



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“Estudio geológico e hidrogeoquímico de un sistema de manantiales en la región de Xalapa, Veracruz “

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
(MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA)

P R E S E N T A

MARIA DEL ROCIO SALAS ORTEGA

JURADO EXAMINADOR

Dr. Sergio Rodríguez Elizarrarás

Dr. Gerardo Carrasco Núñez

Dr. Alejandro Carrillo Chávez

Dr. Oscar Escolero fuentes

Dr. Francisco Martín Romero



MÉXICO, D.F., JUNIO 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido

Agradecimientos

Resumen

1 Introducción	1
1.1 Localización del área de estudio	2
1.2 Hidrografía.....	5
1.3 Uso del Suelo	7
1.4 Comportamiento climatológico.....	8
1.5 Trabajos previos en el área de estudio.....	12
1.6 Marco geológico.....	15
1.6.1 Sector Oriental	15
1.6.2 Geología local.....	17
1.6.3 Estratigrafía	19
1.7 Importancia del Estudio.....	22
1.8 Hipótesis	23
1.9 Objetivo	23
1.10 Metodología	24
1.10.1 Trabajo de Gabinete.....	24
1.10.2 Actividades de campo	24
1.10.3 Trabajo de Laboratorio	26
2 Entorno geológico de los manantiales	
2.1 Marco Teórico.....	27
2.1.1 Causas de la fluctuación del caudal de los manantiales.....	28
2.1.2 Clasificación de los manantiales	29
2.1.3 Tipos representativos de manantiales	29
3 Resultados	
3.1 Descripción y clasificación de la ocurrencia geológica de los manantiales	34
3.1.1 Descripción de los afloramientos en las lavas del CVMX	37
3.1.2 Descripción de los manantiales que afloran entre el contacto lavas del CVMX - ignimbrita El Castillo.	40
3.1.3 Descripción del manantial que aflora en el contacto ignimbrita El castillo-depósitos de Lahar.....	41
3.1.4 Descripción de los manantiales que afloran en la ignimbrita El Castillo	42

3.1.5 Descripción de los manantiales que afloran en la roca fracturada, Basaltos Chiconquiaco.	44
3.1.6 Descripción de los manantiales que afloran en la zona de contacto ignimbrita El Castillo-Caliza	47
3.1.7 Descripción de los manantiales que afloran en el contacto Travertino-Basaltos Chiconquiaco.....	48
3.1.8 Descripción de los manantiales que afloran en el depósito de Travertino.....	50
3.1.9 Descripción de los afloramientos en el contacto del depósito del Travertino-Calizas.....	52
3.2 Movimiento del agua subterránea	56
3.3 Hidrogeoquímica.....	58
3.3.1 Balance de electroneutralidad	59
3.3.2 Temperatura	61
3.3.3 Distribución espacial de la conductividad y sólidos totales disueltos	63
3.4 Representación gráfica de la composición del agua.....	66
3.4.1 Diagramas Stiff	66
3.4.2 Diagramas Piper	69

4 Discusión y Conclusiones

4.1 Discusión	77
4.2 Conclusiones	81

Referencias

Índice de figuras

1.1 Ubicación del área de estudio dentro del contexto geográfico. Localización; sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana.....	4
1.2 Hidrografía y Cuencas Hidrológicas de la región de Xalapa.	6
1.3 Mapa de uso de suelo en la región. Fuente: Inventario Nacional forestal, Conafor, UNAM 2000.	7
1.4 Ilustra las regiones del planeta donde se presentan comúnmente los Huracanes, Ciclones y Tifones. Modificado de: Servicio Meteorológico Nacional.	8
1.5 Isoyetas de la precipitación media anual en la zona de estudio. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Periodo 1971-2000	11
1.6 Columna estratigráfica en la zona de estudio, que muestra las principales unidades litoestratigráficas dentro de las que ocurren los manantiales estudiados. Modificado de Morales-Barrera, (2009)	18
2.1 Manantiales de un embalse subterráneo en un terreno homogéneo, están fundamentalmente controlados por las relaciones del límite de la zona saturada y la superficie del terreno.	30
2.2 Manantial que drena de un cono de deyección cuya base está formada por terrenos impermeables.	30
2.3 Modelo de manantiales que drenan un acuífero tabular recargado por la lluvia.	31
2.4 Manantial que drena de una formación basáltica poco permeable a través de los aluviones de un valle fosilizado por la colada volcánica	31
2.5 Manantial que drena un acuífero confinado	31
2.6 Manantial que drena un embalse subterráneo limitado lateralmente por dos fallas	32
2.7 Manantial que drena un acuífero confinado a través de una zona milonitizada.....	32
2.8 Esquema del sistema hidráulico que origina los cambios bruscos de caudal de algunos manantiales intermitentes de zonas kársticas	32
2.9 Manantial originado en diaclasas de descompresión del granito, estas formaciones suelen dar lugar a manantiales de bajo caudal y temporales	33

2.10 Manantial originado por la descarga del agua que drena una roca fracturada.....	33
3.1 Mapa geológico y localización de los manantiales. Se aprecia que los manantiales afloran en las zonas de contacto de las unidades, algunos se ubican cerca de la a la zona de las fracturas a escala local.....	36
3.2 Sección esquemática que muestra el modelo de funcionamiento hidrodinámico propuesto para los manantiales en la zona de estudio. Los espesores de las unidades litológicas son aproximados. Φ índice de infiltración, Gómez y Pereyra (1997), valores de precipitación, Servicio Meteorológico Nacional.	37
3.3 Derrames de lava cubriendo a la Ignimbrita El Castillo. Foto tomada en un corte sobre la autopista Xalapa-Veracruz.	38
3.4 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en las depresiones formadas por las lavas del CVMX. El Lencero (R), Agua Santa (P), Vaquerías 1 (X), Paso Grande (Z) y Vaquerías 2 (B), surgen en el contacto de las lavas provenientes de diversos eventos. La columna estratigráfica es esquemática	39
3.5 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el contacto de las Lavas del CVMX y la litofacies no consolidada de la Ignimbrita El Castillo. En esta zona de contacto surge el manantial El Castillo (W), que coincide con una fractura a escala local. La columna estratigráfica es esquemática.....	41
3.6 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el contacto del depósito de Lahar y la ignimbrita el Castillo. En esta zona de contacto emerge el manantial Loma de Rogel (K), coincide con una fractura a escala local. La columna estratigráfica es esquemática	42
3.7 Característica de la ignimbrita El Castillo en la zona de los afloramientos. a) Zona de contacto de la ignimbrita El Castillo y las lavas del CVMX, en la zona del manantial Pocitos 3 Pasos (H); b) Zona de falla de la ignimbrita El Castillo, en los alrededores del manantial La Aurora (C), las fracturas se encuentran rellenas de harina de falla.	43
3.8 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en la ignimbrita El Castillo Pocitos 3 Pasos (H), La Aurora (C) y El Jobo (J). El manantial El Jobo (J) aflora en la parte no consolidada de la ignimbrita El Castillo, mientras que el	

Pocitos 3 Pasos y La Aurora, emergen en las fracturas de esta unidad. Esquema representativo de la columna estratigráfica en la zona de los manantiales.	44
3.9 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en la Roca Fracturada: San Antonio (G), Los Chorros (S) y Rancho Nuevo (E) , los manantiales Los Chorros y Rancho Nuevo afloran en la roca fracturada conocida como Basaltos Chiconquiaco, el manantial San Antonio aflora en una colada de lava proveniente del CVMX. Esquema de la columna estratigráfica	45
3.10 Manantial Los Chorros, aflora en una colada de los basaltos Chiconquiaco, a) basaltos fracturados y afloramiento del manantial, b) panorámica de la zona, se observan las mesetas de la ignimbrita, c) zona de contacto de la ignimbrita El Castillo con los Basaltos Chiconquiaco.	46
3.11 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el contacto de la ignimbrita El castillo y el depósito de travertino: Carrizal (Y) y El Hormigo (A). La columna estratigráfica es esquemática	48
3.12 Manantiales que afloran en el contacto del depósito de Travertino-Basaltos Chiconquiaco, a) panorámica de la zona, se observa en la cima el depósito de Travertino, b) zona donde aflora el manantial El Encanto (F), y c) se observa la zona de contacto, el depósito de Travertino sobreyace a los Basaltos Chiconquiaco.....	49
3.13 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el contacto del Travertino y los Basaltos Chiconquiaco: El Encanto (F) y Buena vista (U). La columna estratifica es esquemática	50
3.14 a) Panorámica de una zona donde se explota un depósito de Travertino, b) depósito de material retrabajado que corona al travertino, c) Afloramiento del manantial Pocitos Cumbre (L) que aflora en el depósito retrabajado y el Travertino.....	51
3.15 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el depósito de Travertino: Palo Gacho (N), Pocitos Cumbre (L) y Mizapan (M). Corona a este depósito un paquete de material retrabajado, se infiere que éste se asocia con alteración hidrotermal. La columna estratigráfica es esquemática	52

3.16 Zona donde se localiza el manantial Balneario Carrizal, a) Depósito re TRABAJADO de escombros que corona al travertino, b) calizas que se observan en el área del manantial, c) fósiles de moluscos en el travertino, b) fósiles de vegetales en el travertino.	53
3.17 Mapa geológico y localización del manantial que aflora en el contacto del depósito de Travertino y las Calizas: Balneario Carrizal (T). Este manantial es considerado termal por presentar una temperatura de 39.5°C. La columna estratigráfica es esquemática.	54
3.18 Mapa regional de curvas isopiezas que esquematiza el flujo preferencial del agua subterránea. Se aprecia una dirección de flujo de NW a SE..	57
3.19 Mapa de isolíneas de temperatura medida en los manantiales e isotermas en el área de Estudio. Las isolíneas de los manantiales muestran un incremento de la temperatura en dirección NW a SE. En la parte baja el manantial Balneario Carrizal presenta una diferencia de temperatura de 14.5°C con respecto a la temperatura media anual de la zona, por lo que es considerado termal.	63
3.20 Mapa de isolíneas de conductividad eléctrica en el área de estudio, a partir de los 800 msnm, se aprecia un incremento de los valores.	65
3.21 Mapa hidroquímico con diagramas de Stiff distribuidos en el área de estudio. Los diagramas ubicados en la parte alta y media, pertenecen a la facies Bicarbonatada cálcica. Los diagramas localizados en la parte baja presentan características de agua Sulfatada.....	68
3.22 El diagrama de Piper muestra la existencia de 2 familias de agua, en el círculo se encuentra en grupo que pertenece a la familia Bicarbonatada cálcica, se aprecia una evolución a sulfatada cálcica, que se lleva a cabo por la interacción agua-roca. Las muestras W y C presentan una tendencia a clorurada sódica.	71
3.23 Esquema que muestra la presencia de nitratos en los manantiales. La infiltración de agua contaminada puede estar relacionada con la dirección de flujo que sigue el agua que descarga en los manantiales.	74

3.24 Comparación de la concentración de Nitratos con respecto la Norma Oficial Mexicana, en salud ambiental para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994), en los manantiales del área de estudio. El manantial El Castillo se acerca al límite máximo permisible, los manantiales Buena Vista, La Aurora, Palo Gacho, El Pomo y Pocitos Cumbre muestran un incremento en este parámetro.	75
3.25 Correlación de la concentración del ión Cl^- con la altitud de los manantiales, se aprecia que los valores de este ión en la parte alta de la zona no rebasan los 10 mg/l, en la parte baja la concentración de este ión incrementa.	76

Índice de tablas

1.1 Estaciones climatológicas e hidrométricas ubicada dentro y fuera del Área de estudio	10
3.1 Datos de localización de los manantiales y clasificación de acuerdo a las características de relaciones litología-estructura-terreno de los afloramientos.	55
3.2 Parámetros físicos medidos en campo, resultados de Iones mayores y menores, balance de electroneutralidad. Las unidades Conductividad eléctrica (CE $\mu\text{S}/\text{cm}$), temperatura $^{\circ}\text{C}$, las concentraciones en mg/l	60
3.3 Clasificación de las familias de agua, con base en el diagrama de Piper	70

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el orgullo y placer de haber realizado el posgrado en esta Institución. Al Grupo de Hidrología Isotópica que a través del Proyecto de colaboración técnica, MEX8025, del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, apoyó la realización de este estudio, así como al Oficial Técnico para los Proyectos Latinoamericanos, Dr. Luis Araguas, por su confianza y ayuda. A los Drs. Ricardo Hirata y Robert Drimmie, expertos asignados por el OIEA, por sus atinados comentarios que me ayudaron a entender el sistema desde el punto de vista hidrogeoquímico. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geología, UNAM, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, CONCyTEQ, y al Centro de Geociencias UNAM, campus Juriquilla por las becas otorgadas. A mi tutor Dr. Sergio Rodríguez Elizarrarás, por su apoyo y aportación de conocimientos. A los investigadores que formaron parte del Jurado Drs. Gerardo Carrasco Núñez, Alejandro Carrillo Chávez, Oscar Escolero fuentes y Francisco Martín Romero, por sus excelentes y acertados comentarios durante la realización de este trabajo. Mi agradecimiento y reconocimiento especial para: Fis. Alejandra Cortés Silva, por el apoyo motivacional, por su paciencia, por brindarme la oportunidad de pertenecer a un grupo de investigación y por todos los conocimientos compartidos. A Juan Pérez Quezadas por compartir sus conocimientos y por todo su apoyo en la realización de este trabajo. A Joaquín Pérez Valera, gracias por compartir tus conocimientos. Agradezco el apoyo y la confianza al personal del Municipio de Emiliano Zapata, en especial a la Ing. Alicia Isabel Martínez y al Sr. Carlos Santamarina, a los integrantes de los Comités Encargados del Agua de las diferentes comunidades del Municipio; al Ing. Lucio Moreno Guzmán por su apoyo en el trabajo de campo. Lalita gracias por su apoyo y cariño. Agustín gracias por tu apoyo y paciencia. A mi familia, amigos y demás personas que de alguna manera directa o indirecta colaboraron en la realización de una meta más.

Mil gracias...

Resumen

Se analizan las características geológicas e hidrogeoquímicas de un sistema de manantiales, localizados en el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana en la región de Xalapa. La finalidad fue aportar conocimientos para la mejor comprensión del funcionamiento hidrodinámico en la región, teniendo en cuenta que los manantiales proporcionan la oportunidad de estudiar procesos subterráneos en lugares donde no existen perforaciones como es el caso de la zona de estudio. Para ello se seleccionaron 23 manantiales, los cuales representan la única fuente de abastecimiento de agua potable para 52 comunidades. Se realizó el reconocimiento del entorno geológico de los manantiales, clasificándolos con base en las relaciones litología-estructura-terreno y a la hidrogeoquímica del agua. Afloran en unidades que varían desde el Cretácico temprano hasta el reciente, como son Calizas de origen marino, travertino producto de cuencas evaporíticas, flujos piroclásticos y derrames de lava producto del Campo Volcánico Monogénico Xalapa CVMX, con altitudes que van desde los 1185 a los 130 msnm. En algunos puntos los ríos seccionan a las unidades litológicas, la diferencia de potenciales da origen a zonas de recarga y descarga local. Los manantiales surgen condicionados por las características geológicas, geomorfológicas y climatológicas de la zona. Hidrogeoquímicamente existen 2 familias de agua, Bicarbonatada cálcica con 97% y 3% restante Sulfatada cálcica. Los valores de sólidos disueltos totales (SDT) para los manantiales que afloran en la parte más alta de la zona es de 75 a 113 mg/l, en la parte más baja los valores de SDT van de 112 a 1250mg/l. Algunos manantiales muestran indicios de contaminación antropogénica debido a su localización y por tratarse de recargas locales, tal es el caso del manantial El castillo que se ubica en los límites de la zona urbana, la concentración de nitratos en este manantial es de 8.85 mg/l, muy cercanos al límite máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana para uso y consumo humano; existen otros manantiales como son La Aurora, El Lencero, Palo Gacho y Pata de Cabra que manifiestan esta misma tendencia. Con base en las características físicas y químicas se asocian con flujos locales e intermedios.

1 Introducción

El agua, al mismo tiempo que constituye el líquido más abundante en la Tierra, representa el recurso natural más importante y la base de toda forma de vida. Actualmente el desmedido crecimiento demográfico e industrial ha propiciado un incremento exagerado en la demanda de agua, siendo la principal causa de la contaminación del agua. El ciclo hidrológico natural se ha visto alterado, cada vez es más difícil conseguir y preservar este recurso en calidad y cantidad. Por otro lado las prácticas erróneas de utilización de la tierra, tales como el pastoreo excesivo y la deforestación pueden convertir al agua en un poderoso agente de erosión.

México, no se escapa a esta realidad, el 80% de su territorio se localiza en áreas áridas y semiáridas. El 77% de la población vive en donde solo se encuentra el 28% del agua disponible y en el sureste con abundantes recursos hídricos se asienta únicamente el 20% de la población nacional (CNA, 2000). Por esta razón México depende en gran parte del agua subterránea para el abastecimiento de la población. El agua superficial ha sufrido un fuerte deterioro debido al desconocimiento en su manejo y escasa educación ambiental, convirtiendo los cauces de los ríos en áreas de basureros y descargas de aguas negras.

En el Estado de Veracruz los manantiales y agua superficial aportan alrededor del 80% del abastecimiento de agua potable. En la región de estudio, debido a su topografía y localización, los manantiales tienen una relevante importancia, como en el caso de Xalapa que su nombre significa *manantial en la arena*. En la zona los manantiales fueron la única fuente de abastecimiento, el crecimiento poblacional y consecuentemente la demanda de agua ha ocasionado que en la capital del estado el suministro de agua sea mediante fuentes superficiales, llevándola a la ciudad desde lugares lejanos como son: Presa de los Colibríes, Medio Pixquiac, Alto Pixquiac, Socoyolapan, Cinco Palos y actualmente un porcentaje se importa de cuencas vecinas como es el caso de Huitzilapan, Pue.



En la actualidad aún existen algunos manantiales como son: el manantial “Descabezadero”, considerado como una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable en la región de Actopan. El Lencero ubicado al sureste de la ciudad de Xalapa, es un manantial que se utiliza como fuente de abastecimiento desde hace cinco siglos, y continúa siendo una importante fuente de abastecimiento en la zona.

En las poblaciones aledañas de la capital los manantiales funcionan prácticamente como la única fuente de abastecimiento de agua potable, algunos se ubican muy cerca de las poblaciones, en donde existe un crecimiento urbano y semi-urbano desordenado, cambio de uso de suelo de agroforestal a pecuario y habitacional, la falta de acciones ante la tala ilegal y la disminución de precipitaciones pluviales, son amenazas para los manantiales, por lo que es importante estudiar su origen y trayectoria.

Este trabajo se enfoca al estudio de un conjunto de manantiales que se aprovechan como fuente de abastecimiento para 52 comunidades pertenecientes al municipio de Emiliano Zapata, con un total de 49,476 habitantes. Se realiza esta investigación aplicando herramientas geológicas e hidrogeoquímicas, con la finalidad de aportar fundamentos para el desarrollo de un modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico en la región, que permita conocer la dinámica en tiempo y espacio de los sistemas de flujo del agua subterránea a través de las unidades hidrogeológicas.

1.1 Localización del área de estudio.

La zona de estudio se localiza en la porción central del estado de Veracruz; está delimitada por las coordenadas 720000, 760000 W y 2134000, 2165000 N (Figura 1.1). Dentro del contexto de provincias geológicas se encuentra en el sector oriental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana, donde destaca la existencia de la cordillera volcánica conformada por los volcanes Cofre de Perote-Pico de Orizaba. Este rasgo morfológico constituye un parteaguas regional que divide el altiplano de la cuenca Serdán-Oriental en el estado de Puebla, de la planicie costera del Golfo de México en el estado de Veracruz. (Ortega et al., 1992).



Se ubica a 15 Km de la ciudad de Xalapa y a 80 km aproximadamente de la costa del Golfo de México; su topografía es un plano inclinado de Occidente a Oriente, abarca una superficie aproximada de 395 km² y queda comprendido dentro de las cartas topográficas editadas por el INEGI escala 1:50,000: Xalapa (E14B-27), (INEGI, 2000 a), Actopan (E14B-28), (INEGI; 2000 b), Coatepec (E14B-37), (INEGI, 2003) y José Cardel (E14B-38), (INEGI 2000 c).

La principal vía de acceso al área de estudio desde la ciudad de México es a través de la Carretera Federal # 140 que parte del entronque en Acatzingo, de la autopista México-Puebla # 150. Dentro del área existen numerosas carreteras estatales que comunican a la zona. Para fines de esta investigación se tomó la división descrita por Gómez y Pereyra (1997), quienes dividen a la zona con base a su topografía en parte alta, media y baja.

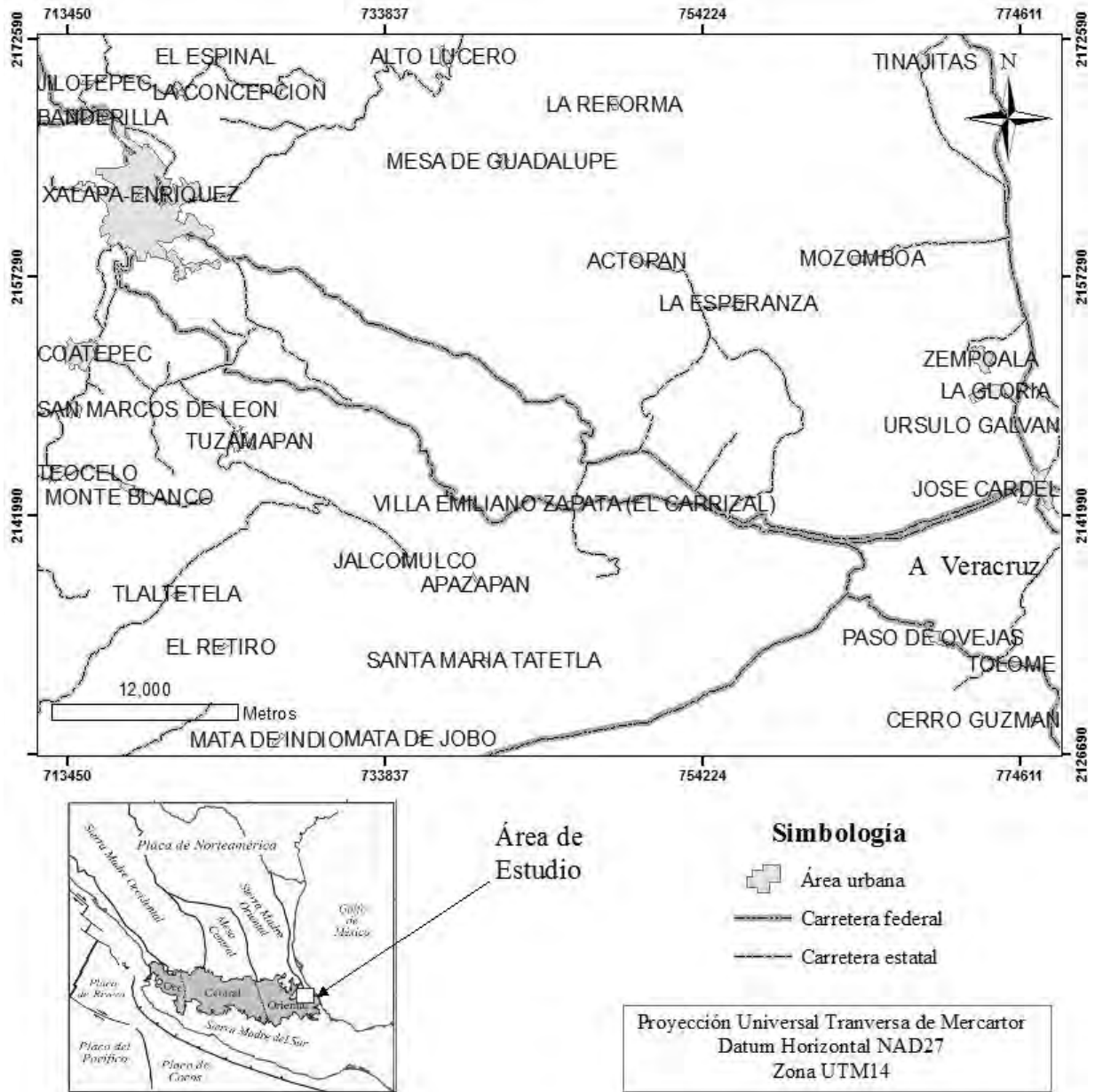


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio dentro del contexto geográfico. Localización; sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana.



1.2 Hidrografía

De acuerdo a la clasificación de la Comisión Nacional del Agua, el área de estudio se ubica en la región hidrológica del Papaloapan, en el parteaguas de dos importantes cuencas hidrológicas del centro del estado de Veracruz; la cuenca del Río Actopan y la cuenca del Río la Antigua.

La cuenca del Río Actopan tiene un área aproximada de 2000 km², distribuida en su totalidad dentro del estado de Veracruz (CONAGUA, 2005). El río Actopan nace en las faldas del Cofre de Perote a 3000 m de altitud, su curso sigue en dirección noreste a través de 21 km de terreno montañoso, capturando por ambas márgenes las corrientes que se forman en la porción nororiental del Cofre de Perote, posteriormente cambia su curso hacia el sureste a la altura del poblado de Tlacolulan, Ver., dirección que conserva hasta su desembocadura.

La cuenca del Río la Antigua tiene un área aproximada de 2827 km²; una pequeña porción pertenece al estado de Puebla y la mayor parte al estado de Veracruz. El río La Antigua nace en la zona montañosa, con el nombre de río Resumidero, a una altitud de 3350 msnm, al oriente de la población González Ortega, del estado de Puebla. Fluye hacia el sureste en terreno montañoso, con un rumbo hacia el este-noreste hasta la confluencia con el río Barranca Grande a 3 km al norte. En este sitio el colector general cambia su nombre a río Pescados, en los límites de los estados de Puebla y Veracruz cambia su curso al noreste. Aguas abajo de este punto recibe por la margen izquierda al río Cozolapa. En esta confluencia el colector general cambia su nombre a río La Antigua, continuando su flujo al este-sureste y descargando sus aguas en la Boca La Antigua del Golfo de México.

El área de estudio se localiza en su mayor parte en la subcuenca del Río Ídolos. Esta subcuenca se ubica dentro de la cuenca del río Actopan, tiene un área aproximada de 540 km². (Figura 1.2).

La corriente principal se forma en las partes altas del municipio de Xalapa, a unos 1450 msnm, sigue su curso en dirección noreste, a lo largo de este recorrido recibe aportaciones de



varios arroyos. Después de pasar por el poblado El Castillo, recibe el nombre de río Paso de la Milpa, continúa su recorrido en dirección noreste y antes de llegar al poblado Paso de la Milpa recibe la aportación, por su margen derecha del río Chavarrillo. En el lugar denominado Paso de la Milpa recibe la aportación por la margen izquierda del río Otates. A partir de este lugar recibe el nombre de río Ídolos el cual desemboca al río Actopan, este río desemboca al Golfo de México a través de la barra de Chachalacas. (Atlas climático del Estado de Veracruz (Textos universitarios/Universidad Veracruzana), 1989).

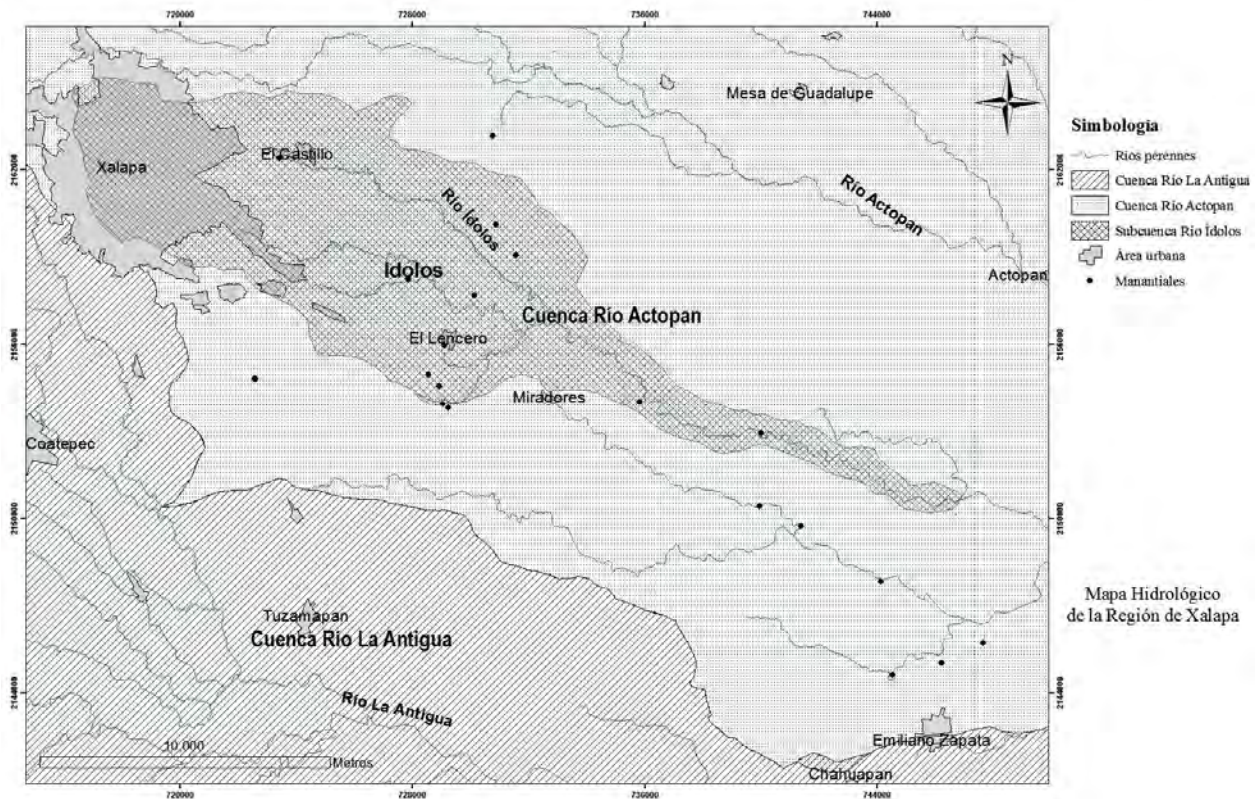


Figura 1.2 Hidrografía y Cuencas Hidrológicas de la región de Xalapa. Fuente: CONAGUA, 2005



1.3 Uso del suelo.

En la parte alta de la zona de estudio, en los límites con el municipio de Xalapa, existe un incremento en el índice demográfico, ocasionando con ello un cambio en el uso del suelo. En donde anteriormente había sembradíos de café y caña de azúcar, actualmente se han desarrollado zonas urbanas; hay zonas sin vegetación y permanecen escasamente algunas zonas de pastizales, cultivos agrícolas y bosques de encino. En la parte media, se encuentra la selva baja caducifolia con vegetación secundaria arbórea y arbustiva, así como pequeñas áreas de agricultura de bajo riego con cultivos semi-permanentes. En la parte baja, se encuentra principalmente selva caducifolia, pastizales, agricultura de bajo riego y algunas áreas sin vegetación. (Figura 1.3).

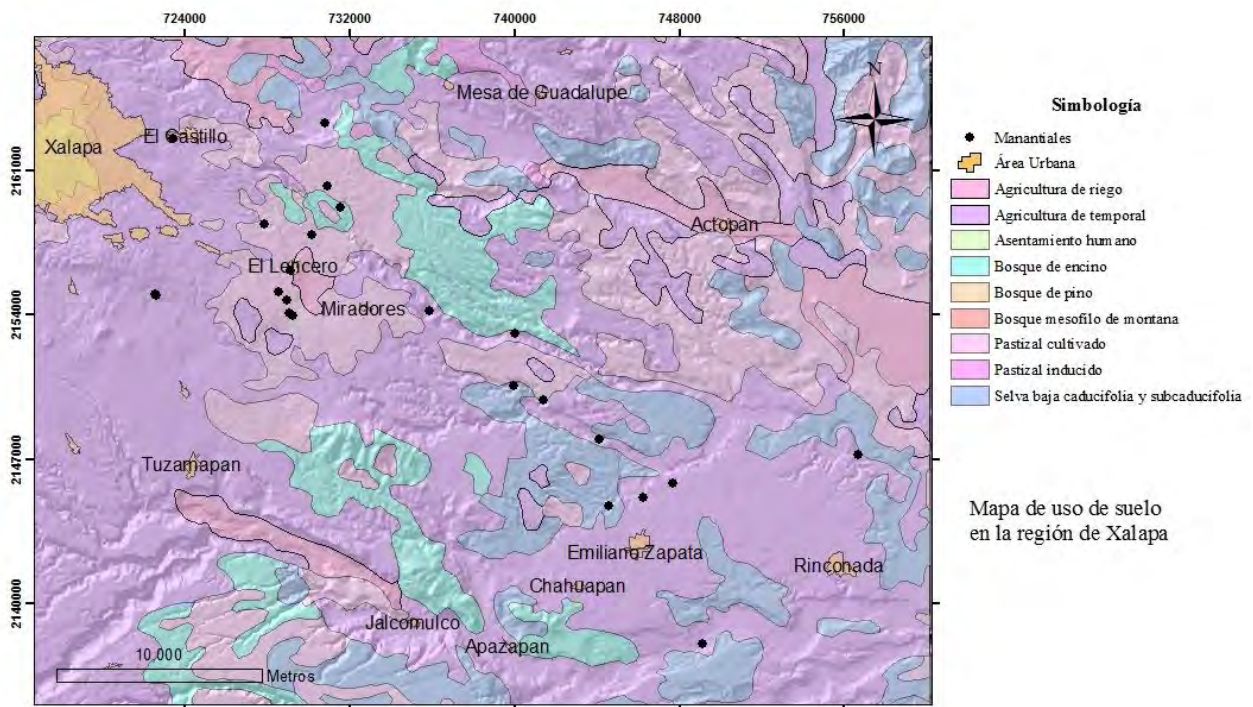


Figura 1.3 Mapa de uso de suelo en la región. Fuente: Inventario Nacional forestal, Conafor, UNAM 2000.



1.4 Comportamiento climatológico

Debido a que prácticamente toda el agua subterránea es de origen meteórico y tomando en cuenta que la infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie hacia el nivel freático, Se consideró importante realizar un breve análisis de los patrones atmosféricos que dominan en la región.

Patrones de circulación atmosférica

Dos tipos de masas de aire se alternan en el dominio de la zona de estudio: La tropical y la polar. La primera centrada en el verano, y la segunda con influencias frecuentes en el invierno. Existen también periodos de transición donde no hay una situación bien definida (Tejeda *et al.*, 1989). Esta fuerte alternancia atmosférica se debe principalmente a que el estado de Veracruz se encuentra en la franja definida como Zona Tropical, que es una zona de clima cálido y húmedo comprendida entre los dos trópicos, el de Cáncer y Capricornio. (Figura 1.4).

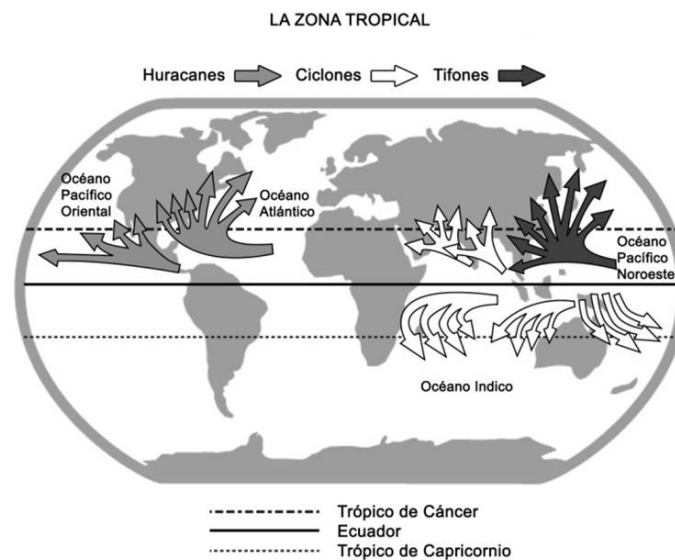


Figura 1.4 Ilustra las regiones del planeta donde se presentan comúnmente los Huracanes, Ciclones y Tifones. Modificado de: Servicio Meteorológico Nacional.



Sistemas locales

Más allá de los efectos que induce la orografía local sobre los sistemas de circulación atmosférica de gran escala, está la brisa marina terral, que son circulaciones debidas a los contrastes térmicos entre el mar y el continente. Cuando se presenta la brisa marina, su efecto llega hasta la ciudad de Xalapa (parte alta de la región de estudio), haciéndose patente por un máximo relativo de humedad alrededor del medio día (Jáuregui, 1984).

Según la clasificación climática de Köppen modificada por García (1964), la parte alta, que comprende a la ciudad de Xalapa y sus alrededores, tiene un clima semicálido húmedo con lluvias durante todo el año, las cuales tienden a concentrarse en el verano, siendo éste fresco y largo, presenta poca oscilación térmica, marcha anual de la temperatura tipo Ganges y canícula. En la parte media y baja se encuentra un clima cálido subhúmedo, el más seco de los subhúmedos con lluvias en verano. La precipitación media anual en la parte alta oscila entre 1200 y 1800 mm, siendo este valor el más alto en la zona de estudio. En la parte media y baja la precipitación varía entre 700 y 1200 mm al año (Tejeda *et al.*, 1989).

El estudio de las precipitaciones es básico para cuantificar los recursos hídricos dentro de cualquier estudio hidrológico regional, la precipitación constituyen la principal entrada de agua a una cuenca. La precipitación se mide en lámina de agua recogida y se expresa comúnmente en milímetros (mm); un mm de lámina de agua es equivalente a un litro de agua en un metro cuadrado. Para realizar el mapa de isoyetas de la región se utilizó la información hidrométrica y climatológica proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional, se seleccionaron las estaciones pluviométricas incluyendo a aquellas que se localizan fuera del área de estudio; en total se utilizaron los datos de 21 estaciones que cuentan con registros pluviométricos del período 1971 a 2000. (Tabla 1.1 y Figura 1.4).



Tabla 1.1 Estaciones climatológicas e hidrométricas ubicadas dentro y fuera del Área de estudio

No.	Nombre	X	Y	Z
1	Naolinco	723023	2174385	1470
2	Rancho Viejo	732699	2151807	880
3	Rinconada	755926	2141692	313
4	Totalco	674412	2157485	2300
5	Xalapa	719979	2158845	1427
6	Puente Nacional	720231	2138148	110
7	Los pescados	693984	2173216	2938
8	Mozomboa	765315	2158564	70
9	Jose Cardel	775818	2143307	28
10	Emiliano Zapata	732677	2155837	425
11	Tembladeras	697487	2159415	3160
12	Las Vigas	698216	2172647	2400
13	Tamarindo	763542	2140078	144
14	Coatepec	741702	2152879	19.5
15	Cerro Gordo	741735	2150388	580
16	Perote	683801	2166066	2415
17	Chiconquiaco	728663	2184546	1900
18	Cosautlan	710703	2138897	1225
19	Manlio Fabio	780014	2113432	44
20	Puente Jula	779316	2124683	45
21	Jalcomulco	755143	2138889	335

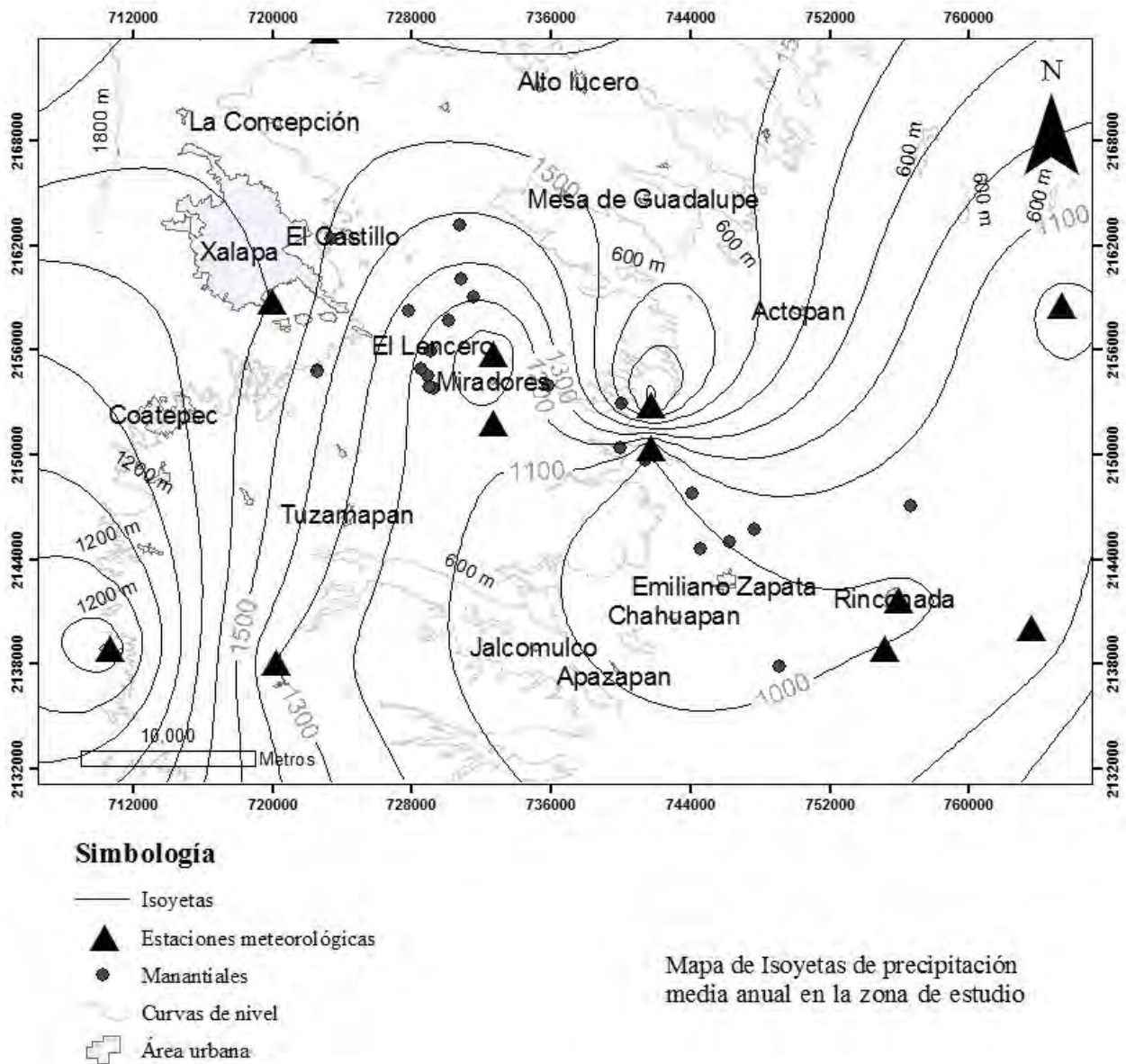


Figura 1.5 Mapa de Isoyetas de precipitación media anual en la zona de estudio. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Periodo 1971-2000.



1.5 Trabajos previos en el área de estudio

Con el propósito de fundamentar esta investigación, se recopiló información relacionada con el tema de estudio, publicada en reportes técnicos, tesis y artículos.

Dentro de los trabajos recopilados y relacionados con el área de estudio, se encuentra el realizado por la empresa Ariel Construcción, S.A. (1981). El objetivo fue identificar las unidades hidrogeológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar y transmitir agua subterránea. Reportan que las condiciones topográficas y de permeabilidad en la zona favorecen los escurrimientos superficiales e infiltración hacia el subsuelo.

Gómez y Pereyra (1997) realizaron una cuantificación de la infiltración en suelos de la cuenca del Río Ídolos, aplicando métodos empíricos y medición directa. Estimaron la capacidad de infiltración de la cuenca para cinco tormentas registradas durante un año. Los métodos empíricos utilizados fueron: coeficiente de escurrimiento, índice de infiltración media y el método de los números de escurrimiento. Para comparar los resultados de los métodos utilizados realizaron mediciones de infiltración en algunos puntos de la cuenca utilizando un infiltrómetro de anillos concéntricos. De acuerdo a la topografía que presenta, la cuenca fue dividida para su estudio en tres partes: La parte alta, comprendida entre los 1450 y los 1000 msnm, donde los cauces presentan encañonamientos con pendientes fuertes, y en donde de acuerdo a los estudios realizados por estos autores, reportan un índice de infiltración media de 36 mm/h. La parte media, entre los 1000 y los 500 msnm donde los cauces presentan pendientes de transición, reportan un índice de infiltración media de 468 mm/h, siendo el más alto en el área de estudio. Finalmente la parte baja, comprendida entre los 500 y los 150 msnm, conforme se acerca a la planicie costera del Golfo de México, con pendientes muy ligeras, con un índice de infiltración media de 210 mm/h. Observaron que el coeficiente de escurrimiento varía entre 0.05 y 0.23%; el número de escurrimiento varía entre 44.70 y 94.20. Concluyen con base en los valores obtenidos que la infiltración en la Cuenca es alta.

Báez *et al.* (1997) recolectaron muestras de lluvia durante tres años en la ciudad de Xalapa, Veracruz; analizaron los iones más importantes bajo la influencia de diferentes condiciones



meteorológicas, durante las temporadas de lluvias y secas. Los resultados estadísticos indicaron que existen diferencias significativas en el nivel de confianza del 95% entre la concentración iónica medida en muestras recogidas en ambas temporadas. La temporada de lluvias, presenta los valores más bajos de concentración, esto se atribuye los procesos de dilución ocasionados por la misma lluvia, en esta temporada se produce el 79% de la precipitación anual. Encontraron correlaciones en ambas temporadas de los iones SO_4^{2-} y Ca^{2+} . En temporada de lluvias, el enriquecimiento de SO_4^{2-} , NH_4^+ y NO_3^- se debe a los vientos de barlovento. En la estación seca este enriquecimiento se debe a las fuentes de emisión de gases provenientes de las industrias situadas en Tampico, Madero, Poza Rica y sur-sureste de Texas, según lo indicado por los vientos predominantes del noreste.

Domínguez *et al.* (1999) realizaron una estimación de las características de infiltración puntual en diversos suelos de la cuenca del Río Ídolos y su relación con la infiltración global. La finalidad de este estudio fue conocer con precisión las pérdidas por infiltración en suelos, y evaluar con mayor exactitud las avenidas en puntos donde se encuentran instaladas obras hidráulicas. Para realizar este trabajo utilizaron un modelo basado en el balance hídrico en cada tipo de suelo de la cuenca. Tales autores recomiendan conocer la distribución espacial de la lluvia, debido a que existe una gran diferencia en la infiltración de cada tipo de suelo.

Siebert y Carrasco-Nuñez (2002) desde un punto de vista geológico y vulcanológico, estudiaron 3 grupos diferentes de lavas procedentes de una serie de volcanes localizados en el sector noroeste de la región de Xalapa. El grupo más antiguo de 42,000 años antes del presente (A.P.), está representado por basaltos de olivino del Volcán La Joya, este derrame se extendió 14 km a partir de su fuente alcanzando la parte norte de la ciudad de Xalapa. El segundo grupo incluye al volcán Cerro Colorado de aproximadamente 2,980 años A.P. Dentro del grupo más reciente se encuentra el cono de escoria conocido El Volcancillo, cuya última erupción data de 870 años A.P., estas lavas viajaron hasta 50 km a partir de su fuente y se distribuyeron a lo largo y ancho del valle del río Actopan, en la parte norte de la región de Xalapa y llegan hasta el extremo este del área de estudio, en el lugar conocido como el Descabezadero.



González-Mercado (2005) estudió el vulcanismo de origen monogenético de la región de Xalapa, reconociendo un total 11 unidades litoestratigráficas, una de origen marino constituida por rocas calcáreas cretácicas que corresponden al basamento prevolcánico, a la cual le sobreyacen 9 unidades de origen volcánico y una de origen continental (aluvión). Identificó 20 conos de escoria, los cuales clasificó en tres grupos utilizando parámetros morfométricos tales como la altura y diámetro del cono. En su conjunto, los volcanes son de edad Pleistoceno-Holoceno, y sus flujos de lava son de basalto, andesita basáltica y andesita, predominando los primeros.

Morales-Barrera (2009) estudio la geología volcánica de la Región de Xalapa. Según esta autora, las estructuras tectónicas principales consisten en conjuntos de fallas que muestran diferentes relaciones de temporalidad. Las fallas NW-SE muestran una cinemática principalmente normal y afectan únicamente a las unidades más antiguas, de las cuales la más importante es la ignimbrita el Castillo, a la que le asigna una edad mínima de Plioceno Tardío (2.436 ± 0.125 y 2.208 ± 0.071 Ma). Es de composición riolítica con una afinidad calco-alcalina y alto contenido en K_2O . Abarca un área aproximada de 637 km^2 , con una distribución hacia el sureste en forma de franja, con una longitud máxima que varía de 32 a 35 km. Su expresión morfológica es en forma de extensas mesetas con un volumen estimado de 22 km^3 .

Rodríguez *et al.* (2009) estudiaron los rasgos geológicos y morfológicos de un grupo de volcanes monogenéticos localizados sobre el flanco este del volcán Cofre de Perote, alrededor de la ciudad de Xalapa, Veracruz. A este conjunto de volcanes le asignan el nombre de Campo Volcánico Monogenético de Xalapa, el cual está formado por 59 volcanes en un área de 2400 km^2 . Con los parámetros morfológicos y las fechas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtenidas, los agruparon dentro de tres intervalos de edad diferentes; más antiguos de 2.0 Ma., aquellos entre 0.25 – 0.40 Ma. y los menores de 0.1 Ma. Los flujos de lava están formados principalmente por basaltos de olivinos, andesitas basálticas con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y olivinos menores, y andesitas con fenocristales y piroxenos. La mayoría de las rocas basálticas tienen un comportamiento calco-alcalino.



En la revisión de los trabajos realizados en la zona, es probable que no se hayan podido recopilar todos los relacionados con el tema. Los estudios realizados a la fecha aportan información relacionada con el comportamiento climático y con las características de infiltración, los realizados recientemente se enfocan a la descripción de la geología, sin embargo no se encontraron estudios de geofísica que permitan conocer al detalle la estratigrafía. El resultado de esta búsqueda pone en evidencia la falta de estudios relacionados con la hidrogeología e hidrogeoquímica, por consiguiente es importante realizar este tipo de estudios que contribuyan a conocimiento del funcionamiento hidrogeológico en la zona.

1.6 Marco geológico

La zona de estudio forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM); definida como un arco magmático continental que se extiende desde las costas del Pacífico en los estados de Jalisco (Bahía de Banderas) y Nayarit (San Blas), hasta las costas del Golfo de México (Palma Sola) en el estado de Veracruz. (Demant, 1978). Dentro de la FVTM se diferencian dos tipos de estructuras: grandes estratovolcanes orientados en dirección N-S y un gran número de pequeños volcanes alineados principalmente en dirección NE-SW. Con base en las características geológicas, geomorfológicas y estructurales, algunos autores dividen a la FVTM en tres sectores, occidental, central y oriental. (Demant, 1978; Pasquaré *et al.*, 1987).

1.6.1 Sector oriental

El área de estudio se localiza dentro de este sector. Dentro del contexto geológico es uno de los menos estudiados. Los primeros trabajos realizados se deben a Robin (1976), quien propuso que las rocas calci-alcalinas se relacionan con los procesos de subducción de la Trinchera Pacífica y forman parte de la FVTM. Las rocas alcalinas ajenas a este ambiente, las asoció a la presencia de una tectónica extensional relacionada con la apertura del Golfo de México. Este sector se distingue por presentar un vulcanismo de carácter bimodal: calci-alcalino y alcalino.

Otros estudios más recientes que se refieren a este sector, son los realizados en las regiones de Palma Sola, Campo Volcánico de los Tuxtlas y Campo Volcánico de Xalapa,



(Negendank *et al.*, 1985; López-Infanzón, 1991; Nelson y González-Cáver, 1992; Nelson *et al.*, 1995; Siebert *et al.*, 2002; González-Mercado, 2005; Morales-Barrera, 2009; Rodríguez *et al.*, 2009).

Los patrones de fracturamiento en el sector oriental no están bien establecidos, debido a que se encuentran cubiertos por vulcanismo reciente. En algunos trabajos se reporta la presencia de al menos dos sistemas de fallas con orientaciones NW-SE y NE-SW para esta región (López-Hernández, 1995; Campos-Enríquez y Garduño-Monroy, 1987; González-Mercado, 2005; Morales-Barrera, 2009).

Dentro del sector oriental la estructura volcánica más importante es la cadena montañosa Cofre de Perote - Pico de Orizaba (CP-PO), esta cordillera está constituida por 4 estratovolcanes, con una orientación NNE-SSW y se localiza en los límites de los estados de Puebla y Veracruz. La distribución de estas estructuras volcánicas queda comprendida de Norte a Sur de la siguiente forma: el extinto estratovolcán Cofre de Perote (Carrasco-Núñez, *et al.*, 2009), el Complejo Volcánico La Gloria (Höskuldsson, 1992), el Complejo Volcánico Las Cumbres (Rodríguez, 2005) y el estratovolcán activo Pico de Orizaba (Carrasco, 1997; 1993; Carrasco-Núñez y Rose, 1995 y Siebe *et al.*, 1993), cada uno cuenta con un centro principal de emisión con actividad efusiva y explosiva que manifiestan procesos constructivos y destructivos, los cuales han dado origen a calderas, domos, flujos de lava, depósitos piroclásticos, depósitos de avalancha y lahares. Estos centros volcánicos manifiestan una afinidad calci-alcalina. Otras manifestaciones volcánicas en este sector son: “Naolinco Volcanic Field” (NVF) (Siebert y Carrasco-Núñez, 2002) y el Campo Monogenético Volcánico de Xalapa (CMVX) (Rodríguez *et al.*, 2009), los cuales se encuentran al noreste de extinto volcán Cofre de Perote, estos campos se componen de conos de escoria y cráteres de explosión que produjeron una serie de derrames de basalto alcalino-calci-alcalino. Bajo estos derrames se encuentra un flujo piroclástico que sirve de basamento a los flujos de lava (Morales-Barrera, 2009). Desde un punto de vista geológico el área de estudio se ubica en el Campo Monogenético Volcánico de Xalapa (CVMX). Dentro de sus unidades aflora la mayoría de los manantiales objeto de este estudio.



1.6.2 Geología Local

En los trabajos realizados en el área de estudio por González-Mercado (2005) y Morales-Barrera (2009), diferencian y describen once unidades litológicas, una de las cuales corresponde a una secuencia de origen sedimentario marino de edad cretácica, que conforma el basamento pre-volcánico de la región, sobre ésta unidad se desarrolló una secuencia volcánica que comenzó en el mioceno y continuó hasta el Holoceno. Ocho unidades se asocian a procesos volcánicos que incluyen depósitos de avalancha se describen también en (Carrasco-Núñez, et., al. 2006; 2009), flujos piroclásticos y derrames de lava, dos unidades litológicas se asocian a (travertino y aluvión) los cuales se derivan de procesos sedimentarios de ambiente continental. (Figura 1.5).

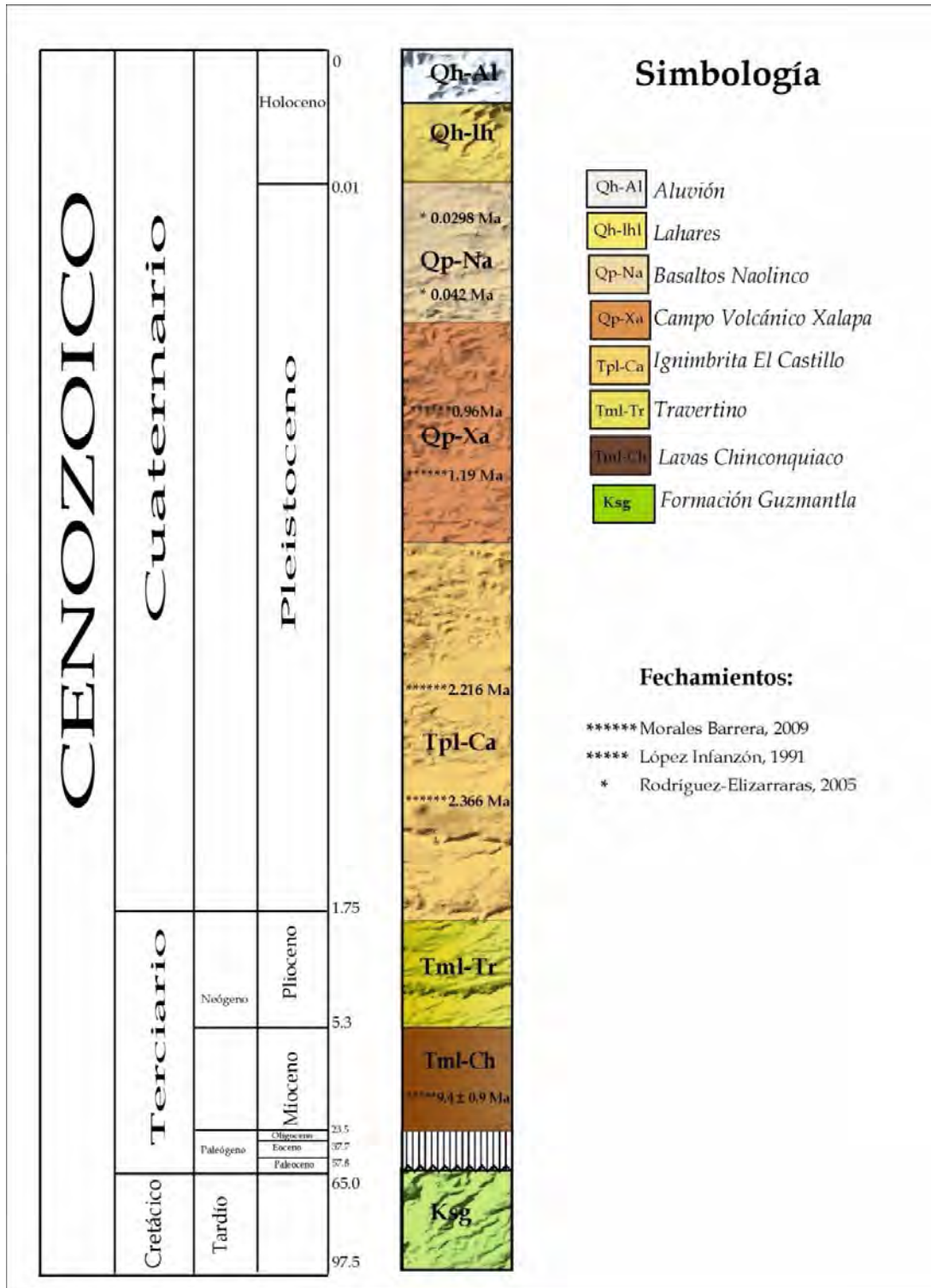


Figura 1.6 Columna estratigráfica en la zona de estudio, que muestra las principales unidades litoestratigráficas dentro de las que ocurren los manantiales estudiados. Modificado de Morales-Barrera, (2009).



1.6.3 Estratigrafía

En este trabajo solo se incluye la descripción de las unidades que interactúan con los manantiales objeto de este estudio. Sus características y descripción, fueron tomadas de González-Mercado (2005) y Morales-Barrera (2009).

Unidades Mesozoicas

Cretácico

Formación Guzmantla. Ksg

Las rocas que forman el basamento pre-volcánico en la zona constituyen una secuencia sedimentaria carbonatada del Mesozoico tardío, definida como Formación Guzmantla, Viniegra-Osorio (1965). Consiste de depósitos que van desde el Turoniano en el que reflejan un ambiente de plataforma externa, hasta el Coniaciano-Santoniano, que representan un ambiente de plataforma interna con lagunas dispersas (Ferket *et al.*, 2003). En el área de estudio, la formación Guzmantla aflora en el sector SE, con una orientación general NW-SE y al SW de la ciudad de Xalapa.

Unidades cenozoicas

Mioceno tardío

- **Basaltos Chinconquiaco-Palma Sola Tml- Ch**

Las rocas ígneas más antiguas que se encuentran en el área, están representadas por extensos derrames de rocas basálticas emplazados a partir de fallas y fracturas (López Infanzón, 1991). Esta secuencia aflora en la denominada Sierra de Chinconquiaco localizada en la parte N y NE del área de estudio.

Los basaltos porfídicos son las rocas más comunes de esta unidad y están constituidos por fenocristales de olivino, piroxeno y plagioclasa embebidos en una matriz de la misma composición. Forman extensas mesetas con paredes verticales de gran espesor que originan espectaculares cascadas como las de Naolinco. Las edades reportadas por



Negendank et al., 1985 y López Ifanzón 1991, para esta secuencia varían entre el Mioceno tardío y el Pleistoceno (9.4 ± 0.9 a $0.82 \pm .82$ Ma).

- **Travertino Qp (Tr)**

Son rocas de composición calcárea, de origen continental, afloran dentro del área en una amplia extensión al sur del poblado de Cerro Gordo, esta unidad de roca presenta una estructura masiva, recristalizada de color café y gris, con fósiles. Su espesor es mayor a 100m.

Con base en su posición estratigráfica, Gymsa (1987), asignó una edad de Pleistoceno a estas rocas. La unidad se encuentra sobreyaciendo en contacto discordante de tipo angular a la secuencia carbonatada del Cretácico.

- **Ignimbrita El Castillo Tpl_Ca**

Esta unidad fue definida por Morales-Barrera (2009) consiste de una secuencia de flujos piroclásticos de composición riolítica, consolidados en la base y no consolidados en la cima.

Estos depósitos se encuentran distribuidos desde el noroeste de la ciudad de Xalapa, hasta el extremo sureste. También se extiende en afloramientos aislados hacia la parte noroeste. El depósito es de color rosa al intemperismo y gris claro al fresco, tiene espesores variables desde 60 m (en las depresiones) a 5 m en los altos topográficos.

La facies consolidada está constituida por material juvenil representado por pómez gris de tamaño que varía de 0.6 hasta 10 cm, con biotita como mineral distintivo. Contiene líticos de color negro de composición basáltica con tamaños de hasta 8 cm, los cuales presentan bordes de alteración. La matriz es ceniza de color blanco en la que se encuentran inmersos la pómez y los fragmentos de roca. La facies no soldada de la ignimbrita, está compuesta por una secuencia de flujos piroclásticos granulares, tiene un espesor máximo de 40 m. Está constituida por pómez fibrosa de color crema y líticos accidentales de basalto y andesita embebidos en una matriz de tamaño de lapilli (2-64mm).

Las rocas de esta unidad están afectadas por diaclasas de enfriamiento, las cuales tienen orientaciones preferenciales que varía entre N45°W a N45°E. Estratigráficamente la



ignimbrita sobreyace en contacto discordante a la Formación Guzmantla, Basaltos Chinconquiaco y la Avalancha Guadalupe y subyace en contacto también discordante a la secuencia de lavas del Campo Volcánico de Xalapa, Depósitos de lahar y al flujo de escombros Las Cumbres.

- **Campo Volcánico de Xalapa Qph Xa**

El Campo Volcánico de Xalapa (CVX) fue descrito originalmente por González-Mercado, (2005). Posteriormente Rodríguez *et al.*, (2009) ampliaron el área de este campo volcánico y lo definieron como Campo Volcánico Monogenético de Xalapa, (CVMX), el cual incluye una secuencia de lavas y depósitos piroclásticos originada a partir de conos de escoria que se distribuyen alrededor de esta ciudad.

Los depósitos del CVMX, se distribuyen en el sector oeste del área de estudio. Consisten de extensos derrames de lava que fluyeron principalmente hacia el sureste y cubren parcialmente las poblaciones de Xalapa, Coatepec y San Marcos de León. Las rocas que conforman el CVMX son basaltos y andesitas basálticas; se presentan en afloramientos masivos, muestran una textura afanítica, aunque en algunas partes se observan fenocristales de olivino, en otras, es frecuente encontrar fenocristales de plagioclasa y piroxeno que en ocasiones están reemplazados por óxidos de hierro embebidos en una matriz vítrea. Son rocas duras, densas, eventualmente vesiculadas, con diaclasas hexagonales en algunos afloramientos. Los espesores de los derrames varían desde 5 m en Cerro Gordo hasta 50 m en Teocelo.

Estratigráficamente las lavas del CVMX cubren discordantemente a la ignimbrita El Castillo. El contacto muestra un horizonte de alteración por oxidación de color rojizo. En su mayoría las lavas del CVMX se encuentran cubiertas por depósitos de lahar. Sin embargo, las lavas más antiguas están cubiertas por los depósitos de la ignimbrita Xáltipan (Morales-Barrera, 2009).

- **Depósitos de Lahar Chiltoyac Qh- lh**

Esta unidad está representada por depósitos de lahar que se encuentran ampliamente distribuidos en la parte norte y este del área de estudio. Los lahares consisten de un material



masivo de color amarillo-café, con apariencia caótica, deleznable, con una matriz limo-arcillosa que contiene fragmentos líticos subredondeados de 1 mm de diámetro y fragmentos de cristales. Su espesor varía de 1-10 m y se encuentra sobreyaciendo de forma irregular a las unidades ignimbrita El Castillo, ignimbrita Xaltipan y al CVMX.

- **Depósitos de aluvión Qp-AI**

Estos depósitos son producto de la acumulación a lo largo de cauces de ríos y zonas bajas, de material erosionado de las zonas altas. Están formados por material areno-arcilloso con un bajo porcentaje de cantos rodados, la composición de estos rellenos depende del material que conforma las rocas en su entorno. Se encuentran básicamente distribuidos a lo largo de los ríos principales, así como en los cauces menores formados a lo largo del área de estudio.

1.7 Importancia del Estudio

En la bibliografía consultada no se encontró información relacionada con la hidrogeoquímica del agua, los trabajos realizados hasta ahora se enfocan principalmente al análisis de la hidrología superficial para la determinación de algunos parámetros hidráulicos, y los más recientes a la geología. Es fundamental realizar estudios hidrogeoquímicos que ayuden a la comprensión de la dinámica de los manantiales.

En los últimos años, se ha denunciado en diferentes medios de comunicación el grave problema ambiental que se presenta en la zona, donde los manantiales representan la única fuente de abastecimiento de agua potable para 52 comunidades, con un total de 49,476 habitantes (INEGI, 2005). Debido al aumento poblacional (tasa de crecimiento 2000-2005 1.85%, existe una creciente necesidad de agua, por lo que es imprescindible preservar el recurso, tanto en cantidad como en calidad.

Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, se considera importante realizar trabajos de investigación hidrogeológica dentro de la región, que permitan fundamentar el comportamiento hidrogeoquímico de los manantiales.



1.8 Hipótesis

Debido a las características geológicas, geomorfológicas, climáticas e hidrográficas de la zona, existen posibilidades que se presenten diferentes tipos de flujo subsuperficiales los cuales pueden considerarse como locales, intermedios y regionales. Los puntos de descarga de estos flujos son los diferentes manantiales, cuyo origen y evolución puede ser determinado mediante análisis hidrogeológicos e hidrogeoquímicos convencionales. Es probable que los manantiales en los últimos años se hayan visto afectados por el desordenado crecimiento demográfico y el cambio en el uso de suelo, la falta de ordenamiento territorial y crecimiento urbano en las zonas de recarga, frecuentemente son una de las principales causas a las que se les atribuyen los problemas de contaminación antropogénica y reducción de sus volúmenes de descarga. Se infiere que la ocurrencia de los manantiales pueda estar condicionada por las unidades litológicas, y que el agua se infiltra y circula a través de ellas formando flujos locales, intermedios y regionales.

1.9 Objetivo

El objetivo de esta investigación es aportar las bases para entender el funcionamiento generalizado del sistema hidrodinámico de los manantiales en la región, mediante el uso de herramientas hidrogeoquímicas y geológicas.

Para ello se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Describir y caracterizar los principales aspectos del entorno geológico de los manantiales.
- Correlacionar las características físicas y químicas del agua que se descarga a través de los manantiales, con su probable origen y evolución.
- Aportar fundamentos para la comprensión y desarrollo de un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeoquímico e hidrogeológico regional.



1.10 Metodología

El método de trabajo para lograr el objetivo planteado, se dividió en tres etapas: Trabajo de gabinete, Actividades de campo y Trabajo de laboratorio.

1.10.1 Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete consistió en realizar una recopilación de la información relacionada con el tema de estudio, publicada en diferentes fuentes. Se realizó la revisión y análisis de esta información para conocer la zona de estudio. Se adquirió la base de datos topográfica de las cartas E14B27, E14B37, E14B28 y E14B38 en formato vectorial escala 1:50,000 editadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se limitó la zona de estudio y se localizaron los manantiales que aparecen en las cartas, así como, otros manantiales que fueron mencionados por los habitantes de la zona y que sirven como fuente de abastecimiento, para posteriormente visitarlos y realizar la inspección geológica así como para rectificación de su geoposición.

Con base en lo anterior se planeó la visita y muestreo de agua para análisis químico de los manantiales. Una vez procesada y analizada toda la información adquirida, así como la generada en esta investigación, se procedió a la redacción e integración de este documento. Para procesar la información se utilizaron los programas ArcGis 9.2, Surfer 8 y AquaChem, con los cuales se elaboraron los diferentes mapas y diagramas.

1.10.2 Actividades de Campo

El trabajo de campo consistió en diez campañas divididas en tres etapas, durante las cuales se recorrió el área de estudio y se llevaron a cabo las siguientes actividades: localización de los manantiales, reconocimiento geológico y muestreo químico.

Localización de los manantiales

Con base en la cartografía de INEGI, se efectuó la localización de los manantiales, en un área aproximada de 1000 km². Posteriormente con la ayuda de los representantes de los municipios y los comités encargados de la distribución de agua a las comunidades, se



localizaron otros manantiales que no aparecen en las cartas topográficas. Se tomaron coordenadas con un GPS manual marca Garmin.

Se realizó una caracterización geológica inicial sobre la génesis de cada manantial. Tomando como base inicial 63 manantiales en un área de aproximadamente 1000 km², se elaboró un mapa preliminar. Para realizar este trabajo, se seleccionaron 23 manantiales para su estudio a detalle, los cuales se utilizan como fuente de abastecimiento. Finalmente, el área de estudio quedó comprendida en el Municipio de Emiliano Zapata, Veracruz, con una superficie de 395 km².

Verificación geológica.

Con base en el mapa geológico tomado de Morales-Barrera, (2009), se realizó la verificación y descripción geológica del entorno en el cual afloran los manantiales, considerando aspectos como: estructuras geológicas, fallas y fracturas a escala local, unidades estratigráficas y zonas de contacto. La importancia de esta descripción proporciona información espacial que ayuda a la comprensión de la dinámica de los manantiales.

Muestreo

Una parte importante de la información que se requiere para alcanzar los objetivos es que, el agua muestreada para su posterior análisis sea representativa. Por lo que es necesario, tomar en cuenta protocolos y requerimientos establecidos para evitar que la concentración química y características originales del agua se modifiquen. Para ello se aplicó la metodología propuesta en la NOM-014-SSA1-1993; “Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados”.

El muestreo se llevo cabo del 19 al 21 de junio de 2008, las muestras fueron tomadas directamente en los afloramientos de los manantiales en envases de polietileno de alta densidad, con tapa y contratapa, en cada sitio se tomó una muestra para iones mayores y otra para metales. Simultáneamente se midieron parámetros físicos: pH, conductividad eléctrica, alcalinidad y temperatura. Es importante que cada sensor que mide estos parámetros sea previamente calibrado.



El sensor del pH fue calibrado con soluciones buffer de 4, 7, y 10. La calibración de la conductividad se llevó a cabo por medio de una solución estándar con conductividad 1000 $\mu S/cm$. Para la determinación de la alcalinidad se utilizó el método de Gran, titulando un volumen de muestra (20 ml) con ácido sulfúrico de normalidad conocida que se aplicó gradualmente con un titulador digital Hach, hasta alcanzar un pH menor a 2 ó 3. Las muestras para cationes fueron filtradas en campo con una bomba peristáltica utilizando filtros de 0.45 μm , se acidificaron a un (pH menor a 2N) con HNO_3 ultrapuro. Todas las muestras para aniones se tomaron sin añadir ningún tipo de conservador y se preservaron en hieleras a una temperatura $<4^{\circ}C$ hasta llegar al laboratorio, para evitar cualquier tipo de reacción o alteración.

1.10.3 Trabajo de laboratorio

Los análisis químicos para las muestras de agua y elementos traza se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica del Centro de Geociencias, UNAM Campus Juriquilla. Las muestras de cationes fueron analizadas por espectrometría de masas con un equipo ICP-OES (Plasma Inductivamente Acoplado con Espectrometría Óptica de Emisión), Marca ThermoFischer Scientific, Modelo iCAP 6500 Duo View ICP-OES Spectrometer con Auto muestreador ASX-520. Utilizando el Método 200.7 de la US EPA de Enero del 2001. Las muestras de aniones se determinaron por cromatografía, utilizando un Cromatógrafo Dionex ICS-2500 HPLC/IC con detector ED50A electroquímico de conductividad, supresor dionex ASRS-ULTRA ii columna analítica dionex AS14A y guarda analítica dionex AG14A. Para lo cual se utilizó el Método 300.1 de la US EPA de 1997.

2 Entorno geológico de los manantiales.

2.1 Marco Teórico

Un manantial puede definirse como una zona de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua, procedente de un acuífero subterráneo. Son considerados como aliviaderos o desagües por los que sale el agua que reciben los acuíferos subterráneos. (Custodio y LLamas, 1983). Un manantial aflora donde el nivel de saturación del agua en el acuífero corta la superficie topográfica. Se forman debido a cambios verticales u horizontales en la conductividad hidráulica de los materiales geológicos.

De acuerdo con Davis (1971), los manantiales pueden manifestarse en todo tipo de formaciones geológicas, la variación horizontal o vertical de la permeabilidad es la causa más frecuente de la formación de manantiales. Cualquier descarga natural de agua en la superficie del suelo lo suficientemente grande como para construir un pequeño arroyo, puede ser denominada manantial. Una descarga de orden menor recibe el nombre de zona de rezumo o zona de manantío. Los manantiales brotan no solamente sobre la superficie del suelo sino también bajo los océanos, lagos y ríos.

La geología y la geomorfología condicionan la circulación del agua subterránea y la distribución de las áreas de recarga y descarga, el relieve de la zona puede condicionar de forma importante la pluviometría y cantidad de agua de recarga. Esto conduce a la creación de sistemas de flujo locales y regionales, con líneas de corrientes que difieren unas de otras en cuanto a recorrido y profundidad, y por lo tanto el tiempo de permanencia del agua en el terreno. El resultado es la posibilidad de notables variaciones en la hidrogeoquímica del agua. Estos principios teóricos son la base para la interpretación de este trabajo de investigación.

La geología juega un papel de primer orden en la variación de las aportaciones anuales, la influencia geológica se manifiesta primordialmente en tres factores: los suelos, la litología y la estructura de las rocas. Los suelos determinan en gran parte el coeficiente de infiltración, el cual depende directamente de la intensidad de la lluvia, a partir de la cual empieza a producirse la escorrentía superficial. El tipo de suelo influye en la retención



específica, así como, en el volumen del agua infiltrada que la zona superior del terreno retiene sin permitir su flujo vertical hacia la zona saturada inferior.

La litología tiene una influencia determinante en la existencia de acuíferos dentro de una cuenca. Cuando la roca aflora en una superficie con poca formación de suelos, la litología suele guardar una relación con la densidad de la red de drenaje. Cuando la red es muy densa, la lluvia alcanza más rápidamente los cursos de agua, que cuando se trata de una red menos densa. En las rocas consolidadas, los principales factores que determinan las características hidrogeológicas de las formaciones volcánicas son: el tipo de vulcanismo, la distancia desde el centro de emisión, la estructura, su edad y la presencia de materiales no volcánicos interstratificados. Estos factores inciden en un mayor grado de anisotropía y heterogeneidad del medio, y por lo tanto, en la circulación del agua subterránea. La estructura determina, en buena parte, la situación de las capas permeables, las cuales condicionan a que un acuífero quede o no conectado con un determinado curso de agua, o que descargue en un manantial de la misma formación permeable situada en otra cuenca, a veces ni siquiera colindante con la del manantial.

El estudio de la litología y de la estructura de una zona puede dar indicaciones sobre la localización y el caudal de los manantiales, en zonas de geología uniforme, la existencia de manantiales pequeños y abundantes en las laderas de los valles o colinas, indica generalmente una zona saturada poco profunda y una permeabilidad baja; por el contrario, los manantiales grandes y situados en el fondo de los valles, suelen indicar una permeabilidad mayor.

2.1.1 Causas de la fluctuación del caudal de los manantiales.

El caudal de la mayoría de los manantiales varía considerablemente, pero el de algunos es casi constante, las variaciones responden fundamentalmente a los cambios en los niveles piezométricos del acuífero drenado por el manantial, que a su vez, dependen de las relaciones entre la recarga y la descarga. Cualquier causa que dé lugar a una fluctuación en el nivel piezométrico del agua contenido en un acuífero, puede originar también un cambio en el caudal de los manantiales alimentados por dicho acuífero. La descarga de los manantiales que drenan acuíferos con poco volumen de almacenamiento y con buena transmisividad, por lo general fluctúa mucho. Sus caudales pueden desaparecer poco tiempo después de los



períodos de recarga. Si la zona saturada esta próxima a la superficie y existen plantas freatofitas, pueden registrarse variaciones de caudal a lo largo del día debidas a la evapotranspiración.

2.1.2 Clasificación de los manantiales.

Los manantiales han sido estudiados desde hace muchos años y se han sugerido diversos tipos de clasificaciones, según sus características más distintivas. Entre estas puede señalarse las que se refieren a los materiales geológicos que constituyen el acuífero, las relaciones litología-estructura-terreno, la cuantía y régimen del caudal, la composición química y de temperatura de sus aguas (Custodio, 1983). Las tres variables que definen la cantidad de agua de un manantial son la cantidad de precipitación, el área de recarga y la permeabilidad del terreno. De acuerdo al área de recarga se clasifican por medio del método de (Meinzer, 1942), que los agrupa de acuerdo a la descarga de agua en ocho categorías.

2.1.3 Tipos representativos de manantiales.

A continuación se muestran algunos esquemas representativos de diversos tipos de manantiales de acuerdo a los estudios realizados por (Davis 1971 y Custodio 1983), con los cuales se realiza un comparativo de los manantiales ubicados en la zona de estudio.

Cuando se tiene una formación geológica cuyos parámetros hidrológicos son homogéneos y su espesor es superior a los desniveles topográficos, lo normal es que los manantiales surjan en aquellas depresiones o valles en los que el límite superior de la zona saturada alcanza la superficie topográfica, los manantiales de aguas arriba dan origen a un curso permanente de agua, de modo que los manantiales de aguas abajo suelen ser subfluviales (Figura 2.1).

Cuando la geometría de la formación acuífera es de dimensiones más reducidas que los accidentes topográficos, los manantiales, suelen encontrarse en las proximidades de la zona de contacto entre las formaciones permeables e impermeables (Figura 2.2). Estos casos se producen en las masas de derrubios de ladera de las zonas montañosas. Por lo regular son manantiales de bajo caudal, dado el reducido tamaño del acuífero del cual provienen.

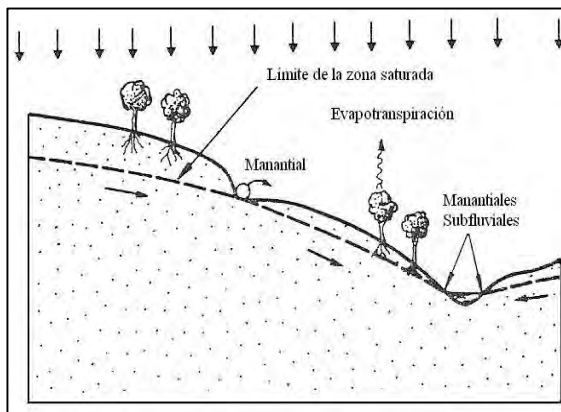


Figura 2.1 Manantiales de un embalse subterráneo en un terreno homogéneo, están fundamentalmente controlados por las relaciones del límite de la zona saturada y la superficie del terreno.

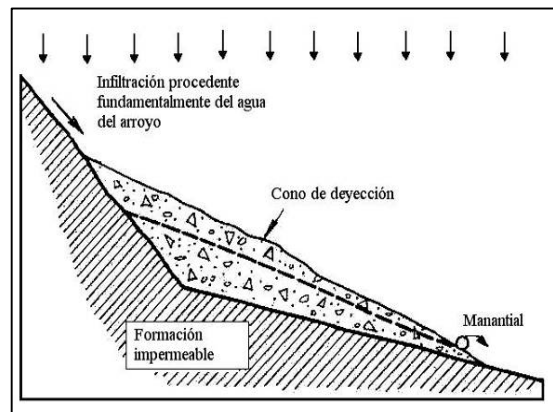


Figura 2.2 Manantial que drena de un cono de deyección cuya base está formada por terrenos impermeables.

La situación que se presenta en la figura 2.3 es hidráulicamente similar a la descrita en la figura 2.2 y corresponde a una estructura geológica de tipo tabular que ocurre con bastante frecuencia; la formación permeable suele corresponder a un estrato de areniscas o calizas, o a una terraza colgada. En la figura 2.4 se representa una estructura parecida, pero constituida por dos formaciones con distinta permeabilidad; se supone que la capa inferior de gravas tiene mayor permeabilidad y por ello actúa a manera de colector o dren de la zona saturada de la colada basáltica superior. Los plegamientos y las fallas pueden influir notablemente en la configuración geométrica de los embalses subterráneos y en los procesos de disminución o aumento de porosidad o permeabilidad de sus materiales.

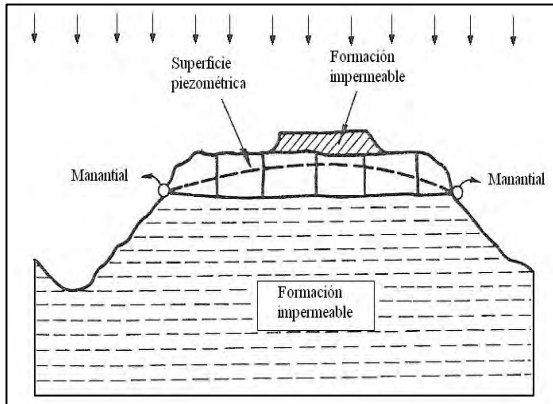


Figura 2.3 Modelo de manantiales que drenan un acuífero tabular recargado por la lluvia.

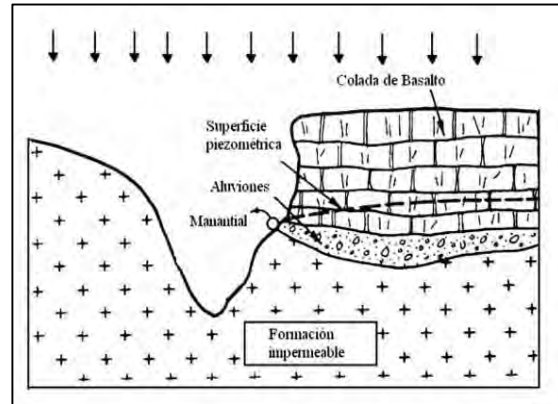


Figura 2.4 Manantial que drena de una formación basáltica poco permeable a través de los aluviones de un valle fosilizado por la colada volcánica.

En la figura 2.5 se esquematiza una estructura sinclinal que origina un acuífero confinado cuya descarga se hace por el flanco en que la erosión hace aflorar la capa acuífera a nivel más bajo. La figura 2.6 representa la descarga de un embalse subterráneo de naturaleza calcárea cuyos límites laterales son dos formaciones impermeables en contacto por falla.

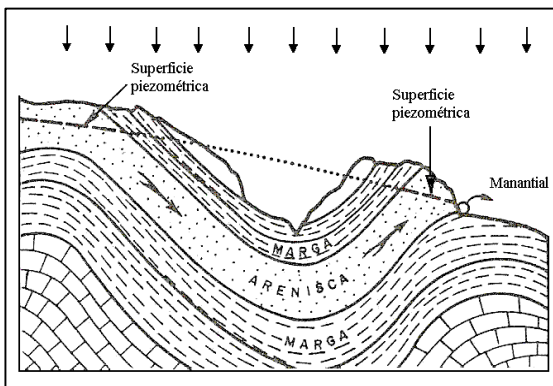


Figura 2.5 Manantial que drena un acuífero confinado

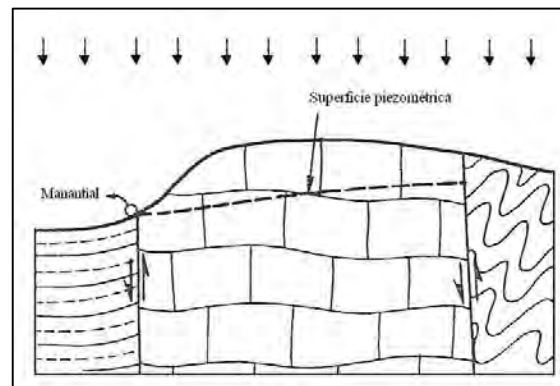


Figura 2.6 Manantial que drena un embalse subterráneo limitado lateralmente por dos fallas

La figura 2.7 representa un acuífero confinado, originado por un sinclinal fallado; su descarga a la superficie se produce a través de la zona milonitizada originada por la falla; se supone que en este caso la zona milonitizada es permeable, cosa que no siempre ocurre. En la



figura 2.8, se presenta el esquema de las fuentes bruscamente intermitentes, cuyo caudal pasa, de ser muy pequeño o nulo, a ser muy importante durante breve tiempo, a veces solo unas horas o minutos debido a que la descarga se hace a través de un sifón. Este tipo de manifestaciones son casi exclusivos de las rocas calcáreas que presentan disolución kárstica.

En las rocas ígneas o metamórficas la circulación y almacenamiento de agua ocurre fundamentalmente a través de las diaclasas y zonas fracturadas. Por lo general son manantiales de poco caudal y se extinguen durante los períodos sin lluvia.

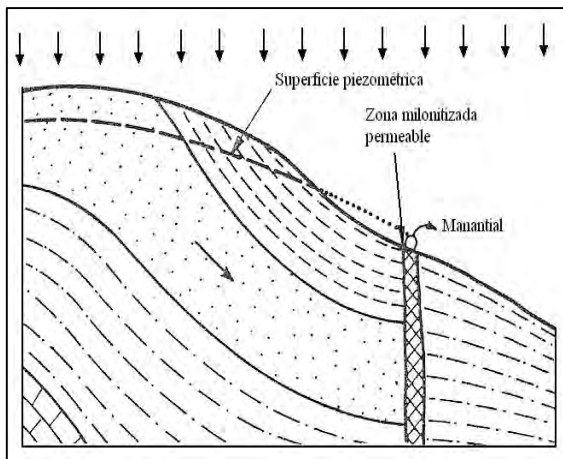


Figura 2.7 Manantial que drena un acuífero confinado a través de una zona milonitizada

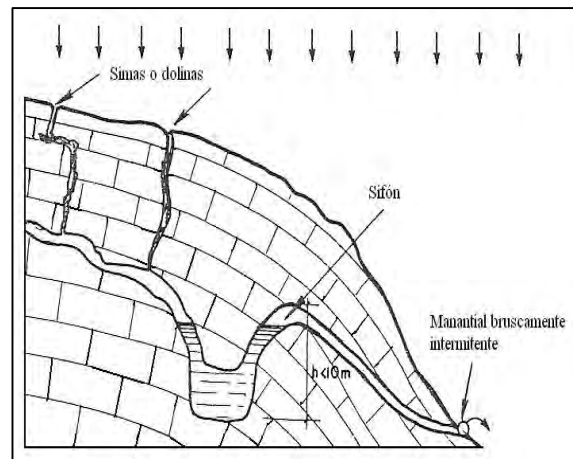


Figura 2.8 Esquema del sistema hidráulico que origina los cambios bruscos de caudal de algunos manantiales intermitentes de zonas kársticas

En la figura 2.9 se representa un tipo de pequeños manantiales que se originan debido a las diaclasas de una masa de granito. En la figura 2.10 se presenta un manantial que se origina cuando una zona más permeable (milonita, dique, etc.) está en contacto con una red de fracturas saturadas. En otras ocasiones, la milonita o el dique pueden ser más impermeables que la roca fracturada y constituir una barrera que también da origen a un manantial, el cual descarga el agua almacenada en las diaclasas de la zona aguas arriba de la milonita impermeable.

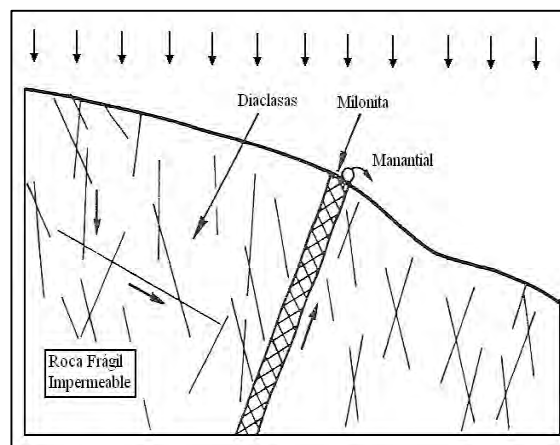
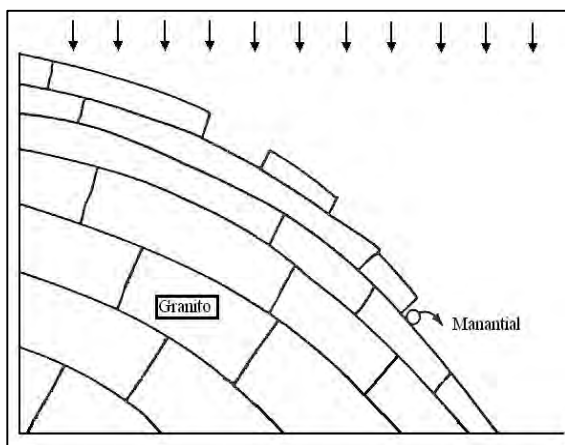


Figura 2.9 Manantial originado en diaclasas de descompresión del granito, estas formaciones suelen dar lugar a manantiales de bajo caudal y temporales.

Figura 2.10 Manantial originado por la descarga del agua que drena una roca fracturada.

3 Resultados

3.1 Descripción y clasificación de la ocurrencia geológica de los manantiales.

En este apartado se presenta un inventario de los manantiales y se describe el entorno geológico en el que ocurren, con base en los estudios recopilados se tiene un concepto general de la estratigrafía, sin embargo, no se cuenta con datos de espesores de las unidades. El reconocimiento geológico ayudó a conocer y describir a detalle el entorno geológico y la columna estratigráfica del área de cada manantial.

La clasificación de los manantiales se basa en las relaciones litología-estructura-terreno, así como en las características químicas del agua. No se emplea el método de clasificación de Meinzer, que se refiere al área de recarga de los manantiales, por carecer de datos de registro de caudales.

Como ya se ha mencionado, la región estudiada se localiza en el sector oriental de la FVT, en donde afloran unidades que varían desde el Cretácico temprano hasta el Reciente. Las principales unidades geológicas en la zona de estudio son: calizas de origen marino de edad cretácica, las cuales se aprecian en afloramientos al sureste del área de estudio, así como algunos depósitos expuestos al suroeste de la ciudad de Xalapa. Cubriendo a las calizas en algunos puntos se encuentran los basaltos Chiconquiaco y un depósito de travertino producto de cuencas evaporíticas, distribuido ampliamente al sureste de la zona. En el Terciario la ignimbrita El Castillo de composición riolítica, cubrió a la secuencia calcárea y al travertino. Esta ignimbrita se encuentra ampliamente distribuida en el centro y norte del área. En el Pleistoceno-Cuaternario, la actividad volcánica está dada por la presencia de numerosos volcanes monogenéticos conocidos con el nombre de Campo Volcánico Monogenético Xalapa, estos volcanes produjeron extensos derrames de lava, los afloramientos se distribuyen en su mayoría en la parte norte del área, son lavas fracturadas y cavernosas.

En la figura 3.1 se muestra el mapa geológico (modificado de Morales-Barrera, 2009) y la localización geográfica de los manantiales. Se muestra un esquema de una sección con dirección SE a NW, que ilustra el posible comportamiento hidrodinámico en la región, los



espesores de las unidades son estimados con base en la columna estratigráfica. En el mapa geológico se observa que la mayoría de los manantiales aflora en zonas de contacto horizontal, otros afloran en las zonas cercanas a las fracturas a escala local. Las condiciones topográficas, hidrológicas, climáticas y características físicas de las rocas, dan como resultado las descargas a través de los manantiales, que al parecer, presentan un mismo patrón de comportamiento, el cual se asemeja a los descritos por las figuras 2.3, 2.4 y 2.10, presentadas en el capítulo anterior y se relacionan con flujos locales y probablemente intermedios.

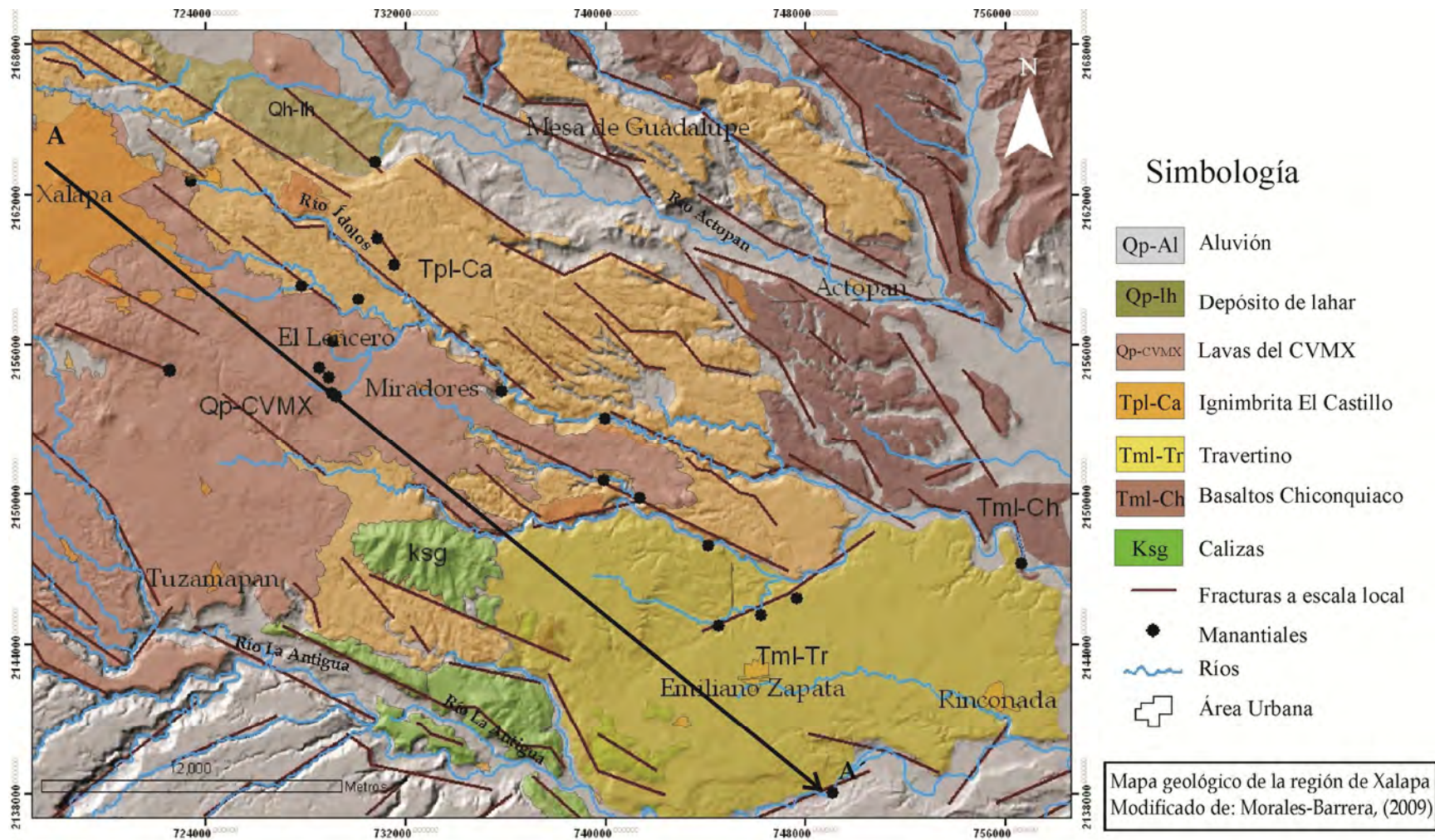


Figura 3.1 Mapa geol3gico y localizaci3n de los manantiales. Se aprecia que los manantiales afloran en las zonas de contacto de las unidades, algunos se ubican cerca a la zona de las fracturas a escala local.

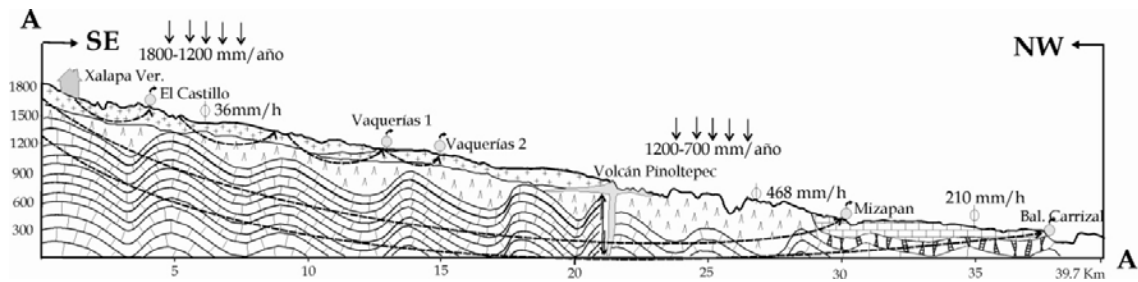


Figura 3.2 Sección esquemática que muestra el modelo de funcionamiento hidrodinámico propuesto para los manantiales en la zona de estudio. Los espesores de las unidades litológicas son aproximados. Φ índice de infiltración, Gómez y Pereyra (1997), valores de precipitación, Servicio Meteorológico Nacional.

3.1.1 Descripción de los manantiales localizados en las lavas del CVMX

En esta unidad afloran los manantiales El Lencero (R), Agua Santa (P), Vaquerías 1 (X), Paso Grande (Z), Vaquerías 2 (B), Pata de Cabra (O) y El Pomo (I), se localizan en la parte alta de la zona por arriba de los 1000 msnm.

Es posible que en esta zona el funcionamiento hidrodinámico esté controlado principalmente por los contrastes de permeabilidad, ya que estas lavas presentan un grado de fracturamiento de moderado a intenso. En algunos puntos se observa en la lavas una vesicularidad elevada, mientras que en otros las rocas son más densas.

La ignimbrita El Castillo constituye el basamento de los volcanes monogenéticos del CVMX. Esta relación de contacto se observa a lo largo de la autopista Xalapa-Veracruz, en donde las lavas alteraron las rocas subyacentes que muestran un contacto pirometamórfico de 0.50 - 2.0 m de espesor de color rojizo (Figura 3.3). Esta relación de contacto condiciona la ocurrencia de los manantiales en las lavas del CVMX, debido a que la ignimbrita El Castillo en esta zona actúa como capa impermeable.



Figura 3.3 Derrames de lava cubriendo a la Ignimbrita El Castillo.
Foto tomada en un corte sobre la autopista Xalapa-Veracruz.

De esto se deduce que el agua de este grupo de manantiales circula a través de la formación de suelo, fracturas y tubos de lava. La mayoría afloran en las depresiones formadas por las lavas emitidas por los distintos volcanes monogenéticos que forman el CVMX, descargando en los desniveles topográficos. En la figura 3.4 se presenta un esquema de la columna estratigráfica de la zona donde afloran este grupo de manantiales.

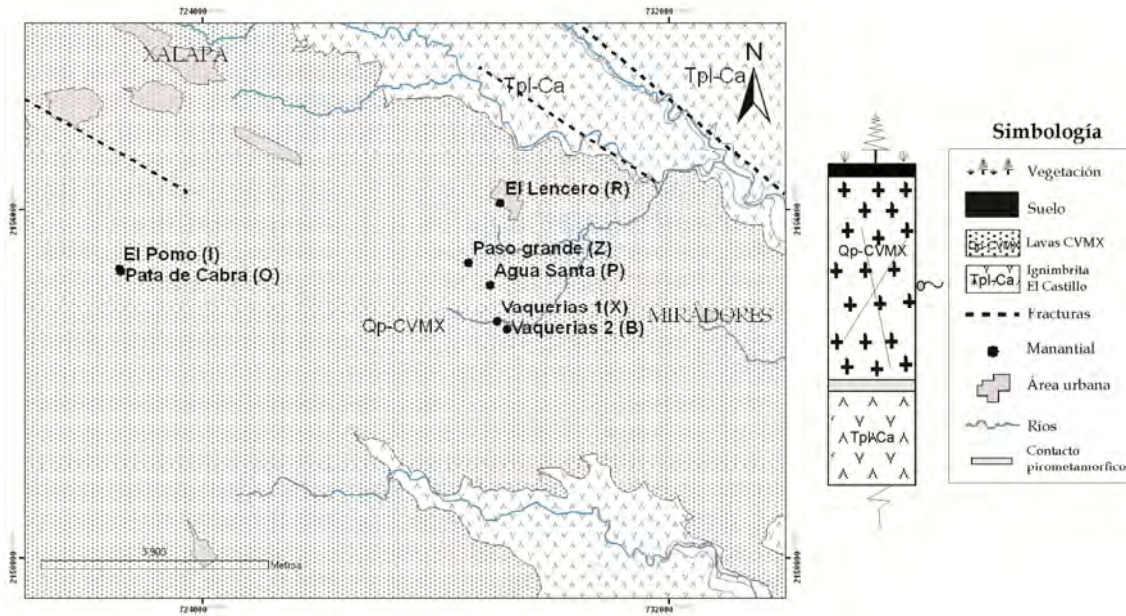


Figura 3.4 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en las depresiones formadas por las lavas del CVMX. El Lencero (R), Agua Santa (P), Vaquerías 1 (X), Paso Grande (Z) y Vaquerías 2 (B), surgen en el contacto de las lavas provenientes de diversos eventos. La columna estratigráfica es esquemática.

Como se observa en la figura 3.4 los manantiales no se ubican en zonas cercanas a las fallas a escala local, se asocian a una zona de contacto de las lavas provenientes de diversos eventos. En el contacto de estas unidades existen depósitos aluviales o laháricos intercalados entre los derrames de lava.

Algunos de estos manantiales localizados en esta unidad, son cabecera de arroyos tributarios de la subcuenca del Río Ídolos (Figura 1.2). De acuerdo a su temperatura, la cual oscila entre los 19 y 20.5 °C, se consideran no termales. Dentro de este grupo, los manantiales más distintivos son: El Lencero (R) el cual da origen a un lago que alimenta a un arroyo tributario del Río Ídolos. El manantial Vaquerías 2 (B), aflora en la zona de contacto entre un depósito de lahar y las lavas del CVMX, este manantial es considerado importante en la zona de estudio, debido a que su caudal abastece a 10 comunidades en forma regular durante todo el año.



3.1.2 Descripción de los manantiales que afloran entre el contacto lavas del CVMX - ignimbrita El Castillo.

En esta zona de contacto afloran 4 manantiales, de los cuales para su análisis solo se tomó uno, el más caudaloso, conocido como el manantial el Castillo (W); se utiliza en forma constante durante todo el año para abastecimiento de dos colonias de la ciudad de Xalapa y tres comunidades del municipio de Emiliano Zapata. Se ubica en la parte alta de la zona de estudio. En esta zona se aprecia un flujo de lava que se encuentra bajo las áreas densamente pobladas localizadas al noreste de la ciudad de Xalapa y sobreyace en contacto discordante con la parte no consolidada de la ignimbrita El Castillo. La litofacies no consolidada de esta ignimbrita está compuesta por un flujo piroclástico masivo granular con un espesor promedio de entre 10 y 15 m, lo que le confiere una permeabilidad alta. Con base en el reconocimiento geológico de esta zona, se infiere que la litofacies no consolidada funciona como acuífero y zona de recarga del agua subterránea, la cual descarga en este conjunto de manantiales, siendo éstos los más caudalosos de la parte alta. En esta zona no se aprecia un contacto pirometamórfico como el descrito en el caso de los manantiales que afloran en las lavas del CVMX. La figura 3.5 muestra el mapa geológico y la columna estratigráfica de esta relación de contacto, se aprecia que este grupo de manantiales afloran cerca de la zona donde se ubica una fractura a escala local.

Se ubican al este, en la periferia de la zona urbana de la ciudad de Xalapa. Afloran a una altitud de 1185 msnm y son cabecera del Río Ídolos y pertenecen a la cuenca del Río Actopan. De acuerdo a su temperatura de 20°C este manantial se considera no termal.

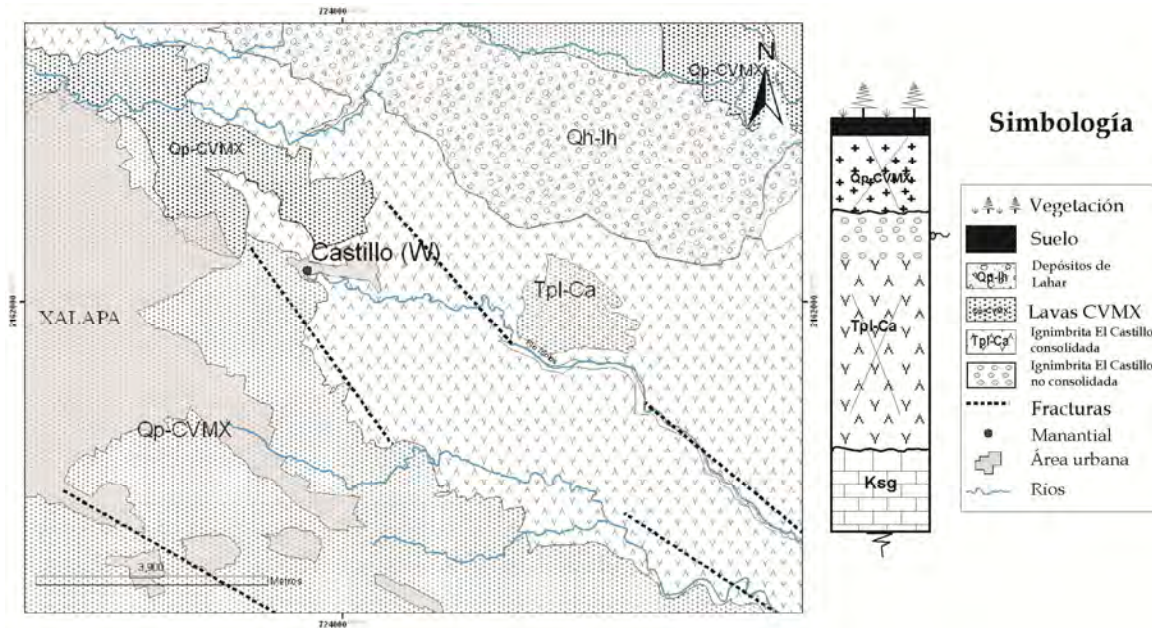


Figura 3.5 Mapa geológico y localización del manantial El Castillo, aflora en el contacto de las Lavas del CVMX y la litofacies no consolidada de la ignimbrita El Castillo. La columna estratigráfica es esquemática.

3.1.3 Descripción del manantial que aflora en el Contacto ignimbrita El castillo-depósitos de Lahar.

Como se describe en el apartado 1.6.2 los depósitos de lahar se encuentran distribuidos en la parte norte y este del área de estudio, están constituidos de material masivo, deleznable, con una matriz limo-arcillosa, contiene fragmentos líticos de 1 mm de diámetro y fragmentos de cristales, el espesor varía de 1 a 10 m en algunas zonas, tienen una permeabilidad baja. Estos depósitos sobreyacen de forma irregular a las unidades de la ignimbrita El Castillo y al CVMX.

En esta zona de contacto surge el manantial Loma de Rogel (K), la ocurrencia de este manantial se debe al cambio de permeabilidad que se presenta al contacto entre ambas unidades, emerge en la base de una meseta de la Ignimbrita El Castillo, que se encuentra en contacto con los depósitos de lahar. En la figura 3.6 se presenta el mapa geológico con un esquema de la columna estratigráfica del área.



Se localiza en la parte alta de la zona, pertenece a la cuenca del Río Actopan y se sitúa en los alrededores del poblado Loma de Rogel a una altitud de 820 msnm, es cabecera de un arroyo tributario del Río Actopan. De acuerdo a su temperatura 20.5°C se considera no termal; su caudal abastece en forma constante durante todo el año, a 4 comunidades que son: San Nicolás, Loma de Rogel, Otates y Trapiche del Rosario.

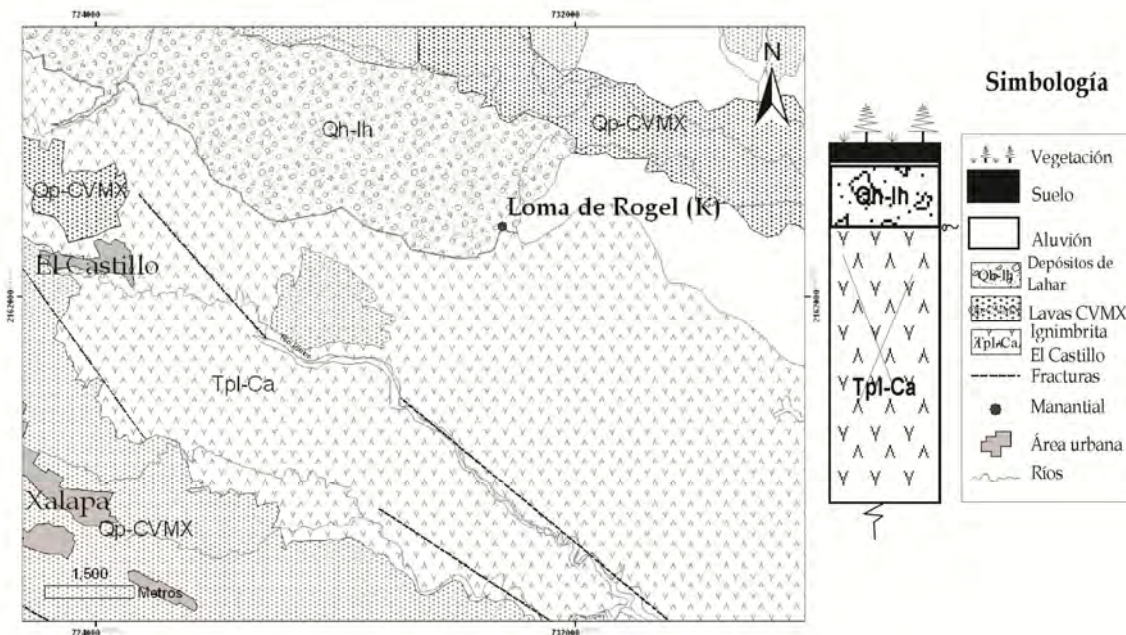


Figura 3.6 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el contacto del depósito de Lahar y la ignimbrita el Castillo. En esta zona de contacto emerge el manantial Loma de Rogel (K). La columna estratigráfica es esquemática.

3.1.4 Descripción de los manantiales que afloran en la ignimbrita El Castillo

En esta unidad se ubican 3 manantiales: Pocitos 3 Pasos (H), La Aurora (C) y El Jobo (J). Como se describe en el apartado 1.6.2, la ignimbrita El Castillo es una unidad constituida por un flujo piroclástico de pómez, de composición riolítica, que se encuentra distribuido en la mayor parte del área de estudio, desde el noreste de la ciudad de Xalapa, hasta el extremo sureste. Este flujo es consolidado en la base y no consolidado en la cima. La parte consolidada presenta un patrón de fracturamiento con dirección NE a SW y una baja permeabilidad. La



facies no consolidada está compuesta por una secuencia de flujos piroclásticos granulares. (Figura 3.7).



Figura 3.7 Característica de la ignimbrita El Castillo en la zona de los afloramientos. a) Zona de contacto de la ignimbrita El Castillo y las lavas del CVMX, en la zona del manantial Pocitos 3 Pasos (H); b) Zona de falla de la ignimbrita El Castillo, en los alrededores del manantial La Aurora (C), las fracturas se encuentran rellenas de harina de falla.

En la zona de contacto de ambas facies aflora el manantial El Jobo, la parte consolidada de la ignimbrita actúa como capa semiconfinante y da origen a este manantial. Se localiza en los alrededores del poblado el Lencero a una altitud de 960 msnm, es cabecera de un arroyo tributario del Río Ídolos. Su caudal da origen a un lago, abastece en forma constante durante todo el año a la comunidad de las Víboras. De acuerdo a su temperatura de 20°C, se considera no termal. En la figura 3.8 se presenta el mapa geológico y un esquema de la columna estratigráfica de la zona.

En la parte consolidada de la ignimbrita, afloran 2 manantiales: Pocitos 3 Pasos (H) y La Aurora (C), la ocurrencia de estos manantiales se debe a las fracturas de la ignimbrita, a través de las cuales fluye el agua. De acuerdo a su temperatura de 19.5 y 22°C se consideran no termales, poseen un caudal bajo.

El manantial Pocitos 3 Pasos (H), se localiza al suroeste de la ciudad de Xalapa en una zona casi en su totalidad urbana, a una altitud de 1044 msnm, es cabecera de un arroyo



tributario del Río Ídolos. Aflora en una depresión formada por la ignimbrita El Castillo. Su caudal abastece en forma constante durante todo el año a una parte de la comunidad de El Lencero.

El manantial La Aurora (C), se localiza en los alrededores del poblado La Tinaja, a una altitud de 970 msnm. Aflora en una depresión sobre la margen derecha del cauce de un río intermitente. En este punto la ignimbrita presenta innumerables fallas y fracturas de hasta 8 cm, éstas se encuentran rellenas de harina de falla. Su caudal abastece en forma constante durante todo el año a la comunidad de La Aurora.

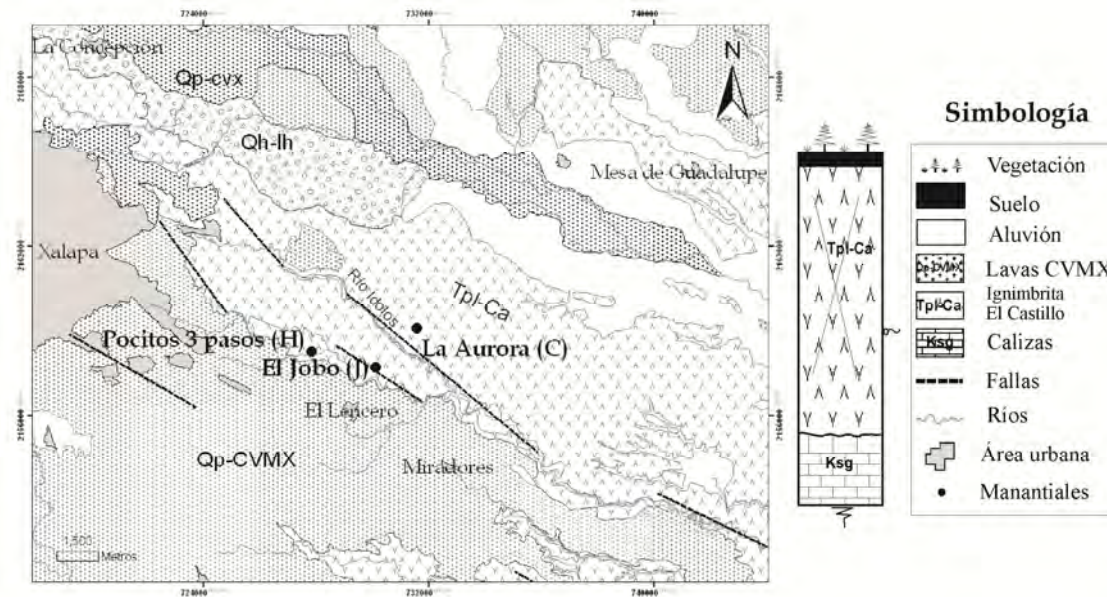


Figura 3.8 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en la ignimbrita El Castillo Pocitos 3 Pasos (H), La Aurora (C) y El Jobo (J). El manantial El Jobo (J) aflora en la parte no consolidada de la ignimbrita El Castillo, mientras que el Pocitos 3 Pasos y La Aurora, emergen en las fracturas de esta unidad. Esquema representativo de la columna estratigráfica en la zona de los manantiales.

3.1.5 Descripción de los manantiales que afloran en la Roca fracturada, Basaltos Chiconquiaco.

Los basaltos Chiconquiaco es la unidad considerada como la más antigua en la zona de estudio, está formada por extensos derrames de roca basáltica emplazados a partir de fisuras. Se distribuyen en la parte norte y noreste del área, en esta zona la ignimbrita El Castillo cubre



completamente a los basaltos Chiconquiaco, los cuales se observan expuestos en los acantilados. En la figura 3.9 se presenta el mapa geológico y un esquema de la columna estratigráfica de la zona.

En estos basaltos afloran 3 manantiales: San Antonio (G), Los Chorros (S) y Rancho Nuevo (E), pertenecen a la subcuenca del Río Ídolos (Figura 1.2). De acuerdo a su temperatura que oscila entre los 21 y 24°C se consideran no termales.

El manantial San Antonio (G) se localiza en los alrededores del poblado Corral Falso, a una altura de 413 msnm, en la parte media de la zona. Se ubica sobre la margen izquierda del cauce del río Ídolos al que se incorpora su caudal, drena en la roca fracturada de una colada de lava proveniente del CVMX, esta colada se encuentra en el fondo de un acantilado y rellenó el cauce del río, a los lados de este flujo de lava se observa el contacto con la ignimbrita El Castillo. Su caudal abastece en forma constante durante todo el año, a una parte de la comunidad de Xoltepec.

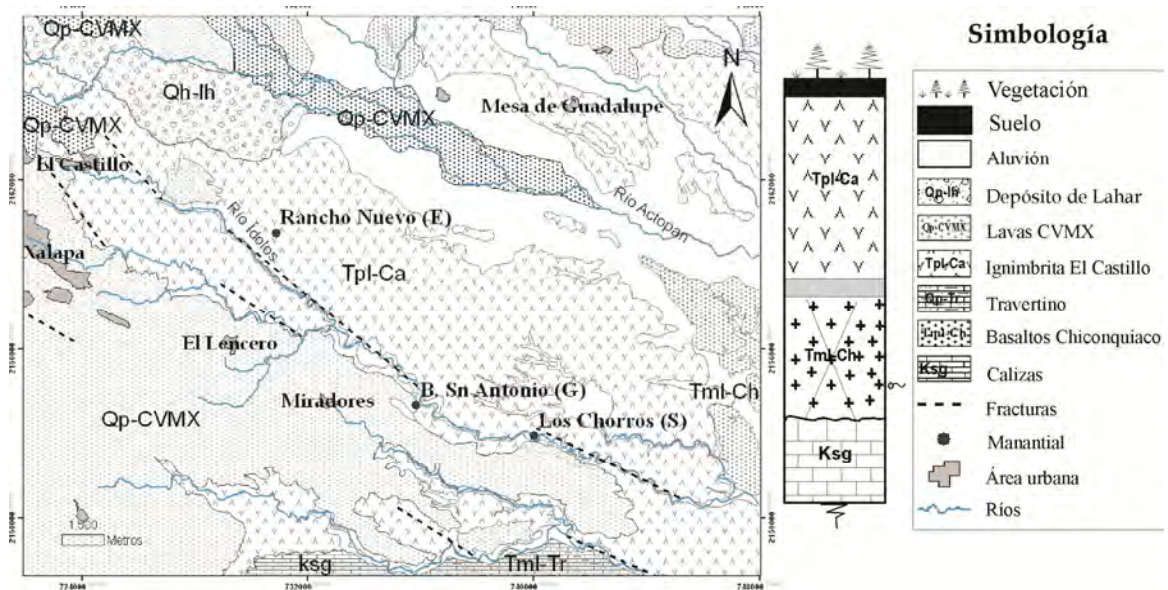


Figura 3.9 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en la Roca Fracturada: San Antonio (G), Los Chorros (S) y Rancho Nuevo (E), los manantiales Los Chorros y Rancho Nuevo afloran en la roca fracturada conocida como Basaltos Chiconquiaco, el manantial San Antonio aflora en una colada de lava proveniente del CVMX. La columna estratigráfica es esquemática y no tiene escala.



Los manantiales Los Chorros (S) y Rancho Nuevo (E), afloran en los Basaltos Chiconquiaco, los cuales se observan en afloramientos masivos con innumerables fracturas, a través de estas fracturas emergen los manantiales (Figura 3.10). El manantial Los Chorros (S) se localiza cerca del poblado Xoltepec, a una altitud de 379 msnm, en la parte baja de la zona. Aflora en un acantilado sobre la margen izquierda del río Ídolos. Su caudal abastece en forma irregular a otra parte de la comunidad de Xoltepec.

El manantial Rancho Nuevo (E), se localiza en el poblado que lleva el mismo nombre, a una altitud de 1034 msnm, en la parte alta de la zona. Aflora en las fracturas de un afloramiento de los Basaltos Chiconquiaco, sobre la margen izquierda del cauce de un arroyo intermitente. Su caudal abastece en forma irregular a la población de Rancho Nuevo.



Figura 3.10 Manantial Los Chorros, aflora en una colada de los basaltos Chiconquiaco, a) basaltos fracturados y afloramiento del manantial, b) panorámica de la zona, se observan las mesetas de la ignimbrita, c) zona de contacto de la ignimbrita El Castillo con los Basaltos Chiconquiaco.



3.1.6 Descripción de los manantiales que afloran en la zona de contacto ignimbrita El Castillo-Caliza

Debido a la extensa distribución de la Ignimbrita El Castillo, sus relaciones estratigráficas son muy variadas. Los depósitos de ignimbrita se observan en forma de mesetas, las cuales están separadas por depresiones que generan desniveles de 100 a 200 m y forman valles en forma de U. Los escarpes están alineados en dirección NW - SE con pendientes mayores a 60°.

Los valles están rellenos de depósitos aluviales, producto de la acumulación del material erosionado de las sierras, los cuales están constituidos por material areno-arcilloso con un bajo porcentaje de cantos rodados. Se encuentran distribuidos a lo largo de los cauces de los ríos principales.

En esta zona de contacto afloran 2 manantiales: Carrizal (Y) y El Hormigo (A), la caliza actúa como roca sello o capa impermeable y el agua fluye a través de la ignimbrita. En la figura 3.11 se presenta el mapa geológico y un esquema de la columna estratigráfica. Pertenecen a la cuenca del Río Actopan. Se localizan en la parte media de la zona de estudio, de acuerdo a su temperatura promedio de 24° y 26°C respectivamente se consideran no termales.

El manantial Carrizal (Y) se localiza en los alrededores del poblado Cerro Gordo a una altura de 484 msnm, aflora en el fondo de un acantilado en el cauce de un arroyo intermitente tributario del Río Actopan. En este manantial la caliza funciona como roca sello, está controlado por las relaciones del límite de la zona saturada y la superficie del terreno. Su caudal abastece en forma constante durante todo el año a la comunidad de Emiliano Zapata.

El manantial El Hormigo (A), se localiza en las cercanías del poblado Cerro Gordo a una altura de 392 msnm, aflora en forma de escurrimiento en el escarpe de un acantilado sobre la margen izquierda del Río El Encanto, al cual se incorpora su caudal. La ocurrencia de este manantial se origina en la intercepción del nivel freático con el acantilado; su caudal abastece en forma constante durante todo el año a la comunidad de Plan del Río.

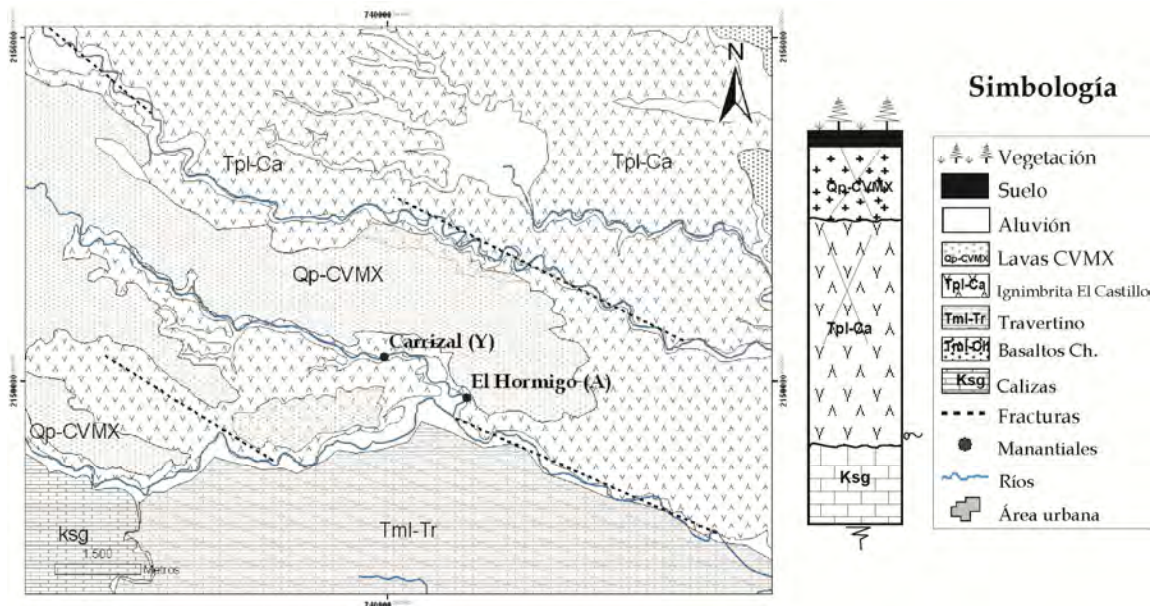


Figura 3.11 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el contacto de la ignimbrita El Castillo y el depósito de travertino: Carrizal (Y) y El Hormigo (A). La columna estratigráfica es esquemática.

3.1.7 Descripción de los manantiales que afloran en el contacto Travertino-Basaltos Chiconquiaco.

Los basaltos Chiconquiaco están distribuidos en la zona noreste del área de estudio, en esta región se observan afloramientos masivos de basalto en los acantilados. En este punto el depósito de travertino sobreyace en contacto discordante a los basaltos Chiconquiaco (Figura 3.12). En esta zona de contacto se sitúan los manantiales El Encanto (F) y Buena vista (U), pertenecen a la cuenca del Río Actopan. Se localizan en la parte baja de la zona. De acuerdo a su temperatura de 26°C se consideran no termales.



Figura 3.12 Manantiales que afloran en el contacto del depósito de Travertino-Basaltos Chiconquiaco, a) panorámica de la zona, se observa en la cima el depósito de Travertino, b) zona donde aflora el manantial El Encanto (F), y c) se observa la zona de contacto, el depósito de Travertino sobreyace a los Basaltos Chiconquiaco.

En la figura 3.13 se presenta el mapa geológico y un esquema de la columna estratigráfica. El manantial El Encanto (F) se localiza en los alrededores del poblado Plan del Río a una altura de 391 msnm, sobre la margen derecha del río conocido con el nombre de Plan del Río. Aflora en el escarpe de un acantilado, en la zona de contacto discordante entre el travertino y los basaltos Chiconquiaco, se ubica en el área de una falla a escala local. Su caudal abastece en forma constante durante todo el año a la población de Plan del Río. El manantial Buena Vista (U) se localiza en los alrededores del poblado Buena Vista a 131 msnm, sobre la margen derecha del Río Actopan, su caudal se incorpora a este río. Aflora en la zona de contacto entre un flujo de lava de los basaltos Chiconquiaco y el depósito de Travertino. Su caudal abastece en forma constante durante todo el año a la población de Buena Vista.

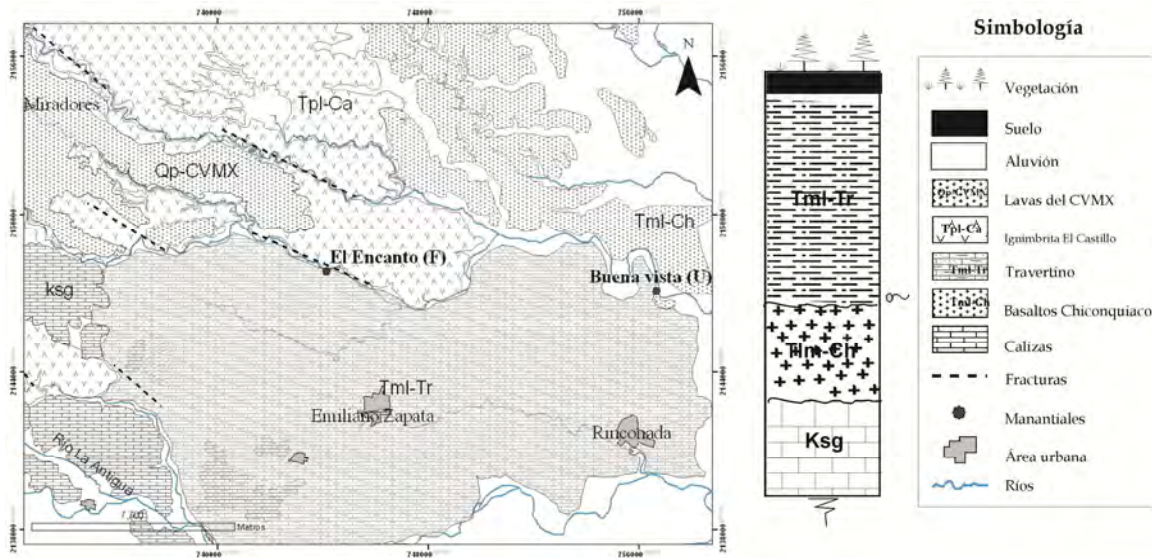


Figura 3.13 Mapa geológico y localización de los manantiales que afloran en el contacto del Travertino y los Basaltos Chiconquiaco: El Encanto (F) y Buena vista (U). La columna estratigráfica es esquemática.

3.1.8 Descripción de los manantiales que afloran en el depósito de Travertino

Los travertinos son depósitos calcáreos de ambiente continental. Se distribuyen al sur del área de estudio en una amplia extensión, en los alrededores del poblado de Cerro Gordo. Consiste de depósitos con estratificación horizontal a masiva. Contiene fósiles que reflejan un ambiente netamente continental que lo asocia con la existencia de una cuenca lacustre; su espesor es de aproximadamente 300 m. En algunas zonas está cubierto discordantemente por la ignimbrita El Castillo, en otras zonas, se observa un depósito retrabajado, producto de alteración hidrotermal. Su contacto inferior no se observa en campo; sin embargo, se infiere que estos depósitos presentan relaciones de contacto transicional con las calizas y probablemente intercalados en estas unidades, existan depósitos de alguna unidad evaporítica. (Figura 3.14).



Figura 3.14 a) Panorámica de una zona donde se explota un depósito de Travertino, b) depósito de material reabajado que corona al travertino, c) Afloramiento del manantial Pocitos Cumbre (L), que aflora en el depósito reabajado y el Travertino.

En esta unidad se ubican los manantiales: Palo Gacho (N), Pocitos Cumbre (L), y Mizapan (M), hidrográficamente pertenecen de la cuenca del Río Actopan. Se localizan en la parte baja de la zona, en la figura 3.15 se presenta el mapa geológico y la columna estratigráfica de la zona.

Estos manantiales afloran entre el depósito reabajado y el travertino, el agua circula a través del depósito reabajado, el travertino funciona como roca semipermeable. De acuerdo a su temperatura de 26°C y 31°C se consideran no termales. El manantial Palo Gacho (N), se localiza en el poblado Palo Gacho, sobre el costado izquierdo de la Carretera Federal #140 (Xalapa-Veracruz), a una altura de 342 msnm. Aflora en una depresión formada por el cauce de un arroyo intermitente. Su caudal abastece de forma irregular a la comunidad de Palo Gacho. El manantial Pocitos Cumbre (L) se ubica sobre el costado derecho de la Carretera



Federal #140 (Xalapa-Veracruz) a una altura de 365 msnm, es cabecera de un arroyo tributario del río que se conoce con el nombre de Plan del Río. Su caudal se utiliza para un balneario recreativo, otra parte abastece en forma constante durante todo el año a la comunidad de Plan del Río. El manantial Mizapan (M) se localiza en los alrededores del poblado Emiliano Zapata a una altura de 380 msnm, sobre la margen izquierda de un arroyo intermitente, en época de estiaje funciona como cabecera del mismo arroyo. Su caudal abastece de manera irregular a las localidades de Rinconada, Palo Gacho, El Aguaje y Buena Vista.

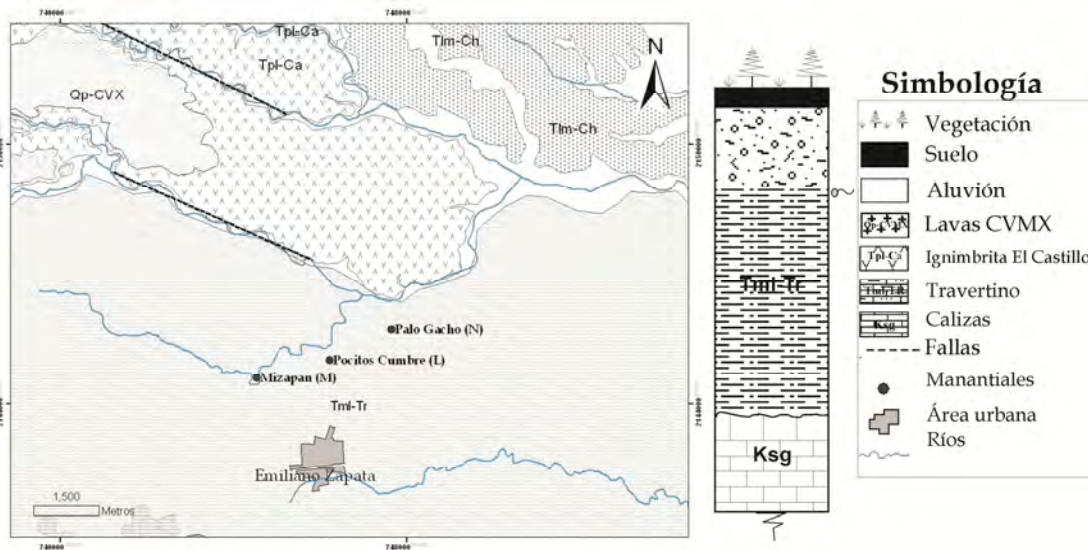


Figura 3.15 Mapa geol3gico y localizaci3n de los manantiales que afloran en el dep3sito de Travertino: Palo Gacho (N), Pocitos Cumbre (L) y Mizapan (M). Corona a este dep3sito un paquete de material retrabajado, se infiere que 3ste se asocia con alteraci3n hidrotermal. La columna estratigr3fica es esquem3tica.

3.1.9 Descripci3n de los manantiales que afloran en el contacto del dep3sito de Travertino-Calizas.

Las evidencias de campo indican que entre estas dos unidades existe un cambio transicional entre un ambiente marino y uno continental, que es caracter3stico de un ambiente costero. Con base en esto se infiere que se desarrollaron cuencas evapor3ticas, se deduce que



estos depósitos se encuentran intercalados en la zona de contacto de estas unidades, ya que no existe un afloramiento visible en la zona. (Figura 3.16). El agua circula a través de la zona de contacto de estas dos unidades, la diferencia de permeabilidad entre ambas da origen al manantial. En la figura 3.17 se presenta el mapa geológico y la columna estratigráfica en esta zona, se muestra la relación existente entre las calizas y el travertino.

En esta zona de contacto descarga el manantial Balneario Carrizal (T), el cual se localiza en los alrededores del poblado Emiliano Zapata a una altura de 212 msnm, sobre la margen izquierda del Río los Pescados. Aflora en la formación de un pequeño valle de fácil acceso, en el contacto discordante entre el travertino y las calizas. De acuerdo a su temperatura de 39.5°C se considera termal, su caudal se utiliza como un centro de recreación.

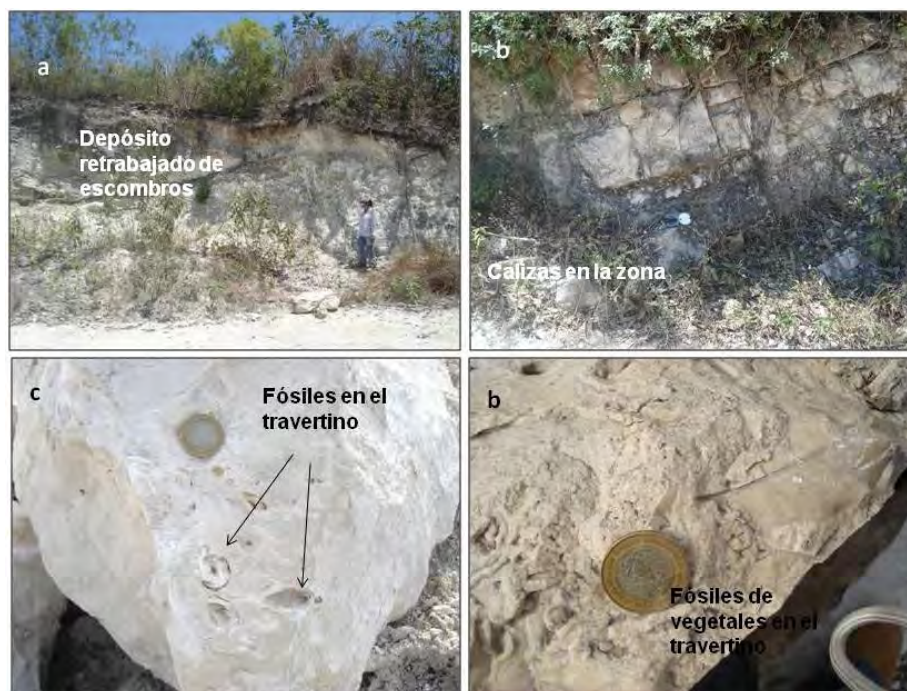


Figura 3.16 Zona donde se localiza el manantial Balneario Carrizal, a) Depósito retrabajado de escombros que corona al travertino, b) calizas que se observan en el área del manantial, c) fósiles de moluscos en el travertino, b) fósiles de vegetales en el travertino.

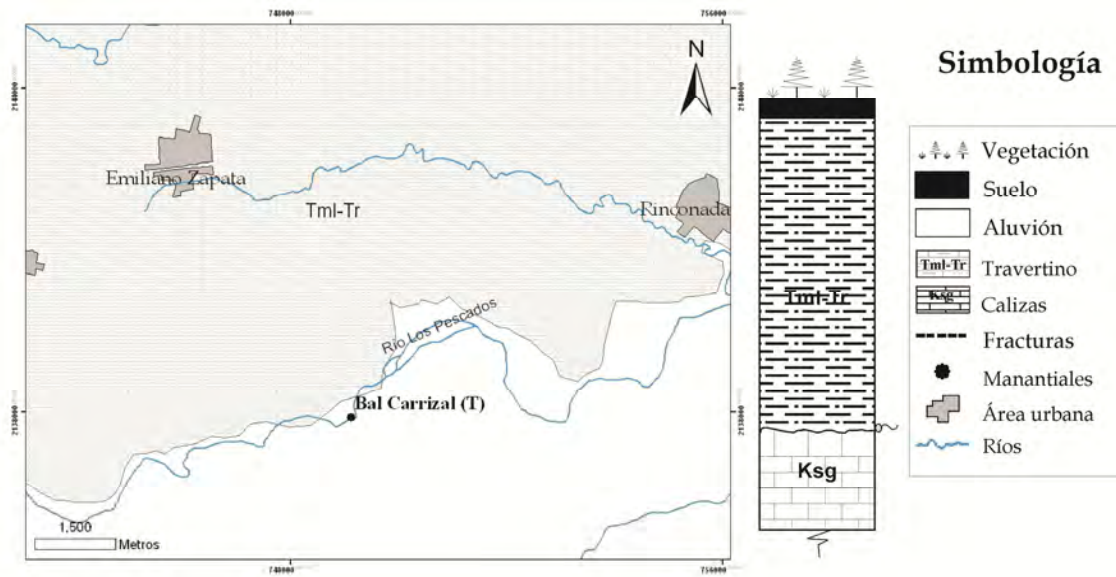


Figura 3.17 Mapa geológico y localización del manantial que aflora en el contacto del depósito de Travertino y las Calizas: Balneario Carrizal (T). Este manantial es considerado termal por presentar una temperatura de 39.5°C. La columna estratigráfica es esquemática.

En la tabla 3.1 se muestran los datos de localización, temperatura y la clasificación realizada de acuerdo al entorno geológico. El nombre de cada uno de ellos fue asignado conforme se les conoce en el poblado donde se ubican.



Tabla 3.1 Datos de localización de los manantiales y clasificación de acuerdo a las características de relaciones litología-estructura-terreno de los afloramientos.

NOMBRE	Id	X	Y	Altitud msnm	TEMP.°C	CONDICION
LAVAS DEL CAMPO VOLCANICO XALAPA						
El Pomo	I	722564	2154971	1150	20.5	Cambio de permeabilidad
Pata de Cabra	O	722587	2154938	1147	19	Cambio de permeabilidad
El Lencero	R	729106	2156102	1034	20	Cambio de permeabilidad
Agua Santa	P	728925	2154697	1034	19.5	Cambio de permeabilidad
Paso grande	Z	728556	2155084	1024	20	Cambio de permeabilidad
Vaquerías 1	X	729045	2154060	980	19.5	Cambio de permeabilidad
Vaquerías 2	B	729223	2153934	962	19	Cambio de permeabilidad
CONTACTO LAVA-IGNIMBRITA						
El Castillo	W	723403	2162534	1185	20	Cambio de permeabilidad
IGNIMBRITA						
Pocitos 3 pasos	H	727854	2158374	1044	19.5	Fracturas
La Aurora	C	731563	2159188	970	22	Fracturas
El Jobo	J	730128	2157830	960	20	Cambio de permeabilidad
CONTACTO IGNIMBRITA-AVALANCHA						
Loma de Rogel	K	730780	2163290	820	20.5	Cambio de permeabilidad
ROCA FRACTURADA						
Rancho Nuevo	E	730878	2160247	1034	21.5	Fracturas
B. Sn Antonio	G	735834	2154147	413	23	Fracturas
Los Chorros	S	740005	2153059	379	24	Fracturas
CONTACTO IGNIMBRITA-CALIZAS						
Carrizal	Y	739946	2150547	484	24	Cambio de permeabilidad
El Hormigo	A	741381	2149845	392	26	Cambio de permeabilidad
CONTACTO TRAVERTINO - BASALTOS CHICONQUIACO						
El Encanto	F	744120	2147956	391	26	Cambio de permeabilidad
Buena Vista	U	756661	2147215	131	26	Cambio de permeabilidad
TRAVERTINO						
Mizapan	M	744540	2144735	390	31	Cambio de permeabilidad
Pocitos Cumbre	L	746216	2145147	365	31	Cambio de permeabilidad
Palo Gacho	N	747649	2145839	342	26	Cambio de permeabilidad
CONTACTO TRAVERTINO-CALIZA						
Bal. Carrizal	T	749114	2138018	212	39.5	Cambio de permeabilidad



3.2 Movimiento del agua subterránea

El objetivo de esta investigación es aportar fundamentos para describir el funcionamiento hidrodinámico del sistema de manantiales, descritos con anterioridad. Para lograrlo se emplearon técnicas geológicas como el reconocimiento del entorno en el cual afloran. Se realizó la descripción estratigráfica de cada afloramiento y se relacionó con la geología superficial, a escala regional se hizo una estimación de espesores de las principales unidades hidroestratigráficas.

Debido a que no se tiene registro de niveles estáticos en piezómetros o pozos para poder generar una superficie potenciométrica y describir con más detalle el funcionamiento hidrodinámico local circundante en cada manantial, se generó un mapa regional de curvas isopiezas y perfiles de flujo en el cual se intenta representar el flujo del agua subterránea. Debido a la complejidad de la geología, la representación es solo una simplificación de la realidad. La figura 3.18 esquematiza el flujo preferencial del agua, el cual es aproximado a la topografía. Para realizar este mapa se consideró la altitud medida en cada manantial, con GPS manual aun con sus aproximaciones, las altitudes de los manantiales van de los 1185 a los 130 msnm, bajo la hipótesis de que el nivel estático en un manantial representa la intersección con la superficie topográfica, por lo tanto, se asume que el agua subterránea se mueve de los puntos en los que tiene más energía hacia aquellos en los que tiene menor energía, conocido como potencial hidráulico.

De forma natural los manantiales deberían estar recargando a los ríos, sin embargo, es probable que debido a la topografía de la zona, algunos manantiales se recarguen parcialmente por ríos perennes cercanos, ya que poseen un potencial menor. Existen otros, que son totalmente independientes y se recargan localmente, condicionados por la geología, geomorfología y climatología de la zona, que en conjunto conforman su área de recarga.

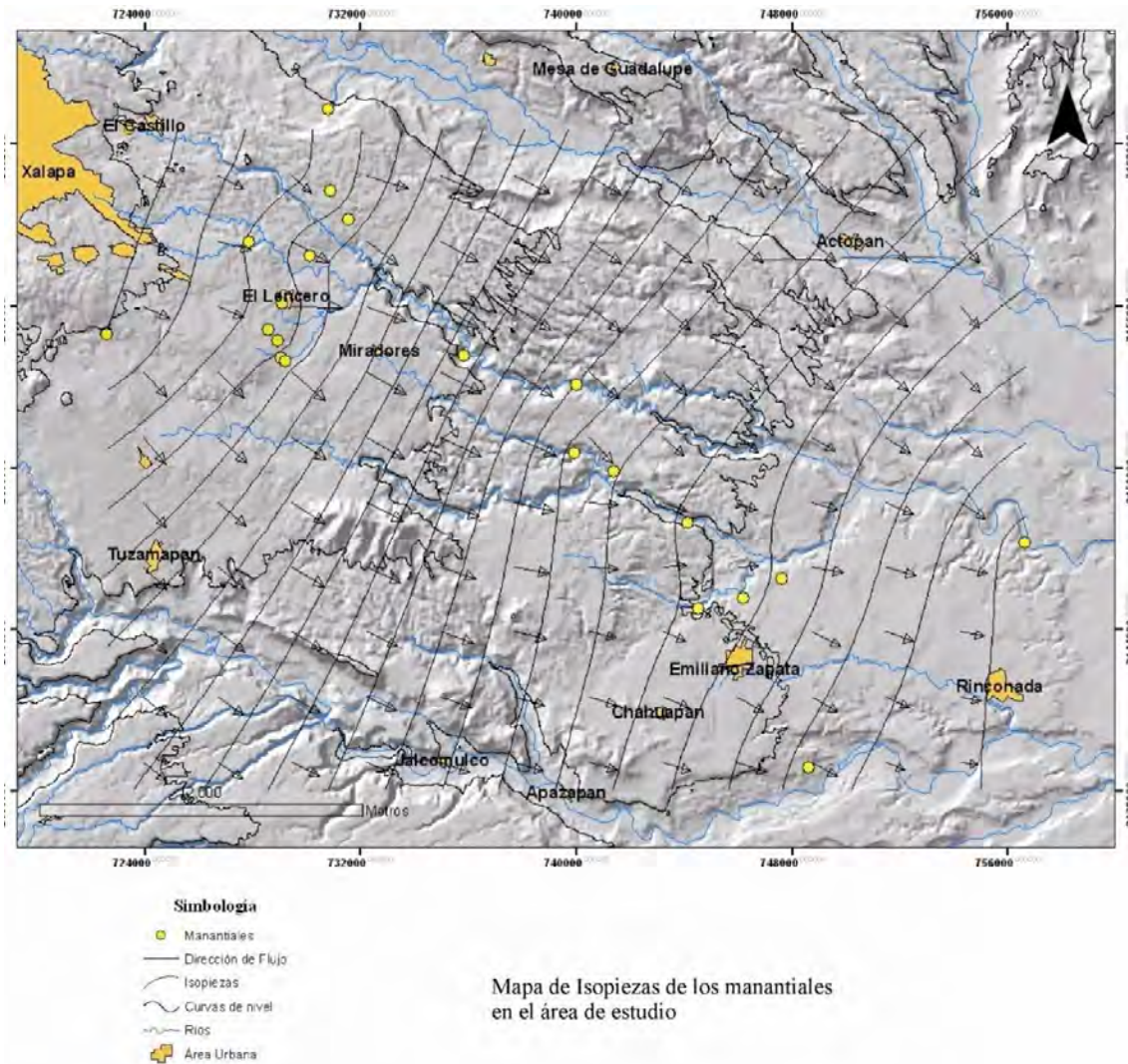


Figura 3.18 Mapa regional de curvas isopiezas que esquematiza el flujo preferencial del agua subterránea. Se aprecia una dirección de flujo de NW a SE.

En algunos puntos los ríos se encuentran seccionando a las unidades litológicas, con profundidades desde algunas decenas de metros hasta cientos de metros, lo cual genera una topografía abrupta, donde es común encontrar manantiales o lloraderos que en suma son captados y conducidos a las comunidades y utilizados para consumo humano.

La relación con las condiciones climáticas como se verá más adelante, en algunos casos resulta directa, esto se fundamenta en los comentarios expresados por la gente



encargada de supervisar y suministrar el agua a las comunidades, relacionados con la variación significativa del caudal en las diferentes épocas del año.

El análisis geológico no proporcionó un conocimiento pleno del comportamiento dinámico de los manantiales, por lo tanto, se consideró necesario emplear herramientas hidrogeoquímicas, cuya interpretación permitirá tener una idea más clara del tránsito y descarga del agua, así como del comportamiento del flujo en el subsuelo y su interacción con el medio.

3.3 Hidrogeoquímica

El agua de lluvia es la fuente de recarga a los acuíferos, una vez que se inicia el proceso de infiltración a través del suelo, el agua adquiere una firma química característica del medio que será intrínseca del acuífero. Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale al exterior en un río ó manantial, pueden transcurrir días o miles de años, el recorrido puede ser de unos metros o de varios kilómetros, por lo tanto, la evolución química del agua, depende de los minerales con los que entre en contacto y de su duración. Por lo anterior el agua que circula a una profundidad mayor, suele ser más salina que la que está más próxima a la superficie, debido a la interacción agua-roca.

Existen varios modelos para poder explicar la trayectoria y disolución de los minerales debido a la interacción con el agua. Los cuales han sido de gran utilidad para entender las características fisicoquímicas del agua. A continuación se presenta algunos de estos modelos y posteriormente la discusión de cada uno de los parámetros que ayudan a entender el sistema en estudio.

El modelo hidrogeoquímico de Tóth, (1962), describe bajo ciertas condiciones ideales, la evolución química de algunos elementos mayores disueltos en el agua subterránea, los cuales ayudan a identificar los diferentes flujos locales, intermedios y regionales que pudieran existir en un sistema determinado. El agua subterránea es un agente geológico, las dos causas fundamentales para el papel activo del agua subterránea en la naturaleza son: su capacidad para interactuar con el medio ambiente y la distribución espacial del flujo. Ambas tienen lugar



simultáneamente a todas las escalas de espacio y tiempo, aunque con distintas intensidades. El flujo subterráneo tiene lugar desde la superficie hasta grandes profundidades, y desde escalas de un día hasta tiempos geológicos. El número y la diversidad de los fenómenos naturales que se generan mediante flujo subterráneo son prácticamente ilimitados, ya que los tipos básicos se pueden modificar por una o varias de las componentes del medio hidrogeológico: topografía, geología y clima (temperatura). (Tóth, 2000).

De acuerdo al contenido iónico, se clasifican en bicarbonatadas, sulfatadas y cloruradas. (Cherbotarev, 1955; Tóth, 1984). Estos fundamentos se utilizan para justificar el comportamiento del sistema de manantiales aquí estudiado. Para realizar la hidrogeoquímica se tomaron muestras de agua de los aprovechamientos para su análisis físico y químico, con los resultados de los análisis se realizó la caracterización hidrogeoquímica convencional y se correlacionan a través de gráficas ilustrativas que fortalecen la idea del funcionamiento hidrodinámico.

3.3.1 Balance de electroneutralidad

La precisión de los análisis químicos se controla mediante diferentes métodos, entre estos la diferencia entre aniones y cationes que no debe exceder de un cierto valor. Según Drever, (1979), el porcentaje máximo aceptable en el balance de electroneutralidad debe ser de 10%.

En la tabla 3.2 se presentan los resultados de los análisis químicos, iones mayores y litio, así como el balance de electroneutralidad. Tomando en cuenta que pueden existir errores, tanto en el análisis, en la toma y conservación de las muestras, se decidió tomar para este trabajo un error de electroneutralidad máximo del 15% y así poder incluir los manantiales Pocitos 3 Pasos con un error del 15.20%, El Encanto con 12.82%, El Jobo con 10.57% y Palo Gacho con 11.35%. El balance se realizó incluyendo al ion NO_3^- ; este anión aunque es considerado como menor por el hecho que, de forma natural se encuentra en concentraciones menores a 1 mg/l, en este caso, en algunos manantiales se encuentra presente y se acerca al límite máximo permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana, en salud ambiental para uso y Consumo Humano (NOM-127-SSA1-1994).

Tabla 3.2: Parámetros físicos medidos en campo, resultados de Iones mayores y menores, balance de electroneutralidad.
Las unidades Conductividad eléctrica (CE $\mu\text{S}/\text{cm}$), temperatura $^{\circ}\text{C}$, las concentraciones en mg/l

NOMBRE	ID	TEMP.	CONDUC.	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	BALANCE %	SDT
Agua Santa	P	19.5	90	6.70	5.7	2.1	6.3	4.11	1.10	45	1.12	1.75	7.79	75.0
Vaquerías 2	B	19.0	95	6.23	6.9	2.5	6.8	3.92	1.95	50	1.96	3.52	2.97	80.5
Pocitos 3 pasos	H	19.5	110	6.80	8.1	2.9	6.9	5.21	1.97	45	1.84	3.46	15.20	90.6
El Jobo	J	20.0	110	6.90	7.8	2.8	7.1	5.24	2.05	45	1.75	3.52	10.57	85.8
Vaquerías 1	X	19.5	95	6.65	6.6	2.5	6.8	3.82	1.98	55	1.97	3.16	-1.83	80.1
Paso grande	Z	20.0	100	7.20	7.7	3.3	4.3	3.90	1.34	55	1.16	1.73	-1.43	77.1
El Pomo	I	20.5	120	6.63	5.8	2.7	9.9	5.77	4.63	55	4.64	10.85	6.36	105.6
Pata de Cabra	O	19.0	120	5.90	5.6	2.4	9.9	5.73	4.17	60	4.49	9.99	-3.10	99.2
La Aurora	C	22.0	125	5.23	12.5	3.3	6.6	2.85	11.65	30	9.77	17.49	-4.72	89.4
El Lencero	R	20.0	145	6.57	8.9	2.7	11.1	6.01	5.93	60	7.86	8.52	2.07	113.2
Loma de Rogel	K	20.5	140	6.40	11.5	3.4	8.6	4.78	5.22	70	4.25	7.61	-3.23	112.1
Sn Antonio	G	23.0	105	7.00	17.2	6.1	8.2	3.94	6.16	70	5.42	3.91	4.54	125.5
Los Chorros	S	24.0	170	7.60	17.4	4.7	9.7	5.41	7.35	90	1.81	3.83	0.78	141.0
Rancho Nuevo	E	21.5	225	6.70	21.0	5.6	13.3	5.30	16.66	100	16.18	15.44	-11.13	182.3
Castillo	W	20.0	255	6.80	20.6	5.4	19.9	7.01	19.86	65	26.20	39.19	-3.59	199.6
Carrizal	Y	24.0	290	7.03	16.9	4.7	33.5	5.02	6.54	145	2.86	0.91	5.59	221.1
El Encanto	F	26.0	435	7.00	22.4	6.1	54.3	5.98	8.00	180	2.97	2.09	12.58	294.4
El Hormigo	A	26.0	455	7.86	33.4	8.1	39.3	10.66	22.50	170	4.11	10.33	10.10	308.4
Buena vista	U	26.0	580	7.10	25.2	6.5	80.8	8.58	23.70	205	32.73	22.14	8.45	413.0
Palo gacho	N	26.0	570	6.70	20.7	5.5	98.9	14.84	22.10	210	67.36	16.91	11.35	467.7
Mizapan	M	31.0	980	7.30	23.5	6.3	123.4	19.90	33.26	245	154.50	7.50	4.06	617.4
Pocitos Cumbre	L	31.0	1050	6.80	26.8	7.4	126.3	21.37	38.54	215	175.47	11.21	5.52	627.7
Bal. Carrizal	T	39.5	2000	7.17	31.1	11.5	228.8	46.72	43.57	240	652.39	0.05	-5.02	1249.1



3.3.2 Temperatura

La temperatura del agua subterránea, en algunos casos, es considerada como trazador natural. Temperaturas cercanas a la media anual del área corresponden a flujos someros y temperaturas mayores a flujos profundos (Edmunds *et al.*, 2002; Van-Lanen y Carrillo-Rivera, 1998). El agua subterránea tiene una temperatura poco variable, y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar. Su temperatura se incrementa debido a la profundidad influenciada por el gradiente geotérmico. (1°C cada 33 m en promedio). Este valor puede aumentar en zonas con tectonismo y volcanismo activo y disminuir en grandes cuencas sedimentarias. (Custodio, 1983).

Las condiciones hidrogeológicas y el régimen de flujo son factores determinantes para la modificación de las características físicas del agua subterránea, una vez extraída la muestra, las condiciones de confinamiento cambian. La temperatura, puede acelerar o desacelerar la disolución de algunos minerales, por lo tanto aumenta o disminuye los valores de la conductividad y como consecuencia aumenta o disminuye la cantidad de sólidos totales disueltos. Por esta razón, se realizaron “in situ” las mediciones de temperatura, conductividad eléctrica, pH y alcalinidad.

En la figura 3.19 se esquematiza el comportamiento de la temperatura medida en los manantiales comparándola con el valor medio anual de la temperatura ambiente. El valor promedio medido en la descarga de los manantiales, es del orden de 23.4 °C, con una variación de 19 a 39.5 °C. Los registros de temperatura menores, son los que corresponden a los manantiales que se localizan al NW de la zona de estudio, en la parte alta, en donde la temperatura media anual es de 19.8°C. (Estación climatológica de Xalapa). Las temperaturas más bajas se registraron en los manantiales Vaquerías 2 y Pata de Cabra con 19°C. En la parte media de la zona, la temperatura media anual es de 23°C, (Estación climatológica Cerro Gordo). Los manantiales presentan temperaturas de 20 a 26°C por lo que no se consideran termales. La temperatura más alta medida en los manantiales se obtuvo en la parte sur-este o parte baja, con temperaturas de 30 a 39.5°C, en esta zona el valor de temperatura media anual es de 25°C



(Estación climatológica Emiliano Zapata). Periodo 1971-2000, (CONAGUA, 2009). En el manantial Balneario Carrizal (T) se midió una temperatura de 39.5 °C, rebasa la temperatura media anual del lugar con 14.5°C motivo por el cual es considerado como termal. Este incremento de temperatura se relaciona con el gradiente geotérmico. En esta figura se observa que la temperatura presenta un incremento con dirección NW a SE, que coincide con el decremento de la altitud conforme se acercan los manantiales a la Planicie Costera del Golfo de México. La evolución de este parámetro, coincide con la dirección de flujo del agua subterránea planteado en la figura 3.18, donde se menciona que la dirección de flujo está condicionada por la topografía y se manifiesta por la presencia de los manantiales, los cuales funcionan como zonas de descarga.

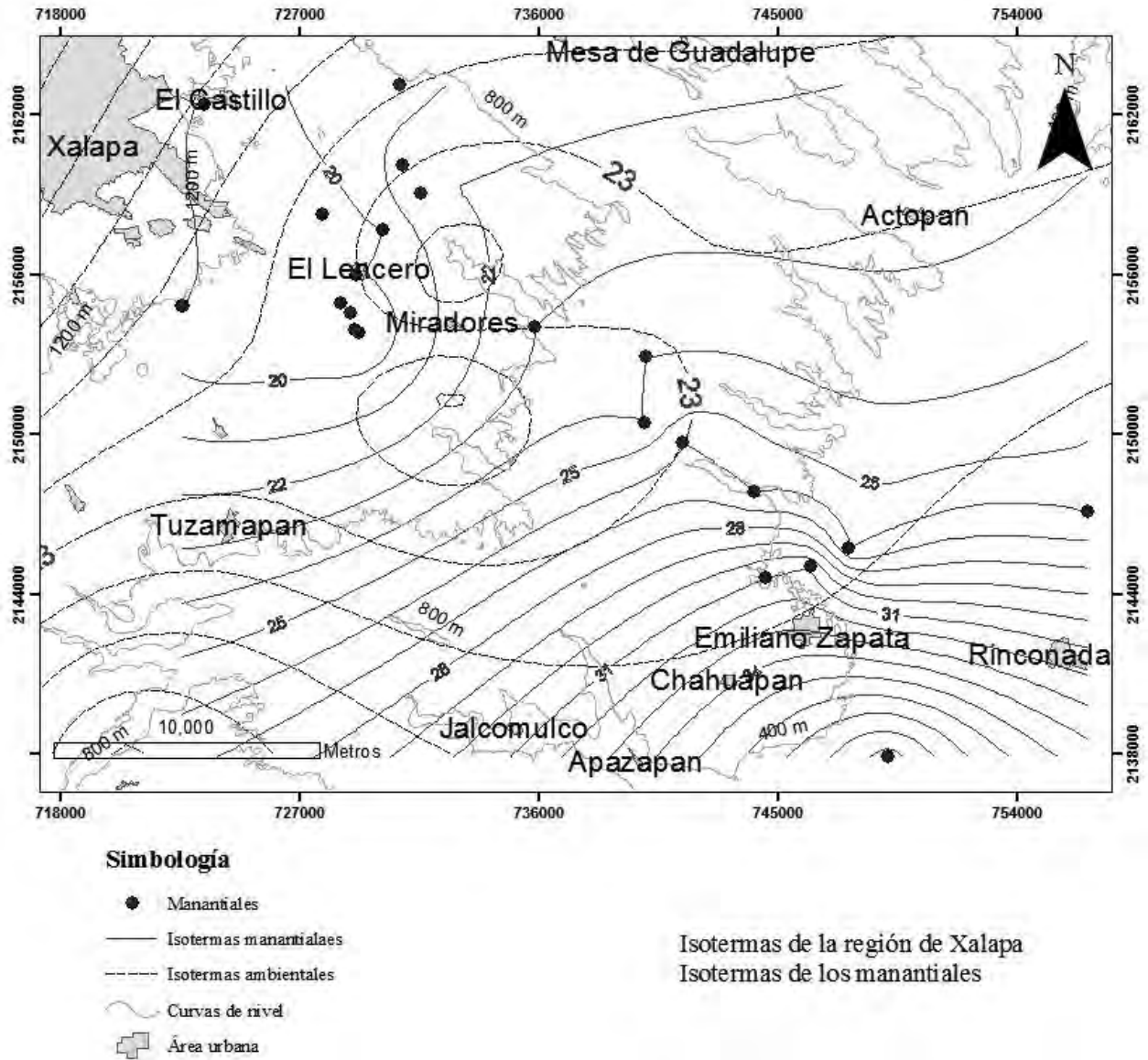


Figura 3.19 Mapa de isolíneas de temperatura medida en los manantiales e isothermas en el área de estudio. Las isolíneas de los manantiales muestran un incremento de la temperatura en dirección NW a SE. En la parte baja el manantial Balneario Carrizal (T) presenta una diferencia de temperatura de 14.5°C con respecto a la temperatura media anual de la zona, por lo que es considerado termal.

3.3.3. Distribución espacial de la Conductividad y sólidos totales disueltos.

Debido al contenido iónico del agua, esta se hace conductora de la electricidad. A medida que la concentración iónica aumenta, aumenta también la conductividad eléctrica. La temperatura



modifica notablemente la conductividad. La concentración iónica está determinada por la presencia de iones o sales minerales disociados en el agua, esta concentración aumenta dependiendo del recorrido del agua y el contacto con el medio geológico. (Custodio, 1983). La estimación de la conductividad permite determinar los Sólidos Disueltos Totales (SDT), éstos a su vez proporcionan una medida primaria de la calidad del agua que permite evaluar y dictaminar riesgos en los diferentes usos de agua.

En la parte alta de la zona los valores de este parámetro van de 90 a 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$, conforme la altitud disminuye los valores de conductividad tienden a un incremento. En la parte media de la zona a partir de los 800 msnm aproximadamente, se observa un incremento en la conductividad, con dirección NW a SE; en este punto los valores de conductividad van de 120 a 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$, hasta llegar a la parte baja de la zona donde los valores van de 200 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. (Figura 3.20). El comportamiento de la conductividad fortalece la idea del recorrido y régimen de flujo probable, con sentido NW a SE.

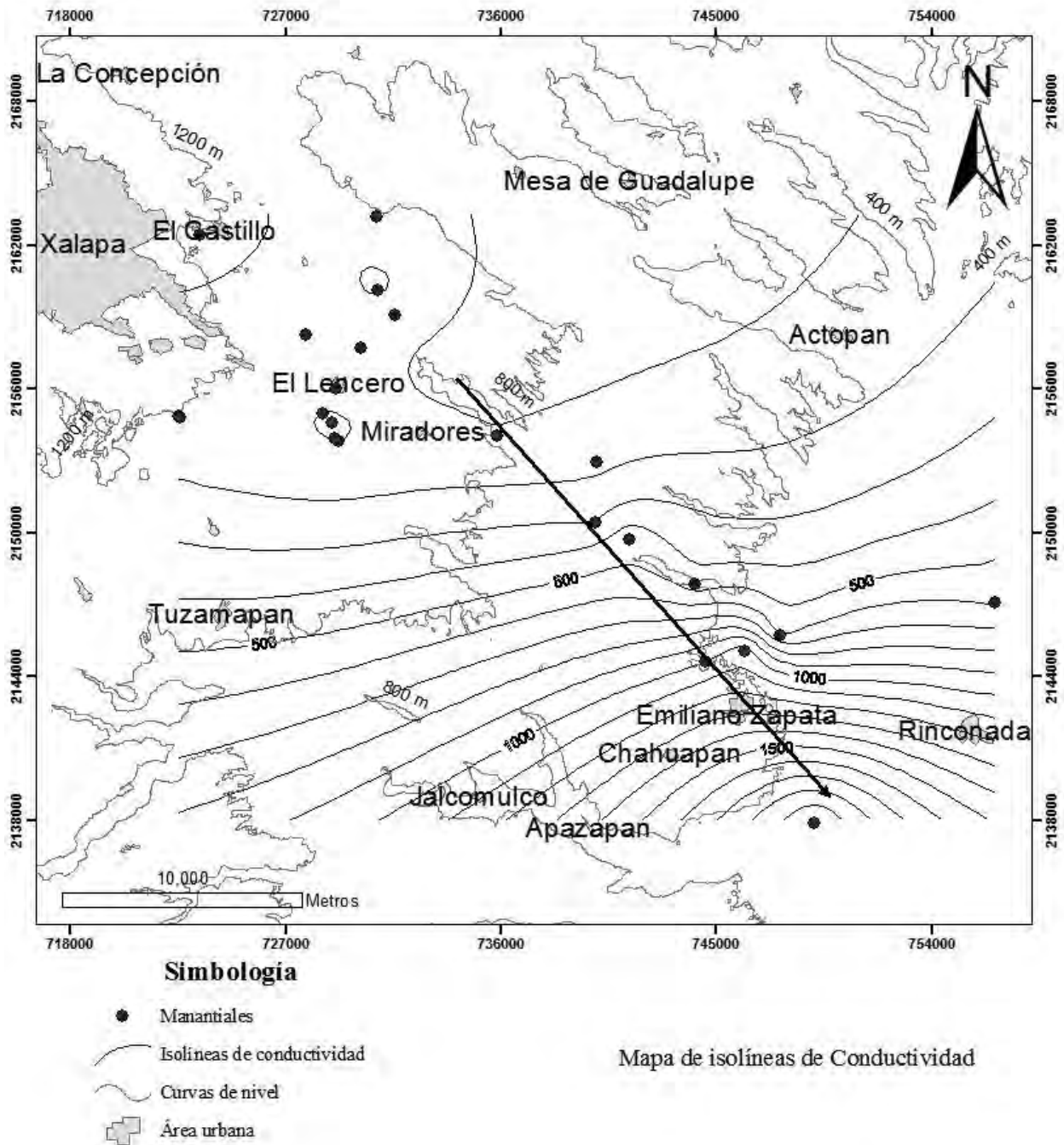


Figura 3.20 Mapa de isólinas de conductividad eléctrica en el área de estudio, a partir de los 800 msnm, se aprecia un incremento de los valores.



3.4 Representación gráfica de la composición del agua.

La representación gráfica permite observar con facilidad el comportamiento y la evolución química y espacial del agua subterránea en un medio conocido a través del tiempo.

3.4.1 Diagramas de Stiff

Los diagramas poligonales de Stiff permiten representar gráficamente la composición química de las muestras de agua subterránea, de acuerdo con la concentración de los iones principales. Con base en la forma de los diagramas de Stiff es posible distinguir en forma visual las características principales del agua subterránea, así como establecer grupos de agua con características hidrogeoquímicas similares. Los resultados hidrogeoquímicos representados en un mapa ofrecen una valiosa información sobre las relaciones existentes entre el quimismo de las aguas y las condiciones geológicas, así como físico-geográficas (Fagundo, 2007).

En la figura 3.21 se muestra la distribución espacial de los diagramas de Stiff sobre un mapa topográfico con curvas de nivel con diferencia de 600 m de altitud. Los diagramas se realizaron con el software desarrollado por el Ing. Joaquín Pérez Valera y está disponible en: <http://hidrología.geofisica.unam.mx>.

El análisis visual de esta figura permite observar que, en la parte alta, se localiza un grupo de manantiales cuyo contenido de sales va de 88 a 133mg/l, a excepción de los manantiales El Castillo (W) y Rancho Nuevo (E) con valores de 228.54 y 221.76 mg/l respectivamente, este incremento en la cantidad de sales se debe a la concentración de cloruro, lo que pudiera ser indicador de alguna componente externa. Este grupo se asocia a agua bicarbonatada cálcica, la cantidad de SDT se relaciona con una descarga rápida, la cual es probable provenga de la componente meteórica; en esta zona los valores de precipitación son de 1400 mm/año, lo cual pudiera estar originando flujos subsuperficiales condicionados por la geomorfología, debido a que en esta zona la topografía es abrupta.



En la parte media la concentración de sales varía de 101 a 152mg/l, a excepción del manantial El Carrizal (Y), su contenido de SDT es de 248mg/l, este incremento de sales pudiera estarse dando debido a una mayor interacción agua-roca con la ignimbrita El Castillo. Las características hidrogeoquímicas del agua de este grupo de manantiales se asocian a agua Bicarbonatada cálcica.

En la parte baja se aprecia que los manantiales contienen una cantidad mayor de SDT, los valores varían de 178 a 651mg/l, en esta zona el manantial Balneario Carrizal (T), tiene un contenido de sales de 1283.18 mg/l, este aumento en la concentración se debe a la presencia de sulfatos. La composición cálcica es probable que se deba a la interacción con el travertino y caliza. Con base en estas características estos manantiales se asocian a agua sulfatada cálcica. De la cota de 700 msnm hasta los 180 msnm aproximadamente a la altura donde se localiza el manantial Balneario Carrizal, se aprecia un incremento en la mineralización.

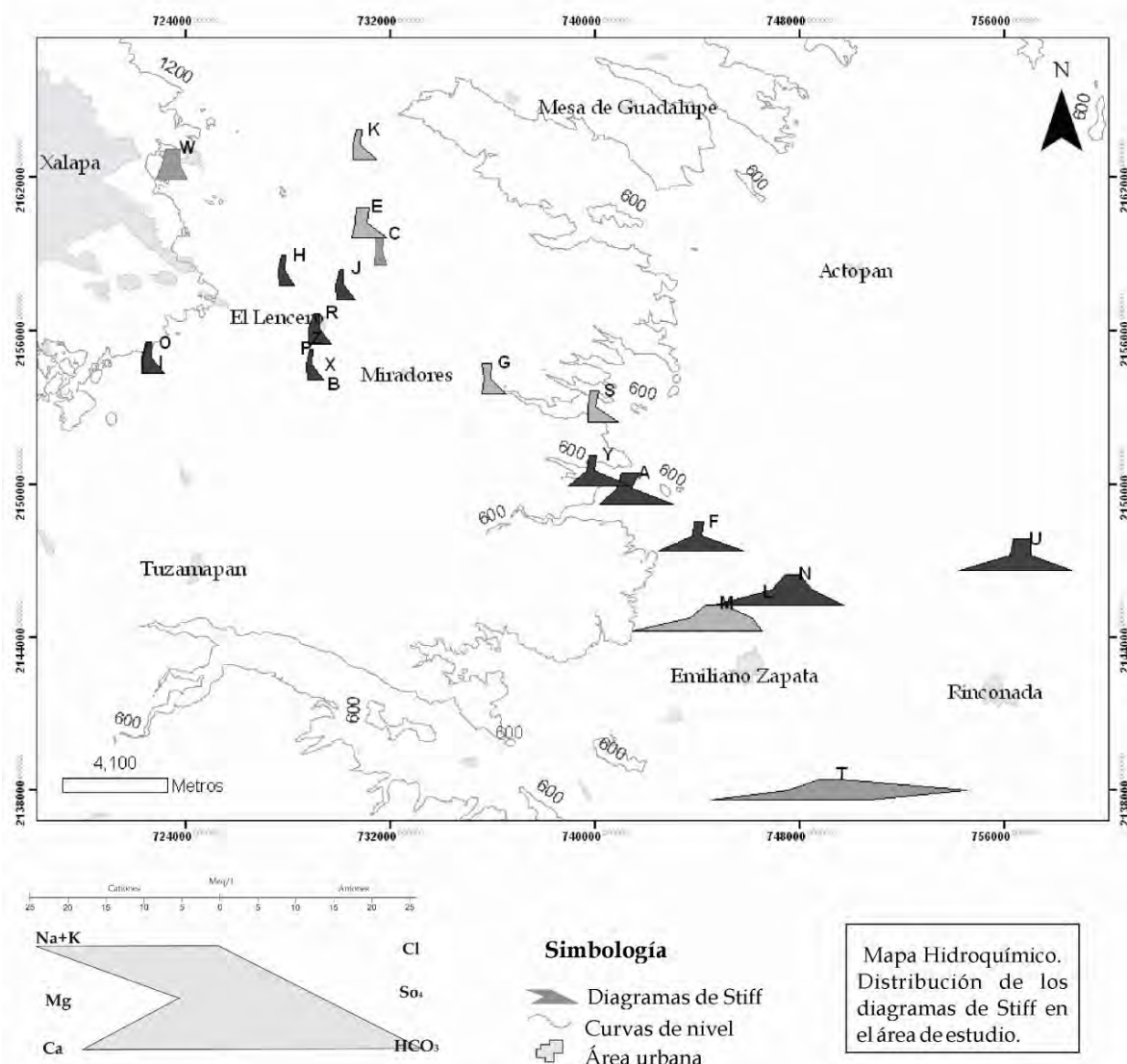


Figura 3.21 Mapa hidroquímico con diagramas de Stiff distribuidos en el área de estudio. Los diagramas ubicados en la parte alta y media, pertenecen a la facies Bicarbonatada cálcica. Los diagramas localizados en la parte baja presentan características de agua Sulfatada cálcica.



3.4.2 Diagrama de Piper

El tipo de familia está condicionada por los procesos de interacción entre el agua subterránea y los diversos materiales por donde circula. Con base en el diagrama de Piper (Figura 3.22), en la tabla 3.3 se presenta la clasificación de las familias, 20 Muestras presentan características de agua bicarbonatada cálcica constituyendo un 97%; dentro de esta facies 2 muestras, El castillo (W) y la Aurora (C), muestran una tendencia a agua clorurada sódica; como se analizó en el mapa de los diagramas de Stiff, estos manantiales se localizan en la parte alta de la zona y se distinguen por su incremento en el contenido de SDT, esta tendencia a clorurada sódica pudiera estar siendo provocada por fuentes externas, posteriormente se analiza esta tendencia. 3 Muestras se agrupan dentro de la facies sulfatada cálcica constituyendo el 3%; los cationes dominantes en las muestras son el calcio y el sodio.

La presencia de agua sulfatada cálcica es indicador de una probable evolución hidrogeoquímica, sin embargo, es necesario utilizar otras herramientas como la correlación y análisis de diferentes elementos para justificar esta hipótesis.

En la gráfica $SO_4^{2-} - Cl^-$ (figura 3.22), se observa que en los manantiales Mizapan (M), Pocitos Cumbre (L) y sobre todo en el Balneario Carrizal (T), existe un incremento en la concentración de sulfatos. Si la presencia de este ión se asocia con la evolución geoquímica natural del agua, se pudiera tratar de un flujo de agua con un recorrido mayor, debido a que, cuando la circulación es mayor, la mineralización tiende a aumentar; si se trata de interacción agua-roca en la zona deberían existir rocas evaporíticas. Para fundamentar esta idea, se realizó una salida de campo para tomar muestras de las rocas aflorantes y posteriormente analizarlas geoquímicamente en el laboratorio de geoquímica del Centro de Geociencias. En las rocas aflorantes no se encontró un componente que proporcione la firma química de agua sulfatada cálcica, (Comunicación Dr. Alejandro Carrillo Chávez), con base en esto, se asume que existen depósitos de rocas evaporíticas intercaladas entre estas unidades que pudieran proporcionar esta características. Sin embargo, se debe corroborar si esta evolución corresponde con agua que ha tenido un mayor recorrido ó se debe a la interacción agua-roca.



Tabla 3.3: Clasificación de las familias de agua, con base en el diagrama de Piper

FAMILIA		Id	MANANTIAL
Bicarbonatada	Cálcica	B	Vaquerías 2
		A	El Hormigo
		H	3 Pasos
		I	El Pomo
		J	El Jobo
		N	Palo Gacho
		O	Pata de Cabra
		R	El Lencdero
		X	Vaquerías 1
		P	Agua Santa
		U	Buena Vista
		Y	Carrizal
		F	El Encanto
		K	Loma de Rogel
		Z	Paso Grande
		W	El Castillo
		E	Rancho Nuevo
S	Los Chorros		
C	La Aurora		
G	San Antonio		
Sulfatada		M	Mizapan
		L	Pocitos Cumbre
	Cálcica	T	Bal. Carrizal

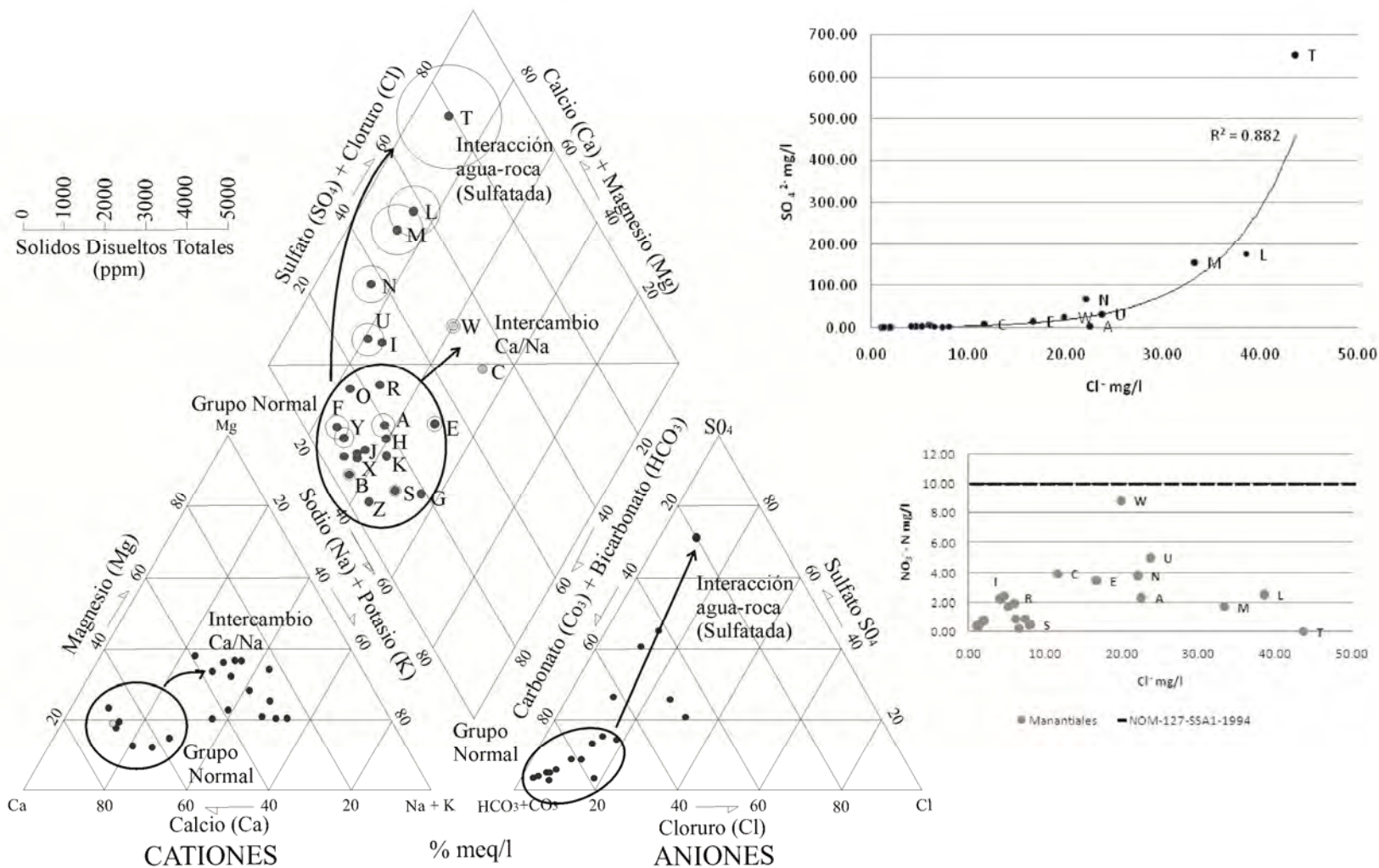


Figura 3.22 El diagrama de Piper muestra la existencia de 2 familias de agua, en el círculo se encuentra un grupo que pertenece a la familia Bicarbonatada cálcica, en la parte superior se aprecia una evolución a agua sulfatada cálcica, que se lleva a cabo por la interacción agua-roca. Las muestras W y C presentan una tendencia a clorurada sódica.



La presencia de los iones Nitrato y Cloruro regularmente son indicadores de contaminación antropogénica. El nitrógeno es un elemento que se encuentra en la mayoría de los fertilizantes, en el abono (estiércol) y en los desechos liberados de los tanques sépticos. Las bacterias naturales del suelo pueden convertir el nitrógeno en nitrato y puede ser transportado por la lluvia o por el agua de riego. El Cloruro se asocia con la presencia de rocas evaporitas en el subsuelo, con el uso de fertilizantes clorurados (como el cloruro de amonio) y con el efecto de la intrusión marina. En la gráfica $NO_3^- - Cl^-$ (figura 3.22), se aprecia que la concentración de $NO_3^- - N$ en algunos manantiales es elevada, como es el caso de los manantiales El Castillo (W) y la Aurora (C). Como se mencionó anteriormente, estos manantiales presentan características de agua Bicarbonatada cálcica y en el diagrama de Piper se observa una tendencia a agua clorurada sódica, lo cual pudiera ser un indicador de contaminación ocasionada por fuentes externas, probablemente influenciados por contaminación antropogénica; en la zona de estos manantiales el uso de suelo es principalmente habitacional, agrícola y ganadería, por lo que en gran parte del territorio en la actualidad se observan pastizales; en el ión Cl^- también se aprecia un incremento, razón por la cual se infiere que se trata de contaminación antropogénica. Los manantiales que se encuentran dentro del círculo, presentan un incremento en la concentración de NO_3^- .

En la figura 3.23 se hace un análisis de la ubicación del manantial Buena Vista (U), cuya concentración de $NO_3^- - N$ es de 5.00 mg/l, el objetivo de este esquema es evidenciar una probable fuente de contaminación antropogénica, ocasionada por agua residual. Esto se deduce con base al análisis realizado en la figura 3.18, en donde se muestra la dirección de flujo que sigue el agua subterránea en la zona, por lo que se especula que el manantial puede estar siendo influenciado por la contaminación antropogénica proveniente de las poblaciones cercanas, ubicadas topográficamente en una zona mas alta que el afloramiento del manantial, en donde seguramente existe una deficiencia en la red de drenaje. Este mismo caso se observó en los manantiales el Castillo (w), Rancho Nuevo (E), la Aurora (C), El Pomo (I), Pata de Cabra (O), el Hormigo (A) y Palo Gacho (N), los cuales se ubican muy cerca de áreas urbanas y afloran en zonas de menor potencial, en estos manantiales tambien hay presencia de nitratos.

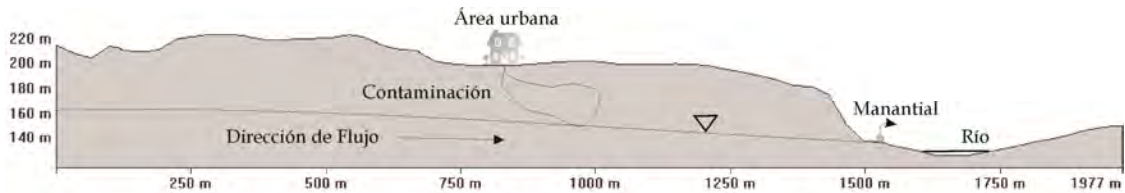


Figura 3.23 Esquema que evidencia una probable fuente de nitratos en los manantiales. La infiltración de agua contaminada puede estar haciendo contacto con la dirección de flujo que sigue el agua que descarga en los manantiales.

En la figura 3.24 se muestra la concentración del ión NO_3^-N encontrada en los manantiales, comparada con la Norma Oficial Mexicana en salud ambiental para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994), el manantial El Castillo (W) tiene un valor de 8.85mg/l, cercano a límite máximo permisible por la citada norma (10 mg/l), el manantial la Aurora (C), y Buena Vista (U) también tienen una concentración un tanto elevada 3.95 y 5.00 mg/l respectivamente. El resto de los manantiales como es el caso de El Pomo, Palo Gacho, Rancho Nuevo y Pocitos Cumbre, muestran un incremento en este ión, como se mencionó anteriormente esta componente se asocia a contaminación antropogénica, provocada por los asentamientos urbanos que se localizan en su alrededor, con base en sus características hidrogeoquímicas se asocian con agua de reciente infiltración, por lo tanto son manantiales cuya recarga es local y en consecuencia presentan una mayor susceptibilidad a la contaminación y al cambio de uso de suelo en su área de recarga.

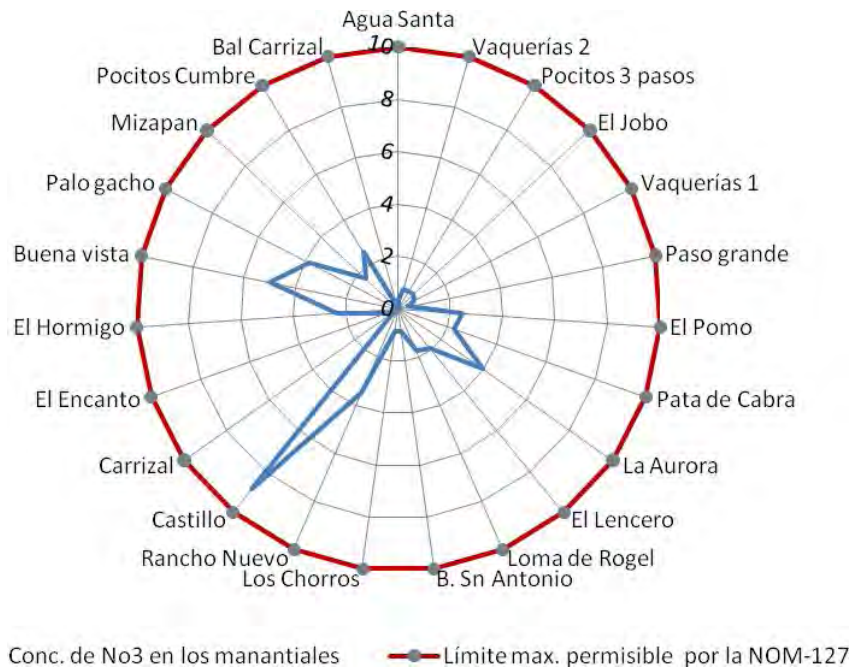


Figura 3.24 Comparación de la concentración de NO_3-N en los manantiales del área de estudio con la Norma Oficial Mexicana, en salud ambiental para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994). El manantial El Castillo se acerca al límite máximo permisible, los manantiales Buena Vista, La Aurora, Palo Gacho, El Pomo y Pocitos Cumbre muestran un incremento en este parámetro.

En la figura 3.25 se muestra la correlación del ión Cl^- con la altitud, para realizar esta gráfica se excluyeron los manantiales que presentan concentraciones de nitratos. En esta gráfica se aprecia que los manantiales localizados en la parte alta y media de la zona presentan concentraciones del ión Cl^- bajas, por lo tanto, la presencia de este ión en estos manantiales no puede asociarse con el agua de lluvia. Las concentraciones de Cl^- reportadas en el estudio realizado por Báez, *et. al.*, (1997) en la parte alta de la zona de estudio, mencionan que para el año 1995 la concentración del ión Cl^- en temporada de lluvia en la zona de Xalapa son de 0.33 mg/l, en la temporada de secas es de 1.24 mg/l. La concentración del ión Cl^- en los manantiales que se ubican en la parte baja de la zona, como es el caso del manantial Mizapan (M) y Balneario Carrizal (T), poseen valores de 33.26 y 43.57 mg/l; estos valores no se pueden relacionar con el agua de lluvia, por lo tanto revelan que el agua que descarga en esta zona ha tenido un recorrido mayor, comparado con los manantiales que



afloran en la parte alta, ó probablemente exista una interacción agua-roca con alguna unidad que este aportando esta componente.

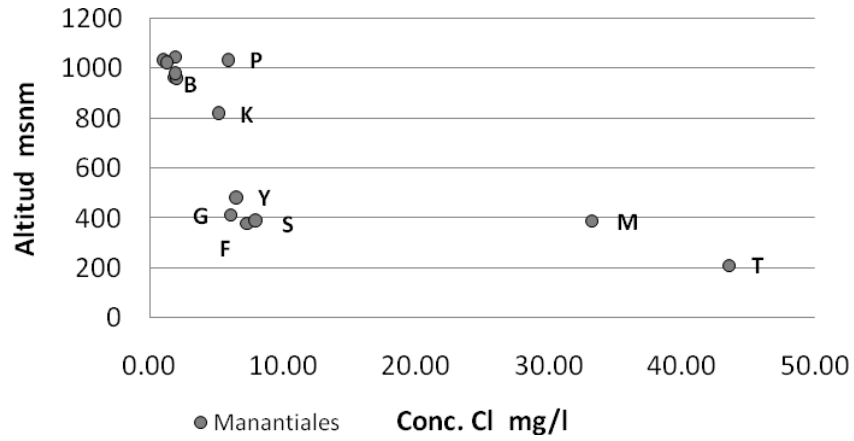


Figura 3.25 Correlación de la concentración del ión Cl^{-} con la altitud de los manantiales, se aprecia que los valores de este ión en la parte alta de la zona no rebasan los 10 mg/l, en la parte baja la concentración de este ión incrementa.



4 Discusión y conclusiones

4.1 Discusión

De acuerdo a la hipótesis y objetivos planteados, la clasificación de los manantiales se efectuó a partir de las relaciones litología-estructura-terreno, así como, en las características químicas del agua. Para fines de interpretación en este estudio, se tomó la división realizada por Gómez y Pereyra, (1997), donde divide la zona en: parte alta, media y baja.

Al ubicar los manantiales en el mapa geológico, se aprecia que algunos, se localizan en las zonas cercanas a las fracturas a escala local. Las condiciones geológicas, geomorfológicas, topográficas, hidrológicas y climáticas, condicionan la recarga y descarga de los manantiales. El análisis realizado en el entorno geológico, no aportó un conocimiento del comportamiento dinámico de los manantiales, por lo tanto, mediante la aplicación de la herramienta geoquímica convencional, se logró integrar una idea del comportamiento del flujo en el subsuelo y su interacción con el medio. Como se explica en la figura 3.17, las isopiezas revelan un patrón de flujo aproximado a la topografía, con una dirección NW a SE. Existen ríos que fluyen en el contacto entre unidades litológicas, estos ríos a su vez, en algunos puntos recargan a unidades de menor potencial, en otros puntos funcionan como zonas de descarga debido a la morfología de la zona. La mayoría de los aprovechamientos afloran en cambios de permeabilidad en la intersección con el nivel freático local y en fracturas de las unidades.

Con la ayuda de las técnicas hidrogeoquímicas utilizadas y con el análisis realizado a los parámetros de temperatura y conductividad, se observa una evolución natural del agua, la cual sigue una dirección NW a SE como la planteada en la hipótesis. Desde el punto de vista de Facies o familias, 20 muestras pertenecen al tipo de agua bicarbonatada cálcica representando un 97%; dentro de esta familia, 2 presentan una tendencia a clorurada sódica. 3 muestras pertenecen a la familia sulfatada cálcica constituyendo el 3%. En la familia completa de los manantiales los cationes dominantes son el calcio y el sodio.

Al relacionar los iones mayores de las muestras y su contenido de sólidos totales con la litología corroborada en el afloramiento de los manantiales, se deduce que la familia



bicarbonatada cálcica toma esta firma química debido a la interacción agua-roca con: el suelo, rocas volcánicas del CVMX, basaltos fracturados e ignimbrita. Los tres manantiales que se localizan en la parte baja presentan una tendencia hacia agua sulfatada cálcica, con un contenido de sólidos totales mayor, lo que indica una mayor interacción agua-roca. Los manantiales Mizapan (M) y Pocitos Cumbre (L), afloran en el depósito de escombros retrabajado que corona al travertino, el manantial Balneario Carrizal considerado como termal, aflora en el contacto del Travertino y las calizas. La firma química de agua sulfatada cálcica de estos tres manantiales se asocia con la interacción agua-roca, se infiere que probablemente existen yesos intercalados entre ambas unidades; sin embargo, como se explica en el apartado 2.2.9, en campo no se aprecia un afloramiento de rocas evaporíticas con la cuales se pueda relacionar esta característica, esto se deduce con base en la firma química que distingue a estos manantiales, cuya interacción del agua con una roca rica en sulfato como son las evaporitas, pudiera estarse llevando a cabo la siguiente reacción:



En la parte alta de la zona, en donde la precipitación media anual es de 1800 – 1200 mm/año y el índice de infiltración es de 36 mm/h., con base en las características hidrogeoquímicas del agua, se deduce que existen manantiales donde la infiltración y circulación del agua es a través del suelo, al contacto con las rocas del CVMX se origina un cambio de permeabilidad, lo que da origen a la descarga del agua en las depresiones formadas por las mismas lavas. Desde el punto de vista de facies o familias hidrogeoquímicas pertenecen a agua de tipo Bicarbonatada cálcica, el contenido de sólidos disueltos totales es 88 a 130 mg/l, el agua de estos aprovechamientos se asocia con agua de circulación local con poca interacción con el medio, esto se debe a la rapidez con la que el agua circula el suelo y en las lavas fracturadas; por lo tanto, mantienen características parecidas al agua de lluvia. Esta característica de recarga local le confiere a los manantiales ubicados en esta zona, una condición vulnerable tanto a la contaminación antropogénica, como al cambio de uso de suelo.



En la parte media de la zona, donde la precipitación media anual es de 1200 –700 mm/año y el índice de infiltración es de 468 mm/h, las características hidrogeoquímicas del agua, indican una interacción con rocas ricas en calcio, en este caso se asume que el agua se infiltra a través de las lavas, llega a la ignimbrita El Castillo y en los cambios de permeabilidad que se suscita en el contacto de las lavas con las unidades subyacentes menos permeables, se originan los manantiales. Estos manantiales se asocian a agua de tipo Bicarbonatada Cálcida, su contenido de sólidos disueltos totales es de 130 a 250 mg/l, un poco mayor a los que se localizan en la parte alta, de lo que se deduce que existe mayor interacción agua-roca. La mayoría se localizan en el fondo de los acantilados, en donde los espesores de las unidades son de aproximadamente 50 a 200 m. Esta característica hace pensar que se trata de flujos un poco más profundos donde se puede estar generando un mayor recorrido del agua, sin embargo, con base en los parámetros físicos y químicos se asocian con características de recargas locales.

En la parte baja del área, los manantiales descargan en el contacto del depósito de material retrabajado y el travertino, estos manantiales presentan una tendencia a agua Sulfatada Cálcida. El contenido de sólidos disueltos totales es de 429 a 650 mg/l, hidrogeoquímicamente se observa una evolución natural del agua en estos manantiales debido a la interacción agua roca. En esta misma zona en el contacto del depósito de travertino y las calizas aflora el manantial Balneario Carrizal (T). Con base en el análisis de las características geológicas, físicas y químicas, se deduce que la infiltración y recorrido del agua, es a través del depósito de travertino, y probablemente interacciona con depósitos evaporíticos que le confieren la firma química de agua sulfatada cálcica. La temperatura del agua de este manantial se relaciona con el gradiente geotérmico, el agua se infiltra a cierta profundidad, por lo tanto, esto va acompañado de un aumento de presión y temperatura, lo cual favorece una mayor interacción con el medio y en consecuencia, una mineralización del agua. Hidrogeoquímicamente este manantial pertenece a la familia Sulfatada Cálcida, se aprecia una tendencia de evolución química natural, la concentración del ión Cl^- puede relacionarse con la interacción de rocas evaporitas en el subsuelo, esta descarga se asocia a características de un flujo intermedio.

Respecto a los nitratos, con base en la Norma Oficial Mexicana, en salud ambiental agua para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994); el manantial que presenta una



mayor concentración de este ión es manantial El Castillo (W), existen otros que presentan de igual manera un incremento, sin embargo, ningún manantial rebasa los límites máximos permisibles; el incremento en la concentración de este ión debe ser tomado en cuenta y monitorear su comportamiento. La presencia de $NO_3^- - N$ en los manantiales se asocia a contaminación antropogénica, debido a su ubicación, ya que, los flujos que descargan en los manantiales pueden estar siendo interceptados por la pluma de contaminantes provenientes de los asentamientos urbanos localizados topográficamente más arriba que el afloramiento, en donde indudablemente existen fugas en las redes de drenaje.

Con base en el análisis geológico y el empleo de herramientas hidrogeoquímicas se comprobó que en el área de estudio los aprovechamientos analizados se asocian con características de flujos locales y el manantial Balneario Carrizal a un flujo intermedio, por lo tanto se desecha la idea de un flujo regional.

Esto se corrobora con un trabajo isotópico realizado paralelamente a esta investigación, por Cortes et. al., (en prensa) cuya zona de estudio abarca desde la costa hasta el Cofre de Perote, en el cual obtuvieron valores isotópicos para lluvia en la región de O^{18} y D, a una altitud de 2400 msnm de -15.27 de O^{18} y -106.3 de D y para una altitud de 140 msnm, valores de -5.73 de O^{18} y -34.3 de D. Los valores de O^{18} y D reportados para los manantiales en la zona de estudio, oscilan entre -7.01 a -8.87 para O^{18} , y -45.1 a -58.3 para D, con base en este trabajo se asume que el agua que descarga en los manantiales es contemporánea.



4.2 Conclusiones

La ocurrencia de los manantiales en la zona es originada por las características geológicas, geomorfológicas, climatológicas e hidrológicas de la zona. El sistema de drenaje se desarrolla bajo un control litológico y estructural, donde fallas y fracturas condicionan un patrón de flujo con dirección NW a SE. En algunos puntos los ríos funcionan como zonas de descarga, mientras que en otros puntos sirven de recarga para otras unidades litológicas que se encuentran en un potencial menor, obedeciendo a la topografía.

En la parte alta de la zona, la mayoría de los manantiales se originan por flujos subsuperficiales y locales, En la parte media se recargan en las lavas fracturadas, llegan a la ignimbrita El Castillo y afloran en los cambios de permeabilidad que ocurre en el contacto con las unidades subyacentes menos permeables. En la parte baja descargan en el travertino y en la zona de contacto entre el travertino y las calizas. La mayoría de los manantiales se asocian con características de flujos locales, por lo tanto se considera que son vulnerables a la contaminación antropogénica y al cambio de uso de suelo en la zona.

Las herramientas hidrogeoquímicas muestran la existencia de dos familias de agua, bicarbonatada cálcica y sulfatada cálcica, las muestras corresponden en su mayoría a la familia Bicarbonatada cálcica con el 97%, dentro de esta familia algunas muestras pertenece a agua de tipo Bicarbonatada-cálcica-sódica, con un contenido de SDT menor a 250 mg/l, en segundo término la familia Sulfatada cálcica con el 3%, el contenido de SDT es de 500 a 1200 mg/l. Dentro de la familia Bicarbonatada cálcica, se encontraron algunas muestras que presentan una tendencia hacia bicarbonatada - sódica, producto de la interacción agua-roca con la ignimbrita. 2 muestras presentan una tendencia hacia clorurada sódica, esta tendencia se relaciona con contaminación antropogénica. 2 muestras presentan una evolución natural del agua, y una muestra se ubica dentro de la facies Sulfatada cálcica. Con la ayuda de las herramientas geológicas e hidrogeoquímicas se comprobó que en el área de estudio solo existen flujos locales e intermedios, por lo que se desecha la idea de un flujo regional.

La concentración del ión NO_3^- , en los manantiales no rebasa el límite máximo permisible para el consumo humano, (NOM-127-SSA1-1994). Sin embargo, presentan una tendencia de incremento en su concentración. La presencia de nitratos en los manantiales, se



asocia a la contaminación antropogénica, ocasionada por la infiltración de agua residual en el área de recarga de los manantiales, a causa de la falta o deficiencia en las redes de drenaje.

No se precisó el área de recarga de los manantiales por carecer de datos de medición de caudales, así como financiamiento para emplear otras técnicas como el uso de isotopos ambientales estables, los cuales permiten establecer el origen y procesos en los que el agua participó. A su vez pueden ayudar a definir la altura topografica donde la recarga se llevo a cabo. De conocer el área de recarga de los manantiales se podría contribuir a preservar el recurso tanto en calidad como en cantidad.



Referencias

- Ariel Construcciones, S.A., (1981).** “Prospección Hidrogeológica en la zona de Jalapa y Coatepec, Edo. de Veracruz”. Contrato No. GZA-81-46-ED
- Báez, A. P., Padilla, H., Cervantes, J., Pereyra, D., Belmont, R., (1997).** Rainwater chemistry at the flanks of the Sierra Madre Oriental, Veracruz, México. *Journal of Geophysical Research*. Vol., 102, No. D19. PAGES 23,329 – 23,336 p.
- Campos-Enríquez J. O. y Garduño-Monroy, V.H.,1987** The shallow structure of Los Humeros and Las Derrumbadas geothermal fields, Mexico *Geothermics* Vol 16. No 5-6 539-554
- Carrasco, N. G., 1993.** Structure, eruptive history and some major hazardous events of Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), México. Tesis Doctoral, Michigan Tehnological University, USA, 182 pt.
- Carrasco, N. G., 1997.** Lava flow growth infered from morfometric parameters: a case study of Citlaltépetl volcano, México, *Geol. Mag.*, 134, 151-162
- Carrasco- Núñez. G. y Rose, W. I., 1995.** Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), Mexico, 8.5-9.0 ka. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 69, 197-215.
- Carrasco-Núñez, G., Díaz-Castellón, R., Siebert, L., Hubbard, B., Sheridan, M. F., Rodríguez, S. R., 2006.** Multiple edifice-collapse events in the Eastern Mexican Volcanic Belt: the role of sloping substrate and implications for hazard assessment. Eds. Tibaldi, A. and Lagmay, A., “The effects of basement structural and stratigraphic heritages on volcano behaviour”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158, 151-176.



- Carrasco-Núñez, G., Siebert, L, Díaz-Castellón, R., Vázquez-Selem, L., Capra, L., 2009.** Evolution and hazards of a long-quiescent compound shield-like volcano: Cofre de Perote, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, in press
- Cherbotarev II (1955).** Metamorphism of neutral wáter in the crust of weathering. *Geochimica et Cosmochimica. Acta* 8:22-48, 137-170, 192-212.
- CNA (2000).** El agua en México, CNA, México, D.F.
- Cortes, et. at.,** Efecto de altitud isotópico en la parte central oriente del estado de Veracruz, México. (en prensa).
- CONAGUA, (2005),** Subdirección. Boletines proporcionados por la Gerencia Regional Golfo Centro de la Comisión Nacional del Agua.
- Custodio, E., y Llamas, M.R., 1983.** Hidrología Subterránea. (2 Tomos). Ediciones Omega, S.A. Barcelona. 2350p.
- Davis, S., de Wiest, R., 1971.** Hidrogeología. Barcelona, Ariel, 1971.
- Demant Alain, 1978.** Características Del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. U.N.A.M. Instituto de Geología, Revista V.2 172-187.
- Domínguez, M. R., Pereyra, D. R., Gómez, R. L., Sosa, U. I., Pérez, S. A., (1999).** “Estimación de las características de infiltración puntual en los diversos suelos de la cuenca del Río Ídolos y su relación con la infiltración Global de dicha cuenca. Clave: 0640P-A CONACyT”. Universidad Veracruzana. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 50pp.
- Edmunds WM, Carrillo-Rivera JJ y A Cardona. 2002.** Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico city. *Journal of Hydrology*, Vol 258, pp 1-24.
- Fagundo, J. R., 2007.** Contribuciones al desarrollo de la Hidrogeoquímica. La Habana, Cuba.
- Ferket, H., S. Ortuño-Arzate, F. Roure, and R. Swennen, 2003.** Lithologic control on matrix porosity in shallow-marine Cretaceous reservoir limestones: A study of the



Peñuela reservoir outcrop analogue (Cordoba Platform, Southeastern Mexico), in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir* 79, 283– 304.

García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Enriqueta García de Miranda, México. 220 pp.

Gómez, R. L. y Pereyra, D. R., (1997). “Cuantificación de la infiltración en suelos de la cueca del Río ídolos, Ver., aplicando métodos empíricos y medición directa. Tesina para Especialidad en climatología. Facultad de Instrumentación Electrónica. Universidad Veracruzana, 34 pp.

González-Mercado E., 2005. El vulcanismo monogenético de la región de Xalapa, Veracruz. Geomorfología, petrología y génesis Tesis de Maestría, UNAM-Instituto de Geología, 131 p.

Gymza, Estudios de Planeación Regional, 1987. Exploración Geológico-Petrolera de tipo tectónico. Prospecto Huatusco-Jalapa de Díaz, Estado de Veracruz. Proyecto realizado para PEMEX, 196 pt. inédito.

Höskuldsson, A., 1992. Le complexe volcanique Pico de Orizaba-Sierra Negra-Cerro Las Cumbres (sud-est mexicain): Structure, dynamismes eruptifs et évaluations des aléas. Tesis Doctoral, Univ. Clermont Ferrand II, 210 pt.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1982. Carta Edafológica y de Uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000a. Carta Topográfica Xalapa E14-B27, Escala 1:50 000.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2005. II conteo de población y vivienda 2005.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2003. Carta Topográfica Coatepec E14-B37, Escala 1:50 000.



-
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000b.** Carta Topográfica Actocpan E 14B-28, Escala 1:50 000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000c.** Carta Topográfica José Gardel E 14B-38, Escala 1:50 000.
- Jáuregui, E. (1984).** Desarrollo de un modelo de difusión atmosférica para evitar la contaminación ambiental en montaña, valle y costa. Centro de Meteorología Aplicada. Universidad Veracruzana. 81 pp.
- López, I. M., 1991.** Petrologic study of the volcanic rocks in the Chiconquiaco-Palma Sola. Area, central Veracruz, México. M.S. Thesis, Tulane University, U.S.A. 139 pt.
- López-Hernández, A., 1995.** Estudio regional volcánico y estructural de la zona geotermica de Los Humeros Puebla, México. Geotermia Vol.11 No 1 17-36
- Meinzer , O.E. (1942).** Ground Water en Hydrology, McGraw-Hill Co., págs. 443-484.
- Morales-Barrera W., 2009.** Estudio geológico de un depósito ignimbrítico en la región de Xalapa, Veracruz: distribución, estratigrafía, petrografía y geoquímica. Tesis de Maestría, UNAm – Instituto de Geología, 143 P.
- Negendank, J. F. W., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., y Werle, D., 1985.** Geological and geochemical investigations on the eastern Transmexican Volcanic Belt. Geofísica Internacional 24-4, 477-575.
- Nelson, S. A. y González C. E., 1992.** Geology and K-Ar dating of the Tuxtla Volcanic Field, Veracruz, Mexico. Bull. Volcanol. 55, 85-96.
- Nelson, S. A., González C. E. y Kyser, T. K., 1995.** Constraints on the origin of alkaline and alkalkaline magmas from the Tuxtla Volcanic Field, Veracruz, Mexico. Contrib. Mineral. Petrol., 122, 191-211
- NOM-014-SSA1-1993** Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. SEMARNAT. Diario Oficial de la Federación



NOM-127 SSA1-1984 (199). Que establece los límites máximos permisibles para la calidad del agua para uso potable. Secretaría de Salubridad y Asistencia. México.

Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J. J., Morán- Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 1992, Carta geológica de la República Mexicana, Quinta Edición, Escala 1:2,000,000. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, consejo de Recursos Minerales. 1 Mapa con Texto Explicativo, 74 p.

Pasquaré, G., Vezzoli, L. y Zanchi, A., 1987. Morphological and structural model of the Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional* 26-2, 159-175.

Rodríguez, S. R., Morales-Barrera, W., 2009. A quaternary monogenetic volcanic field in the xalapa region, eastern trans-mexican volcanic belt: geology, distribution and morphology of the Volcanic vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Reserarch.*

Rodríguez, S. R., 2005. Geology of Las Cumbres Volcanic Complex, Puebla and Veracruz states, Mexico *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm. 2, 2005, pp 181-199.

Siebe C., Abramas M. and Sheridan M. F., 1993 Major Holoceno block and ash fan at the western slope of ice-capped Pico de Orizaba Volcano, México: Implications for future hazards. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 59,1-33.

Siebert L. y Carrasco-Nuñez G., 2002. Late –Pleistoceno to pre Columbian behind the arc mafic volcanism in the eastern Mexican Volcanic Belt; implications for future hazards. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 115, 179-205 .

Tejeda, M. A., F. Acevedo R. y E. Jáuregui O., (1989). “Atlas climático del Estado de Veracruz. Universidad Veracruzana, Colección Textos Universitarios, 150 pp.

Tóth J. (1962). A theory of groundwater motion in small drainage basins i central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical. Research* 67, (11):4375-4387.

Tóth J. (1984). The role of regional gravity flow in the chemical and termal evolution of ground wáter. In: Hitchon B, and Wallick El (eds) *Proc First Canadian/American*



Conference on Hydrogeology, Practical Applications of Ground Water Geochemistry, Worthington, Ohio, 1984, National Water Well Association and Alberta Research Council, pp 3-39.

Tóth J. (2000). Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal* 7:1-14

Van-Lanen, AJH y Carrillo-Rivera, JJ. 1998. Framework for groundwater monitoring in (semi-)arid regions. UNESCO, libro: *Monitoring for groundwater management in (semi-)arid regions. Studies & reports in hydrology* 57, pp7-20

Viniegra-Osorio, 1965. Geología del Macizo de Teziutlán y la Cuenca Cenozoica de Veracruz en “La Cuenca de Veracruz Papaloapan” Publicación especial No.1, 50 Aniversario Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. 1999, 315-384.

US EPA (2001). Método 200.7

US EPA (1997). Método 300.1