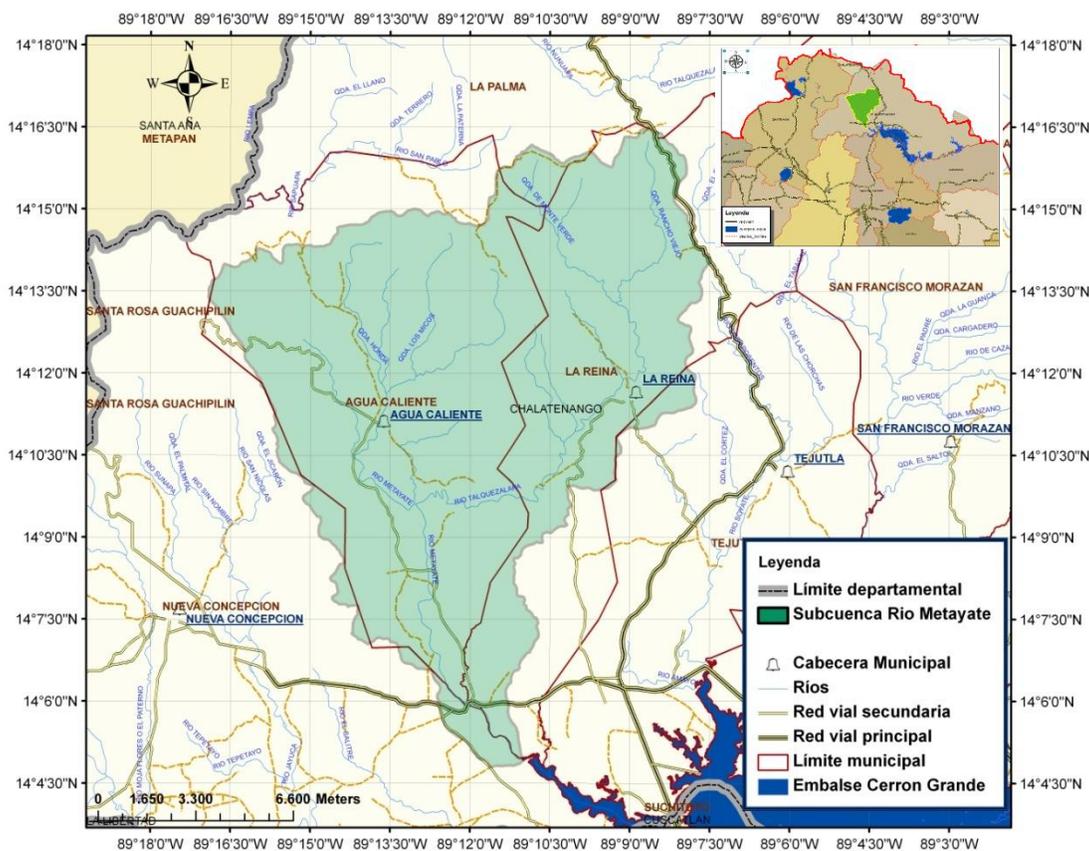


Figura 1.1: Mapa de ubicación del área de estudio

### 1.10.2 Parámetros climatológicos

**Precipitación:** La precipitación pluvial promedio es de 2269 mm de agua en la parte alta del municipio de Agua Caliente, y de 1618 mm de agua en Nueva Concepción. Los meses más lluviosos son junio y septiembre, y los menos lluviosos noviembre, marzo y abril.

**Temperatura:** La temperatura promedio para la estación meteorológica de Nueva Concepción varió entre 26 y 29°C, con máximos promedios de 32 a 34°C, y mínimos de 22.5 a 25°C. Los meses con las mayores temperaturas fueron noviembre, marzo, abril y mayo, y los meses con menores temperaturas fueron diciembre y enero. De acuerdo a un estudio realizado por Harza Engineering en 1999, la temperatura promedio en la parte alta (1025 msnm) es de 12 a 25° C.

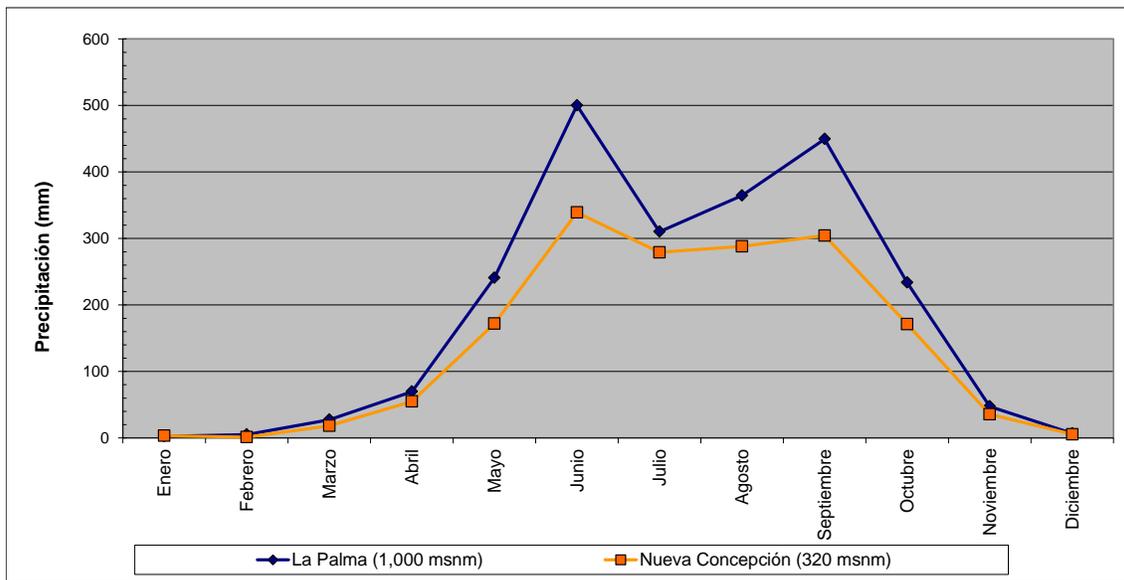


Figura 1.2: Precipitaciones promedio mensuales registradas en La Palma y Nueva Concepción (Fuente: CEL, 2007)

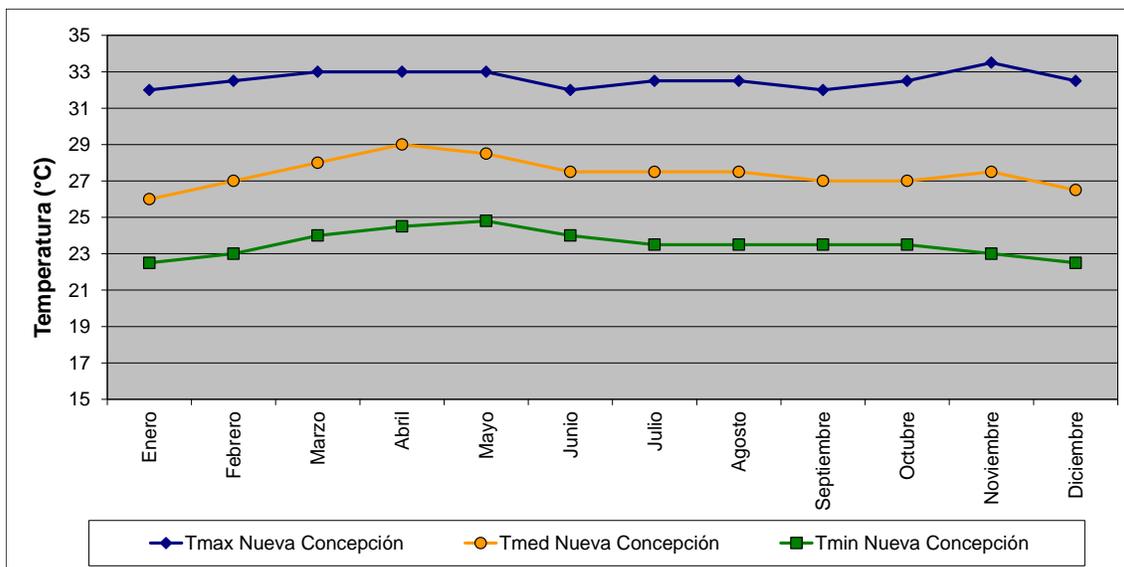


Figura 1.3: Temperatura promedio mensual en La Palma y Nueva Concepción (Fuente: CEL, 2007)

**Humedad relativa:** La humedad relativa promedio en el año es de 76.25% en Nueva Concepción y de 82.67% en La Palma. El comportamiento anual entre ambos es similar en los meses de mayo a octubre, por lo que coincide con la época lluviosa; en el resto de meses, época seca, existen diferencias de 10 a 12% entre ambos sitios.

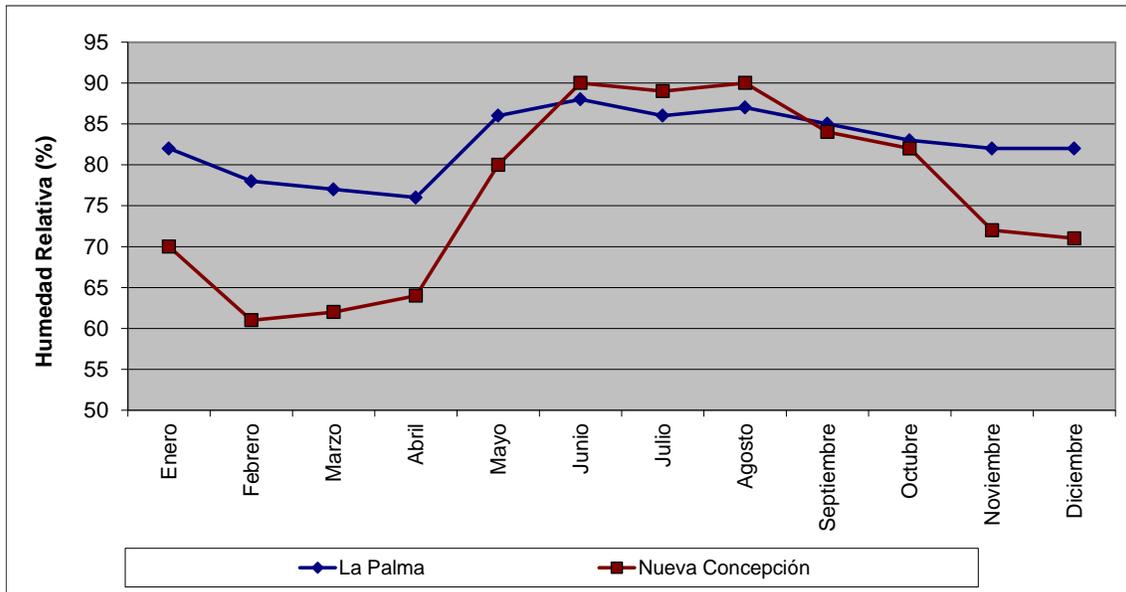


Figura 1.4: Humedad relativa mensual en La Palma y Nueva Concepción (Fuente: CEL, 2007)

### 1.10.3 Parámetros hidráulicos

Partiendo de datos históricos disponibles (antes de 1980), la estación hidrométrica en el río Metayate ( $89^{\circ}12'$  LWG y  $14^{\circ}06'$  LN) reportó caudales máximos en septiembre y octubre, y mínimos en abril y mayo.

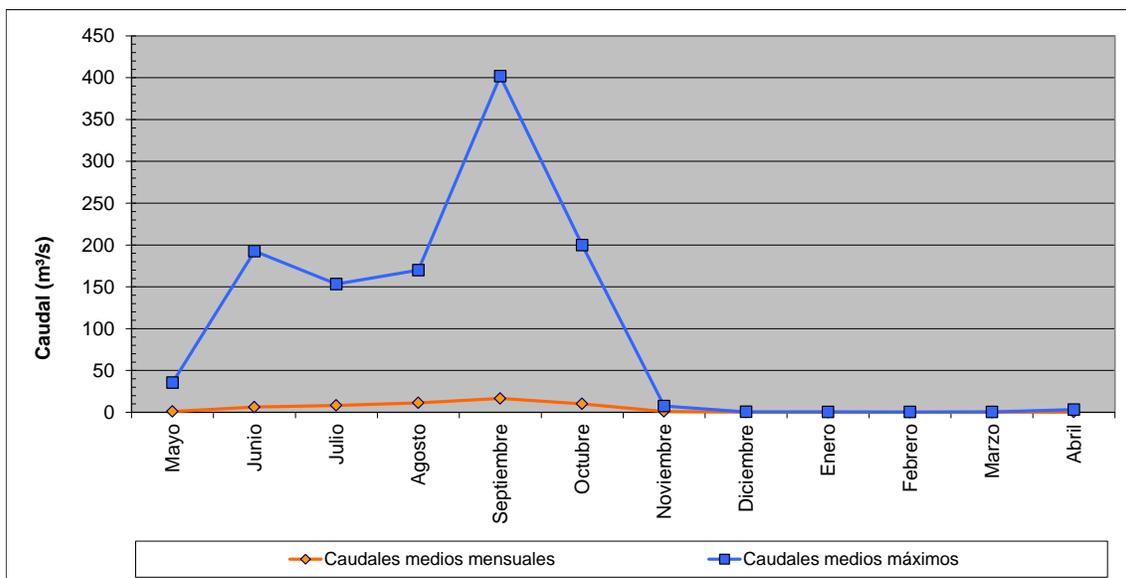


Figura 1.5: Caudales promedios del río Metayate (Fuente: CEL, 2007)

#### 1.10.4 Geología

En la subcuenca del río Metayate, así como en zonas aledañas a ésta, se han identificado formaciones geológicas que van desde el Oligoceno inferior (35.4 millones de años) al Holoceno subboreal (5,000 años).

Las rocas más antiguas se ubican en la parte alta de la subcuenca, y en partes de la subcuenca media y baja, predominando rocas volcánicas de la formación Morazán y Chalatenango, los cuales forman una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad, con presencia de fracturas.

##### **Formación Morazán (m)**

Esta formación pertenece al período Oligoceno (35.4 a 23.3 millones de años), de la época terciaria. Se compone de rocas efusivas intermedias-acidas, piroclastitas, tobas ardientes, riolitas, epiclastitas volcánicas (formación Morazán 1), y de rocas efusivas básicas-intermedias hasta intermedias-acidas, piroclastitas, epiclastitas volcánicas. Alteración regional por influencia hidrotermal.

En la zona de estudio hay dos grupos de rocas pertenecientes a la formación Morazán:

- **(m1b) Piroclastitas riolíticas-andesíticas**, con porosidad media y permeabilidad de baja a nula. Representa un acuífero de bajo rendimiento, con alteración hidrotermal al acuífero profundo desde Agua Caliente hasta el cantón y caserío Agua Zarca y caserío El Obrajuelo;
- **(m2a) Piroclastitas andesíticas-riolíticas**, con porosidad media y permeabilidad de baja a nula, formando una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad. Se encuentra en los cantones.

Esta formación aflora, junto a la formación Chalatenango, en toda la parte alta y media de la subcuenca; en la parte baja, se encuentra en capas superficiales, ya que ha sufrido procesos de meteorización, deposición y sedimentación de capas de tierra que perteneces a formaciones más recientes (Cuscatlán, Bálsamo, San Salvador, etc.).

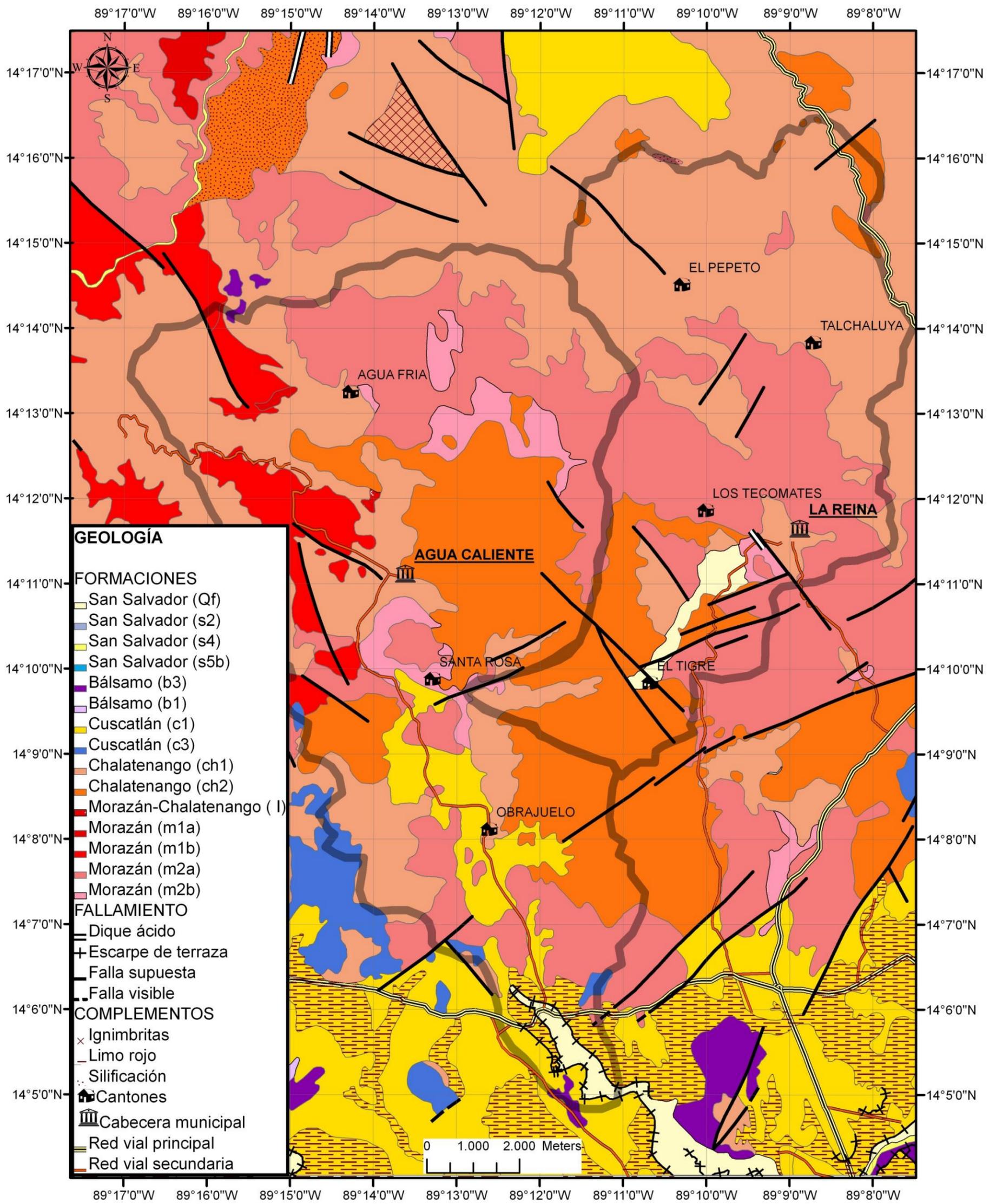


Figura 1.6: Geología del área de estudio

Tienen una porosidad baja, y una permeabilidad de baja a nula, con fracturamiento que le permite conducir el agua.

La formación geológica Morazán posee las siguientes características hidrogeológicas: Lavas riolíticas-andesíticas con influencia hidrotermal, con baja porosidad y permeabilidad de baja a nula, formando una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad. Estas capas almacenan agua, y su transmisión está condicionada por fracturas y fisuras por donde circulan acuíferos de bajos a mediano rendimiento, influenciada su cantidad a la extensión, espesor, grado de fracturamiento conexión hidráulica con otras capas de mayor permeabilidad. El nivel freático tiende a ser discontinuo.

Además, también en esta formación hay lavas efusivas con mediana porosidad y permeabilidad de media a baja, formando una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad. Estas capas almacenan y transmiten agua, en forma muy aislada y en regiones de altas elevaciones y precipitaciones, no representan ningún recurso subterráneo aprovechable.

A 1.5 km al sur de la ciudad de Agua Caliente, existe una estructura volcánica sin cráter, denominada Cerro El Zapatero o El Gallinero. A 4km al sureste también existe una segunda estructura volcánica sin cráter, llamado Cerro Copetudo (ANDA, 1987).

### **Formación Chalatenango (ch)**

Son rocas volcánicas de carácter riolítico-dactídico, que pertenecen al Mioceno (23.3 a 5.2 millones de años). Se compone de rocas del mioceno, del tipo piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas con tobas ardientes y fundidas; localmente efusivas ácidas intercaladas; ignimbritas, o del tipo de rocas efusivas ácida; riolitas, piroclastitas ácidas subordinadas.

Prevalecen tobas muy endurecidas de colores claros. El espesor es mayor a 500 m, aproximadamente, compuesto por areniscas finas rojo violeta, con bancos de conglomerados rojos de caliza con capas de areniscas. En su lecho, hay conglomerados

monomixtos de caliza color rojo-violeta y cantos de tobas volcánicas andesíticas. Esta serie representa los productos de erosión de las capas inferiores, con espesores mayores a 400 m.

La formación superficial predominante en la parte alta (300 a 450 msnm) es Chalatenango, la cual se compone de dos tipos de rocas (CEL, 2007):

- (ch1) Rocas efusivas ácidas; piroclastitas ácidas subordinadas: Conforman una unidad hidrogeológica de mediana a baja permeabilidad.
- (ch2) Piroclastitas andesíticas ácidas, ignimbritas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas. Tienen porosidad media a baja, formando una unidad hidrogeológica de mediana a baja permeabilidad.

La formación Chalatenango se compone de capas geológicas con una baja porosidad y baja a nula permeabilidad. El agua se almacena en estas capas, circulando acuíferos de bajo a mediano rendimiento en forma dispersa y retinente, condicionados a su espesor, extensión, granulometría, conexión con capas de mayor permeabilidad a partir del nivel freático en la zona de saturación. Este recurso es el de mayor importancia para ser explotado, y se encuentra rellenando anchas fajas y calles muy extensas en la parte central y sur de la subcuenca (ANDA, 2007).

Las rocas más recientes, ubicadas en la parte baja, corresponden a la formación Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador, formada por rocas sedimentarias, conformando una unidad hidrogeológica de media a baja permeabilidad.

### **Formación bálsamo (b)**

Data del Plioceno (5.2 – 1.6 millones de años). Compuestos por productos volcánicos en los cuales abundan los aglomerados con intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica con un espesor aproximado de 500 m. También hay suelos fósiles de color rojo de gran profundidad (hasta 20 m). Además se encuentran rocas extrusivas con pocas intercalaciones de tobas volcánicas y aglomerados; la parte inferior es de carácter andesítico y en la parte superior, basáltico (SNET, 2010).

Esta formación es más joven que las ignimbritas ácidas de la Formación Chalatenango, pero anteriores a las de la Formación Cuscatlán por lo que se puede decir que ésta se encuentra entre ellas (D.R. López, J.R. Retana, 2007).

Se ubica en una reducida área en la parte baja de la subcuenca, próximo al río Lempa.

### **Formación Cuscatlán (c)**

Comprende rocas desde el Pleistoceno Inferior hasta Plioceno Superior (1,6 millones – 10,000 años). Se encuentran en la cadena volcánica vieja que atraviesa la parte Norte del país y están compuestos por productos extrusivos de los volcanes individuales. Estos productos son: corrientes de lava, aglomerados, tobas, escorias y cenizas volcánicas endurecidas y tobas fundidas con intercalaciones de sedimentos lacustres y fluviales. El espesor de los estratos y su sucesión varía de volcán a volcán. También se encuentran suelos fósiles de color rojo de poca profundidad (hasta 4 metros). Comprende tres miembros: c1, c2, c3 y c4, de las cuales los miembros c1 y c3 se encuentran en la zona del proyecto.

- (c1): Se compone de piroclastitas ácidas y efusivas ácidas-básicas intercaladas, así como Piroclastitas ácidas y epiclastitas subordinadas, en secuencia, denominadas comúnmente “tobas de color café” (Urrutia – Arias, 2007). Data del Pleistoceno Superior a Holoceno (1.6 millones a 10 mil años).
- (c4): Rocas efusivas básicas intermedias

Esta que se compone de depósitos fluviales (cantos rodados, estratos de limos y arcillas), porosidad media y permeabilidad de media a baja, formando una unidad hidrogeológica de media a baja permeabilidad (ANDA, 2007).

Se encuentra principalmente en la parte baja de la subcuenca, formando planicies dedicadas a actividades agropecuarias: Cantones Agua Zarca y El Obrajuelo.

## **Formación San Salvador (s)**

Data del Holoceno (5,000 – 10,000 años). Se encuentran principalmente en la cadena volcánica joven que atraviesa la parte Sur del país y están compuestos por productos extrusivos de los volcanes individuales, y algunas porciones aisladas del municipio de La Reina y algunas zonas aledañas al río Lempa. Estos productos son: corrientes de lava, cúpulas de lava, tobas fundidas, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas, que se encuentran a veces con intercalaciones de sedimentos lacustres. El espesor de los estratos y la sucesión varía de volcán a volcán. También se encuentran suelos fósiles color café y negro (SNET, 2010). Se compone de cinco miembros: s1, s2, s3, s4, s5 y aluviales (Q), de las cuales la Q se encuentra en el área de estudio, específicamente la formación “Qf”, Depósitos sedimentarios del Cuaternario.

El miembro Aluviones (Qf) se compone de tobas poco compactas y piroclastos del cuaternario, y depósitos de materiales aluviales, que datan del Holoceno (10 a 5 mil años). Las tobas consisten en piroclastos gruesos tales como lapilli y cenizas que se encuentran en intercalación con lentes arcillosos y de polvo volcánico. En conjunto tienen un color café predominante y su espesor de mayor de cien metros. Estos materiales se componen de bajo nivel de compactación que les hace vulnerables a la erosión y suelen formar depósitos sedimentarios al pie de ladera (S.L. Codina Tomathis, 2007).

Predomina en una franja del río Talquezalapa, al sur de la ciudad de La Reina, y en la parte baja de la subcuenca del río Metayate, próximo al embalse Cerrón Grande.

Otra formación presente es la de diques ácidos cercano a la ciudad de La Reina. Esto indica que hay formaciones recientes de magma en proceso de enfriamiento en dicha zona.

En el Anexo 1 se presentan el mapa de la litología y geológico de la subcuenca del río Metayate, con la ubicación de los sitios de muestreo.

### **1.10.5 Mineralogía**

La mineralogía en la zona del río Lempa próximo a la subcuenca del río Metayate (LaGeo, 2007), indicaron la presencia de los siguientes minerales:

Tabla 1.1: Minerales detectados en muestras de suelo provenientes de tres sitios de estudio en la cuenca del río Lempa cercana a la subcuenca del río Metayate (LaGeo, 2007)

Sitio	Minerales primarios	Porcentaje	Condición física general	Nombre la roca
1	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Ortoclase y sanidinaina: (K,Na)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> Pirita: FeS <sub>2</sub> Esfena: CaTiSiO <sub>5</sub> Plagioclase: (Ca,Na)AlSiO <sub>4</sub> Biotita: K <sub>2</sub> (MgFe) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> (AlSiO <sub>10</sub> ) Muscovita: (KAl <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> (AlSiO <sub>10</sub> ) Clorita: Mg <sub>5</sub> (Al,Fe)(OH) <sub>8</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> Líticos	10% 5% 2% 5% 2% 2% 13% 5% 10%	La roca contiene diferentes tamaños de cristales de cuarzo, feldespato-K, plagioclase y biotita, y fragmentos de roca alterada en una matriz silicificada e illitizada.	Grauwaca
2	Olivino Plagioclase Arcilla clorítica Calcita	7% 5% 5% 3%	La roca contiene vetillas y oquedades rellena de arcilla y calcita. Los cristales de olivino están reemplazados por calcita, iddingsita y probablemente serpentina.	Basalto parcialmente alterado
3	Cuarzo Ortoclase y microclina (K,Na)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> Microclina (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) Biotita Pirita	15% 10% 5% 5% 2%	La roca contiene cristales de cuarzo y feldespato-K, cementada por cuarzo intergranular con pequeños cristales de biotita en los intersticios de cuarzo.	Granito

### 1.10.6 Hidrología

En la parte alta de la subcuenca, el agua lluvia que se infiltra y almacena en formaciones geológicas superficiales porosas, poco permeables, drenando por medio de los poros o fisuras (fallas geológicas) por efecto de la gravedad. Tiene pendientes entre el 5 y el 45%. En la zona de estudio existen quebradas de invierno que conducen la escorrentía superficial y subsuperficial a los ríos: Agua Fría, Quebrada Honda, Los Micos, Metayate, Trompillo, Las Vegas, Quebrada Grande, Manzanal, entre otra quebradas de invierno.

En la parte media predominan zonas con rocas de mediana a nula permeabilidad, con zonas de recarga identificadas en el mapa hidrogeológico conceptual elaborado por ANDA, en

Agua Zarca y Santa Rosa. La mayor parte del terreno tiene pendientes entre 5 y 15%, por lo que el agua lluvia tiene el tiempo de residencia adecuado para ser infiltrada en el suelo, y el resto drena por quebradas a los ríos locales: Metayate, Talquezalapa, Los Micos, El Potrerón, El Cordoncillo, La Quebradora, El Salamo, Palo Verde, Conacaste, y otras quebradas de invierno.

La cantidad de ríos en la parte baja se limita al río Metayate, y quebradas de corto recorrido. El terreno es plano, con pendientes menores a 5%. Debido a que la mayor parte de esta zona se compone de rocas acuíferas, la escorrentía superficial es menor que en las partes media y alta. Esto se debe a las condiciones topográficas, la pendiente y la permeabilidad de los materiales aflorantes.

La principal zona de recarga superficial se encuentra en las partes altas de El Encumbrado. En esta zona se genera un drenaje superficial y un drenaje subterráneo en forma radial convergente, predominando el drenaje hacia el sector sur (ANDA, 2007).

### **1.10.7 Hidrogeología**

Considerando la información hidrogeoquímica, y la información bibliográfica disponible, el modelo conceptual contempla la existencia de acuíferos someros colgados, fracturados, porosos y fracturados hidrotermales.

De acuerdo al mapa hidrogeológico de ANDA, elaborado en 2008, y que salió al público en 2009, en la figura 1.7 se presenta una sección para el área de estudio. En éste, aparece que en toda la parte alta de la subcuenca, y la mayor área de la subcuenca media, presenta “Unidades rocosas no acuíferas”, lo cual no indica que no hay agua subterránea, sino que la formación rocosa indica que la permeabilidad del suelo es bajo, por lo que predominan flujos subsuperficiales, y una pequeña recarga a acuíferos más profundos.

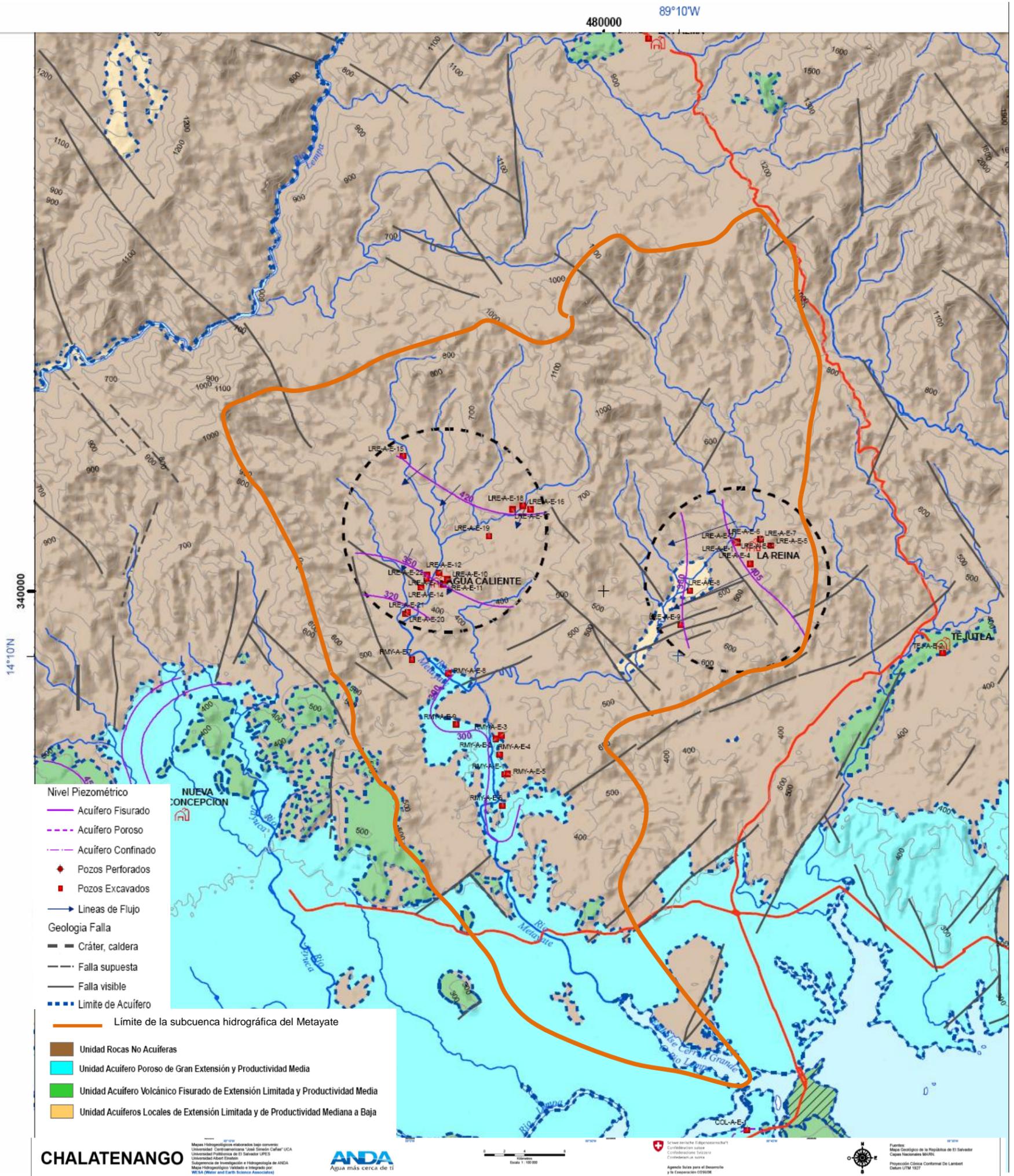


Figura 1.7: Detalle del Mapa Hidrogeológico Chalatenango de ANDA, con área de estudio delimitado (Fuente: ANDA, 2009)

En la parte media y baja de la subcuenca, indica el mapa que hay “acuíferos porosos de gran extensión y productividad media”, y algunas zonas con “acuífero volcánico fisurado de extensión limitada y productividad media”.

Los recursos de aguas subterráneas son limitados por la presencia de formaciones y capas geológicas antiguas, de baja porosidad, permeabilidad de baja a nula, por lo que el almacenamiento de agua es poco (ANDA, 2007). El coeficiente de transmisividad de la zona se asume para formaciones y capas geológicas antiguas compuestas por coladas de lava riolíticas-andesíticas fracturadas (Theis). Por lo anterior, los acuíferos existentes retienen poca agua; sin embargo, existen algunos acuíferos pertenecientes a formaciones Cuscatlán y San Salvador que almacenan suficiente agua para su explotación.

Se cuenta con un inventario de pozos (ANDA, 1987 y 2007), el cual se presenta en detalle en Anexo 2.

#### **1.10.6.a. Unidad rocas no acuíferas**

##### **Parte alta de la subcuenca: Acuíferos someros colgados**

La poca presencia de minerales indica que las aguas pertenecen a un flujo local de agua, que se caracteriza por presentar manantiales como puntos de descarga, por medio de un flujo sub-superficial, con flujos radiales convergentes, con rumbo predominante del norte al sureste (Fuente: ANDA, 2007). Es probable que estos acuíferos someros colgados aporten sus aguas a los acuíferos someros encontrados en la parte media y baja.

En este sector, predomina la formación Chalatenango y Morazán. La primera, presenta rocas efusivas ácidas y piroclásticas ácidas subordinadas, compuesta por lavas andesíticas y piroclásticas antiguas, parcialmente fracturadas y fisuradas, con porosidad mediana y permeabilidad media a baja.

Se ha calculado un gradiente hidráulico del orden de 0.05 m. La profundidad del nivel freático varía entre 75 y 100 m, en los caseríos Agua Fría y Ojo de Agua (parte alta de la subcuenca). La dirección del flujo subterráneo en la zona de Agua Caliente hasta El

Obrajuelo es de norte a sur, con un gradiente hidráulico del orden de 0.05, fallas locales (ANDA, 2007).

Las aguas son bicarbonatadas cálcicas (ANDA, 2007) en el manantial Apantillo, cantón Agua Fría. En el Anexo 2 se presentan copia de los análisis fisicoquímicos de ANDA.

### **Parte media y baja: Acuíferos en medios fracturados**

Las formaciones presentes son Chalatenango, Morazán y Cuscatlán, por lo que predominan las unidades hidrogeológicas de baja a nula permeabilidad en las partes oeste y este de la zona, y de mediana a baja permeabilidad en la zona de los caseríos Poza Redonda, Metayate, parte de El Obrajuelo, Los Marín y Los Albíos. Se eleva entre 250 y 300 msnm.

Sobre la formación Morazán en la zona del Cantón Santa Rosa, Agua Zarca y El Obrajuelo, descansa la formación Cuscatlán (c1). Esta que se compone de depósitos fluviales (cantos rodados, estratos de limos y arcillas), porosidad media y permeabilidad de media a baja, formando una unidad hidrogeológica de media a baja permeabilidad.

La capa de epiclastitas volcánicas andesíticas tiene una porosidad baja y una permeabilidad de baja a nula, formando una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad, en algunas partes con intercalación de tobas fundidas o ignimbritas. Por estas capas circula agua por medio de poros, intersticios y grietas, formando acuíferos de pequeño espesor, con capas de lavas basálticas parcialmente fracturadas y fisuradas, con influencia en la parte noroeste de fallas locales, que ha producido un fuerte fracturamiento y planos de interconexión cruzada entre fracturas y fisuras (ANDA, 2007).

Las aguas son bicarbonatadas cálcicas (ANDA, 2007) en pozo perforado de ANDA/AID, barrio El Carmen, Agua Caliente. En el Anexo 2 se presentan copia de los registros de ANDA.

#### **1.10.6.b. Acuífero someros poroso de gran extensión y productividad media**

Conformada por la formación San Salvador (s4), comprendiendo una franja irregular sobre el río Metayate, desde el caserío Santa Rosa hasta El Obrajuelo, compuesta por depósitos de materiales aluviales. Esta formación se caracteriza por presentar una permeabilidad media y porosidad elevada, por lo que conforma un acuífero con mediana productividad.

La dirección del flujo subterráneo es de norte a sureste, con un gradiente hidráulico del orden de 0.05. En El Obrajuelo, la profundidad del nivel freático del acuífero superficial oscila entre 5 y 15 m, el cual es aprovechado por medio de pozos excavados (ANDA, 2007).

Las aguas son bicarbonatadas cálcicas (Anexo 2, copia de los registros de ANDA).

#### **1.10.6.c. Acuífero local de extensión limitada y productividad media**

Se encuentra en la formación San Salvador (Qf), compuesta por depósitos aluviales y acuáticos, con intercalaciones de piroclastos. El flujo es de nordeste a suroeste, siguiendo las pendientes topográficas. Se ubica en franja del río Talquezalapa, desde La Reina hasta caserío El Tigre, y entre la Hacienda Metayate y el embalse Cerrón Grande.

#### **1.10.6.d. Acuífero profundo**

Hay evidencia de un acuífero regional profundo oscila de 20-30 m de profundidad, en la parte media de la subcuenca, el cual es aprovechado por medio de pozos perforados por ANDA, los cuales han presentado hidrotermalismo: Existe al menos tres zona de afloramiento hidrotermal (temperaturas de 50° a 90 °C) y 75 a 100 galones por minuto (gpm), que se encuentra a gran profundidad, y que fluyen por grietas y fisuras irregulares, en los cantones Santa Rosa, Agua Zarca y Agua Caliente, de la parte media y baja de la subcuenca del río Metayate (Estévez, “Estudio Hidrogeológico del área cantón Agua Zarca, Agua Caliente, Chalatenango”, 2009).

Existen pozos perforados en Caserío El Obrajuelo, pero fueron cerrados por presentar hidrotermalismo (ANDA, 2007, Anexo 2). No se dispone de una caracterización hidrogeoquímica de esta agua.

#### **1.10.8 Entorno socioeconómico**

En la zona norte de El Salvador emplea recursos naturales tales como manantiales, ríos y pozos superficiales para el desarrollo de actividades agropecuarias, generación hidroeléctrica, industria y consumo humano. Además, de acuerdo al programa del FOMILENIO “Las cuatro plantas eléctricas que operan en el Río Lempa producen un tercio de la electricidad del país; el Lempa además proporciona un tercio del agua de la Región Metropolitana de San Salvador. La Zona Norte produce el 60 por ciento del arroz nacional; el 15 por ciento de la producción de leche; y el 75 por ciento de pescado de agua dulce del país proviene de sus cuatro lagos” (Fuente: [www.mca.gob.sv/fomilenio](http://www.mca.gob.sv/fomilenio)).

El municipio de Agua Caliente está ubicado a 70 kilómetros de San Salvador, conduciendo por la carretera Troncal del Norte y luego con dirección hacia Nueva Concepción; este municipio lo comprende su Área Urbana y siete cantones: Ojos de Agua, Cerro Grande, El Encumbrado, Agua Fría, Agua Zarca, Obrajuelo y Santa Rosa.

De acuerdo al Mapa de Pobreza del FISDL (Carlos Briones, 2005), el municipio de Agua Caliente presenta una Pobreza Extrema Alta, y el municipio de La Reina con Pobreza Extrema Moderada.

#### **Municipio de La Reina**

Está limitado al norte por La Palma, al noreste por San Fernando y San Francisco Morazán, al este por Tejutla, al sureste por Tejutla y al sur por Suchitoto y El Paisnal, al suroeste por Nueva Concepción, al oeste y noroeste por Agua Caliente; riegan al municipio los ríos: Grande de Tilaza, Los Aposentos, Rancho Viejo, El Coyolar, El Infierno; sus elevaciones orográficas más notables son los cerros: Calambre, La Víbora, La Junta, El Roblarcito, El Morro, Tronco Prieto; cuenta con una población de 12,000 habitantes, su

clima es cálido. Su principal rubro económico son las remesas familiares, le sigue la agricultura y la ganadería (Ministerio de Gobernación, 2004).

### **Municipio de Agua Caliente**

Limitado al norte por La Palma y Metapán, al noreste, este y sur este por La Reina al sur por El Paisnal, al sureste, este y noreste por de La Nueva Concepción, el área del municipio es de 195.74 Km<sup>2</sup>, riegan al municipio los ríos San Pablo, Talquezalapa, Metayate, Zapoapa, los accidentes geográficos más notables son los cerros El Zapatoro o Gallinero, Las Piletas, Las Lajas Negras, Apersogado, Tierra Sumida.

Su clima es cálido. Tiene un lugar turístico que se llama Piedra Movediza. Cuenta con una población aproximada de 8,915 habitantes. La población se dedica a la siembra de maíz, maicillo y fríjol. Existen muchas familias que viven de las remesas familiares. La falta de oportunidades laborales sigue siendo un factor que obliga a los jóvenes a emigrar a los Estados Unidos.

El casco urbano tiene un tamaño mediano, cuenta con los servicios básicos: agua, luz, teléfono, correos, un puesto de policía, un juzgado de paz, internet, una farmacia. Existe señal de teléfono celular de Telecom (Ministerio de Gobernación, 2004).

#### **1.10.9 Entorno ambiental**

##### **Parte alta de la subcuenca**

La cobertura vegetal está caracterizada por bosque tropical húmedo, coníferas en las partes mayores a 800 msnm; sin embargo, esta cobertura ha sido afectada por actividades agropecuarias, en su mayoría cultivos de subsistencia, maíz, maicillo y pasto (MARN, 2004).

Los principales caseríos se asientan en zonas cercanas a ríos y manantiales en el municipio de Agua Caliente son: Agua Fría, El Encumbrado, Mal Paso, Los Apantes, Casas de Teja, Ojos de Agua, Los Conacastes, etc.

La principal fuente de abastecimiento de agua para consumo son los manantiales, los cuales han sido captados y conducidos por medio de tubería plástica. Así mismo, la presencia de pozos se da entre las cotas 400 y 450 msnm, es decir en la zona próxima a la subcuenca media.

El abastecimiento de agua para la población local, ganado y cultivos está restringido a los manantiales y a los ríos afluentes al Metayate.



*Fotografía 1:  
Vista al sur subcuenca alta*



*Fotografía 2:  
Vivienda en la zona rural subcuenca alta*

### **Parte media de la subcuenca**

La cobertura vegetal corresponde al bosque tropical húmedo, afectada por actividades agropecuarias, en su mayoría cultivos de maíz, maicillo y pasto, además de ganado, y el desarrollo urbano en la ciudad de Agua Caliente.

A pesar que existe abastecimiento domiciliar de agua por medio de captaciones de manantiales en la parte alta de la subcuenca y un pozo perforado en la zona urbana (ANDA, 2007), la presencia de pozos está extendida en la zona urbana de Agua Caliente, usualmente cerca de fosas sépticas de hoyo no selladas. Lo anterior incide en la calidad del agua de los pozos.

En la zona rural (caseríos Santa Rosa y Agua Zarca), los pozos tienden a estar cerca de las viviendas o alejadas de éstas, estando los pozos excavados influenciados por la actividad antropogénica. Algunos pozos perforados presentan influencia hidrotermal (ANDA, 2007).



*Fotografía 3:  
Zona de pastizales en subcuenca media*



*Fotografía 4:  
Pozo contaminado en ciudad  
de Agua Caliente*

### **Parte baja de la subcuenca**

Similar a la parte media de la subcuenca, la cobertura vegetal está caracterizada por bosque tropical húmedo, afectada por actividades agropecuarias tales como cultivos de caña de azúcar como de granos básicos (maíz, maicillo, frijol) y pasto, además de ganado.

La presencia de pozos excavados está más extendida en la parte baja que en la parte alta y media, encontrándose agua a hasta 8 m. Cada vivienda cuenta con pozos excavados, siendo mayor en el caserío de El Obrajuelo, Poza Redonda, Metayate, Campamento Metayate.



*Fotografía 5:  
Fosa séptica de hoyo en zona rural  
en subcuenca baja*



*Fotografía 6:  
Zona de cultivo de caña de azúcar  
en subcuenca baja*

### 1.10.10 Calidad del agua

Estudios de ANDA determinaron que, debido a la presencia de letrinas y establos, pueda haber contaminación con Coliformes fecales (ANDA, 2007). CEL realizó estudios de calidad fisicoquímica del agua en el río Metayate de 2003 a 2008, y del río Agua Fría y de un manantial de agua termal en 2008 y 2009. Los resultados se presentan en el Anexo 2.



*Fotografía 7:  
Río Agua Fría*



*Fotografía 8:  
Río Metayate*

### Río Agua Fría

Los valores fueron muy estables de pH (de 7.37 a 7.75), sus aguas fueron hipotermales (rango de 24.5 a 26.2° C) y poco mineralizadas (promedio de 129  $\mu$ S/cm).

Todos los parámetros químicos (aniones, cationes, metales pesados, plaguicidas y compuestos orgánicos) presentaron concentraciones que cumplieron con la norma de agua potable salvadoreña (CONACYT, 2008).

Los análisis microbiológicos indicaron una ligera contaminación con Coliformes fecales, Coliformes totales y *Escherichia coli* en época seca, con valores entre 110 NMP/100 mL y 790 NMP/10 mL. En la época lluviosa, presentaron valores de Coliformes totales entre 240 y 2,300 NMP/100 mL, y para Coliformes fecales de 1.1 a 20 NMP/100 mL (CEL, 2010).

## **Manantial de aguas termales en Agua Caliente**

El agua presentó temperatura altas, con valores entre 38.6 y 39.6° C en época lluviosa, y entre 39.5 y 44.5 °C en época seca. Esto se puede deber a que proviene de un acuífero profundo con actividad hidrotermal, con mezcla del agua lluvia infiltrada en la zona (CEL, 2010).

El pH del agua es alcalino en época seca y neutra en época de lluvias, debido al efecto de la dilución del agua del riachuelo por el agua lluvia, el cual, aparentemente, arrastra minerales de carbonato que otorgan dureza y un medio más alcalino. Al reducirse el aporte del agua lluvia, la concentración de minerales que otorgan alcalinidad al agua aumenta (CEL, 2010).

La Conductividad Eléctrica fue mayor en la época seca (valores entre 778 y 1,150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) que en la época lluviosa (valores de 394 a 468  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Este comportamiento se debe a la naturaleza volcánica del agua, y al efecto de dilución de las lluvias (CEL, 2010).

Presentó predominancia de Coliformes totales y Coliformes fecales, principalmente en la época lluviosa, y el inicio de la época seca. Esto puede atribuirse a contaminación por actividad ganadera (CEL, 2010).

## **Río Metayate**

El sitio de monitoreo se localizó de 2003 a 2008 en el puente sobre el río Metayate, sobre la calle que conduce a Nueva Concepción. Fueron estudiados parámetros físicos: La temperatura promedio en época seca y lluviosa osciló entre 25 y 29 °C, siendo mayor a finales de agosto y a principios de marzo. La conductividad eléctrica presentó variaciones significativas entre la época seca y la lluviosa, lo que se explica por el hecho de la dilución por el aporte de ríos tributarios y quebradas de invierno, los cuales incrementan su caudal considerablemente por la escorrentía superficial. Los valores de pH tendieron a ser ligeramente alcalinos.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA)

### 2.1. CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGIA

#### 2.1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se compone de una serie de cambios físicos y procesos de transporte que experimenta el agua, considerando un sistema cerrado.

El proceso natural de precipitación del agua en forma de lluvia o nieve, la infiltración, la recarga de acuíferos, flujo subsuperficial, evaporación, evapotranspiración, se ven afectados por procesos humanos tales como la extracción e inyección por bombeo, así como procesos de percolación de lixiviados, redes de drenaje de aguas residuales urbanas y fugas y/o derrames de contaminantes.

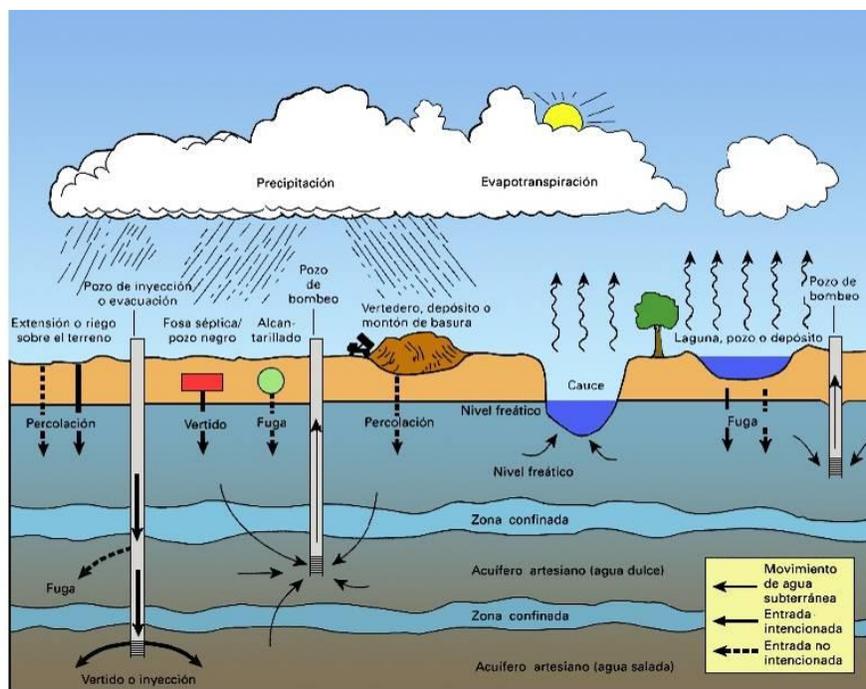


Figura 2.1: Ciclo hidrológico y afectación antropogénica  
(Fuente: [http://www.zonacatastrofica.com/files/2008/07/napas\\_subterranas1.jpg](http://www.zonacatastrofica.com/files/2008/07/napas_subterranas1.jpg))

La imagen siguiente, describe los procesos de transporte de agua, conformando un ciclo cerrado.

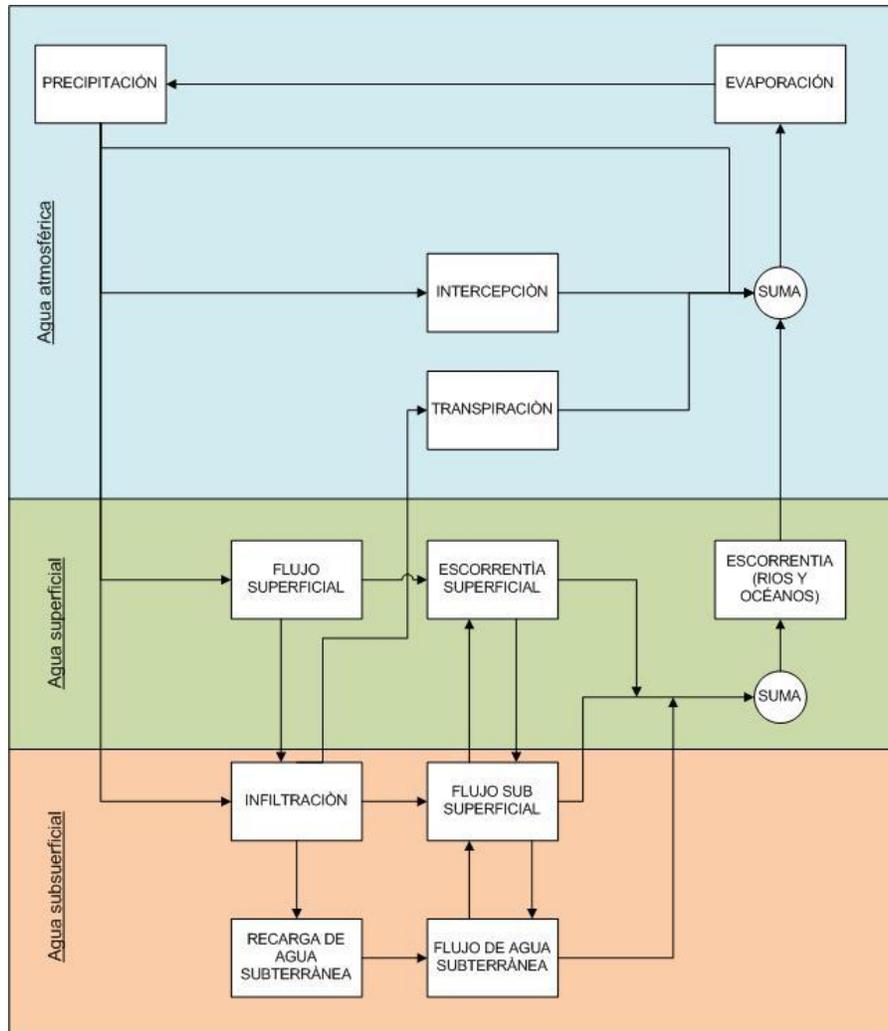


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema hidrológico global  
(Fuente: Chow, et al)

### 2.1.2. Acuíferos

Por acuífero se entiende a un reservorio de agua en el subsuelo, cuya capacidad de almacenamiento, retención y entrega está condicionada por la formación geológica predominante. Dicho de otro modo, es “una unidad geológica permeable y saturada lo suficientemente permeable para ceder cantidades apreciables de agua a pozos“ (Kruseman

y Ridder, 2000). Las formaciones geológicas típicas son arenas, gravas, granito fracturado, etc.

Un acuitardo es una unidad geológica que tienen una gran capacidad de retención de agua el cual, visto en consideración de grandes áreas y tiempos largo, permite transmitir agua en cantidades significativas, sin embargo, su permeabilidad es tan baja que no permite la entrega de cantidades de agua lo suficientemente grande para la perforación y uso de pozos. Ejemplo de ellos son: Arcillas, arenas arcillosas, arenisca, rocas compactas con alteración y/o fracturación, y esquistos con fracturas (rocas metamórficas de arcilla, conocida como talpetate).

El concepto de acuicludo se emplea a aquellas unidades geológicas que no tienen capacidad para transmitir agua. Ejemplo son rocas metamórficas o rocas ígneas densas no fracturadas (Kruseman y Ridder, 2000), así como esquistos inalterados.

Hay tres tipos de acuíferos (Kruseman y Ridder, 2000):

- **Confinado**, limitado arriba y abajo por un acuicludo, lo que produce una compresión del agua confinada, generando pozos surgentes al nivel del acuífero; en otras palabras, sólo se puede acceder a ellos por medio de pozos perforados, o por manantiales que provengan de zonas fracturadas como las aguas termales.
- **Libre o somero**, limitado abajo por un acuicludo, sin capas arriba que lo restrinjan. Comúnmente se le conoce como acuífero superficial, y el nivel del agua varía con la infiltración y aportes a cuerpos de agua superficial, delimitando un nivel freático variable en profundidad, estando influenciado por efecto de la gravedad y se encuentra a presión atmosférica. A este se accede por medio de pozos excavados o perforados, así como estanques, pozas, etc.
- **Semiconfinado**, presenta acuitardos arriba y abajo, o un acuitardo y un acuicludo.

El diagrama siguiente, esquematiza los tres tipos de acuíferos (<http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/semiconfinados.pdf>)

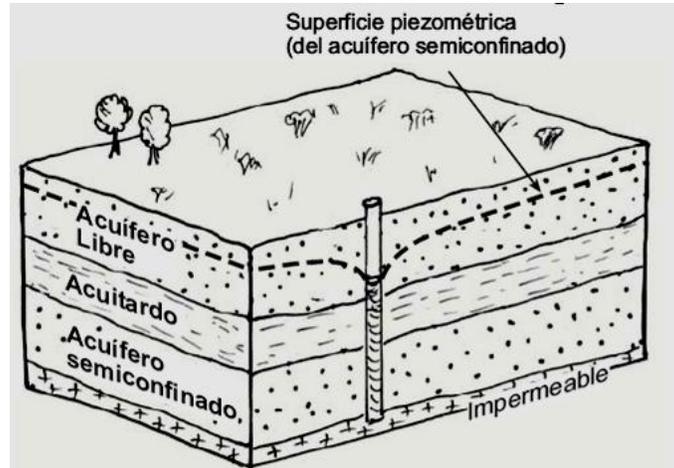


Figura 2.3: Diagrama de la distribución de acuíferos y acuitardos

### 2.1.3. Estratos del suelo

Generalmente, entre la superficie y un acuífero libre, y dependiendo del grado de saturación de agua, la columna de suelo se compone de una zona de aireación (o zona vadosa) y una zona de saturación.

En la zona de aireación, los espacios intergranulares del suelo se encuentran parcialmente llenos con agua, y el resto por aire. En ésta, los procesos oxidativos y de percolación son muy importantes.

En la zona de saturación, en la cual todo el espacio intergranular está ocupado por agua, se dan procesos de reducción y deposición de minerales.

El límite entre estas dos zonas está dado por el nivel freático, por lo que el nivel de éstas es fluctuante de acuerdo a procesos de recarga/descarga (Singhal y Gupta, 1999).

En la zona vadosa, se encuentran tres regiones: Zona de evapotranspiración (suelo-agua), zona vadosa intermedia y zona capilar. El diagrama siguiente ubica de estas zonas.

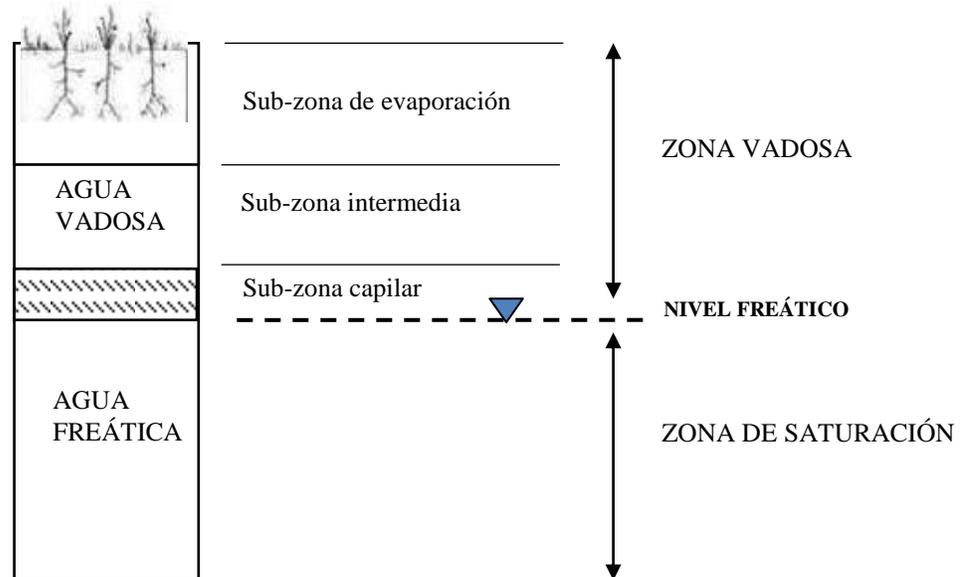


Figura 2.4: Diagrama de distribución de los estratos del suelo (Fuente: (Singhal y Gupta, 1999))

#### 2.1.4. Parámetros físicos que definen a los acuíferos

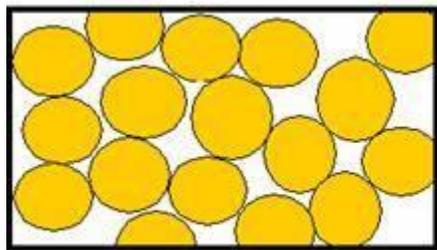
Los estudios generales de hidrogeología, asumen como primera aproximación que los acuíferos y acuitardos son homogéneos e isotrópicos en sus propiedades físicas, geológicas, mineralógicas (G. P. Kruseman y N. A. de Ridder, 2000). Con esta aproximación, se infiere que la conductividad hidráulica es la misma a través de una formación geológica, en todas sus direcciones.

#### Porosidad y fracturamiento

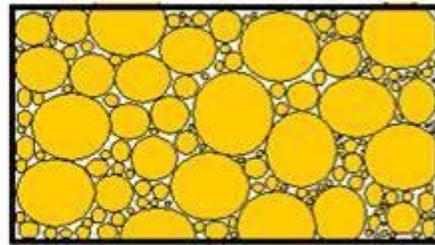
Porosidad total es la relación entre el espacio vacío y el volumen total de la masa de unidad geológica. Por otro lado, por porosidad efectiva se entiende la relación entre el

espacio total que puede almacenar agua en forma efectiva y el volumen total de la masa de unidad geológica.

La porosidad puede ser clasificada como Porosidad Intergranular, propia de materiales detríticos (arenas, gravas, etc.), y Porosidad por Fisuración. El primero se origina en depósitos aluviales, principalmente. En el segundo caso, las fisuras pueden ser ocluidas por procesos de mineralización, o ensancharse por procesos de disolución de minerales (calizas, por ejemplo). Las fisuras son causadas por movimientos tectónicos, enfriamiento del magma, o discontinuidades sedimentarias (F.J. Sánchez, 2008).

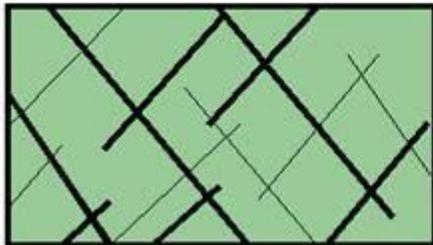


*Acuífero poroso*



*Acuífero con poros cementados*

*Acuífero en grietas o fracturas*



*Acuífero cavernoso*



*Figura 2.5: Medios rocosos y tipos de poros*

### **Conductividad hidráulica, transmisividad y capacidad de almacenamiento**

La conductividad hidráulica ( $K$ ), conocida también como permeabilidad, es una constante de proporcionalidad en la ecuación de Darcy, por lo que es función de las propiedades de la porosidad del medio y el paso del flujo de agua:

$$\frac{Q}{A} = K * \frac{dh}{dL} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Así, K se define como el volumen de agua que puede desplazarse a través de un medio poroso por unidad de tiempo, por efecto de un gradiente hidráulico, a través de una unidad de área medida perpendicularmente en la dirección del flujo (Kruseman y Ridder, 2000).

Para acuíferos porosos, se aplica el concepto de permeabilidad intrínseca (K<sub>i</sub>), el cual indica el paso de un fluido (agua o soluciones, así como contaminantes orgánicos e inorgánicos) a través de la abertura de los poros.

La transmisividad (T) es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor del acuífero. Así, representa la razón de flujo, por un gradiente hidráulico, a través de una sección de un acuífero.

La Capacidad de Almacenamiento (S<sub>s</sub>) indica el volumen de agua que un acuífero puede entregar por presencia de un gradiente hidráulico.

El 90 por ciento de los acuíferos aprovechables consisten en rocas no consolidadas, principalmente grava y arena. Las areniscas y conglomerados son formas cementadas de arena y grava, y por esa razón su permeabilidad y rendimiento han sido reducidos por el cemento. Los mejores acuíferos en areniscas son aquéllos que se encuentran sólo parcialmente cementados. Los conglomerados poseen una distribución limitada y no son de gran importancia como acuíferos.

Las rocas cristalinas y metamórficas son prácticamente impermeables. Los suelos arcillosos tampoco presentan estas propiedades, debido a su capacidad para retener y no transmitir el agua.

Menos frecuentemente se originan acuíferos importantes en el yeso y otras rocas solubles.

### **Captaciones de agua: Pozos y manantiales**

Con el objeto de extraer agua del subsuelo, se ha usado el agua de ríos, manantiales, pozos excavados y pozos perforados. La presencia de agua en pozos excavados y

manantiales, se debe al flujo de agua subsuperficial alimenta el agua de los manantiales y pozos excavados. Sin embargo, la extracción de agua por pozos profundos se alimenta del almacenamiento de agua subterránea (A. M. Erazo Chicas, 2005). En el caso de los ríos, éstos reciben agua por medio de flujo subsuperficial y por escorrentía superficial.

De acuerdo a la producción de agua, los pozos pueden ser clasificados en pozos artesianos (proviene de un acuífero confinado), o pozo surgente, y pozo de extracción. En el primer caso, se requiere de la perforación de pozos (usualmente, profundidades mayores a 30 m), y en el segundo pueden ser pozos excavados o perforados.

## **2.2. CONCEPTOS DE GEOLOGIA**

### **2.2.1. Rocas ígneas y volcánicas**

Las rocas ígneas o magmáticas son el producto final de la solidificación del magma. Estas pueden ser extrusivas o volcánicas si se solidifican fuera de la cámara magmática (superficie, océanos, etc.), e intrusivas, en el caso opuesto, como por ejemplo aquellas que se solidifican en fracturas, grietas, fallas o en la cámara magmática (Banda, Torné, 2000).

La clasificación de las rocas ígneas se realiza por medio de la concentración de sílice ( $\text{SiO}_2$ ): rocas ultrabásicas (Peridotita, Olivino), básicas o máficas (Gabro, plagioclasas cálcicas, piroxeno), intermedias (plagioclasas sódica, anfíbol, diorita, granodiorita) y ácidas o félsicas (cuarzo, feldespato cálcico, granito, moscovita, biotita, plagioclasas sódica). Al aumentar el contenido de sílice, las rocas tienden a ser más claras (Banda et al, 2000).

Otra clasificación es de acuerdo a su vulcanoclastia (Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 2009):

- a) **AUTOCLASTO:** Fragmento generado durante el movimiento de la lava o el desmoronamiento de domos por gravedad, por lo que es un producto de un proceso volcánico no explosivo. Se localizan in situ.

- b) **PIROCLASTO:** Partícula expulsada por cráteres volcánicos, producto de un proceso volcánico explosivo.
- c) **HIDROCLASTO:** Piroclasto generado en el contacto agua-magma, producto de un proceso volcánico más o menos explosivo.
- d) **EPICLASTO:** Partícula generada por erosión de rocas volcánicas antiguas. Consta de fragmento lítico –litoclasto– procedente de rocas volcánicas. Proviene de un proceso sedimentario largo.

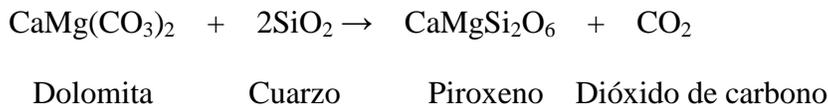
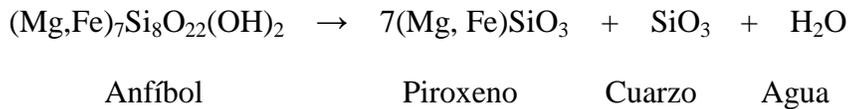
Los tipos de rocas volcánicas son (Tucker, Carozzi, Greensmith):

- **Piroclásticas de caída:** Son fragmentos procedentes de actividad volcánica explosiva, que se han depositado en mantos que cubren la topografía del terreno. Se componen de lapilli y ceniza
- **Ignimbritas:** Conocidos como flujo piroclástico o colada piroclástica, se componen de partículas concentradas de minerales, transportados por medio de una masa gaseosa laminar, caliente, generado por el colapso de la columna eruptiva en magmas ácidos. Por lo anterior, tienden a concentrarse en valles, tierras bajas.
- **Avalancha piroclástica:** material producido por el transporte de partículas por tracción en el medio aéreo, que cubre en parte la topografía del terreno.
- **Lahar:** flujo de lodo en laderas de volcanes aéreos (lluvia mezclada con ceniza).
- **Rocas efusivas ácidas:** aquellas que han sido llevadas a la superficie de la tierra por la fuerza volcánica, de granulometría fina: riolita, diabasa, basalto.

### 2.2.2. Rocas metamórficas

Son rocas ígneas y sedimentarias que sufren modificaciones en su estructura cristalina por variaciones de temperatura (metamorfismo térmico), presión (metamorfismo dinámico), fluidos químicamente activos. Ejemplo son: talco, serpentina, grafito, aluminosilicatos de

hierro, silicatos aluminicos, mármol, pizarra, esquisto, cuarcita, etc. Dos de las reacciones metamórficas más comunes son (Banda et al, 2000):



### 2.2.3. Rocas sedimentarias

Son rocas originadas a partir de la consolidación de fragmentos de otras rocas, de restos de plantas y animales o de precipitados químicos. Estas pueden ser detríticas, químicas u orgánicas.

**Detríticas:** formadas a partir de la sedimentación de trozos de otras rocas después de una fase de transporte. La clasificación de estas rocas se basa en los tamaños de los trozos que las componen. Las constituidas por trozos de tamaño grande son los conglomerados, las areniscas poseen granos de tamaño intermedio y los limos y arcillas poseen trozos muy pequeños. Estas mantienen su integridad física intacta.

**Rocas sedimentarias de origen químico:** formadas a partir de la precipitación de determinados compuestos químicos en soluciones acuosas. Ejemplo son los carbonatos, evaporitas, ferruginosas y fosfatos.

**Rocas biogénicas:** formadas por acumulación de sustancias de origen orgánico. Un tipo muy común es la roca caliza, formada en su mayor parte por restos de organismos como corales, algas, etc. aunque también puede originarse por precipitación de cementos calcáreos. Las tobas calcáreas son rocas muy porosas y con abundantes restos vegetales que se originan en los ríos cuando el carbonato de calcio precipita sobre la vegetación

En la formación de una roca sedimentaria pueden actuar más de un proceso sedimentario por lo que se producen rocas mixtas de difícil asignación a un grupo concreto. Tal es el caso de una roca formada por la acumulación in situ de las partes duras de organismos y por partículas aportadas por algún mecanismo de transporte (fósiles).

### **2.3. CONCEPTOS DE HIDROGEOQUÍMICA**

La aplicación de conocimientos y métodos hidrogeoquímicos permite identificar procesos de mezclado, dilución, disolución de minerales, meteorización de minerales, procesos de filtración y tipo de minerales presentes. Esto permite establecer el flujo de contaminantes que podrían afectar la calidad del agua para consumo y vida acuática (C.A.J. Appelo y D. Postma, 1994).

Otros factores que afectan la química del agua son:

- La ingesta de selectiva debido a la materia orgánica, debido al almacenamiento de iones en la biomasa, principalmente por la presencia de fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio) y la absorción de gases de la atmósfera (amoníaco, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno).
- Descomposición de la materia orgánica, debido a procesos de oxidación (liberación de dióxido de carbono), liberación de nutrientes.
- Meteorización y disolución de minerales de rocas (carbonatos y silicatos) por tiempos de residencia por la presencia de acuíferos porosos, permeables y otros con velocidades de flujo elevadas. El tipo de roca es determinante para evidenciar procesos de meteorización: Altas concentraciones de sólidos disueltos totales indican mayor tiempo de residencia y, por tanto, mayor meteorización, así como el tipo de acuífero por el que circula (arenas y gravas, piedra caliza y rocas volcánicas).
- Precipitación mineral, la cual indica si un mineral se encuentra sobre saturado o subsaturado, dando un posible rastro de los minerales existentes en las unidades acuíferas.

- Intercambio iónico, cuyos subproductos pueden cambiar la composición de aniones.
- Procesos de mezclado, el cual puede cambiar el estado de saturación disolviendo o precipitando minerales. Esta se determina por medio de un balance de aguas versus acción de masas, según las siguientes ecuaciones:
- Contaminación, por sales, metales, agentes contaminantes del aire, hidrocarburos, fertilizantes, plaguicidas, desechos radioactivos, etc.
- Tiempo de residencia del agua, es decir la relación de la cantidad de agua en el acuífero respecto a flujo de agua en éste. Los valores obtenidos permiten determinar si las aguas subterráneas pertenecen a un flujo local, regional o intermedio: Un flujo local indica aguas de corto tiempo de tránsito, de días, semanas o años, las aguas regionales indican aguas que han tenido un tiempo de tránsito muy largo, de siglos e incluso milenios (paleoaguas), y las aguas intermedias períodos de tránsito que van de años a siglos, ya que van del lapso de algunos días a decenas de miles de años.
- Zonas de descarga y recarga, la cual puede presentar presencia de minerales, materia orgánica, plaguicidas, fertilizantes, metales pesados, y otros que no sean propios de la geología de la zona.

### **2.3.1. Hidrogeoquímica del agua**

La hidrogeoquímica del agua superficial y subterránea puede determinarse midiendo la concentración de aniones y cationes mayoritarios, la cual varía significativamente del agua lluvia. Las sustancias disueltas en el agua subterránea son, en la mayoría de los casos, sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), silicio ( $\text{SiO}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ), y se les conoce como Compuestos Mayoritarios. Estos usualmente presentan concentraciones mayores a 1 mg/l en aguas subterráneas, pero con dichos valores también suele aparecer nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), sin embargo este obedece más a procesos de contaminación (Sánchez, 2004).

De los compuestos minoritarios, aquellos con concentraciones entre 0.1 y 1 mg/l, pueden ser iones de flúor ( $F^-$ ), fosfato ( $PO_4^{3-}$ ), estroncio ( $Sr^{2+}$ ) e hierro ( $Fe^{2+}$ ). Elementos tales como metales pesados, se llaman compuestos trazas, con concentraciones menores a 0.1 mg/l (Sánchez, 2004).

### 2.3.2. Composición física del agua

Los parámetros físicos del agua subterránea y superficial más importantes se detallan en el Anexo 3, y se resumen a continuación:

**Temperatura (T):** En el agua subterránea, hay un incremento aproximado de  $3^\circ C$  por cada 100 m de profundidad (F.J. Sánchez, 2004). Las variaciones de las temperaturas, ya sea un descenso o un incremento anómalo, debe ser analizado de acuerdo al tipo de formación geológica, ya que la presencia de rocas fracturadas o porosas, puede evidenciarse.

Las aguas se clasifican, de acuerdo a su termalismo, en aguas frías ( $<20^\circ C$ ), hipotermas (21- $30^\circ C$ ), mesotermas (31- $40^\circ C$ ) e hipertermas ( $> 40^\circ C$ ).

**Conductividad eléctrica (CE):** Es la facilidad del agua de conducir una corriente eléctrica, por presencia de iones disueltos (minerales en solución). Sus unidades son  $\mu S/cm$  (microsiemens por centímetro). Los valores típicos de CE para el agua destilada es de 0.5 a 5  $\mu S/cm$ , el agua lluvia de 5 a 30  $\mu S/cm$ , y el agua subterránea de 30 a 10,000  $\mu S/cm$ .

**Sólidos totales disueltos (STD):** se refiere a la cantidad de residuo del agua que pasa a través de un filtro (usualmente 0.45 mm), y luego evaporado a  $180^\circ C$  y pesado. Representa la cantidad de iones solubles que están disueltos en agua. Se puede calcular a partir de la CE como una aproximación:

$$SDT = 0.7 * CE \quad (\text{Ec. 2.2})$$

**Potencial de hidrógeno (pH):** Mide la acidez del agua. Es el logaritmo negativo base diez de la concentración de iones hidronio. El pH de las aguas superficiales oscila entre 5.5. y 8.5, y el de las aguas subterráneas oscila entre 6.5 y 8.5. La siguiente es una escala tomada

del documento “La escala de pH y fuerzas de los ácidos y bases” (Jacqueline Gutiérrez, 2003):

Tabla 2.1: Valores típicos de pH en la naturaleza

Tipo de agua, según si pH	Valor de pH	Equivalencia en la naturaleza
Muy ácida	pH 4 o menos	jugos gástricos (2,0); limón (2,3); vinagre (2,9); refrescos (3,0); vino (3,5); naranja (3,5); tomate (4,2)
Moderadamente ácida	pH 5 a 6	lluvia ácida (5,5)
Ligeramente ácida	pH 6 a 7	leche de vaca (6,4)
Neutra	pH 7	saliva en reposo (6,6); agua pura (7,0); saliva al comer (7,2); sangre humana (7,4)
Ligeramente alcalina	pH 7 a 8	huevos frescos (7,8); agua de mar (8,0); solución bicarbonato sódico (8,4)
Moderadamente alcalina	pH 8 a 9	Dentífrico (9,5)
Muy alcalina	pH 10 o más	leche de magnesia (10,5); amoníaco casero (11,5)

**Dureza (D):** Esta indica la cantidad de iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) presentes en el agua, los cuales precipitan al aumentar la temperatura. Para su cálculo, se empleó la metodología por cálculo de Calcio y Magnesio, que consiste en la suma de los miliequivalentes mol para concentraciones de los anteriores cationes ( $\text{meq}_{\text{Ca}}$  y  $\text{meq}_{\text{Mg}}$ ) cuantificados en el laboratorio (C.A.J. Appelo, D. Postma, 2006), expresado como carbonato de calcio:

$$D_{\text{CaCO}_3} = 50 * (\text{meq}_{\text{Ca}} + \text{meq}_{\text{Mg}}) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

### 2.3.3. Composición química del agua

La tabla siguiente, presenta los compuestos químicos típicos de aguas sin influencia hidrotermal.

Tabla 2.2: Principales compuestos químicos del agua sin actividad termal

Compuesto	Característica	Concentración en aguas subterráneas continentales	Origen Natural	Origen antropogénico
Ión cloruro (Cl <sup>-</sup> )	No se oxida ni reduce en aguas naturales	2 a 80 ppm	Agua lluvia. Meteorización de evaporitas: silvitas, halitas, carnalita. Intercambio iónico	Efluentes provenientes de zonas urbanas
Ión sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Muy solubles	1 a 1000 ppm	Meteorización de evaporitas: Anhidrita, yeso (rocas sulfatadas)	Fertilizantes, oxidación de sulfuros
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Forma soluciones tampón	0 a 350 ppm	Meteorización rocas bicarbonatadas: calizas, margas, calcitas, aragonitas, magnesitas, dolomitas, materia orgánica	Descargas de aguas empleadas en fabricación de cementos, cal y conglomerados
Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	Presente en concentraciones mucho menores que el ión bicarbonato. En aguas con pH > 8.3, puede haber cantidades importantes	Variado	Meteorización rocas bicarbonatadas	Descargas de aguas empleadas en fabricación de cementos, cal y conglomerados
Ión nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> )	Muy soluble	0.1 a 15 ppm	Meteorización de algunas rocas ígneas (salitre)	Proviene del arrastre de fertilizantes por la escorrentía superficial, oxidación de orina, deforestación.
Sílice o silicio (SiO <sub>2</sub> )	Presente como H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> y una pequeña parte está ionizada (H <sup>3-</sup> SiO <sub>4</sub> ) a pH normales	1 a 40 ppm	Meteorización de silicatos	Residuos industriales
Ión sodio (Na <sup>+</sup> )	Muy soluble	2 a 50 ppm	Meteorización de feldespatos, halitas, albitas, yeso, silicatos, zeolitas y arcillas (intercambio iónico)	Efluentes provenientes de zonas urbanas
Ión potasio (K <sup>+</sup> )	Muy soluble	0.1 a 10 ppm	Meteorización de evaporitas, feldespato potásico, silvita, mica	Fertilizantes
Ión calcio (Ca <sup>2+</sup> )	Soluble	2 a 200 ppm	Caliza, Dolomita, aluminosilicatos, plagioclasas cálcica, fluorita, fluoroapatita, yeso, feldespatos, piroxeno, anfíboles	Fertilizantes
Ión magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	Soluble	1 a 50 ppm	Dolomita, magnesita, olivino, mica, serpentina, piroxeno, anfíboles	Fertilizantes

Compuesto	Característica	Concentración en aguas subterráneas continentales	Origen Natural	Origen antropogénico
Ión ortofosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Poco soluble	0.01 y 1 ppm	Fosforita, fluoroapatita	Fertilizantes, detergentes
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	Indicador de contaminación	<1 ppm	Materia orgánica	Aguas residuales domésticas y especiales
Nitrógeno total (N <sub>TOTAL</sub> )	Indicador de contaminación	<1 ppm	Materia orgánica	Fertilizantes
CT y CF	Por proceder de desechos orgánicos, tiende a biodegradarse	Ausencia	Fuente animal	Aguas residuales domésticas

\* Fuentes: United Nations Environment Programme, International Labour Organisation, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety, environmental health criteria 204, Boron; Antonio Plata Bedma, 1999.

#### 2.3.4. Balance iónico

El balance iónico permite determinar si las mediciones de aniones y cationes mayoritarios se encuentran balanceadas, es decir que se han considerado la mayoría de los iones presentes. Para verificar lo anterior, se calcula el porcentaje de error (L.S. Rodríguez, et al, “Análisis químico y calidad de las aguas minerales”). Porcentaje de error (%E) :

$$E\% = 200 * \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

El error de un análisis químico depende de la conductividad eléctrica (CE) medida en el campo, de acuerdo al cuadro siguiente (Auge, 2006):

Tabla 2.3: Error admisible de acuerdo al CE

CE	50	200	500	2000	>2000
Error admisible (%)	30	10	8	4	4

Lo anterior permite validar los resultados de laboratorio en las muestras de agua analizadas.

### 2.3.5. Procesos de disolución y precipitación

Para describir las condiciones de saturación del agua, y por tanto las especies minerales presentes en el subsuelo donde circula el agua, se tienen las siguientes ecuaciones:

Constante de equilibrio:

$$K = [A]_{eq} * [C]_{eq} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde la  $[A]_{eq}$  es la concentración de aniones y  $[C]_{eq}$  la de cationes en el equilibrio, es decir a condiciones de temperatura y presión dadas, las especies iónicas se encuentran en estado saturado, es decir no precipitan ni se disuelven.

Producto de la Actividad del Ion (Ion Activity Product, IAP):

$$IAP = [A]*[C] \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

[A] Concentración de aniones una muestra de agua,

[C] Concentración de cationes en una muestra de agua.

Es decir, a condiciones de temperatura y presión determinadas en campo, las especies iónicas pueden precipitarse cuando su IAP es mayor a su K, o se disuelven si su IAP es menor a su K.

Otros indicadores usados son los siguientes:

Estado de Saturación ( $\Omega$ ):

$$\Omega = \frac{IAP}{K} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Índice de Saturación (SI):

$$SI = \log_{10} \left( \frac{IAP}{K} \right) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

La tabla siguiente resume la interpretación de los resultados:

*Tabla 2.4: Interpretación de los equilibrios de fases de acuerdo a la constante de equilibrio*

IAP, K	$\Omega$	SI	Resultado
IAP < K	<1	Negativo	El mineral se disuelve
IAP > K	>1	Positivo	El mineral precipita
IAP = K	1	0	Equilibrio iónico

El programa AQUACHEM y PHREEQC permiten realizar los anteriores cálculos, realizando la identificación de las posibles especies minerales que se disuelven o precipitan.

### **2.3.6. Procesos de meteorización**

Los índices de meteorización son controlados por el pH, la presión de CO<sub>2</sub> y la presencia de ácidos orgánicos, además de procesos de oxidación de amoníaco y pirita (drenaje ácido). Este último se mide por medio del cálculo de la energía libre de Gibbs, la ecuación de Nerst y la lectura de diagramas REDOX, potencial de electrones y pH.

### **2.3.7. Sistemas de flujos de agua subterránea**

Hay tres tipos generales de flujos de agua subterránea: local, intermedia y regional. La primera de ellas se refiere a aguas que se caracterizan por tener un tiempo de tránsito corto en una matriz rocosa; el segundo término se aplica a aquellos flujos que tiene un tiempo de tránsito largo (siglos, milenios, incluso millones de años, y que se denominan paleoaguas), con zonas de recarga usualmente alejados a los sitios de descarga.

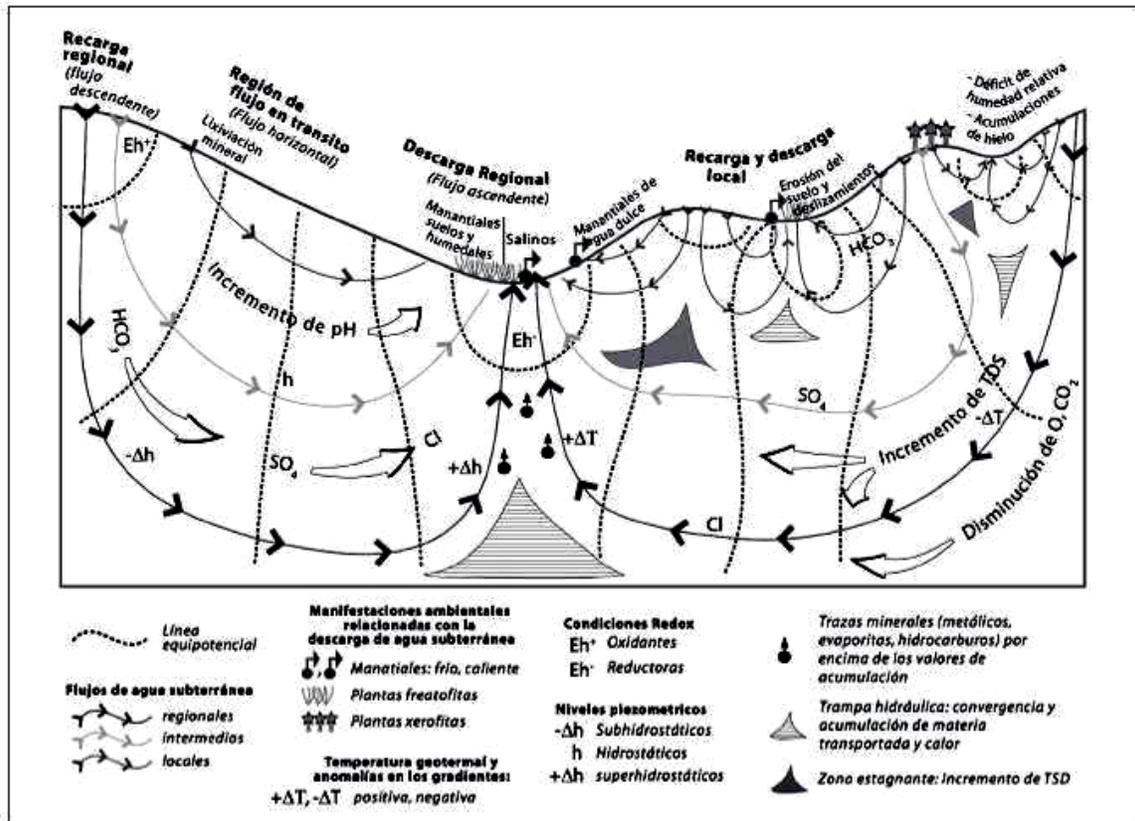


Figura 2.6: Sistemas de flujo subterránea: áreas de recarga, descarga e indicadores ambientales asociados (Toch, 2000)

Las aguas subterráneas con flujo regional presentan las siguientes características: Alta mineralización, actividad hidrotermal, composición isotópica diferentes a la del agua lluvia, indicando un tiempo de tránsito largo, baja presencia de dióxido de carbono y oxígeno disuelto.

Las aguas subterráneas con flujo local poseen una composición similar al agua lluvia: bajo pH, poca mineralización, alto contenido de dióxido de carbono y oxígeno disuelto.

Las aguas intermedias presentan características comunes a los flujos locales y regionales.

### **2.3.8. Representación gráfica**

La representación de la hidrogeoquímica se determina por medio de diagramas de Piper, Stiff y otros. Estas representaciones pueden usarse para realizar análisis gráficos del origen de los constituyentes disueltos en el agua (diferenciación del tipo de agua), las modificaciones del agua al paso por un área y problemas geoquímicos relacionados, efectos de dilución (trazado de líneas de corrientes, mezclado con aguas foráneas) y cambio en la composición de elementos trazas por la presencia de contaminantes.

## **2.4. CONCEPTOS DE CONTAMINACION DE CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL**

### **2.4.1. Contaminación de agua subterránea y superficial**

Las actividades humanas suelen traer consigo cambios en la calidad del agua superficial y subterránea, lo cual pone en riesgo la salud, la productividad y la conservación de los ecosistemas. A pesar que la contaminación en aguas subterráneas tienden a aparecer lentamente, esta es muy persistente, requiriendo procesos de descontaminación cada vez más especializados y costosos, ya que son más difíciles de revertir (R. Franco Plata, 2002).

En la Tabla 2.2 se presentan algunos contaminantes y sus fuentes comunes.

Al considerar los perfiles del suelo, dada su composición, éstos actúan sobre una gran cantidad de contaminantes, incluso se ha considerado como una forma efectiva de tratamiento del agua contaminada, en especial la de excrementos y efluentes domésticos (CEPIS, 1991).

El proceso de transporte de contaminantes desde la superficie a los acuífero, es función de la actividad humana que lo genera, la hidrodinámica del agua desde que llueve hasta que se infiltra a los acuíferos o al flujo subsuperficial (contaminación de agua subterránea), incluyendo la escorrentía superficial (contaminación de cuerpos de agua superficiales).

#### **2.4.2. Procesos de sorción**

En la zona saturada y no saturada existen minerales que pueden retener compuestos químicos, tales como iones, contaminantes, fertilizantes, plaguicidas, etc. Estos minerales son materia orgánica, arcillas, óxidos, hidróxidos, etc. Estas tienen una función muy importante en el transporte de plumas de contaminantes (Jordi Helsén, 2008).

Los procesos de sorción pueden ser: absorción, adsorción e intercambio iónico. Al hablar de tipos de agua obtenidas por un intercambio iónico, únicamente se habla del excedente de iones que resultan de un proceso de intercambio iónico, no de una clasificación del agua de acuerdo a un diagrama de Piper. Sin embargo, el diagrama de Piper puede emplearse para identificar procesos de mezclado y de reacciones químicas (Appelo, Postma, 2006).

#### **2.4.3. Procesos de precipitación**

Generalmente, los metales pesados tienden a inmovilizarse en el suelo por la formación de precipitaciones, sin embargo en acuíferos con pH ácido y bajo potencial redox, pueden movilizarse más fácilmente (Hirata et al). Sin embargo, contaminantes de tipo orgánico como hidrocarburos alifáticos pueden ser más móviles que otros contaminantes, en especial hidrocarburos aromáticos y alifáticos.

#### **2.4.4. Dilución**

Hay una mayor tendencia a presentarse procesos de dilución de contaminantes en pozos de extracción de agua, ya que inducen o interceptan flujos que pueden provenir de zonas limpias y zonas con contaminantes, en todas direcciones (Hirata et al).

#### **2.4.5. Procesos de oxidación / reducción**

Los procesos de oxidación y reducción ejercen un importante control sobre la distribución de especies tales como  $O_2$ , Fe,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $NO_3^-$ , etc., en el agua subterránea. Estos procesos juegan un importante papel en problemas de contaminación de acuíferos por

fertilizantes (nitratos), lixiviado de vertederos, drenaje de aguas ácidas de minas y movilidad de los metales pesados (C. Appelo, D. Postma, 1994).

El agua de lluvia en el momento de su infiltración es una solución fuertemente oxidante, saturada con el oxígeno atmosférico. La cantidad de materia orgánica y otras sustancias reductoras presente en las zonas de recarga y de tránsito, reduce esta cantidad de oxígeno aguas abajo, la cual está también influenciada por la velocidad del flujo, presencia de bacterias y sus nutrientes (F. Sánchez san Román, 2011).

### **Nitrificación / desnitrificación**

Las aguas residuales de tipo doméstico (aguas negras de humanos, ganado, avicultura, porcicultura, etc.) contienen nitrógeno principalmente en forma de nitrógeno orgánico (urea, aminoácidos, aminas, etc.). Los vertidos de fertilizantes y otros químicos aportan nitrógeno en forma de nitrógeno amoniacal (amoníaco,  $\text{NH}_3$ , e ión amonio,  $\text{NH}_4^+$ ). Las fuentes naturales de nitratos son muy raras y muy solubles en agua (C. Appelo, D. Postma, 1994).

Estas, presencia de bacterias del suelo, el nitrógeno orgánico se oxida en nitrito y nitrato (M. Cardona, 2003):

- $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$  (Oxidación en fosa séptica) (Ec. 2.9)
- $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$  (Oxidación en fosa séptica) (Ec. 2.10)
- $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  (bacterias *Nitrosomas* y *Nitrosococcus*) (Ec. 2.11)
- $\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  (bacterias *Nitrobacter*) (Ec. 2.12)

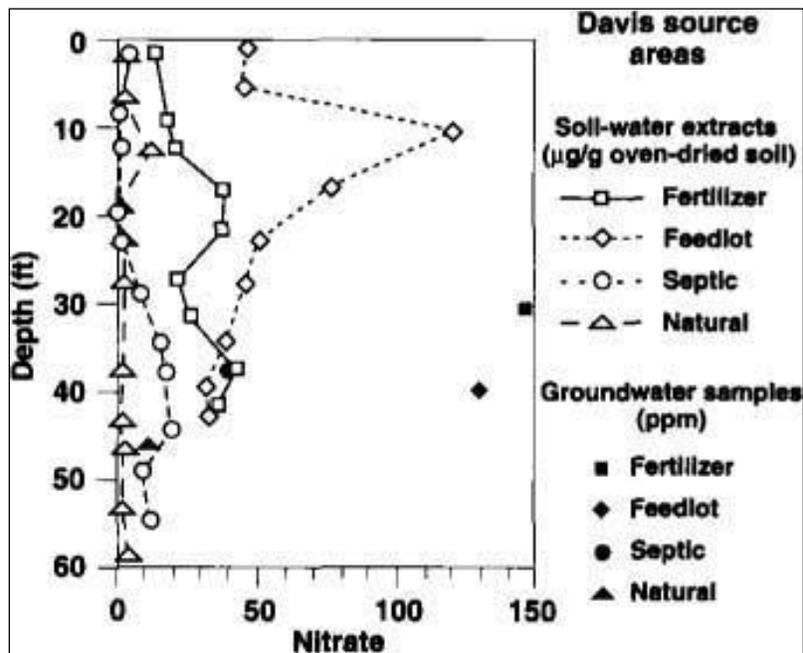
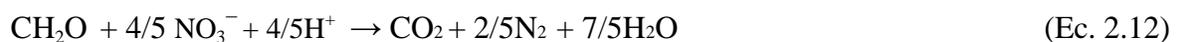


Figura 2. 7: Concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  con la profundidad, para diversas fuentes de contaminantes

Por lo anterior, la producción de nitratos a partir de nitrógeno orgánico y amonio varía con la profundidad y la naturaleza de la fuente contaminante. De acuerdo a su composición isotópica, se tiene la siguiente variación de concentraciones de nitrato respecto a la profundidad (D. Rolston, G. Fogg, David Decker, D. Louie, M. Grismer, 1996):

Las condiciones adecuadas para el proceso de nitrificación son (M. Cardona, 2003): Oxígeno, pH de 6.6 a 8.0, temperatura óptima entre 30 y 35° C, humedad y materia orgánica del suelo (M. Cardona, 2003).

El proceso de desnitrificación es el proceso por medio del cual el nitrógeno pasa del suelo a la atmósfera, por medio de reducción microbiológica de nitratos y/o nitritos:



Las bacterias responsables de la desnitrificación son anaerobias facultativas. Están involucrados tanto organismos autótrofos (*Micrococcus denitricans* y *Thiobacillus denitricans*) como heterótrofos (géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*). Estas bacterias utilizan para su metabolismo el oxígeno del aire

Las condiciones más adecuadas para que se de este proceso son: temperatura de 25°C o superior, pH entre 6 y 8, bajo drenaje del suelo y existencia de compuestos orgánicos.

La desnitrificación se puede producir en el caso de suelos bien drenados dentro de microporos anaerobios (poros llenos de agua) y también cuando se alcancen condiciones anaerobias originadas por una prolongada saturación del suelo durante el riego o la precipitación. Concentraciones bajas de oxígeno se obtienen cuando la tasa de consumo de oxígeno es mayor que la de su renovación, hecho muy frecuente cuando el tamaño de los poros del suelo es muy pequeño. Además se puede dar este proceso en la rizosfera de las plantas y en las zonas inmediatas a la descomposición de plantas y residuos de animales (Fuente: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ18.pdf>).

Las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación pueden ser de hasta un 90% del nitrógeno aportado en función del tipo de suelo y del sistema, dotación y frecuencia de riego. Se ha constatado que suelos con textura gruesa, con buen drenaje y bajo contenido en materia orgánica presentan una capacidad de desnitrificación muy baja mientras que los suelos franco-arenosos y francos tienen una tasa intermedia. Los suelos con textura fina (franco-limosos, franco-arcillosos y arcillosos) presentan alta capacidad de desnitrificación (Fuente: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ18.pdf>).

### **Reducción de sulfatos**

Inicialmente la materia orgánica utiliza, en su oxidación, el oxígeno disuelto en el agua y, posteriormente, cuando el oxígeno se agota, toma el oxígeno de otros agentes oxidantes. La oxidación total de los componentes orgánicos da como resultado la formación de CO<sub>2</sub>, según la siguiente reacción que esquematiza el proceso de reducción de sulfato:



Se diferencian dos mecanismos de reducción de sulfatos, en los que interviene la materia orgánica: Reacciones bacterianas (requieren la presencia de determinadas bacterias) y reacciones termoquímicas o abióticas (requieren alta temperatura).

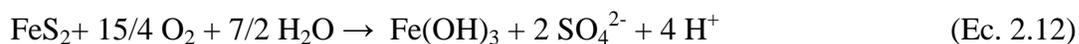
La reducción de sulfatos vía bacteriana es el principal mecanismo que produce sulfuros, en condiciones sedimentarias. La reducción bacteriana se realiza a través de ciertas bacterias sulfatoreductoras que actúan como catalizadores químicos, usando la materia orgánica como sustrato.

Las bacterias no oxidan o reducen, solamente la transferencia de electrones. La reducción de sulfatos está ligada a la intervención de bacterias del género *Sporovibrio*, siendo las más importantes la *Sporovibrio desulfuricans* y *Sporovibrio rubentskiki*.

La reducción de sulfatos no bacteriana o termoquímica se da en presencia de agentes reductores, como resultado de la alteración de compuestos orgánicos. La restrictiva distribución de ambientes ricos en  $\text{H}_2\text{S}$  parece sugerir que la reducción termoquímica tiene lugar en profundidad, a alta temperatura (Fuente: <http://www.agua.uji.es>).

### **Oxidación de la pirita**

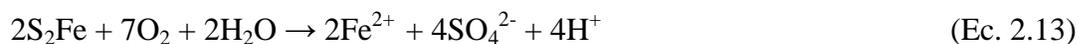
Este proceso se da principalmente en drenaje ácido de minas. La reacción general es (C. Appelo et al, 1994):



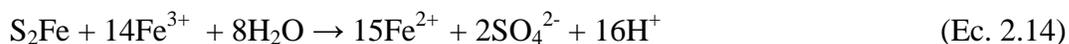
Se distinguen dos modos de oxidación inorgánica de la pirita, en función del agente oxidante implicado:

- a) Oxidación: Es una reacción limitada por la disponibilidad de oxígeno que suele ser baja debido a la dificultad de difusión de este elemento, y su cinética depende de la

velocidad de reducción del oxígeno molecular (M. Urrutia, J. Graña, R. García-Rodeja, F Mcaías, 1987)



b) Reducción de hierro (III) a hierro (II):



#### 2.4.6. Normas de calidad de agua

Los estándares de calidad de agua para consumo humano a considerar en el estudio son:

*Tabla 2.5: Límites máximos para agua*

Parámetros	Unidades	Límites para agua Potable
pH	unidades	6.0 a 8.5 <sup>(1)</sup>
Temperatura	°C	18° - 30° <sup>(2)</sup>
Conductividad Eléctrica (CE)	μS/cm	<500 <sup>(1)</sup>
Sólidos disueltos totales (SDT)	g/L	<1 <sup>(1)</sup>
Fosfato	mg/l	<0.2 <sup>(3)</sup>
Sulfatos	mg/l	<400 <sup>(1)</sup>
Nitratos	mg/l	<45 <sup>(1)</sup>
Cloruros	mg/l	<250 <sup>(1)</sup>
Bicarbonatos	mg/l	No establecido
Sodio	mg/l	<200 <sup>(1)</sup>
Magnesio	mg/l	<50 <sup>(2)</sup>
Calcio	mg/l	<75 <sup>(2)</sup>
Hierro	mg/l	<0.30 <sup>(1)</sup>
Potasio	mg/l	<10 <sup>(2)</sup>
Dureza Total	mg/l	<500 <sup>(1)</sup>
Silicio	mg/l	<60 <sup>(1)</sup>
Coliformes fecales	NMP/100mL	<1.1 <sup>(1)</sup>
Coliformes totales	NMP/100mL	<1.1 <sup>(1)</sup>
DBO5	mg/l	No establecido
Nitrógeno total	mg/l	<1.0 <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.07.01:08

<sup>(2)</sup> NSO13.07.01:04

<sup>(3)</sup> Norma Argentina para agua potable

<sup>(4)</sup> NSO13.07.01:99

### **III. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS**

Considerando que el estudio es explicativo, con una hipótesis que diferencia grupos atribuyendo una causalidad, se requiere de un diseño de Investigación No Experimental, es decir que no se realizó la manipulación deliberada de variables, ya que sólo fueron observados y registrados los efectos de éstas (resultados de laboratorio) en el ambiente natural para posterior análisis. Dicho análisis considera la documentación existente sobre la geología, hidráulica, hidrogeología, hidrogeoquímica y calidad de agua.

Las variables independientes que se consideraron fueron: Formaciones geológicas, composición fisicoquímica y microbiológica del agua. Las variables dependientes fueron: Índices de Saturación, índices de Calidad del agua y especies minerales

Considerando los dos tipos de diseños no experimentales, la recolección de datos en el tiempo (transeccional y longitudinal), así como la naturaleza de esta investigación, el método seleccionado para este estudio fue la Investigación Longitudinal o Evolutiva.

Para alcanzar cada uno de los objetivos específicos, se identificaron actividades, recursos, tiempo a invertir y productos obtenidos.

#### **3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO**

##### **3.1.1. Diseño de la investigación para el proyecto**

Se identifican los siguientes grupos de estudio:

- Formaciones geológicas: Estudio de mapas geológicos existentes.
- Comportamiento hidráulico: Recolección de información de referencia sobre balance hídrico y caudales en el río Metayate.

- Parámetros hidrogeológicos: Recolección de información sobre las unidades acuíferas.
- Parámetros de abastecimiento de agua: Este se centró en la calidad del agua para consumo humano.

Los resultados de esta investigación como sus limitantes, se presentaron en los apartados 1.9 (Limitaciones de la investigación) y 1.10 (Antecedentes).

Posteriormente, se realizaron inspecciones de campo para verificar, la información recolectada y el marco conceptual propuesto por ANDA en 2007, en época seca y en época lluviosa. Las fotografías de las inspecciones se presentan en el Anexo 4.

### **3.1.2. Diseño del muestreo de aguas subterráneas y superficiales**

Las unidades de muestreo para esta investigación fueron: 8 manantiales, 10 pozos y 5 tramos de ríos en la subcuenca del río Metayate.

Se realizaron campañas en época seca y lluviosa.

Durante la ejecución del proyecto, y a medida se tenía resultados de laboratorio, fue necesario realizar monitoreos adicionales de confirmación del modelo conceptual.

Por otra parte, la subcuenca se subdividió en tres partes de estudio:

- **Parte alta**, comprendiendo las poblaciones (cantones y caseríos) de El Rosario, Los Achiotos, Huertas Viejas y El Conacaste, con los caseríos El Encumbrado, Agua Fría, Casas de Teja, Los Apantes, La Montañita, Los Potrerillos, El Encumbrado. El área se encuentre entre las coordenadas 14°12'00"LN y 14°15'00" LN; entre 400 y 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm).
- **Parte media**, ubicada entre las coordenadas 14°12'00"LN y 14°09'30"LN, por lo que se ubica entre el caserío. En ella se encuentran las poblaciones de Agua Caliente,

Casitas, El Portezuelo, La Aradona, Palo Verde, Santa Rosa y San Antonio, entre otras de menor población; entre 300 y 400 msnm.

- **Parte baja**, ubicado entre 14°04'30"LN y 14°15'00"LN, es decir entre el embalse Cerrón Grande y río Lempa, y la unión del río Talquezalapa con el río Metayate. En esta área se encuentran las poblaciones de Agua Zarca, El Obrajuelo, Chansunte, Los Marín, Poza Redonda, Las Cañas y Colima; entre 250 y 300 msnm.

Para la selección de los sitios de muestreo se consideraron los siguientes criterios:

- **Ubicación:** Se seleccionaron sitios de monitoreo que estuvieran las partes alta, media y baja de la subcuenca.
- **Accesibilidad:** Los sitios muestreados fueron accesibles por vehículo y a pie, con el objeto de no recorrer distancias largas con el equipo de medición en campo y las muestras recolectadas.
- **Poca contaminación antropogénica:** Manantiales y pozos en uso, que no presentaran materia orgánica ni descarga directa de aguas residuales.
- **Caudal:** Se seleccionaron sitios que permitían un flujo constante de agua en la época seca (manantiales y ríos). Los manantiales de la parte alta y media fueron muestreados en la época seca y lluviosa, no así los manantiales de la parte baja, los cuales no aportaron agua en la época seca. Este factor asegura que se tendría la mayoría de sitios de interés estudiados en la época seca y en la época lluviosa.

Tomando en cuenta los criterios anteriores, durante el estudio se monitorearon los sitios indicados en la tabla 3.1, los cuales fueron georeferenciados con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS):

Tabla 3.1: Sitios de monitoreo y datos de ubicación

Código	Latitud	Longitud	Altitud	Nombre del sitio	Tipo de agua
CAN01SM	14° 13'49.52"N	89° 15'19.43"O	638	Río Agua fría	Río
CAN02SM	14° 9'53.32"N	89° 13'36.32"O	313	Río Metayate, Caserío Santa Rosa	Río
CAN03SM	14° 5'11.02"N	89° 11'12.58"O	250	Río Metayate, 200 m del embalse	Río
CAN04ST	14° 9'42.62"N	89° 12'55.95"O	307	Río Talquezalapa	Río
CAN05SM	14° 11'56.24"N	89° 13'11.60"O	387	Río Sapo	Río
FAN01SM	14° 13'55.80"N	89° 15'24.76"O	715	Agua Fría	Manantial
FAN02SM	14° 14'43.87"N	89° 12'51.93"O	917	Casas de Teja	Manantial
FAN03SM	14° 11'32.59"N	89° 13'40.50"O	365	Agua caliente	Manantial
FAN04SM	14° 9'53.70"N	89° 13'33.16"O	315	Santa Rosa	Manantial
FAN05SM	14° 14'5.94"N	89° 11'39.06"O	1034	Los Apantes	Manantial
FAN06SM	14° 14'10.80"N	89° 11'42.24"O	735	El Trompillo	Manantial
FAN07SM	14.22685° N	89.21684° O	723	Ojos de agua	Manantial
FAN08SM	14° 8'7.11"N	89° 12'34.81"O	290	El Obrajuelo	Manantial
POE01SM	14° 11'01"N	89° 13'41"O	346	Los Tejada	Pozo excavado
POE02SM	14° 09'23"N	89° 13'35"O	325	Los Cartagena	Pozo excavado
POE03SM	14° 11'25.24"N	89° 14'16.22"O	360	Los Interiano	Pozo excavado
POP04SM	14° 9'47.88"N	89° 13'41.16"O	324	Los Aguilar	Pozo Perforado
POE05SM	14° 6'39.46"N	89° 12'5.01"O	335	Los López	Pozo excavado
POE06SM	14° 12'8.93"N	89° 12'21.71"O	429	Los Hernández	Pozo excavado
POE07SM	14° 9'44.82"N	89° 13'40.97"O	328	San Antonio	Pozo excavado
POE08SM	14° 8'9.09"N	89° 12'24.50"O	325	Los Mancía	Pozo excavado
POE09SM	14° 6'18.53"N	89° 11'55.15"O	271	El Obrajuelo	Pozo excavado
POE10SM	14° 5'59.03"N	89° 11'46.43"O	275	Carretera Chalatenango – Nueva Concepción	Pozo excavado

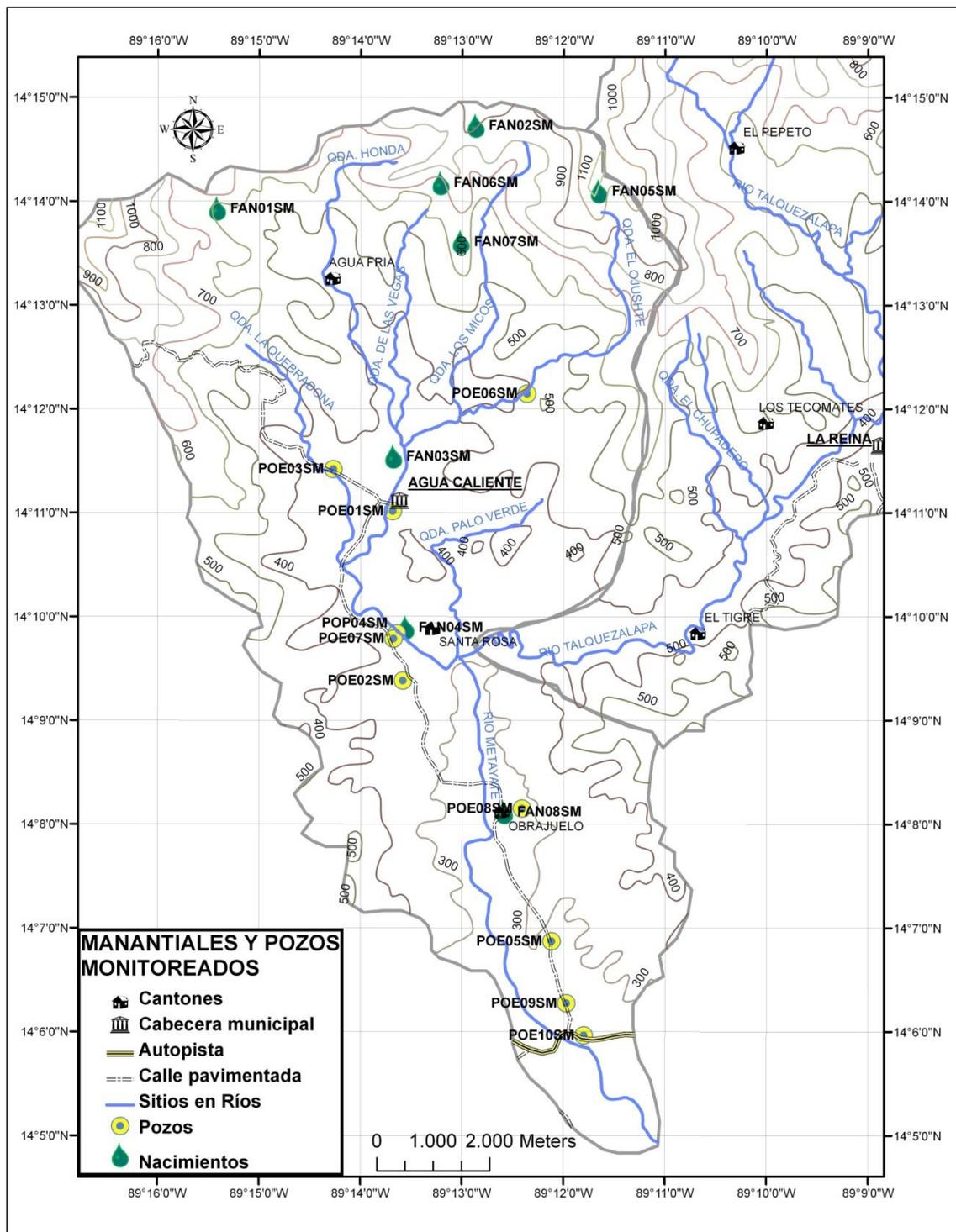


Figura 3.1: Ubicación espacial de los sitios de monitoreo en pozos y manantiales

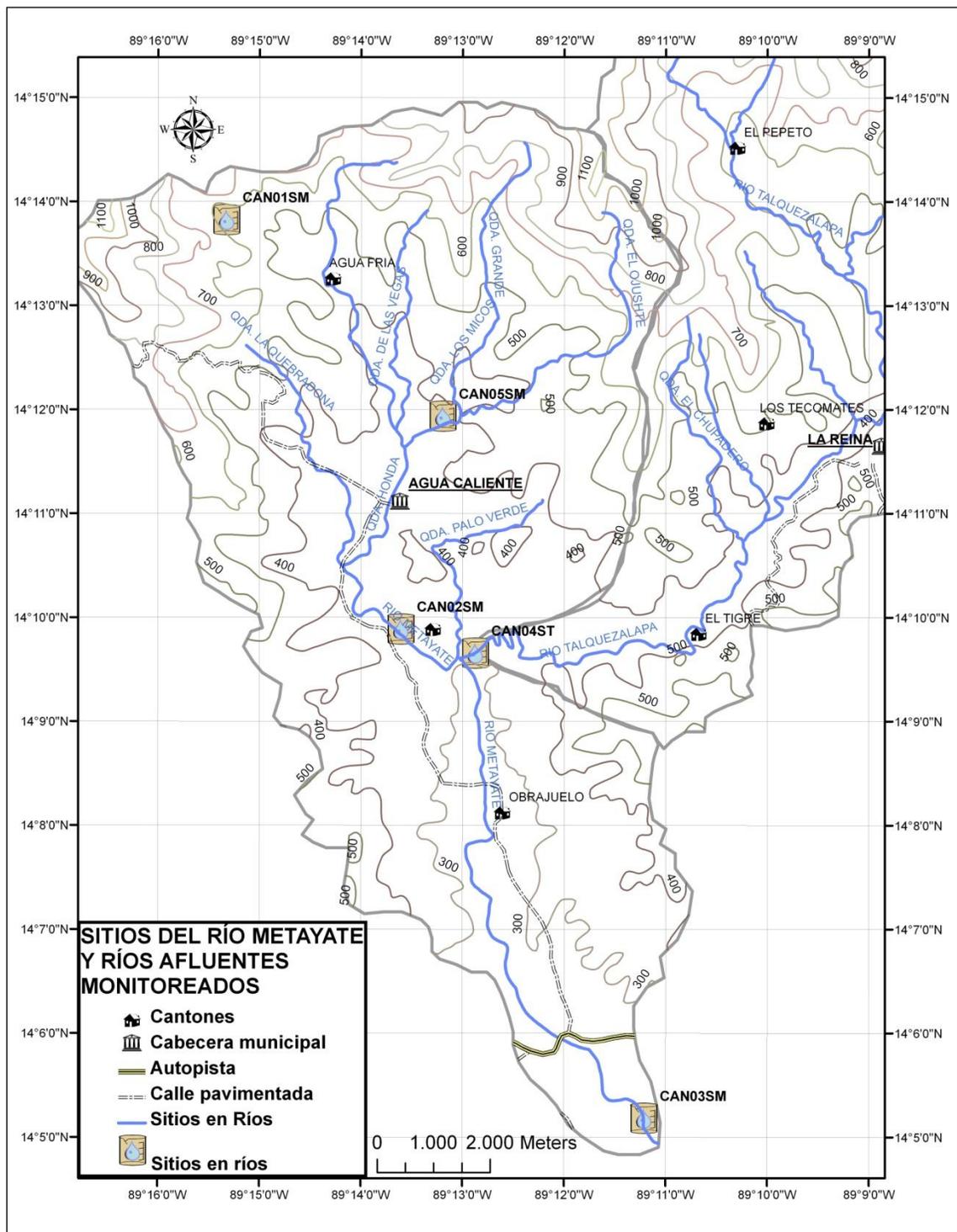


Figura 3.2: Ubicación espacial de los sitios de monitoreo en cuerpos de aguas superficial

### 3.1.3. Parámetros a analizar

Para la caracterización hidrogeoquímica y de calidad del agua, se realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

Tabla 3.2: Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados

Parámetro	Símbolo/ abreviación	Cuerpo de agua estudiado		
		Manantiales	Pozos	Ríos
<b>Parámetros físicos</b>				
Conductividad eléctrica*	CE	Sí	Sí	Sí
Temperatura*	T	Sí	Sí	Sí
Potencial de hidrógeno*	pH	Sí	Sí	Sí
Oxígeno disuelto*	OD	Sí	Sí	Sí
<b>Parámetros químicos</b>				
Sodio	Na	Sí	Sí	Sí
Potasio	K	Sí	Sí	Sí
Calcio	Ca	Sí	Sí	Sí
Magnesio	Mg	Sí	Sí	Sí
Hierro	Fe	Sí	Sí	Sí
Silicio	Si	Sí	Sí	Sí
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	Sí	Sí	Sí
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sí	Sí	Sí
Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Sí	Sí	Sí
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Sí	Sí	Sí
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Sí	Sí	Sí
Nitrógeno total (Kiendhal)	Ntotal	Sí	Sí	Sí
Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días	DBO <sub>5</sub>	No	No	Sí
<b>Parámetros microbiológicos</b>				
Coliformes fecales	CF	Sí	Sí	Sí
Coliformes totales	CT	Sí	Sí	Sí

\*Medido con equipo de campo

### 3.1.4. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos

El monitoreo de parámetros fisicoquímicos se realizó por medio del uso de las sondas multiparámetros Troll9500 y YSI 556 MPS. Con dichos equipos, se midieron in situ los siguientes parámetros: Temperatura, Conductividad Eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), sólidos disueltos totales (STD) y Oxígeno disuelto (OD).

	
<p>Sonda multiparámetros TROLL9500 y data logger</p>	<p>Sonda multiparámetros YSI 556 MPS y data logger</p>
	
<p>Medidor portátil de pH y temperatura WTW, Modelo 315</p>	<p>Medidor portátil de conductividad eléctrica y temperatura WTW, Modelo 315</p>

*Figura 3.3: Imágenes de equipo de monitoreo empleado*

Las especificaciones de los sensores empleados para las lecturas de los parámetros fisicoquímicos para cada equipo se presentan en el Anexo 3.

### 3.1.5. Recolección y manipulación de muestras de agua

Se contrataron los servicios del Laboratorio de Servicios Analíticos de la Fundación para Investigaciones del Café, PROCAFE, de 2009 a 2010.

El método de laboratorio empleado para realizar los análisis se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 3.3. Límites mínimos de detección de los equipos y métodos de laboratorio empleado

Parámetro	Límite Mínimo Detectable (LMD)	Método de laboratorio empleado
Calcio (Ca)	0.10 mg/l	Absorción atómica
Magnesio (Mg)	0.01 mg/l	Absorción atómica
Sodio (Na)	0.10 mg/l	Absorción atómica
Potasio (K)	0.10 mg/l	Absorción atómica
Hierro (Fe)	0.0001 mg/l	Absorción atómica
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	0.10 mg/l	Método Colorimétrico
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	0.10 mg/l	Colorimétrico vanádico molíbdico
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.10 mg/l	Método de la Brucina
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	0.01 mg/l	Titulación con nitrato de plata
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.10 mg/l	Volumetría con Fenolftaleína
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	1.00 mg/l	Método turbidimétrico
Nitrógeno Total (Nt)	0.10 mg/l	Destilación
Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO <sub>5</sub> )	0.10 mg/l	Modificación Alsterberg
Coliformes totales (CT)	1 NMP/100 mL mínimo 1,100,000 NMP/100 mL máximo <sup>1</sup>	Tubos de fermentación múltiple
Coliformes fecales (CF)	1 NMP/100 mL mínimo 1,100,000 NMP/100 mL máximo	Tubos de fermentación múltiple

Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos de PROCAFE

Las muestras de aguas para realizar análisis químicos y microbiológicos fueron recolectadas en frascos plásticos de polipropileno (PP), proveídos por el laboratorio que realizó los análisis. Se emplearon: tres Frascos de 1 l cada uno para muestras de aniones, cationes y DBO<sub>5</sub>, y un cuarto frasco de 1 l, estéril, para los análisis microbiológicos.

El procedimiento de muestreo seguido se detalla a continuación.

<sup>1</sup> NMP: Número más probable.

**PASO 1. Verificación de los frascos de recolección de muestras de agua:** Se verificó que no presentasen fisuras, suciedad, rotulación ajena. Se emplearon los siguientes frascos:

- Un frasco de 1 l para cationes;
- Un segundo frasco de 1 l para aniones;
- Un tercer frasco esterilizado de 1 l para análisis microbiológico; y,
- Un cuarto frasco de 1 l para análisis de DBO5 (sólo para agua de ríos).



**PASO 2. Ubicación de los sitios de muestreo:** Se registraron las coordenadas geodésicas, en las unidades siguientes: grados-minutos-segundos.



**PASO 3. Rotulación de los frascos:** Los frascos fueron rotulados con marcador indeleble para ser identificados, registrados y remitidos al laboratorio junto a la hoja de remisión de muestras proporcionada por el laboratorio.



**PASO 4. Recolección de muestras para análisis:**

Para la toma de muestra para análisis de aniones, cationes y DBO<sub>5</sub>, cada frasco fue enjuagado 3 veces con agua del sitio a muestrear. Luego, se recolectó la muestra.



Para análisis microbiológicos, fueron empleados guantes de látex desechables. Los frascos para la toma de muestras no fueron enjuagados previamente.



Para la toma de muestras en pozos, debido a que todos los pozos monitoreados estaban en uso, se emplearon bombas manuales o cubetas propiedad del dueño del pozo, para extraer la muestra.



En el caso de toma de muestras en manantiales, el muestreo fue directo en la fuente.



El muestreo en ríos se realizó en la sección del río con mayor profundidad, en la cual hubiera circulación de agua.



**PASO 5. Preservación de las muestras:** Las muestras para análisis de cationes fueron conservadas con ácido nítrico concentrado, y luego refrigeradas; las muestras para aniones solamente fueron refrigeradas. El filtrado fue realizado por el laboratorio.



Para la recolección de muestras, se emplearon hieleras para el traslado de muestras, en la cual la temperatura se mantuvo entre 4° y 10° C.

### **3.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

El procesamiento de la información presenta dos componentes: Validación de los resultados de laboratorio, y procesamiento de los resultados. Estos son descritos en los apartados 3.2.1 y 3.2.2.

#### **3.2.1. Validación de resultados de laboratorio**

Una metodología para evaluar la validez de los resultados de laboratorio y las mediciones en campo, consiste en evaluar las desviaciones en forma gráfica de los valores de CE contra la suma de aniones y cationes mayoritarios, expresados en mg/l. Esta gráfica permite establecer una correlación lineal entre dichos parámetros, y recomienda realizar un segundo análisis para aquellos resultados que presenten una desviación mayor al 15% de los valores teóricos (J. D. Taupin, 2009).

Este segundo análisis consiste en analizar los valores correspondientes a los porcentaje de error y la conductividad eléctrica, de acuerdo al numeral 2.1.4 (“Balance Iónico”) y a la presencia de otros iones que podrían estar en concentraciones significativas, como podría ser por contaminación antropogénica, o en último caso por fallos en el equipo de medición

o en la cuantificación hecha por el laboratorio que realiza los análisis químicos (J. D. Taupin, 2009).

### **3.2.2. Procesamiento de los resultados**

Una vez validados los datos recolectados, éstos fueron procesados para su modelaje. A continuación se presenta el tipo de modelaje realizado, y el recurso informático utilizado.

**AquaChem 4.0:** Permitió el análisis, cálculos, modelado y diseño gráfico base de datos de parámetros físicos y químicos, para determinar el tipo de agua, la suma de aniones, la suma de cationes, el equilibrio iónico, el TDS, la dureza, la alcalinidad, los niveles de iones comunes, el nivel de absorción de sodio, el peligro del magnesio. También, se empleó para la generación de diagramas de Piper y Stiff.

**ArcGIS 9.2:** Sistema integrado de creación, administración, integración y análisis de datos geográficos. Con él se elaboraron los mapas geológicos, de uso del suelo, etc., para la interpretación hidrogeoquímica:

**ICA-Test V1.0:** Esta herramienta computacional facilitó el cálculo de índices de calidad del agua e índices contaminación, considerando normas de calidad establecidos por instituciones de diversos países y/o autor. De igual manera ICATEST V1.0 permitió generar y guardar, tanto reportes como historiales, para realizar posteriores estudios comparativos de calidad del agua.

**PHREEQC 2.8:** Empleado para la simulación de las especies minerales, y los procesos de disolución y precipitación por medio del cálculo de los índices de saturación. Fue diseñado para realizar una amplia variedad de cálculos geoquímicos de baja temperatura. Éste se

basa en un modelo de asociación de iones acuosos, que permite calcular los índices de saturación, lotes de reacción y cálculos de transporte de especies, modelado inverso.

No obstante, los modelos de balance presentan tres particularidades que hay que tener presentes a la hora de interpretar los resultados (D. E. Martínez, E. M. Bocanegra y M. Manzano):

- 1) Dado que en el medio real muchas veces un mismo resultado puede ser consecuencia de distintos conjuntos de reacciones, en general la modelación inversa no sirve para conocer cuál de entre los propuestos es el más probable;
- 2) Suponen que el agua se halla en equilibrio con el medio, aunque en la realidad todas las muestras tomadas sobre una misma línea de flujo suelen corresponder a un mismo momento en el tiempo, por lo que las diferencias de composición pueden corresponder en parte a variaciones temporales en la recarga y no a reacciones con minerales.
- 3) Proporcionan en valor de las reacciones netas que tienen lugar entre dos puntos del acuífero, es decir, suponen que dichas reacciones son homogéneas entre ambos. Por ejemplo, no consideran la posibilidad de que una reacción invierta su sentido a lo largo del flujo, hecho frecuente en la realidad.

## IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan en función del cumplimiento de los objetivos planteados para esta investigación: De los apartados del 4.1 al 4.2 se presentan los resultados obtenidos y la validación de los mismos; el apartado 4.3 presenta los análisis respectivos para caracterizar la hidrogeoquímica del agua subterránea y su evolución hidrodinámica; el apartado 4.4 caracteriza la calidad del agua subterránea para consumo humano; la caracterización hidrogeoquímica y de calidad del agua superficial para vida acuática, así como su evolución, se presenta en el apartado 4.5.

### 4.1.RESULTADOS OBTENIDOS

Fueron recolectadas 43 muestras de agua entre abril 2009 y agosto 2010. Las fechas de los muestreos en época seca se realizaron en abril de 2009 y 2010, y los de época lluviosa en septiembre y noviembre de 2009, y en agosto de 2010. Esto se debió a disponibilidad de fondos y equipo, así como recomendaciones de asesores y maestros del programa de la maestría tras la interpretación de los análisis de época seca y lluviosa de 2009.

*Tabla 4.1: Composición química del agua en época seca*

Sitio de monitoreo	CE	pH	T	Ca	Mg	K	Na	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe	SDT*	Dureza**
	μS/cm	Unid.	°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l	mg/l
CAN01SM	204	6.96	27	9.4	1.7	1.8	12.4	3.4	64.8	6.5	22.05	0.01	0,1428	30,44
CAN02SM	645	7.89	29.9	8.8	4.4	5.6	99	20.57	88.5	150.41	24.32	0.1	0,4515	40,05
CAN03SM	569	8.09	32.4	12.4	5	7.9	83.7	19.8	120	94.9	28.56	0.3	0,3983	51,50
CAN04ST	235	8.09	22.31	22.8	3.4	11.2	26.5	3.7	139	14.9	25.98	0.19	0,1645	70,85
CAN05SM	85	6.35	27.63	7.8	3.4	5.8	10.7	0.4	79.8	3.2	35.98	0.22	0,0595	33,44
FAN01SM	98.8	5.72	24.76	7.1	1.4	1.4	12.6	4	54	6.7	24.45	0.2	0,0692	23,47
FAN02SM	133.2	6.56	25	13.9	6.9	1.4	6.5	4.1	92.5	3.1	39.12	<0.01	0,0932	63,06
FAN03SM	1261	8.05	51.53	8.2	<0.01	1.6	117	16.31	93	174.8	24.18	0.01	0,8827	20,49
FAN04SM	206	6.33	31.9	13.5	3.3	8.4	18.8	9.1	98.3	12.2	50.96	0.01	0,1442	47,25
FAN05SM	317	7.2	25.6	40	5	0.6	22.8	3.55	214.5	23.88	23.88	<0.01	0,2219	120,33

Sitio de monitoreo	CE	pH	T	Ca	Mg	K	Na	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe	SDT*	Dureza**
	μS/cm	Unid.	°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l	mg/l
FAN06SM	150.1	6.44	25.4	16.7	5.6	3.8	8.3	4.4	99.9	6.1	43.68	0.23	0,1051	64,69
FAN07SM	80	5.9	24.31	7.5	2.5	6.3	8.8	0.7	61	7.9	36.22	0.52	0,0560	28,99
FAN08SM	1175	7.7	90	7.1	0.6	4.5	154	1.5	75	261.15	37.44	0.05	0,8225	20,17
POE01SM	725	6.38	31	70.2	9.8	9.9	49.3	74.9	211	29.9	21.3	0.01	0,5075	215,39
POE02SM	426	6.6	28.4	28	3.6	7.9	62	9.93	225	14.23	35.75	0.1	0,2982	84,64
POE03SM	512.9	7.47	28.66	31	1.7	5	69	7.1	261	19.51	14.22	<0.01	0,3590	84,30
POP04SM	1059	8.54	36.1	5.8	0.1	3.2	122.5	16.2	83.1	208.1	22.38	<0.01	0,7413	14,88
POE05SM	417	7.12	30.6	45	8	1	36.6	12.06	255	6.1	38.4	<0.01	0,2919	145,14
POE06SM	1250	7.5	29	122	27	16	61	177.3	252	81.3	20.16	<0.01	0,8750	415,35
POE07SM	851	6.95	31.97	7.9	0.1	2.5	143	2.3	96	241.05	24.27	0.68	0,5957	20,11
POE08SM	296	6.8	32.4	18.1	1.7	2	34.1	1.7	137	6.9	43.41	0.04	0,2072	52,13
POE09SM	549	6.5	30.52	49	12	3.1	41.3	2	296	3.57	46.83	0.11	0,3843	171,58
POE10SM	278	6.45	31.97	19.3	4.1	3.8	15.2	1.2	84.7	38.1	42.4	0.05	0,1946	65,00

\* Calculado con Ec. 2.2

\*\* Calculado con Ec.2.3, expresado como CaCO<sub>3</sub>

Tabla 4.2: Composición química del agua en época lluviosa

Sitio de monitoreo	CE	pH	T	Ca	Mg	K	Na	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe	SDT**	Dureza***
	μS/cm	Unid.	°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l	mg/l
CAN01SM	137.32	7.71	24.76	8.3	2.6	2.6	13.9	3.1	70.2	7.9	21.71	0.04	0,0961	31,40
CAN02SM	320	8.11	28.86	8.9	2.5	3.5	16.8	6.1	68.6	14.1	18.49	0.51	0,2240	32,48
CAN03SM	114	7.76	30.41	4.6	2.3	4.1	14.9	4.5	57.5	8.5	18.82	0.48	0,0798	20,94
CAN04ST	350	7.68	27.87	8.1	2.1	3.9	10.7	4.7	57.2	7.8	23.24	0.47	0,2450	28,84
CAN05SM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
FAN01SM	134.9	5.95	26.25	7.8	2.4	1.8	14.3	4.2	69	5.1	21.4	NM	0,0944	29,33
FAN02SM	132.4	6.33	23.8	11.4	6.9	1.9	7.9	4.6	92	<0.1	30.16	0.26	0,0927	56,82
FAN03SM	1374.3	8.66	55.48	3.6	0.6	3	122	15.7	101	149.3	23.14	<0.1	0,9620	11,45
FAN04SM	224	6.03	31.4	10.7	4.7	8.9	21.1	8.1	101	10.2	40.89	0.16	0,1568	46,02
FAN05SM	219	6.99	27.8	20.6	6.8	1.9	16.3	16.3	105	10.08	30.16	<0.1	0,1533	79,36
FAN06SM	111.6	6.26	23	11.5	6	4.9	10.9	3	100	2.7	31.11	<0.1	0,0781	53,37
FAN07SM	110	6.53	23.7	4.1	1.9	4.5	9.9	2.6	45	8.2	30.16	0.36	0,0770	18,04
FAN08SM	780	8.5	80	11.9	<0.01	3.5	154.2	20.6	92.4	229.8	25.85	<0.05	0,5460	29,72
POE01SM	575	6.41	28.3	46.5	10.5	16.3	47.9	50.8	186	50.7	19.74	1	0,4025	159,17
POE02SM	266	6.56	27.61	25.9	3.7	4.5	13.8	7.6	121.1	14.1	103.79	0.12	0,1862	79,81
POE03SM	195.5	6.31	27.7	15.9	1.3	6.3	21.9	5.5	109	10.3	14.68	0.25	0,1369	45,00
POP04SM	792	8.36	39.4	5.9	0.2	2.6	167	13.9	65	315	16.18	0.42	0,5544	15,54
POE05SM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
POE06SM	1122	7.52	27.93	89	26	31	73	156.0	232.5	74.07	42.23	0.11	0,7854	328,94
POE07SM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
POE08SM	356	6.25	28	34	2	2.2	48	34	168	36.67	22.24	0.13	0,2492	93,02

Sitio de monitoreo	CE	pH	T	Ca	Mg	K	Na	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe	SDT**	Dureza***
	μS/cm	Unid.	°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l	mg/l
POE09SM	663	6.95	29.1	57	11	5.1	67	48.93	290	20.74	29.29	<0.05	0,4641	187,41
POE10SM	257	6.49	29.5	29	5	2.8	11	9.93	81	33.51	25.56	<0.05	0,1799	92,90

\* NM: No medido

\*\* Calculado con Ec. 2.2

\*\*\* Calculado con Ec.2.3, expresado como CaCO<sub>3</sub>

Tabla 4.3: Presencia de contaminantes en época seca

Sitio de monitoreo	DBO5	Nitrógeno total	Nitratos	Fosfatos	Oxígeno disuelto	Coliformes totales	Coliformes fecales
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	MP/100 mL	NMP/100 mL
CAN01SM	0.25	0.5	0.8	0.7	6.6	7900	7900
CAN02SM	0.5	0.7	0.93	1.5	5.34	13000	130000
CAN03SM	0.2	0.77	1.95	2.89	6	22	11
CAN04ST	0.6	NM	1.95	1.4	7.33	16000	900
CAN05SM	0.1	NM	1.22	0.98	7	5000	1300
FAN01SM	NM	0.63	0.84	1	2.72	49	49
FAN02SM	NM	0.56	0.27	<0.1	NM	2400	2400
FAN03SM	NM	0.49	1.11	0.6	3.28	1	1
FAN04SM	NM	0.49	10.01	1.3	4.8	9400	9400
FAN05SM	NM	0.1	1.06	<0.1	NM	49	49
FAN06SM	NM	0.1	0.4	<0.1	NM	5400	2200
FAN07SM	NM	NM	1.4	1.33	2.61	30000	30000
FAN08SM	NM	NM	0.1	0.2	1.88	<1.1	<1.1
POE01SM	NM	1.8	44.88	0.9	7.52	5400	5400
POE02SM	NM	0.84	5.58	1	2.72	240	240
POE03SM	NM	0.66	0.66	<0.1	3.45	23	5
POP04SM	NM	0.7	0.58	<0.1	NM	1	1
POE05SM	NM	0.01	8.15	<0.1	NM	790	330
POE06SM	NM	0.63	0.44	<0.1	NM	490	140
POE07SM	NM	NM	0.37	0.14	NM	1300	280
POE08SM	NM	NM	2.74	0.6	NM	240	80
POE09SM	NM	NM	0.37	0.14	NM	90000	11000
POE10SM	NM	NM	6.28	0.42	NM	13	4

\* NM: No medido

Tabla 4.4: Presencia de contaminantes en época lluviosa

Sitio de monitoreo	DBO5	Nitrógeno total	Nitratos	Fosfatos	Oxígeno disuelto	Coliformes totales	Coliformes fecales
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	MP/100 mL	NMP/100 mL
CAN01SM	0.15	0.04	0.04	0.87	6.0	9200	1300
CAN02SM	0.4	0.84	0.04	1.84	8.2	54000	2200
CAN03SM	0.7	0.56	0.04	1.22	5.23	54000	7900
CAN04ST	NM	0.7	0.04	1.53	7.43	24000	13000
CAN05SM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
FAN01SM	NM	0.04	0.04	0.29	NM	49	49
FAN02SM	NM	<0.1	<0.1	<0.5	NM	46	5
FAN03SM	NM	0.04	0.04	0.96	NM	1	1
FAN04SM	NM	<0.1	8.5	<0.5	NM	49	33
FAN05SM	NM	<0.1	8.1	<0.5	NM	790	49
FAN06SM	NM	<0.1	<0.1	<0.5	NM	330	170
FAN07SM	NM	<0.1	0.58	<0.5	NM	5400	790
FAN08SM	NM	NM	2.39	NM	NM	NM	NM
POE01SM	NM	<0.1	30.1	<0.5	NM	9200	1400
POE02SM	NM	0.7	0.04	0.2	NM	5400	1100
POE03SM	NM	<0.1	0.73	<0.5	NM	5400	3500
POP04SM	NM	<0.1	<0.1	<0.5	NM	1.09	1.09
POE05SM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
POE06SM	NM	1.4	0.04	0.2	NM	170	110
POE07SM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
POE08SM	NM	NM	2.29	NM	NM	NM	23
POE09SM	NM	NM	2.95	NM	NM	NM	350
POE10SM	NM	NM	8.56	NM	NM	NM	350

## 4.2.VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados de las mediciones de parámetros físicos fueron validados por medio de la calibración de los equipo de medición. Empleando el método indicado en el numeral 3.2.1, en la Figura 4.1 se representan aquellas muestras que presentaron desviaciones mayores al 15% respecto a la relación del valor SDT calculado con la conductividad eléctrica medida en campo (Los cálculos para determinar las desviaciones se presentan en el Anexo 5):

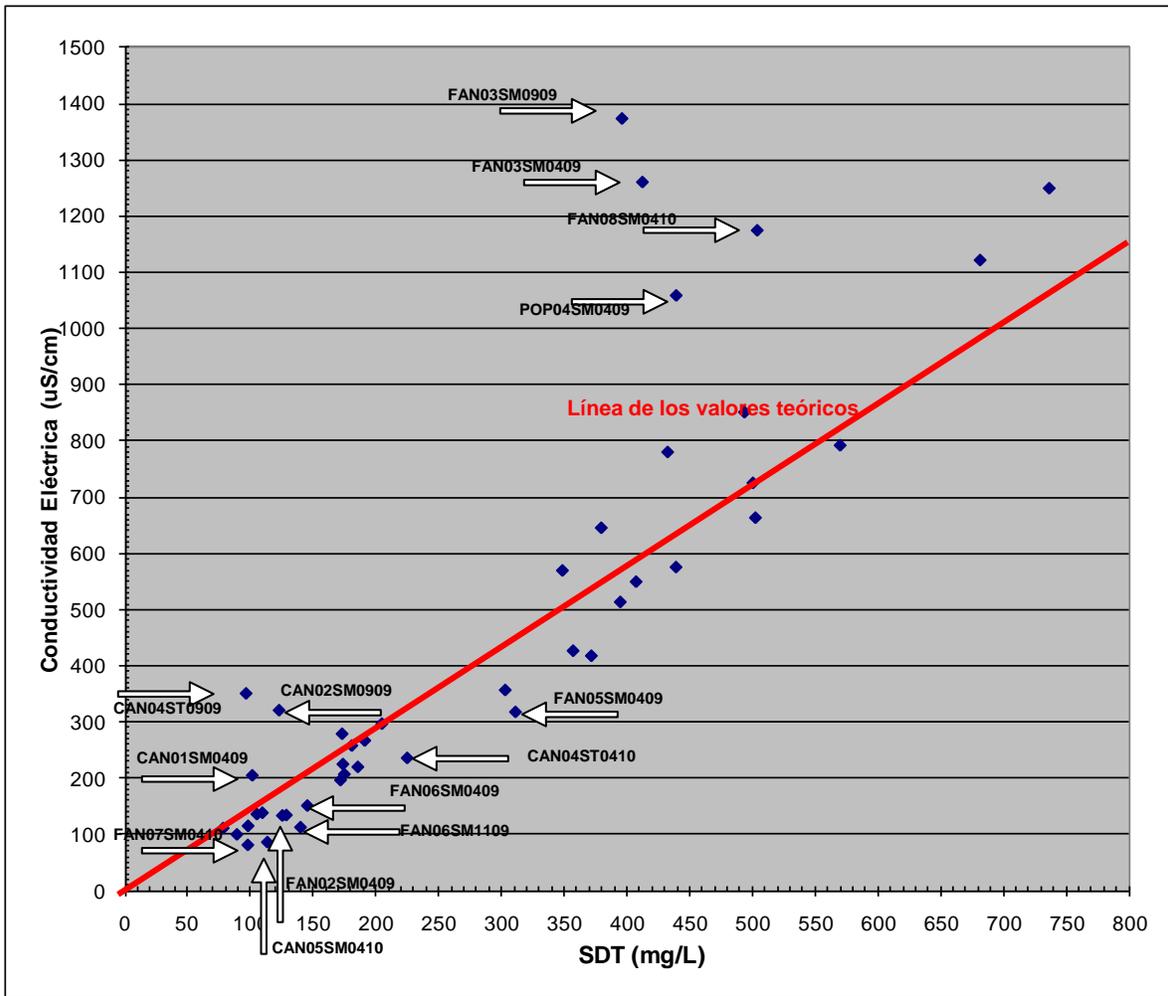


Figura 4.1: Gráficos de conductividad eléctrica y sólidos disueltos estimado, con sitios que presentaron más de 15% de desviación

Los sitios siguientes requirieron ser validados por medio de la correlación entre la electroneutralidad y la conductividad eléctrica (J.D. Taupin, 2009):

Tabla 4.5: Validación por medio de % de error y CE de sitios con desviaciones

No.	Muestra	% de error de lectura de SDT y CE	% de error en el balance iónico	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Validación
1	CAN01SM0409	16.9	-8.85	204	Resultado admisible
2	CAN02SM0909	29.1	1.39	645	Resultado admisible
3	CAN04SM0909	43.5	-7.5	350	Resultado admisible
4	CAN04SM0410	15.5	4.83	235	Resultado admisible
5	CAN05SM0410	31.2	-9.01	85	Resultado admisible
6	FAN02SM0409	16	-7.13	133.2	Resultado admisible
7	FAN03SM0409	41.6	-1.89	1261	Resultado admisible
8	FAN03SM0909	36.3	7.42	1,374.21	Revisar
9	FAN05SM0409	16.8	-18.85	217.0	Revisar
10	FAN06SM0409	16.1	-7.63	150.1	Resultado admisible
11	FAN06SM1109	28.4	-6.47	111.6	Resultado admisible
12	FAN07SM0410	27.2	-6.9	80	Resultado admisible
13	FAN08SM0410	24	7.2	1175	Revisar
14	POP04SM0409	25.6	-7.7	1059.0	Revisar

De acuerdo al cuadro anterior, los sitios FAN03SM0909, FAN05SM0409, POP04SM0409 y FAN08SM0410 presentaron anomalías químicas. Sin embargo, se descartan errores de laboratorio o de medición, y se consideran como datos válidos debido a los siguientes aspectos específicos de cada sitio:

- FAN03SM0909: Este corresponde a un manantial con actividad hidrotermal, por lo que puede haber disueltos otros minerales diferentes a los iones mayoritarios como serían los sulfuros;
- FAN05SM0409: Corresponde a un manantial cercano a una zona agropecuaria, por lo que puede haber contaminación externa;
- POP04SM0409: Este corresponde a un pozo perforado con actividad hidrotermal, por lo que puede haber disueltos minerales diferentes a los iones mayoritarios; y,
- FAN08SM0410: Manantial con actividad hidrotermal, con posible presencia de minerales diferentes a los iones mayoritarios como serían los sulfuros, debido a la presencia de éste en el ambiente.

### **4.3. MODELO CONCEPTUAL DE LOS ACUÍFEROS DE LA SUBCUENCA DEL RIO METAYATE**

El modelo conceptual descrito en el Capítulo 1, desde la hidrogeoquímica, requiere una revisión del mismo, por lo que se propone un modelo conceptual actualizado, considerando el origen del flujo del agua subterránea, es decir si existen acuíferos con sistemas de flujo local (someros colgados), intermedio (acuífero somero o profundo mineralizado, o mezcla de ambos) y regional (acuíferos profundos con actividad hidrotermal o con influencia de éste). Este será determinado por medio del análisis de la hidrogeoquímica recolectada.

#### **4.3.1. Formaciones geológicas y sitio de monitoreo**

La tabla 4.6. presenta los sitios monitoreados se localizan en las siguientes formaciones y miembros. La mayoría de los sitios analizados se encuentran en la formación Chalatenango, seguido por la formación Morazán y Cuscatlán, y por último la formación San Salvador. No se encontraron pozos o manantiales ubicados directamente en las formaciones Cuscatlán y Bálamo.

#### **4.3.2. Indicadores fisicoquímicos de los sitios muestreados**

Se analizan los parámetros Conductividad Eléctrica, pH, Temperatura, Cloruros, los cuales pueden ser empleados como trazadores naturales del agua, así como nitratos (A. Plata Bedma, 1999).

Tabla 4.6: Formación y edad geológica de aguas subterráneas muestreadas por sitio

Formación y miembro (fuente: Plan Trifinio, 2009)	Sitio de monitoreo
<b>Formación San Salvador (Qf)</b> Holoceno 5,000 – 10,000 años Depósitos sedimentarios del Cuaternario.	POE10SM 
<b>Formación Cuscatlán (c4)</b> Pleistoceno Inferior e Intermedio 1,6 millones – 10,000 años Rocas efusivas básicas intermedias	No hay manantiales o pozos en esta formación
<b>Formación Cuscatlán (c1)</b> Pleistoceno Inferior e Intermedio 1,6 millones – 10,000 años Piroclastitas Ácidas, epiclastitas volcánicas. Formado por tobas de lapilli con pómez y fragmentos líticos de lavas dacíticas vítreas y andesitas, inmersas en una matriz de cenizas finas no estratificadas	FAN04  POE02SM  POP04SM  POE05SM 
<b>Formación Bálsamo</b> Plioceno 5.2 – 1.6 millones de años Rocas tipo ácido en las partes bajas e intermedias y básicas en la parte superior de la formación,	No hay manantiales o pozos en esta formación
<b>Formación Chalatenango (ch1)</b> Mioceno 23,3 – 5,2 millones de años Piroclastitas ácidas, ignimbritas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas	FAN02  FAN03  POE01SM  POE09SM  FAN01  FAN05  FAN08 
<b>Formación Chalatenango (ch2)</b> Mioceno 23,3 – 5,2 millones de años Efusivas ácidas; piroclastitas ácidas subordinadas	POE08SM  POE06SM 
<b>Formación Morazán (m1b)</b> Oligoceno superior 35,4 – 23,3 millones de años Lavas de Intermedias a ácidas	POE03SM 
<b>Formación Morazán (m2a)</b> Oligoceno inferior 35,4 – 23,3 millones de años Efusivas intermedias hasta intermedias- ácidas piroclastitas subordinadas, alteración regional por influencia hidrotermal	FAN06SM  FAN07SM  POE07SM 

## Conductividad eléctrica (CE)

Los sitios más elevados respecto al terreno presentaron la menor Conductividad Eléctrica, similar al agua lluvia, con un enriquecimiento en dirección a las cotas menores. Esto indica que existe flujo del agua subterránea local en las partes altas, media y baja de la subcuenca, y regional o intermedio en las partes media y baja.

En las partes altas predominan rocas con poca o nula permeabilidad (formación Morazán y Chalatenango), por lo que los valores de CE son similares al agua lluvia (ANDA, 2007), indicando una baja mineralización (CE menores a 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): FAN01SM, FAN02SM, FAN05SM, FAN06SM, FAN07SM. En la época seca, el agua que fluye sub-superficialmente mantiene la misma cantidad de minerales disueltos que en la época lluviosa.

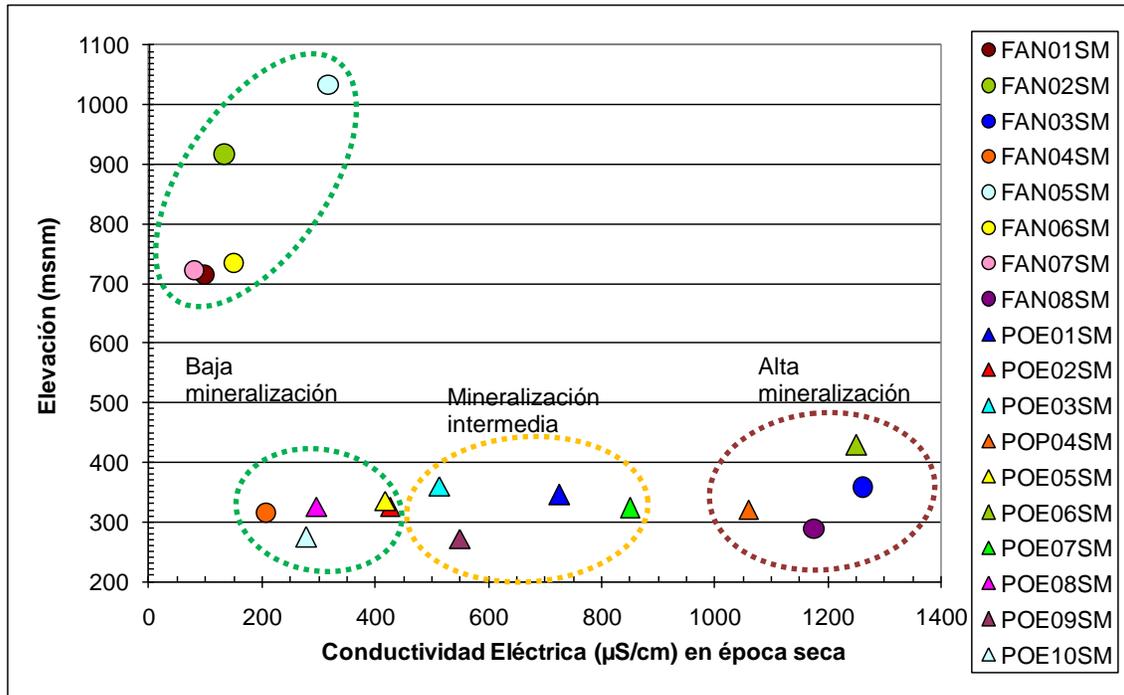


Figura 4.2: Gráfico de CE contra altitud en época seca, agua subterránea

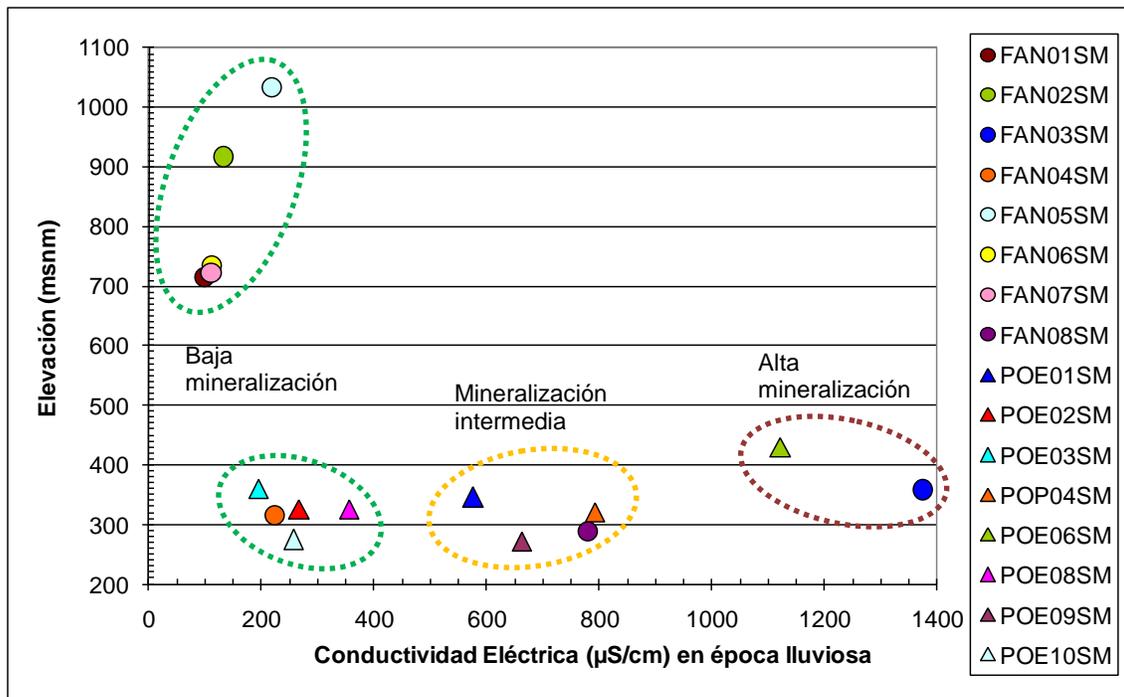


Figura 4.3: Gráfico CE contra altitud en época lluviosa, agua subterránea

En la parte media, hay formaciones Cuscatlán, Chalatenango y Morazán, por lo que presenta rocas desde mediana a nula permeabilidad. Los que presentan baja mineralización se encuentran en zonas con tobas de lapilli y pómez, y otros materiales poroso, por lo que indica una zona de recarga para FAN04SM y POE02SM. Los que tienen mineralización intermedia están en medios fracturados, como lo son POE01SM, POE07SM y POE03SM, en donde los dos primeros no presentaron variaciones significativas en la época seca y lluviosa, sin embargo el tercero presentó un proceso de dilución en época lluviosa, debido al aporte de un río afluente al Metayate, el cual se encuentra a aproximadamente 20 m.

También hay sitios con alta mineralización: POP04SM y FAN03SM, los cuales también presentaron hidrotermalismo, así como una composición rica en sulfatos y sodio. El primero de ellos corresponde a un pozo perforado, de aproximadamente 60 m, el cual sufre un proceso de dilución en época lluviosa, debido a una recarga local, puesto que en la zona hay rocas de la formación Cuscatlán.

Tabla 4.7: Cuadro comparativo de los resultados de CE

Ubicación en la subcuenca	Sitio	Mineralización		Tipo de formación		
		Época seca	Época lluviosa	Aluviales (Qf)	Tobas de lapilli con pómez, (c1)	Roca y lava fracturada (ch1, ch2, m1, m2)
Parte alta	FAN01SM	Baja	Baja			X
	FAN02SM	Baja	Baja			X
	FAN07SM	Baja	Baja			X
	FAN05SM	Baja	Baja			X
	FAN06SM	Baja	Baja			X
	POE06SM	Alta	Alta			X
Parte media	FAN04SM	Baja	Baja		X	
	POE02SM	Baja	Baja		X	
	POE03SM	Intermedia	Baja			X
	POE01SM	Intermedia	Intermedia			X
	POE07SM	Intermedia	- - -			X
	POP04SM	Alta	Intermedia		X	
	FAN03SM	Alta	Alta			X
Parte baja	POE10SM	Baja	Baja	X	X	
	POE05SM	Baja	- - -		X	
	POE08SM	Baja	Baja			X
	POE09SM	Intermedia	Intermedia			X
	FAN08SM	Alta	Intermedia			X

En la parte baja se encuentran rocas con permeabilidad e nula a intermedia, dada la presencia de formaciones Morazán, Chalatenango, Cuscatlán y San Salvador. Los sitios con una composición similar al agua lluvia estuvieron en rocas fracturadas (POE08SM), tobas (POE05SM) y aluviales (POE10SM).

Hay sitios con mineralización intermedia (POE09SM) y de alta en época seca a intermedia en época lluviosa (FAN08SM), indicando en el último caso una recarga local que diluye el agua de un acuífero que pasa por una fuente de calor subterránea con alta presión, y que asciende a la superficie por fallas locales y fracturamiento de la roca.

El cuadro siguiente resume las relaciones existentes entre la mineralización, la ubicación en la cuenca y el tipo de formación.

Predomina procesos de dilución en época lluviosa para la mayoría de los sitios, siendo excepción FAN03SM, POE09SM y POE08SM, que tendieron a incrementar la CE ligeramente en época lluviosa, debido a procesos de disolución.

En resumen, hay cuatro áreas:

- a) Zona 1: baja mineralización en parte alta de la subcuenca (FAN01SM, FAN02SM, FAN05SM, FAN06SM y FAN07SM);
- b) Zona 2: de baja a intermedia mineralización en parte media y baja de la subcuenca en formaciones porosas (FAN04SM, POE02SM, POE05SM, POE08SM, POE10SM);
- c) Zona 3: de baja a intermedia mineralización en parte media y baja de la subcuenca en formaciones de rocas fracturadas (POE01SM, POE03SM, POE07SM, POE09SM, POE10SM); y,
- d) Zona 4: de intermedia a alta mineralización en algunos sectores de la toda la subcuenca, en rocas fracturadas (POP04SM, POE06SM, FAN03SM, FAN08SM).

## **Temperatura**

Las menores temperaturas se registraron en las partes altas, donde se encuentran los manantiales correspondientes a la zona 1 de CE: valores entre 25 y 26°C en época seca, y entre 23 y 28°C en época lluviosa (aguas hipotermas).

Con temperaturas muy similares, pero ligeramente mayores, se encuentran los manantiales y pozos de la subcuenca media y baja: de 28 a 32°C en época seca y lluviosa. Presenta aguas hipotermas y mesotermas, para los sitios de las zonas 2 y 3 de CE. Sin embargo, dentro de este grupo se encuentra el POE06SM, el cual presentó alta mineralización, por lo que, al ser comparado con el resto de sitios, presenta un proceso de enfriamiento por mezclado con agua de una recarga local con una de recarga regional desconocida por la literatura consultada.

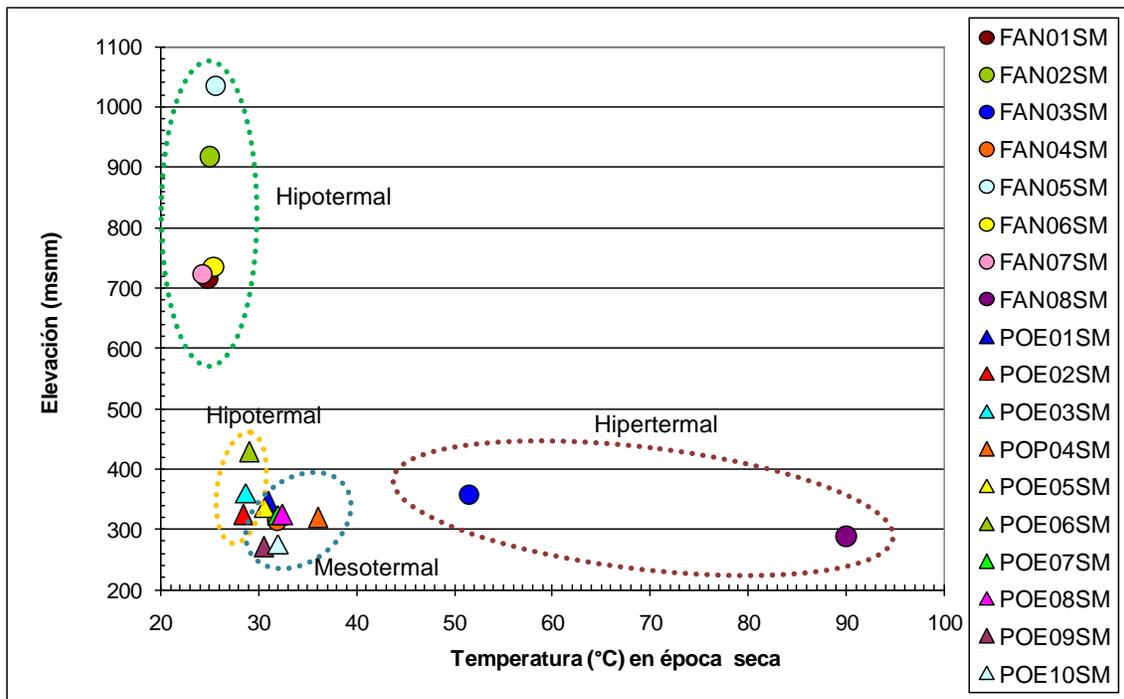


Figura 4.4: Gráfico Temperatura contra altitud en época seca, agua subterránea

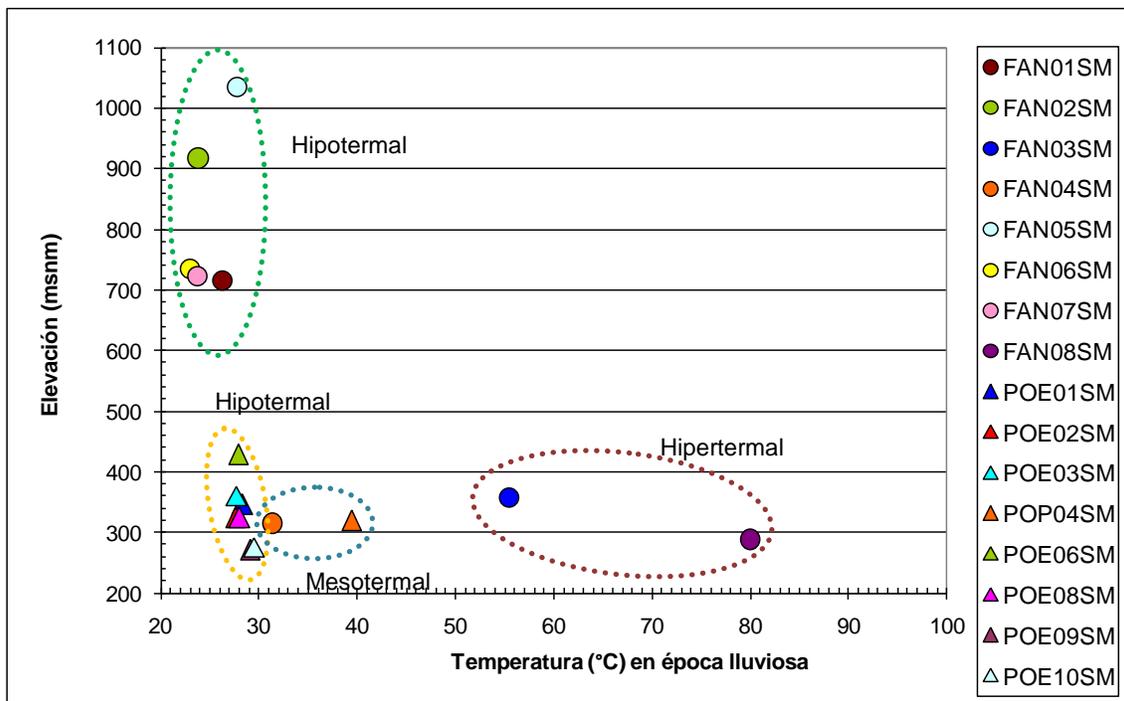


Figura 4.5: Gráfico Temperatura contra altitud en época lluviosa, agua subterránea

Las mayores temperaturas fueron registradas en los manantiales FAN03SM y FAN08SM, y los pozos POP04SM y POE07SM: 32 a 90°C en época seca, y de 40 a 80°C en época lluviosa, por lo que sus aguas fueron mesotermales e hipertermales. Esto indica que el agua subterránea pasa por una zona de calor o un acuífero regional hidrotermal, con alto contenido de sulfatos y sodio, los cuales solo pueden proveer de un acuífero con afectación hidrotermal, del cual se tienen estudios (ANDA, 2007; Estévez, 2009).

Las manifestaciones de actividad hidrotermal en los manantiales FAN03SM y FAN08SM indican interacción directa del agua de un acuífero regional con una fuente de calor profunda, con descensos de temperatura apreciables en los pozos POP04SM y POE07SM, ubicados en un área conformada por tobas de lapilli con piedra pómez.

Las temperaturas están influenciadas por: vegetación, temperatura ambiente y sólidos disueltos y del sistema de flujo del agua subterránea de un acuífero profundo regional que afecta a dos manantiales y dos pozos monitoreados.

## **pH**

En las partes de media y baja altura, debido a la geología, predominan valores de pH ligeramente ácidos, similares al agua lluvia en la subcuenca media y baja con presencia de aluviones, y valores mayores en presencia de rocas fracturadas, con un mayor tiempo de tránsito del agua subterránea.

Considerando las zonas establecidas a partir de la CE, se observa que los valores de pH de la zona 1, 2 y 3, variaron de 5.7 (similar a agua lluvia, Tabla 2.1) a 7.2 en época seca, y de 5.9 a 7 en época lluviosa. La zona de alta mineralización presentó aguas de ligeramente alcalinas a moderadamente alcalinas (7 a 8.5 en época seca, y 7.5 a 8.7 en época lluviosa).

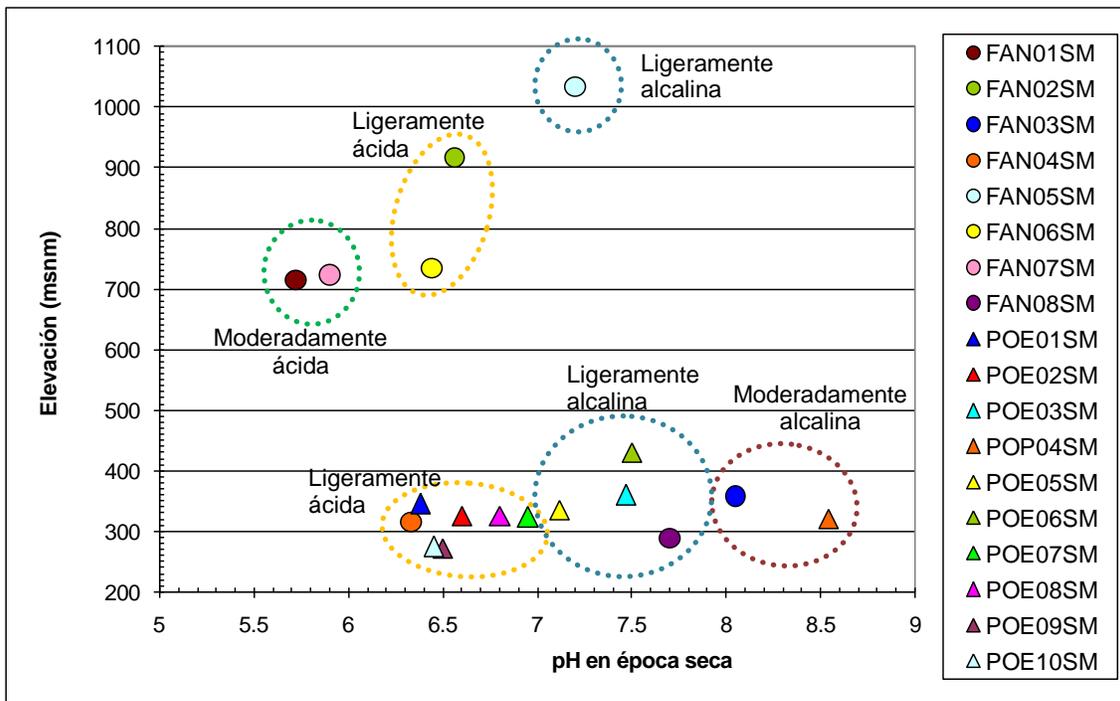


Figura 4.6: Gráfico pH contra altitud en época seca, agua subterránea

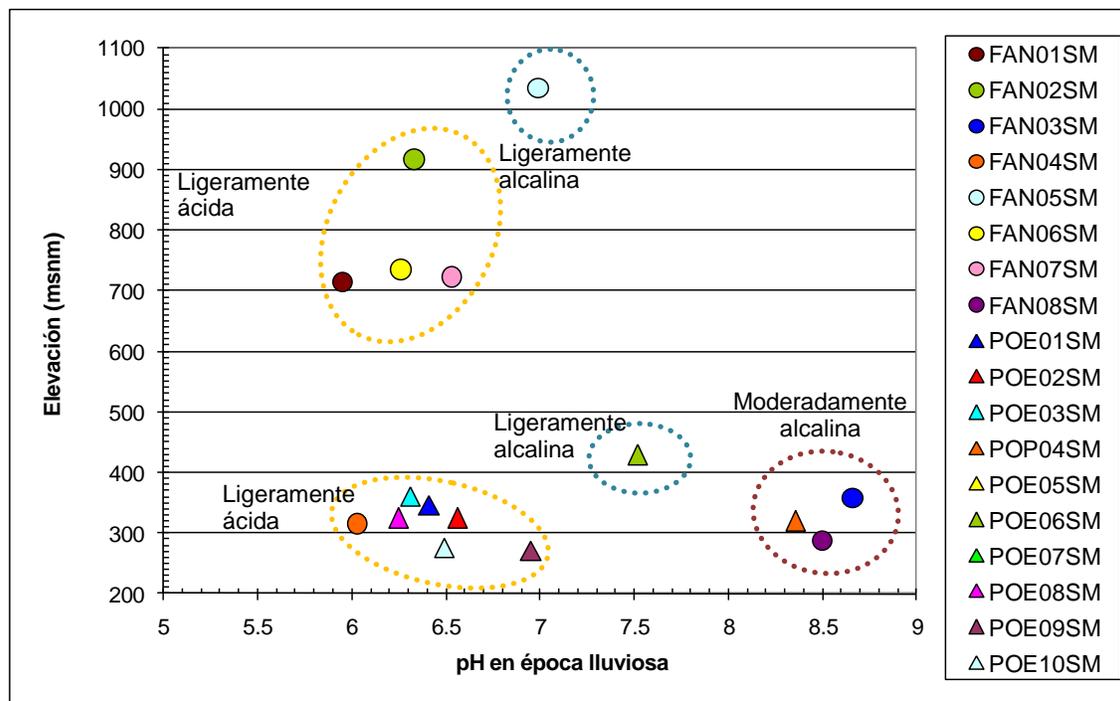


Figura 4.7: Gráfico pH contra altitud en época lluviosa, agua subterránea

Las zonas 2 y 3 de CE presentaron descensos en aquellos ubicados en zona donde predominan formaciones con permeabilidad de media a baja (formación Cuscatlán), e incremento en la parte baja, donde predominan formaciones con permeabilidad de baja a nula (formación Chalatenango), y actividad hidrotermal (formación Morazán).

El pozo POE07SM presentó un valor casi neutro de pH respecto al resto de sitios de la zona 4 de la CE, en época seca, por lo que esta zona se traslapa con la zona 2 y 3 de la CE. En la época lluviosa, al no tener registros para el pozo antes mencionado, las fronteras entre las tres zonas es más evidente.

Las variaciones de pH entre las épocas del año fueron pequeñas para los sitios de monitoreo ubicados en la zona 2 y 3 de la CE, y mayores en los localizados en la zona 1 de CE, debido a que la recarga de agua lluvia en éste último, a través de la formación Cuscatlán, tiende a infiltrarse en mayor cantidad (por su mayor permeabilidad) que otras formaciones más antiguas.

### **Cloruros y nitratos**

Los manantiales de la zona alta presentaron concentraciones de cloruros entre 0.7 y 4.4 mg/l en época seca y 2.6 a 4.6 mg/l en época lluviosa. El agua de estos sitios corresponde a una composición similar al agua lluvia, que es similar o menor a 2 mg/l (A. Plata, 1999). Lo que indica que el tiempo de residencia del agua en el suelo es muy bajo.

Por otro lado, la presencia de contaminantes de origen antropogénico es muy poca: nitratos cuantificados entre 0.4 y 1.4 mg/l en época seca y entre no detectable (<0.1) a 0.58 mg/l en época lluviosa. Excepción es el manantial FAN05SM, el cual presentó en época seca 16.3 mg/l de cloruros y 8,1 mg/l de nitratos, pudiéndose deber a contaminación antropogénica; en época lluviosa, presentó 3.55 mg/l de cloruros y no detectable de nitratos, por lo que existe un arrastre de contaminantes por flujo subsuperficial, así como dilución.

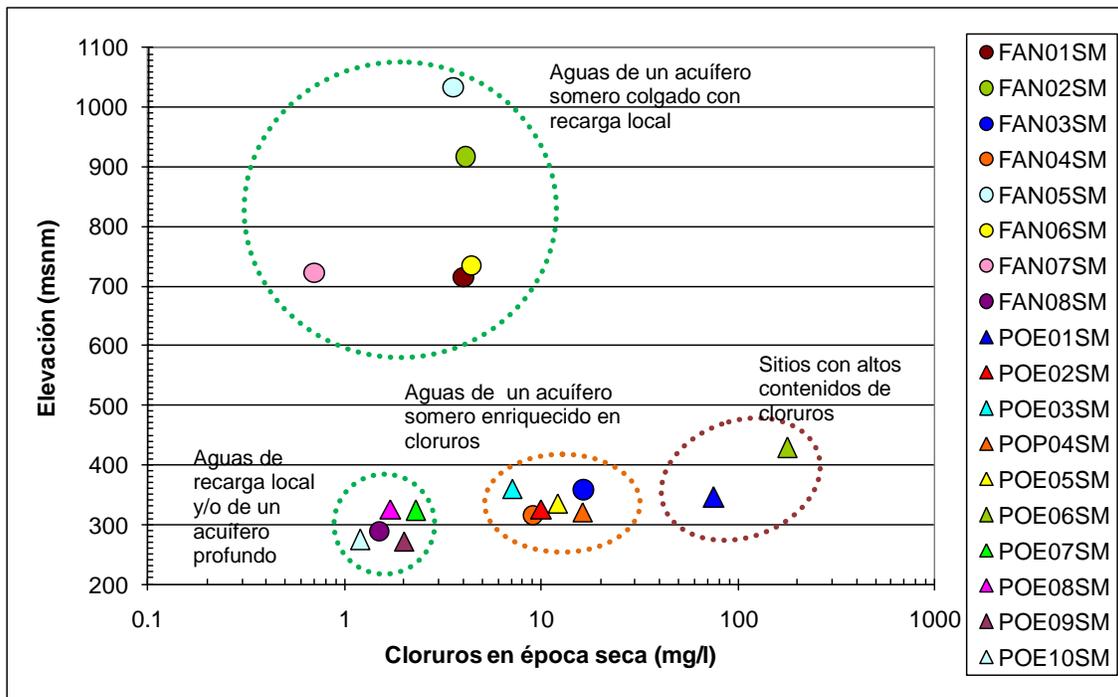


Figura 4.8. Gráfico cloruros contra altitud en época seca, agua subterránea

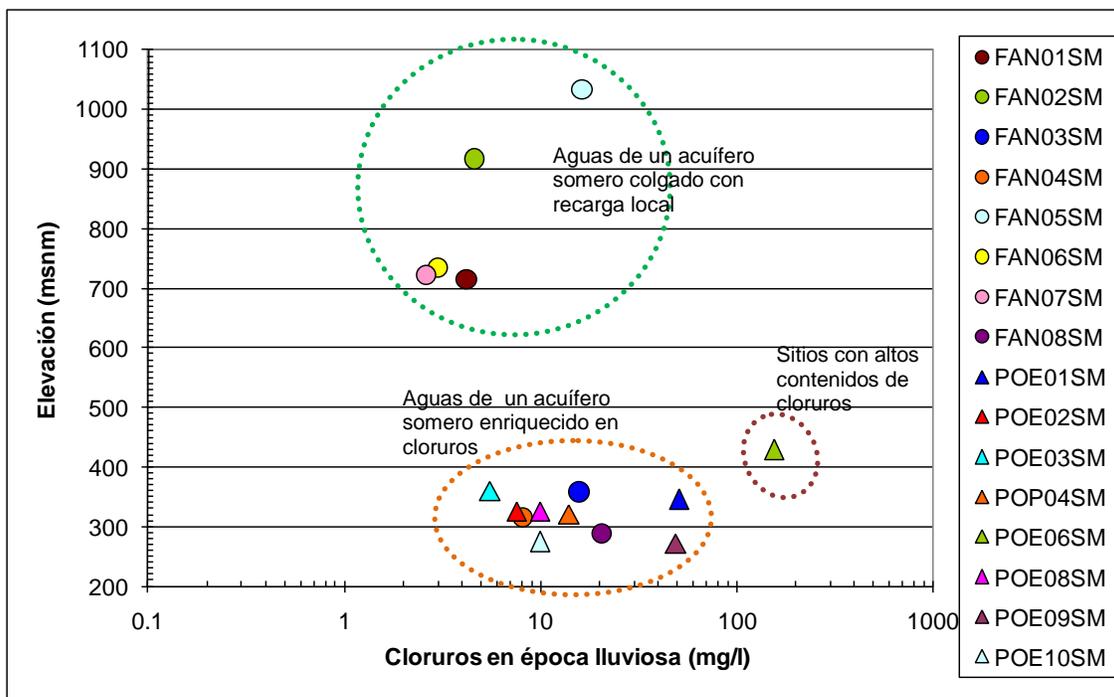


Figura 4.9: Gráfico cloruros contra altitud en época lluviosa, agua subterránea

En las cotas intermedia y baja, la concentración de cloruros presentó las siguientes concentraciones:

- Valores de 1.2 a 2 mg/l en época seca, y de 9.93 a 48.93 mg/l en época lluviosa, en aluviales recientes de la formación San Salvador, localizados en la parte más baja de la cuenca (pozos POE08SM, POE09SM y POE10SM);
- De 7.1 a 9.93 mg/l en época seca, y de 5.5. a 7.6 mg/l en época lluviosa, en zona de aluviales de la formación Cuscatlán y rocas fracturadas de la formación Chalatenango y Morazán (pozos POE02SM y POE03SM, y manantial FAN04SM); Hubo también concentraciones de 74.9 mg/l en época seca y de 50.8 mg/l en época lluviosa en la zona urbana de Agua Caliente (POE01SM).

La presencia de nitratos en las anteriores cotas presentaron concentraciones entre 0.37 y 6.28 mg/l en aluviales, y de 0.66 a 44.88 mg/l, por lo que existe presencia de contaminación antropogénica.

El pozo POE06SM presentó elevadas concentraciones de cloruros: 177.3 mg/l en época seca y 156 mg/l en época lluviosa, debido a fuentes naturales, ya que la cantidad de nitratos es muy baja (0.44 mg/l en época seca, y 0.04 mg/l en época lluviosa), siendo las posibles explicaciones: El pozo no es utilizado frecuentemente, lo que ocasiona una concentración de especies químicas por evaporación; y las aguas originalmente tienen un origen hidrotermal, que transita por estratos diferentes a que afloran en la superficie, según el mapa geológico, lo que puede originar altas concentraciones de cloruros, sodio y magnesio. Ejemplo son capas de piroclastos que contienen biotitas:  $K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2$

Por lo anterior, a pesar que posee una elevada conductividad eléctrica, no comparte la misma composición hidrogeoquímica que el resto de sitios, por lo que puede considerarse como una anomalía respecto al resto, perteneciendo a otro acuífero no identificado.

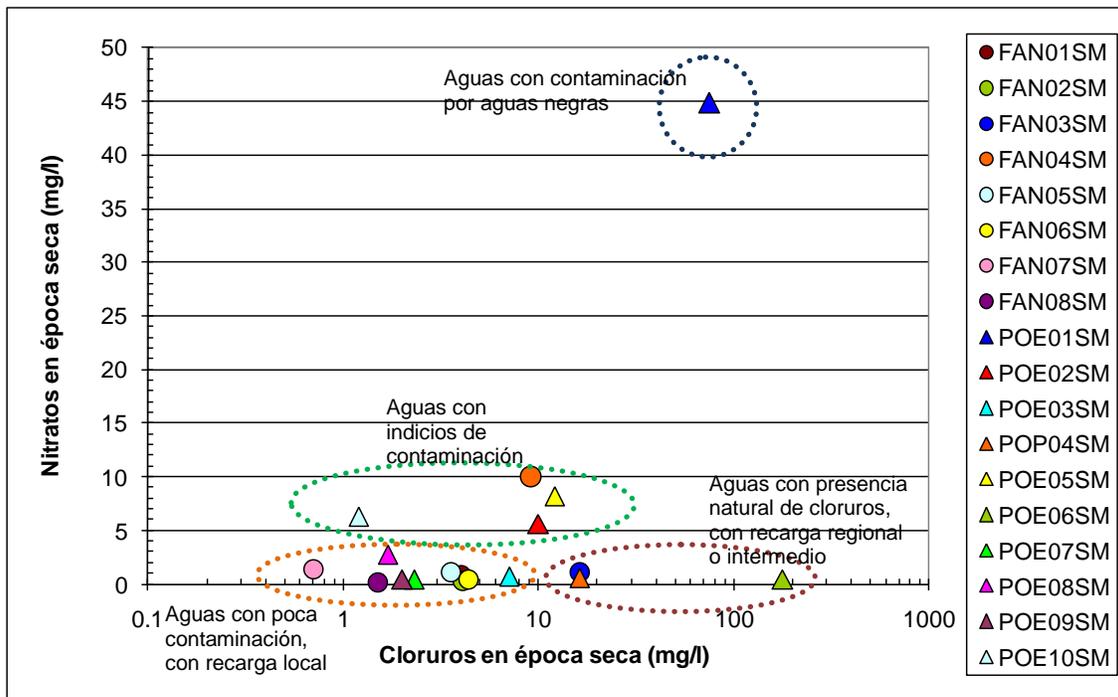


Figura 4.10: Gráfico de nitratos contra cloruros en época seca, agua subterránea

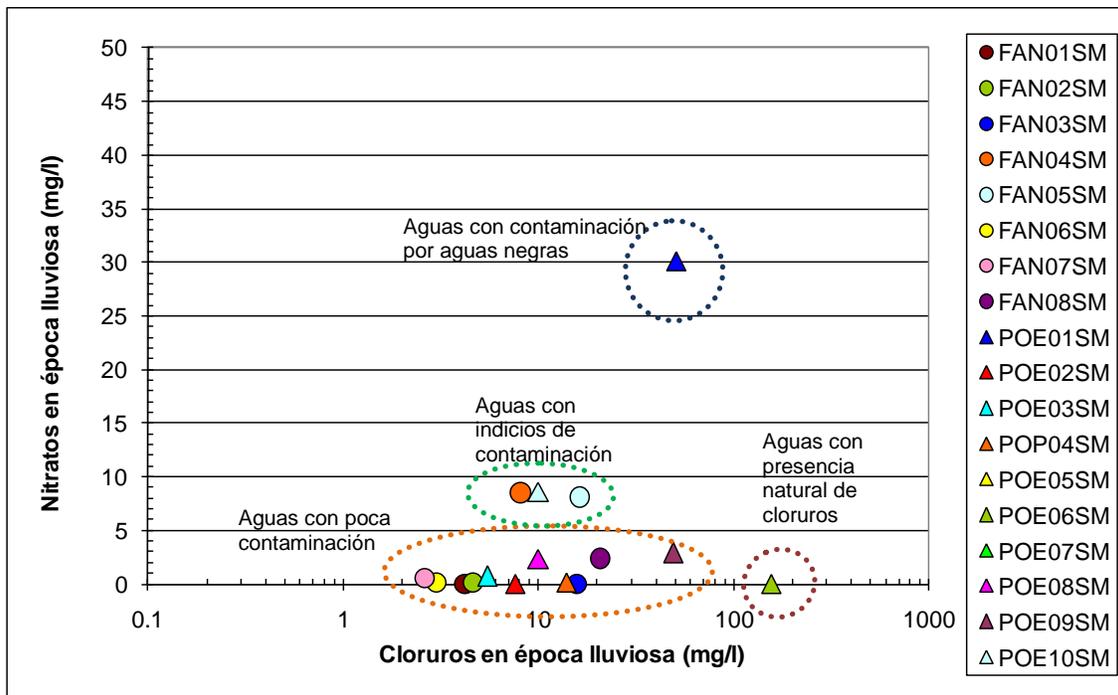


Figura 4.11: Gráfico de nitratos contra cloruros en época lluviosa, agua subterránea

En resumen, se identifican cuatro grupos de aguas conforme a la mineralización, termalismo, pH, cloruros y nitratos:

- Hipotermal con baja mineralización, de moderada a ligera acidez: Conformado exclusivamente por los manantiales de las partes altas y uno en la parte media;
- Hipotermal con baja y mediana mineralización, ligeramente ácido a neutro: Conformado por pozos en la parte media y baja de la subcuenca;
- Meso e hipertermal con alta mineralización, de ligera a moderada alcalinidad: Comprende manantiales con hidrotermalismo en la subcuenca media y baja, y pozos en la parte media; y,
- Hipotermal con alta mineralización, ligeramente alcalino: Sólo el pozo excavado POE06SM está en este grupo.

#### **4.3.3. Caracterización hidrogeoquímica y acuíferos identificados**

Los diagramas de Piper y Stiff de las figuras 4.12 a 4.17 describen la composición hidrogeoquímica de los sitios monitoreados en agua subterránea y agua superficial (símbolos y relleno de color verde: época lluviosa; símbolos y relleno de color naranja: época seca).

Considerando el capítulo 4.3.1., y los diagramas de Piper y Stiff arriba mencionados, se pueden establecer tres acuíferos:

- Acuíferos someros colgados en la parte alta de la subcuenca;
- Acuífero somero poroso y fracturado en la parte media y baja de la subcuenca; y,
- Acuífero profundo hidrotermal en la parte baja y media de la subcuenca.

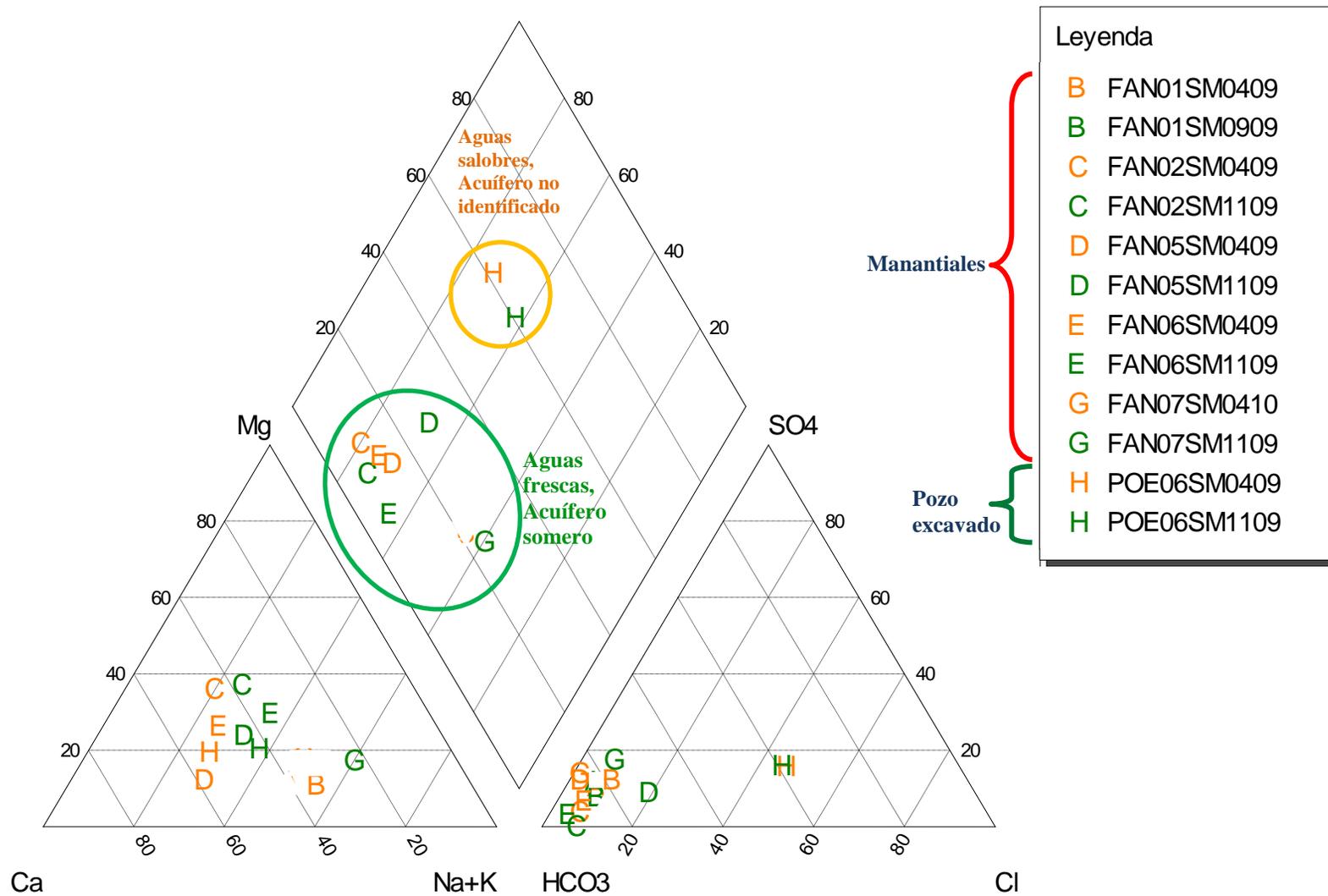


Figura 4.12: Diagrama de Piper para acuíferos en la parte alta de la subcuenca del río Metayate

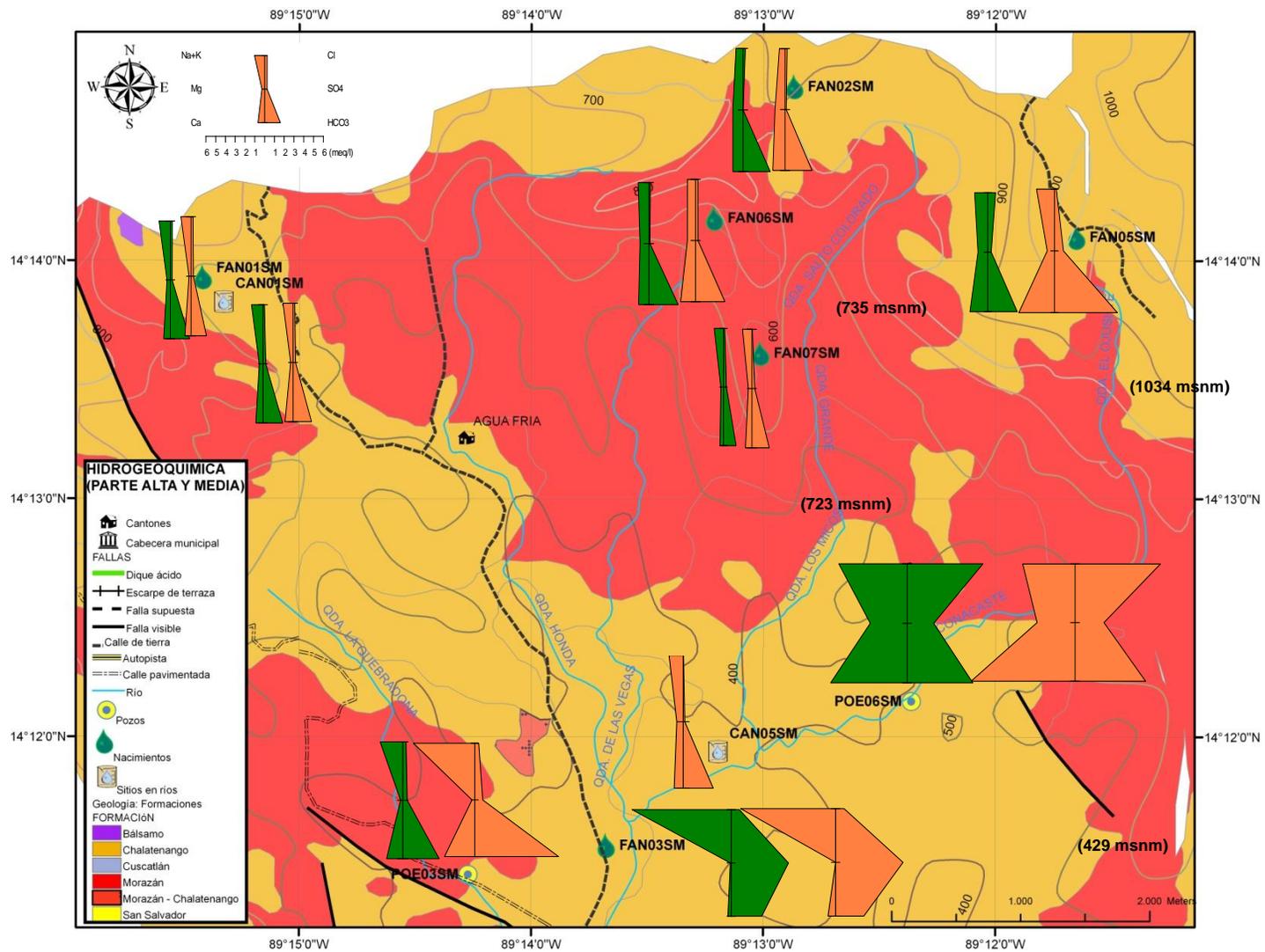


Figura 4.13: Caracterización hidrogeoquímica en parte alta de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa)

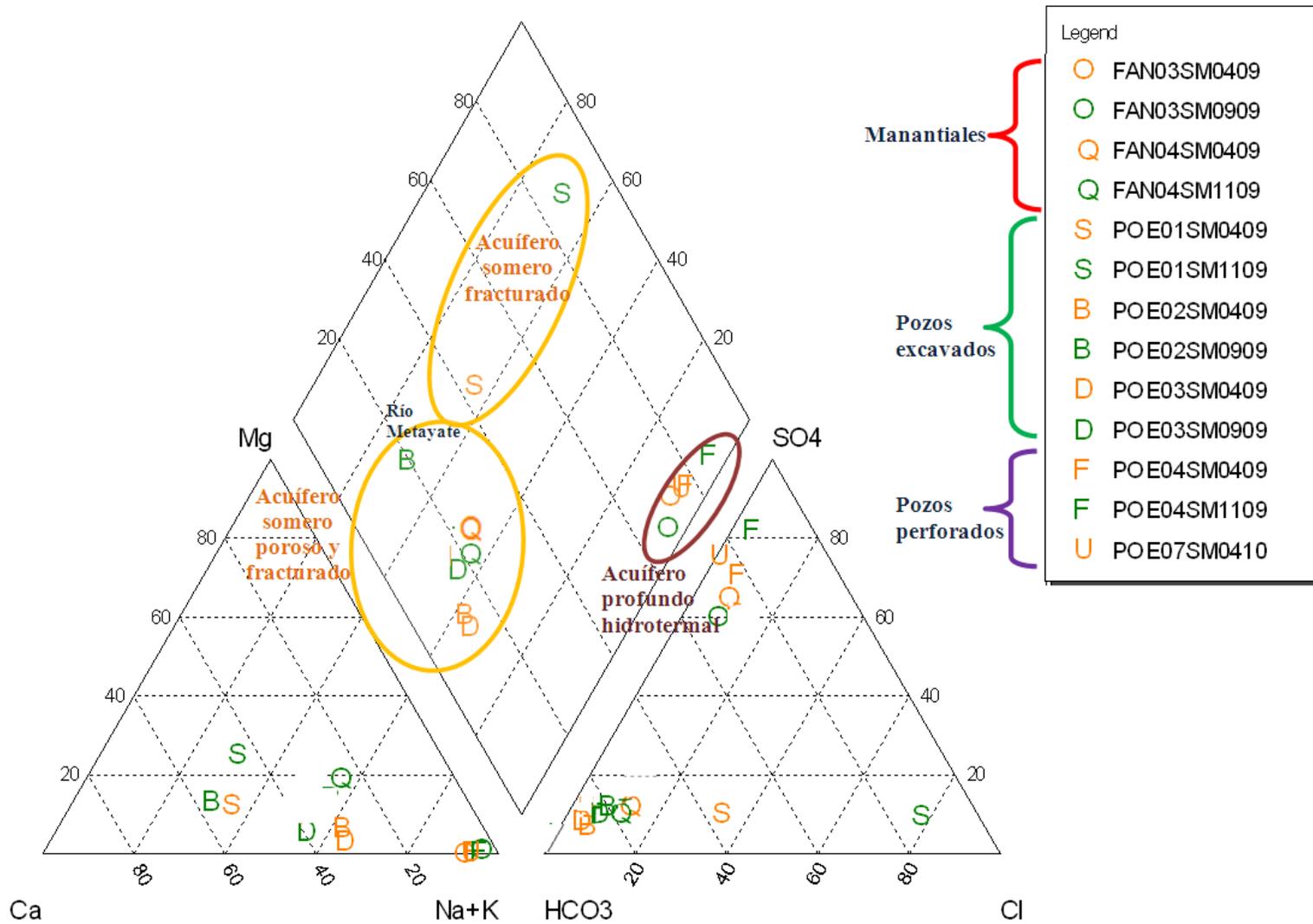


Figura 4.14: Diagrama de Piper para acuíferos en la parte media de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa)

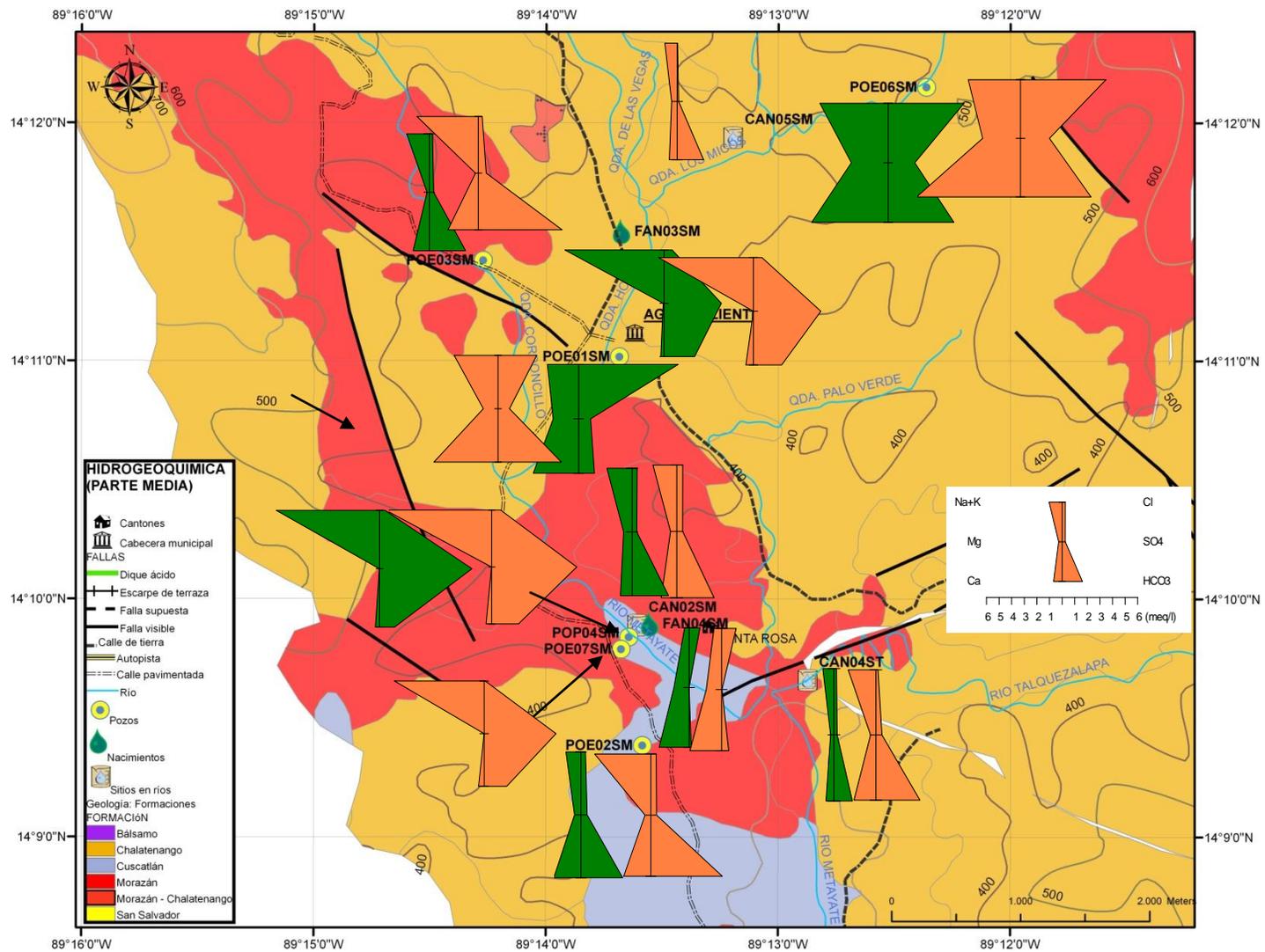


Figura 4.15: Caracterización hidrogeoquímica en parte media de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa)

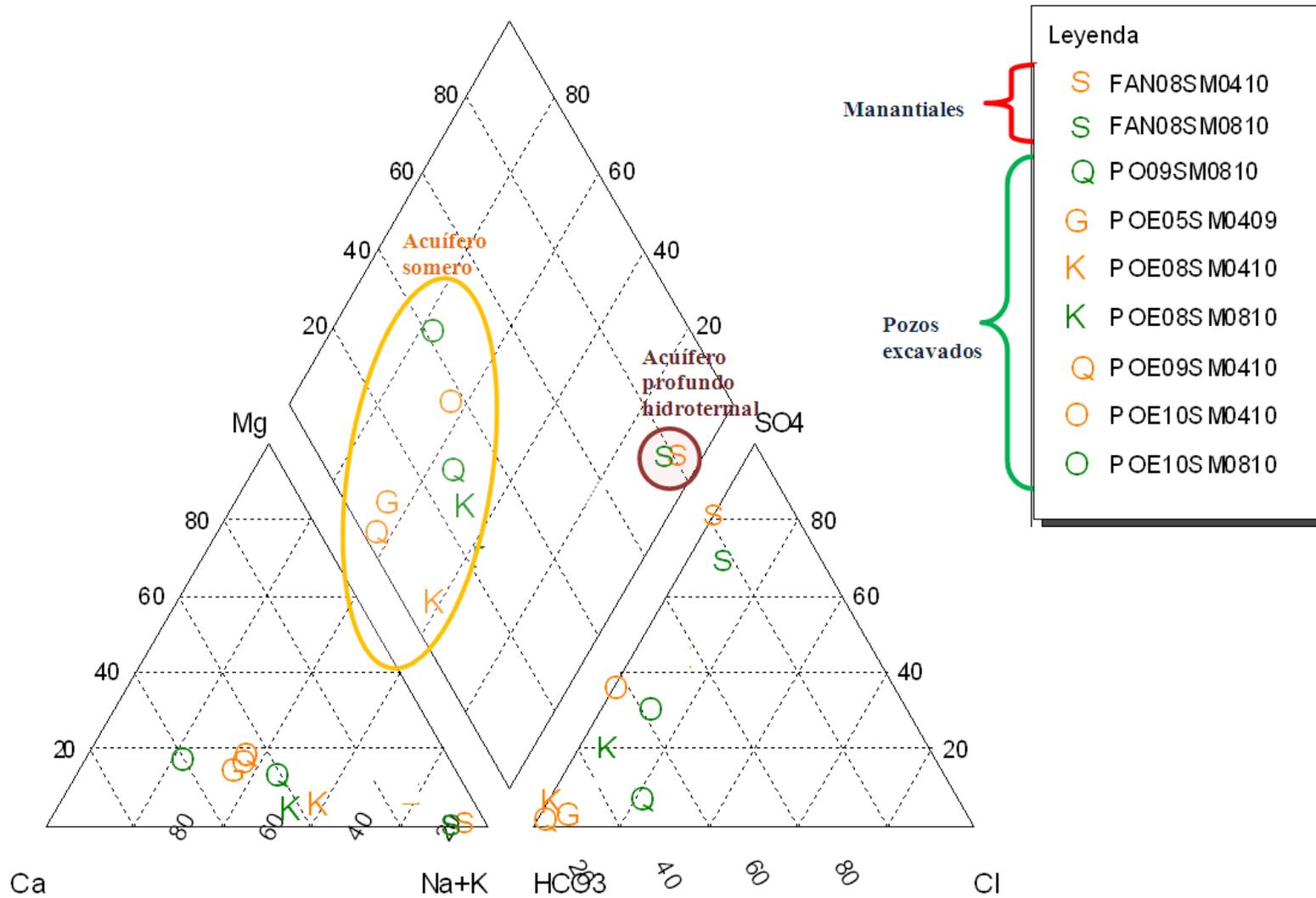


Figura 4.16: Diagrama de Piper para parte baja de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa)

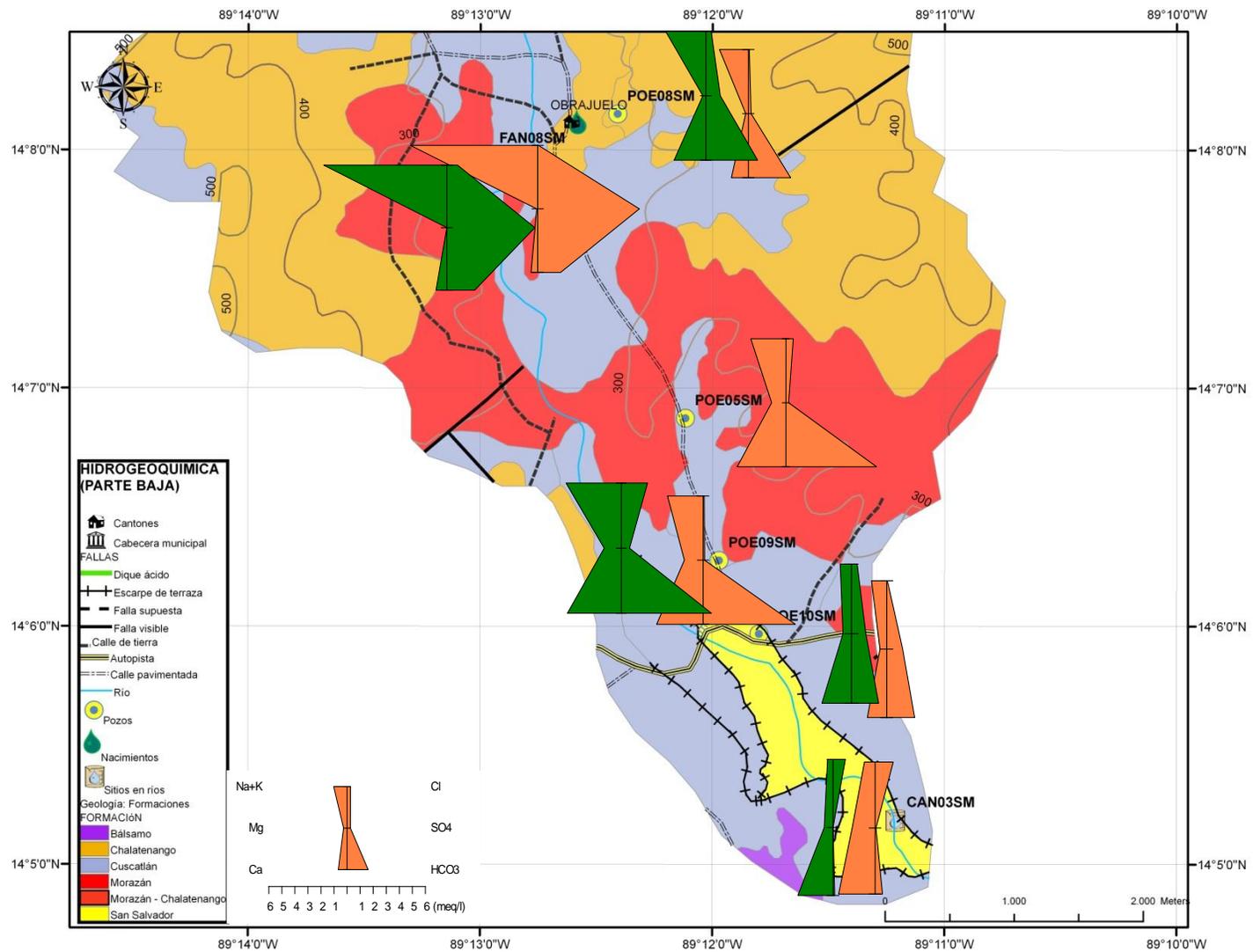


Figura 4.17: Caracterización hidrogeológica en parte baja de la subcuenca del río Metayate (naranja, época seca; verde, época lluviosa)

17 de 18 pozos y manantiales de agua analizados se encuentran dentro de los acuíferos. Estos fueron distribuidos atendiendo a los grupos de aguas identificados en el numeral 4.3.1 y a la composición hidrogeoquímica (proporción de los iones de calcio, sodio, potasio, bicarbonato, cloruros, sulfatos).

Sólo el pozo excavado POE06SM presenta una composición química única en todo el grupo analizado: altas concentraciones de cloruros, en contraste con ausencia de nitratos. Este sitio será analizado por separado, puesto que pertenece a un sistema de acuíferos aparte que requiere de un mayor estudio.

#### **4.3.4. Acuíferos someros colgados en la parte alta de la subcuenca**

En la parte Alta, predomina la formación Chalatenango y Morazán. La primera, presenta rocas efusivas ácidas y piroclastitas ácidas subordinadas, compuesta por lavas andesíticas y piroclásticas antiguas, parcialmente fracturadas y fisuradas, con porosidad mediana y permeabilidad media a baja. Conforman una unidad hidrogeológica de mediana a baja permeabilidad.

La caracterización hidrogeoquímica indica presencia de aguas dulces. De acuerdo a las figuras anteriores, la composición hidrogeoquímica de cinco sitios en la parte Alta corresponde a:

- **Aguas bicarbonatadas-sódicas-cálcicas ( $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ ), poco mineralizadas en manantiales FAN01SM y FAN07SM.** Estos presentaron en la época seca y lluviosa una baja mineralización: SDT entre 0.09 y 0.1 g/L en época lluviosa y 0.07 y 0.14 en época seca, por lo que el agua presenta una composición similar al agua lluvia, indicando un flujo local del agua subterránea.
- **Aguas bicarbonatadas-cálcicas-sódicas ( $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ ), en manantiales FAN02SM, FAN05SM y FAN06SM.** Los valores de SDT oscilaron entre 0.08 y 0.15 g/L en época lluviosa, y entre 0.09 y 0.22 g/L en época seca, debido a que poseen mayor contenido de iones de magnesio, calcio y bicarbonato, por un mayor

tiempo de tránsito del agua en la matriz rocosa desde la zona de recarga (partes altas) hasta la de descarga (manantiales).

La descripción en detalle por cada sitio muestreado se presenta en el Anexo 6 (Diagramas de Piper y Stiff, y resumen de la simulación del origen de agua para cada sitios de monitoreo, empleando AquaChem).

Según la simulación del estado y especies minerales presentes empleando PHREEQ-C, y resultados de la modelación, los cuales se han resumido en la Tabla 4.8, los minerales que pueden estar presentes en estado de subsaturación, es decir que tienden a estar en solución de acuerdo a la modelación, serían: anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), crisotilo ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), halita ( $\text{NaCl}$ ), melanterita ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ).

Tabla 4.8: Especies minerales según índices de saturación en acuíferos someros colgados

Sitio	Época del año	Tipo de agua	Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Posibles especies minerales presentes										
				Anhidrita	Aragonito	Calcita	Calcedonita	Dolomita	Hidróxido de hierro	Yeso	Hematita	Cuarzo	SiO2	Talco
FAN01SM	Época Seca	$\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$	98.8	d	d	d	↓	d	d	d	↓	↓	↓	d
	Época lluviosa	$\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$	134.9	d	d	d	↓	d	d	d	↓	↓	↓	d
FAN02SM	Época Seca	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	133.2	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	132.4	d	↓	↓	↓	↓	x	d	x	↓	↓	↓
FAN05SM	Época Seca	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	317	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	219	d	↓	↓	↓	↓	x	↓	x	↓	↓	↓
FAN06SM	Época Seca	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	150.1	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	111.6	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓
FAN07SM	Época Seca	$\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$	80	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	$\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$	110	d	↓	↓	↓	d	d	d	↓	↓	↓	d

\* Disolución (d); Precipitación (↓); presencia no probable (x)

Los que están presente en forma sobresaturada, es decir que tienen una concentración mayor al equilibrio iónico y que pueden precipitar, serían: calcedonita ( $\text{SiO}_2$ ), goethita ( $\text{FeOOH}$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y sílice amorfa ( $\text{SiO}_2$ ). Estos son meteorizados en menor grado, debido a que el agua subterránea corresponde a un flujo local.

Sin embargo, no se ha encontrado bibliografía que indique que existan en las formaciones geológicas del área de estudio, yacimientos de los minerales siguientes (A. Matus, 2011): Halita, Crisotilo, Goethita, Jarosita-K, Melanterita, Sepiolita y Siderita. Estos no serán considerados en la interpretación de los resultados, salvo en la interpretación del POE06SM.

La naturaleza mineralógica del subsuelo donde fluye el agua subterránea y brota en cada manantial analizado son los siguientes:

- FAN01SM: No experimentaría cambios significativos en la disolución y saturación de minerales en época seca y lluviosa, que atraviesa una matriz rocosa fracturada. Sus aguas son principalmente aguas lluvias que atraviesan rocas conformadas principalmente por minerales de calcedonita, hematita, cuarzo y cuarzo amorfo;
- FAN02SM: Son aguas lluvias más enriquecidas que FAN01SM, puesto que pudieron estar en contacto con capas de tierra compuestas con aragonito, calcita, calcedonita, dolomita, cuarzo, cuarzo amorfo y talco; sin embargo, las diferencias de composición pueden corresponder en parte a variaciones temporales en la recarga y no a reacciones con los minerales arriba mencionados;
- FAN05SM: Presentaría una similar mineralización que FAN02SM, por lo que pertenecen a un misma formación geológica (Chalatenango), pero presentando éste último mayor presencia de iones de  $\text{HCO}_3^-$ , Ca y Na que el primero. Sin embargo, están ubicados en zonas topográficas separadas por ríos afluentes al Metayate;
- FAN06SM: Mantiene la misma presencia de minerales en ambas épocas de forma similar al FAN05SM, sin embargo pertenece a la formación Morazán; y,

- FAN07SM: Presenta una composición similar a FAN01SM en época lluviosa, y a FAN06SM en época seca. Así, atraviesa rocas con minerales de aragonita, calcita, calcedonita, dolomita, hematita, cuarzo, cuarzo amorfo.

La poca presencia de minerales indica que las aguas pertenecen a un flujo local de agua, que se caracteriza por presentar manantiales como puntos de descarga, por medio de un flujo sub-superficial, radial, con rumbo norte a sur. Se puede confirmar el modelo establecido por ANDA en 2007.

En resumen, las características hidrogeológicas de esta zona son:

- Profundidad del acuífero: Somero;
- Recarga: Recarga local en cerros y montañas;
- Descarga: Manantiales que alimentan a los ríos Agua Fría, Los Micos, Quebrada Honda y otras quebradas de invierno afluentes al río Metayate;
- Dirección del flujo: Norte a sur;
- Tipo de flujo del agua subterránea: local, subsuperficial;
- Tipo de agua: Poco mineralizada, con predominancia de bicarbonatos, calcio y sodio, hipotermal, pH de ligeramente ácido a neutro similar al agua lluvia; y,
- Fallamiento: Existen pocas fallas visibles, las cuales se ubican en la frontera al Oeste de la zona de estudio, y conforma un parte aguas.

#### **4.3.5. Acuífero somero de tipo fracturado y poroso en la parte media y baja de la subcuenca**

En la parte media y baja predominan formaciones geológicas con rocas fracturadas de baja permeabilidad pertenecientes a la formación Morazán (m1a, m2b) y Chalatenango (ch), y aluviales con mediana a baja permeabilidad de la formación Cuscatlán y San

Salvador, entre la parte inferior de la subcuenca alta (hasta 450 msnm) y la parte baja de la subcuenca media (hasta 250 msnm).

Corresponden los pozos POE01SM, POE02SM, POE03SM, POE06SM, POE07SM, POE08SM, POE09SM, POE10SM y el manantial FAN04SM. Sin embargo, debido a la composición hidrogeoquímica, la geología, la actividad antropogénica (contaminación) y la recarga local, el acuífero somero se subdivide en Acuífero Somero Fracturado y Acuífero Somero Poroso, los cuales están interconectados entre sí por medio de fracturas y fallas geológicas.

#### **4.3.5.a. Acuífero somero de tipo fracturado**

Corresponde los sitios POE01SM, POE03SM, POE06SM La formación superficial predominante en la parte alta es Chalatenango y Morazán. A pesar que estas rocas presentan poca permeabilidad, el flujo del agua subterránea sigue un gradiente hidráulico similar a la pendiente y elevación del terreno, a través de un sistema de fallas, con rumbo noreste – suroeste (ANDA, 2007).

La composición hidrogeoquímica del agua para los sitios muestreados es:

- **Aguas Cl-Ca-Na en época lluviosa, y HCO<sub>3</sub>-Cl-Ca-NA en época seca (POE01SM).** El pozo excavado POE01SM se caracteriza por presentar una mineralización mediana: 0.4 g/L de SDT en época lluviosa y 0.5 g/L en época seca. Esta mineralización se debe a la presencia de elevadas concentraciones de cloruros y nitratos, debido a que se encuentra en una zona urbana, con fosas sépticas aledaña, por lo que presenta una evidente contaminación con aguas residuales ordinarias, pudiendo ser un reflejo de la actual situación en los pozos de la ciudad de Agua Caliente.
- **Aguas HCO<sub>3</sub>-Na-Ca (POE03SM, POE02SM, POE08SM).** Presentaron una mineralización mediana, con valores de 0.14 a 0.19 g/l de SDT en época lluviosa, y de 0.3 a 0.38 g/l en época seca, presentando mayor proporción de bicarbonatos, sodio

y calcio en la época seca. Así, su composición indica un enriquecimiento de minerales respecto al agua lluvia, por el paso por la formación Morazán y Chalatenango, en un tiempo de residencia mayor a los registrados en la parte alta de la subcuenca.

El agua del pozo excavado POE03SM, localizado en el caserío El Jicarillo fluye en dirección al cantón y caserío Agua Zarca (POE02SM, también con aguas  $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ ). Esta conexión puede deberse a la presencia de al menos una falla con rumbo noroeste – sureste entre dichos sitios (Figura 4.15)

El POE08SM presenta sulfatos en bajas concentraciones, debido a que en la zona se ha reportado actividad hidrotermal.

La zona de recarga de este acuífero podría proceder de una zona localizada fuera de la subcuenca (Zona de recarga regional), la cual es alimentada por una recarga local en la zona de Santa Rosa, donde la geología predominante son tobas con piedra pómez, pertenecientes a la formación Cuscatlán.

En las cotas 250 a 300 msnm (El Obrajuelo), la composición del agua sigue la misma tendencia química que en el acuífero somero fracturado y el somero poroso:  $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$  en el pozo excavado POE08SM, con una pequeña variación en la proporción relativa de iones de sodio y calcio de los pozos POE05SM, POE09SM y POE10SM, ubicados en una formación con mayor porosidad (Cuscatlán y San Salvador).

A pesar que estas rocas presentan poca permeabilidad, el flujo del agua subterránea sigue un gradiente hidráulico similar a la pendiente y elevación del terreno, a través de un sistema de fallas, con rumbo noreste – suroeste y noroeste – sureste (POE03SM, aguas  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ), convergiendo en la ciudad de Agua Caliente (POE01SM, aguas  $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na-Ca}$ ).

Las especies minerales presentes en mayor cantidad son: aragonitas y calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), calcedonita, cuarzo y sílice amorfa ( $\text{SiO}_2$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), hidróxidos de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ).

Tabla 4.9: Especies minerales según índices de saturación en acuífero somero fracturado

Sitio	Época del año	Tipo de agua	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	Posibles especies minerales presentes											
				Anhidrita	Aragonito	Calcita	Calcedonita	Dolomita	Hidróxido de hierro	Yeso	Hematita	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Talco	
POE01SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -Cl-Ca-Na	725	↓	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	Cl-Ca-Na	575	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
POE02SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	426	d	↓	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	266	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓	↓
POE03SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	512.9	d	↓	↓	↓	↓	x	d	x	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	195.5	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓	d
POE08SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	296	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	356	↓	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓	↓

\* Disolución (d); Precipitación (↓); presencia no probable (x)

Los procesos de disolución/precipitación se dan en época seca y lluviosa por sitio son:

- POE01SM: Debido a que este pozo presenta contaminación antropogénica, no se puede emplear para caracterizar la composición mineralógica a cabalidad, ya que pueden intervenir otras reacciones químicas que puedan estar dando variaciones apreciativas entre la composición mineralógica en época seca y lluviosa.
- POE02SM: Puede dar indicio de que el agua atraviesa formaciones ricas en bicarbonatos, principalmente de aragonito, calcita, calcedonita, dolomita, hematita, cuarzo y sílice amorfo, por medio de fracturas y fallas, ya que presenta similitud con los pozos POE03SM y POE08SM, ubicados en terrenos en cotas arriba y abajo.
- POE03SM: Tiene una composición similar a PO02SM, pero se única cotas arriba de éste, con una muy probable conexión por medio de fallas y fracturas geológicas. Presenta disolución de anhidritas y de yeso.
- POE08SM: En época lluviosa el agua presenta sobresaturación de anhidrita y yeso, los cuales se disuelven en época seca; en época seca precipita talco, disolviéndose en

época lluviosa. Tiene una composición similar a POE03SM y POE02SM, y está ligeramente influenciado por actividad hidrotermal, la cual procede de un acuífero profundo con flujo regional.

#### **4.3.5.b. Acuífero somero de tipo poroso**

Las formaciones presentes son Cuscatlán, que posee unidades hidrogeológicas de baja permeabilidad, y la formación San Salvador, compuesta por depósitos de materiales aluviales, con una alta porosidad. Corresponden los sitios FAN04SM, POE05SM, POE09SM y POE10SM.

- **Aguas HCO<sub>3</sub>-Na-Ca con poca mineralización en el manantial FAN04SM:** Los SDT del manantial fueron de 0.16 y 0.14 g/l en época seca y lluviosa, respectivamente. Considerando que existe un enriquecimiento en los pozos de este acuífero aguas abajo, este manantial se encuentra en una zona de recarga de la formación Cuscatlán en el caserío de Santa Rosa, y presenta agua todo el año.
- **Aguas HCO<sub>3</sub>-Ca-Na medianamente mineralizados en pozos POE05SM y POE09SM:** presentaron una composición similar al manantial FAN04SM, pero presentan una mediana mineralización (valores entre 0.14 y 0.46 g/l de SDT), pH ligeramente ácido a neutro (valores de 6.5 a 6.95), y aguas hipotermas. Estas aguas pertenecen a un flujo local que se mueve en el sentido del gradiente hidráulico, es decir de norte a sur. Pertenece a la formación Cuscatlán, la cual posee arcillas que facilitan un intercambio iónico.
- **Agua HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Ca-Na en pozo POE10SM:** La zona superficial pertenece a la formación San Salvador, compuesta por depósitos sedimentarios del cuaternario (aluviales). Sus aguas son hipotermas, ligeramente ácidas y de baja mineralización (0.18 g/L en época lluviosa y 0.19 g/L en época seca de SDT), el flujo del agua subterránea es local. La composición hidrogeoquímica de este sitio, muy diferente al resto de sitios de este acuífero por su contenido de sulfatos, sugiere la influencia

directa de otros acuíferos con influencia hidrotermal en la zona y del embalse Cerrón Grande, por lo que sería una zona de descarga y recarga.

Tabla 4.10: Especies minerales según índices de saturación en acuífero somero poroso

Sitio	Época del año	Tipo de agua	Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Anhidrita	Aragonito	Calcita	Calcedonita	Dolomita	Hidróxido de hierro	Yeso	Hematita	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Talco
FAN04SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	206	d	↓	↓	↓	↓	d	d	↓	↓	↓	↓
	Época Lluviosa	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	224	d	↓	↓	↓	↓	d	d	↓	↓	↓	↓
POE05SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	417	d	↓	↓	↓	↓	x	d	x	↓	↓	↓
POE09SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	549	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	↓	↓	↓	↓
	Época Lluviosa	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	663	d	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
POE10SM	Época Seca	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Na-Ca	278	d	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Época Lluviosa	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Na-Ca	257	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

\* Disolución (d); Precipitación (↓); presencia no probable (x)

Podrían haber procesos de precipitación de las especies minerales siguientes: aragonito y calcita (CaCO<sub>3</sub>), calcedonita, cuarzo y sílice amorfo (SiO<sub>2</sub>), dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), hidróxidos de hierro (Fe(OH)<sub>3</sub>), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), talco (Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>), por lo que tiene una composición igual a los acuíferos fracturados. Las especies que están subsaturadas son: anhidrita (CaSO<sub>4</sub>), y yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O).

La variación de los minerales antes citados respecto a las épocas del año por sitio son las siguientes:

- FAN04SM: Las aguas atraviesan formaciones con posible presencia de aragonito, calcita, calcedonita, dolomita, hematita, cuarzo, sílice amorfa, talco, siendo la composición química uniforme, pero de baja mineralización, en época seca y lluviosa, por lo que corresponde a un sitio de descarga de captaciones de agua de la zona por medio de fracturas.

- POE05SM: Sólo se tienen registros de la época seca. El agua presenta sobresaturación de aragonito, calcita, calcedonita, dolomita, cuarzo, sílice amorfo y talco. Está en una formación con baja permeabilidad, estaría conectado por medio de fracturas y fallas locales a los pozos POE02SM, POE03SM, POE08SM y al manantial FAN08SM, así como a agua de la recarga local, y posiblemente por influencia hidrotermal registrada en los caseríos de Santa Rosa y El Obrajuelo.
- POE09SM: Tiene una composición muy similar al POE05SM, compartiendo también la misma formación geológica. Así, estaría conectado al sistema de acuíferos someros fracturados.
- POE10SM: En época lluviosa se sobresatura de anhidrita, y se disuelve en época seca. El resto de minerales de la tabla 4.10 puede estar presente en el subsuelo, así como en acuíferos que se encuentran en zonas aledañas, y en el embalse Cerrón Grande. Atendiendo a la CE, tiene una composición similar al FAN04SM, lo cual se debe a que se encuentra en una zona de aluviones recientes (Formación Qf).

#### **5.4.2.c. Características hidrogeológicas de los acuíferos someros poroso y fracturado**

En resumen, las características hidrogeológicas de los acuíferos fracturados y porosos en la subcuenca del río Metayate son:

- Profundidad del acuífero: somero;
- Recarga:
  - i. Recarga local en partes altas que se conduce por flujo subsuperficial;
  - ii. Recarga local en la zona con formación Cuscatlán y San Salvador, caseríos Santa Rosa, Agua Zarca, El Obrajuelo y Hacienda Metayate;
  - iii. Aporte por fallamiento en las formaciones Morazán y Chalatenango; y,
  - iv. Aporte del embalse Cerrón Grande u otro acuífero.

- Descarga:
  - i. Zona de Agua Caliente, río Metayate, por medio de un sistema de fallas.
- Dirección del flujo:
  - i. Noroeste-sureste (El Jicarillo) y Noreste-suroeste (Las casitas, Portezuelo, El Conacaste) en parte alta, influenciado por el fallamiento local, con dirección al río Metayate en la zona de Agua Caliente;
  - ii. Noreste-sur (El Jicarillo) y norte-sur (Santa Rosa) en parte alta, rumbo a Agua Zarca, influenciado por el fallamiento local;
  - iii. Noroeste-sureste (Agua Zarca, Santa Rosa) en la parte media, rumbo a El Obrajuelo; y,
  - iv. Norte-sur (El Obrajuelo) en la parte baja, rumbo a Poza Redonda y Hacienda Metayate.
- Tipo de flujo del agua subterránea: local, y posiblemente intermedio y/o regional.
- Tipo de agua:  $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$  de baja a medianamente mineralizada, con poca influencia termal, pH de ligeramente alcalino. Composición  $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na-Ca}$ , muy mineralizada, con presencia de cloruros por contaminación antropogénica en la Ciudad de Agua Caliente.
- Fallamiento: se reportan un fracturamiento localizado de la roca (fallas) que se interconectan entre sí, especialmente entre Agua Caliente, Santa Rosa y El Obrajuelo.

#### **4.3.6. Acuífero profundo hidrotermal**

Existe un acuífero profundo procedente de un flujo regional, vertical ascendente, con aguas de meso a hipertermales (temperaturas entre 50 y 90°C), el cual cubre la parte media (hasta 400 msnm) y baja de la subcuenca (hasta 250 msnm), con una composición  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , con presencia de bicarbonatos. Presenta una alta mineralización y valores alcalinos de pH. Corresponden los sitios POP04SM, POE07SM, FAN03SM y FAN08SM.

El manantial FAN08SM presentó temperaturas de 90°C en época seca y 80°C en época lluviosa, por lo que son aguas hipertermales, muy mineralizadas (0.82 g/l de SDT en época seca y 0.54 g/l en época lluviosa) y con pH alcalino (7.7 en época seca y 8.5 en época lluviosa), apuntan a aguas subterráneas con un flujo regional, intermedio y local.

De forma similar, el manantial FAN03SM y los pozos POP04SM y POE07SM se caracterizan por presentar hidrotermalismo (temperaturas entre 32 y 55°C), una alta mineralización (valores entre 0.55 y 0.96 g/L) y predominancia de iones sulfatos y sodio. Geológicamente, los estratos superiores pertenecen tres formaciones: Cuscatlán en POP04SM, Chalatenango en FAN03SM y FAN08SM, y Morazán en POE07SM. Sin embargo, la presencia de artesianismo en el POP04SM (de 40 m de profundidad) podría indicar que existe un acuífero confinado.

La relación entre conductividad eléctrica y temperatura indica que el manantial FAN08SM tiene la mayor influencia hidrotermal de los sitios muestreados, siendo los pozos de la parte intermedia los menos influenciados, sin embargo estos sitios están muy mineralizados.

El Na y  $\text{SO}_4^{2-}$  tienden a ser mayores en las cotas menores (manantial FAN08SM), y menor en las cotas mayores (manantial FAN03SM), en época seca. Sin embargo, en época lluviosa, se incrementa la composición de ambos iones, los pozos de las cotas intermedias (POP04SM), pero se mantiene la tendencia mostrada en época seca para los manantiales muestreados.

Para el resto de iones, el comportamiento es muy similar en época lluviosa:  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl}^-$  y K presentaron concentraciones similares y altas en los manantiales, y menores en el pozo perforado; Ca y Mg presentaron mayores concentraciones en las cotas menores del terreno, y menores en las cotas más altas, con valores intermedios en cotas intermedias; Fe, presentó mayores concentraciones en la mayor altura, y menor en cotas intermedias.

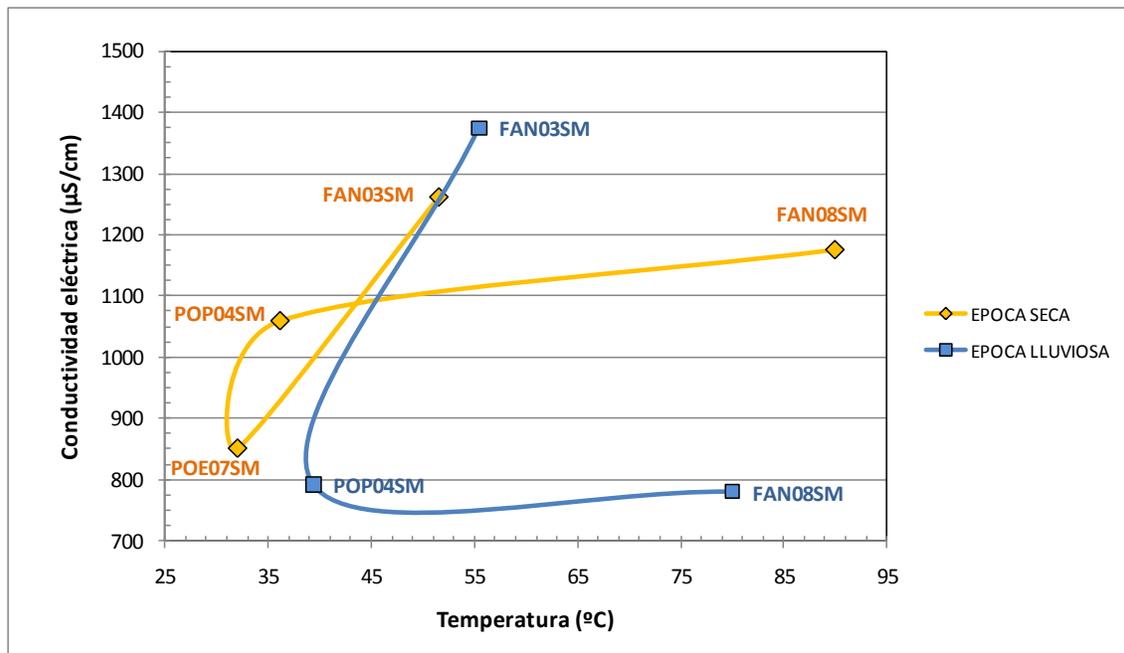


Figura 4.18: Relación conductividad eléctrica y temperatura en manantiales y pozos con aguas hidrotermales

En época seca, el comportamiento es más variado: Mg y K presentaron mayores concentraciones en las partes bajas del terreno, y las menores concentraciones en las partes altas; Ca presentó concentraciones similares en todos los sitios;  $\text{HCO}_3$  y  $\text{Cl}^-$  fueron menores en la cota menor y en el pozo excavado de la parte media, y mayor en las cotas mayor y en el pozo perforado de la cota intermedia; el Fe similar en todos los sitios, excepto en el pozo perforado, el cual presentó las mayores concentraciones, debido a la tubería.

Por lo anterior, estas aguas pertenecen a un sistema de flujo regional, mezclado con flujo intermedio y local, considerando que se encuentran en una zona con permeabilidad de nula a baja.

Al igual que los acuíferos someros fracturados y porosos, podrían haber procesos de precipitación de las especies minerales siguientes: aragonito y calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), calcedonita, cuarzo y sílice amorfo ( $\text{SiO}_2$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), hidróxidos de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), por lo que tiene una composición igual a los

acuíferos fracturados. Las especies que están subsaturadas son también: anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), posiblemente halita ( $\text{NaCl}$ ).

La diferencia entre estos minerales y los de los acuíferos someros porosos y fracturados, radica en la proporción de sulfatos es mayor que el resto, siendo las aguas sulfatadas.

Tabla 4.11: Especies minerales según índices de saturación en acuífero hidrotermal

Sitio	Época del año	Tipo de agua	Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Anhidrita	Aragonito	Calcita	Calcedonita	Dolomita	Hidróxido de hierro	Yeso	Halita	Hematita	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Talco
FAN03SM	Época seca	SO <sub>4</sub> -Na	1261	d	↓	↓	↓	x	↓	d	d	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	SO <sub>4</sub> -Na	1374	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	d	↓	↓	↓	↓
POP04SM	Época seca	SO <sub>4</sub> -Na	1059	d	↓	↓	↓	↓	x	d	d	x	↓	↓	↓
	Época lluviosa	SO <sub>4</sub> -Na	792	d	↓	↓	↓	↓	↓	d	d	↓	↓	↓	↓
POE07SM	Época seca	SO <sub>4</sub> -Na	851	d	↓	↓	↓	d	↓	d	d	↓	↓	↓	d
FAN08SM	Época seca	SO <sub>4</sub> -Na	1175	↓	↓	↓	↓	↓	d	d	d	↓	↓	↓	↓
	Época lluviosa	SO <sub>4</sub> -Na	780	↓	↓	↓	↓	↓	d	d	d	↓	↓	↓	↓

\* Disolución (d); Precipitación (↓); presencia no probable (x)

La variación de los minerales antes citados respecto a las épocas del año por sitio son las siguientes:

- FAN03SM: Sus aguas pueden arrastrar minerales producto de la meteorización de aragonito, calcita, calcedonita, hidróxido de hierro, hematita, cuarzo, silicio amorfo, en composición de sobresaturados.
- POP04SM: Tiene una composición similar a FAN03SM, pero sin presentar hematita ni hidróxido de hierro. Este presenta una dilución muy importante en época lluviosa, lo que indica que existe una recarga local por medio de fracturas, incidiendo en el mezclado del agua regional ascendente con el agua de los acuíferos someros que se encuentran en la zona.

- POE07SM. Presenta una composición muy similar a FAN03SM, pero presenta una posible dilución de hematita.
- FAN08SM: Presenta una composición muy similar a FAN03SM, POE07SM y POP04SM, pero no presenta minerales que aporten hierro.

Por otro lado, en la zona de La Reina se ha identificado en el mapa geológico un Dique Ácido, lo que puede interpretarse como rocas con alto contenido de temperatura por proceder de un flujo de magma que no se ha enfriado completamente. Este puede tener alguna conexión con los sistemas de acuíferos profundos, así como influencia en los acuíferos someros.

Así mismo, tampoco se descarta la posible existencia de capas de arcilla que actúen como barrera que desvía un flujo horizontal, otorgando un flujo vertical.

En resumen, las características hidrogeológicas del acuífero profundo hidrotermal es:

- Profundidad del acuífero: profundo;
- Recarga: Procede de un flujo regional no determinado;
- Descarga: Manantiales con agua que fluyen a través de fallas. Estos descargan al río Metayate;
- Dirección del flujo: vertical ascendente, a través de fracturas;
- Tipo de flujo del agua subterránea: regional;
- Tipo de agua: Muy mineralizada, con predominancia de  $\text{SO}_4^{2-}$  y Na, con actividad hidrotermal, pH alcalino; y,
- Fallamiento: comparte algunos de las fallas existentes para los acuíferos someros poros y fracturado.

#### **4.3.7. Acuífero del Pozo POE06SM**

El pozo excavado POE06SM, con aguas Cl-HCO<sub>3</sub>-Na-Ca, presentan una mineralización mediana (SDT: 0.78 g/L en época lluviosa, y 0.87 g/L en época seca), con una tendencia a reducirse la cantidad de calcio y a aumentar el sodio en la época lluviosa. También, la presencia de cloruros, sulfatos y magnesio en concentraciones moderadas en ambas épocas, indica que existe una posible influencia de flujos regionales no identificados.

Como se explicó anteriormente, se pueden dar los casos siguientes, o la combinación de los mismos para explicar la naturaleza de las aguas de este pozo: 1) El pozo no es utilizado con mucha frecuencia, lo que ocasiona una concentración de especies químicas por evaporación; y, 2), las aguas originalmente tienen un origen hidrotermal, que transita por estratos diferentes a los mostrados en el mapa geológico, lo que puede originar altas concentraciones de cloruros, sodio y magnesio. Ejemplo son capas de piroclastos que contienen biotitas:  $K(Mg,Fe)_3 (Al,Fe) Si_3O_{10} (OH,F)_2$

Con la información recolectada sólo se puede inferir que este sitio correspondería a un acuífero somero fracturado, con influencia hidrotermal no determinado. Para poder tener un mejor criterio, se requiere de realizar un estudio más precios en el área del caserío Los Conacastes y sus alrededores.

#### **4.3.8. Dinámica del agua subterránea en los acuíferos identificados**

Se verifican procesos siguientes: Procesos de dilución, disolución, precipitación, procesos de mezcla. Las Figuras 4.19 y 4.20, presentan la dirección de los flujos supuestos del agua subterránea, atendiendo a los resultados obtenidos de AQUACHEM, las fallas presentes, las formaciones existentes y a los acuíferos identificados. La figura 4.21 presenta la sección transversal del modelo conceptual de la subcuenca del río Metayate con los sistemas de flujo identificados, elaborado a partir de la sección A-B-C-D-E-F-G-H representada en las figuras antes mencionadas.

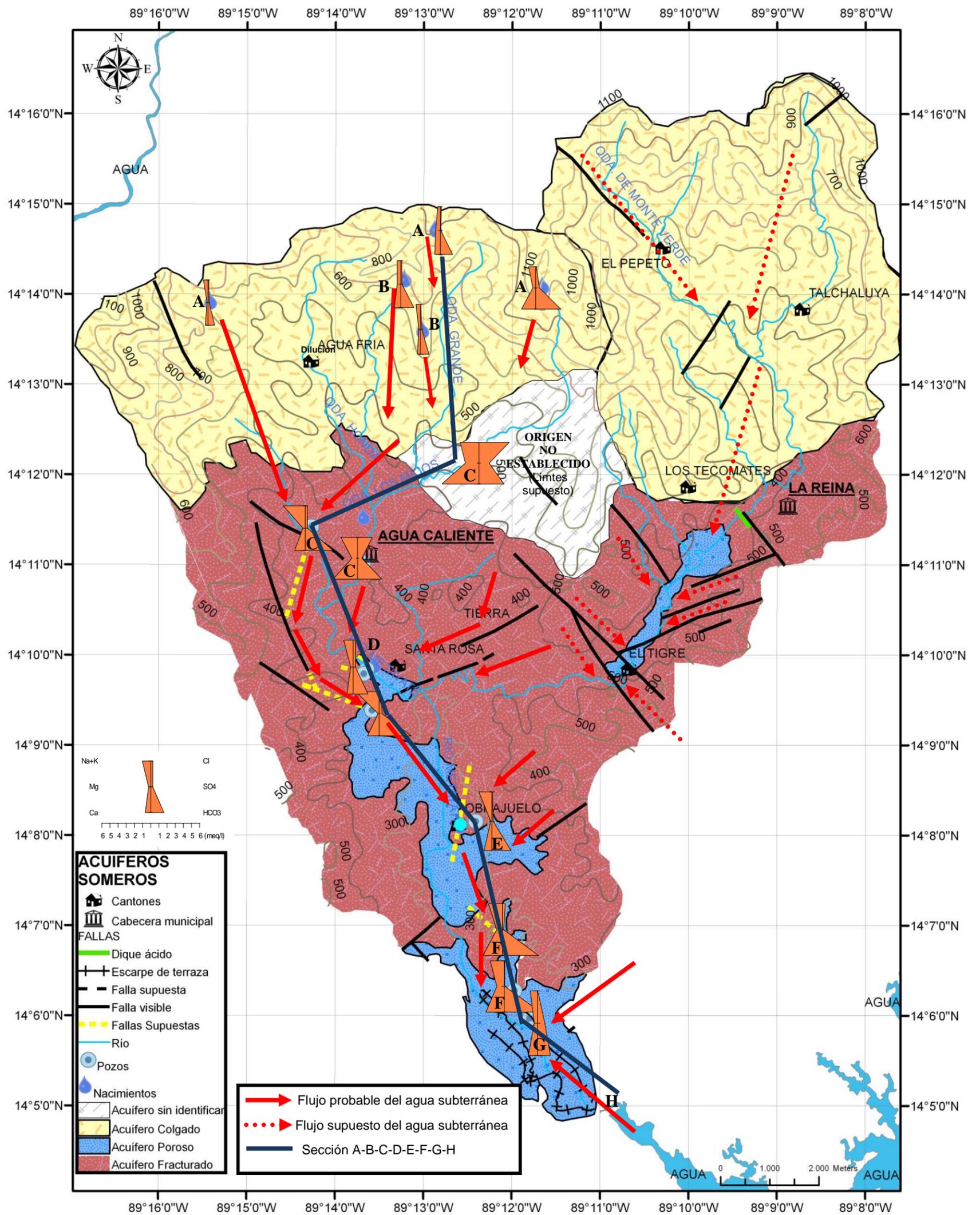


Figura 4.19: Acuíferos someros identificados y dinámica de flujo del agua subterránea

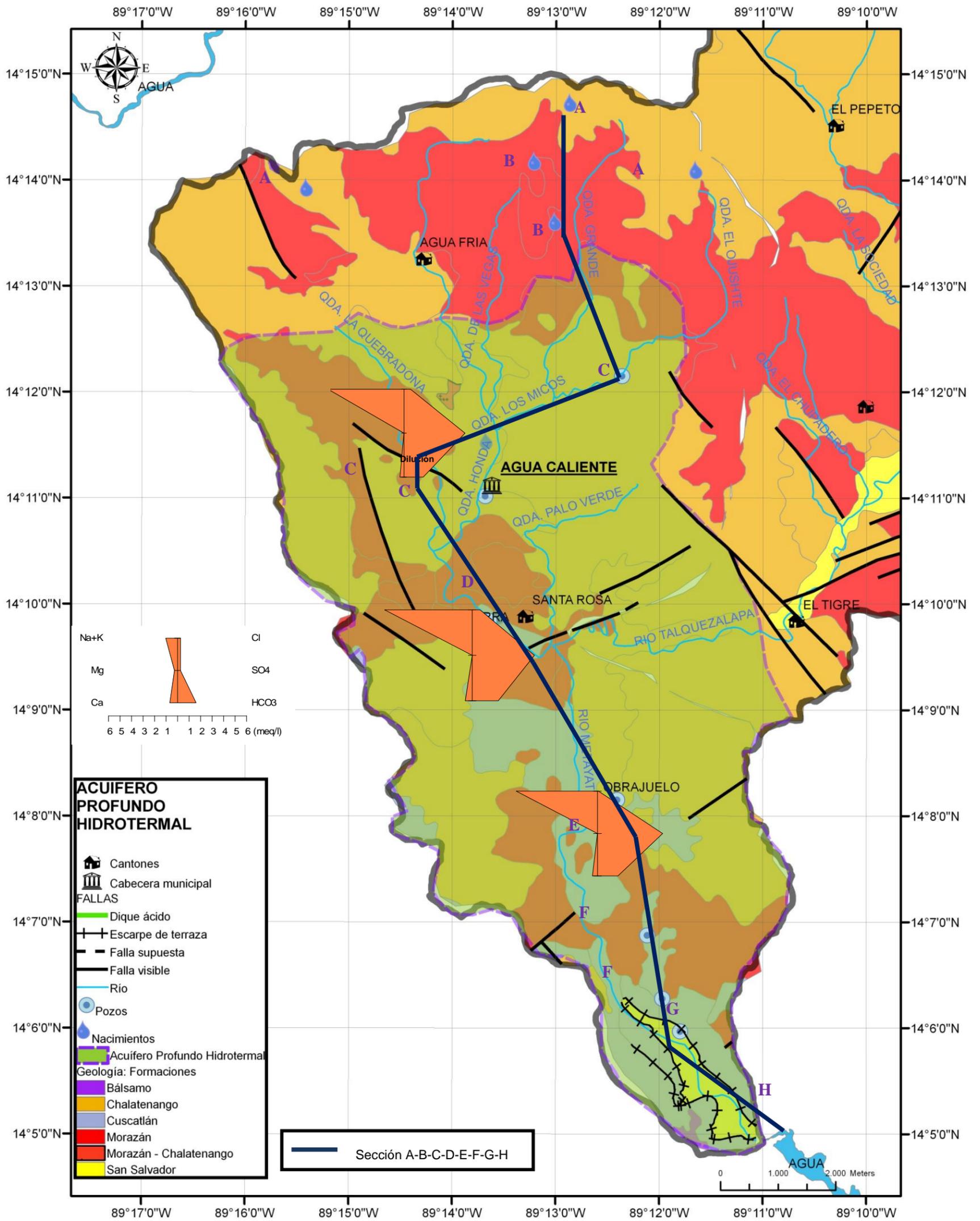


Figura 4.20: Acuífero profundo hidrotermal identificado (proyección). El flujo es vertical ascendente.

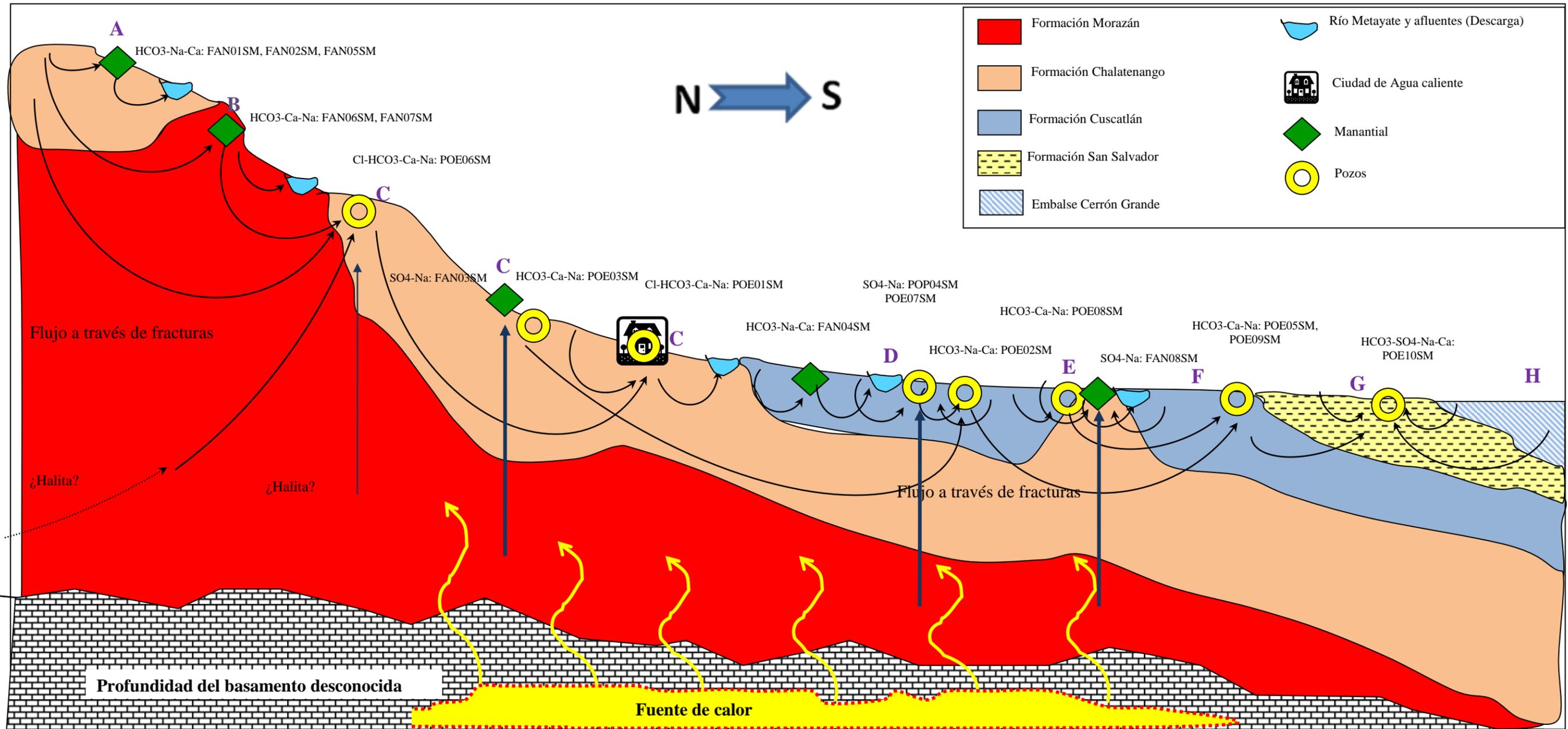


Figura 4.21: Dinámica de flujo de agua subterránea en acuífero someros y profundo hidrotermal

#### **4.4. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

Como primera aproximación, se comparan las lecturas obtenidas de cloruros, nitratos, oxígeno disuelto, Coliformes fecales y fosfatos, y se determina el comportamiento dinámico del mismo. Posteriormente se comparan todos los resultados obtenidos con la norma de calidad de agua potable NSO 13.01.08:01, Agua. Agua Potable.

##### **4.4.1. Contaminación del agua subterránea en la subcuenca**

###### **Presencia de nitratos**

A pesar que todas las muestras presentaron concentraciones de nitratos por abajo de la norma de agua para agua potable (45 mg/L), es evidente que algunos pozos y manantiales presentan una contaminación con nitratos, producto de un proceso de nitrificación o aporte directo por medio de fertilizantes.

Existe un proceso de nitrificación en aquellos pozos excavados próximos a fosas sépticas, particularmente el POE01SM, que está a 1 m y 3 m de dos fosas sépticas tipo letrina de fosa sin paredes recubiertas.

En la figura 4.25 se aprecia la existencia de disponibilidad de nitrógeno orgánico y amonio en la época seca, además de existir una proporción aproximadamente directa entre éstos compuestos y la producción de nitratos. Por lo anterior, algunos manantiales del acuífero somero colgado y del acuífero somero poroso presentan contaminación orgánica de tipo antropogénico, lo cual fue verificado en campo. Sin embargo, la presencia de oxígeno disuelto (OD) es muy baja (menor a 3.5 mg/L) en los manantiales de la los acuíferos someros colgados, por lo que hay poca producción de nitratos, no así en el caso del manantial FAN04SM que se encuentra en el acuífero somero poroso y presenta más de 4.5 mg/L de OD.

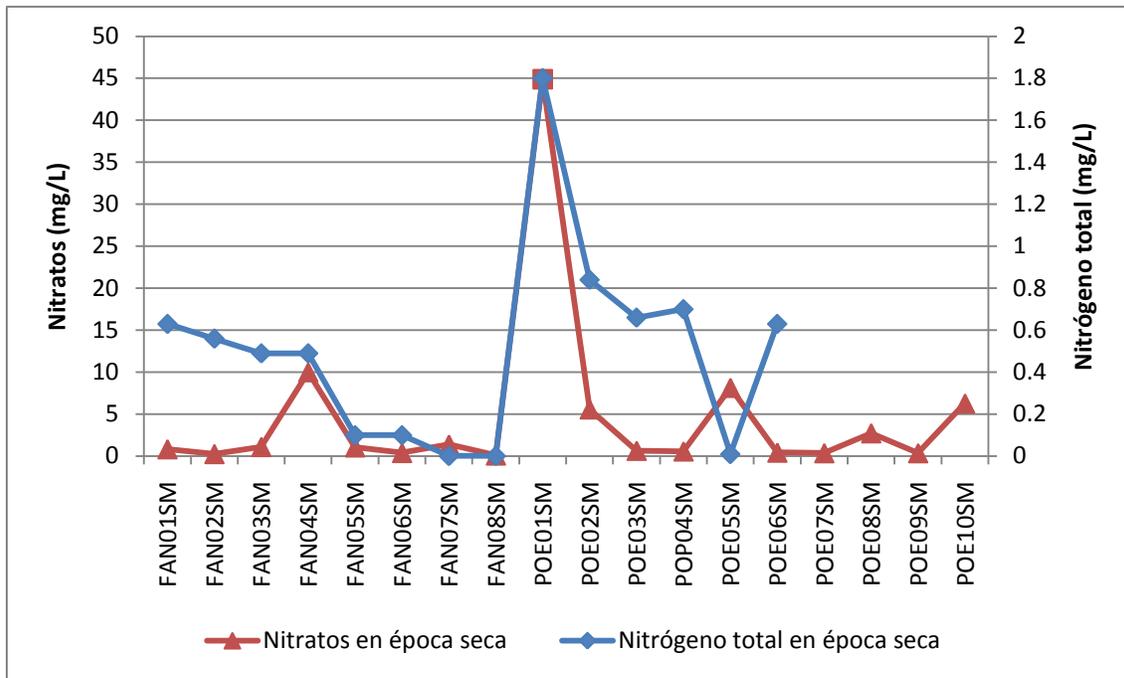


Figura 4.22: Gráfico de nitrógeno Kjendahl y nitratos en época seca en manantiales y pozos

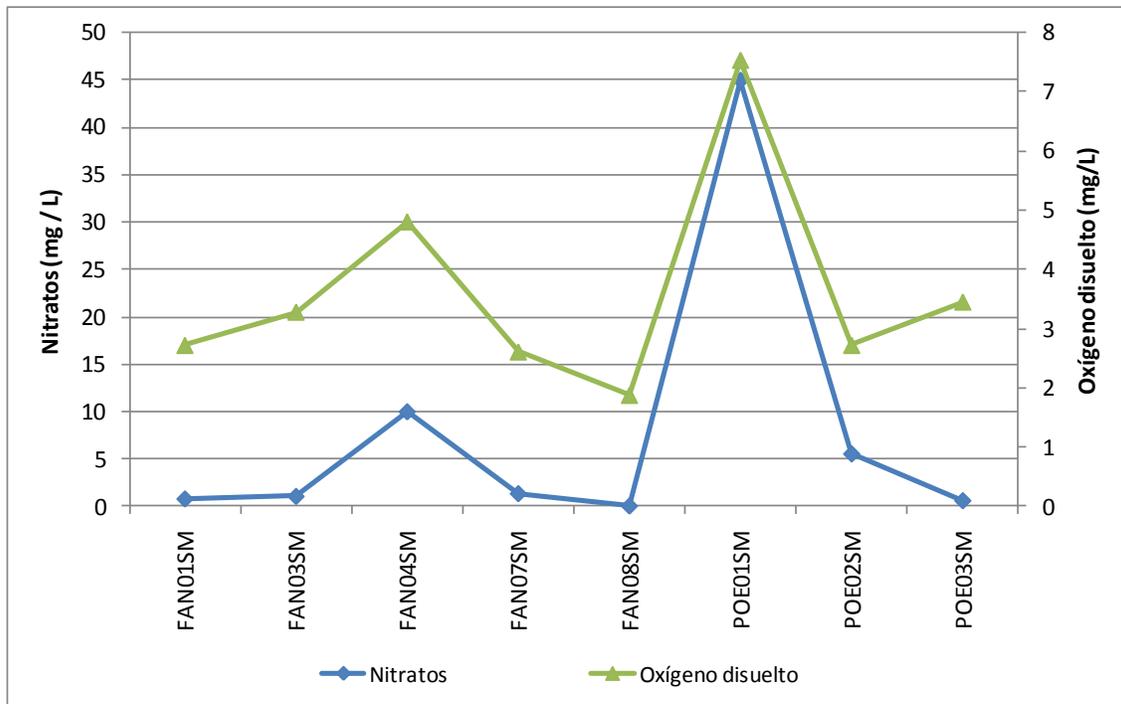


Figura 4.23: Gráfico de OD y nitratos en época seca en manantiales y pozos

En los pozos excavados existió una tendencia a presentar nitrógeno total que se transforma en nitrato gracias a la presencia de oxígeno, en mayor proporción en el pozo POE01SM. Similar a los manantiales, la nitrificación estuvo controlada principalmente por el OD, excepto en el POE03SM, que puede tener poca presencia de bacterias nitrificantes.

En época lluviosa disminuyó la cantidad de nitrógeno total disponible, esto afectó principalmente a los pozos excavados de los acuíferos porosos y fracturados, y a los manantiales del acuífero somero colgado. Sin embargo, para los manantiales FAN04SM y FAN05SM, la fuente de nitratos puede provenir de la escorrentía superficial, la cual recoge aguas de terrenos donde existen cultivos, así como actividad ganadera.

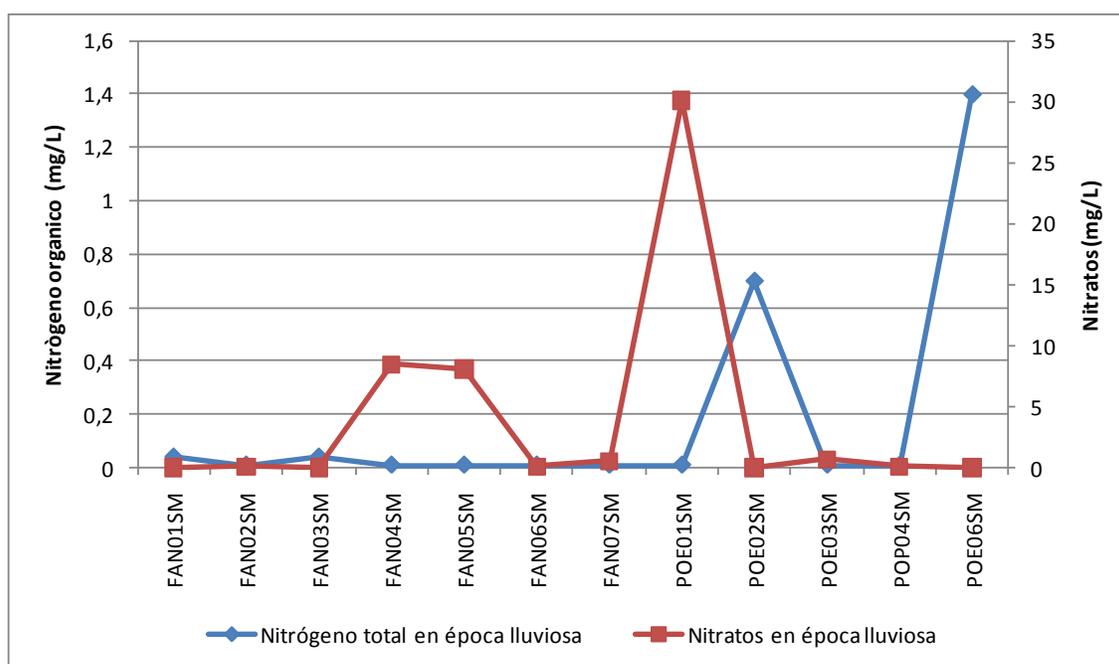


Figura 4.24: Gráfico de Nitrógeno total y nitratos en época lluviosa en manantiales y pozos

Respecto a los cloruros, se evidenció una fuerte contaminación antropogénica en POE01SM, ya que presenta concentraciones elevadas de nitratos. Sin embargo, el pozo POE06SM presenta altas concentraciones de cloruros en época seca, pero bajas de nitratos, por lo que aparentemente no tiene conexión con el resto de acuíferos.

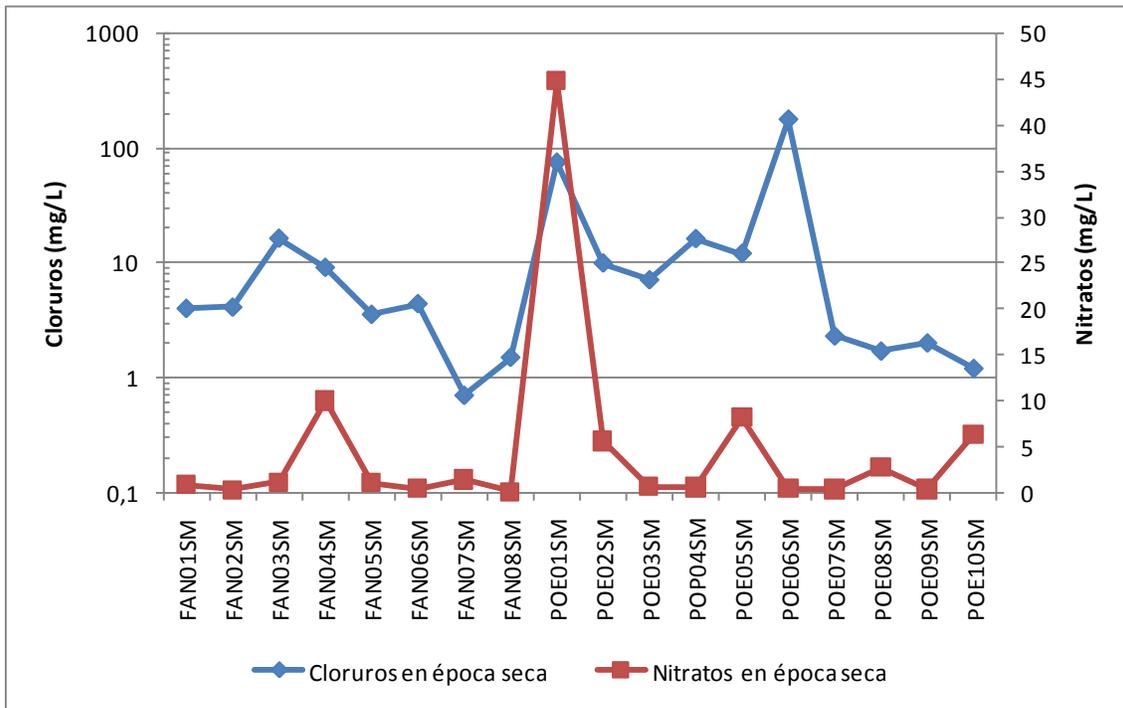


Figura 4.25: Gráfico de cloruros y nitratos en época seca en manantiales y pozos

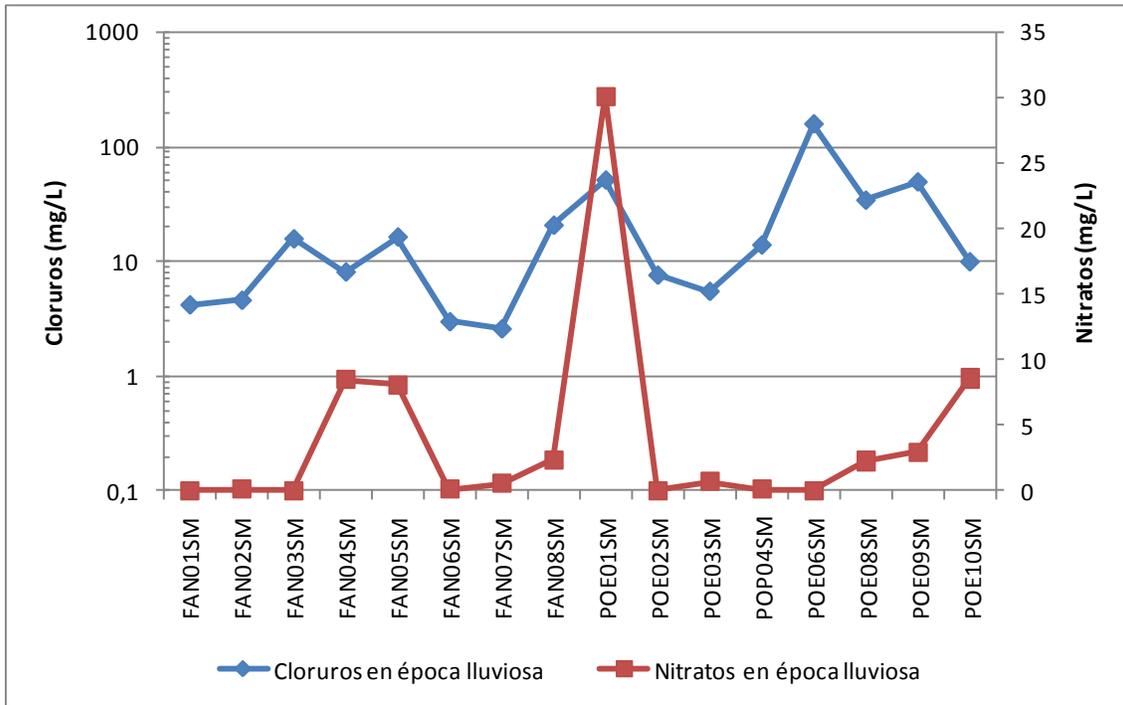


Figura 4.26: Gráfico de cloruros y nitratos en época lluviosa en manantiales y pozos

En época lluviosa, hay un incremento en la cantidad de cloruros y nitratos en el acuífero poroso, sin embargo en el resto de acuíferos los cloruros se mantienen casi sin alteraciones significativas (Figura 4.28).

### Presencia de Coliformes totales y Coliformes fecales

La presencia de Coliformes fecales y totales está relacionado a aguas negras por medio de fosas de hoyo cercanos a pozos (POE01SM), presencia de ganado y crecidas del río Metayate (FAN04SM). Sólo los manantiales y pozos que pertenecen al acuífero profundo hidrotermal no presentaron contaminación. Existe además una proporción directa con la cantidad de nitrato presente en algunos sitios.

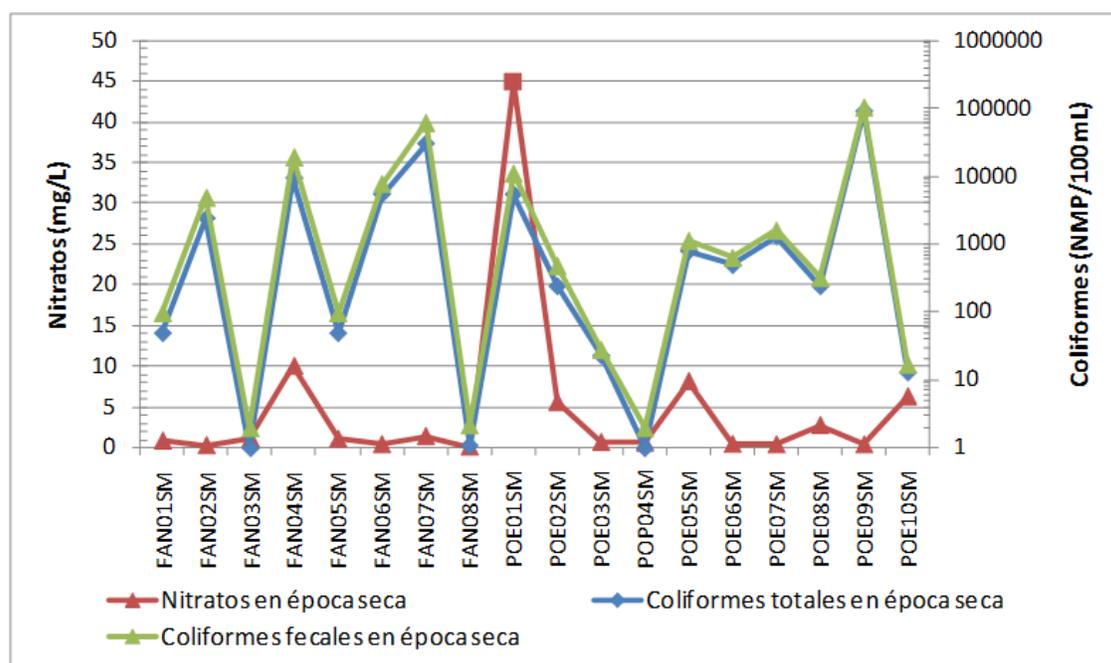


Figura 4.27: Gráfico de Coliformes y nitratos en época seca en manantiales y pozos

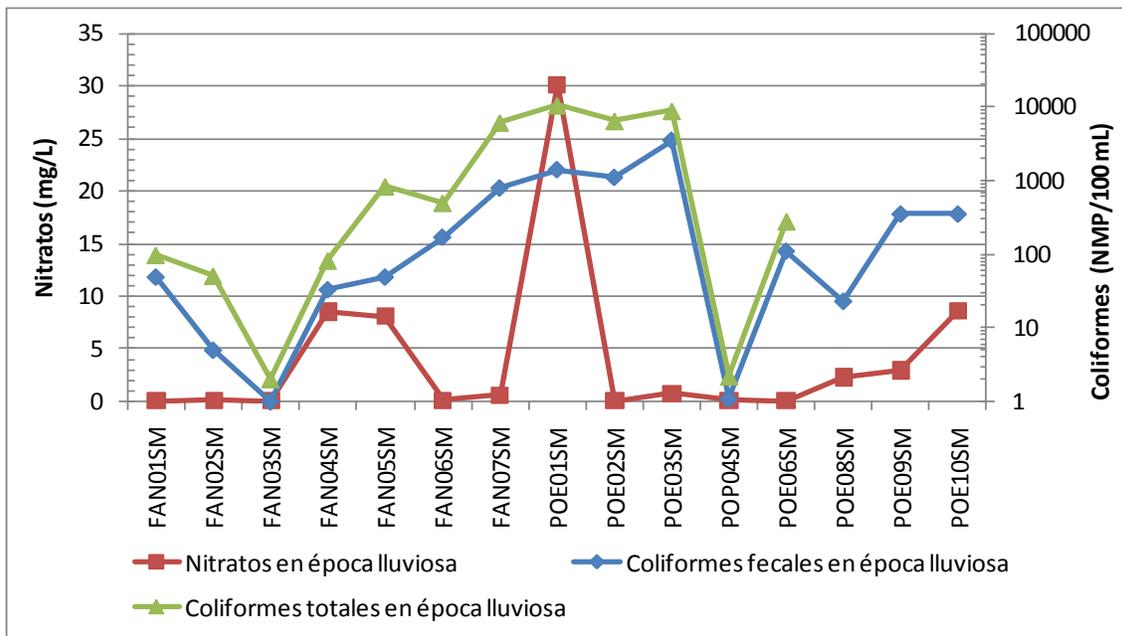


Figura 4.28: Gráfico de Coliformes y nitratos en época lluvia en manantiales y pozos

### Presencia de fosfatos

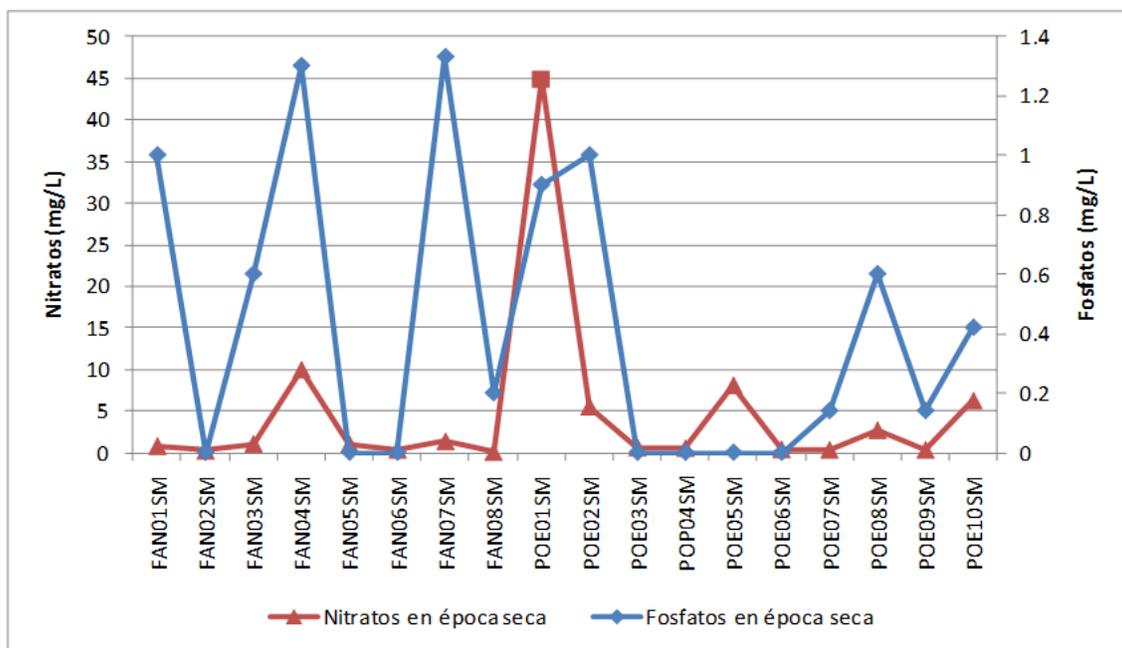


Figura 4.29: Gráfico de nitratos y fosfatos en época seca en manantiales y pozos

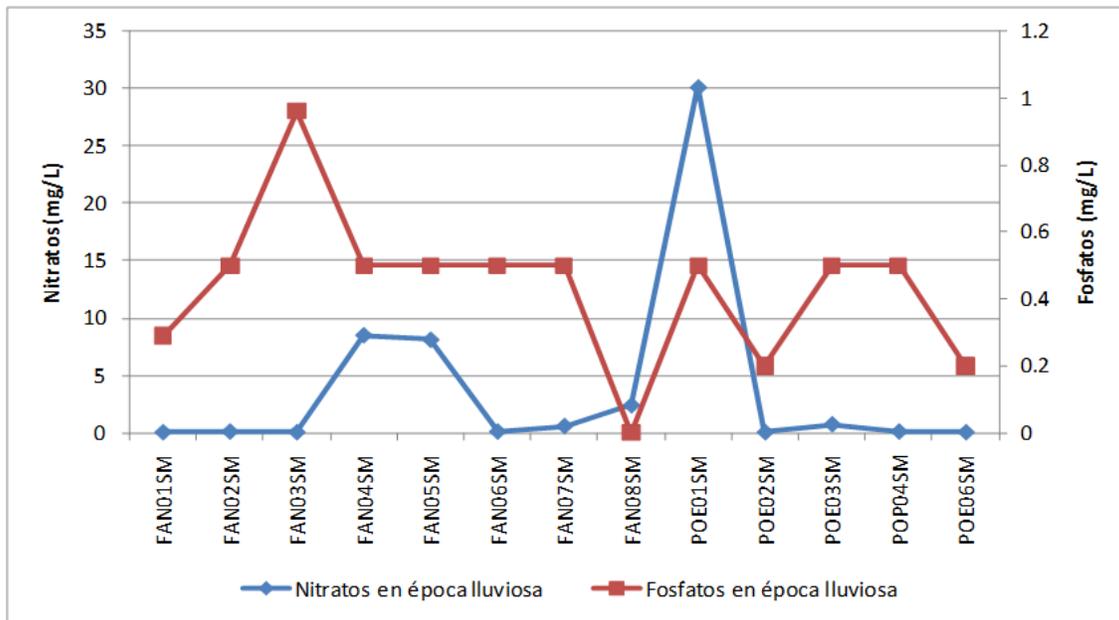


Figura 4.30: Gráfico de nitratos y fosfatos en época lluvia en manantiales y pozos

La mayoría de las muestras presentaron concentraciones de fosfatos que en algunos casos tiene relación con la presencia de nitratos de origen orgánico e inorgánico (fertilizantes).

A continuación, se detalla los parámetros que no cumplieron con la norma de agua potable, de acuerdo al acuífero.

#### 4.4.2. Calidad del agua en acuíferos someros colgados

**Coliformes:** El principal contaminante es el microbiológico, debido a la presencia de Coliformes fecales y Coliformes totales, con valores entre 5 y 30,000 NMP/100ml.

En época lluviosa, los niveles de Coliformes totales y fecales fueron diluidas por la recarga local, excepto FAN01SM y FAN05SM, que tendieron a ser casi constantes.

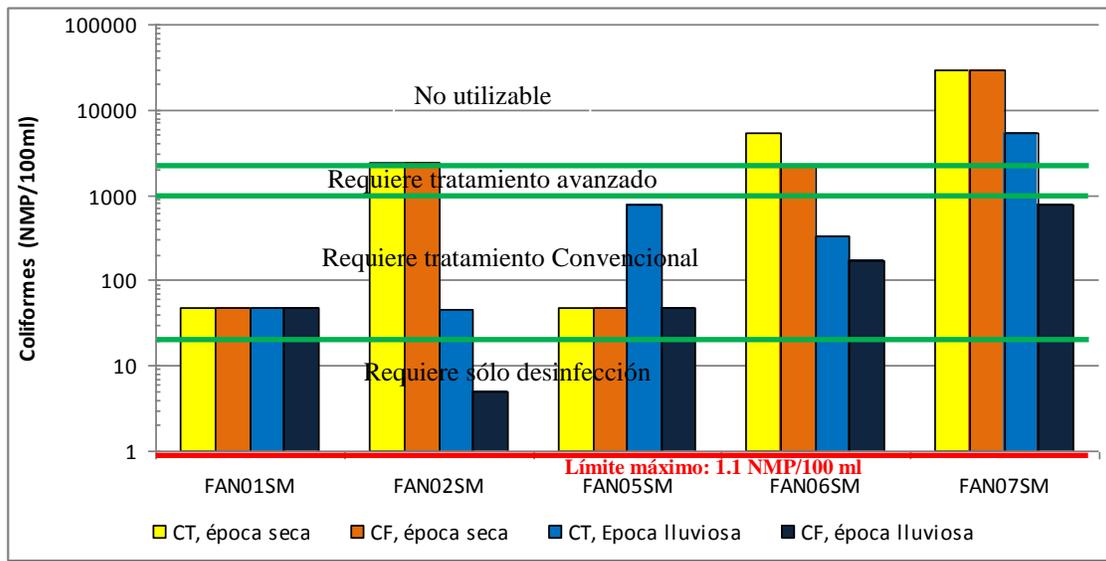


Figura 4.31: Gráfico Coliformes fecales y totales en acuíferos someros colgados

Los niveles de Coliformes indican que se requeriría un tratamiento convencional y avanzado para volver potable estas aguas, excepto FAN07SM en la época seca, ya que tiene una mala calidad para su consumo humano (Fuente: “Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de aguas superficiales”, Costa Rica, 2007).

**Fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ):** Estos fueron mayores en época seca, en los sitios FAN01SM (0.29 y 1 mg/l) y FAN07SM (<math><0.5</math> y 1.33 mg/l), correspondiendo éstos a aguas con poca mineralización. El resto de sitios se mantuvo por abajo de 0.5 mg/L en ambas épocas.

La presencia de este anión se debe a actividades de uso de fertilizantes, principalmente en los dos sitios con mayor presencia de este compuesto en época seca. En época lluviosa, se da un arrastre de nutrientes por medio de escorrentía superficial.

**Hierro:** El manantial FAN07SM en el caserío Ojos de Agua, presentó concentraciones de hierro mayores a la norma, establecida en 0.3 mg/l. Este manantial se encuentra a la orilla de una calle de tierra, por lo que se descarta que la fuente de ésta no sea solamente natural, sino antropogénico. El resto de sitios presenta concentraciones de 0 a 0.35 mg/l.

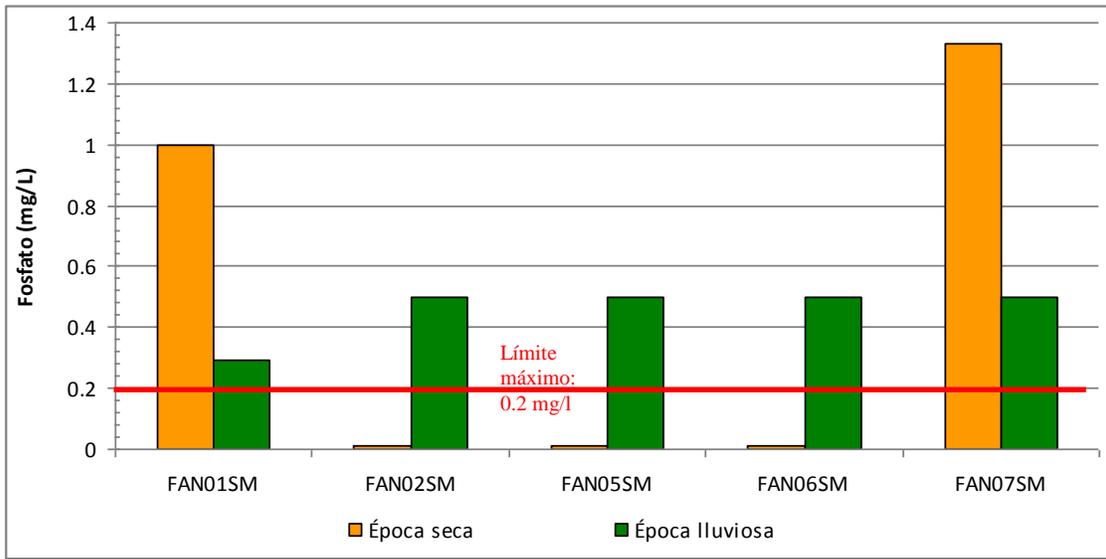


Figura 4.32: Gráfico de fosfatos en acuíferos someros colgados

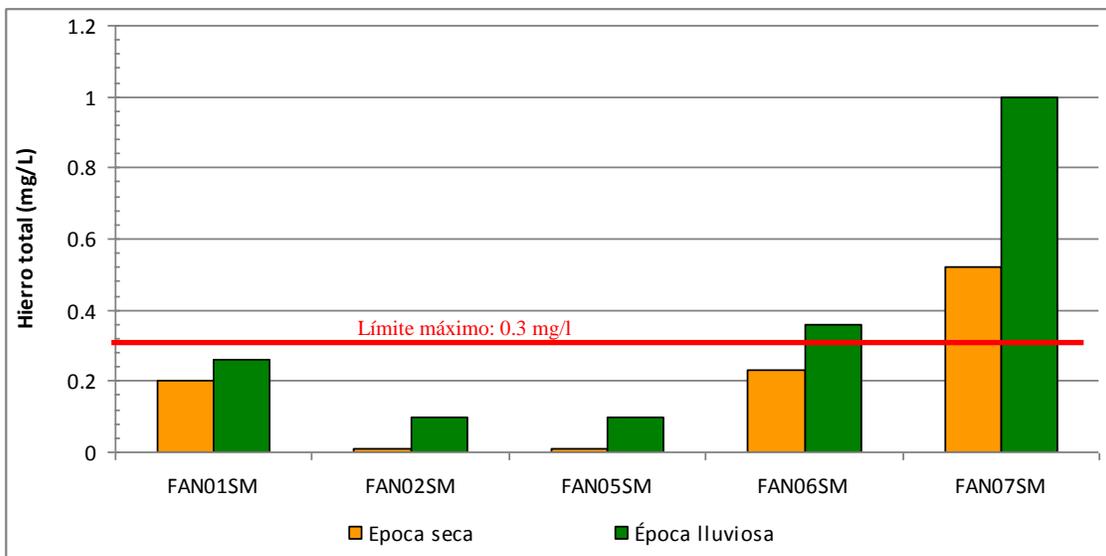


Figura 4.33: Gráfico de hierro total en acuíferos someros colgados

En todos los sitios, se aprecia un incremento en la cantidad de hierro total en la época lluviosa, debido al arrastre de contaminantes por escorrentía superficial.

**pH:** Presentó valores fuera de los límites establecidos para agua potable de 6 a 8.5 en FAN01SM, el cual presentó valores entre 5.72 y 5.95 en época seca y lluviosa,

respectivamente. El manantial FAN07SM presentó 5.9 en época seca, pero cumplió con la norma de referencia en época lluviosa. El resto de manantiales cumplieron con la norma.

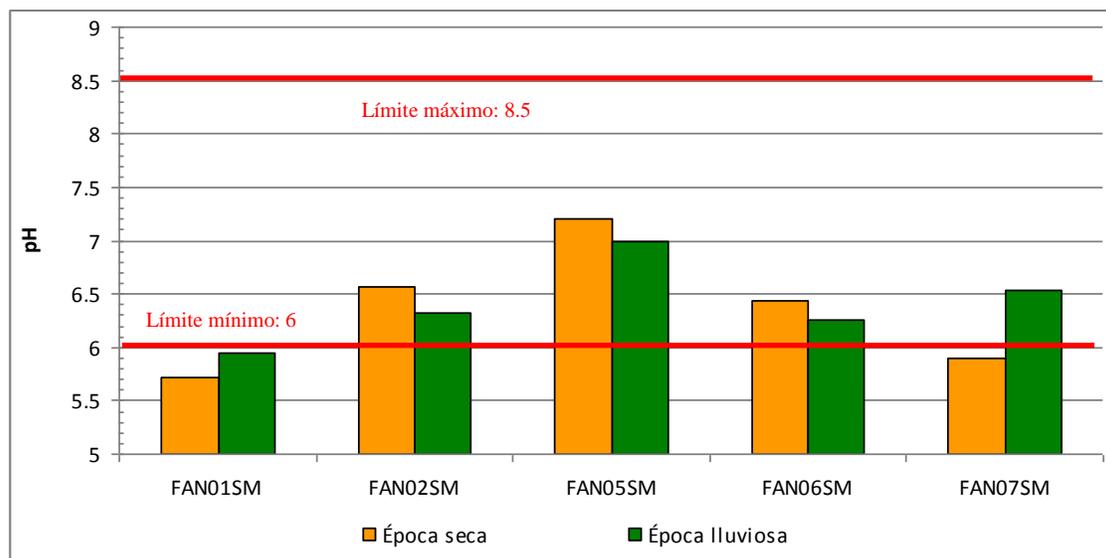


Figura 4.34: Gráfico pH en acuíferos someros colgados

#### 4.4.3. Calidad del agua en acuífero somero poroso

**Coliformes:** Igual al acuífero somero colgado, el principal contaminante es el microbiológico, debido a la presencia de Coliformes fecales y Coliformes totales, en la época seca y lluviosa.

Sólo el POE10SM presentó una calidad adecuada del agua para ser tratada con simple desinfección. POE05SM y POE08SM requieren un tratamiento convencional, así como FAN04SM en época lluviosa. El pozo POE09SM y FAN04SM en época seca, presentaron agua con mala calidad.

En época lluviosa, la presencia de Coliformes disminuye considerablemente, debido a las condiciones geológicas (suelos con permeabilidad media a baja). La principal fuente de este contaminante fue la cercanía a fosas sépticas (POE05SM, POE08SM) y potreros (FAN04SM).

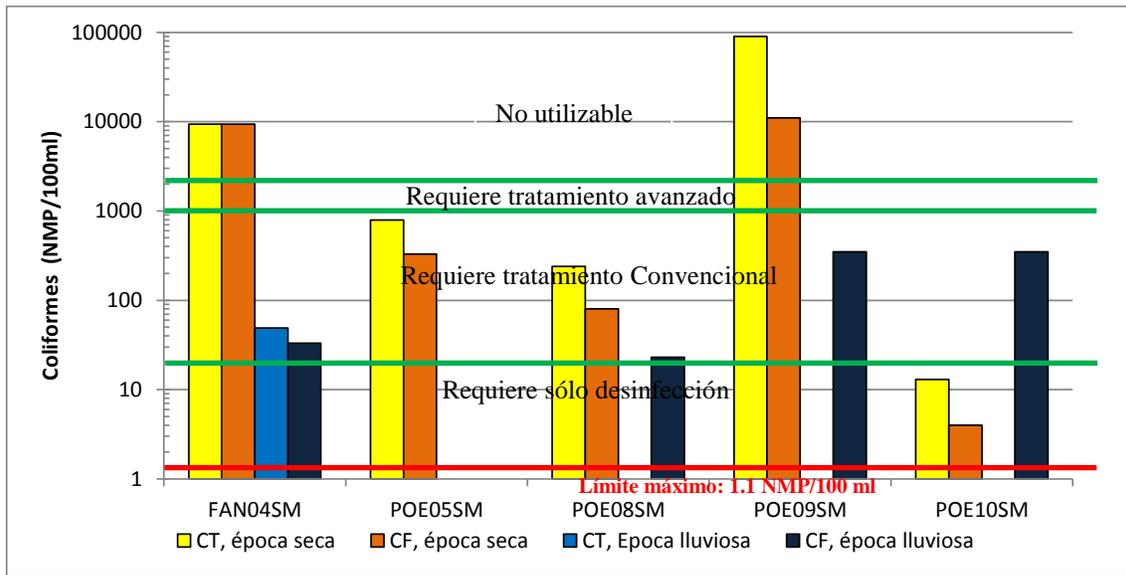


Figura 4.35: Gráfico de Coliformes en acuífero somero poroso

**Fosfatos:** Presentaron concentraciones similares a los acuíferos someros colgados. El sitio con los mayores niveles se presentaron el manantial FAN04SM (<0.5 y 1.3 mg/l), seguido del pozo POE08SM presentó 0.6 mg/l en época seca. Ambos sitios están próximos a zonas de cultivo de maíz, por lo que la fuente de la contaminación es la actividad agropecuaria.

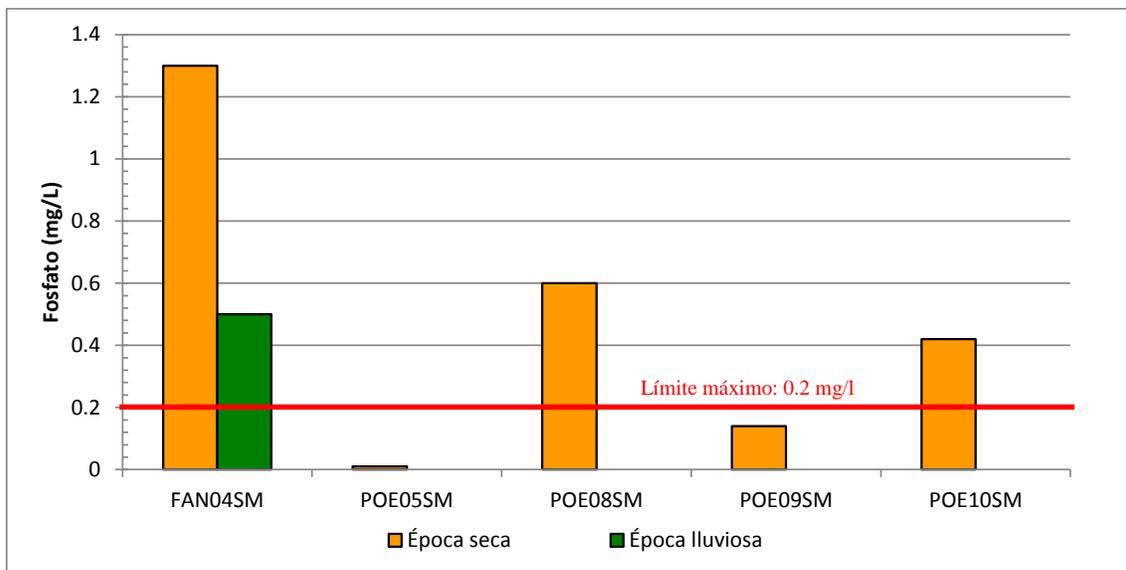


Figura 4.36: Gráfico de fosfatos en acuífero somero poroso

**Temperatura:** Fue mayor al límite superior de la norma de referencia, 30°C, en todos los sitios monitoreados en época seca. Esta se debe a la presencia de actividad hidrotermal en formaciones geológicas (Morazán) que se alojan bajo formaciones recientes (Cuscatlán). En época lluviosa, dichos niveles descienden a valores adecuados a la norma de referencia, con excepción del manantial FAN04SM, más afectado por la influencia hidrotermal.

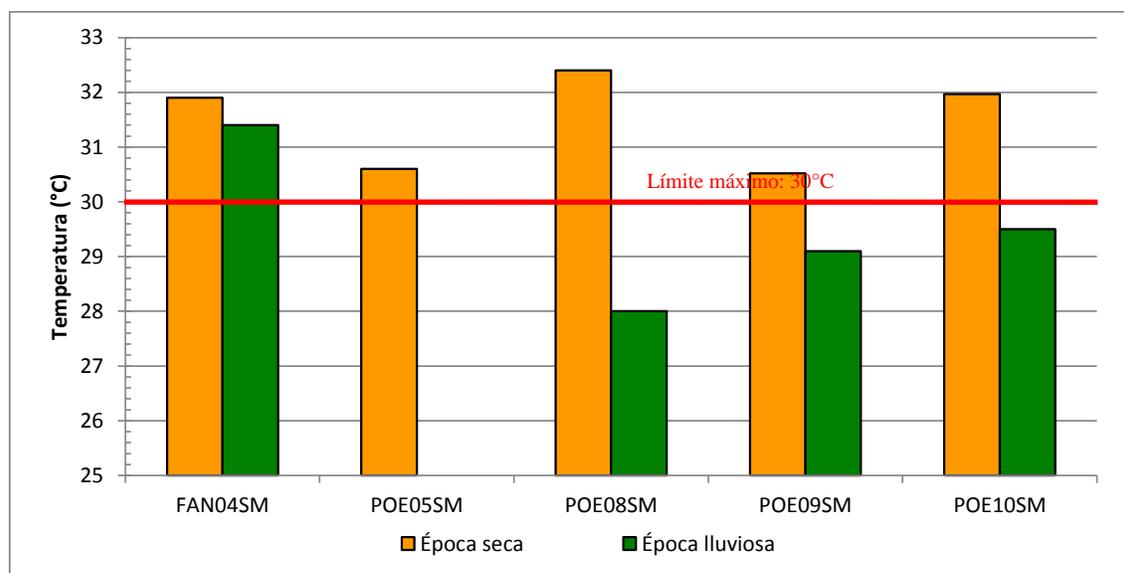


Figura 4.37: Gráfico de Temperatura en acuífero somero poroso

**Conductividad Eléctrica (CE):** Presentó valores fuera de norma en POE09SM.

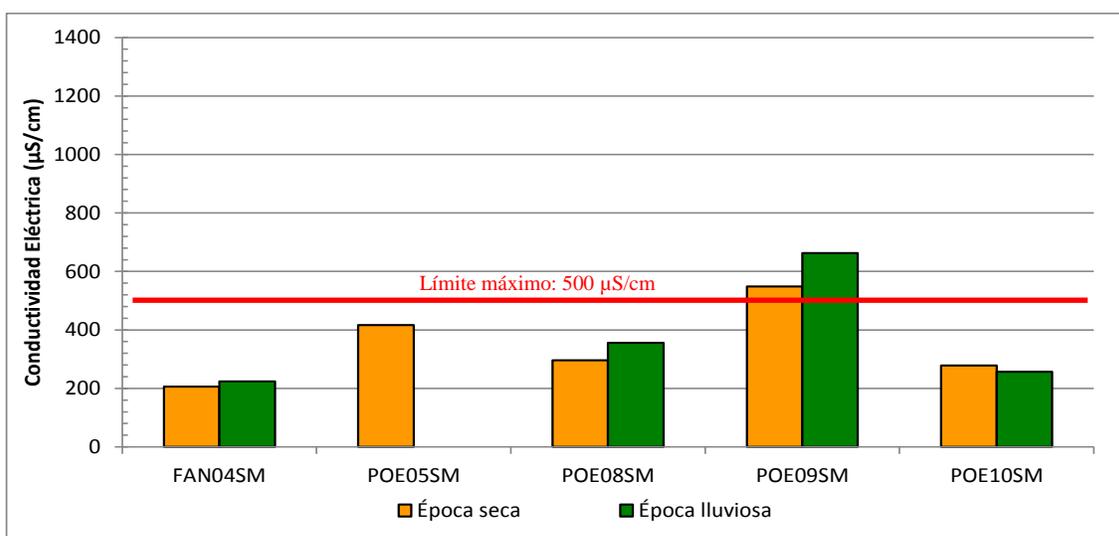


Figura 4.38: Gráfico de CE en acuífero somero poroso

Se aprecia el efecto de disolución de minerales en la época lluviosa, excepto en POE10SM, el cual puede estar influenciado por el nivel del embalse Cerrón Grande y el aporte de otros acuíferos de la zona, ya que pertenece a una formación muy reciente (San Salvador).

#### 4.4.4. Calidad del agua en acuífero somero fracturado

**Coliformes:** También, como los pozos y manantiales de los acuíferos someros colgados y del acuífero somero poroso, existe contaminación microbológica. Las variaciones entre épocas del año fueron pocas, excepto en POE03SM, el cual se incrementa en un factor de 100 en la época lluviosa, debido a su cercanía a un río.

El tratamiento requerido va desde simple desinfección (POE03SM en época seca), convencional (POE06SM en época seca y lluviosa, y POE02SM en época seca), hasta avanzado (POE01SM y POE02SM en época lluviosa). Sin embargo, sitios como POE01SM y POE03SM en época seca presentaron una mala calidad del agua debido al alto contenido de Coliformes.

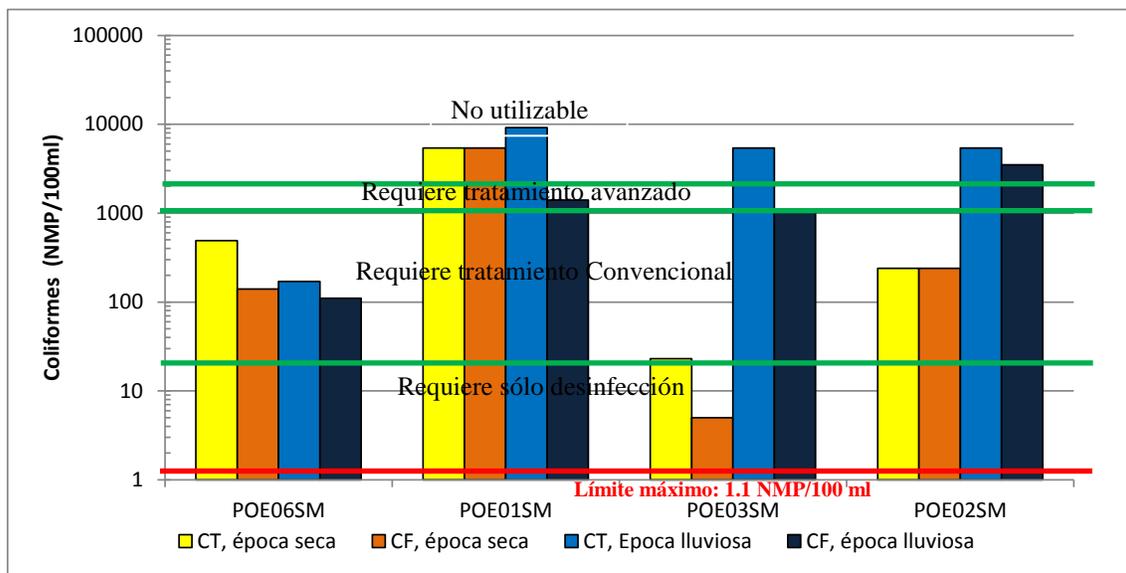


Figura 4.39: Gráfico de Coliformes en acuífero somero fracturado

**Fosfato:** El POE01SM presentó valores arriba de 0.2 mg/l en el monitoreo en época secas y lluviosa, por su cercanía a fosas sépticas de la ciudad de Agua Caliente; el POE02SM presentó un valor fuera de norma en época seca, y POE03SM en época lluviosa, ambos sitios situados cercanos a zonas de cultivos.

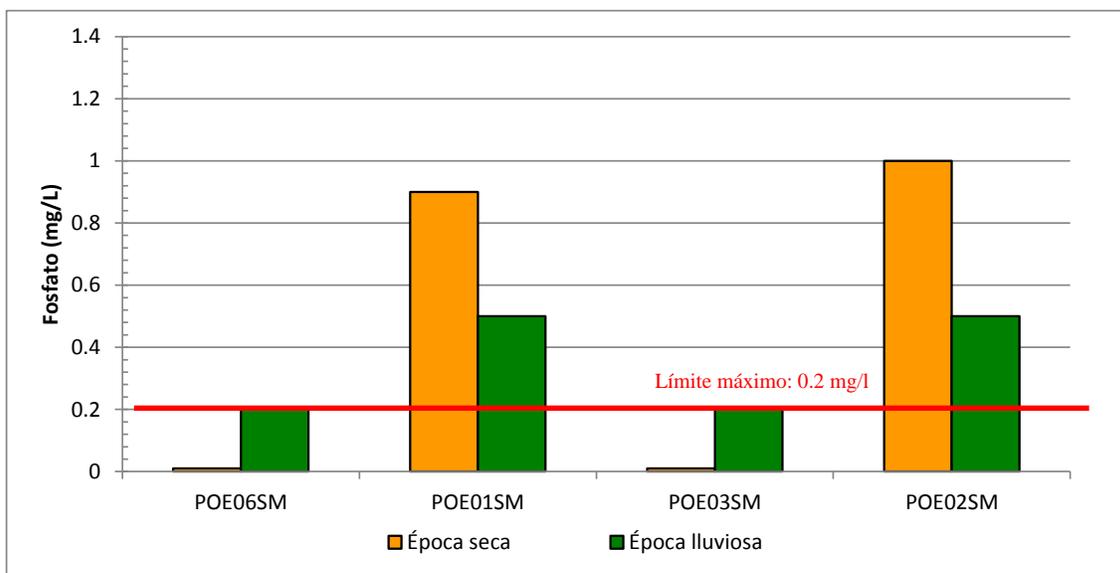


Figura 4.40: Gráfico de fosfatos en acuífero somero fracturado

**Potasio:** A diferencia de los otros acuíferos estudiados, presentó valores fuera de norma en POE06SM y POE01SM.

El comportamiento entre ambos es proporcional, lo que indica que pueden estar conectados por medio de fallas, reflejando ambos el mismo efecto de dilución por el agua lluvia.

El resto de sitios presentaron valores que cumplieron con la norma, reflejando una tendencia a disolver minerales con potasio en el sentido del gradiente hidráulico: del POE03SM a POE02SM, a través de fallas.

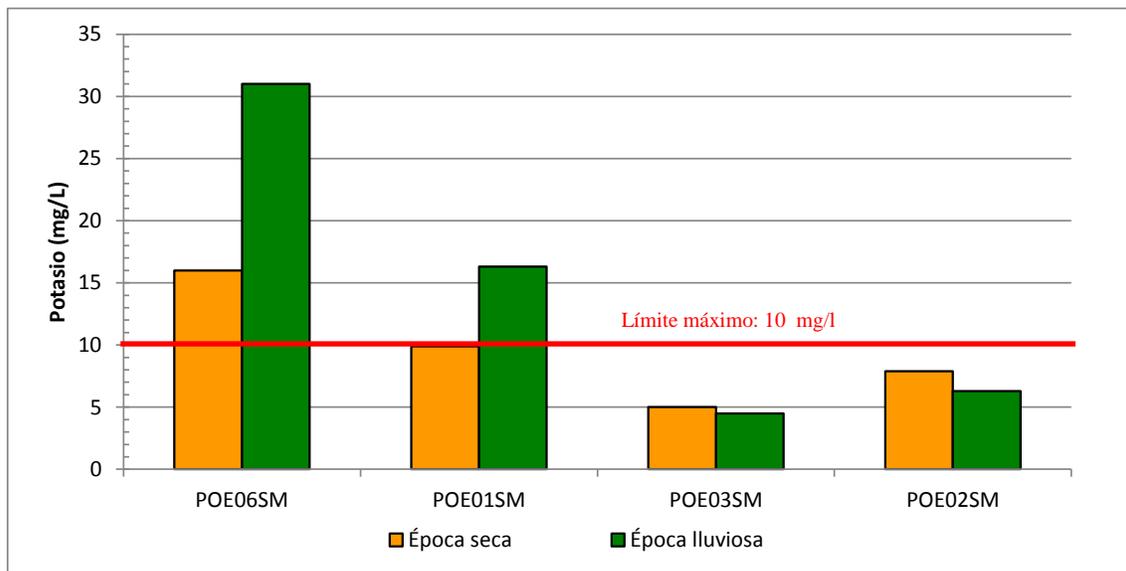


Figura 4.41: Gráfico de potasio en acuífero somero fracturado

**Hierro total:** En época lluviosa hubo hierro total en POE03SM, POE02SM, superando en el segundo sitio la norma de agua potable. Hay enriquecimiento en hierro en el sentido del gradiente hidráulico, es decir de norte a sur, en época lluviosa. La disolución de hierro en el agua no es significativa.

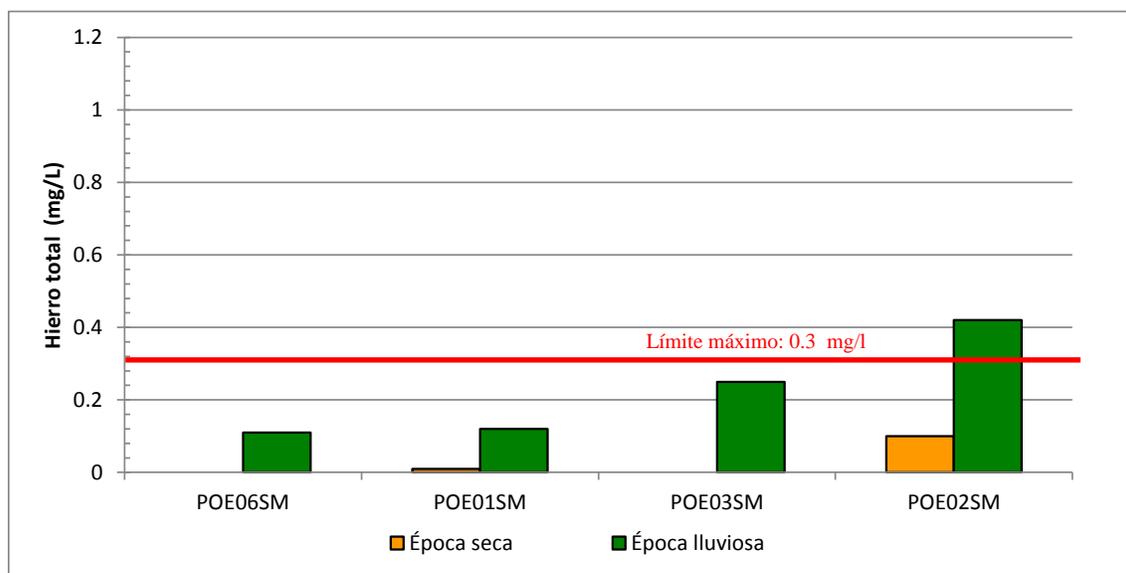


Figura 4.42: Gráfico hierro total en acuífero somero fracturado

**Sílice:** en época seca tiende a ser similar en todos los sitios, pero se incrementó en época lluviosa en las partes altas de este acuífero (POE06SM y POE03SM). Existe una gran disolución de sílice en POE03SM, sobrepasando el límite máximo de 60 mg/l, debido a la cercanía a un río y a la presencia de fracturas y fallas locales.

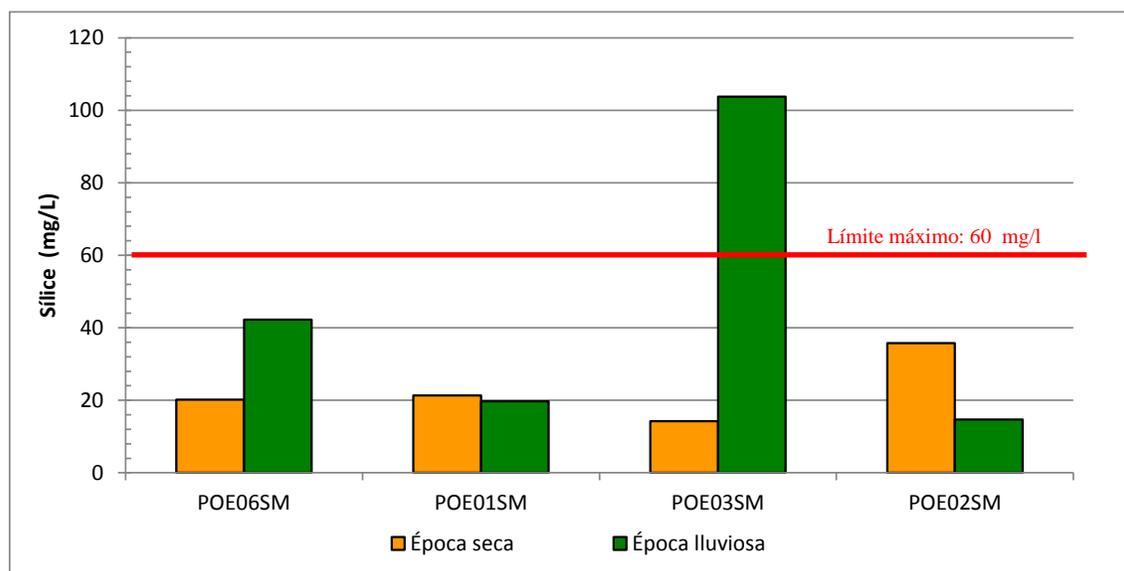


Figura 4.43: Gráfico sílice en acuífero somero fracturado

**Nitrógeno total:** Aparece en el POE06SM y POE01SM, estando afectados por la presencia de fosas sépticas, donde existe oxidación de la urea en nitratos (proceso de nitrificación).

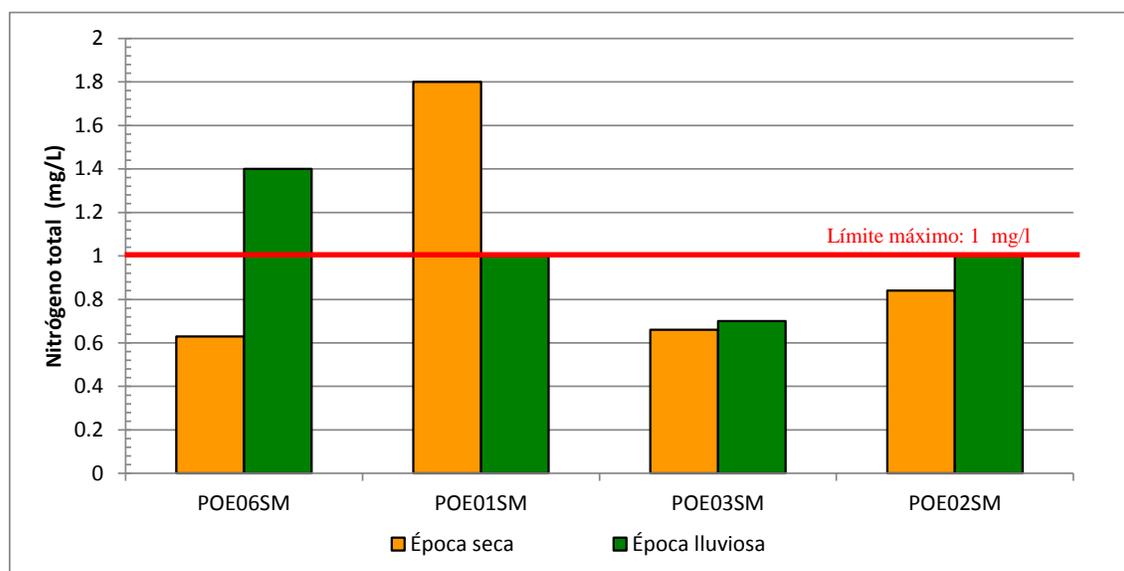


Figura 4.44: Gráfico de nitrógeno total en acuífero somero fracturado

**Calcio, Dureza (calculado como  $\text{CaCO}_3$ ) y CE:** Éstos disminuyen con la elevación, es decir que hay procesos de precipitación al disminuir el gradiente hidráulico, así como dilución.

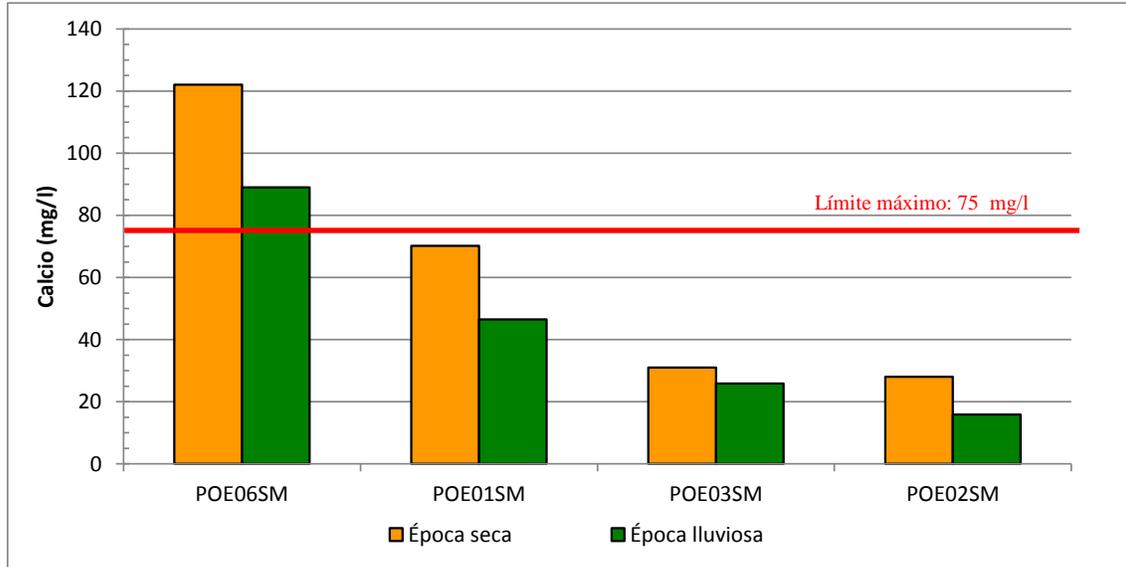


Figura 4.45: Gráfico de calcio en acuífero somero fracturado

El POE06SM presentó concentraciones de calcio (época seca y lluviosa) y dureza (época seca) que sobrepasaron la norma (75 mg/l y 500 mg/l, respectivamente). En la época lluviosa, disminuye la cantidad de minerales disueltos, igual que la dureza.

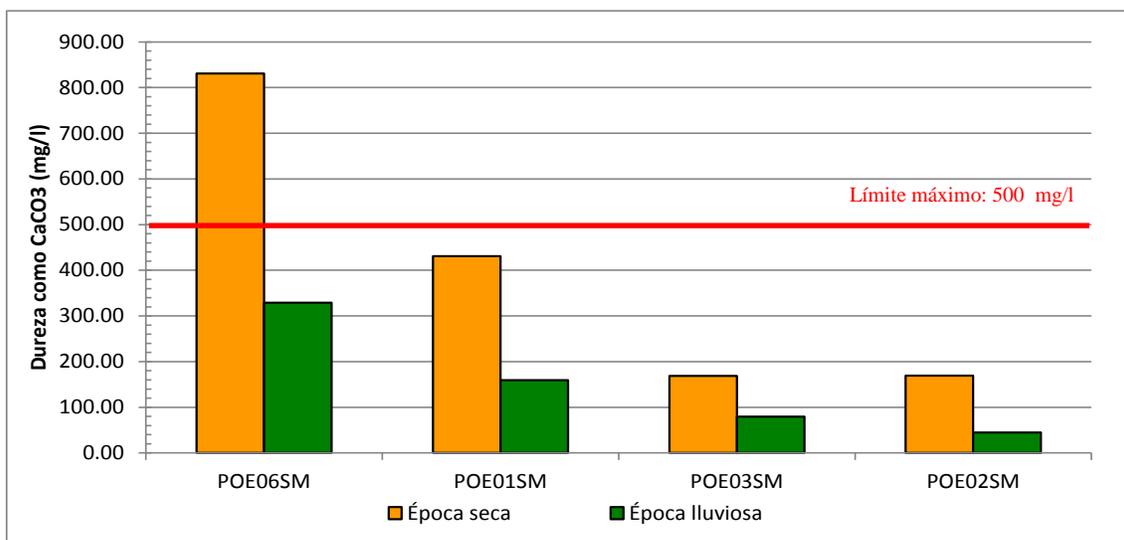


Figura 4.46: Gráfico de dureza como  $\text{CaCO}_3$  en acuífero somero fracturado

Respecto a la CE, en la época seca los sitios POE06SM, POE01SM y POE03SM presentaron niveles que sobrepasaron la norma de referencia (500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). En época lluviosa, sólo los pozos POE06 y POE01 presentaron valores de CE arriba de la norma.

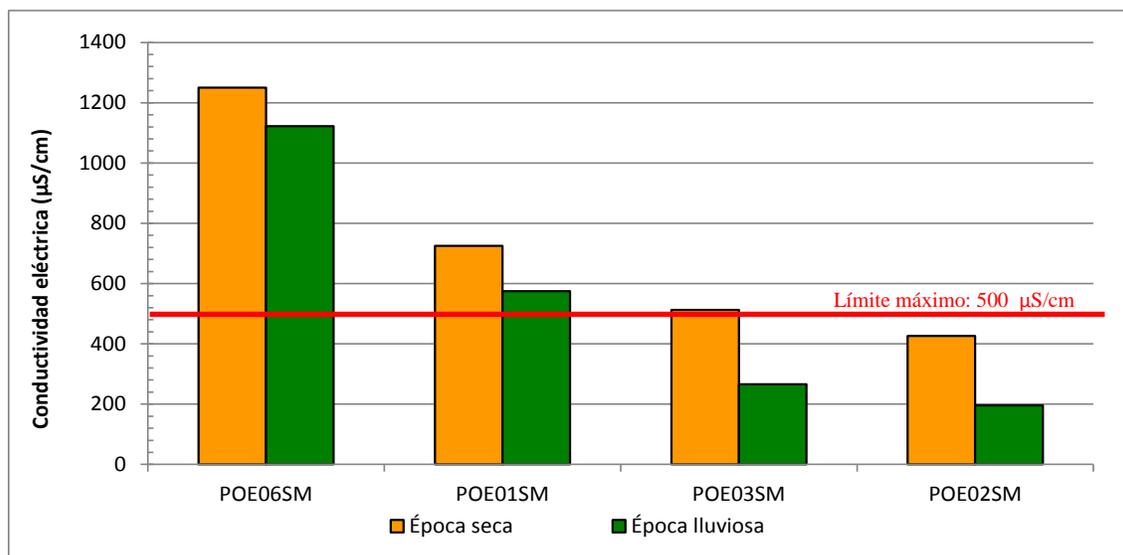


Figura 4.47: Gráfico de CE en acuífero somero fracturado

**Temperatura:** Influenciada principalmente por la actividad hidrotermal de la formación Morazán y la temperatura ambiental, principalmente en la ciudad de Agua Caliente.

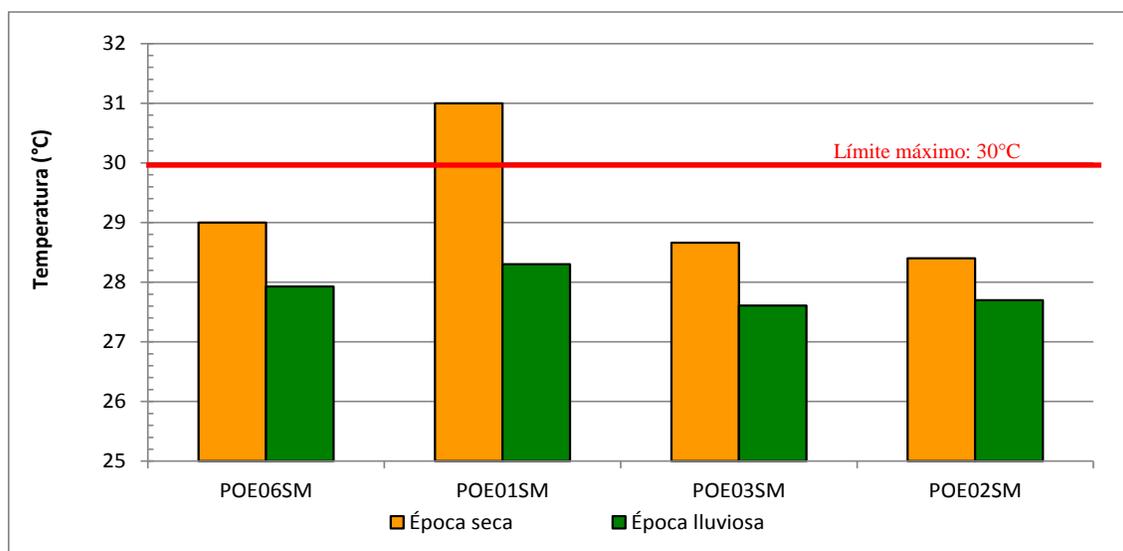


Figura 4.48: Gráfico de Temperatura en acuífero somero fracturado

#### 4.4.5. Calidad del agua en acuífero profundo hidrotermal

**Coliformes:** A diferencia del resto de sitios, no se detectó contaminación microbiológica debido a las altas temperaturas presentes, excepto en POE07SM, el cual requeriría de un tratamiento convencional para que cumpla con la norma de referencia.

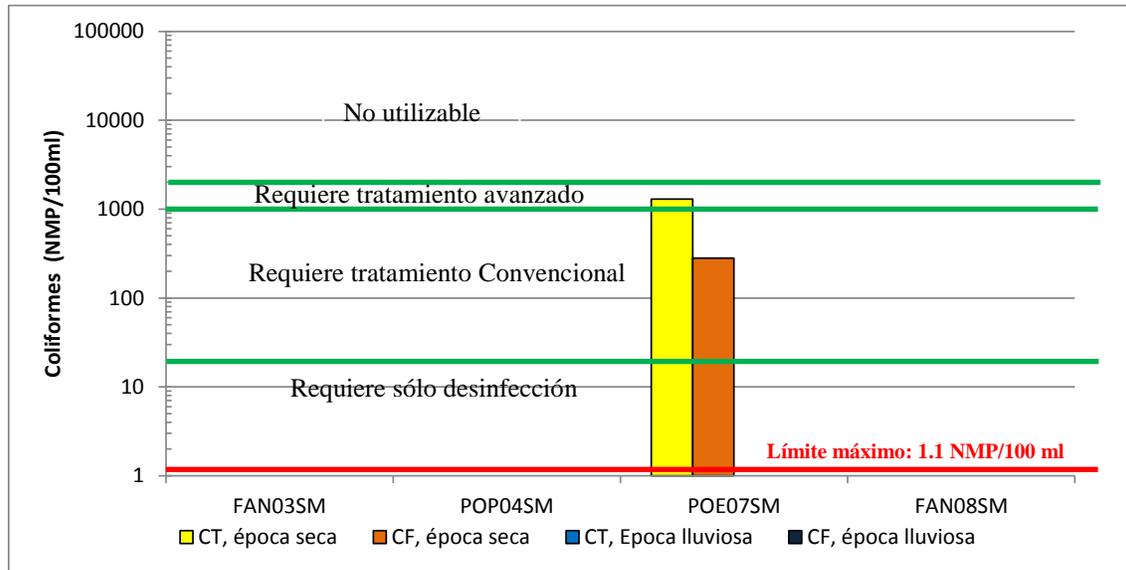


Figura 4.49: Gráfico de Coliformes en acuífero profundo hidrotermal

**Temperatura:** Las aguas son hipertermales en los manantiales, y mesotermas en los pozos. Considerando la composición hidrogeoquímica de estos pozos, existe una influencia directa de la recarga local, principalmente en los pozos monitoreados, y en el manantial FAN03SM.

Todos los sitios presentaron temperaturas que no cumplieron con la norma de referencia, puesto que fueron mayores a 30°C. Los sitios tendieron a aumentar la temperatura en la época lluviosa, por efecto del incremento de minerales disueltos dilución del agua subterránea por la recarga local con el agua lluvia, excepto el pozo perforado POP04SM, que presentó una relación inversa, pero por efecto de la recarga local, al estar localizado en una zona con permeabilidad de media a baja en las capas superficiales del suelo.

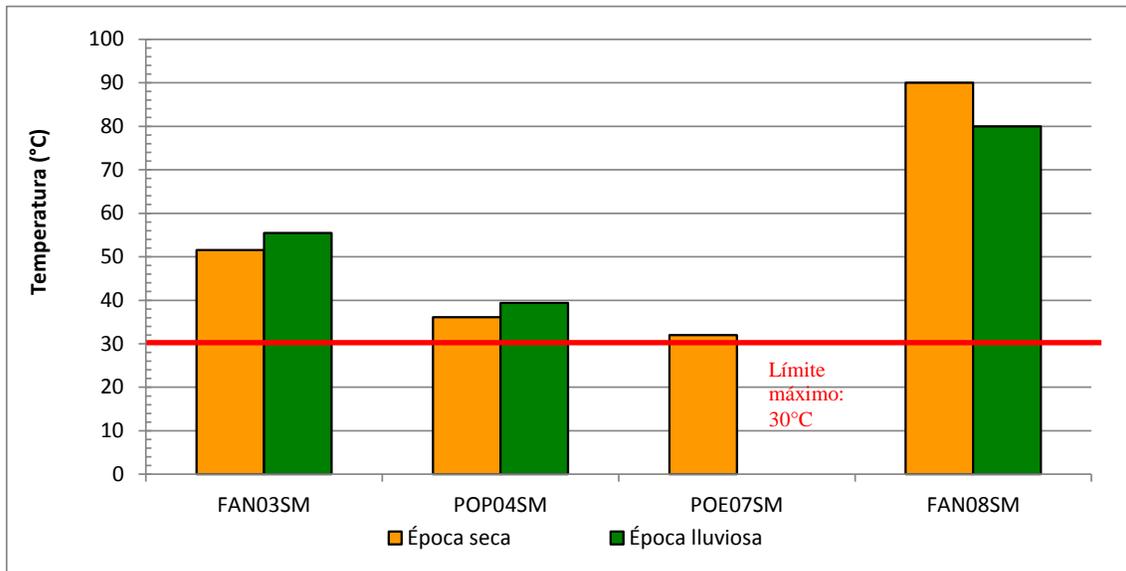


Figura 4.50: Gráfico de Temperatura en acuífero profundo hidrotermal

**CE:** Todos las muestras recolectadas presentaron niveles de CE arriba de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La mineralización es proporcional a la temperatura del agua, y a la recarga local.

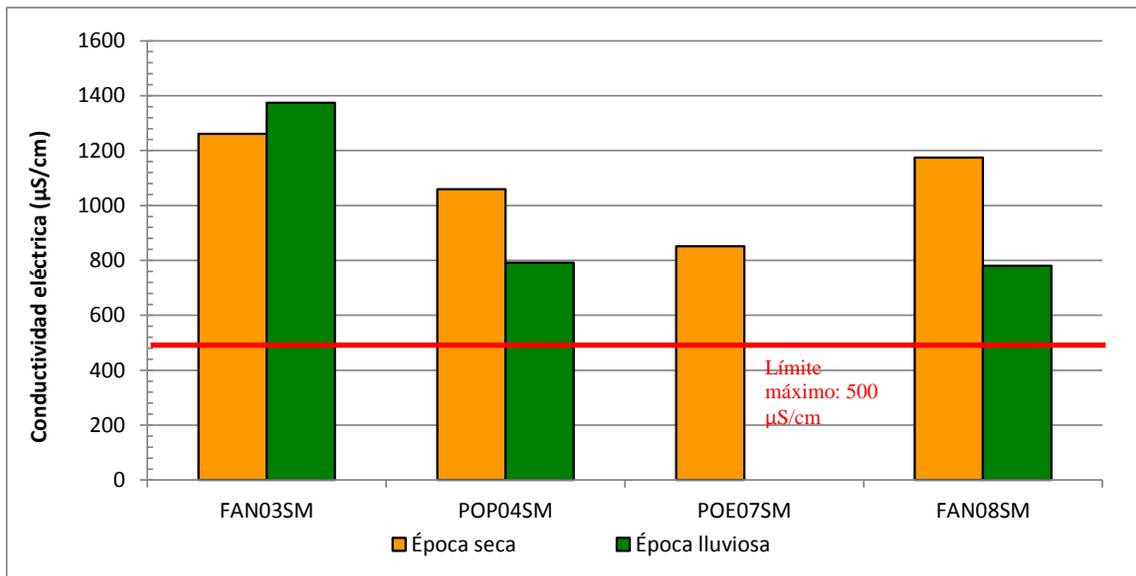


Figura 4.51: Gráfico de CE en acuífero profundo hidrotermal

**Fosfatos:** presente en el agua de los manantiales FAN03SM y POP04SM, los cuales se encuentran en zonas de cultivos de granos básicos. En la época lluviosa se incrementaron los fosfatos, gracias a la presencia de capas superficiales permeables que se mezclan con el agua que fluye por la recarga local, y que se mueve por medio de un flujo subsuperficial.

El manantial FAN08SM presentó concentraciones en el límite, lo que indica que también la recarga local tiene influencia en la presencia de fosfatos.

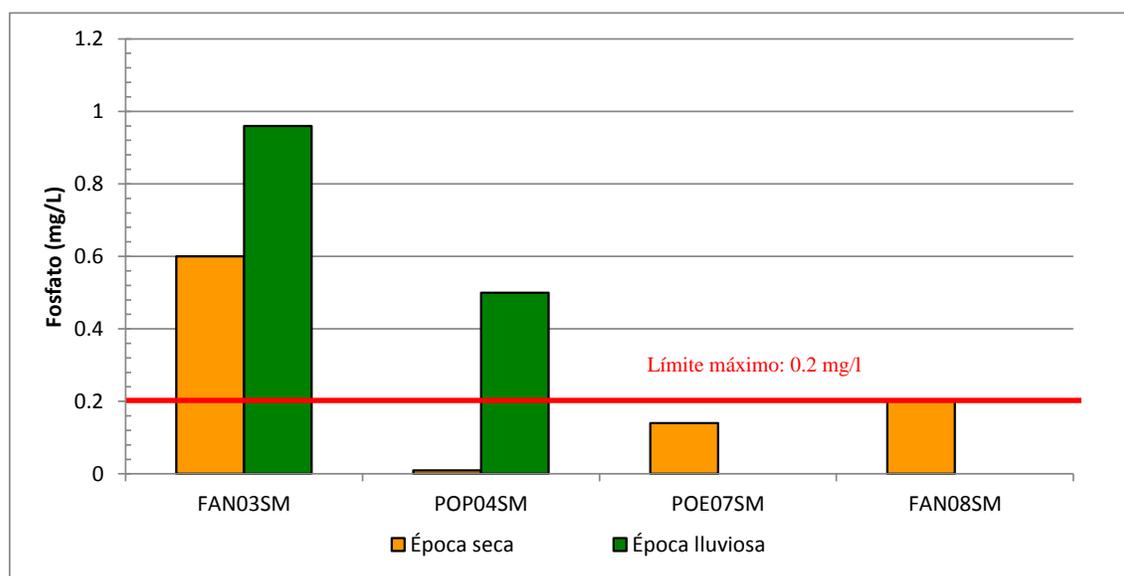


Figura 4.52: Gráfico de fosfatos en acuífero profundo hidrotermal

**Hierro total:** Éste sólo apareció en concentración mayor a 0.3 mg/l en el pozo excavado POE07SM, en época seca.

La presencia de hierro en este pozo puede atribuirse a la recarga local, ya que sobre este acuífero profundo se encuentra un acuífero somero poroso, con permeabilidad de media a baja, así como a la tubería empleada para el bombeo manual, la cual puede presentar corrosión.

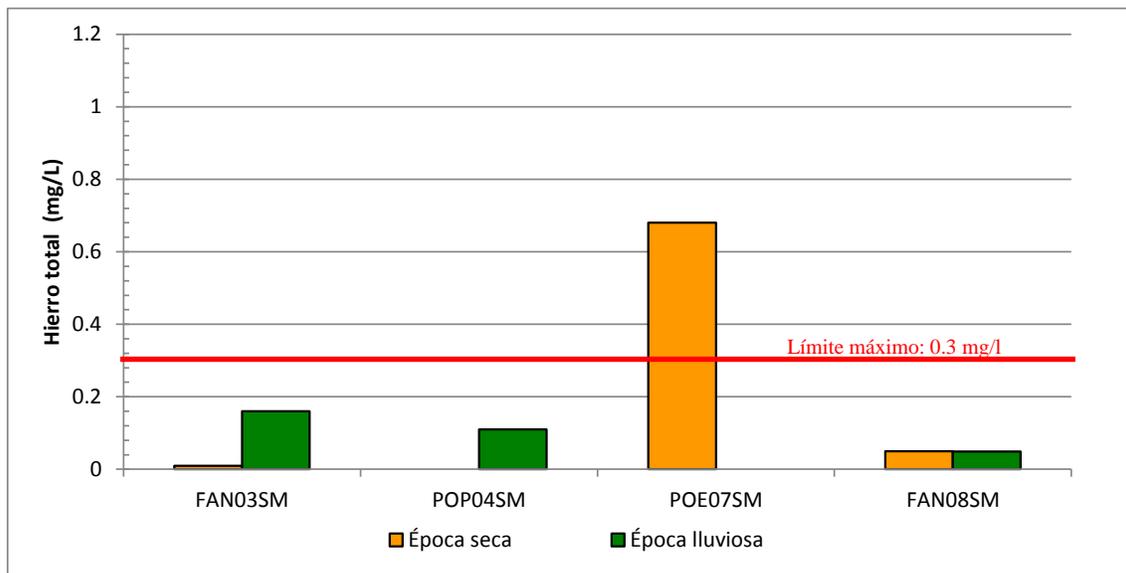


Figura 4.53: Gráfico de hierro total en acuífero profundo hidrotermal

**pH:** en los sitios fue alcalino, con valores mayores entre 7.7 y 8.66 unidades de pH, siendo la excepción POE07SM, que presentó un valor de 6.95, por lo que es afectado por la recarga local. Este pozo se encuentra en una formación geológica permeable (formación Cuscatlán).

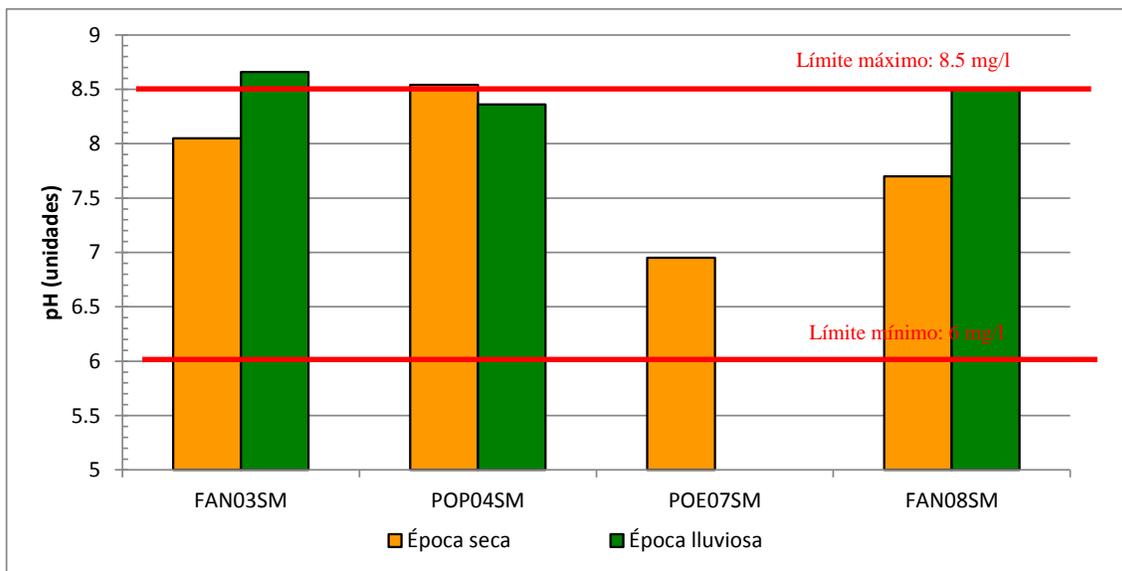


Figura 4.54: Gráfico de pH en acuífero profundo hidrotermal

## 4.5. DINÁMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE

### 4.5.1. Evolución de la composición física del agua

**Conductividad eléctrica:** Las variaciones de CE con la altura son, significativamente diferentes en época seca y lluviosa. La composición del río Metayate es influenciado por aportes subterráneos por fallas locales en Agua Caliente, Santa Rosa y Agua Zarca, y poco por el río Talquezalapa.

**Temperatura:** Las temperaturas tienden a incrementarse al reducirse la elevación del terreno. Sin embargo, al pasar por la ciudad de Agua Caliente, caserío Santa Rosa y Agua zarca, la temperatura se eleva por la influencia hidrotermal presente.

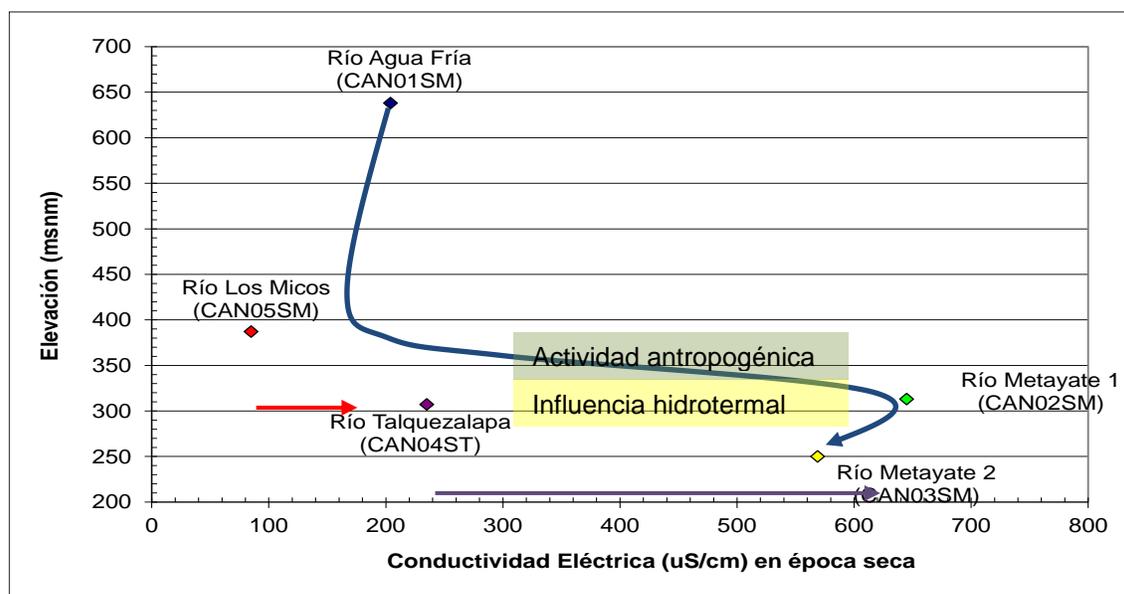


Figura 4.55: Gráfico CE contra altitud en época seca, río Metayate y ríos afluentes

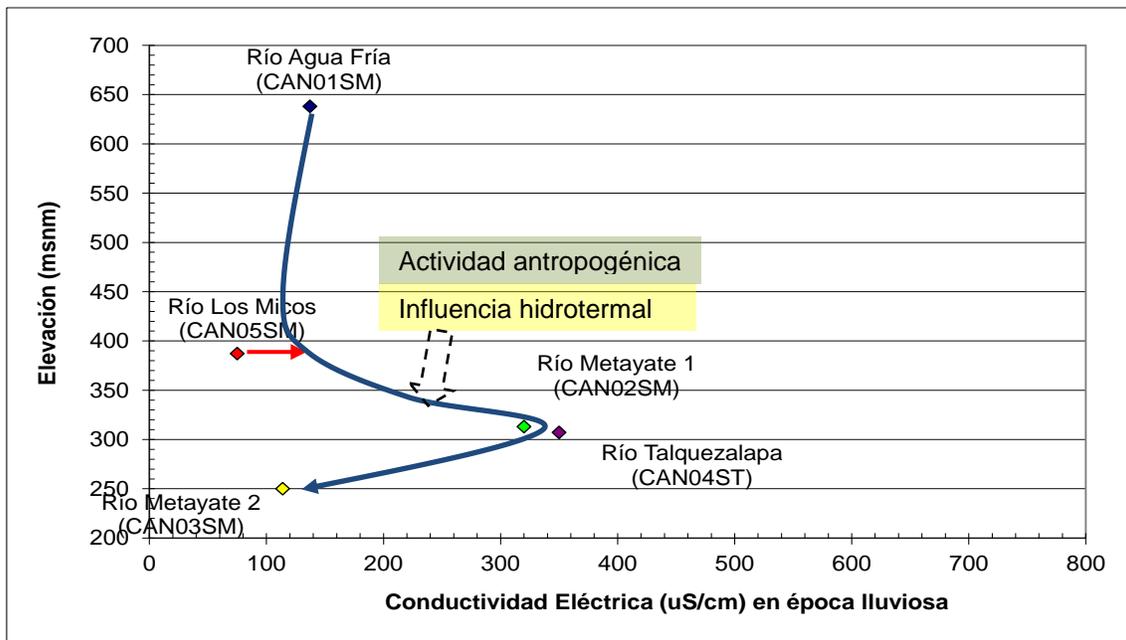


Figura 4.56: Gráfico CE contra altitud en época lluviosa, río Metayate y ríos afluentes

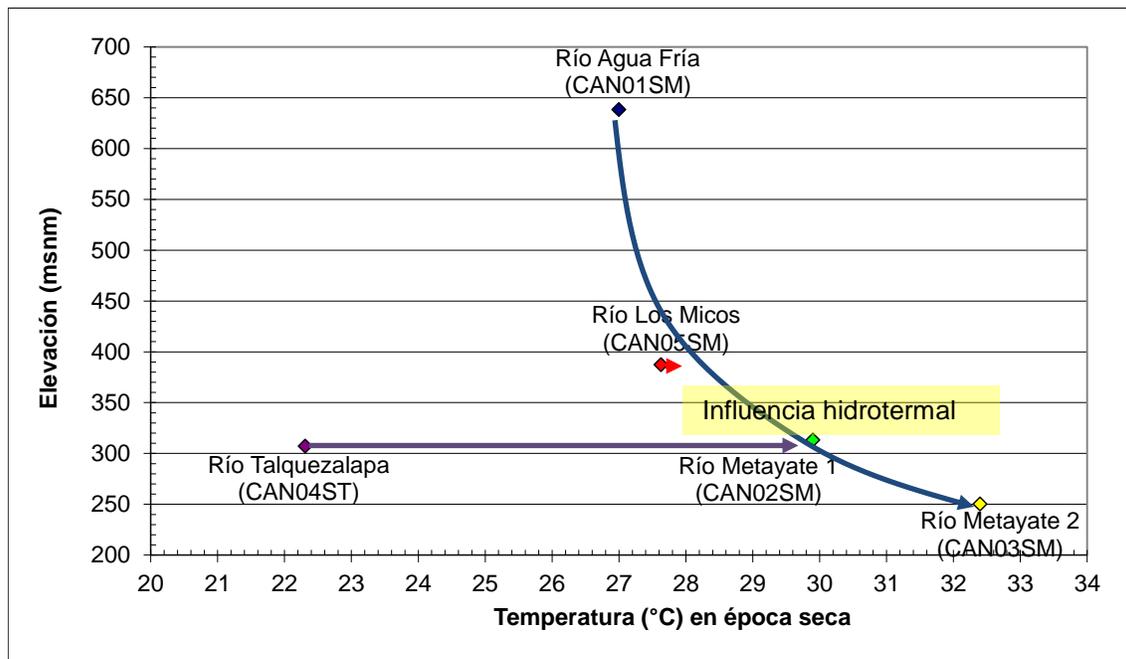


Figura 4.57: Gráfico de Temperatura contra altitud en época seca, río Metayate y ríos afluentes

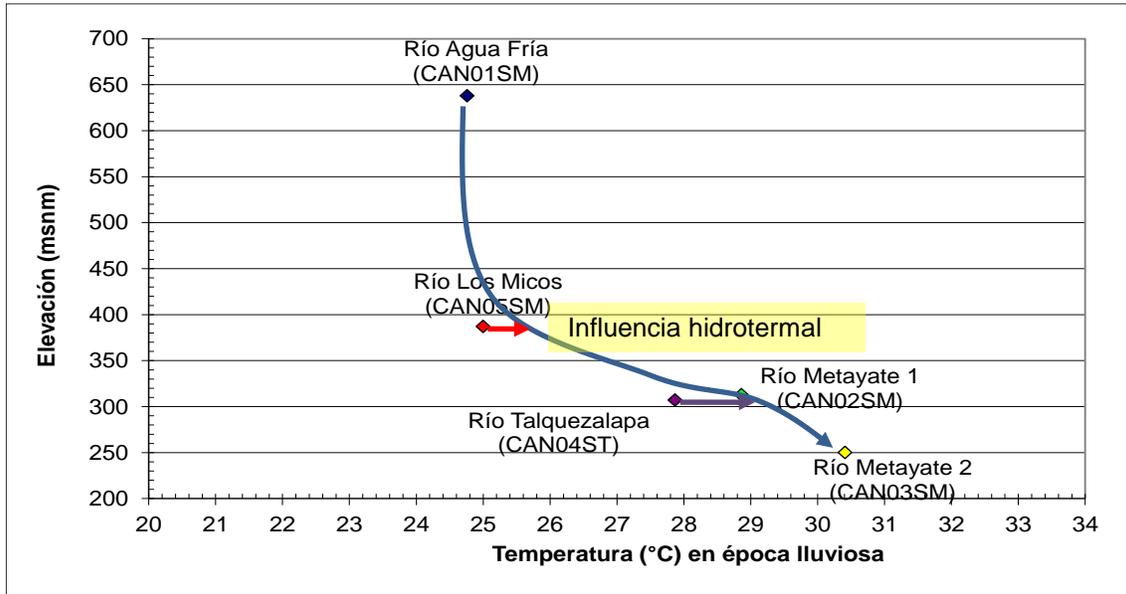


Figura 4.58: Gráfico de Temperatura contra altitud en época lluviosa, río Metayate y ríos afluentes

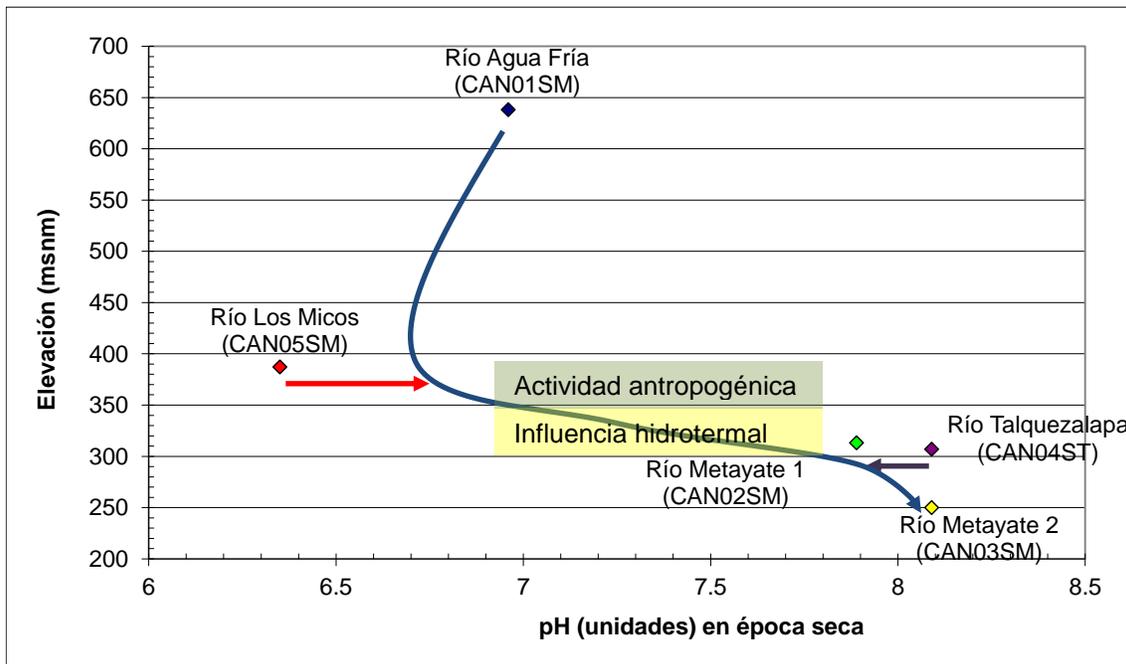


Figura 4.59: Gráfico pH contra altitud en época seca, en río Metayate y ríos afluentes

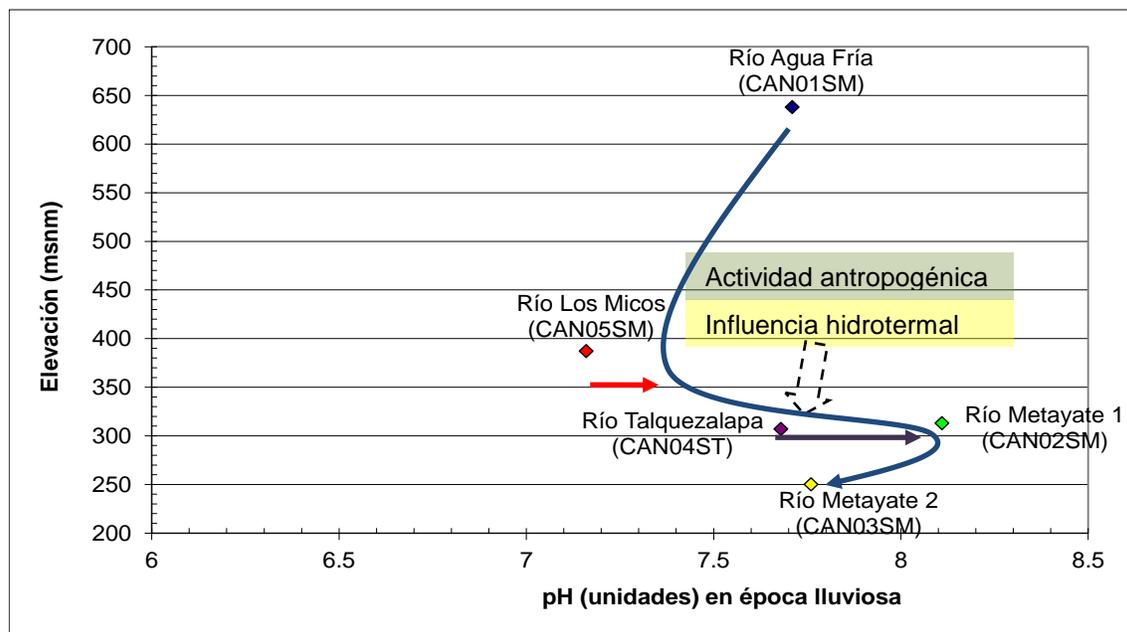


Figura 4.60: Gráfico pH contra altitud en época lluviosa, en río Metayate y ríos afluentes

**pH:** Los valores de pH se vuelven más alcalinos a medida que son influenciados por la actividad hidrotermal de la parte media de la subcuenca. El río Talquezalapa presenta mayor influencia en los valores de pH cuando se encuentra mezclada en la zona de El Obrajuelo.

#### 4.5.2. Caracterización hidrogeoquímica del agua superficial

Se describe la composición hidrogeoquímica de cada uno de los sitios estudiados:

- **Aguas HCO<sub>3</sub>-Ca-Na, con poca mineralización:** Los ríos Agua Fría (CAN01SM) y Los Micos (CAN05SM) presentaron una composición HCO<sub>3</sub>-Ca-Na, con poca mineralización (entre 0.14 y 0.096 g/L de SDT), por lo que el agua presenta una composición similar al agua lluvia, indicando que sus aguas son similares a los manantiales FAN01SM y FAN07SM. Así, conduce agua que procede de un flujo local, subsuperficial y escorrentía superficial. El río Talquezalapa (CAN04SM) también presentó una composición muy similar a CAN01SM y CAN05SM, pero con mayor presencia de sodio que de calcio.

- **Aguas Cl-Ca-Mg:** El sitio CAN02SM, correspondiente al río Metayate después de su paso por la ciudad de agua Caliente, y CAN03SM, en el río Metayate, antes de desembocar al embalse Cerrón Grande. Los cloruros proviene de actividades humanas (contaminación antropogénica) y de posibles aportes de un acuífero que presenta disolución de halitas u otro mineral que contenga sodio y cloruros. Tiene una composición similar a los pozos POE01SM y PE06SM, excepto que presenta una posible saturación de bicarbonatos ya que éste no está presente en cantidades significativas. La cantidad de SDT para CAN02SM es de 0.22 (época lluviosa) a 0.45 g/L (época seca), por lo que más mineralizado que CAN01SM y CAN05SM. Para CAN03SM los SDT fueron de 0.08 (época lluviosa) a 0.4 g/L (época seca), debido al efecto de dilución de las aguas del río Talquezalapa.

#### **4.5.3. Dinámica del agua superficial en la subcuenca del río Metayate**

En la subcuenca del río Metayate, existe una evolución en la cantidad de minerales disueltos a lo largo de su recorrido, comportándose de forma similar a los acuíferos someros colgados en la parte alta, predominando las aguas HCO<sub>3</sub>-Na, con una baja mineralización, procedente de los ríos Agua fría y Los Micos.

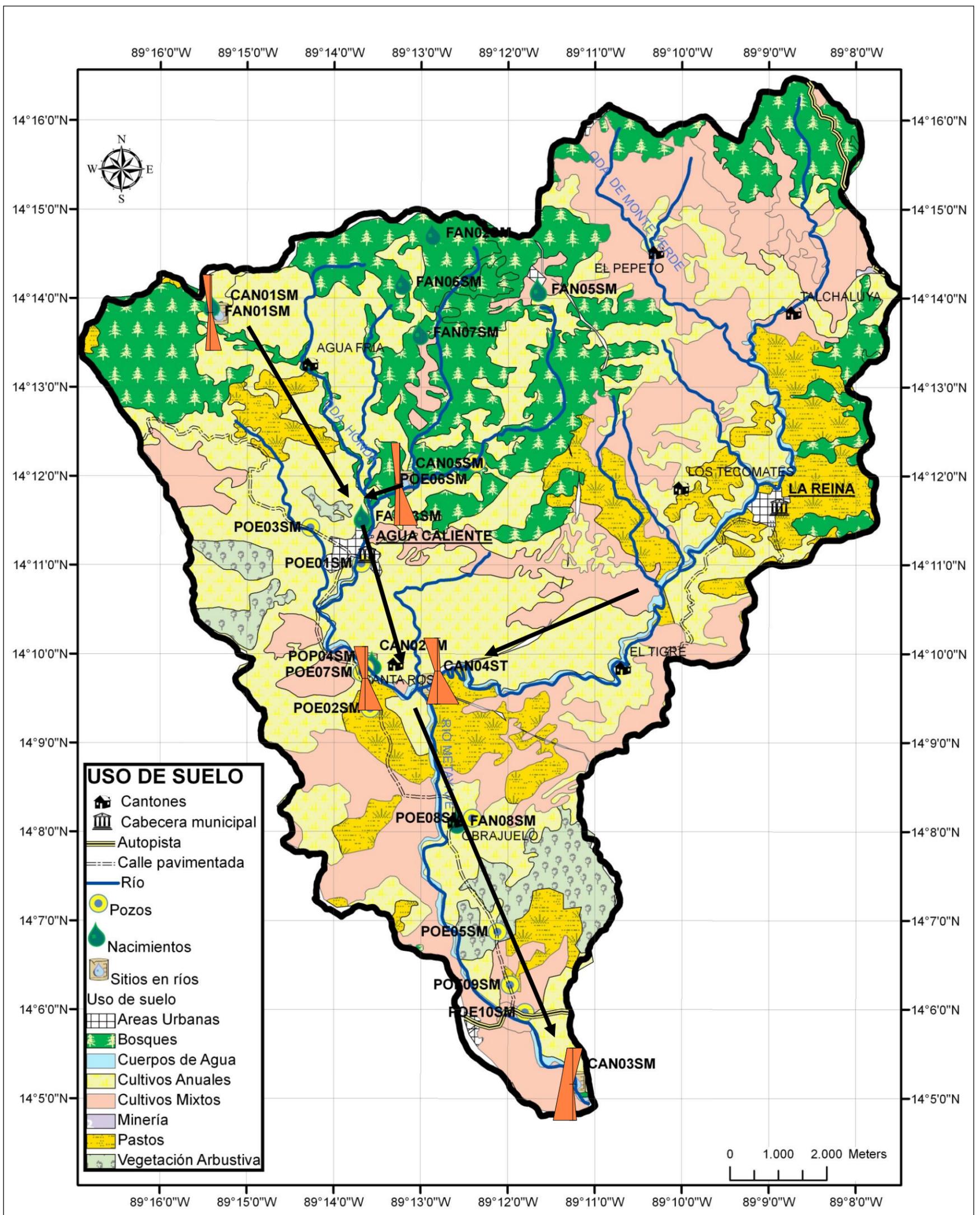


Figura 4.61: Mapa de uso del suelo y diagramas de Stiff del agua en río Metayate y ríos afluentes, época, época seca

Esta composición cambia a ser Cl-Ca-Mg luego de pasar por la zona de la ciudad de Agua Caliente, probablemente debido a que en esta zona descargan aguas subterráneas con rumbo norte a suroeste, con una composición Cl-HCO<sub>3</sub>-Ca-Na, la cual proviene de formaciones naturales como antropogénicas. Aquí puede haber un proceso de precipitación de aragonito y calcita (CaCO<sub>3</sub>), procesos de intercambio iónico, etc.

Aguas abajo, se mantiene una composición Cl-Ca en época lluviosa, y Cl-Ca-Mg en época seca, antes de desembocar en el embalse Cerrón Grande. El aporte de magnesio del río Talquezalapa es el principal factor para dicha composición.

Las figura 4.63 presentan la evolución hidrogeoquímica del agua superficial en del río Metayate y tres ríos afluentes a éste, considerando el mapa de usos de suelo.

Se observa que el agua de los ríos de la subcuenca alta es captada gracias a los bosques existentes, sin embargo estos están intervenidos. A medida que se acerca a la subcuenca media, atraviesa zonas agropecuarias, donde se cultiva maíz y maicillo, principalmente, así como un aumento en la cantidad de granjas avícolas y porteros locales.

Sin embargo, al pasar por la ciudad de Agua Caliente, la química cambia significativamente., debido a la contaminación antropogénica en acuíferos fracturados.

#### **4.5.4. Calidad del agua para consumo humano**

**Coliformes:** Todas las muestras recolectadas presentaron contaminación microbiológica. El agua en las partes altas, ríos Agua Fría (CAN01SM) y Los Micos (CAN05SM), presentaron Coliformes fecales y totales en concentraciones menores a 1000 NMP/100ml, procediendo éstos de potreros que se ubican cerca de dichos ríos, paso de ganado, pasos vehiculares y caseríos. Estos ríos son afluentes al Metayate. Estos requerirían de sistemas avanzados de potabilización en época lluviosa, por efecto de la dilución de Coliformes fecales en el río Agua Fría, pero en época seca debe evaluarse su uso por la elevada presencia de Coliformes.

Al atravesar la ciudad de Agua Caliente (censo DIGESTYC de 2007: 1,984 personas), el río Metayate presentó Coliformes en mayor cantidad que los ríos Los Micos y Agua Fría en el sitio CAN02SM. El río Tamulasco (CAN04ST) también presenta una contaminación similar al río Metayate, el cual atraviesa la ciudad de La Reina (censo DIGESTYC de 2007: 2,036 personas). Para ambos casos, debe evaluarse su uso para consumo humano por la elevada presencia de Coliformes.

Finalmente, se aprecia una autodepuración del río en época seca cuando se acerca al punto de descarga al embalse Cerrón Grande, puesto que sólo se requieren técnicas simples de desinfección en CAN03SM. Se destaca que en la zona hay estanques para cultivo de tilapias y ganado, así como cultivos de caña de azúcar y lotificaciones.

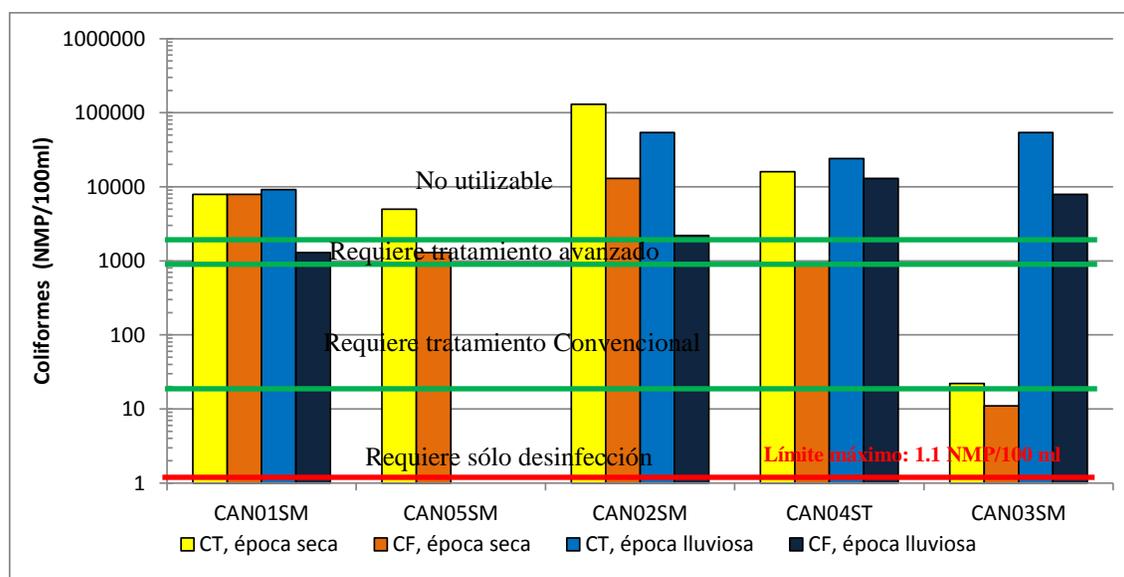


Figura 4.62: Gráfico de Coliformes en río Metayate y ríos afluentes

**Fosfatos:** Todos los sitios presentaron concentraciones de fosfatos mayores a 0.2 mg/l, por el arrastre superficial de fertilizantes, especialmente en la parte media y baja de la subcuenca del río Metayate, donde se encuentran zonas de cultivo de granos básicos y caña de azúcar.

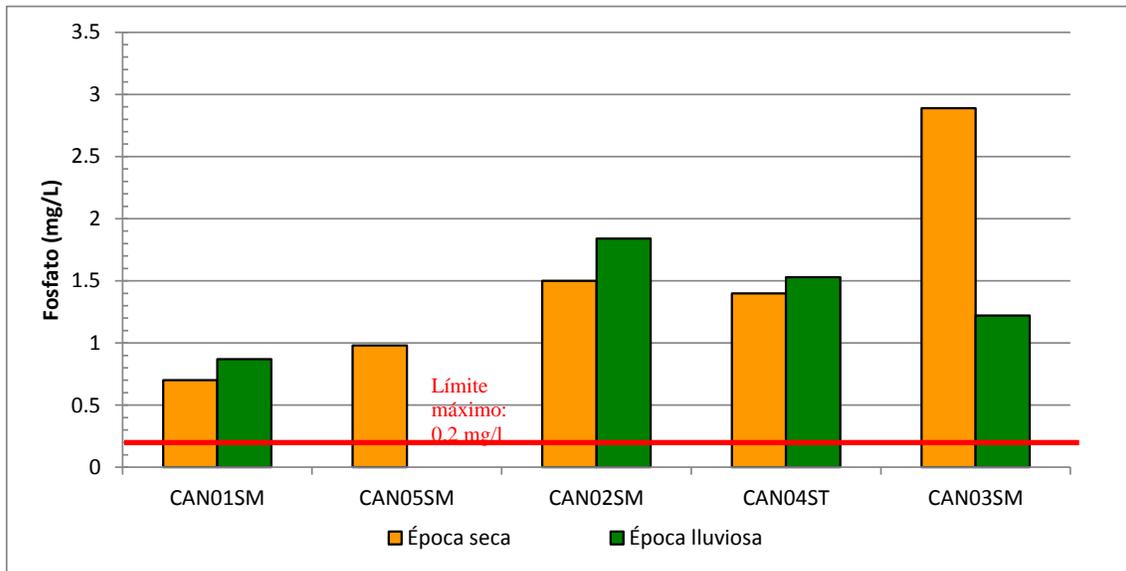


Figura 4.63: Gráfico de fosfatos en río Metayate y ríos afluentes

**Hierro total:** En época lluviosa, y aguas debajo de la ciudad de Agua Caliente, las concentraciones de hierro superaron la norma establecida para el agua potable (0.3 mg/l). En época seca, hay un incremento en dirección del flujo del río Metayate.

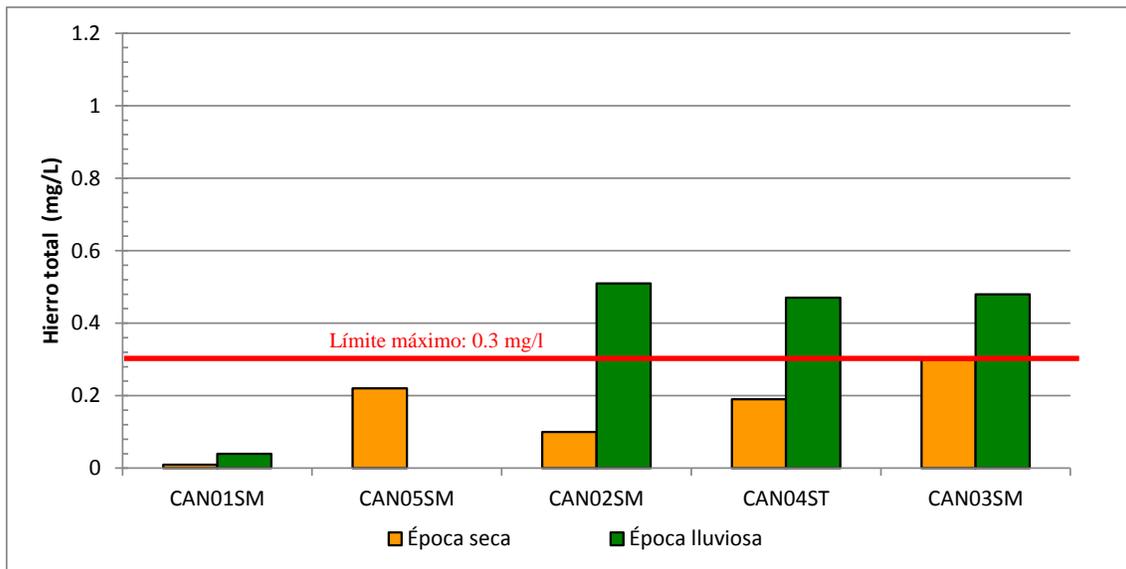


Figura 4.64: Gráfico de hierro total en río Metayate y ríos afluentes

El río Talquezalapa también aporta hierro al río Metayate. Ya que el agua subterránea presenta hierro sólo en la parte alta y media, el hierro presente también proviene de contaminación antropogénica.

**Potasio:** El río Talquezalapa (CAN04ST) arrastra iones de potasio en concentraciones mayores al permitido por la norma de agua potable (mayores a 10 mg/l). El aporte del río Talquezalapa el cual eleva la cantidad de este mineral en el río Metayate (CAN03SM).

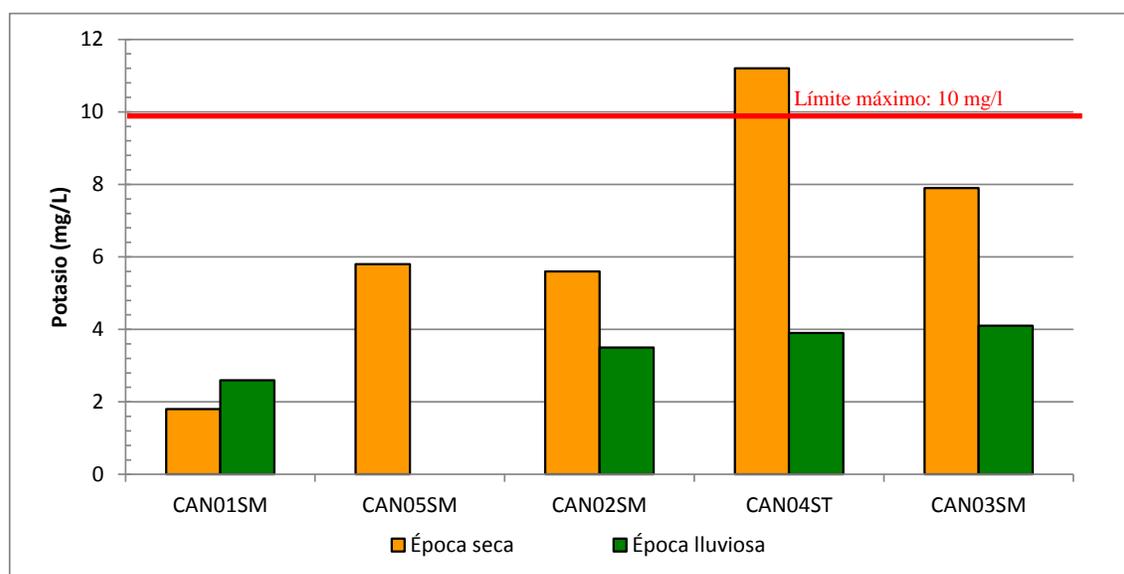


Figura 4.65: Gráfico de potasio en río Metayate y ríos afluentes

**Conductividad Eléctrica:** La mineralización del río Metayate en CAN02SM se incrementa respecto a los ríos Agua Fría y Los Micos por la presencia de una zona de descarga de agua subterránea rica en cloruros. Aguas abajo, tiende a haber una mejora por dilución causada por el aporte del río Talquezalapa.

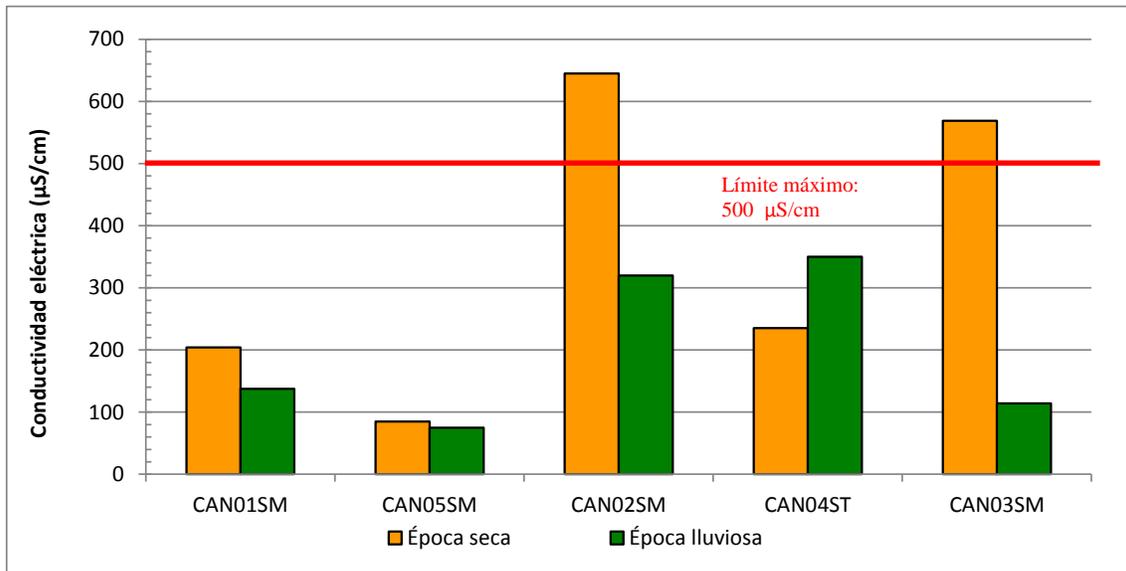


Figura 4.66: Gráfico de CE en río Metayate y ríos afluentes

**Temperatura:** Los tramos del río Metayate que no cumplieron con la norma de referencia fueron CAN02SM y CAN03SM.

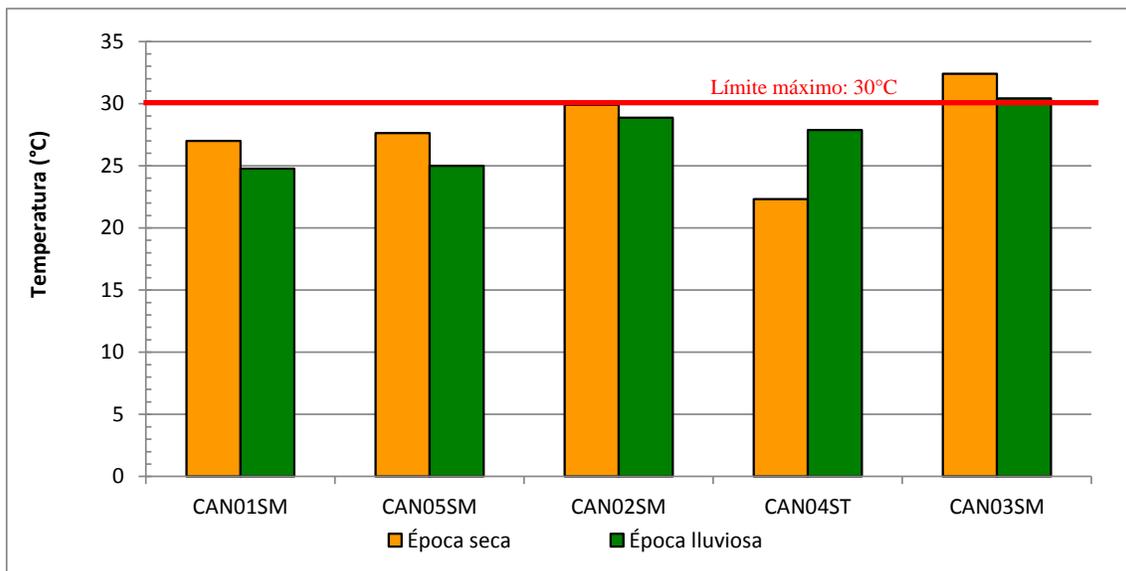


Figura 4.67: Gráfico de Temperatura en río Metayate y ríos afluentes

El primero presenta temperatura promedio aproximada de 29.5°C, el cual comparado con CAN04ST (río Talquezalapa), ubicado aproximadamente al mismo nivel, presentó un promedio aproximado de 25°, debido a la influencia hidrotermal en la zona de Santa Rosa. El segundo sitio presentó un promedio aproximado de 31°C, debido a que se encuentra en las cotas más bajas, por lo que es la temperatura ambiente la que reduce la cantidad de calor disipado.

#### 4.5.5. Índices de calidad ambiental en el río Metayate

Empleando el método ICA, se tiene la siguiente clasificación del agua del río Metayate o ríos afluentes (ver resultados en Anexo 7).

*Tabla 4.12: Índices de calidad ambiental (ICA) en río Metayate y ríos afluentes*

<b>Río monitoreado</b>	<b>Sitio de monitoreo</b>	<b>Época</b>	<b>Valor ICA</b>	<b>Clasificación</b>
Agua Fría	CAN01SM	Seca	73.4	Buena
		Lluviosa	74.42	Buena
Los Micos	CAN05SM	Seca	71.57	Buena
Metayate	CAN02SM	Seca	66.28	Media
		Lluviosa	68.28	Media
Talquezalapa	CAN04ST	Seca	68.91	Media
		Lluviosa	67.16	Media
Metayate	CAN03SM	Seca	72.9	Buena
		Lluviosa	62.84	Media

La parte alta de la subcuenca se compone de aguas con buena calidad para la vida acuática, sin embargo esta decrece en la parte media y baja, por la actividad antropogénica, agropecuaria y en pequeña cantidad por la actividad hidrotermal en la zona de Santa Rosa, Agua Zarca y El Obrajuelo.

## V. RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 5.1.RESUMEN

Las rocas más antiguas se ubican en la parte alta de la subcuenca, y en partes de la subcuenca media y baja, predominando rocas volcánicas de la formación Morazán, y Chalatenango, los cuales forman una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad, con presencia de rocas fracturadas, y fallas localizadas.

Las rocas más recientes, ubicadas en la parte baja, corresponden a la formación Cuscatlán (depósitos fluviales: cantos rodados, estratos de limos y arcillas) y San Salvador (depósitos de materiales aluviales del cuaternario), conformando una unidad hidrogeológica de media a baja permeabilidad.

Considerando la información hidrogeoquímica, y la información bibliográfica disponible, el modelo conceptual establece la presencia de cuatro acuíferos:

- a) Acuífero somero colgado con flujo local: Poco mineralizada, con predominancia de bicarbonatos, calcio y sodio, sin influencia termal, pH de ligeramente ácido a neutro, con puntos de descarga focalizado en manantiales y drenaje subsuperficial, con rumbo norte a sur, por medio de fallas. Se encuentra en una formación geológica de baja a nula permeabilidad, y pertenece a ella los caseríos Ojos de Agua, Agua fría, Los Apantes, Casa de Teja, Los Apantes, El Conacaste.
- b) Acuífero somero de tipo fracturado con flujo local e intermedio, y posible regional: entre la parte inferior de la subcuenca alta (hasta 450 msnm) y la parte baja de la subcuenca media (hasta 300 msnm). Presenta mayor mineralización que el acuífero somero colgado, sin influencia hidrotermal, con puntos de descarga en el río Metayate, debido al rastro de cloruros existente. La dirección del flujo es de norte a sur y de noreste a suroeste, moviéndose por medio de fracturas en la roca, presentando un grupo con baja concentración de cloruros y sodio, y otra con altas

concentraciones de dichos minerales, así como magnesio y sulfatos, con influencia antropogénica. Se encuentra en una formación geológica con permeabilidad de baja a nula. Su topografía es plana a ondulada, y en ella se encuentra la ciudad de Agua Caliente, así como los caseríos El Jicarillo, Santa Rosa, San Antonio, Los Conacastes.

- c) Acuífero somero de tipo poroso con flujo local: Acuífero entre la parte media y baja de la subcuenca (300 hasta 250 msnm). Su composición es similar al acuífero somero fracturado, con baja concentración de sodio, magnesio, sulfatos y cloruros, sin embargo tiende a ser más somero, con puntos de recarga locales, localizado en formaciones geológicas de media a baja permeabilidad. La topografía es plana, y en ella se ubican los caseríos Santa Rosa, Agua Zarca, El Jicarón, El Obrajuelo, Los Marín, Hacienda Metayate.
- d) Acuífero profundo hidrotermal: Pertenece a la formación Morazán, y se encuentra bajo las formaciones Cuscatlán y Chalatenango. De acuerdo a estudios previos, existe un cuerpo magmático generador de presión, alta temperatura, localizado a gran profundidad, que ocasiona la actividad hidrotermal en la zona de Agua Zarca y Agua Caliente. El agua fluye de sur a norte, por medio de fallas (grietas y fisuras irregulares), y se mezcla con agua de la recarga local, principalmente en la zona de Agua caliente, donde experimenta mayor dilución. Se desconoce su extensión y profundidad real, sin embargo presentó artesianismo en un pozo localizado en la parte media de la subcuenca.

Las aguas superficiales de la parte alta tienen una composición similar a los acuíferos someros colgados en la parte alta, predominando las aguas  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ , con una baja mineralización (río Agua Fría y Los Micos). Al unirse estos ríos en el río Metayate, la composición del agua cambia a  $\text{Cl-Ca-Mg}$  luego de pasar por la zona de la ciudad de Agua Caliente, probablemente debido a que en esta zona descargan aguas subterráneas del acuífero somero fracturado, así como actividad antropogénica (contaminación). Aguas abajo, se mantiene una composición  $\text{Cl-Ca}$  en época lluviosa, y  $\text{Cl-Ca-Mg}$  en época seca, antes de desembocar en el embalse Cerrón Grande. El aporte de magnesio del río Talquezalapa es el principal factor de dilución que otorga dicha composición.

Tabla 5.1: Resumen de la caracterización del agua de los sitios de los acuíferos someros colgados

Tipo de agua	Sitio	Formación geológica local y edad	Litología	Termalismo	Posibles especies minerales (simulación)	Mineralización	Tipo de flujo	Dirección del flujo supuesto
Bicarbonatadas-sódicas-cálcicas	FAN01SM	Chalatenango Mioceno (23,3 – 5,2 millones de años)	Piroclastitas ácidas, ignimbritas, volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas epiclastitas	Hipotermal	Plagioclasas, minerales ferromagnesianos, arcillas	Poca en ambas épocas (<0.2 g/L de SDT)	Local	Norte a sur, de acuerdo a topografía del terreno
	CAN01SM			Hipotermal	Plagioclasas, minerales ferromagnesianos, carbonatos y silicatos	Poca en ambas épocas		
	FAN07SM	Morazán, Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).	Lavas de Intermedias a ácidas	Hipotermal	Carbonatos, plagioclasas (albita), minerales ferromagnesianos, arcillas	Poca en ambas épocas		
Bicarbonatadas-cálcicas-magnésicas-sódicas	FAN02SM	Chalatenango Mioceno (23,3 – 5,2 millones de años)	Piroclastitas ácidas, ignimbritas, volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas epiclastitas	Hipotermal	Plagioclasas, minerales ferromagnesianos, arcillas	Poca en ambas épocas		
	FAN05SM			Hipotermal	Carbonatos y plagioclasas	Mediana en época seca (entre 0.2 y 1 g/L de SDT) y poca en época lluviosa		
	FAN06SM	Morazán, Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).	Lavas de Intermedias a ácidas	Hipotermal	Carbonatos y plagioclasas	Poca en ambas épocas		

Tabla 5.2: Resumen de la caracterización del agua de los sitios del acuífero somero fracturado

Tipo de agua	Sitio	Formación geológica local y edad	Litología	Termalismo	Posibles especies minerales (simulación)	Mineralización	Tipo de flujo	Dirección del flujo supuesto
Clorurada-bicarbonatada-cálcica-sódica	POE01SM	Chalatenango Mioceno (23,3 – 5,2 millones de años)	Piroclastitas ácidas, ignimbritas, volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas y epiclastitas	Hipotermal	Ferromagnesianos, calcio y silicatos. Contaminación antropogénica.	Mediana mineralización	Local e intermedio	Norte a sur, por medio de fallas
Bicarbonatadas-sódica-cálcicas con mediana mineralización	POE02SM	Chalatenango	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas	Hipotermal	Plagioclasas, albita, calcio y silicatos, arcillas	Poca en época lluviosa, y mediana en época seca	Local e intermedio	
	POE03SM	Morazán, Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).	Lavas de Intermedias a ácidas, flujos piroclásticos con presencia de riolita e ignimbritas	Hipotermal	Carbonatos, silicatos, dolomita, plagioclasas y caliza, arcillas	Poca en época lluviosa, y mediana en época seca		

Tabla 5.3: Resumen de la caracterización del agua de los sitios del acuífero somero poroso

Tipo de agua	Sitio	Formación geológica local y edad	Litología	Termalismo	Posibles especies minerales (simulación)	Mineralización	Tipo de flujo	Dirección del flujo supuesto
Bicarbonatadas-cálcicas-sódica	POE05SM	Cuscatlán, Pleistoceno Inferior e Intermedio (1,6 millones – 10,000 años).	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, formado por tobas de lapilli con pómez y fragmentos líticos de lavas dacíticas vítreas y andesitas, en una matriz de cenizas finas no estratificadas	Hipotermal	Plagioclasas, albita y arcillas.	Poca en época seca	Local e intermedio	Norte a sur, por medio de fallas
	POE08SM	Chalatenango, Mioceno	Rocas efusivas ácidas	Hipotermal	Carbonatos, silicatos, plagioclasas, arcillas	Poca en época seca		
	POE09SM	Chalatenango, Mioceno	Piroclastitas ácidas, ignimbritas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas	Hipotermal	Carbonatos, silicatos, dolomita y arcillas	Poca en época lluviosa, y mediana en época seca		
Bicarbonatadas-sulfatadas - cálcicas-sódicas	POE10SM	San Salvador, Holoceno (5,000 – 10,000 años).	Depósitos sedimentarios del cuaternario,	Hipotermal	Carbonatos, silicatos, plagioclasas y arcillas	Baja mineralización		
Bicarbonatadas-sódicas-cálcicas con poca mineralización	FAN04SM	Chalatenango y Morazán	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas Lavas de intermedias a ácidas	Hipotermal	Silicatos, albita, plagioclasas, minerales ferromagnésicos, carbonatos, arcillas	Baja mineralización	Local	

Tabla 5.4: Resumen de la caracterización del agua de los sitios del acuífero profundo hidrotermal

Tipo de agua	Sitio	Formación geológica local y edad	Litología	Termalismo	Posibles especies minerales (simulación)	Mineralización	Tipo de flujo	Dirección del flujo supuesto
Sulfatada-sódicas	FAN03SM	Chalatenango Mioceno (23,3 – 5,2 millones de años)	Piroclastitas ácidas, ignimbritas, volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas epiclastitas	Hipertermal	Silicatos, posible presencia de albita, arcillas y posibles minerales ferromagnesianos.	Media en ambas épocas (>0.2 y <1 g/L de SDT)	Regional, intermedio y local	Sur a norte, por medio de fracturas
	POP04SM	Cuscatlán (1,6 millones – 10,000 años)	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas	Mesotermal	Silicatos, albita, plagioclasas, arcillas, y posibles minerales ferromagnesianos.	Media en ambas épocas		
	POE07SM	Morazán, Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).	Lavas de Intermedias a ácidas	Mesotermal	Silicatos, albita, minerales ferromagnesianos, arcillas y posible precipitación de calcita	Poca en ambas épocas		
Sulfatada-sódicas	FAN08SM	Chalatenango, Mioceno (23,3 – 5,2 millones de años)	Piroclastitas ácidas, ignimbritas, volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas epiclastitas	Hipertermal	Silicatos, posible presencia de albita, arcillas y posibles minerales ferromagnesianos.	Media en época seca (>0.2 y <1 g/L de SDT)		

Se detectó contaminación microbiológica y fisicoquímica en el agua de los manantiales, pozos y ríos, al compararse con las normas de agua potable de referencia:

Tabla 5.5: Parámetros del agua subterránea que no cumplieron con la norma de agua potable

Acuífero	Sitio de monitoreo	Contaminantes en Época Seca			Contaminantes en Época lluviosa		
		Físicos	Químicos	Micro-biológicos	Físicos	Químicos	Micro-biológicos
Acuífero somero colgado	FAN01SM	pH	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	pH	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF
	FAN02SM	---	---	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF
	FAN05SM	---	---	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF
	FAN06SM	---	---	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF
	FAN07SM	pH	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF
Acuífero somero poroso	FAN04SM	T	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF
	POE05SM	T	---	CT, CF	No muestreado		
	POE08SM	T	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	---		
	POE09SM	CE, T	---	CT, CF	CE		
	POE10SM	T	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	---		
Acuífero somero fracturado	POE01SM	T, Nt	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	CE	K	CT, CF
	POE02SM	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	---	SiO <sub>2</sub> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF
	POE03SM	CE	---	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF
	POE06SM	CE, T	K, Ca, Dureza	CT, CF	CE	K, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Nt	CT, CF
Acuífero profundo hidrotermal	FAN03SM	CE, T	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	---	CE, pH, T	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	---
	POP04SM	CE, pH, T	---	---	CE	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	---
	POE07SM	CE, T	Fe	CT, CF	No muestreado		
	FAN08SM	CE, T	---	---	CE, pH, T		---
Río Agua Fría	CAN01SM	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF
Río Los Micos	CAN05SM	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	No muestreado		
Río Metayate, aguas arriba de CAN04ST	CAN02SM	CE	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF
Río Talquezalapa	CAN04ST	---	K, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CT, CF	---	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF
Río Metayate, aguas abajo de CAN04ST	CAN03SM	CE, T	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF	T	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe	CT, CF

“- - -”: Todos los parámetros cumplen

Empleando el método ICA, se tiene la siguiente clasificación del agua del río Metayate o ríos afluentes.

*Tabla 5.6: Índices de calidad ambiental (ICA) en el río Metayate y afluentes*

Río monitoreado	Sitio de monitoreo	Época	Valor ICA	Clasificación
Agua Fría	CAN01SM	Seca	73.4	Buena
		Lluviosa	74.42	Buena
Los Micos	CAN05SM	Seca	71.57	Buena
Metayate	CAN02SM	Seca	66.28	Media
		Lluviosa	68.28	Media
Talquezalapa	CAN04ST	Seca	68.91	Media
		Lluviosa	67.16	Media
Metayate	CAN03SM	Seca	72.9	Buena
		Lluviosa	62.84	Media

La parte alta de la subcuenca se compone de aguas con buena calidad para la vida acuática, sin embargo esta decrece en la parte media y baja, por la actividad antropogénica, agropecuaria y en pequeña cantidad por la actividad hidrotermal en la zona de Santa Rosa, Agua Zarca y El Obrajuelo.

## 5.2.CONCLUSIONES

### **Evolución Hidrogeoquímica**

- La evolución hidrogeoquímica de los acuíferos someros de la subcuenca del río Metayate, consiste en la meteorización gradual de rocas carbonatadas (calcita, dolomita) y de silicatos (cuarzo, biotita, ortoclasa, olivino, plagioclasa), predominando así agua dulces bicarbonatadas-cálcicas-sódicas. Dicho proceso se da por medio de flujos subsuperficiales en las partes altas, y por fallas locales en las partes media y baja de la subcuenca. Sin embargo, también existe una alteración hidrotermal y mineralógica de estos acuíferos someros en la parte media y baja de la

subcuenca, por mezclado con agua procedentes de la meteorización de rocas sulfatadas (anhidritas, yeso, piritas) y silicatos ricos en sodio (ortoclasa, plagioclasa), en un acuífero profundo hidrotermal.

- Se identificaron cuatro tipos de acuíferos: somero colgado (aguas  $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$ , con conductividades eléctricas de 98 a 317  $\mu\text{S/cm}$  en época seca, y 110 a 219  $\mu\text{S/cm}$  en época lluviosa), somero fracturado (aguas  $\text{Cl-HCO}_3\text{-Ca-Na}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ , con conductividades eléctricas de 296 a 725  $\mu\text{S/cm}$  en época seca, y 195.5 a 575  $\mu\text{S/cm}$  en época lluviosa), somero poroso (aguas  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$  y  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Na}$ , con conductividades eléctricas de 206 a 549  $\mu\text{S/cm}$  en época seca, y 224 a 665  $\mu\text{S/cm}$  en época lluviosa) y fracturados hidrotermales (aguas  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , con conductividades eléctricas de 851 a 1,261  $\mu\text{S/cm}$  en época seca, y 780 a 1,374.3  $\mu\text{S/cm}$  en época lluviosa).
- La evolución del flujo del agua en los acuíferos someros colgados, fracturados y porosos va de norte a sur, siguiendo el gradiente hidráulico, a través de un flujo local de agua subterránea, experimentando un enriquecimiento mineral (conductividades eléctricas que se incrementan de valores cercanos a 100  $\mu\text{S/cm}$  en manantiales ubicados en la parte alta, a 550  $\mu\text{S/cm}$  en pozos ubicados en la parte baja), y dilución en zonas de recarga ubicadas en el acuífero poroso (426 a 266  $\mu\text{S/cm}$  en época seca y lluviosa, respectivamente) y por aporte de ríos a través de fracturas en el acuífero fracturado (512 a 195.5  $\mu\text{S/cm}$  en época seca y lluviosa, respectivamente).
- El acuífero fracturado hidrotermal procede de un flujo vertical ascendente regional, mezclado con aguas pertenecientes a un flujo local, el cual se manifiesta por medio de aguas termales (temperaturas entre 32 y 90°C), muy mineralizadas (conductividades eléctricas entre 780 y 1374  $\mu\text{S/cm}$ ), con alto contenido de sulfatos (de 149 a 315 mg/l) y sodio (de 117 a 174 mg/l).
- El agua del río Metayate presenta una composición similar al agua lluvia en las partes altas, enriquecida principalmente de bicarbonatos y calcio. En la parte media, al atravesar la ciudad de Agua Caliente, su composición hidrogeoquímica es ligeramente afectada, enriqueciéndose con cloruros. Sin embargo, la composición

cambia significativamente en la parte baja de la subcuenca, donde se dan procesos de precipitación o adsorción de bicarbonatos y sodio, predominando los cloruros, magnesio y calcio.

### **Evolución de la calidad del agua**

- El principal contaminante presente en todos los acuíferos fueron microbiológicos (Coliformes totales y fecales), cuya evolución está influenciada por la presencia de letrinas de hoyo y potreros. Hubo una tendencia a presentar mayores valores en los acuíferos poroso y colgados (<30,000 NMP/100ml), intermedia en el acuífero fracturado (<5,400 NMP/ml) y nula en el acuífero profundo hidrotermal (<1.1 NMP/ml). Sin embargo, se detectó un pozo con influencia hidrotermal que presentó contaminación microbiológica por ubicarse en una zona con rocas porosas (valor de 280 NM/100ml).
- La calidad del agua de los acuíferos de la subcuenca presentó una progresiva contaminación con nitratos desde zonas con cultivos de subsistencia (parte alta con nitratos de <0.1 a 1.4 mg/l) a zonas con cultivos de caña de azúcar y granos básicos, y casas de habitación con uso de letrinas de hoyo y potreros (parte media y baja, con nitratos de 2.29 a 30.1 mg/l), por lo que los acuíferos someros porosos y fracturados presentaron mayor contaminación. Sin embargo, el acuífero profundo hidrotermal no presentó nitratos que pueden proceder de fuentes naturales o están interconectados con el acuífero somero por medio de una mezcla de aguas (valores de <0.1 a 2.39 mg/l).

### **5.3. TRABAJO A FUTURO**

- Estudiar el área de influencia de las aguas Cl-HCO<sub>3</sub>-Na-Ca detectadas en el POE06SM en la parte alta de la subcuenca del río Metayate, así como realizar un estudio complementario en la microcuenca del río Talquezalapa, a modo de determinar si la anomalía (presencia de altas concentraciones de cloruro y sodio)

detectada en el pozo POE06SM se debe a influencia hidrotermal, conexión con fallas geológicas, o contaminación antropogénica, ya que en la zona existen comunidades sin acceso a agua potable.

- Determinar las zonas de recarga y la edad de los acuíferos somero y profundo por medio de isótopos estables de deuterio ( $\delta^2\text{H}$  ó D), oxígeno-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ), carbono-14 ( $\delta^{14}\text{C}$ ) y tritio ( $\delta^3\text{H}$  ó T), empleando la curva meteórica del agua lluvia de la región del Trifinio;
- Evaluar la posibles proyectos de aprovechamiento del recurso geotérmico de la zona, con un enfoque de desarrollo sostenible; y,
- Evaluar la vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos identificados, y proponer perímetros de protección de zonas de recarga y manantiales, políticas municipales para la preservación del recurso, su monitoreo y seguimiento ambiental y social, con enfoque de género.

## VI. REFERENCIAS

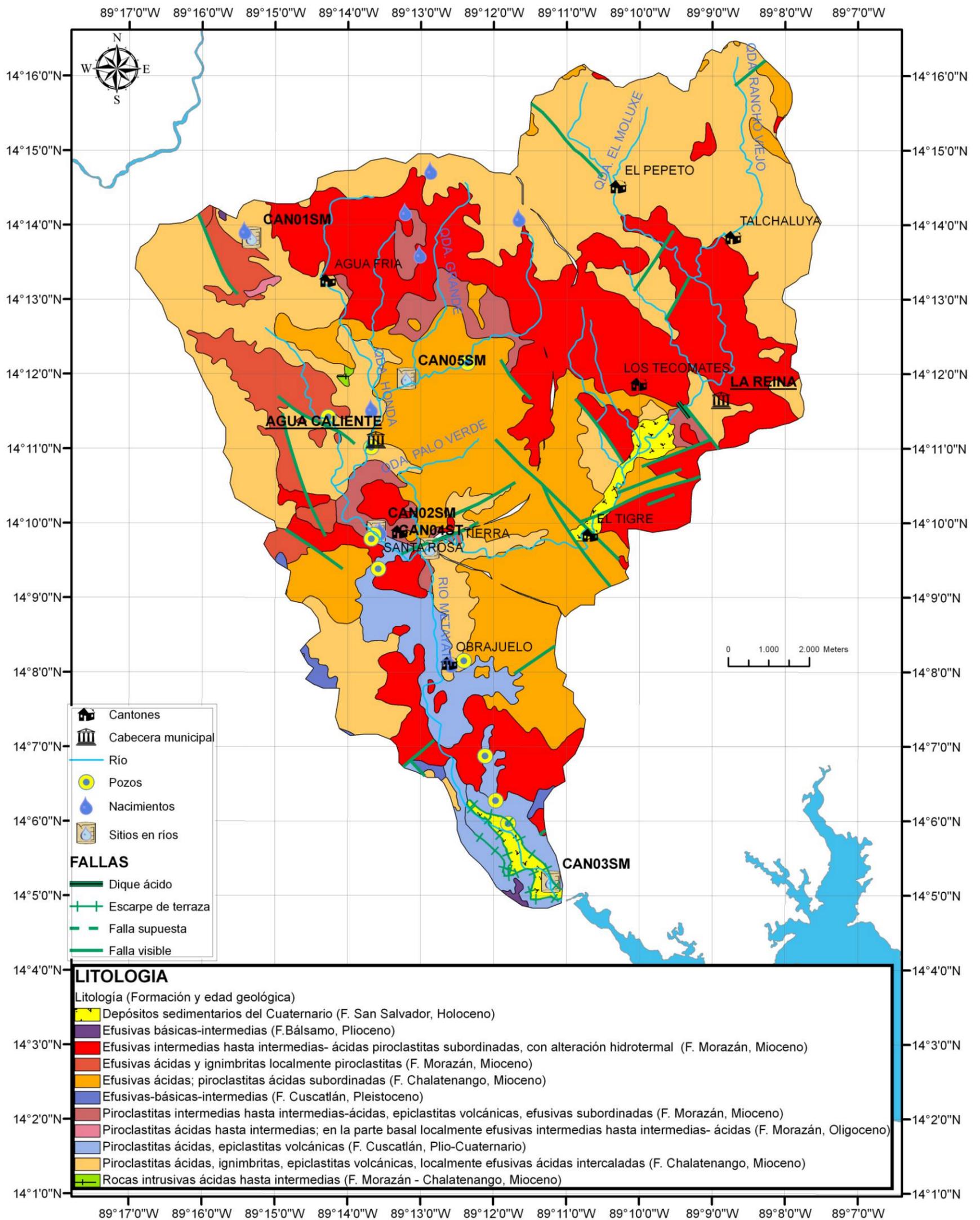
- H.S. Weber, G. Wiesemann, W. Lorenz, M. Schmidt-Thomé, W. Hammerschmidt, Mapa geológico de la República de El Salvador - América Central, (1978). Mapeo geológico por la Misión Geológica Alemana en El Salvador en colaboración con el Centro de Investigaciones Geotécnicas (1967-1971), Hannover-Stuttgart, Alemania, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Appelo, C.A.J., y Postma, D. (2006), Geochemistry, Groundwater and Pollution. Ámsterdam, Segunda Edición.
- Bedmar, A. (1999), Manual de Fugas de Embalses. Madrid, Ministerio de Fomento de España, Segunda Edición.
- Donado, L.D. (1999), Hidrogeoquímica.
- Mulligan, B., (2007), Hidrogeoquímica.
- Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, CEL (2010). Monitoreo de la Calidad el Agua en la Cuenca del Río Lempa, 2003-2008, San Salvador.
- HARZA Engineering Company International L.P. (1999). Estudio Global de Sedimentación, San Salvador, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, CEL.
- SNET (2005). Balance Hídrico Dinámico e Integrado de El Salvador, San Salvador, UNESCO-MARN.
- Guevara, M. M. Guevara, W. Hernández, C. Rivas y E. Márquez. (2006), Estado de las aguas subterráneas en El Salvador. Boletín Geológico y Minero. San Salvador, SNET.
- Organismo Internacional de Energía Atómica, y Plan Trifinio (2010), Anexos al estudio Desarrollo Sostenible de los recursos ambientales e hídricos en la cuenca Alta del Río Lempa, Esquipulas, Guatemala.

- UNESCO, El Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (2003), obtenida el 20 de abril de 2008, <http://www.wateryear2003.org/es>.
- UNESCO, El Agua en El Salvador, obtenida el 20 de abril de 2008, <http://www.wateryear2003.org/es>.
- IESPAÑA, El Tratamiento del Agua, 2008, obtenida el 15 de abril de 2008, <http://potablewater.iespana.es>
- <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/MetodoPOSH.htm>
- <http://www.cel.gob.sv>
- [http://biblioteca.duoc.cl/bdigital/esco/INGENIERIA\\_PREVENCION/Ficha\\_quimica\\_asbesto.pdf](http://biblioteca.duoc.cl/bdigital/esco/INGENIERIA_PREVENCION/Ficha_quimica_asbesto.pdf)

## VII. ANEXOS

Anexo 1:	Mapa de referencia con ubicación de sitios de monitoreo.....	A-1
Anexo 2:	Registros de pozos y manantiales en la subcuenca del río Metayate y análisis fisicoquímicos y microbiológicos históricos.....	A-2
Anexo 3:	Especificaciones del equipo de campo empleado.....	A-7
Anexo 4:	Registro fotográfico de los sitios de monitoreo.....	A-8
Anexo 5:	Cálculo empleados para la validación de resultados.....	A-12
Anexo 6:	Diagramas de Piper y Stiff por sitio.....	A-27
Anexo 7:	Resultados obtenidos en el cálculo de los índices de calidad ambiental para aguas superficiales.....	A-50

**ANEXO 1: MAPA DE LA LITOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO METAYATE Y SITIOS DE MONITOREO**



**ANEXO 2: REGISTROS DE POZOS Y MANANTIALES EN LA SUBCUENCA  
DEL RÍO METAYATE Y ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS  
HISTÓRICOS**

**Tabla A.2.1. Pozos Excavados (Fuente: ANDA, 1987)**

Pozo No.	Sitio	Propietario	Coordenadas		Altura topográfica (msnm)	Nivel freático	Altura nivel freático (msnm)
			Norte	Sur			
1	Cantón Metayate	N.P. (No proporcionado)	N.P.	N.P.	270	2.65	267.35
2	Caserío San Antonio, Cantón Agua Zarca	N.P.	N.P.	N.P.	320	1.80	318.2
3	Caserío Escamil, Cantón Agua Zarca	N.P.	N.P.	N.P.	330	1.65	328.35
4	Caserío Escamil, Cantón Agua Zarca	N.P.	N.P.	N.P.	335	0.85	334.15
5	Cantón Santa Rosa	N.P.	N.P.	N.P.	340	0	340
6	Barrio El Carmen, Agua Caliente	N.P.	N.P.	N.P.	340	4.00	336
7	Barrio El Carmen, Agua Caliente	N.P.	N.P.	N.P.	330	3.00	327
8	Caserío Los Conacastes, cantón Ojos de Agua	Mauricio Contreras	474566	343660	396	7.5	388,5
9	Cantón Obrajuelo	Erasmo Tejada	477308	335053	297	7.05	289,95
10	Caserío Los Conacastes, cantón Ojos de Agua	Comunal El Coyolito	478012	342210	432	14.46	417,54
11	Caserío Los Conacastes, cantón Ojos de Agua	Mariano López	477524	342215	424	11.75	412,25
12	Caserío Los Conacastes, cantón Ojos de Agua	María Ardón	477803	342317	---	2.8	---
13	Caserío Los Conacastes, cantón Ojos de Agua	Juana de Tejada	476891	342317	421	11.41	409,59
14	Cantón Obrajuelo	Rafael Alfaro	477063	336005	299	15.08	283,92
15	Cantón Obrajuelo	Jesús Pineda	477222	336109	314	50.3	263,7
16	Cantón Obrajuelo	Iván Reynaldo	477165	335590	305	13.44	291,56
17	Cantón Obrajuelo	Jesús Villeda	477386	335059	307	6	301
18	Cantón Obrajuelo	Marisol Jovel	477245	334195	284	11.5	272,5
19	Cantón Obrajuelo	José Recinos	477197	333977	304	12.06	291,94
20	Colonia Cordoncilo, Agua Caliente	José Ayala	339400	474627	325	5.57	319,43
21	Colonia Cordoncilo, Agua Caliente	La Comunidad	339430	474690	325	3.94	321,06
22	Agua Caliente	La Comunidad	340345	475200	330	9.55	320,45
23	Caserío San Antonio, Cantón Agua Zarca	Noé Aguilar	338150	474800	327	4.18	322,82
24	Caserío San Antonio, Cantón Agua Zarca	Elsa Ochoa	337780	475780	322	8.69	313,31
25	Caserío San Antonio, Cantón Agua Zarca	José Serrano	336400	476000	320	7	313

**Tabla A.2.2. Pozos Perforados (Fuente: ANDA, 2007)**

Pozo No.	Sitio	Propietario	Coordenadas		Altura topográfica (msnm)	Nivel freático	Altura nivel freático (msnm)
			Norte	Sur			
1	Caserío El Achiotal	El Achiotal	474566	343660	421	60	105
2	Cantón Obrajuelo	Caserío El Jicarón	477099	335990	308	12	80
3	Cantón Obrajuelo	ANDA/AID I	477120	335870	302		60
4	Cantón Obrajuelo	Centro Jicarón	477144	335698	293		80
5	Cantón Obrajuelo	ANDA Orlando Aguilar	477138	335566	296		
6	Cantón Obrajuelo	Rubén Aguilar	477258	335621	261		
7	Cantón Obrajuelo	ANDA/AID 2	477168	335458	304		
8	Cantón Obrajuelo	ANDA/AID 3	477356	333971	319		
9	Agua Caliente, área urbana	Municipal 1	474857	339785	364	90	150
10	Agua Caliente, área urbana	Municipal 2	474764	339600	341	80	150
11	Agua Caliente, área urbana	Agustín Tejada	340014	475253	370	19	42
12	Agua Caliente, área urbana	Vilma Moreno	340152	475142	390	20	94
13	Agua Caliente, área urbana	Gladis Hércules	340079	474959	385	60	105
14	Agua Caliente, área urbana	Cruz Ayala	339787	474905	379	86	105
15	Agua Caliente, área urbana	Tona Guevara	340300	174977	388	64	100
16	Cantón Agua Zarca	Agua Zarca	38023	475032	355	4.5	22

**Tabla A.2.2. Manantiales (Fuente: ANDA, 2007)**

No.	Nombre del manantial	Elevación (msnm)	Caudal (l/s)	Coordenada norte	Coordenada sur
1	El Carrizal	758	0.74	346.655	474.991
2	Apantio	638	0.54	345.235	472.145

**Tabla A.2.3 Resultados obtenidos en un pozo perforado y manantial captado (Fuente: ANDA, 2007)**

<b>características</b>	<b>Pozo Perforado Barrio El Carmen, Agua Caliente, Chalatenango</b>	<b>Manantial Apantillo, cantón Agua Fría Agua Caliente, Chalatenango</b>
<b>Coordenadas Norte</b>	340300	345235
<b>Coordenadas Este</b>	474977	472145
<b>Elev. (mSNM)</b>	390	668
<b>pH</b>	7.20	5.80
<b>Olor</b>	No rechazable	No detectable
<b>Color Aparente</b>	22.5 Pt – Co	27.5 Pt - Co
<b>Color Verdadero</b>	12.5 Pt – Co	15 Pt - Co
<b>Temp. Agua °C</b>	29.4 °C	27.7 °C
<b>Turbiedad</b>	2 UNT	10 UNT
<b>Calcio</b>	33.5mg/l	3.1 mg/l
<b>Hierro Total</b>	Trazas	0.2 mg/l
<b>Hierro Soluble</b>	Trazas	Trazas
<b>Manganeso Total</b>	0.25 mg/l	Trazas
<b>Manganeso Soluble</b>	0.20 mg/l	Trazas
<b>Magnesio</b>	5.6 mg/l	0.9 mg/l
<b>Alcalinidad Total</b>	117.9 mg/l	14.2 mg/l
<b>Dureza Total</b>	106.4 mg/l	11.4
<b>Conduct. <math>\square</math>/cm</b>	101.4	20.0
<b>Cloruros</b>	56.0 mg/l	12.3 mg/l
<b>Sílice</b>	55 mg/l	45 mg/l
<b>Sólidos Totales</b>	436.0 mg/l	56.0 mg/l
<b>Dureza Carbonática</b>	106.4 mg/l	11.4 mg/l
<b>Dureza No Carbonática</b>	0 mg/l	0 mg/l
<b>Carbonatos</b>	0 mg/l	0 mg/l
<b>Bicarbonatos</b>	117.9 mg/l	14.2 mg/l
<b>Hidróxidos</b>	0 mg/l	0 mg/l
<b>Alcalinidad al Bicarbonato de Sodio o Potasio</b>	11.5 mg/l	2.8 mg/l
<b>Bióxido de Carbono (Co<sub>2</sub>)</b>	15.12	41.24
<b>Flour</b>	3.8 mg/l	0.1 mg/l
<b>Sulfatos</b>	28.6 mg/l	8.8 mg/l
<b>NO<sub>2</sub></b>	055 mg/l	0.04 mg/l
<b>Sólidos Totales Disueltos</b>	50.7 mg/l	9.9 mg/l

**Tabla A.2.4 Resultados obtenidos en el río Agua Fría, afluente al río Metayate  
(Fuente: CEL, 2010)**

Fecha	27/07/07	24/09/07	30/11/07	04/03/08
<b>Parámetro</b>				
Sodio (mg/L)	15.30	12.60	16.80	18.00
fosfato (mg/L)	0.70	1.07	ND	ND
sulfatos (mg/L)	17.00	3.68	7.83	10.00
nitratos (mg/L)	8.42	4.87	0.69	1.06
Boro (mg/L)	No detectado (ND)	ND	ND	0.20
Hierro (mg/L)	ND	0.40	0.08	ND
dureza total (mg/L)	30.36	19.57	28.98	32.04
Grasas y aceites (mg/L)	ND	ND	ND	ND
Fenoles (mg/L)	ND	ND	ND	ND
Carbono orgánico total (mg/L)	ND	ND	ND	ND
Silicio (mg/L)	18.96	24.23	26.74	15.74
Arsénico (mg/L)	ND	---	---	---
Mercurio (mg/L)	ND	---	---	---
Cadmio (mg/L)	ND	---	---	---
Cromo hexavalente (mg/L)	ND	---	---	---
Amoniaco (mg/L)	ND	---	---	---
Nitritos (mg/L)	ND	---	---	---
Manganeso (mg/L)	ND	---	---	---
Aluminio (mg/L)	ND	---	---	---
Bario (mg/L)	ND	---	---	---
Cianuro (mg/L)	ND	---	---	---
Níquel (mg/L)	ND	---	---	---
Antimonio (mg/L)	ND	---	---	---
Selenio (mg/L)	ND	---	---	---
Plomo (mg/L)	ND	---	---	---
Detergentes (mg/L)	ND	15.22	13.20	10.40
Sólidos sedimentables (mg/L)	ND	ND	ND	ND
Coliformes fecales	20.00	1.10	170.00	790.00
Coliformes totales	2300.00	240.00	310.00	790.00
Escherichia coli (NMP/100mL)	1.10	1.10	110.00	70.00
Plaguicidas organofosforados	ND	---	---	---
Plaguicidas organoclorados	ND	---	---	---
pH	7.75	7.58	7.37	7.53
Temperatura °C	25	24.8	24.5	26.20
Conductividad µS/cm	135.3	142.5	110.8	127.80
Sólidos totales disueltos (mg/L)	87.95	92.63	72.02	83.07

ND: No detectado

**Tabla A.2.5 Resultados obtenidos en manantial de aguas termales en Agua Caliente, afluyente al río Metayate (Fuente: CEL, 2010)**

<b>Fecha</b>	<b>27/07/07</b>	<b>24/09/07</b>	<b>30/11/07</b>	<b>04/03/08</b>
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	110	1.1	1300	2
Coliformes totales (NMP/100 mL)	2400	49	3500	2
Escherichia coli (NMP/100 mL)	1.1	1.1	110	1.1
pH	7.36	7.64	7.8	9.19
Temperatura (°C)	38.6	39.6	39.5	44.5
Conductividad (µS/cm)	394	468	778	1150
Sólidos totales disueltos (mg/L)	256.1	304.2	505.7	747.5

**Tabla A.2.6 Resultados obtenidos en el río Metayate (Fuente: CEL, 2010)**

<b>Fecha</b>	<b>1/12/2003</b>	<b>1/12/2004</b>	<b>24/08/2005</b>	<b>15/12/2005</b>	<b>3/03/2006</b>	<b>8/02/2007</b>	<b>11/09/07</b>
Temperatura (°C)	29.14	27.75	24.3	27.67	27.85	27.67	26.9
Conductividad eléctrica (µS/cm)	95.3	281.1	8.4	200	783.6	559.7	92.5
pH	8.01	8.06	7.25	6.77	7.95	8.77	8.61
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.6	6.07	8.8	5.08	8.11	6.01	6.74
% de oxígeno disuelto	96.2	77.3	105.1	64.5	124	91.5	98.4
Sólidos totales disueltos	0.061	0.1799	0.0054	0.0001	0.5015	0.3582	0.0588

### **ANEXO 3: ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE CAMPO EMPLEADO**

**Troll 9500:** Usado en campaña 2009

- Temperatura: -5° a 50° C, resolución de 0.01° C y precisión de  $\pm 0.1^\circ$  C.
- Conductividad específica: 0 a 200 mS/cm, resolución de 0.0001 unidades y precisión de  $\pm 0.001$   $\mu$ S/cm.
- pH: 0 a 12 unidades, resolución de 0.01 unidades y precisión de  $\pm 0.01$  unidades.
- Medidor de oxígeno: Rango de 0 a 50 mg/l, resolución de 0.01 mg/l y precisión de  $\pm 0.2$  mg/l.

**YSI 556 MPS:** Usado en campaña 2009 y 2010

- Temperatura: -5° a 45° C, resolución de 0.01° C y precisión de  $\pm 0.15^\circ$  C.
- Conductividad específica: 0 a 200 mS/cm, resolución de 0.0001 unidades y precisión de  $\pm 0.001$  mS/cm.
- pH: 0 a 14 unidades, resolución de 0.01 unidades y precisión de  $\pm 0.2$  unidades.
- Medidor de oxígeno: 0 a 50 mg/l, resolución de 0.01 mg/l y precisión de  $\pm 0.2$  mg/l.

**Medidor portátil de pH y temperatura WTW, Modelo 315:** Usado en campaña 2010

- Temperatura: -5° a 105° C, resolución de 0.01° C y precisión de  $\pm 0.1$  K.
- pH: -2 a 16, resolución de  $\pm 0.01$ .

**Medidor portátil de CE y temperatura WTW, Modelo 315:** Usado en campaña 2010

- Temperatura: -5° a 105° C, resolución de 0.01° C y precisión de  $\pm 0.15^\circ$  C.
- CE: 0 a 500 mS/cm, resolución de  $\pm 0.5\%$  de la lectura.
- Salinidad: 0 a 70

## ANEXO 4: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS SITIOS DE MONITOREO

### Manantiales monitoreados



FAN01SM



FAN02SM



FAN03SM



FAN04SM



FAN06SM



FAN07SM



FAN08SM

### Pozos monitoreados



POE01



POE02SM



POE05SM



POE06SM



POE07SM



POE08SM



POE09SM



POE10SM

## Ríos monitoreados



CAN01SM (Río Agua Fría)



CAN02SM (Río Metayate, antes de unirse al río Talquezalapa)



CAN03SM (Río Metayate)



CAN04ST (Río Talquezalapa)



CAN05SM (Río Los Micos)

## **ANEXO 5: CÁLCULO EMPLEADOS PARA LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS**

### 5.A) Cálculos de la curva conductividad eléctrica vrs. Sólidos Disueltos Totales

Código	Nombre del sitio	Fecha	Conductividad eléctrica (CE)	Suma de cationes	Suma de aniones	Suma de iones	SDT teórico	%Error
CAN04SM0909	Rio Talquezalapa	20/09/2009	350	25,27	71,27	96,54	245	43,5%
FAN03SM0909	Nac. Agua caliente	17/09/2009	1374,21	129,36	267	396,36	961,947	41,6%
FAN03SM0409	Nac. Agua caliente	15/04/2009	1261	126,81	285,82	412,63	882,7	36,3%
CAN05SM0410	Rio Los Micos (Sapo)	12/04/2010	85	27,92	85,6	113,52	59,5	31,2%
CAN02SM0909	Rio Metayate, Crío. Sta. Rosa	20/09/2009	320	32,21	90,68	122,89	224	29,1%
FAN06SM1109	Nac. El Trompillo	22/11/2009	111,6	33,66	106,2999899	139,95999	78,12	28,4%
FAN07SM0410	Nac. Ojos de Agua	12/04/2010	80	25,62	72,33	97,95	56	27,2%
POE04SM0409	PP. Aguilar	21/04/2009	1059	131,6	307,98	439,58	741,3	25,6%
FAN08SM0410	Nac. El Obrajuelo	12/04/2010	1175	166,25	337,9499999	504,1999999	822,5	24,0%
CAN01SM0409	Río Agua fría	15/04/2009	204	25,31	76,2	101,51	142,8	16,9%
FAN05SM0409	Nac. Los Apantes	21/04/2009	317	68,4	242,99	311,39	221,9	16,8%
FAN06SM0409	Nac. El Trompillo	21/04/2009	150,1	34,63	110,8	145,43	105,07	16,1%
FAN02SM0409	Nac. Casas de Teja	21/04/2009	133,2	28,7	99,97	128,67	93,24	16,0%
CAN04SM0410	Rio Talquezalapa	09/04/2010	235	64,09	160,95	225,04	164,5	15,5%
FAN02SM1109	Nac. Casas de Teja	22/11/2009	132,4	28,19999	97,29988	125,49987	92,68	15,0%
FAN01SM0409	Nac. Agua Fría	15/04/2009	98,8	22,7	66,54	89,24	69,16	12,7%
POE05SM0409	PE. López	21/04/2009	417	90,6	281,31	371,91	291,9	12,1%
FAN08SM0810	Nac. El Obrajuelo	28/08/2010	780,00	87,56	345,19	432,75	546,00	11,6%
POE03SM1109	PE. Interiano	22/11/2009	195,50	45,82	126,03	171,85	136,85	11,3%
CAN03SM0909	Río Metayate, 200 m del embalse	20/09/2009	114,00	26,38	71,76	98,14	79,80	10,3%
POE08SM0810	PE. Mancía	28/08/2010	356,00	86,33	216,89	303,22	249,20	9,8%
FAN04SM0409	Nac. Santa Rosa	15/04/2009	206,00	44,01	130,91	174,92	144,20	9,6%
FAN05SM1109	Nac. Los Apantes	22/11/2009	219,00	45,70	139,98	185,68	153,30	9,6%
PPE07SM0410	PP.Noé	15/04/2009	851,00	154,18	339,86	494,04	595,70	9,3%
POE02SM0409	PE. Cartagena	15/04/2009	426,00	101,60	255,74	357,34	298,20	9,0%

Código	Nombre del sitio	Fecha	Conductividad eléctrica (CE)	Suma de cationes	Suma de aniones	Suma de iones	SDT teórico	%Error
CAN02SM0409	Río Metayate, Crío. Sta. Rosa	15/04/2009	645,00	117,90	261,91	379,81	451,50	8,6%
POE06SM0409	P.E. Los Hernández	21/04/2009	1250,00	226,00	511,04	737,04	875,00	8,6%
POE06SM0909	PE. Los Hernández	20/09/2009	1122,00	219,11	462,83	681,94	785,40	7,1%
CAN03SM0409	Río Metayate, 200 m del embalse	21/04/2009	569,00	109,30	239,54	348,84	398,30	6,6%
CAN01SM0909	Río Agua fría	17/09/2009	137,32	27,44	82,11	109,55	96,12	6,5%
POE10SM0410	PE. Calle a Nueva Concepción	12/04/2010	278,00	42,45	130,70	173,15	194,60	5,8%
FAN01SM0909	Nac. Agua Fría	17/09/2009	134,90	26,56	78,63	105,19	94,43	5,4%
FAN04SM1109	Nac. Santa Rosa	22/11/2009	224,00	45,50	128,30	173,80	156,80	5,1%
POE03SM0409	PE. Interiano	21/04/2009	512,90	106,70	288,27	394,97	359,03	4,8%
POE01SM1109	PE. Tejada	22/11/2009	575,00	121,32	318,10	439,42	402,50	4,4%
POE09SM0810	PE. Mecate	28/08/2010	663,00	140,15	362,62	502,77	464,10	4,0%
POE09SM0410	PE. Mecate	12/04/2010	549,00	105,51	302,08	407,59	384,30	2,9%
POP04SM1109	PP. Aguilar	22/11/2009	792,00	175,81	394,50	570,31	554,40	1,4%
POE02SM0909	PE. Cartagena	20/09/2009	266,00	48,15	143,04	191,19	186,20	1,3%
FAN07SM1109	Nac. Ojos de Agua	22/11/2009	110,00	21,40	56,88	78,28	77,00	0,8%
POE01SM0409	PE. Tejada	15/04/2009	725,00	139,21	361,58	500,79	507,50	0,7%
POE08SM0410	PE. Mancía	12/04/2010	296,00	55,94	148,94	204,88	207,20	0,6%
POE10SM0810	PE. Calle a Nueva Concepción	28/08/2010	257,00	47,85	133,00	180,85	179,90	0,3%

## 5.B) Cálculos por medio del software EASYCHEM

### Campaña en época seca (Parte 1 de 3)

Fecha	15/04/2009	15/04/2009	21/04/2009	12/04/2010	12/04/2010	15/04/2009	21/04/2009	15/04/2009
Código de la muestra	CAN01SM0409	CAN02SM0409	CAN03SM0409	CAN04ST0410	CAN05SM0410	FAN01SM0409	FAN02SM0409	FAN03SM0409
Coordenadas x	89°15'19.43"O	89°13'36.32"O	89°11'12.58"O	89°12'55.95"O	89°13'11.60"O	89°15'24.76"O	89°12'51.93"O	89°13'40.50"O
Coordenadas y	14°13'49.52"N	14° 9'53.32"N	14° 5'11.02"N	14° 9'42.62"N	14°11'56.24"N	14°13'55.80"N	14°14'43.87"N	14°11'32.59"N
CE uS/cm	204	645	569	235	85	98.8	133.2	1261
pH	6.96	7.89	8.09	8.09	6.35	5.72	6.56	8.05
T °C	27	29.9	32.4	22.31	27.63	24.76	25	51.53
aniones	mg/l							
HCO3-	64.8	88.5	120	139	79.8	54	92.5	93
SO4=	6.5	150.41	94.9	14.9	3.2	6.7	3.1	174.8
Cl-	3.4	20.57	19.8	3.7	0.4	4	4.1	16.31
NO3-	0.8	0.93	1.95	1.95	1.22	0.84	0.27	1.11
sum aniones	75.5	260.41	236.65	159.55	84.62	65.54	99.97	285.22
cationes	mg/l							
Na+	12.4	99	83.7	26.5	10.7	12.6	6.5	117
K+	1.8	5.6	7.9	11.2	5.8	1.4	1.4	1.6
Ca++	9.4	8.8	12.4	22.8	7.8	7.1	13.9	8.2
Mg++	1.7	4.4	5	3.4	3.4	1.4	6.9	0
sum cationes	25.3	117.8	109	63.9	27.7	22.5	28.7	126.8
NH4+	mg/l							
Cl-+NO3-	4.2	21.5	21.75	5.65	1.62	4.84	4.37	17.42
Na+ + K+	14.2	104.6	91.6	37.7	16.5	14	7.9	118.6
aniones (meq/l)	meq/l							
HCO3-	1.06	1.45	1.97	2.28	1.31	0.89	1.52	1.52
SO4=	0.14	3.13	1.98	0.31	0.07	0.14	0.06	3.64
Cl-	0.10	0.58	0.56	0.10	0.01	0.11	0.12	0.46
NO3-	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02
Cl-+NO3-	0.11	0.59	0.59	0.14	0.03	0.13	0.12	0.48
sum aniones	1.31	5.18	4.53	2.72	1.41	1.15	1.70	5.64

Fecha	15/04/2009	15/04/2009	21/04/2009	12/04/2010	12/04/2010	15/04/2009	21/04/2009	15/04/2009
Código de la muestra	CAN01SM0409	CAN02SM0409	CAN03SM0409	CAN04ST0410	CAN05SM0410	FAN01SM0409	FAN02SM0409	FAN03SM0409
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	0.59	4.45	3.84	1.44	0.61	0.58	0.32	5.13
Na+	0.54	4.30	3.64	1.15	0.47	0.55	0.28	5.09
K+	0.05	0.14	0.20	0.29	0.15	0.04	0.04	0.04
Ca++	0.47	0.44	0.62	1.14	0.39	0.36	0.70	0.41
Mg++	0.14	0.36	0.41	0.28	0.28	0.12	0.57	0.00
sum cationes	1.20	5.25	4.87	2.86	1.28	1.05	1.58	5.54
aniones(%)	%	%	%	%	%	%	%	%
HCO3-	81.32	28.01	43.39	83.63	93.06	76.91	89.16	27.01
SO4=	10.37	60.51	43.61	11.39	4.74	12.13	3.80	64.53
Cl-	7.33	11.19	12.30	3.83	0.80	9.79	6.79	8.14
NO3-	0.99	0.29	0.69	1.15	1.40	1.18	0.26	0.32
Cl+NO3-	8.32	11.48	13.00	4.98	2.20	10.97	7.05	8.46
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cationes(%)	%	%	%	%	%	%	%	%
Na+ + K+	48.94	84.70	78.80	50.31	47.76	55.36	20.11	92.60
Na+	45.09	81.97	74.66	40.29	36.22	51.96	17.85	91.86
K+	3.85	2.73	4.15	10.02	11.55	3.40	2.26	0.74
Ca++	39.31	8.38	12.72	39.87	30.36	33.67	43.89	7.40
Mg++	11.75	6.92	8.48	9.83	21.87	10.97	36.01	0.00
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas								
rNa/rK	11.71	30.05	18.01	4.02	3.14	15.30	7.89	124.31
rMg/rCa	0.30	0.83	0.67	0.25	0.72	0.33	0.82	0.00
rSO4/rCl	1.41	5.41	3.54	2.98	5.92	1.24	0.56	7.93
rCl/rHCO3	0.09	0.40	0.28	0.05	0.01	0.13	0.08	0.30
icb	-5.11	-6.68	-5.89	-12.80	-53.45	-4.18	-1.76	-10.16
Kr	0.81	0.97	1.34	1.81	0.87	0.65	1.17	0.98
INDICE SAR	1.0	6.8	5.1	1.4	0.8	1.1	0.4	11.2
<b>Error (%)</b>	<b>-8.85</b>	<b>1.39</b>	<b>7.25</b>	<b>4.83</b>	<b>-9.01</b>	<b>-8.77</b>	<b>-7.13</b>	<b>-1.89</b>

**Campaña en época seca (Parte 2 de 3)**

Fecha	15/04/2009	21/04/2009	21/04/2009	12/04/2010	12/04/2010	15/04/2009	15/04/2009	21/04/2009
Código	FAN04SM0409	FAN05SM0409	FAN06SM0409	FAN07SM0410	FAN08SM0410	POE01SM0409	POE02SM0409	POE03SM0409
Coordenadas x	89°13'33.16"O	89°11'39.06"O	89°11'42.24"O	14.22685° N	14° 8'7.11"N	89°13'41"O	89°13'35"O	89°14'16.22"O
Coordenadas y	14° 9'53.70"N	14°14'5.94"N	14°14'10.80"N	89.21684° W	89°12'34.81"O	14°11'01"N	14°09'23"N	14°11'25.24"N
CE uS/cm	206	317	150.1	80	1175	725	426	512.9
pH	6.33	7.2	6.44	5.9	7.7	6.38	6.6	7.47
T °C	31.9	26	25.4	24.31	90	31	28.4	28.66
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
HCO3-	98.3	214.5	99.9	61	75	211	225	261
SO4=	12.2	23.88	6.1	7.9	261.15	29.9	14.23	19.51
Cl-	9.1	3.55	4.4	0.7	1.5	74.9	9.93	7.1
NO3-	10.01	1.06	0.4	1.4	0.1	44.88	5.58	0.66
sum aniones	129.61	242.99	110.8	71	337.75	360.68	254.74	288.27
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Na+	18.8	22.8	8.3	8.8	154	49.3	62	69
K+	8.4	0.6	3.8	6.3	4.5	9.9	7.9	5
Ca++	13.5	40	16.7	7.5	7.1	70.2	28	31
Mg++	3.3	5	5.6	2.5	0.6	9.8	3.6	1.7
sum cationes	44	68.4	34.4	25.1	166.2	139.2	101.5	106.7
NH4+	mg/l	mg/l	mg/l			mg/l	mg/l	mg/l
Cl-+NO3-	19.11	4.61	4.8	2.1	1.6	119.78	15.51	7.76
Na+ + K+	27.2	23.4	12.1	15.1	158.5	59.2	69.9	74
aniones (meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
HCO3-	1.61	3.52	1.64	1.00	1.23	3.46	3.69	4.28
SO4=	0.25	0.50	0.13	0.16	5.44	0.62	0.30	0.41
Cl-	0.26	0.10	0.12	0.02	0.04	2.11	0.28	0.20
NO3-	0.16	0.02	0.01	0.02	0.00	0.72	0.09	0.01
Cl-+NO3-	0.42	0.12	0.13	0.04	0.04	2.83	0.37	0.21
sum aniones	2.28	4.13	1.90	1.21	6.71	6.92	4.35	4.90

Fecha	15/04/2009	21/04/2009	21/04/2009	12/04/2010	12/04/2010	15/04/2009	15/04/2009	21/04/2009
Código	FAN04SM0409	FAN05SM0409	FAN06SM0409	FAN07SM0410	FAN08SM0410	POE01SM0409	POE02SM0409	POE03SM0409
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	1.03	1.01	0.46	0.54	6.81	2.40	2.90	3.13
Na+	0.82	0.99	0.36	0.38	6.70	2.14	2.70	3.00
K+	0.21	0.02	0.10	0.16	0.12	0.25	0.20	0.13
Ca++	0.68	2.00	0.84	0.38	0.36	3.51	1.40	1.55
Mg++	0.27	0.41	0.46	0.21	0.05	0.81	0.30	0.14
sum cationes	1.98	3.42	1.76	1.13	7.22	6.72	4.60	4.82
aniones(%)	%	%	%	%	%	%	%	%
HCO3-	123.35	67.90	36.12	36.70	87.46	300.51	216.87	75.81
SO4=	19.46	9.61	2.80	6.04	387.01	54.12	17.43	7.20
Cl-	19.62	1.93	2.73	0.72	3.01	183.30	16.45	3.54
NO3-	12.36	0.33	0.14	0.83	0.11	62.89	5.29	0.19
Cl+NO3-	31.98	2.26	2.88	1.55	3.12	246.19	21.74	3.73
sum aniones	174.79	79.77	41.80	44.29	477.59	600.81	256.03	86.75
cationes(%)	%	%	%	%	%	%	%	%
Na+ + K+	86.33	19.17	9.40	19.01	530.21	227.32	182.97	56.48
Na+	68.36	18.88	7.40	13.38	521.25	203.30	170.22	54.17
K+	17.97	0.29	1.99	5.63	8.96	24.01	12.76	2.31
Ca++	56.45	38.09	17.13	13.11	27.64	332.91	88.40	27.99
Mg++	22.81	7.87	9.49	7.23	3.86	76.82	18.79	2.54
sum cationes	165.59	65.13	36.02	39.35	561.70	637.05	290.16	87.01
Relaciones iónicas								
rNa/rK	3.80	64.60	3.71	2.37	58.18	8.47	13.34	23.46
rMg/rCa	0.40	0.21	0.55	0.55	0.14	0.23	0.21	0.09
rSO4/rCl	0.99	4.98	1.03	8.35	128.76	0.30	1.06	2.03
rCl/rHCO3	0.16	0.03	0.08	0.02	0.03	0.61	0.08	0.05
icb	-3.03	-9.07	-2.70	-26.58	-160.19	-0.14	-9.36	-14.64
Kr	1.21	2.91	1.31	0.72	0.81	3.48	2.67	3.05
INDICE SAR	1.2	0.9	0.4	0.7	14.9	1.5	2.9	3.3
<b>Error (%)</b>	<b>-14.24</b>	<b>-18.84</b>	<b>-7.63</b>	<b>-6.99</b>	<b>7.20</b>	<b>-2.92</b>	<b>5.37</b>	<b>-1.59</b>

**Campaña en época seca (Parte 3 de 3)**

Fecha	21/04/2009	21/04/2009	21/04/2009	12/04/2010	12/04/2010	12/04/2010	12/04/2010
Código	POP04SM0409	POE05SM0409	POE06SM0409	POE07SM0410	POE08SM0410	POE09SM0410	POE10SM0410
Coordenadas x	89°13'38.52"O	89°12'5.01"O	89°12'21.71"O	89°13'40.55"O	89°12'24.50"O	89°11'55.15"O	89°11'46.43"O
Coordenadas y	14° 9'50.35"N	14° 6'39.46"N	14°12'8.93"N	14° 9'47.31"N	14° 8'9.09"N	14° 6'18.53"N	14° 5'59.03"N
CE uS/cm	1059	417	1250	851	296	549	278
pH	8.54	7.12	7.5	6.95	6.8	6.5	6.45
T °C	36.1	27.6	29	31.97	32.4	30.52	31.97
aniones	mg/l						
HCO3-	83.1	255	252	96	137	296	84.7
SO4=	208.1	6.1	81.3	241.05	6.9	3.57	38.1
Cl-	16.2	12.06	177.3	2.3	1.7	2	1.2
NO3-	0.58	8.15	0.44	0.37	2.74	0.37	6.28
sum aniones	307.98	281.31	511.04	339.72	148.34	301.94	130.28
cationes	mg/l						
Na+	122.5	36.6	61	143	34.1	41.3	15.2
K+	3.2	1	16	2.5	2	3.1	3.8
Ca++	5.8	45	122	7.9	18.1	49	19.3
Mg++	0.1	8	27	0.1	1.7	12	4.1
sum cationes	131.6	90.6	226	153.5	55.9	105.4	42.4
NH4+	mg/l						
Cl-+NO3-	16.78	20.21	177.74	2.67	4.44	2.37	7.48
Na+ + K+	125.7	37.6	77	145.5	36.1	44.4	19
aniones (meq/l)	meq/l						
HCO3-	1.36	4.18	4.13	1.57	2.25	4.85	1.39
SO4=	4.34	0.13	1.69	5.02	0.14	0.07	0.79
Cl-	0.46	0.34	4.99	0.06	0.05	0.06	0.03
NO3-	0.01	0.13	0.01	0.01	0.04	0.01	0.10
Cl-+NO3-	0.47	0.47	5.00	0.07	0.09	0.06	0.14
sum aniones	6.16	4.78	10.83	6.67	2.48	4.99	2.32

Fecha	21/04/2009	21/04/2009	21/04/2009	12/04/2010	12/04/2010	12/04/2010	12/04/2010
Código	POP04SM0409	POE05SM0409	POE06SM0409	POE07SM0410	POE08SM0410	POE09SM0410	POE10SM0410
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	5.41	1.62	3.06	6.28	1.53	1.87	0.76
Na+	5.33	1.59	2.65	6.22	1.48	1.80	0.66
K+	0.08	0.03	0.41	0.06	0.05	0.08	0.10
Ca++	0.29	2.25	6.10	0.40	0.91	2.45	0.97
Mg++	0.01	0.66	2.23	0.01	0.14	0.99	0.34
sum cationes	5.71	4.53	11.39	6.68	2.58	5.32	2.06
aniones(%)	%	%	%	%	%	%	%
HCO3-	59.66	101.19	217.98	130.40	33.45	70.17	31.89
SO4=	189.86	3.08	89.37	416.10	2.14	1.08	18.23
Cl-	19.98	8.22	263.53	5.37	0.71	0.81	0.78
NO3-	0.41	3.18	0.37	0.49	0.66	0.09	2.33
Cl+NO3-	20.39	11.41	263.90	5.86	1.37	0.90	3.10
sum aniones	269.92	115.68	571.26	552.37	36.96	72.14	53.22
cationes(%)	%	%	%	%	%	%	%
Na+ + K+	273.13	47.28	174.35	558.17	21.26	27.91	16.50
Na+	269.00	46.53	151.05	552.49	20.55	26.73	14.38
K+	4.13	0.75	23.31	5.68	0.71	1.18	2.11
Ca++	14.65	65.79	347.41	35.10	12.54	36.48	21.00
Mg++	0.42	19.33	127.08	0.73	1.95	14.77	7.37
sum cationes	288.20	132.40	648.84	594.00	35.75	79.16	44.87
Relaciones iónicas							
rNa/rK	65.08	62.22	6.48	97.24	28.99	22.65	6.80
rMg/rCa	0.03	0.29	0.37	0.02	0.16	0.40	0.35
rSO4/rCl	9.50	0.37	0.34	77.51	3.00	1.32	23.48
rCl/rHCO3	0.33	0.08	1.21	0.04	0.02	0.01	0.02
icb	-10.85	-3.76	0.39	-95.95	-31.03	-32.28	-21.43
Kr	0.81	3.40	4.70	0.99	1.66	3.86	1.23
INDICE SAR	13.8	1.3	1.3	13.8	2.1	1.4	0.8
<b>Error (%)</b>	<b>-7.70</b>	<b>-5.38</b>	<b>5.10</b>	<b>0.27</b>	<b>3.85</b>	<b>6.36</b>	<b>-11.67</b>

**Campaña en época lluviosa (1 de 3)**

Fecha Pozo								
		CAN01SM0909	CAN02SM0909	CAN03SM0909	CAN04SM0909	FAN01SM0909	FAN02SM1109	FAN03SM0909
Coordenadas	x	89°15'19.43"O	89°13'36.32"O	89°11'12.58"O	14° 9'45.79"N	89°15'24.76"O	89°12'51.93"O	89°13'40.50"O
Coordenadas	y	14°13'49.52"N	14° 9'53.32"N	14° 5'11.02"N	89°12'49.32"O	14°13'55.80"N	14°14'43.87"N	14°11'32.59"N
	CE uS/cm	137.32	320	114	350	134.9	132.4	1374.21
	pH	7.71	8.11	7.76	7.68	5.95	6.33	8.66
	T °C	24.76	28.86	30.41	27.87	26.25	23.8	55.48
aniones		mg/l						
	HCO3-	70.2	68.6	57.5	57.2	69	92	101
	SO4=	7.9	14.1	8.5	7.8	5.1	0.09999	149.3
	Cl-	3.1	6.1	4.5	4.7	4.2	4.6	15.7
	NO3-	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.09999	0.04
	sum aniones	81.24	88.84	70.54	69.74	78.34	96.79998	266.04
cationes		mg/l						
	Na+	13.9	16.8	14.9	10.7	14.3	7.9	122
	K+	2.6	3.5	4.1	3.9	1.8	1.9	3
	Ca++	8.3	8.9	4.6	8.1	7.8	11.4	3.6
	Mg++	2.6	2.5	2.3	2.1	2.4	6.9	0.6
	sum cationes	27.4	31.7	25.9	24.8	26.3	28.1	129.2
		mg/l						
	Cl+NO3-	3.14	6.14	4.54	4.74	4.24	4.69999	15.74
	Na+ + K+	16.5	20.3	19	14.6	16.1	9.8	125
aniones (meq/l)		meq/l						
	HCO3-	1.15	1.12	0.94	0.94	1.13	1.51	1.66
	SO4=	0.16	0.29	0.18	0.16	0.11	0.00	3.11
	Cl-	0.09	0.17	0.13	0.13	0.12	0.13	0.44
	NO3-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Cl+NO3-	0.09	0.17	0.13	0.13	0.12	0.13	0.44
	sum aniones	1.40	1.59	1.25	1.23	1.36	1.64	5.21
cationes(meq/l)		meq/l						

Fecha Pozo							
	CAN01SM0909	CAN02SM0909	CAN03SM0909	CAN04SM0909	FAN01SM0909	FAN02SM1109	FAN03SM0909
Na+ + K+	0.67	0.82	0.75	0.56	0.67	0.39	5.38
Na+	0.60	0.73	0.65	0.47	0.62	0.34	5.30
K+	0.07	0.09	0.10	0.10	0.05	0.05	0.08
Ca++	0.42	0.45	0.23	0.41	0.39	0.57	0.18
Mg++	0.21	0.21	0.19	0.17	0.20	0.57	0.05
sum cationes	1.30	1.47	1.17	1.14	1.26	1.53	5.61
aniones(%)	%	%	%	%	%	%	%
HCO3-	82.00	70.69	75.58	76.04	83.40	91.88	31.79
SO4=	11.73	18.47	14.20	13.18	7.83	0.13	59.71
Cl-	6.22	10.80	10.16	10.74	8.72	7.89	8.49
NO3-	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.10	0.01
Cl+NO3-	6.27	10.84	10.22	10.79	8.77	7.99	8.50
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cationes(%)	%	%	%	%	%	%	%
Na+ + K+	51.57	55.72	64.18	49.41	53.16	25.59	95.91
Na+	46.46	49.64	55.24	40.68	49.50	22.42	94.54
K+	5.11	6.08	8.94	8.72	3.66	3.17	1.37
Ca++	31.91	30.24	19.61	35.42	31.05	37.20	3.21
Mg++	16.52	14.04	16.21	15.18	15.79	37.21	0.88
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas							
rNa/rK	9.09	8.16	6.18	4.66	13.51	7.07	69.13
rMg/rCa	0.52	0.46	0.83	0.43	0.51	1.00	0.28
rSO4/rCl	1.88	1.71	1.40	1.23	0.90	0.02	7.03
rCl/rHCO3	0.08	0.15	0.13	0.14	0.10	0.09	0.27
icb	-6.68	-3.77	-4.94	-3.27	-4.64	-2.03	-11.17
Kr	0.82	0.83	0.59	0.71	0.79	1.09	0.79
INDICE SAR	1.1	1.3	1.4	0.9	1.1	0.5	15.7
Error (%)	-7.59	-7.79	-6.14	-7.55	-7.67	-6.88	7.42

**Campaña en época lluviosa (2 de 3)**

Fecha Pozo		FAN04SM1109	FAN05SM1109	FAN06SM1109	FAN07SM1109	FAN08SM0810	POE01SM	POE02SM
		Coordenadas x	89°13'33.16"O	89°11'39.06"O	89°11'42.24"O	14.22685° N	14° 8'7.11"N	14°11'01"N
Coordenadas y	14° 9'53.70"N	14°14'5.94"N	14°14'10.80"N	89.21684° W	89°12'34.81"O	89°13'41"O	89°13'35"O	
CE uS/cm	224	219	111.6	110	780	575	266	
pH	6.03	6.99	6.26	6.53	8.5	6.41	6.56	
T °C	31.4	27.8	23	23.7	80	28.3	27.61	
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
HCO3-	101	105	100	45	92.4	186	121.1	
SO4=	10.2	10.08	2.7	8.2	229.8	50.7	14.1	
Cl-	8.1	16.3	3	2.6	20.6	50.8	7.6	
NO3-	8.5	8.1	0.09999	0.58	2.39	30.1	0.04	
sum aniones	127.8	139.48	105.79999	56.38	345.19	927.31	443.01	
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
Na+	21.1	16.3	10.9	9.9	154.2	47.9	13.8	
K+	8.9	1.9	4.9	4.5	3.5	16.3	4.5	
Ca++	10.7	20.6	11.5	4.1	11.9	46.5	25.9	
Mg++	4.7	6.8	6	1.9	0.009	10.5	3.7	
sum cationes	45.4	45.6	33.3	20.4	169.609	121.2	47.9	
NH4+	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
Cl-+NO3-	16.6	24.4	3.09999	3.18	22.99	80.9	7.64	
Na+ + K+	30	18.2	15.8	14.4	157.7	64.2	18.3	
aniones (meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	
HCO3-	1.66	1.72	1.64	0.74	1.51	3.05	1.99	
SO4=	0.21	0.21	0.06	0.17	4.79	1.06	0.29	
Cl-	0.23	0.46	0.08	0.07	0.58	1.43	0.21	
NO3-	0.14	0.13	0.00	0.01	0.04	0.49	0.00	
Cl-+NO3-	0.37	0.59	0.09	0.08	0.62	1.92	0.21	
sum aniones	2.23	2.52	1.78	0.99	6.92	6.02	2.49	

Fecha Pozo							
	FAN04SM1109	FAN05SM1109	FAN06SM1109	FAN07SM1109	FAN08SM0810	POE01SM	POE02SM
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	1.15	0.76	0.60	0.55	6.79	2.50	0.72
Na+	0.92	0.71	0.47	0.43	6.70	2.08	0.60
K+	0.23	0.05	0.13	0.12	0.09	0.42	0.12
Ca++	0.54	1.03	0.58	0.21	0.60	2.33	1.30
Mg++	0.39	0.56	0.50	0.16	0.00	0.87	0.31
sum cationes	2.07	2.35	1.67	0.91	7.39	5.69	2.32
aniones(%)	%	%	%	%	%	%	%
HCO3-	74.13	68.28	92.01	74.43	21.89	50.63	79.61
SO4=	9.51	8.33	3.16	17.24	69.17	17.54	11.78
Cl-	10.22	18.21	4.74	7.39	8.38	23.76	8.58
NO3-	6.14	5.18	0.09	0.94	0.56	8.06	0.03
Cl+NO3-	16.35	23.39	4.83	8.33	8.94	31.83	8.61
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cationes(%)	%	%	%	%	%	%	%
Na+ + K+	55.36	32.24	35.88	60.11	91.94	43.91	30.88
Na+	44.35	30.17	28.38	47.43	90.73	36.59	25.91
K+	11.00	2.07	7.50	12.68	1.21	7.32	4.97
Ca++	25.86	43.84	34.43	22.59	8.05	40.84	55.92
Mg++	18.78	23.92	29.69	17.30	0.01	15.24	13.20
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas							
rNa/rK	4.03	14.58	3.78	3.74	74.90	5.00	5.21
rMg/rCa	0.73	0.55	0.86	0.77	0.00	0.37	0.24
rSO4/rCl	0.93	0.46	0.67	2.33	8.25	0.74	1.37
rCl/rHCO3	0.14	0.27	0.05	0.10	0.38	0.47	0.11
icb	-4.02	-0.65	-6.09	-6.45	-10.71	-0.75	-2.34
Kr	1.14	1.45	1.16	0.48	1.11	2.79	1.72
INDICE SAR	1.4	0.8	0.6	1.0	12.3	1.6	0.7
Error (%)	-7.67	-7.06	-6.47	-8.80	6.55	-5.63	-7.40

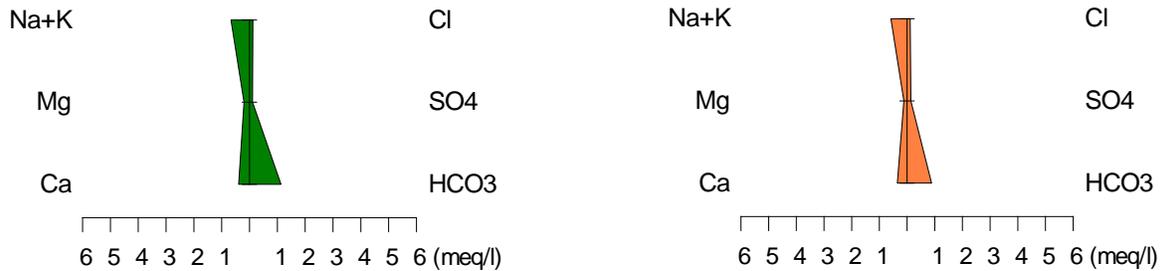
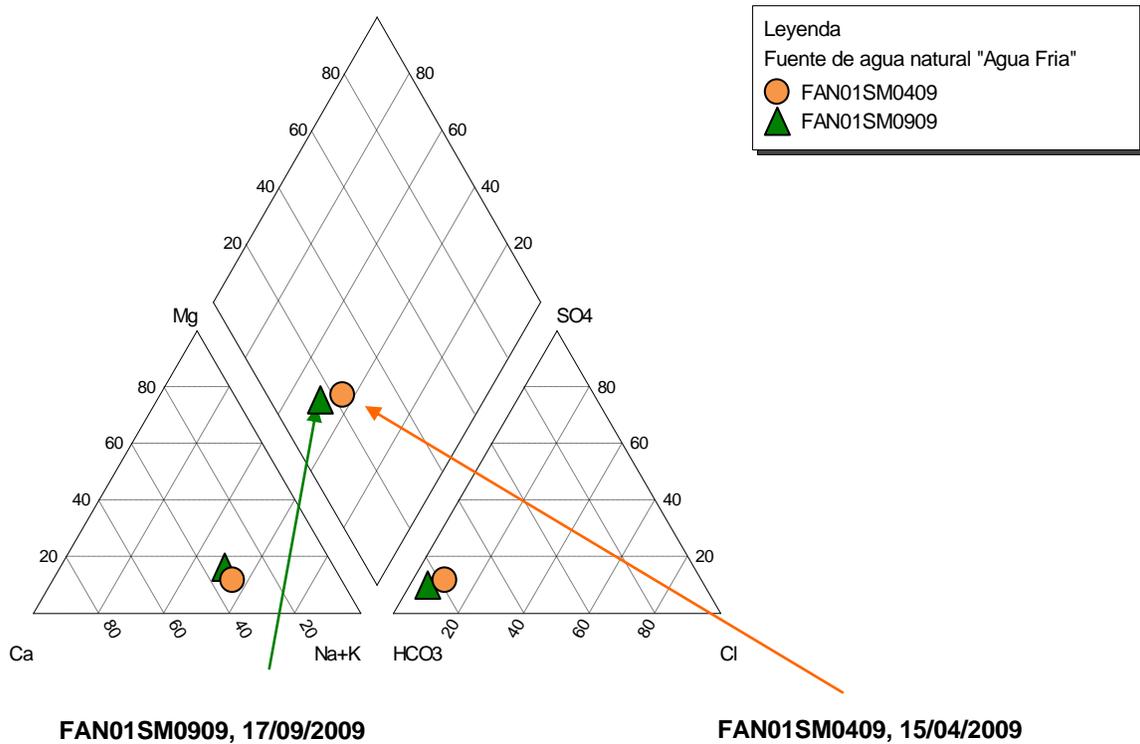
**Campaña en época lluviosa (3 de 3)**

Fecha Pozo		POE03SM	POP04SM	POE06SM	POE08SM	POE09SM	POE10SM
		Coordenadas x	14°11'25.24"N	14° 9'50.35"N	14°12'8.93"N	14° 8'9.09"N	14° 6'18.53"N
Coordenadas y	89°14'16.22"O	89°13'38.52"O	89°12'21.71"O	89°12'24.50"O	89°11'55.15"O	89°11'46.43"O	
CE uS/cm	195.5	792	1122	356	663	257	
pH	6.31	8.36	7.52	6.25	6.95	6.49	
T °C	27.7	39.4	27.93	28	29.1	29.5	
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
HCO3-	109	65	232.5	168	290	81	
SO4=	10.3	315	74.07	36.67	20.74	33.51	
Cl-	5.5	13.9	156.02	9.93	48.93	9.93	
NO3-	0.73	0.0999	0.04	2.29	2.95	8.56	
sum aniones	355.04	1233.7599	1620.08	607.14	1061.67	425.99	
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
Na+	21.9	167	73	48	67	11	
K+	6.3	2.6	31	2.2	5.1	2.8	
Ca++	15.9	5.9	89	34	57	29	
Mg++	1.3	0.2	26	2	11	5	
sum cationes	45.4	175.7	219	86.2	140.1	47.8	
NH4+	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
Cl-+NO3-	6.23	13.9999	156.06	12.22	51.88	18.49	
Na+ + K+	28.2	169.6	104	50.2	72.1	13.8	
aniones (meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	
HCO3-	1.79	1.07	3.81	2.75	4.75	1.33	
SO4=	0.21	6.56	1.54	0.76	0.43	0.70	
Cl-	0.15	0.39	4.39	0.28	1.38	0.28	
NO3-	0.01	0.00	0.00	0.04	0.05	0.14	
Cl-+NO3-	0.17	0.39	4.40	0.32	1.43	0.42	
sum aniones	2.17	8.02	9.75	3.83	6.61	2.44	

Fecha Pozo						
	POE03SM	POP04SM	POE06SM	POE08SM	POE09SM	POE10SM
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	1.11	7.33	3.97	2.14	3.04	0.55
Na+	0.95	7.26	3.17	2.09	2.91	0.48
K+	0.16	0.07	0.79	0.06	0.13	0.07
Ca++	0.80	0.30	4.45	1.70	2.85	1.45
Mg++	0.11	0.02	2.15	0.17	0.91	0.41
sum cationes	2.02	7.64	10.57	4.01	6.80	2.41
aniones(%)	%	%	%	%	%	%
HCO3-	82.41	13.28	39.09	71.82	71.90	54.34
SO4=	9.90	81.81	15.83	19.92	6.53	28.57
Cl-	7.15	4.88	45.08	7.29	20.85	11.45
NO3-	0.54	0.02	0.01	0.96	0.72	5.65
Cl+NO3-	7.69	4.90	45.08	8.26	21.56	17.10
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cationes(%)	%	%	%	%	%	%
Na+ + K+	55.23	95.92	37.54	53.47	44.74	22.79
Na+	47.24	95.05	30.04	52.06	42.82	19.82
K+	7.99	0.87	7.50	1.40	1.92	2.97
Ca++	39.44	3.86	42.12	42.41	41.90	60.09
Mg++	5.33	0.22	20.34	4.12	13.36	17.12
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas						
rNa/rK	5.91	109.19	4.00	37.09	22.33	6.68
rMg/rCa	0.14	0.06	0.48	0.10	0.32	0.28
rSO4/rCl	1.39	16.76	0.35	2.73	0.31	2.50
rCl/rHCO3	0.09	0.37	1.15	0.10	0.29	0.21
icb	-6.19	-17.71	0.10	-6.66	-1.21	-0.97
Kr	1.36	0.69	4.01	2.34	4.01	1.37
INDICE SAR	1.4	18.4	1.7	2.2	2.1	0.5
Error (%)	-7.29	-4.88	8.03	4.43	2.84	-1.26

## ANEXO 6: DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF POR SITIO

Diagrama de Piper para FAN01

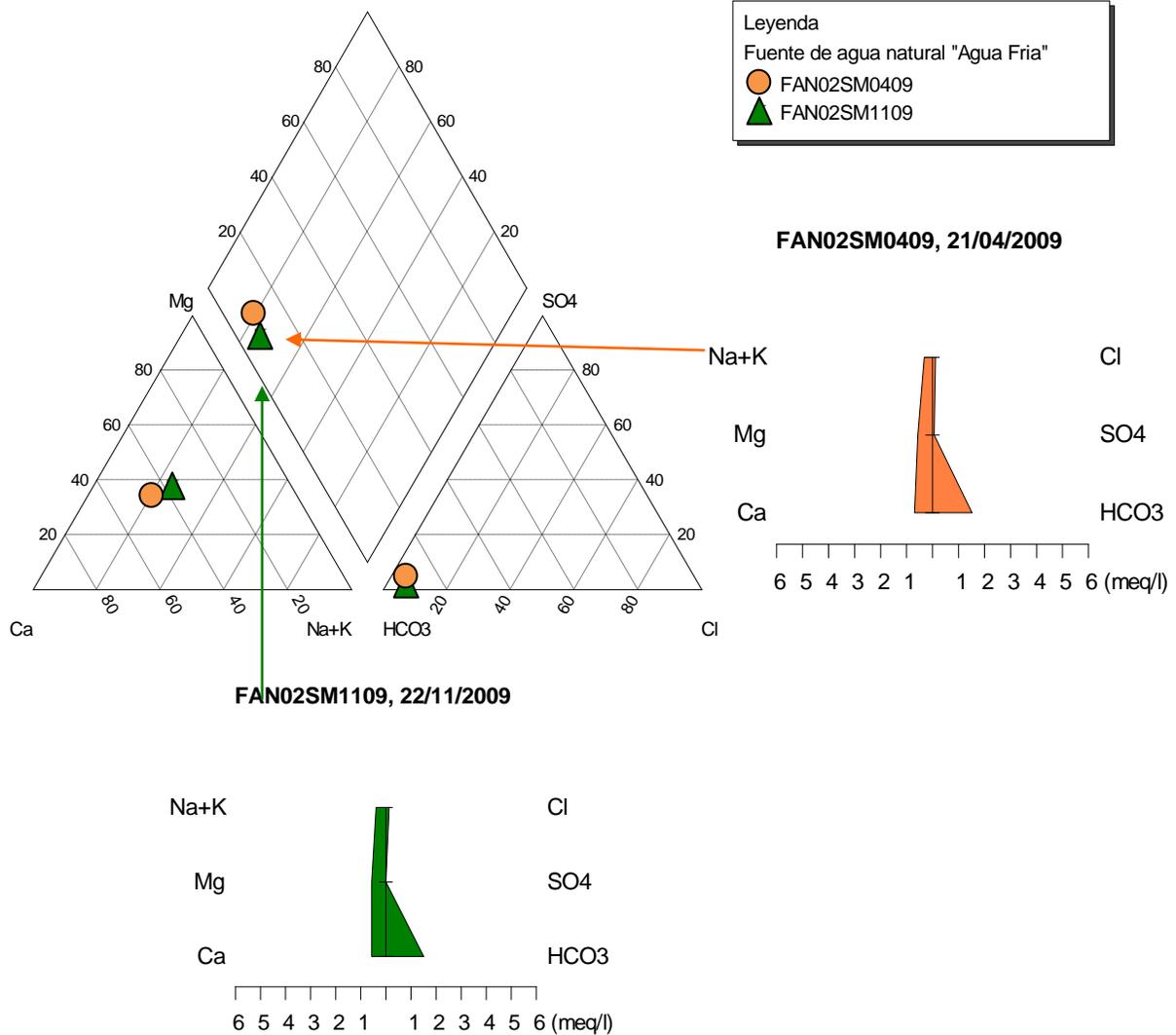


Manantial captado, cuyas aguas aportan al río Agua Fría, afluente al Metayate. Se encuentra en la parte alta de la subcuenca, a 715 msnm, con un caudal menor a 1 litro por minuto. Sus aguas son Bicarbonatadas-sódicas-cálcicas en ambas campañas de monitoreo.

La zona pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas (aquellas que han sido llevadas a la superficie de la tierra por la fuerza volcánica, de granulometría fina: riolita, diabasa, basalto), del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones). Litológicamente, se compone de piroclastitas ácidas, ignimbritas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas.

Origen de la composición del agua: Meteorización de plagioclasas (silicatos), minerales ferromagnesianos, con intercambio iónico.

Diagrama de Piper para FAN02



Manantial captado, cuyas aguas aportan a la quebrada salto Colorado, afluente del río Los Micos, el cual es a su vez afluente al río Metayate. Se encuentra en la parte alta de la subcuenca, a 917 msnm, en la cara sur del cerro Piñuelas (elevación: 1,025 msnm), con un caudal de aproximadamente 6 litros por minuto.

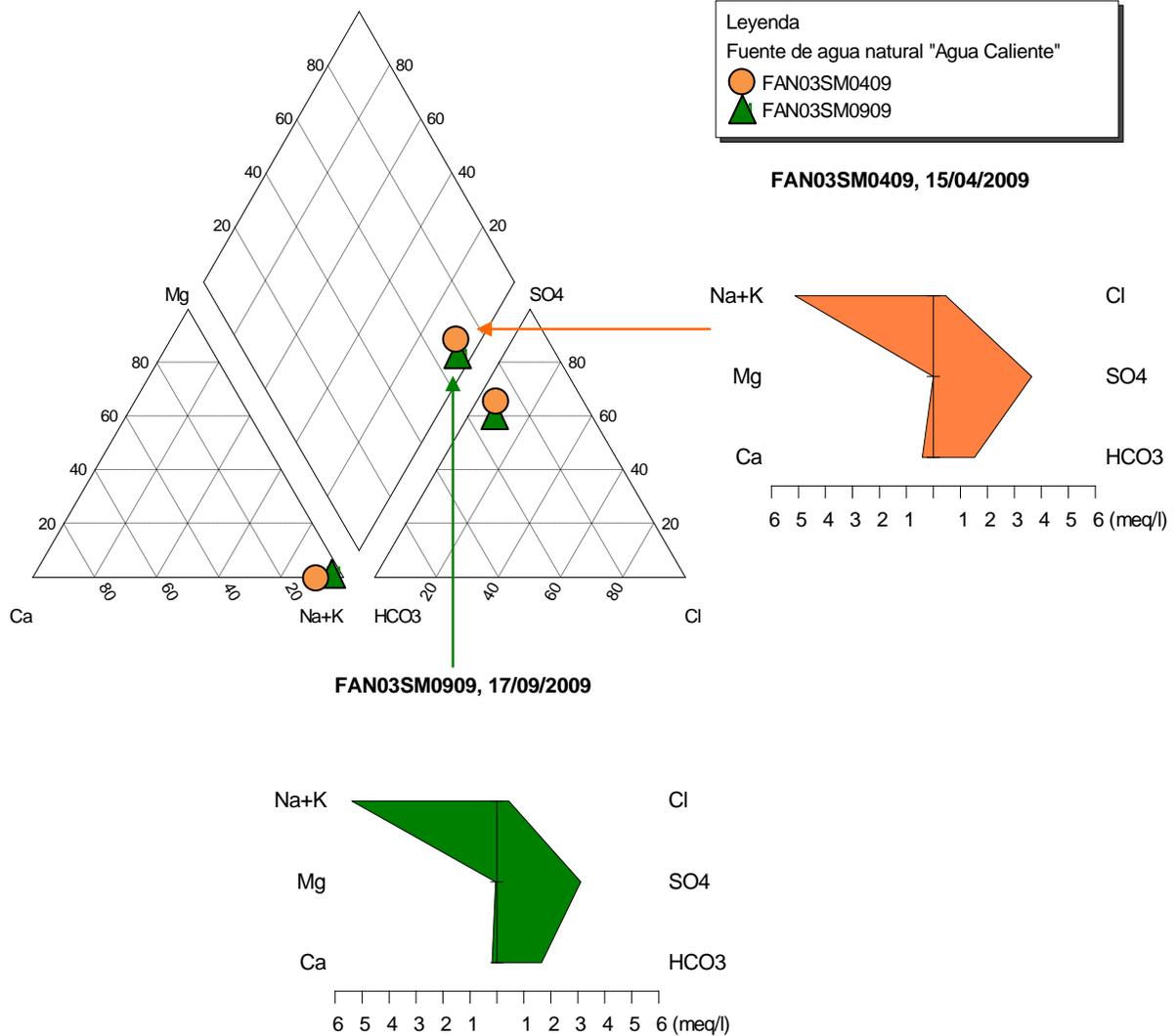
Sus aguas fueron bicarbonatadas-cálcicas-magnésicas-sódicas en ambas campañas.

La zona pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones). Litológicamente, se compone de piroclastitas ácidas, ignimbritas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas.

Origen de la composición del agua: Meteorización de plagioclasas (silicatos), minerales ferromagnesianos, con intercambio iónico.

Presenta un flujo local de agua subterránea.

Diagrama de Piper para FAN03

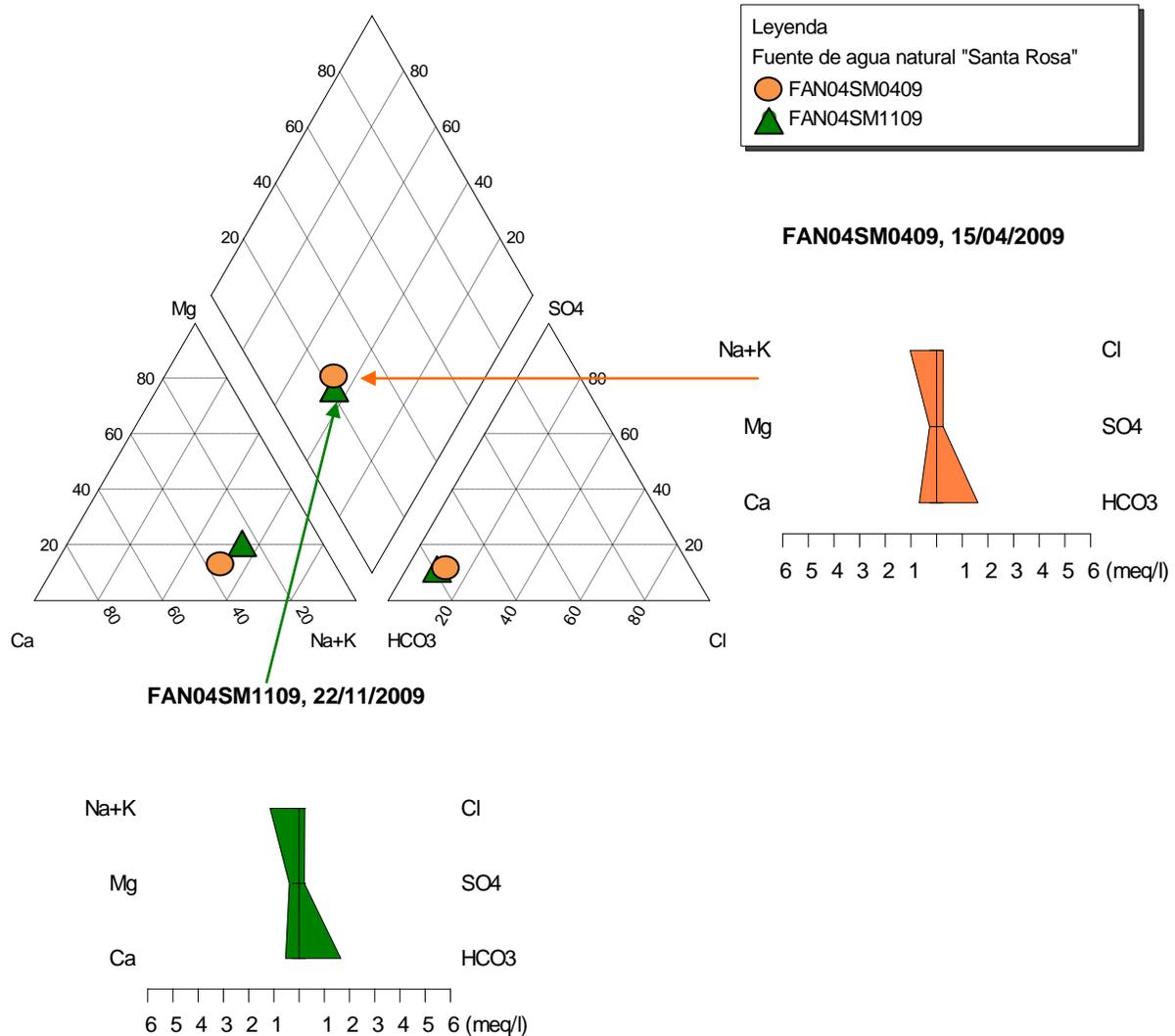


Esta corresponde a un manantial, cuyas aguas aportan al río Metayate. Se encuentra en la parte media de la subcuenca, a 358 msnm, en las afueras de la ciudad de Agua Caliente, en la ladera este de la loma El Nanzal (elevación: 473 msnm), el cual está deforestado. Sus aguas con sulfatadas-bicarbonatadas-sódicas en ambas campañas.

La zona pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones). Sin embargo, la poca presencia de calcio y bicarbonato, además de las temperaturas registradas (51,53°C en abril 2009 y 55,48°C en época lluviosa), la conductividad eléctrica (1261 y 1374  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en abril y septiembre, respectivamente) y el pH (en abril y septiembre, respectivamente), sugieren que las aguas provienen de un acuífero confinado, principalmente, con actividad geotermal.

Origen de la composición del agua: Meteorización de silicatos, posible presencia de albita, con intercambio iónico, y posibles minerales ferromagnesianos.

Diagrama de Piper para FAN04



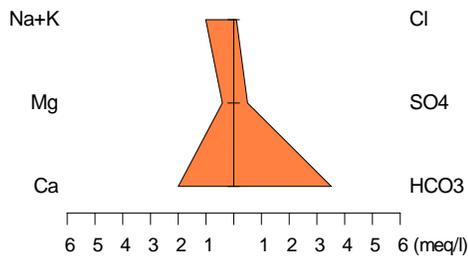
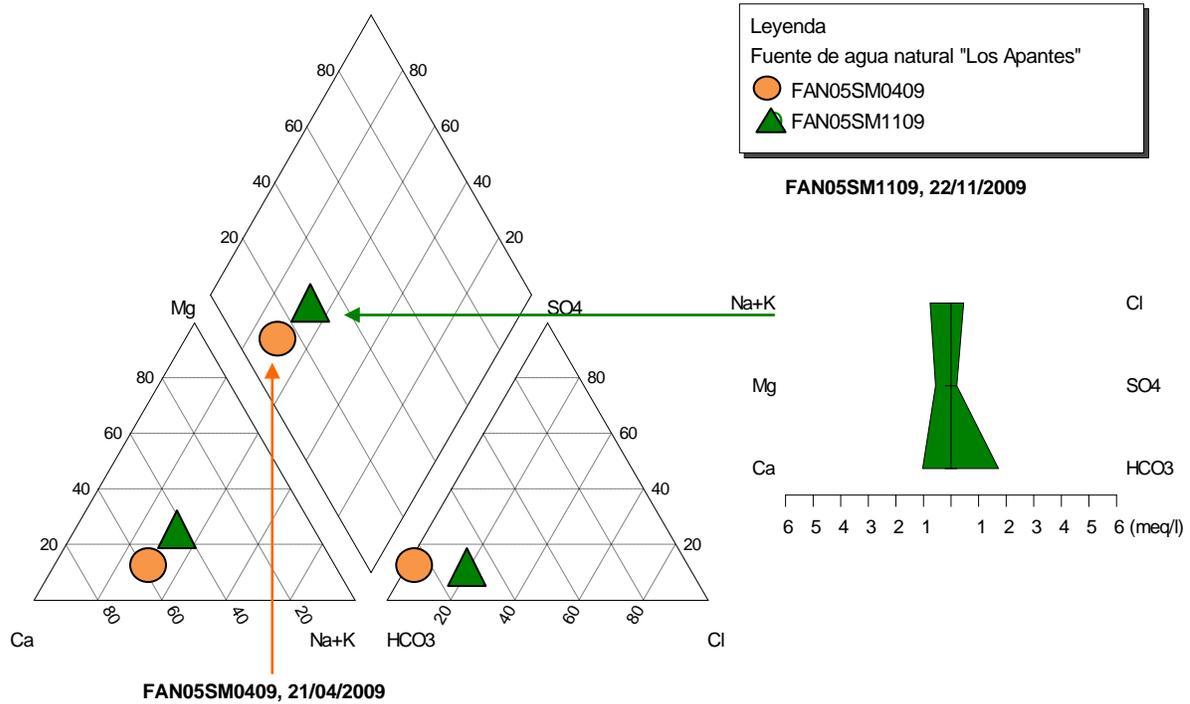
Manantial captado, cuyas aguas aporta al río Metayate. Se encuentra en el caserío Santa Rosa, a 315msnm, en el margen izquierdo del río Metayate, a 20 m de la orilla en época seca. En rumbo oeste y norte se encuentran parcelas agrícolas, de igual forma al sur, pero separado por una calle de tierra que va del caserío Santa Rosa al Caserío San Antonio.

Las aguas registraron ser bicarbonatadas-sódicas-cálcicas en época lluviosa, y bicarbonatadas-sódicas-cálcicas-magnésicas en época seca. Esto puede indicar una dilución del calcio, o intercambio iónico de éste con el sodio.

La zona se encuentra en un área donde convergen dos formaciones: Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones); y formación Morazán, con lavas de Intermedias a Ácidas, generadas en el período del Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).

Origen de la composición del agua: meteorización de silicatos, albita, plagioclasas, minerales ferromagnésicos, carbonatos, así como intercambio iónico.

Diagrama de Piper para FAN05



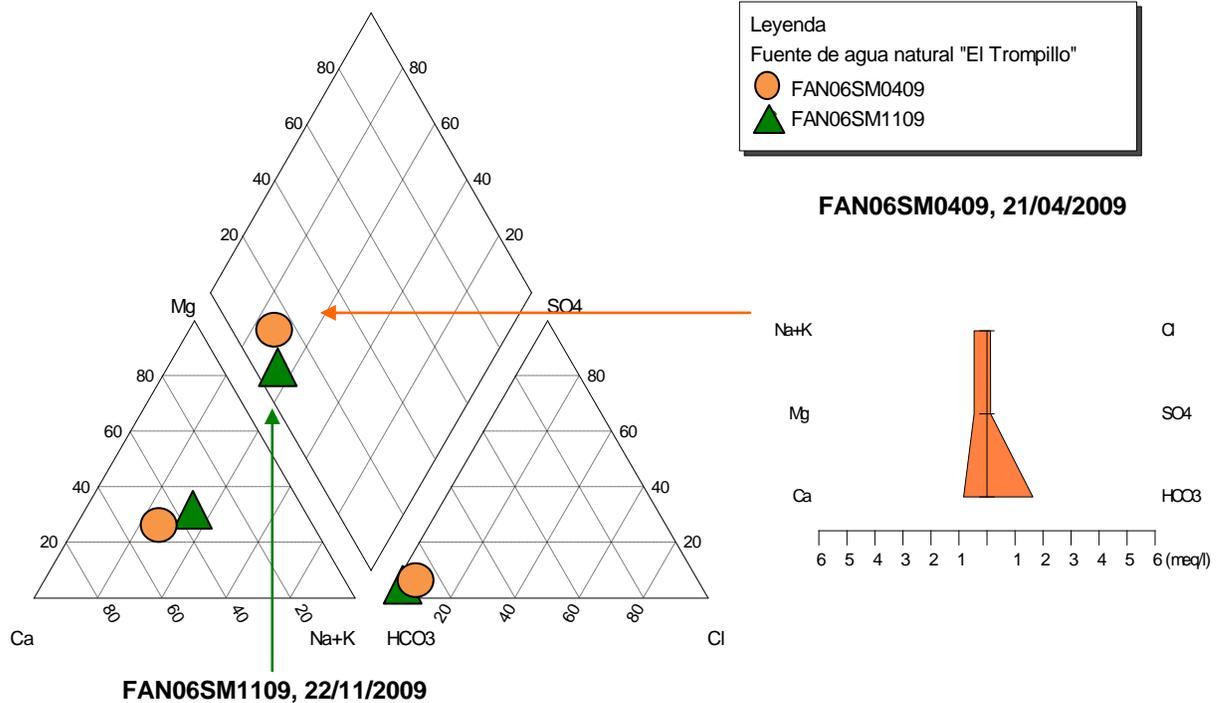
Manantial captado, cuyas aguas aportan a la quebrada Ojushte y Conacaste, afluentes del río Los Micos. Se encuentra en la parte alta de la subcuenca, a 1034 msnm, en el costado oriente del cerro Loma Negra (elevación: 1,126 msnm), con un caudal de aproximadamente 5 litros por minuto. En la zona hay cultivo de maíz para consumo familiar.

Las aguas fueron bicarbonatadas-cálcicas-sódicas en ambas épocas, con una tendencia a aumentar las concentraciones de calcio y bicarbonato en la época seca. Esto sugiere la disolución de tales minerales, así como un posible intercambio iónico entre sodio y magnesio. Litológicamente, se compone de piroclastitas ácidas, ignimbritas, epiclastitas volcánicas, localmente efusivas ácidas intercaladas.

La zona se encuentra la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones).

Origen de la composición del agua: Meteorización de carbonatos y silicatos (plagioclasas), y presencia de arcillas. Presenta un flujo local de agua subterránea.

Diagrama de Piper para FAN06



Manantial captado, que aporta a la quebrada El Trompillo, afluente al río Los Micos. Se encuentra rodeado de zonas agrícolas, y presentó algas verdes y plantas acuáticas. Se encuentra en la parte alta de la subcuenca, a 735 msnm, al noroeste del cerro El Volcán (832 msnm).

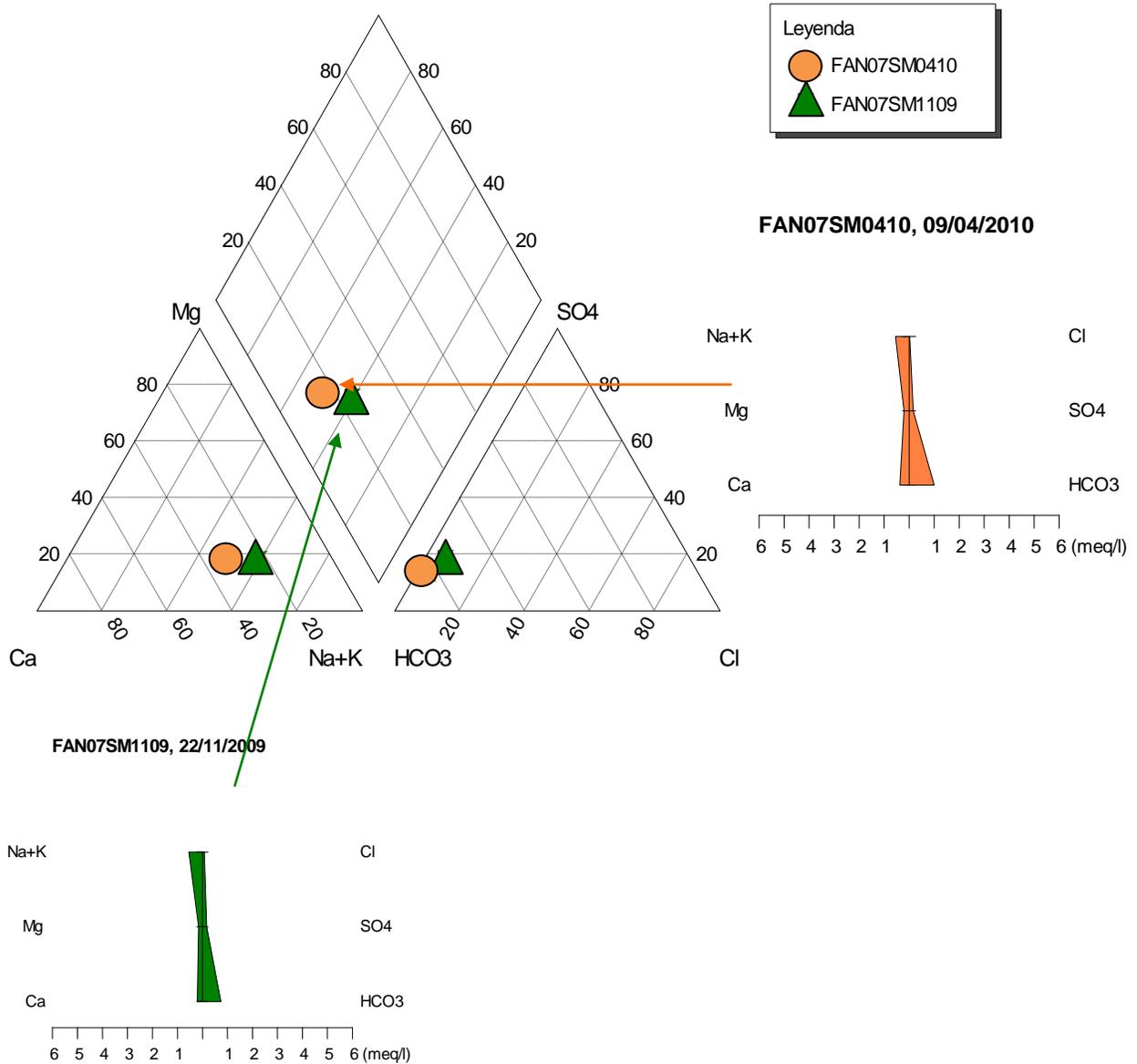
Las aguas fueron bicarbonatadas-cálcicas-sódicas-magnésicas en ambas épocas, con una pequeña tendencia a aumentar las concentraciones de calcio en la época lluviosa.

La zona se encuentra la formación Morazán, con lavas de Intermedias a Acidas, generadas en el período del Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).

Origen de la composición del agua: Meteorización de carbonatos y silicatos (plagioclasas).

Presenta un flujo local de agua subterránea.

### Diagrama de Piper para FAN07SM



Manantial captado, ubicado en la cuenca alta del río Metayate, con un caudal menor a 1 l/s. Se encuentra a la orilla de una calle rural, rodeado de zonas agrícolas. Se encuentra en la parte alta de la subcuenca, a 735 msnm, al noreste del cerro Sitio Viejo (764 msnm).

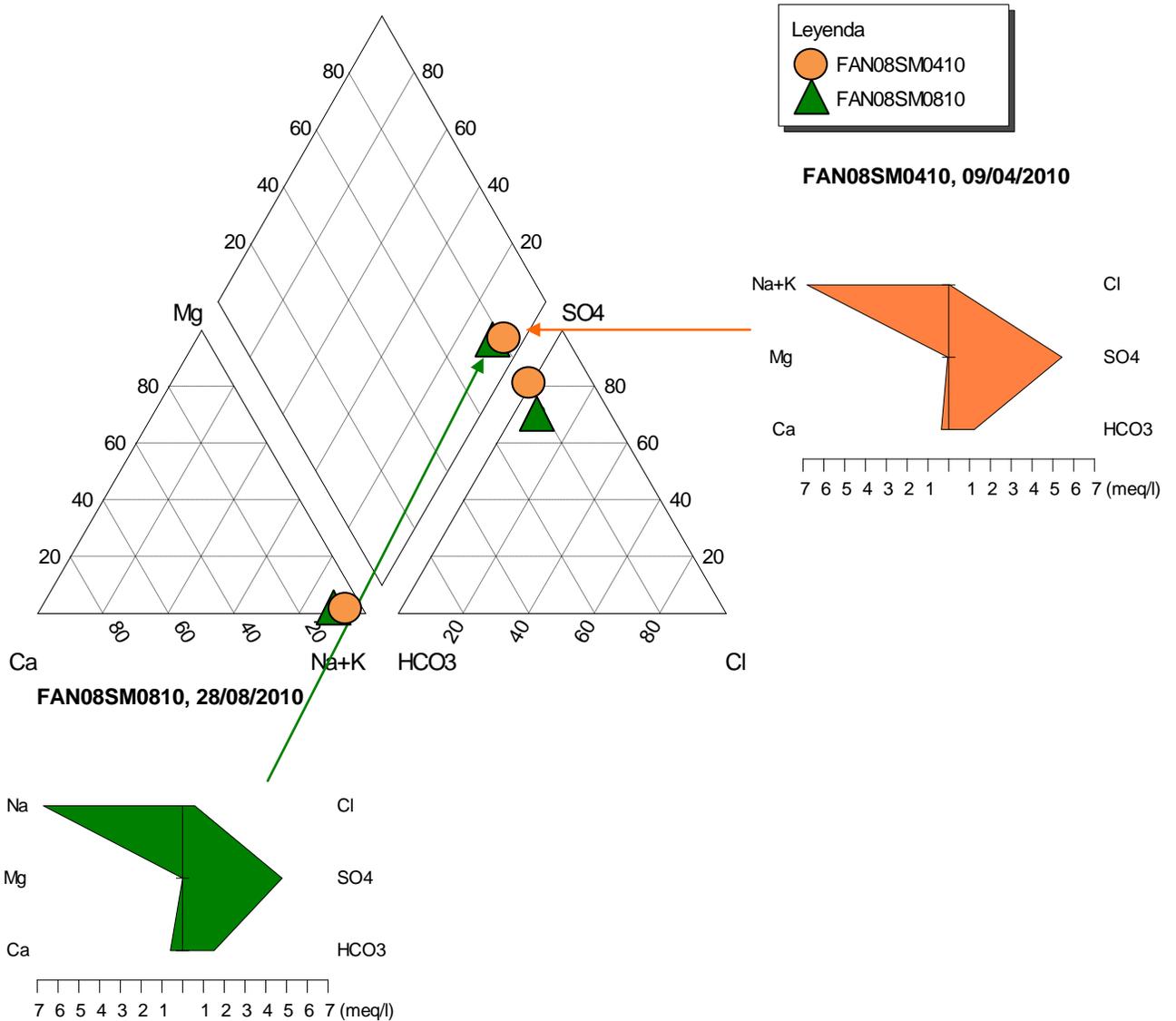
Las aguas fueron Bicarbonatadas-sódica-cálcica en ambas épocas.

La zona se encuentra la formación Morazán, con lavas de Intermedias a Acidas, generadas en el período del Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).

Origen de la composición del agua: Meteorización de carbonatos, albita y silicatos (plagioclasas), minerales ferromagnesianos, incluso presencia de arcillas que generen intercambio iónico.

Presenta un flujo local de agua subterránea.

### Diagrama de Piper para FAN08SM



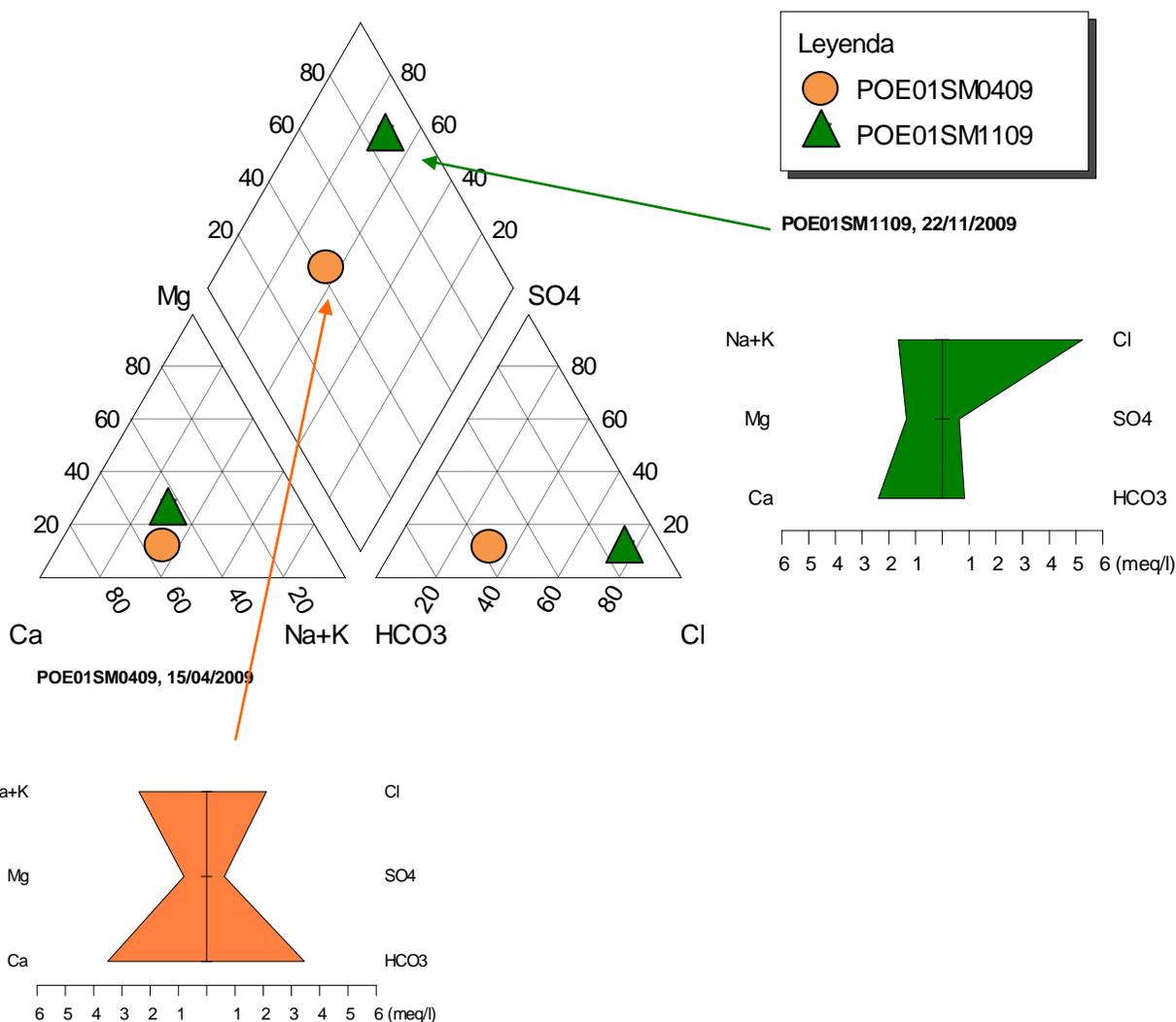
Esta fuente de agua natural (FAN) corresponde a un nacimiento, cuyas aguas aportan al río Metayate. Sus aguas no son usadas para consumo humano.

Sus aguas con sulfatadas-bicarbonatadas-sódicas en abril 2010.

La zona pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones). Sin embargo, la poca presencia de calcio y bicarbonato, además de las temperaturas registradas (90°C en abril 2010), la conductividad eléctrica (1175  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y el pH (7.7), sugieren que las aguas provienen de un acuífero confinado, principalmente, con actividad geotermal.

Mineralogía: Meteorización de silicatos, con intercambio catiónico, y posibles minerales ferromagnesianos.

## Diagrama de Piper para POE01



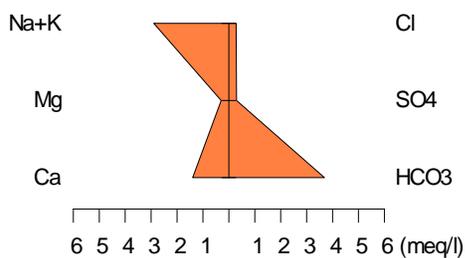
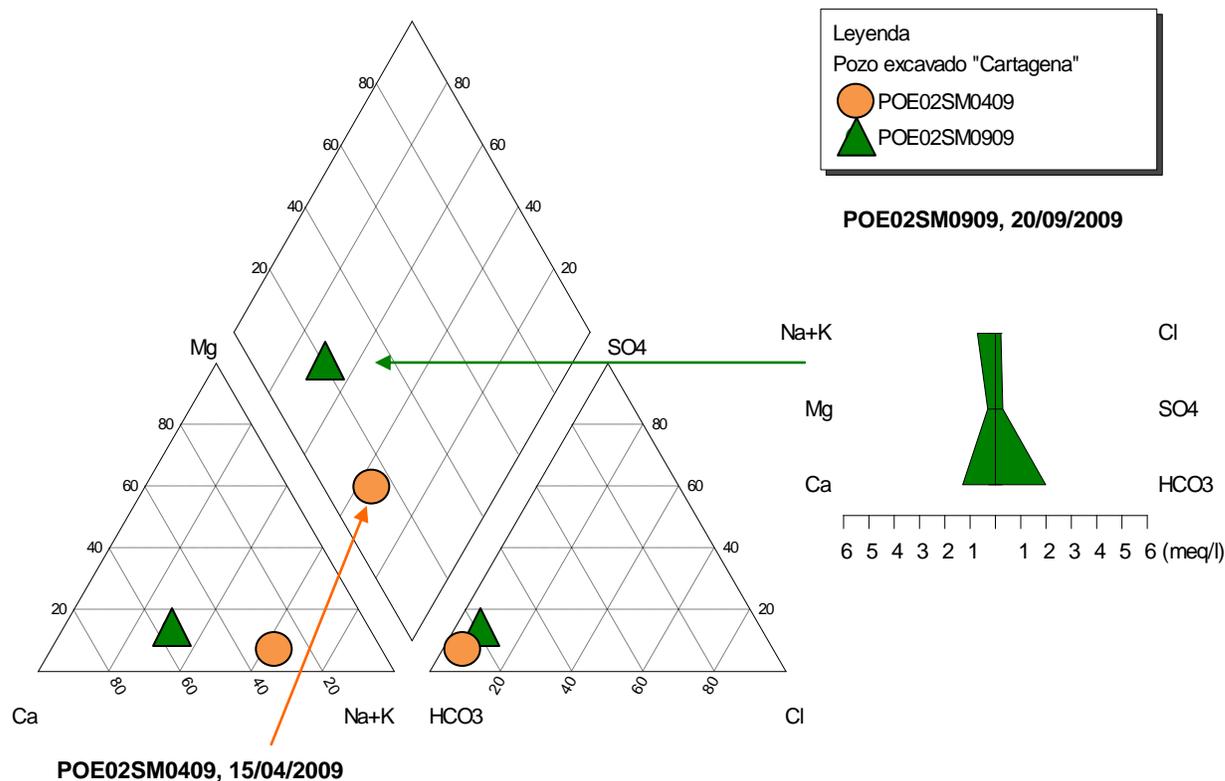
Esta fuente de agua subterránea (POE01SM) corresponde a un pozo excavado dentro de una vivienda, en la ciudad de Agua Caliente, próximo a fosas sépticas. El pozo se encuentra tapado, es limpiado una vez al año, y presenta variaciones de nivel en época seca y lluviosa.

Las aguas fueron bicarbonatadas-cloruradas-cálcicas-sódicas en época seca, lo que indica contaminación antropogénica por la presencia de cloruros.

La zona pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones).

Mineralogía: posible meteorización de minerales ferromagnesianos, calcio y silicatos. A pesar que sugiere la posibilidad de disolución de halitas, es más probable que se deba a contaminación antropogénica.

### Diagrama de Piper para POE02



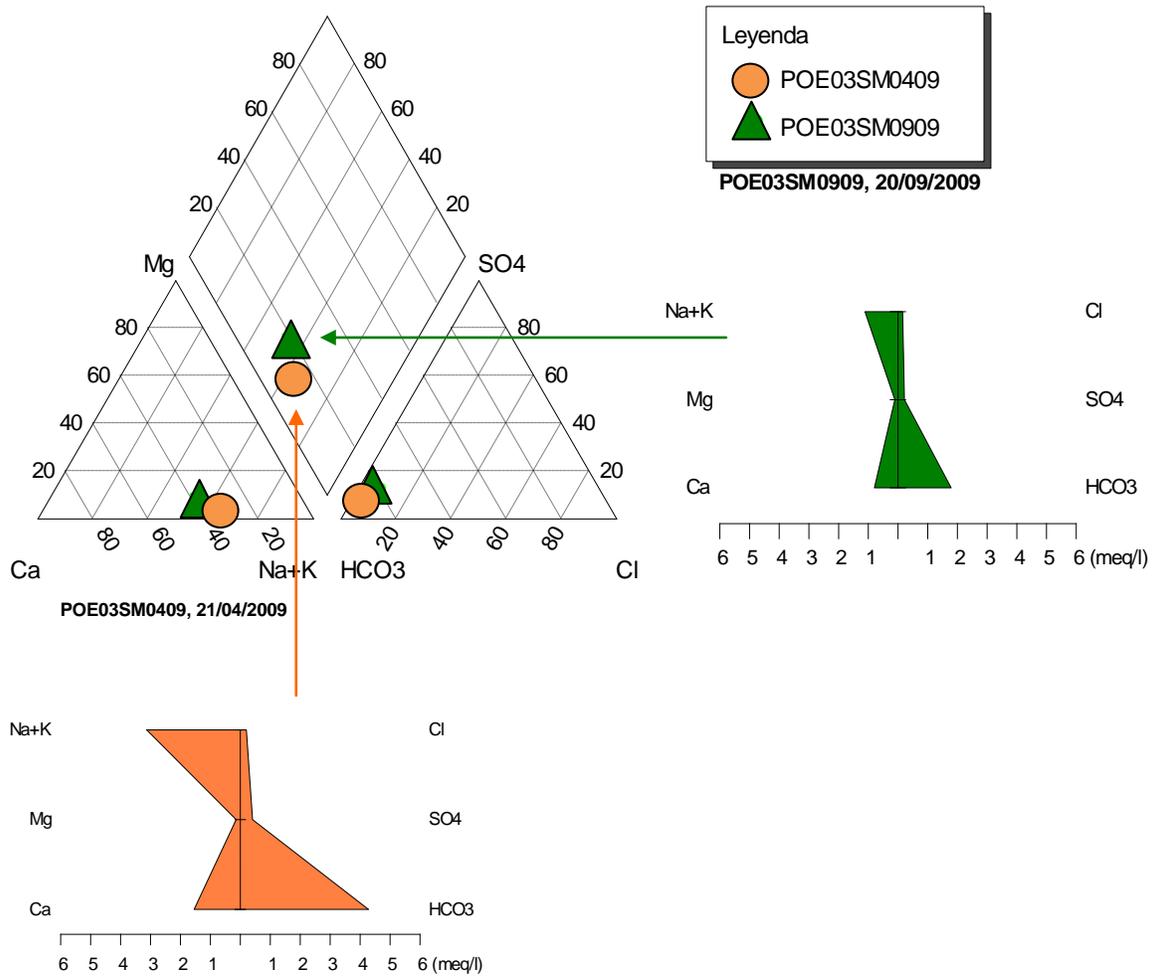
Esta fuente de agua subterránea corresponde a un pozo excavado en una zona rural, rodeada de zonas de pastado de ganado. El pozo se encuentra descubierto y construido en 2009.

Las aguas fueron bicarbonatadas-cálcicas-sódicas en época seca, y bicarbonatadas-sódicas-cálcicas en época lluviosa, lo que indica posible presencia de arcillas por existir indicios de un intercambio iónico.

La zona pertenece a la formación Cuscatlán, compuesta por Piroclastitas Acidas, epiclastitas volcánicas, del período del Pleistoceno Inferior e Intermedio (1,6 millones – 10,000 años).

Origen de la composición del agua: Meteorización de plagioclasas, albita, calcio y silicatos, rocas ferromagnesianas e intercambio iónico entre el calcio y el sodio.

### Diagrama de Piper para POE03



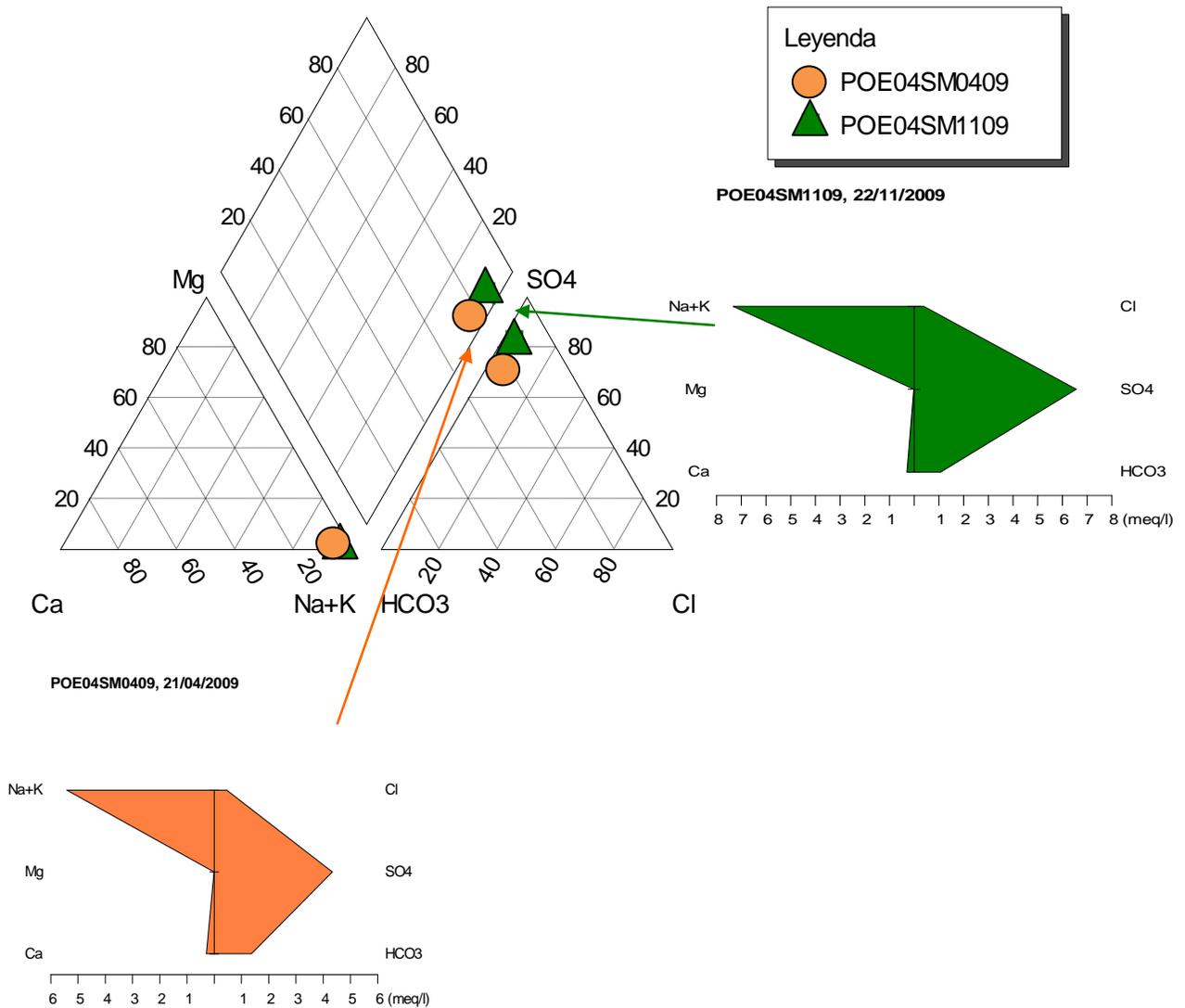
Esta fuente de agua subterránea corresponde a un pozo excavado en una zona rural, a 10 m del río Quebrada El Cordoncillo, el cual desemboca en el río Metayate. El pozo se encuentra tapado, siendo limpiada una vez al año.

Las aguas fueron bicarbonatadas-sódicas-cálcicas en época seca. El bajo contenido de cloruros indicaría que no existe contaminación antropogénica.

La zona se encuentra la formación Morazán, con flujos piroclásticos que presentan Riolita e Ignimbrita, generadas en el período del Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).

Origen de la composición del agua: posible meteorización de carbonatos, silicatos, dolomita, plagioclasa y caliza, además de posible intercambio iónico. En época lluviosa apareció hierro, lo que podría sugerir la presencia de minerales ferromagnésicos.

## Diagrama de Piper para POE04



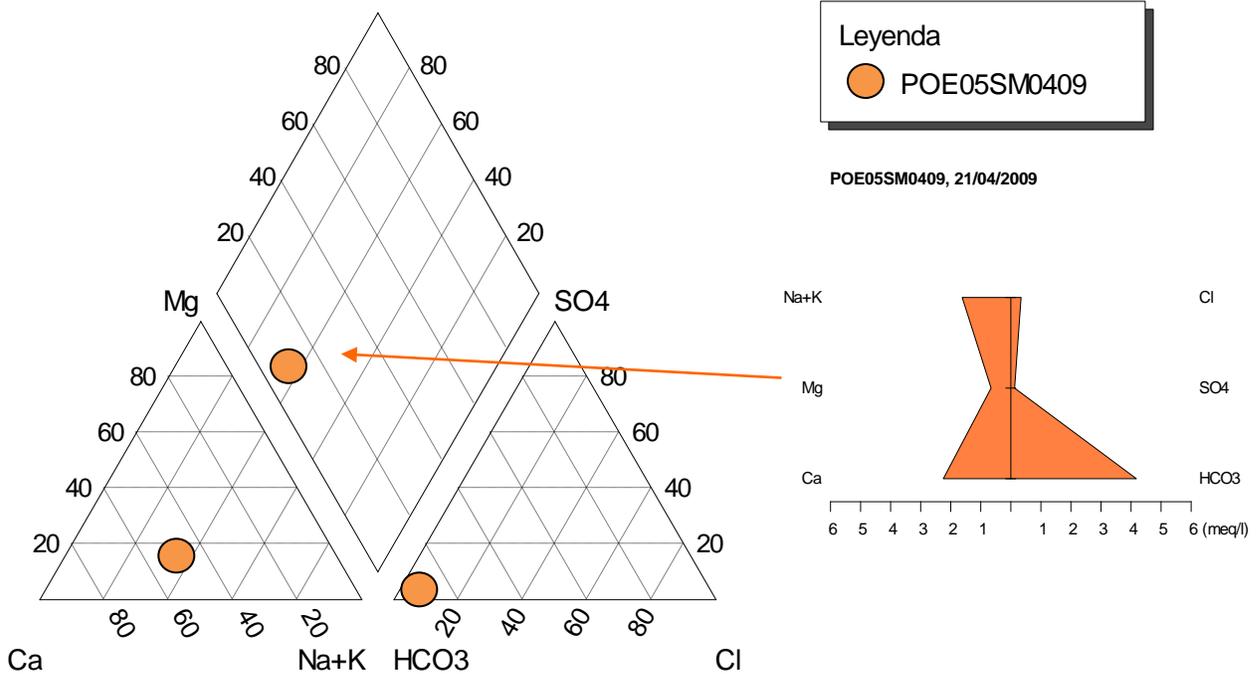
Es un pozo perforado, de aproximadamente 40 m de profundidad, a 230 m del río Metayate, en el caserío Santa Rosa. Este presentó artesianismo, con temperaturas de 36.1 a 39° C.

Las aguas fueron sulfatadas-sódicas en época seca.

La zona superficial pertenece a la formación Cuscatlán, compuesta por Piroclastitas Acidas, epiclastitas volcánicas, del período del Pleistoceno Inferior e Intermedio (1,6 millones – 10,000 años). Debajo de ella, se encontraría la formación Morazán, con posibilidad de haber un acuífero fracturado, con agua que proviene de zonas con termalismo.

Origen de la composición del agua: posible meteorización de silicatos, albita y minerales ferromagnesianos, además de posible intercambio iónico.

## Diagrama de Piper para POE05



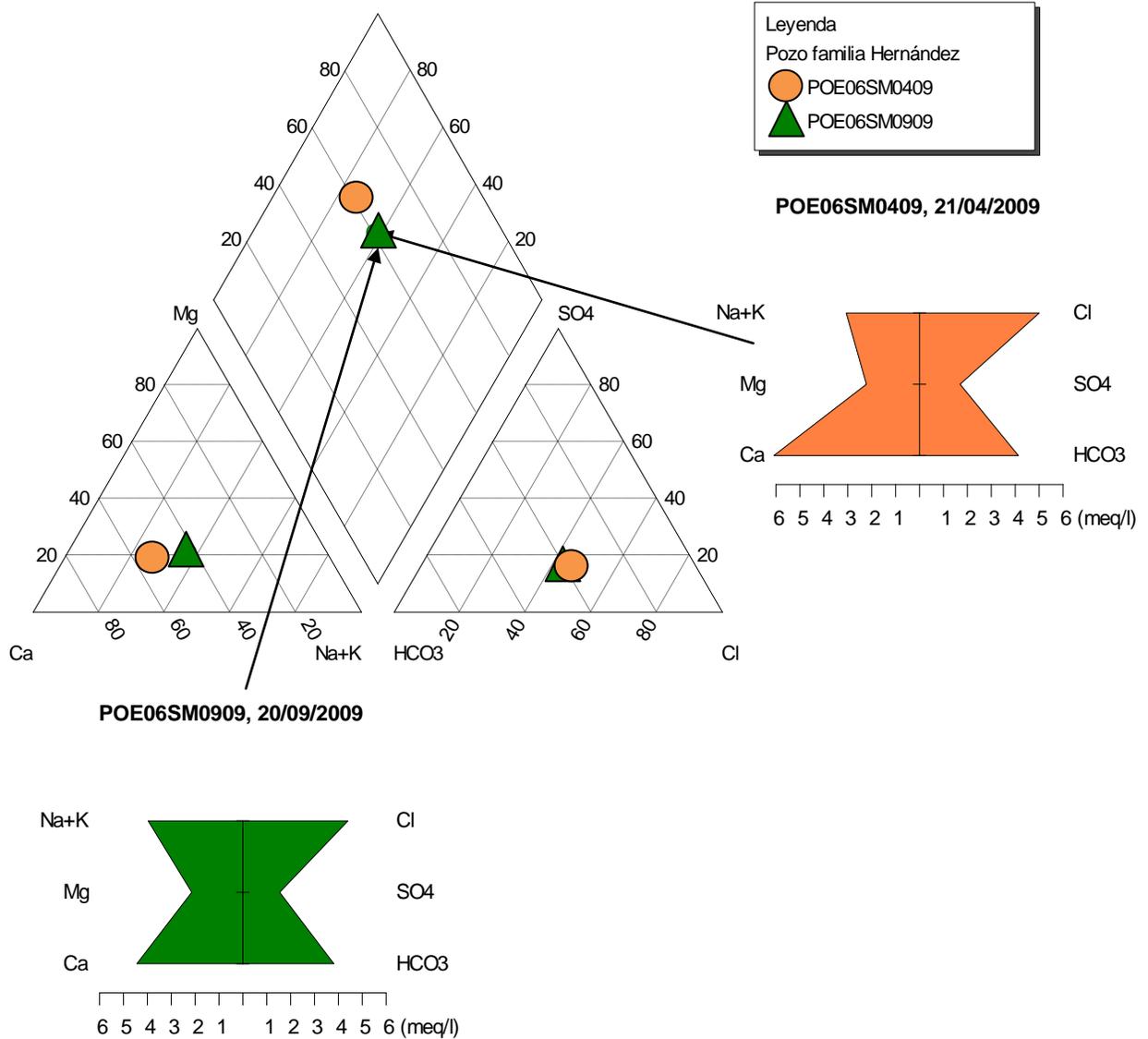
Pozo excavado en una vivienda rural, del cual se abastece una familia de 6 personas. El pozo se encuentra tapado, y es limpiado una vez al año.

Las aguas fueron bicarbonatadas-cálcicas-sódicas en época seca.

La zona pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones).

Origen de la composición del agua: posible meteorización de plagioclasas, albita, e intercambio iónico.

**Diagrama de Piper para POE06**



Este sitio corresponde a un pozo excavado en una vivienda rural, del cual se abastece una familia de 7 personas. El pozo se encuentra tapado, y es limpiado una vez al año.

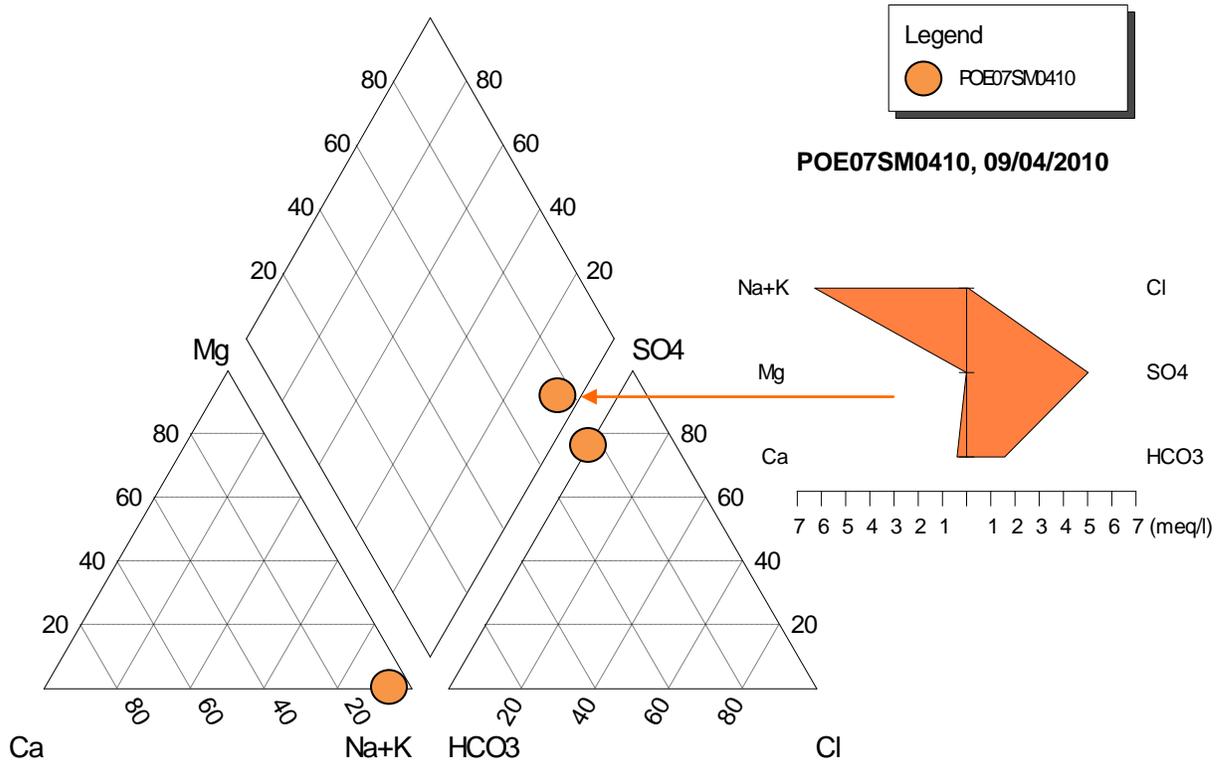
Las aguas fueron cloruradas-bicarbonatadas-cálcicas-sódicas-magnésicas en época seca y lluviosa, con una tendencia a reducirse la cantidad de calcio y a aumentar el sodio en la época lluviosa. Esto sugiere procesos de intercambio iónico.

La zona superficial pertenece a la formación Cuscatlán, compuesta por Piroclastitas Ácidas, epiclastitas volcánicas, del período del Pleistoceno Inferior e Intermedio (1,6 millones – 10,000 años).

Mineralogía: posible meteorización de carbonatos, Dolomita, intercambio iónico.

El flujo parece no ser local, ya que presenta una alta mineralización del agua, en especial cloruros.

## Diagrama de Piper para POE07SM



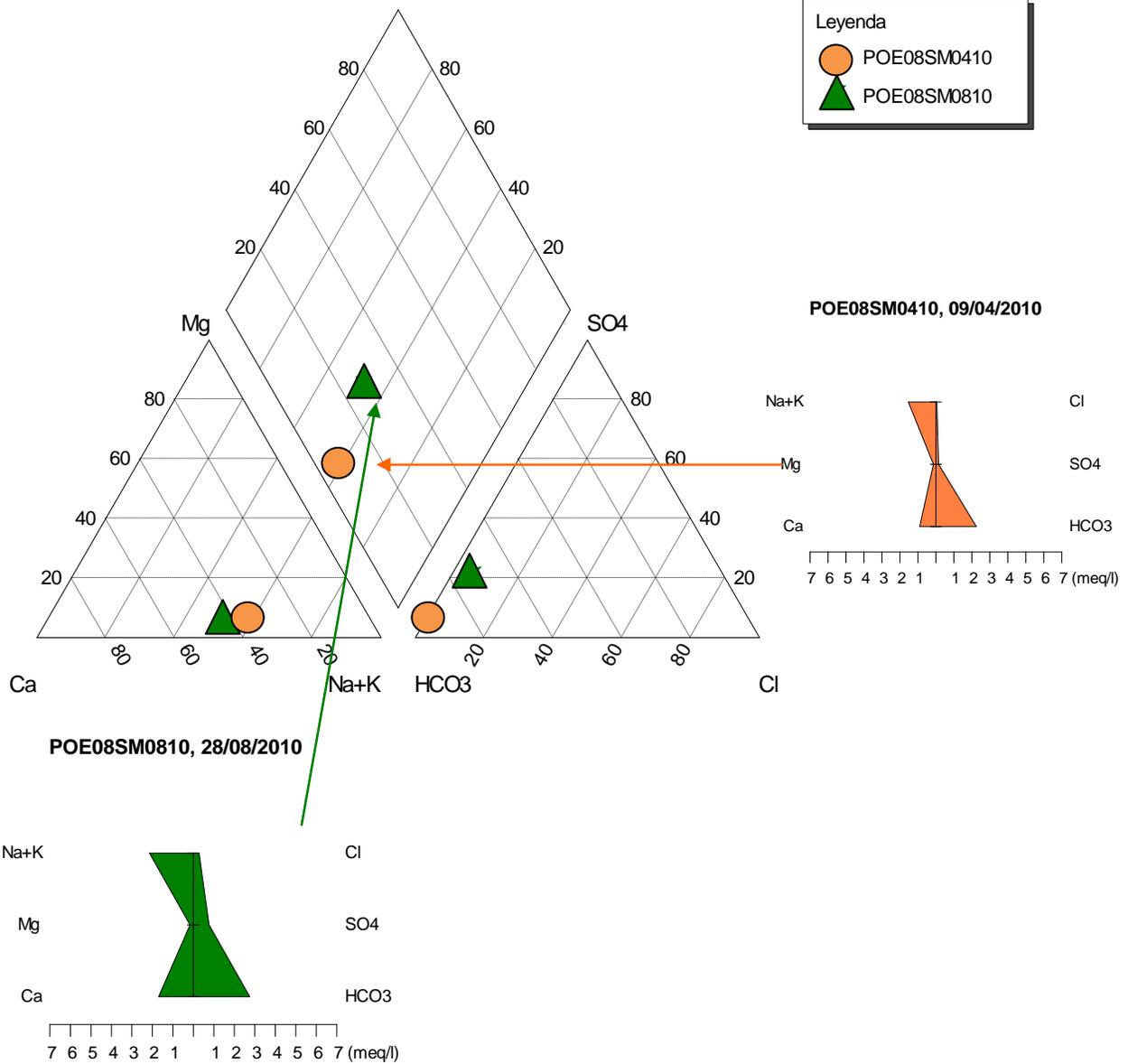
Esta fuente de agua subterránea corresponde a un pozo excavado, con bomba manual para extraer agua, en una zona rural, rodeada de viviendas, a 300 m del río Metayate, zona de San Antonio. Presentó temperaturas de 31.97° C.

Las aguas fueron sulfatadas-sódicas en época seca.

La zona superficial pertenece a la formación Cuscatlán, compuesta por Piroclastitas Ácidas, epiclastitas volcánicas, del período del Pleistoceno Inferior e Intermedio (1,6 millones – 10,000 años). Debajo de ella, se encontraría la formación Morazán, con posibilidad de haber un acuífero fracturado, con agua que proviene de zonas con termalismo.

Origen de la composición del agua: posible meteorización de silicatos, albita, y minerales ferromagnesianos, además de posible intercambio iónico o precipitación de calcita.

### Diagrama de Piper para POE08SM



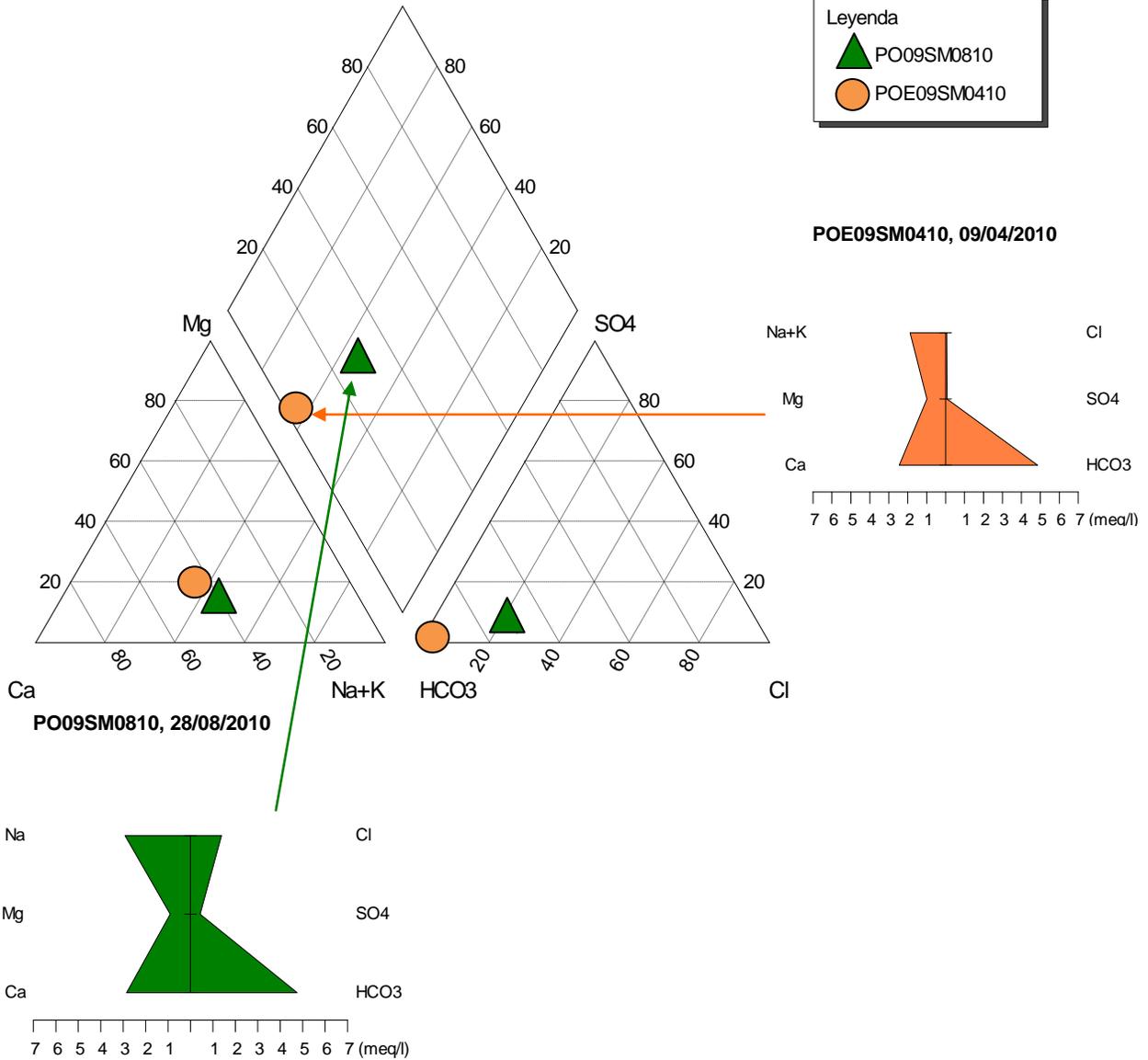
Esta fuente de agua subterránea corresponde a un pozo excavado, con bomba manual para extraer agua, en una zona rural, rodeada de viviendas, a 630 m del río Metayate, caserío El Obrajuelo. Presentó temperaturas de 32.2° C.

Las aguas fueron Bicarbonatada-sódica-cálcica en época seca.

La zona superficial pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones).

Origen de la composición del agua: Meteorización de carbonatos, silicatos, plagioclasas, intercambio iónico (arcillas).

### Diagrama de Piper para POE09SM



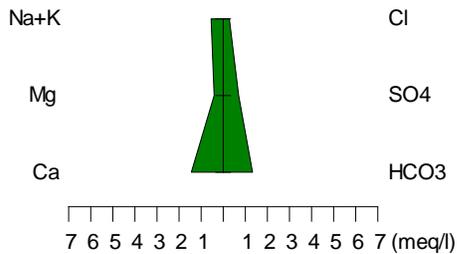
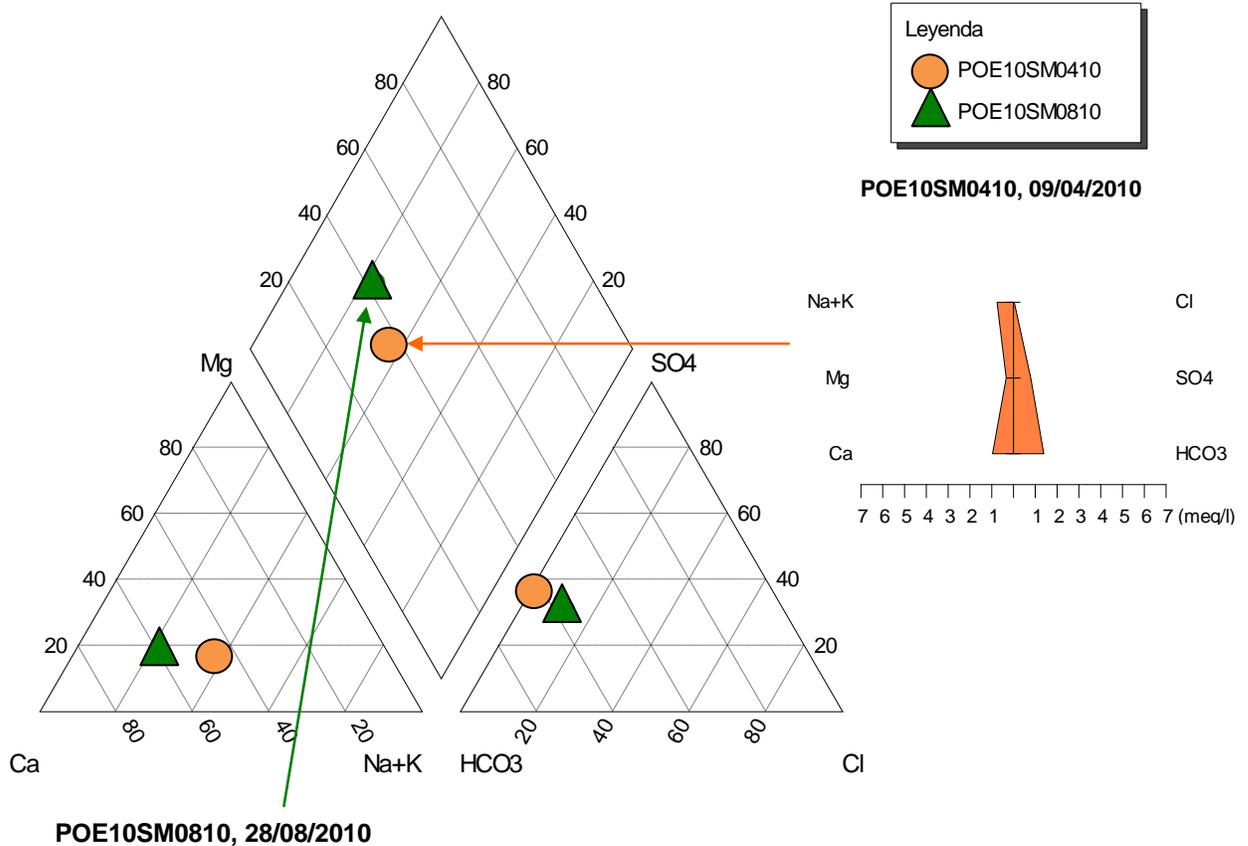
Pozo excavado en una vivienda rural, del cual se abastece una familia de 5 personas, a 540 m del río Metayate, caserío Metayate.

Las aguas fueron Bicarbonatadas-cálcicas-sódicas en época seca.

La zona superficial pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones).

Origen de la composición del agua: Meteorización de carbonatos, silicatos, plagioclasas, intercambio iónico (arcillas).

### Diagrama de Piper para POE10SM



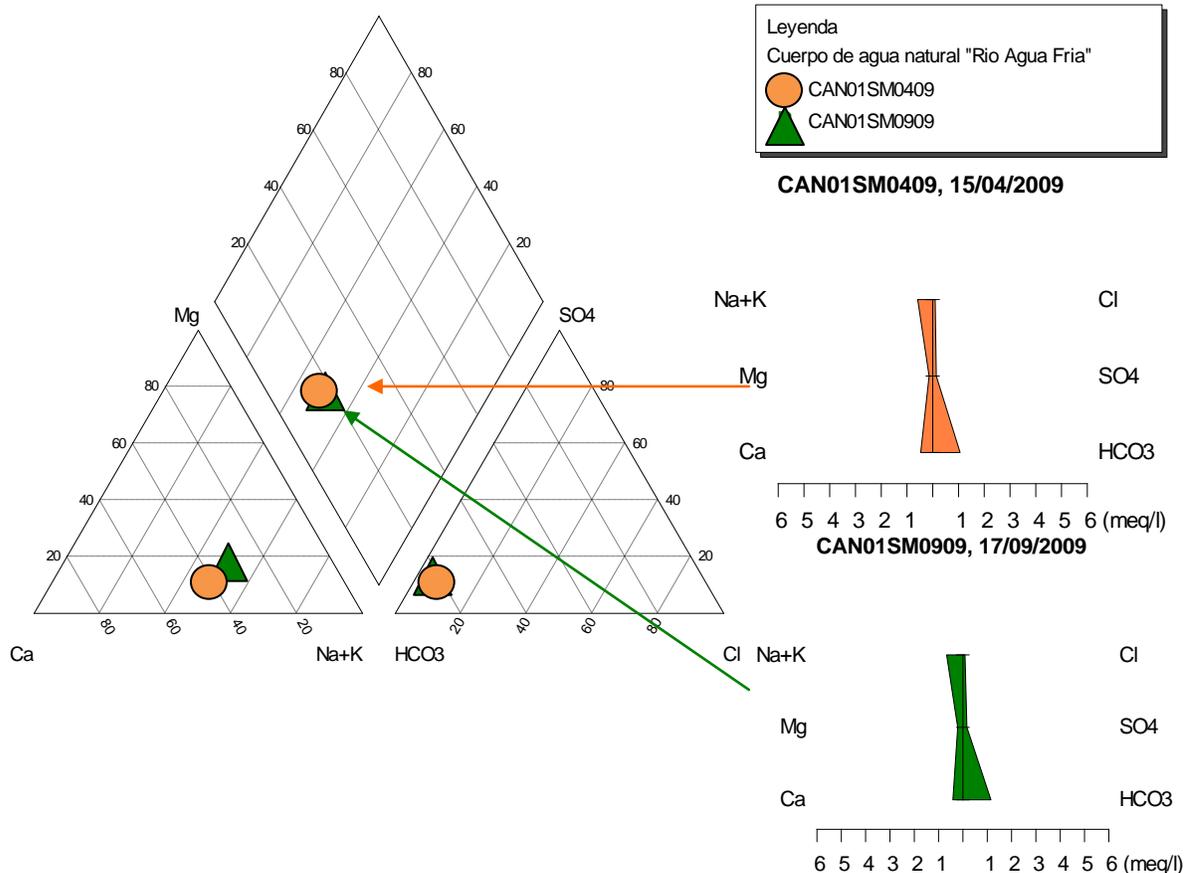
Corresponde a un pozo excavado, con bomba manual para extraer agua, en una zona rural, a 1200 m del río Metayate, caserío Hacienda Metayate. Presentó temperaturas de 30.5° C.

Las aguas fueron Bicarbonatadas-cálcicas-sódicas en época seca.

La zona superficial pertenece a la formación San Salvador, compuesta por depósitos sedimentarios del cuaternario. Su edad pertenece al período del Holoceno (5,000 – 10,000 años).

Mineralogía: posible meteorización de carbonatos, silicatos, plagioclasas, intercambio iónico (arcillas).

Diagrama de Piper para CAN01



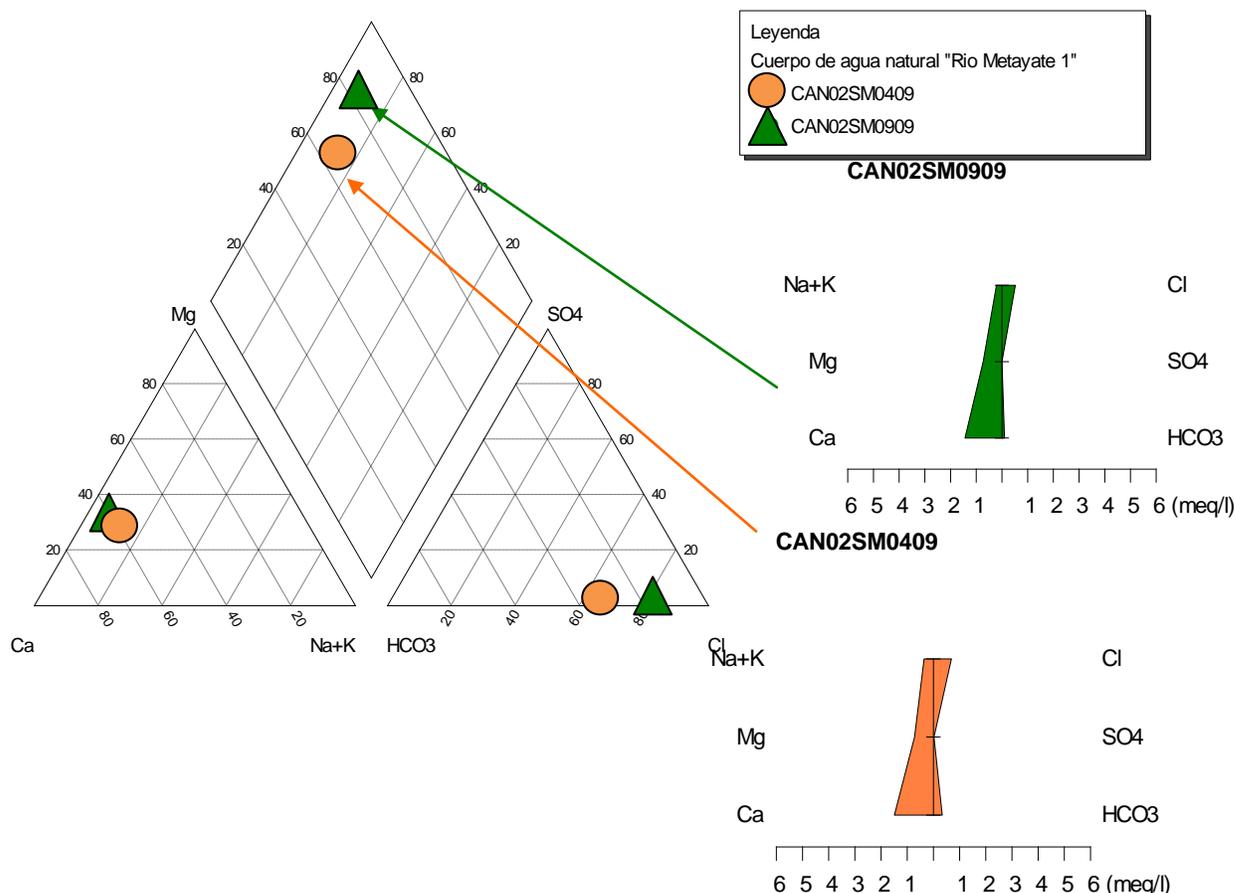
Corresponde al río Agua Fría, uno de los principales afluentes al río Metayate. El sitio de muestreo se ubica en una zona con galería de árboles, algunas viviendas, actividad agropecuaria de subsistencia. El lecho del río se compone de canto rodado y arena, con poca presencia de algas, cercano a zonas de cruce de ganado y vehicular, y es empleado para lavar ropa.

Las aguas fueron bicarbonatadas-sódicas-cálcicas-magnésicas en épocas seca y lluviosa, sin variaciones significativas de ellos en dichas épocas. Hubo una tendencia a presentar concentraciones muy bajas de estos iones. Esto sugiere que el agua proviene de flujo subsuperficial del agua lluvia infiltrada, con poco tiempo de tránsito por la matriz de roca de la zona.

En sitio de muestreo pertenece a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones). El área de recogimiento de agua lluvia que podría aportar a éste río pertenece a las formaciones Bálsamo, Morazán y Chalatenango.

Origen de la composición del agua: Meteorización de plagioclasas, minerales ferromagnesianos, carbonatos y silicatos, así como arcillas. El aporte de la escorrentía superficial influye ligeramente la composición mineral de este riachuelo.

Diagrama de Piper para CAN02



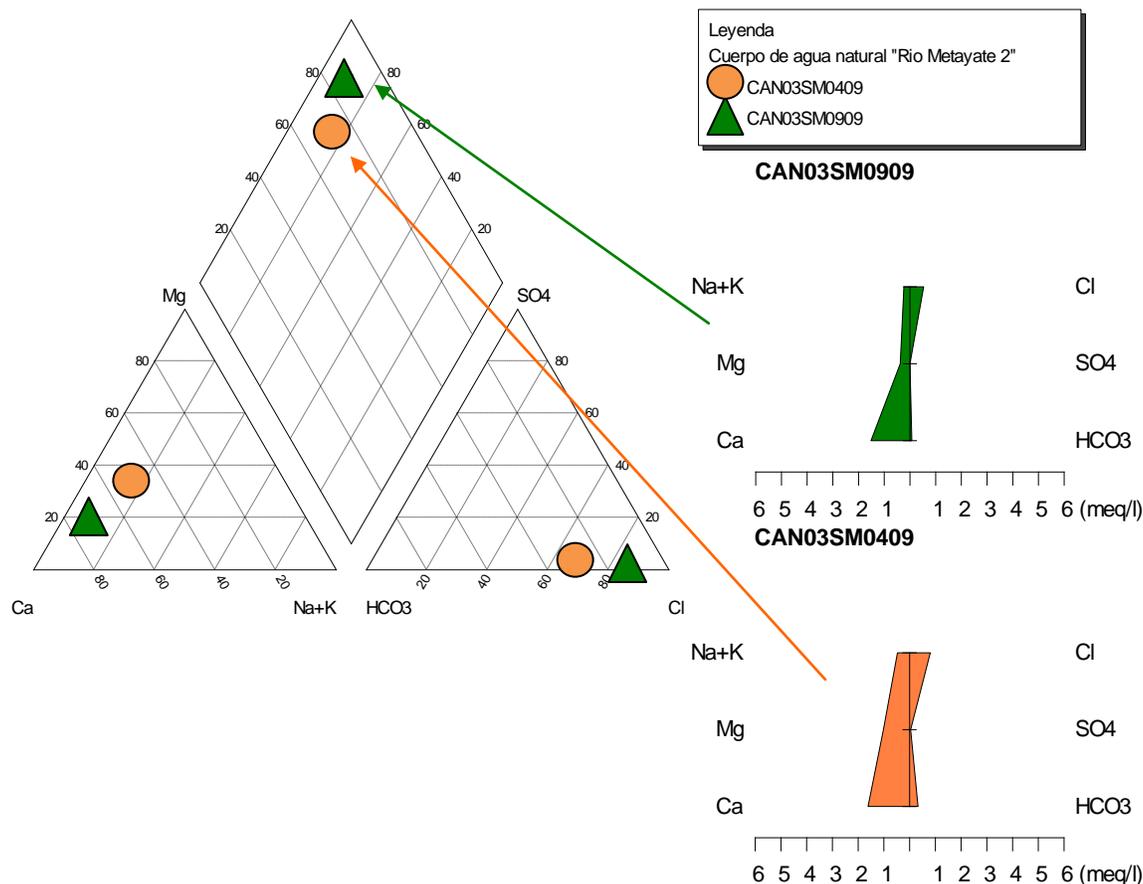
Este sitio (CAN02SM) corresponde al río Agua Metayate, aguas debajo de la ciudad de Agua Caliente. El sitio de muestreo se ubica en una zona con galería de árboles, algunas viviendas, actividad agropecuaria, tráfico vehicular (vado), así como actividad hidrotermal. El lecho del río se compone de canto rodado y arena, con presencia de algas verdes, peces y crustáceos.

Las aguas fueron cloruradas-cálcicas-magnésicas, con variaciones muy bajas de éstas entre cada época del año, por lo que la composición iónica no tendió a ser afectada por el efecto de la dilución por escorrentía superficial. Así, esta agua es principalmente agua lluvia. Sin embargo, el contenido de cloruros, mayor al sitio CAN01SM, indicaría una posible presencia de contaminantes de origen antropogénico.

La zona del muestreo corresponde a la formación Cuscatlán, compuesta por Piroclastitas Ácidas, epiclastitas volcánicas, del período del Pleistoceno Inferior e Intermedio (1,6 millones – 10,000 años). Aguas arriba en el río Metayate y los ríos afluentes a éste se encuentran las formaciones Morazán (flujos piroclásticos con Riolita e Ignimbrita), Chalatenango (rocas efusivas ácidas), principalmente.

Mineralogía: El agua puede proceder de aguas que hayan pasado por matrices de silicatos, minerales ferromagnesianos, carbonatos, pero principalmente es agua lluvia. Sin embargo, es posible la existencia de contaminantes de origen antropogénico, ya que aguas arriba del sitio de monitoreo, se encuentra una ciudad, además de estar en una zona con actividad agropecuaria y antropogénica.

Diagrama de Piper para CAN03



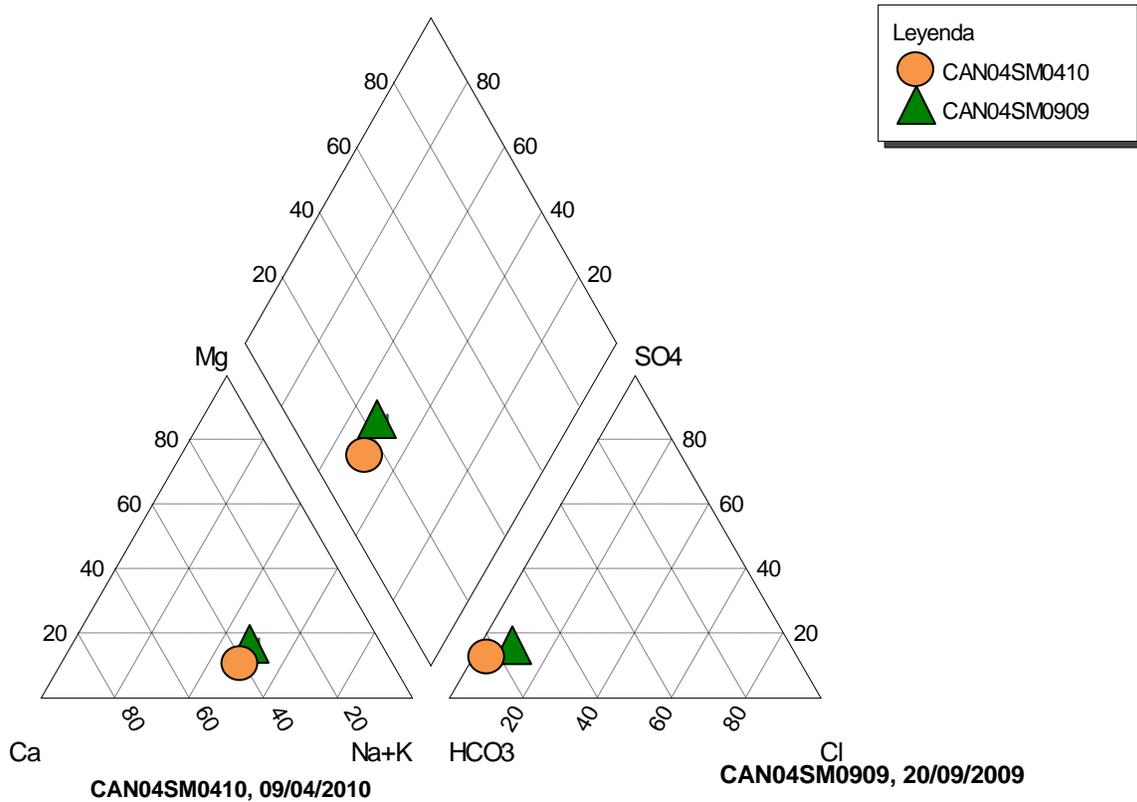
Este sitio (CAN03SM) corresponde al río Agua Metayate, aguas abajo del puente que conduce a Nueva Concepción. El sitio de muestreo se ubica en una zona con galería de árboles, algunas viviendas, actividad agropecuaria y pesquera, tráfico vehicular, y turismo local. El lecho del río se compone de arena, limo y rocas.

Las aguas fueron cloruradas-cálcicas en época lluviosa, y clorurada-cálcica-magnésica en época seca. El contenido de estos iones fue similar a la der CAN02SM, por lo tanto la influencia del río Talquezalapa (sitio CAN04ST) es muy pequeña. La presencia de magnesio se da entre la confluencia del río Metayate y Talquezalapa y el sitio CAN03SM.

La zona del muestreo corresponde a la formación San Salvador, compuesta por depósitos sedimentarios del cuaternario. Su edad pertenece al período del Holoceno (5,000 – 10,000 años).

Mineralogía: Las aguas podrían arrastrar silicatos, minerales ferromagnesianos y carbonatos meteorizados. Sin embargo, es posible la existencia de contaminantes de origen antropogénico por el contenido de cloruros.

### Diagrama de Piper para CAN04SM



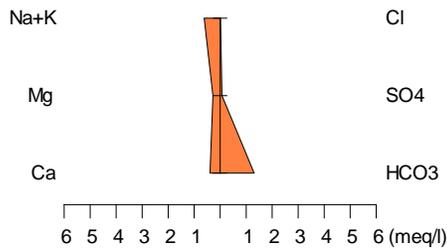
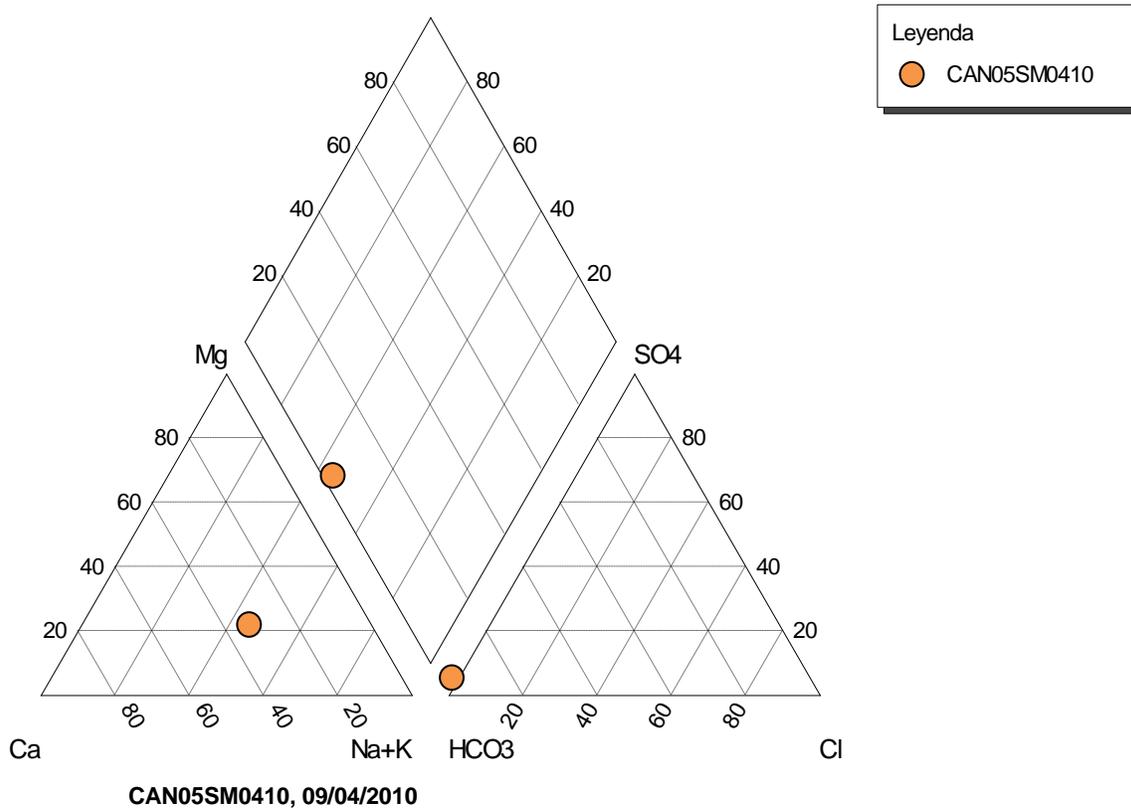
Corresponde al río Talquezalapa, que conduce las aguas superficiales de la subcuenca de dicho río. El sitio de muestreo se encuentra 200 m aguas arriba de su unión con el río Metayate, en una zona con galería de árboles, actividad agropecuaria, tráfico vehicular (vado).

Las aguas fueron bicarbonatadas-cálcicas-sódicas, con variaciones entre cada época del año, estando la composición iónica afectada por la dilución por escorrentía superficial. Así, esta agua es principalmente agua lluvia en época lluviosa.

La zona del muestreo corresponde a la formación Morazán, con flujos piroclásticos que presentan Riolita e Ignimbrita, generadas en el período del Oligoceno inferior (35,4 – 23,3 millones de años).

Origen de la composición del agua: El agua proviene de zonas con presencia de plagioclasas, carbonatos o silicatos varios.

### Diagrama de Piper para CAN05SM



Río Los Micos, aguas arriba de su unión con el río Metayate. El sitio de muestreo se ubica en una zona con galería de árboles, actividad agropecuaria, tráfico vehicular (puente). El lecho del río se compone de canto rodado y arena, con presencia de algas verdes, peces y crustáceos.

Las aguas fueron bicarbonatadas-sódicas-cálcicas-magnésicas en la época seca. Se espera que esta agua se diluya en época lluviosa.

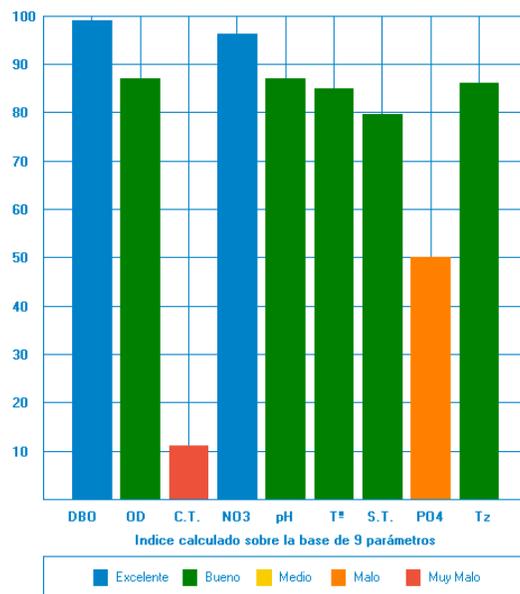
La zona del muestreo corresponde a la formación Chalatenango, compuesta por rocas efusivas ácidas, del período del Mioceno (23,3 – 5,2 millones). El área de recogimiento de agua lluvia que podría aportar a éste río pertenece a las formaciones Bálsamo, Morazán y Chalatenango.

Origen de la composición del agua: El agua proviene de zonas con presencia de plagioclasas, carbonatos, albita, minerales ferromagnesianos o silicatos varios.

## ANEXO 7: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CÁLCULO DE LOS INDICES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUAS SUPERFICIALES

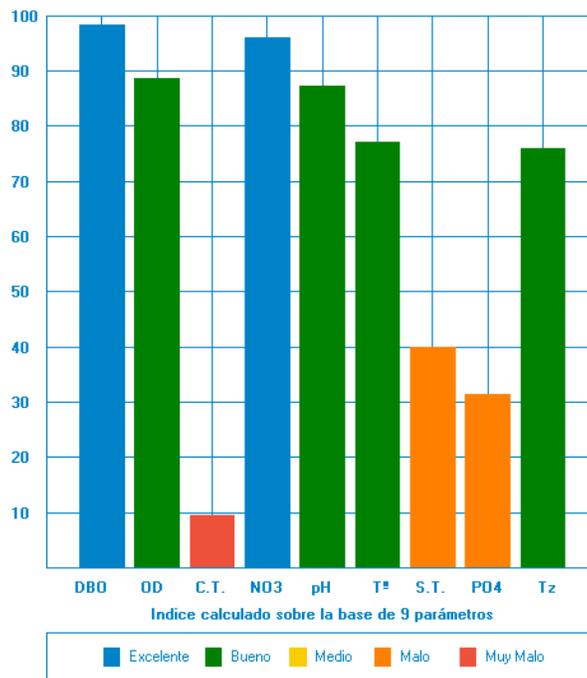
### CAN01SM, época seca

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



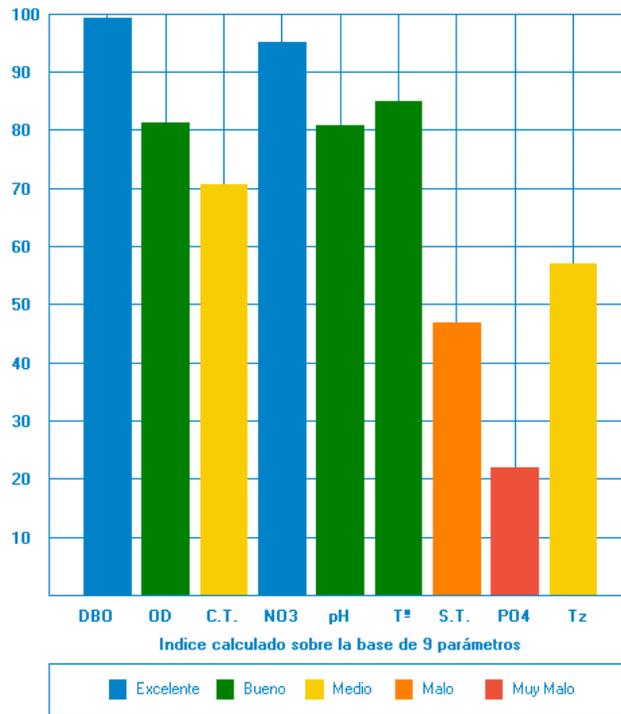
### CAN02SM, época seca

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



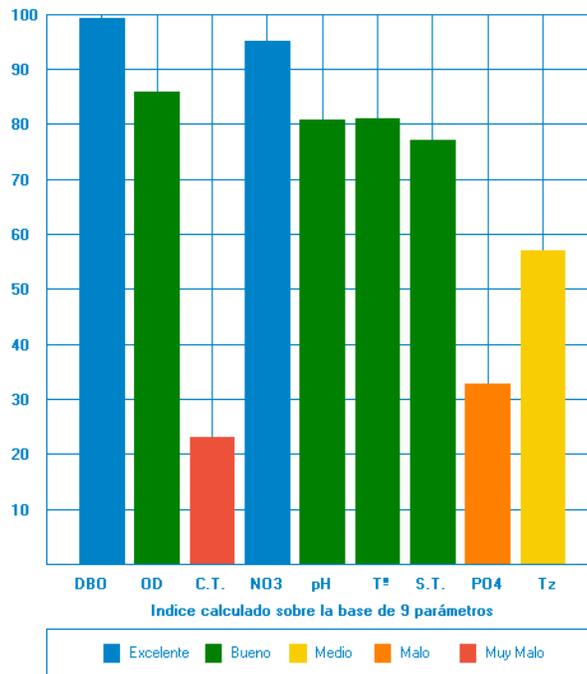
### CAN03SM, época seca

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



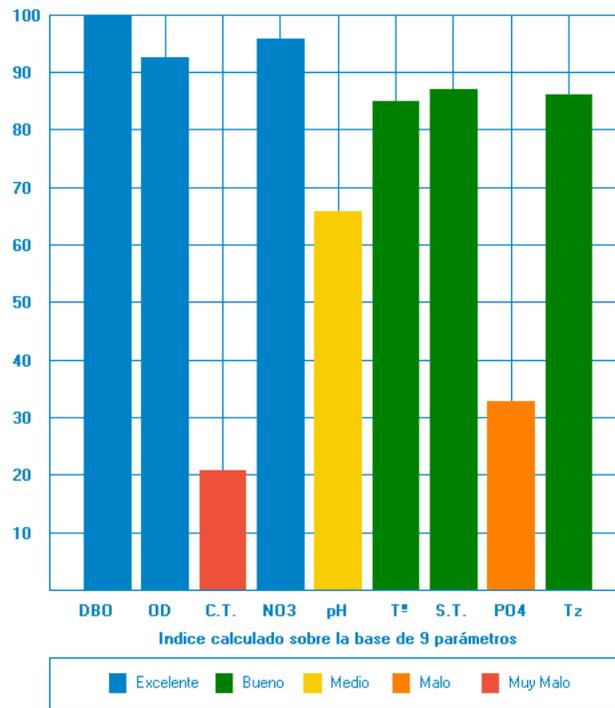
### CAN04SM, época seca

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



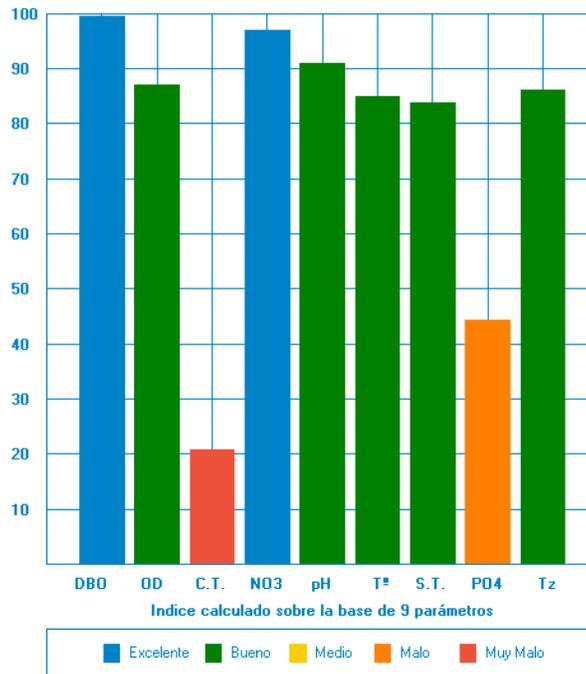
### CAN05SM, época seca

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



### CAN01SM\_época lluviosa

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



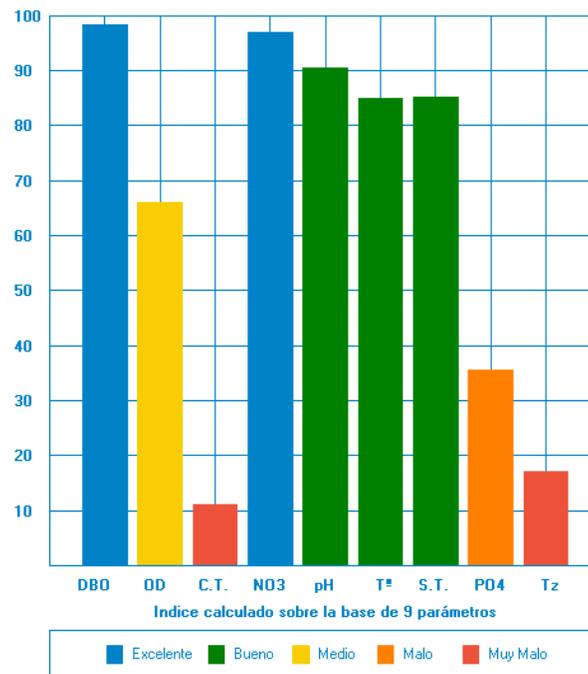
## CAN02SM\_época lluviosa

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



## CAN03SM\_época lluviosa

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q



## CAN04ST\_época lluviosa

ICATEST v1.0  
Parámetros contra Valor-Q

