



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEÓN GUANAJUATO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOLOGO

PRESENTA:

MARTHA ANGELICA SALAS MARTÍN

ASESOR DE TESIS:

M. en C. ALEJANDRA CORTES SILVA



CIUDAD UNIVERSITARIA

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-745

SRITA. MARTHA ANGÉLICA SALAS MARTÍN
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M. en C. Alejandra Cortés Silva y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

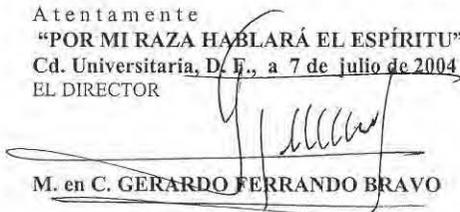
**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LAS
PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEÓN,
GUANAJUATO**

- I GENERALIDADES**
- II MARCO GEOLÓGICO**
- III MODELO GEOHIDROLÓGICO CONCEPTUAL**
- IV HIDROGEOQUÍMICA**
- V FUNCIONAMIENTO GEOHIDROLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO**
- VI CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

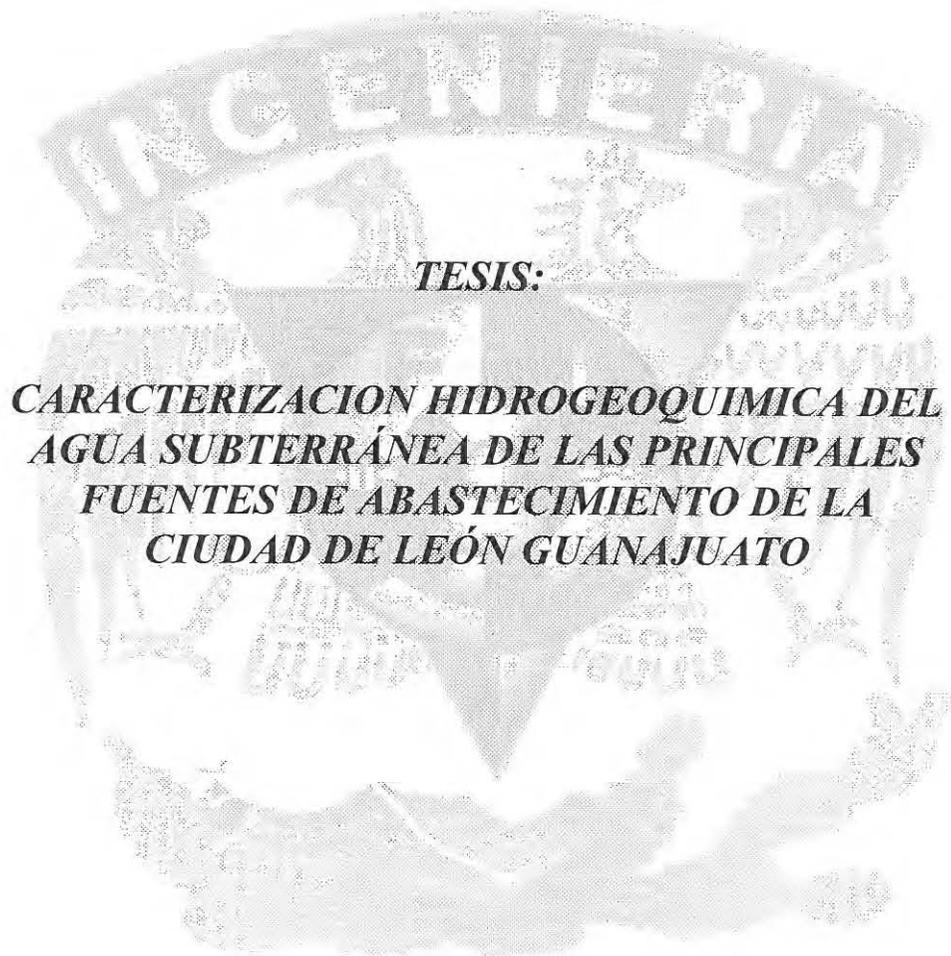
Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 7 de julio de 2004
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/MAGC*gtg

TESIS:

***CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL
AGUA SUBTERRÁNEA DE LAS PRINCIPALES
FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA
CIUDAD DE LEÓN GUANAJUATO***

DEDICATORIAS.

- ☞ *Dedico esta tesis con todo mi amor y respeto a mi mamá: Rosario Martín Pinto, que es la persona que más admiro en este mundo y de la cual me siento muy orgullosa; por que ella es el mejor ejemplo de lucha y superación que he podido tener. Por eso, cada día le doy gracias a Dios por que al nacer la escogió a ella como mi madre, pues aunque se que todas las madres son buenas, para mi ella es la mejor, y aunque a veces no se como demostrárselo, quiero que sepa lo mucho que valoro todo lo que siempre me ha dado; su amor, su paciencia, su apoyo incondicional y el estar siempre conmigo cuando más la necesito, guiándome siempre por el mejor camino y ayudándome día a día, a ser una mejor persona, dándome las herramientas para tener con que luchar en esta vida y la mejor educación que uno pudiera pedir, tanto escolar como familiar. En fin, son tantas las cosas que quisiera hacer y poder decirle para agradecerle todo lo que ha hecho por mi, que sólo espero que la vida me dé lo suficiente, para poder compensarla a tiempo, y como ella se lo merece.*
- ☞ *A mis hermanas Rosario y Cristina que con su existencia llegaron a complementar mi vida y hacen que este mundo sea más bonito y divertido por que ellas están en él. Por que las amo y a pesar de que hay muchas diferencias entre nosotras, siempre puedo contar con ellas como hermanas, amigas, confidentes y hasta cómplices incondicionales, con quienes comparto y deseo compartir siempre, el espacio y todos los momentos significativos de nuestras vidas.*
- ☞ *A Sergio Amador, por su amor y esos momentos agradables que pasamos juntos y que me hacen tener la ilusión de poder estar siempre a su lado, compartiéndolo todo.*
- ☞ *A mis queridos amigos y amigas de la Facultad de Ingeniería, por compartir momentos inolvidables, llenos de experiencias positivas y negativas pero que nos han hecho crecer, fortalecer y valorar nuestra amistad.*
- ☞ *A Edgar Alcala, por su cariño y todas esas cosas que compartimos juntos, pero sobre todo por su motivación y su infinito e ineludible apoyo que me ayudo siempre a salir adelante a como dé lugar, haciéndome sentir afortunada de ser su amiga y poder contar siempre con él, a pesar de su especial carácter fuerte y sus regaños bien intencionados, pero muchas veces incomprensibles, que ahora recuerdo con ternura y que además también extraño.*
-
-

AGRADECIMIENTOS.

- ☞ *A la Fis. Alejandra Cortés Silva, por toda su ayuda, motivación, confianza y apoyo brindado para la realización de esta tesis y la oportunidad de permitirme trabajar a su lado aprendiendo siempre cosas buenas y significativas para una buena formación profesional.*
 - ☞ *Al M. en C. Alejandro Ramírez por su asesoría, comentarios y consejos que fueron de gran ayuda en el desarrollo de esta tesis, además de su invaluable amistad y grata compañía.*
 - ☞ *A los Ingenieros de la Facultad de Ingeniería: Héctor Macías, Alberto Arias, Martín Vidal y Emiliano Campos, por sus sugerencias y comentarios en la revisión de este trabajo.*
 - ☞ *Al Dr. José Alfredo Ramos, por sus enseñanzas y el tiempo que pudo dedicarme durante el tiempo que estuvimos juntos en el Instituto de Geofísica.*
 - ☞ *Al Quím. Héctor Hernández y el Biol. Luis Ernesto Barrón, por su amistad, ayuda y compartir conmigo parte de lo mucho que considero saben.*
 - ☞ *A mis amigos y compañeros de trabajo del grupo de Hidrología: Juan y Nora Pérez, Stefanie Kralisch y Esmeralda Segundo, por su compañía, comentarios y ayuda que han podido brindarme.*
 - ☞ *Al Lic. en Sist. Héctor Tecanhuey y los Ingenieros: Miguel Angel García e Ivan Rodríguez, del departamento de computo del Instituto de Geofísica, por todo su apoyo incondicional, asesorías y consideraciones que siempre han tenido conmigo, además de su amistad y los gratos momentos que he podido compartir con ellos.*
 - ☞ *Al Personal del Instituto de Geofísica, los cuales no menciono sus nombres por que son muchos y temo vaya a faltarme alguno, de los cuales he recibido muchas cosas buenas y favores y que además han hecho agradable y placentera mi estancia en este Instituto.*
-
-

INDICE

	Pág.
I GENERALIDADES	
I.1 Introducción	1
I.2 Objetivos	5
I. 3 Antecedentes	5
I. 4 Localización	8
I. 5 Vías de comunicación	10
I. 6 Fisiografía	12
I. 7 Climatología	15
I. 8 Hidrografía	16
II MARCO GEOLÓGICO	
II.1 Neotectónica y relación con el área de estudio	19
II.2 Historia Geológica	24
II.3 Estratigrafía.	26
<i>II.4.1 Eratema Mesozoico</i>	29
<i>II.4.2 Eratema Cenozoico</i>	32
II.5 Geología estructural	40
III MODELO GEOHIDROLÓGICO CONCEPTUAL.	
III.1 Conceptos básicos	45
III.2 Mecanismos de flujo del agua subterránea.	53
III.3 Parámetros físico-químicos	60
<i>III.3.1 Temperatura</i>	60
<i>III.3.2 Conductividad Eléctrica</i>	61
<i>II.3.3 pH</i>	63
<i>II.3.4 alcalinidad</i>	64

	Pág.
IV. HIDROGEOQUÍMICA	
IV.1 Muestreo de agua y análisis químico	67
IV.2 Familias de Aguas.	69
IV.3 Análisis de resultados hidrogeoquímicos.	74
<i>IV.3.1 Análisis de iones principales</i>	80
<i>IV.3.2 Análisis de metales</i>	98
<i>IV.3.2 Análisis isotópico</i>	101
V. GEOHIDROLOGÍA	
V.1 Unidades hidrogeológicas	119
<i>V.1.1 Unidades permeables</i>	119
<i>V.1.2 Unidades impermeables</i>	120
V.2 Tipo de Acuífero en el área de León (Medios Granular y Fracturado)	122
V.3 Piezometría	123
V.4 Modelo geohidrológico del valle de León	125
<i>V.4.1 Modelo estructural</i>	125
<i>V.4.2. Conexiones hidráulicas</i>	125
<i>V.4.3. Direcciones de flujo y zonas de recarga</i>	126
V.5 Modelo geohidrológico del valle del río turbio	123
<i>V.5.1 Conexiones hidráulicas</i>	130
<i>V.5.2 Zonas de recarga</i>	131
V.6 Modelo geohidrológico la muralla	133
<i>V.6.1 Conexiones hidráulicas</i>	133
<i>V.6.2 Zonas de recarga</i>	139
CONCLUSIONES	140
RECOMENDACIONES	143
BIBLIOGRAFIA	145



I GENERALIDADES

I.1 Introducción

A lo largo del tiempo en las diferentes sociedades, la necesidad de agua para el crecimiento y sostenimiento de las mismas siempre ha estado íntimamente relacionado a su disponibilidad y fácil acceso. El uso para consumo directo, riego, cría de animales y mantenimiento de la infraestructura industrial depende de su calidad de agua.

En nuestro país el agua dulce que utilizamos proviene de dos fuentes: agua superficial y agua subterránea. La gran cantidad de agua utilizada por el hombre; así como, la carencia de sistemas de tratamientos de aguas residuales en la mayoría de las ciudades, provocan un deterioro cada vez mayor de las reservas hídricas superficiales y en muchas regiones, de las reservas subterráneas.

El crecimiento poblacional, a su vez genera una intensa y constante contaminación, vertiendo a los drenajes naturales gran cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

En áreas con problemas de disponibilidad de agua de buena calidad, las ciudades dependen de agua subterránea para todas sus necesidades por lo que en la mayoría de los casos esta fuente sufre riesgos de contaminación y sobreexplotación. En lugares donde no hay otros recursos de agua, es necesario forzar los acuíferos hasta sus límites de producción y para eso se tiene que entender el comportamiento del sistema hidrogeológico bajo condiciones extremas.

Los acuíferos además de ser la principal reserva con la que contamos en el país, se trata de unidades litológicas que, debido a las profundidades a las que actualmente son explotadas, se considera que no se contaminan fácilmente. Su distribución favorece su explotación; aun cuando es necesario invertir recursos económicos encaminados a realizar estudios para evaluar las condiciones hidrogeológicas e hidrodinámicas que conlleven a un éxito de explotación y generar una adecuada regulación por parte de los organismos operadores que

contribuya a conservar su calidad y cuidar su disponibilidad, para el consumo humano.

La desventaja más grande del agua subterránea es el desconocimiento que se tiene acerca de su potencial. Con frecuencia se actúa de manera indiscriminada, pensando que este recurso es inagotable y se pasa por alto que la capacidad de estos sistemas es limitada y una sobreexplotación que exceda la capacidad natural de recarga al subsuelo, provocará una gran cantidad de daños.

Actualmente estos daños se han manifestado en diversas partes del país; de la gran cantidad de consecuencias prácticamente irreversibles y más notables del efecto que provoca la sobreexplotación del agua subterránea son: El descenso acelerado de los niveles, lo que provoca procesos de compactación de las unidades hidrogeológicas ocasionando el problema de subsidencia. Este fenómeno es un reflejo de la compactación del material, reduciendo de manera irreversible, el espacio de almacenamiento. Por otra parte el asentamiento que sufre el terreno daña las estructuras civiles además de provocar agrietamientos en el terreno que favorece la entrada de contaminantes al subsuelo. Estos fenómenos de manera individual o combinada afectan los sistemas de distribución y conducción del agua potable.

La sobreexplotación de acuíferos, si bien es un problema de difícil solución, puede reducirse mediante políticas de consumo racional, aunadas a un programa de control y monitoreo que garantice el abasto mínimo a los sectores usuarios e impida alcanzar un estado crítico del sistema geohidrológico.

Es importante hacer evaluaciones de los recursos periódicamente debido que un estudio representa el estado del sistema en un tiempo determinado, considerándose que sería la fotografía instantánea del sistema en ese momento bajo las condiciones en las que se realizó el estudio. Por lo que es necesario tener una secuencia de estudios a través del tiempo para poder entender la evolución del acuífero, y conocer las condiciones de su funcionamiento e impacto antropogénico.



El estudio de las aguas subterráneas es una ciencia cuantitativa cuyo objetivo fundamental es definir el flujo subterráneo en términos de dirección, velocidad, cantidad y calidad; así como, predecir cualquier cambio en dichos parámetros, debido a la alteración ocasionada por las actividades del hombre.

Para poder entender el comportamiento de los acuíferos es importante establecer el marco geológico de la zona de estudio, enfatizando en las características de las formaciones desde el punto de vista de su capacidad de almacenar y transmitir agua.

La fisiografía debe incluir la descripción de las actividades de la naturaleza sobre los terrenos con sus reflejos y consecuencias topográficas, así como sus repercusiones geológicas. Es necesario hacer una reseña histórica de los fenómenos que dieron a la zona sus características exteriores; y sobre todo investigar las estructuras internas y marco particular de la geología en que se mueve el agua subterránea.

En general, los estudios de agua subterránea se dirigen a conocer tres características fundamentales de los materiales geológicos que las contengan: 1) su facilidad de transmitirla, 2) su capacidad para almacenarla y 3) su influencia en la calidad fisicoquímica del agua.

Dentro de la zona de estudio se hace necesario determinar la presencia y distribución de las formaciones permeables e impermeables; esto, es importante para establecer las barreras al flujo del agua, las zonas de recarga y descarga; así como, sus repercusiones en la perforación de pozos. El conocimiento de la distribución de las diversas unidades geológicas permite además inferir, el funcionamiento hidrodinámico, los volúmenes almacenados y la conexión hidráulica de acuíferos.

Para establecer el modelo conceptual es necesario determinar la distribución espacial de las formaciones permeables y almacenadoras de agua, sus áreas, espesores, litología, granulometría, extensión, composición

mineralógica, tipo de permeabilidad, fracturamiento, cavidades de disolución y demás propiedades relevantes.

Dentro de los estudios efectuados para la definición del modelo hidrogeológico de una zona de estudio, es necesario conocer la calidad del agua subterránea así como su evolución ya que es un factor importante para el uso que se le quiera dar o para la regulación de desechos industriales a los afluentes de descarga.

Es importante investigar las extracciones de agua subterránea por los diferentes aprovechamientos; conocer las características constructivas de pozos, norias, galerías filtrantes, manantiales. Para poder determinar, entre otros aspectos, el acuífero explotado y volúmenes extraídos. Esto se logra mediante un censo de todas las obras, que incluya: uso, litología, profundidad, diámetro de descargas, temperatura del agua, registros eléctricos, caudal, niveles. Estas consideraciones son muy importantes ya que en innumerables ocasiones la falta de atención en los puntos anteriores conlleva a generar pozos fallidos. Estos resultados no implican necesariamente la falta de agua, sino un mal diseño basado en malas estrategias.

I.2 Objetivos

- Establecer el marco geológico en el que se encuentran las zonas de abastecimiento subterráneo de la Ciudad de León.
- Describir el modelo hidrogeológico de la región.
- Conocer el comportamiento hidrogeoquímico del área.

I.3 Antecedentes

Los estudios que se han consultado relacionados con el área de estudio, han tenido por lo general un carácter geológico, geológico-minero y geohidrológico; generando así un panorama de la información existente de acuerdo a las observaciones e interpretaciones hechas por los autores de dichos estudios.

Uno de los primeros estudios hidrogeológicos de esta zona, es el realizado por Hernández Serrano en 1957, en donde se realiza una inspección hidrogeológica del Valle de León. Este trabajo sirvió como pauta para los siguientes trabajos hidrogeológicos de dicha región.

Entre los trabajos más relevantes se encuentran los de la Secretaría de Recursos Hidráulicos SARH, 1969, en donde se realizan pruebas de bombeo y las primeras aproximaciones de la recarga del Valle de León.

En 1979, la SARH, realiza un estudio de actualización del Valle del Río Turbio, en dicho trabajo se reportan volúmenes de extracción, transmisividades, unidades permeables y pruebas de bombeo.

En el año de 1980, la Secretaría de Programación y Presupuesto publica una Síntesis Geográfica de Guanajuato, en la cual se resumen las características geográficas más relevantes así como un apartado de hidrología superficial y subterránea.

A finales de 1982, la SARH realiza una campaña de piezometría en el Valle de León a partir de la separación entre dos acuíferos llamados "acuífero superior" y "acuífero inferior" respectivamente, el primero localizado entre los cero y doscientos metros de profundidad y el segundo entre los doscientos y seiscientos metros de profundidad. En este trabajo se reportaron nuevos volúmenes de extracción y se sostiene la versión de que la explotación del "acuífero inferior" es mínima en comparación con el "acuífero superior".

En 1987, el Instituto de Geología (IG) de la UNAM organiza el primer simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato.

En 1988, la empresa Geofísica GUYSA, S.A de C.V. elaboró un "Estudio de exploración geofísica y actividades geohidrológicas complementarias en la zona sur de León", cuyos objetivos fueron determinar el espesor de los sedimentos lacustres mediante sondeos eléctricos verticales y establecer la relación hidrodinámica entre el Valle de León y la zona de la Muralla.

En 1991, el Instituto de Geofísica-UNAM realiza estudios hidrogeoquímicos en la región, definiendo mecanismos de transporte del cromo. Se investiga el estado de contaminación del agua subterránea en la Ciudad de León y sus alrededores. Con ayuda de análisis químicos del agua en más de cien pozos muestreados, el estudio dio como resultado la presencia de Cr(VI) y N-NO₃, en concentraciones mayores a las teóricamente esperadas dadas las condiciones geoquímicas naturales de la zona, categorizando al Cr(VI) como contaminante industrial y al N-NO₃ como contaminante urbano de las aguas subterráneas.

En 1991, Hernández Noel, propone un modelo geohidrológico conceptual en el valle de León. Postula explícitamente la existencia de un sistema de flujo regional subterráneo asociado a la cuenca superficial del alto Río Turbio, definida desde el nacimiento de ese río, aguas arriba de León, hasta Corralejo, Gto. Según el autor a inicios de la década de los 30's, cuando se intensificó notablemente la extracción y uso del agua subterránea en la región, el sistema de flujo tenía importantes zonas de descarga en las planicies bajas de la cuenca, donde ahora

se dan los grandes desarrollos agrícolas, urbanos e industriales, y sustentados por pozos profundos de alto rendimiento.

En 1995, La empresa IGC, realiza estudios encaminados a una primera modelación de flujo de Valle de Río Turbio. Dos años más tarde la empresa GEOPSA, propone un nuevo modelo conceptual geohidrológico del Valle de Río Turbio y realiza una segunda aproximación a la modelación matemática de flujo del Valle.

En 1996, la Comisión Nacional del Agua CNA, British Geological Survey BGS, Universidad Autónoma de Chihuahua UACH y Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de León SAPAL, llevan a cabo un estudio interinstitucional para determinar los efectos del uso de las aguas residuales sobre los recursos urbanos del agua subterránea en la Ciudad de León, Guanajuato, esta investigación es la única hasta donde sabemos que ha instalado y utilizado los nidos de piezómetros. (Nido de piezómetros: arreglo de varios piezómetros en un mismo lugar pero a diferentes profundidades). En cada piezómetro se midió el nivel del agua y se tomaron muestras para analizarla y para determinar los efectos de aguas residuales sobre el agua subterránea del municipio de León, llegando a la conclusión, que la contaminación antropogénica del agua subterránea es un proceso en activo. Este hecho junto con los resultados anotados en la sección anterior nos inducen a pensar que el proceso de contaminación en León y sus alrededores tiene carácter más bien difuso que localizado. Sin embargo, hay una buena noticia: se descubrió que el suelo tiene una cierta capacidad para retener el Cr(VI).

En 1998, Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato CEASG, identifica cuatro familias de agua subterránea con una característica hidrogeológica distintiva: aguas termales, del agua fría, de las aguas mezcladas, y del agua contaminada, por medio de datos hidrogeoquímicos.

En 1999, CEASG en colaboración con el Instituto de Geofísica de la UNAM, realiza un estudio enfocado en el campo de pozos de la Batería Muralla. Se propone un estudio hidrológico-isotópico de interpretación, basándose en las características documentadas de la precipitación contemporánea en el centro del país y de las características de la propia precipitación local. Con lo que se afirma que el agua que extraen los pozos de los valles de la cuenca del Río Silao, la zona de la batería la Muralla incluida, es la mezcla en diferentes proporciones de tres familias isotópicamente distinguibles: recarga lateral, retornos de riego, y agua original del acuífero, refiriéndose esta última a las aguas que han permanecido en el acuífero desde antes de 1930, y a las aguas de recargas profundas.

Esta tesis se deriva del estudio realizado para SAPAL titulado: ESTUDIO ISOTÓPICO E HIDROGEOQUÍMICO DE LA ZONA LEÓN RÍO-TURBIO a cargo de la Física Alejandra Cortés Silva, y que se llevo a cabo en el Instituto de Geofísica de la UNAM, basándose también en los estudios realizados para CEASG (1998 y 1999), en los que la que suscribe ha sido participe.

I. 4 Localización

La zona de estudio comprende la región noroccidental del Estado de Guanajuato, que se localiza entre las coordenadas UTM 2,300,000 y 2,350,000 de latitud norte y entre 195,000 y 235,000 de longitud oeste. Políticamente corresponde al municipio de León y los límites geográficos con los que colinda son: al noreste con el flanco suroeste de la Sierra de Guanajuato, al noroeste con la depresión de Lagos de Moreno, al sureste con los valles de Silao-Romita y al suroeste con el valle de Río Turbío (**Figura 1**).

Cubre una superficie aproximada de 2000 km², que cartográficamente hablando abarca las hojas de INEGI, a escala 1:50,000 León F14-C41, Valle de Moreno F14-C42, San Roque de Torres F14-C51 y Silao F14-C52.

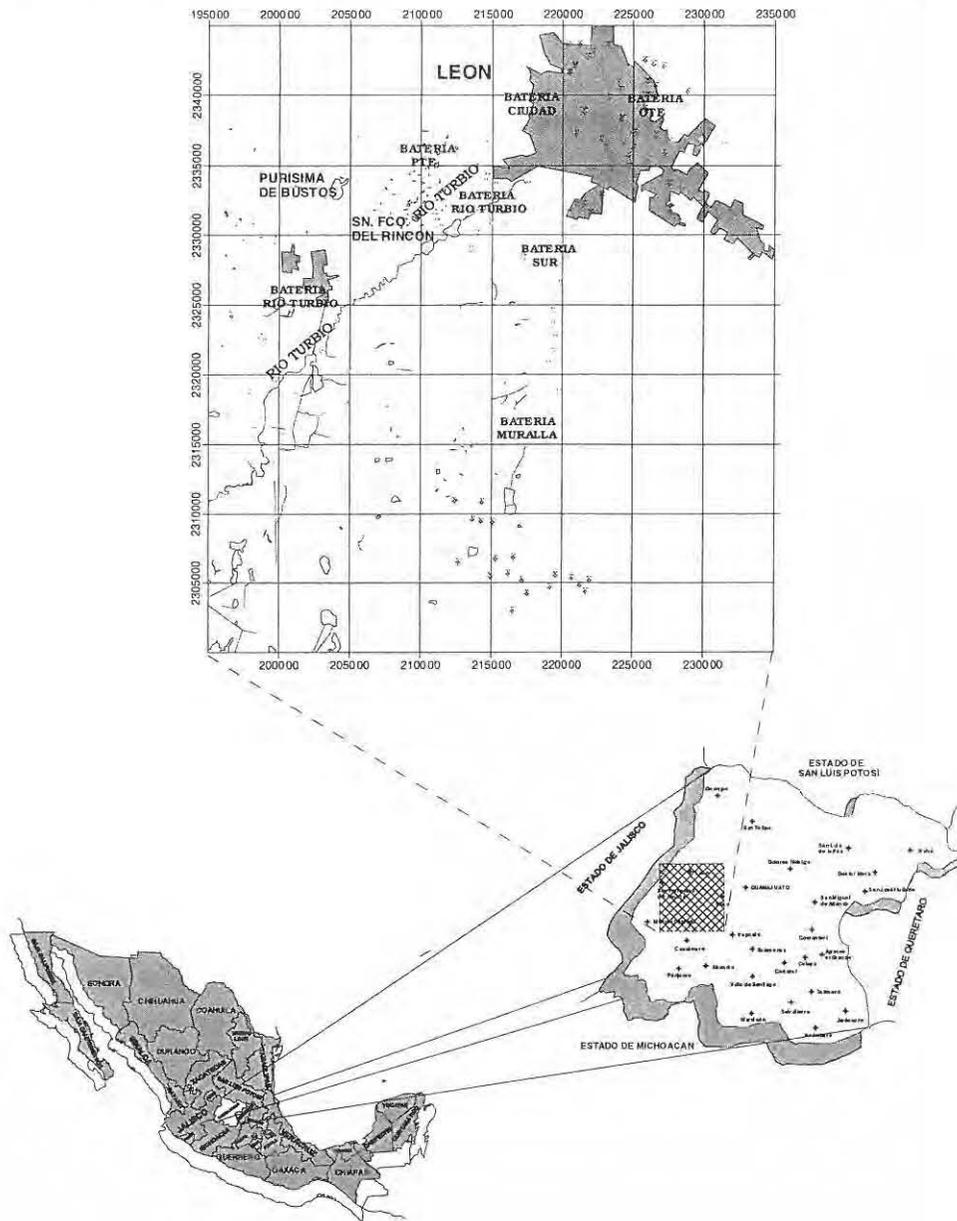


Figura 1. Mapa de localización geográfica del área de estudio.

I. 5 Vías de comunicación

El área se considera bien comunicada, teniendo como principal vía de acceso a la carretera Federal No. 45 que une a las ciudades de Irapuato, Silao y León. Otra vía importante es la carretera federal No. 37 que comunica a la zona hacia el sur con el Estado de Jalisco. A partir de estas carreteras se generan otras de segundo orden así como caminos de terracería y brechas que facilitan la comunicación entre los poblados (**Figura 2**).

En cuanto a vías férreas, se cuenta con una vía que comunica a las ciudades de Irapuato, Silao, León y San. Francisco del Rincón con la ciudad de México. Por otro lado en lo que respecta a la comunicación aérea, se cuenta con dos aeropuertos: uno en la ciudad de León y otro cerca de la ciudad de Silao, así como pequeñas pistas de aterrizaje para avionetas (**Figura 2**).

En la zona estudiada, se cuenta con los servicios de teléfono, telégrafo y servicio postal, radio y televisión. Por lo tanto, tomando en cuenta esta serie de características se puede considerar a la región como una zona muy bien comunicada.

I. 6 Fisiografía

El estado de Guanajuato se encuentra localizado hacia la terminación meridional del Altiplano Mexicano dentro de tres provincias fisiográficas (SPP, 1980) al nororiente en la Sierra Madre Oriental, al norte en la Mesa del Centro y al Sur en el Eje Neovolcánico (**Figura 3**).

En particular el área de estudio se encuentra ubicada principalmente dentro de dos provincias fisiográficas: al noroccidente del Eje Neovolcánico y al suroccidente de la Mesa del Centro (**Tabla 1**).

El Eje Neovolcánico, estructura plio-cuaternaria que desde el Golfo hasta el Pacífico se sobrepone a las provincias geológicas precedentes, sobre la parte central del país, ocupa principalmente gran parte de la entidad, esta conformado por grandes Sierras de constitución volcánica correspondientes a corrientes lávicas, conos volcánicos, escudos volcánicos, calderas y sucesivos episodios volcánicos que van de mediados del Terciario hasta el Reciente. Hacia las partes bajas existen depósitos continentales, que forman extensas llanuras.

En esta zona existen dos subprovincias que son:

1. El bajío Guanajuatense, es la parte sur que colinda con la provincia del Eje Neovolcánico y se encuentra constituido por un valle estructural de origen tectónico relleno por depósitos de material medianamente consolidado (Terciario granular indiferenciado) y sin consolidar (Aluvión), ocupa la mayor parte del área de estudio y esta representado por llanuras de aluviones profundos las cuales ocupan la mayor parte del valle y lomerios asociados a mesetas que ocupan una porción de la parte sur del mismo. Esta subprovincia es producto de la actual acción de los factores exógenos niveladores del relieve, en donde se distinguen dos áreas diferenciables:
 - Franja de transición (Pie de monte). Vía de infiltración de los escurrimientos que alcanzan esta subprovincia. Su origen se

debe al procesos erosivo-acumulativo que ejercen algunos factores externos.

- Planicie acumulativa nivel de base. Es la más extensa y donde se emplazan el mayor número de aprovechamientos de agua subterráneas y áreas de cultivo con aguas subterráneas y residuales.
2. Los Altos de Jalisco que abarca solamente la parte noroccidental del área y se caracteriza por sus sierras altas de cumbres escarpadas. Agrupa a rocas volcánicas del terciario pertenecientes a las unidades litoestratigráficas aflorantes. La pendiente es muy suave en la cima de estas sierras y fuerte en las laderas de las mismas, lo que anudado al fracturamiento que las afecta, le confiere un gran poder de infiltración, lo que logra que gran parte del volumen de agua precipitada llega a formar parte del sistema hidrológico subterráneo.

La provincia de la Mesa del Centro en la que se presenta la discontinuidad fisiográfica Valles paralelos del suroeste de la Sierra de Guanajuato esta constituida por elevaciones de hasta 2,850 msnm, así como por mesetas drenadas por valles más o menos paralelos, lo que indica diversas etapas de erosión, resultado de movimientos tectónicos.

La Sierra de Guanajuato es el rasgo orográfico más prominente y se caracteriza por ser abrupta y favorable para que en condiciones de gran precipitación, el agua forme torrentes violentos que disecan densamente el relieve, lo que implica un alto índice de escurrimiento y una infiltración importantes. Gran cantidad del agua precipitada que se manifiesta como escurrimiento o infiltración, finalmente se integra al sistema de flujo del agua subterránea.

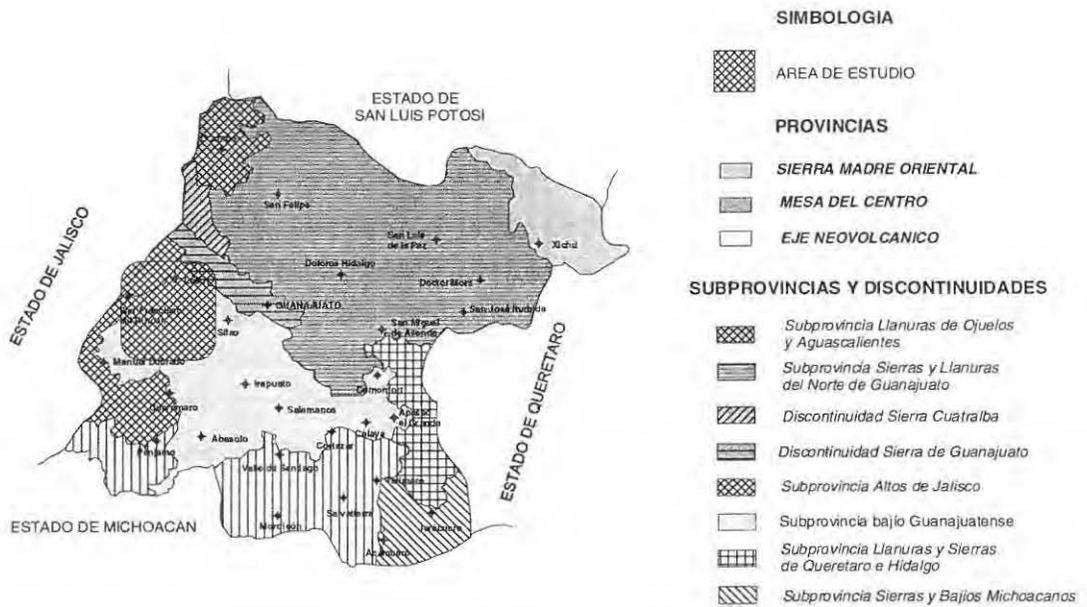


Figura 3. Mapa de provincias fisiográficas

PROVINCIA FIOGRAFICA	SUBPROVINCIA FIOGRAFICA	TOPOFORMAS
EJE NEOVOLCANICO	BAJIO GUANAJUATENSE.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lomerios asociados a mesetas. ▪ Lomerios aislados. ▪ Llanuras de aluviones profundos.
	ALTOS DE JALISCO.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sierras de cumbres escarpadas. ▪ Mesetas lávicas. ▪ Mesetas escalonadas ▪ Lomerios suaves de los Altos
MESA DEL CENTRO	DISCONTINUIDAD VALLES PARALELOS DEL SW DE LA SIERRA DE GUANAJUATO.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sierra con Valles paralelos

Tabla 1. Provincias, subprovincias y toposformas (SPP, 1980)

I. 8 Hidrografía

La cuenca principal del área de estudio es la del Río Lerma-Salamanca, que abarca la porción central y suroriental del estado de Guanajuato y pertenece a la región hidrológica Río Lerma-Santiago. El drenaje está constituido por corrientes de régimen intermitente y perenne. Las subcuencas hidrológicas principales son: Río Turbío-Río Los Gómez-Presa Palote y Río Guanajuato-Silao (Figura 5).

El principal colector de esta cuenca es el Río Lerma, que localmente está drenado por numerosos arroyos que bajan de la sierra en forma de abanico, juntándose aguas abajo en la ciudad de León, para formar el río Turbío, que fluye en dirección suroeste, cerca del borde occidental del Valle.

En la parte de la sierra de Guanajuato, el drenaje está formado por un sistema paralelo, modelado por los arroyos San Juan de Otates, Juache y Grande. Cada uno de ellos conforma un sistema dendrítico con escasos y cortos afluentes. Los dos primeros establecen aguas abajo, el sistema canal Santa Ana del Conde, que se une al Río Guanajuato y éste, al Río Lerma (Hérmendez-Silva et al., 2000).

Las zonas montañosas de la parte norte de la Sierra de Guanajuato está constituida primordialmente por rocas con patrones de drenaje dendrítico, en tanto que en el sur y sureste es muy característico el drenaje radial originado por los aparatos volcánicos existentes, y la litología sedimentaria es subdendrítica.

El principal afluente que drena en el área de estudio es el Río León o Los Gómez, que dirige su curso en un sentido general NE-SW, desde el norte de la Ciudad de León hasta la ciudad de San Francisco del Rincón, donde se interseca con el Río Turbio. Este río se ha convertido en un colector público de aguas residuales.

La mayor parte de las corrientes no alcanzan a desarrollarse en los valles, pues al llegar al pie de monte de la planicie desaparecen, pero las pocas que alcanzan los valles forman los cauces principales de los ríos.

En las zonas de los Valles de Irapuato, Silao y León están canalizados los arroyos: Ing. Antonio Coria y Tamascatío, así como los ríos: Guanajuato, Silao y Turbío.

Sobre los cauces de algunas corrientes, además de la canalización, se han construido presas entre las que destacan:

- El Palote, ubicada al norte de Ciudad de León, sobre la corriente del río Los Gómez con fines de control de avenidas y agua potable con una capacidad de 8.1 millones de m³.
- Chichimequillas, localizada al noreste del poblado del mismo nombre, sobre la corriente del Río Silao, con fines de riego y capacidad de 15 millones de m³.
- La Purísima, localizada cerca del poblado El Zangarro, sobre la corriente del arroyo el Cubo, construida con fines de riego, y capacidad de 67.5 millones de m³.

Además, existe un gran número de bordos distribuidos en toda la cuenca, cuya capacidad de almacenamiento es menor de medio millón de m³; algunos son efímeros y su vida útil restringe a la época de lluvias, perdiendo el agua paulatinamente durante el resto del año, por evaporación y consumo (INEGI, 1998).

Dentro del valle destacan 2 manantiales por su temperatura, el de Comanjilla, en el valle de León. Con temperatura de 96°C y otro en el valle de Silao, conocido como Aguas Buenas con 46°C. El resto de los manantiales localizados en la cuenca, presentan temperaturas que oscilan entre 19° y 25°C.

El uso principal que se le da al agua superficial de la cuenca, es el de satisfacer las necesidades derivadas de la actividad agrícola, contando con una red de canales mediante los cuales se distribuyen los caudales de las principales corrientes de los valles de Silao, Irapuato, Salamanca, Valle Santiago y Abasolo. Las necesidades de la actividad pecuaria y doméstica ocupan el segundo lugar de

importancia del uso del agua, por otro lado el uso del agua de los manantiales de Comanjilla y Aguas Buenas esta restringido para las actividades recreativas.

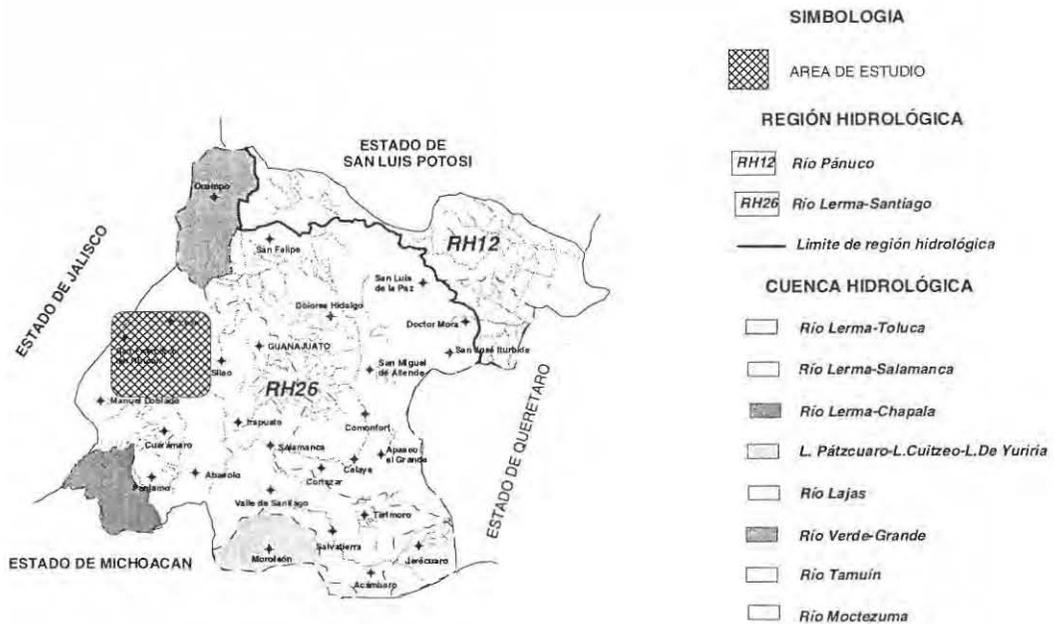


Figura. 5 Mapa de Cuencas y drenaje.

II MARCO GEOLOGICO

II.1 Neotectónica y relación con el área de estudio

La historia tectónica de la región sur de México en los últimos 25 m.a. incluye al menos tres grandes reorganizaciones de los movimientos de la Placa Oceánica. La antigua Placa de Farallón, evolucionó primero como la Placa de Guadalupe y posteriormente fue reducida a las actuales placas de Rivera y de Cocos, debido a la colisión del un eje de la dorsal del Pacífico Oriental (Atatwer, 1970; Schilt y Karing, 1982); lo que ocasionó el cambio de posición de los centros de expansión del fondo oceánico, primero hacia los montes marinos el Matemático entre los 12.5 y 11 m.a, posteriormente a la actual posición de la Dorsal del Pacífico entre los 6.3 y 3.5 m.a (Klitgord y Mammerickx, 1982).

Dicha reorganización tectónica presenta relación con las fases volcánicas de la Sierra Madre Occidental (SMO) así como con las estructuras mayores originadas a todo lo largo de esta extensa meseta volcánica; la cual, es continua desde los Estados Unidos de Norte América hasta la parte centro del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM o Cinturón Volcánico Transmexicano CVTM), esta provincia geológica es paralela a la costa noroeste de México en los Estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Nayarit, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco y Guanajuato, Michoacán, Estado de México y la parte norte de Guerrero.

La SMO está compuesta por dos secuencias ígneas: Una de tipo andesítica de edad Oligocénica (36 a 26 m.a) la cual es la base de una importante secuencia (Fredrikson 1972 y Ruiz 1975) ácida de riolitas y productos piroclásticos con edades del Mioceno Temprano a Medio.

En la parte noroccidental de México se efectuó la apertura del proto-golfo de California (Karing y Jensky, 1972). Este fenómeno ha sido relacionado con las diversas fases extensionales que ha sufrido la SMO y considera como la prolongación de la tectónica Basin and Range (Angelier et al. 1981; Dakka y Merriam, 1982; Coleta y Angelier, 1983), causando fallamiento normal de

dirección NNW-SSE a NNE-SSW que comenzó en el Mioceno y ha sido subsecuentemente reactivada.

El contexto geológico y la interacción de los procesos geodinámicos que afectan la zona de estudio y en general a gran parte de la República Mexicana se asocia a la interacción que existe entre las placas tectónicas de Norteamérica, del Pacífico, Cocos y Rivera. Estas placas, según sus movimientos relativos, marcan límites distensivos, como es el caso de la dorsal del Pacífico y Golfo de California así como convergentes los cuales tienen lugar en la parte sur de México; específicamente entre las placas de Rivera y de Cocos con la Placa de Norteamérica (Molnar y Sykes, 1969; Stoiber y Carr, 1973; Dean y Drake, 1978; Nixon, 1982; Bevis e Isacks 1984; Burbach, 1984).

Datos de sismicidad muestran que la subducción de la Placa de Cocos debajo de La Placa de Norteamérica forma un ángulo somero el cual crece progresivamente hasta -12° . La profundidad máxima de la zona de acoplamiento es 25 km, debajo de esta profundidad el eslabón subducido se curva de manera aguda con trayectoria casi horizontal debajo de México hasta por lo menos 150 km. La cercanía de los sismos a la costa, refleja el movimiento relativo de Cocos y la Placa de Norteamérica donde los terremotos originados por tensión son localizados a profundidad tierra adentro. Esto se ha interpretado como el reflejo del esfuerzo flexural inducido por la curvatura aguda del eslabón (Suárez et al., 1990).

La velocidad relativa de la Placa de Cocos con respecto a la de Norteamérica varía a lo largo de la trinchera, debido a la cercanía de los polos de rotación de cada placa (**Figura 6**). Para la Placa de Rivera la velocidad de subducción es de 2 cm/año; para la de Cocos se tienen velocidades que varían de 5.2 a 8.4 cm/año (**Figura 6**); incrementándose hacia América Central (DeMets y Stein, 1990).

Por otra parte la edad de la Placa Rivera es ≈ 9 m.a. Para la Placa de Cocos que se localiza entre los 105° a 101.4° W la edad es de 5 m.a., y se

incrementa hasta 13 m.a., hacia el sureste de la intersección de la Fractura Orozco y la Trinchera de Mesoamérica. La edad (**Figura 6**) se incrementa a 20 m.a. en las proximidades 100° W (Klitgord y Mammerickx, 1982; Mammerickx y Klitgord 1982).

La diferencia de edades a lo largo de las Placas de Rivera y de Cocos; así como de las velocidades relativas de subducción, se le ha adjudicado la posición inusual del CVTM con respecto a la relación que existe entre arcos volcánicos del mundo y llama la atención, debido a que este no es paralelo a la zona de subducción, con aproximadamente 16° de desviación (Pardo y Suárez, 1993a), con respecto a la Trinchera de Mesoamérica (**Figura 6**).

Basada en localizaciones hipocentrales se determinó la morfología de la zona de Benioff debajo de la Placa de Norteamérica, la cual es un eslabón subhorizontal (Suárez *et al.*, 1990). Los contornos de subducción de la placa de con profundidades entre 80-100 km, se encuentran frente del Cinturón Volcánico Mexicano, esto además de la composición predominante calci-alcalina sugiere la asociación de dicho rasgo volcánico con la subducción de las placas Rivera y Cocos debajo de La Placa de Norteamérica (Pardo y Suárez, 1993b; Singh y Mortera 1991 y Pardo y Suárez 1993b).

El CVM ha sido dividido por Deman (1981) y Nixon et al., (1987) en tres sectores: 1) sector occidental caracterizado por la presencia del punto triple formado por fosas tectónicas (**Figura 6**) de Tepic, Colima y Chapala. 2) El sector central constituido principalmente por vulcanismo monogenético (**Figura 7**) de la región Michoacán-Guanajuato y 3) sector oriental caracterizado por la presencia de grandes estrato volcanes (**Figura 6 y 7**).

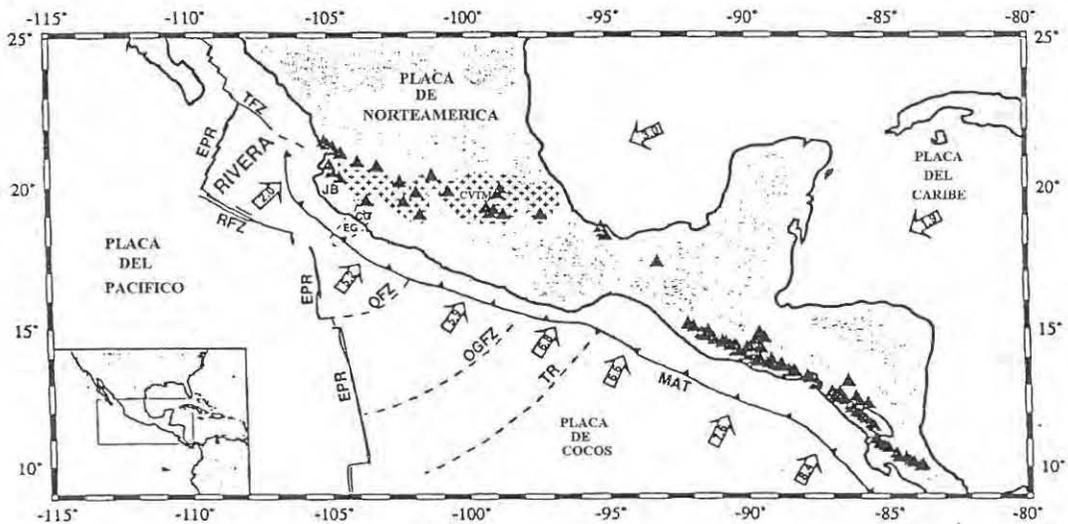


FIGURA 6. Conjunto tectónico del sur de México. Las placas de Rivera y de Cocos subducen en el sur de México a la Placa de Norteamérica; se encuentran involucradas también a dicho conjunto las placas de Rivera y Caribe. Las relaciones de convergencia relativa (cm/año) entre las placas se indican por medio de flechas. Se muestran las principales características tectónicas de la región: Cordillera del Pacífico del Este (EPR), Zona de Fractura Tamayo (TFZ), Zona de fractura Rivera (RFZ), Zona de fractura Orozco (OFZ), Zona de Fractura O'Gorman (OGFZ), Cordillera de Tehuantepec (TR), Trinchera Mesoamericana (MAT), Bloque Jalisco (JB), Graben de Colima (CG), Graben El Gordo (EG). Se indica la región del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM o CVTM), los triángulos indican volcanismo Cuaternario (Tomada de Pardo y Suárez, 1993b).

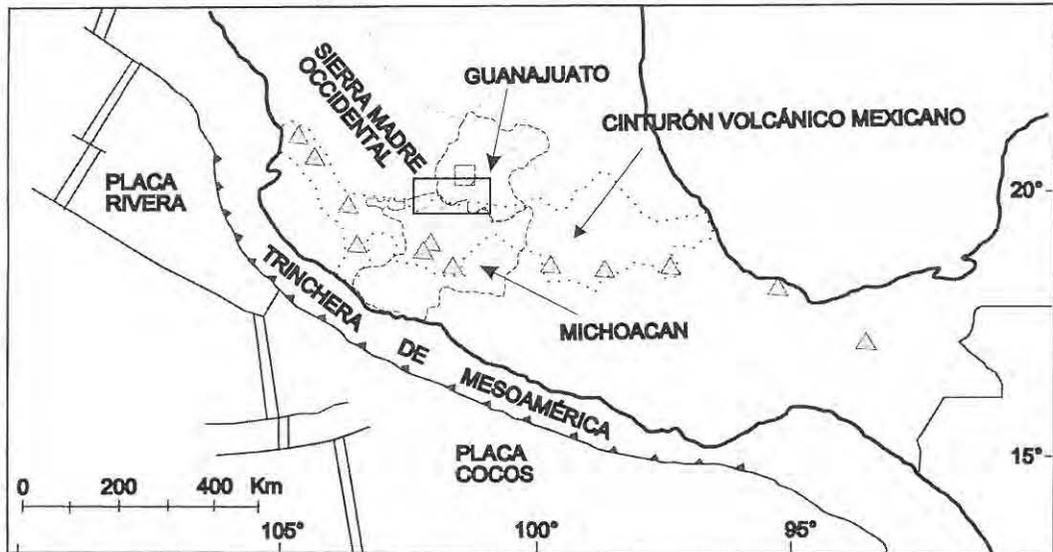


Figura 7. Ubicación del área de estudio (cuadrángulo con líneas diagonales) y relación con la Sierra Madre Occidental y el Cinturón Volcánico Mexicano. El rectángulo con relleno de puntos representa el campo volcánico Michoacán Guanajuato.

II.2 Historia Geológica

Uno de los episodios tardíos de la apertura del Golfo de México durante su comunicación con el ambiente marino del Pacífico en el Jurásico Tardío, es la formación de pilares y cuencas tectónicas con una posterior transgresión marina extensa. Simultáneamente a este evento se formó un margen convergente en el borde occidental de la corteza continental, creándose un arco volcánico insular y una cuenca de trasarco, generándose corteza oceánica testificada por restos de un complejo ofiolítico que aflora en la Sierra de Guanajuato representado por la Piroxenita San Juan de Otates, formada a través de una zona de distensión surgida por una digitación tetisiana (Servais et al., 1982, 1986) a partir tal vez de un dominio netamente de afinidad pacífica (Corona 1988; Martínez, 1989a)

Posteriormente a finales del Neocomiano, se presenta una fase intrusiva de variada composición (Conjunto Plutónico La Luz) siguiéndole después durante el Aptiano un episodio compresivo intenso que metamorfiza a toda la secuencia volcanosedimentaria (Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato) la cual pudiera estar relacionada con la Orogenia Nevadiana que afectó gran parte del borde occidental de la placa norteamericana durante el Cretácico temprano, trayendo como consecuencia el cierre de la cuenca de trasarco y con ello un proceso de obducción, superponiendo el complejo ofiolítico sobre la secuencia volcanosedimentaria de la Sierra de Guanajuato.

El depósito de calizas arrecifales (Caliza la Perlita) se da en el Albiano, en un ambiente de mar somero de afinidad tetisiana.

Durante el Cretácico tardío no existen afloramientos que expliquen las condiciones ambientales prevalecientes en el área, pero zonas adyacentes sugieren una continuidad en el ambiente de depósito de esta zona hasta el Campaniano.

En el Maestrichtiano se inicia un segundo evento compresivo deformacional íntimamente ligado a la Orogenia Laramide que se presentó extensamente y al mismo tiempo en diversos puntos de Norteamérica, América del Sur y en las

Antillas Mayores, al término del Cretácico (Coney, 1983) y que finalizó en el Paleoceno, llevándose acabo el retiro de los mares y formándose definitivamente, un ambiente totalmente continental en el cual se lleva acabo un intenso magmatismo causando el emplazamiento del Granito Comanja, considerado como un batolito post-orogénico.

En las depresiones topográficas formadas como consecuencia de la deformación y fallamiento que sufrieron las rocas intrusionadas por el Granito Comanja, se acumularon rocas conglomeráticas (Conglomerado Guanajuato) posteriormente se presentan derrames andesíticos (Andesita Bernalejo) correlacionables con las últimas manifestaciones volcánicas del Complejo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental propuesta por Mc Dowell y Keizer en 1977 (Mc Dowell and Clabaugh, 1981).

Durante algún tiempo, aproximadamente 11 m.a; no hay actividad volcánica, pero esta se restablece en los inicios del Oligoceno por un corto tiempo de 7 m.a., aproximadamente, finalizando por causa de la extinción de la Placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana, cuya subducción fue la alimentadora del vulcanismo ignimbrítico de la región. La actividad es de carácter silícico, siendo extravasadas grandes cantidades de tobas e ignimbritas (Ignimbrita Cuatralba).

La consumación de la Placa farallón a fines del Oligoceno, propició una reorientación en la tectónica distensiva (Atwater, 1970, en Venegas, op.cit.) y probablemente produjo la apertura del "proto-Golfo" de California y consecuentemente se genera un régimen extensional en el centro y norte de México (Cebull and Shurbet, 1987), creándose una zona de pilares y fosas tectónicas, en las cuales por el proceso denudatorio prevaleciente durante el Neógeno y Cuaternario, se lleva acabo la depositación de grandes espesores de la unidad Terciario Granular Indiferenciado, en las distintas cuencas tectónicas de la región.

En el Cuaternario se presenta actividad volcánica en el Cinturón Volcánico Mexicano, extravasándose rocas de composición básica a intermedia (Unidad

basalto El Cubilete), como producto de la interacción entre las placas Norteamericana y Cocos. Por último, en el Holoceno se generan procesos exógenos que prevalecen sobre los endógenos, esperándose que así sea la respuesta a los períodos de gran actividad que se manifestaron durante gran parte del tiempo geológico.

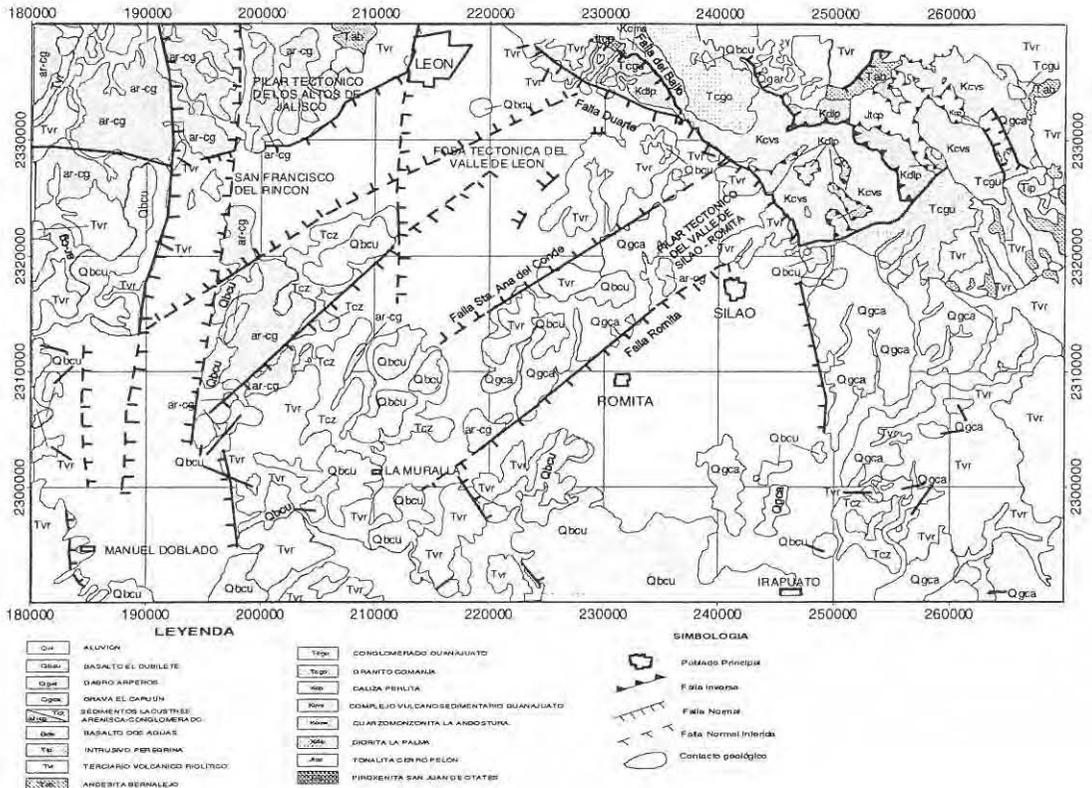
II.3 Estratigrafía.

Con base a lo expresado en el subcapítulo anterior estratigráficamente hablando podemos decir que la Sierra de Guanajuato y sus alrededores está constituida por dos conjuntos litológicos (Martínez-Reyes, 1992): uno inferior Mesozoico y otro superior Cenozoico, claramente definidos por un conjunto de rocas de diversa litología y edad separadas por un intrusivo granítico terciario, que marca el límite entre ambos conjuntos (**Figura 8 y 9**).

La unidad litoestratigráfica inferior está representada por una secuencia de facies sedimentarias y volcánicas marinas de edad cretácica, deformadas, metamorfoseadas e intrusionadas, primeramente por un complejo plutónico de composición intermedia a ácida y posteriormente por un intrusivo de constitución granítica con dimensiones batolíticas y que ocupa la parte central de la Sierra de León Guanajuato y su edad data del Paleoceno. Completando la estratigrafía de este conjunto se tiene una unidad ultramáfica, serpentizada, alóctona, de edad probablemente jurásica tardía, así como pequeños testigos de una sedimentación carbonatada aptiana.

La unidad litoestratigráfica superior cubre en discordancia angular a las rocas mesozoicas y está representada principalmente por facies volcánicas de composición ácida a intermedia de edad terciaria, principalmente del Oligoceno. Hacia su base aparece una unidad sedimentaria clástica continental de edad eocénica, y hacia la cima derrames basálticos pliocuaternarios finalizando con depósitos de aluvión

Los depósitos continentales están ampliamente distribuidos en el valle de León Río Turbío; estando constituidos por conglomerados fluviales sin consolidar con clastos de ignimbrita, andesita, cuarzo e intercalaciones de arenisca y calizas lacustres (Ramírez et al., 1999).



Tomado de CEASG, 1999.

Figura 8. Mapa Geológico-Estructural del área de estudio.

Periodo	Epoca		Descripción
---------	-------	--	-------------

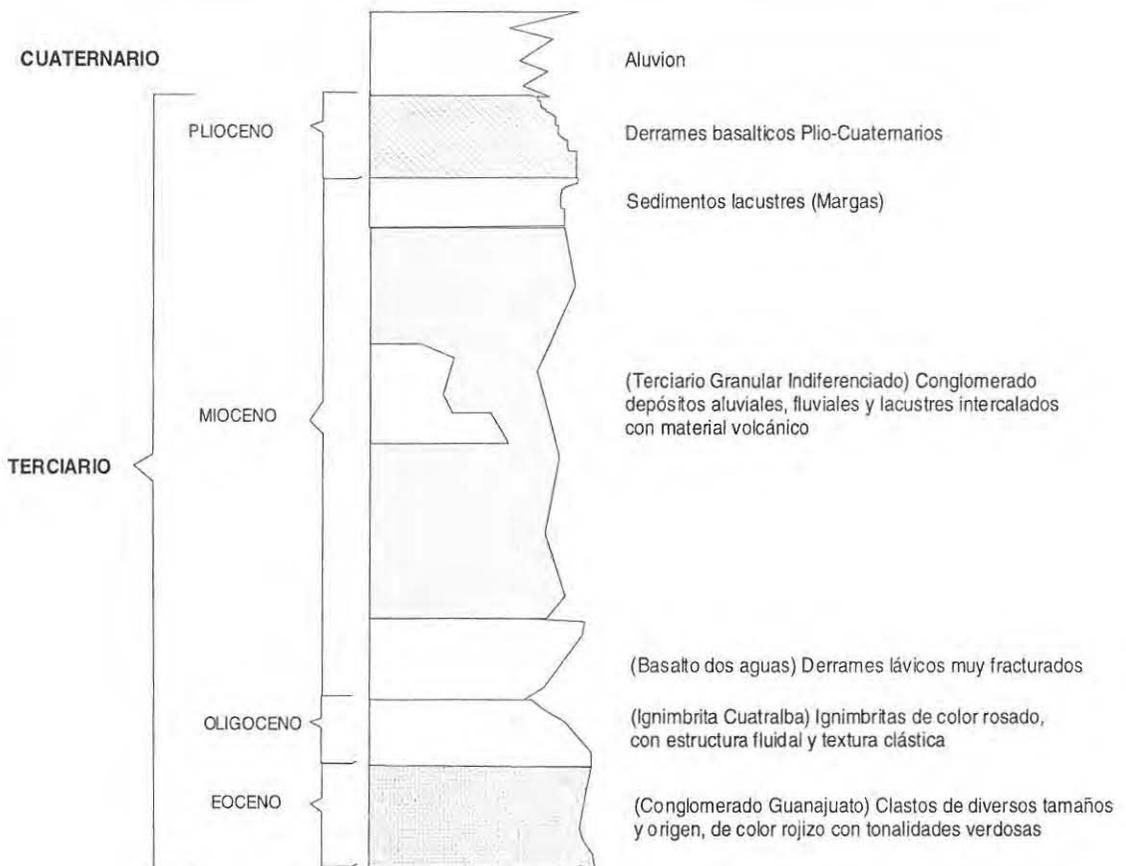


Figura 9. Columna estratigráfica del área de estudio.

En la cartografía del área estudiada se manifiesta la presencia de trece unidades litoestratigráficas, de diversa naturaleza, con sus respectivos nombres informales, correspondiendo las primeras cuatro unidades al eratema Mesozoico y las restantes nueve al Cenozoico. A continuación se hace una descripción y presentación detallada de cada una de ellas.

II.4.1 Eratema Mesozoico

Esta formado por secuencias representativas de dos ambientes paleogeográficos diferentes: una volcanoplutónica alóctona, perteneciente a un arco insular intraoceánico (Arco de Guanajuato) y otra, volcanosedimentaria paraúctona, perteneciente a una cuenca oceánica: Cuenca de Arperos (Monhod et al., 1990; Lapierre et al., 1992)

SISTEMA JURASICO

Piroxenita San Juan de Otates (Jpsj).

Nombre asignado por Servais et al., 1982. Esta unidad aflora en la Sierra de Guanajuato, a lo largo del arroyo San Juan de Otates, al noreste de la ciudad de León, con una extensión superficial aproximada de 12.5 km². La unidad consiste en rocas masivas cristalina de color verde oscuro en una roca alterada (serpentinizada). Su paragénesis está representada principalmente por augita, olivino, tremolita-actinolita y hornblenda como minerales primarios y como minerales secundarios o de alteración, antigorita, clorita, talco y minerales opacos; y actinolita como mineral formado por incipiente metamorfismo regional facies esquistos verdes. Son rocas con metamorfismo regional de bajo grado y una importante alteración hidrotermal

Este complejo ultramáfico sobreyace tectónicamente a rocas metavolcánicas de la unidad complejo volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, como consecuencia de cabalgamiento de naturaleza ofiolítica y esta cubierta en su

extremo norte por productos volcánicos terciarios. En ocasiones, la piroxenita es cortada por diques de diversas composición de la unidad Conjunto Plutónico La Luz (Figuras 8 y 9)..

Estas rocas representan una unidad alóctona de naturaleza ofiolítica cuya edad se ha asignado al Jurásico tardío (Martínez et al., 1987).

SISTEMA CRETACICO

Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato (Kcsq).

Término utilizado informalmente por Martínez op. cit., esta unidad aflora ampliamente a todo lo largo de la sierra y en lo que corresponde al presente estudio, aflora en el extremo superior derecho ocupando gran parte de las zonas topográficamente más altas, con una extensión superficial aproximada de 70 km². Esta unidad se ha dividido en dos componentes que presentan notables diferencias litológicas.

Componente sedimentario.- Representado por lutitas, calizas, areniscas y conglomerados.

- Las lutitas y calizas se presentan en estratos delgados y alternancias rítmicas; las primeras tienen una composición limo-arcillosa o cuarzo-argilácea-clorítica en donde “flotan” aislados clastos de naturaleza cuarzosa o feldespática. Las calizas presentan una fina laminación en donde niveles limosos de composición cuarzo-carbonática se intercalan con niveles calcáreo-argiláceos de lodo calcáreo y minerales arcillosos cloritizados, aunque existen también calizas de puro lodo calcáreo (micritas).
- Las areniscas se presentan en mayor cantidad y son de color verde, impuras, en estratificación gradada. Texturalmente pueden ser clasificadas como grawacas, con fragmentos de naturaleza lítica o

cuarzosa, escasamente feldéspatica. La matriz es argilácea, cloritizada, con algún componente limosos subordinado.

- Los conglomerados son muy escasos, en bancos gruesos, de color verde, con clastos bien redondeados de naturaleza ígnea, sedimentaria y metamórfica.

Componente volcánico.- Se caracteriza por la presencia de lavas de composición basáltica, andesítica y dacítica, generalmente en tonos que varían del verde oscuro al verde manzana, en estructuras masivas o almohadilladas cementadas por material calcáreo, con niveles de brechas, tobas y detríticos de la misma composición.

Mineralógicamente estas rocas presentan plagioclasa (albita), clorita, calcita, minerales opacos y cuarzo (Martínez, op. cit.)

La paragénesis mineral de esta unidad es compatible con fenómenos de espilitización, metamorfismo regional de bajo grado y alteración hidrotermal (propilitización) aunque indudablemente es el metamorfismo el fenómeno que más claramente caracteriza a esta unidad.

En la zona del Distrito Minero de Guanajuato, éstas facies han sido denominadas de manera informal como Formación Esperanza (componente sedimentario) considerada como unidad basal y Formación la Luz (componente volcánico) considerada como unidad sobreyacente.

Esta unidad se caracteriza por presentar fuertes plegamientos, productos de dos periodos de deformación compresiva y por la intrusión del Granito Comanja.

Con base a estudios paleontológicos Corona (1987) le asigna una edad que corresponde al Titoniano-Valanginiano (**Figuras 8 y 9**).

Conjunto Plútonico La Luz (Kcpl)

Nombre dado por Martínez op. cit., con este nombre se señalan los diversos afloramientos expuestos al norte del poblado de Duarte y que en conjunto totalizan 14.5 km². Se trata de cuerpos plutónicos dioríticos y graníticos que son encajonados en la unidad anterior e intrusionados a su vez por numerosos diques, de los cuales se pueden distinguir:

- *Diorita La Palma*: Rocas masivas, cristalinas, de colores oscuros en un complejo intrusivo que incluye términos dioríticos, microdioríticos y gabroicos con gran variabilidad textural.

La paragenésis de las dioritas y granitos está representada por plagioclasa, hornblenda, clinopiroxeno, cuarzo ocasional, minerales accesorios (apatita y opacos) y actinolita, clorita, epidota y sericita como minerales secundarios.

- *Tonalita Cerro Pelón*: Rocas masivas, cristalinas de color blanco, petrográficamente clasificadas como plagiogranitos. Son rocas con texturas holocristalinas, hipidiomórfica-granular, con intercrecimientos mirmekíticos. Su mineralogía incluye oligoclasa, cuarzo, biotita, muscovita, minerales secundarios (clorita, esfena, epidota y sericita) y minerales accesorios de apatita.

Como rasgo común a toda la unidad es el grado de metamorfismo y alteración que representan dichas rocas.

Sobreyace tectónicamente a las facies volcanosedimentarios de la unidad anterior (**Figuras 8 y 9**).

La edad corresponde al Cretácico temprano (Martínez, 1989).

II.4.2 Eratema Cenozoico

Abarca depósitos de ambiente continental, donde diversas fases de volcanismo y plutonismo son acompañadas por fases de sedimentación. Entre el

conjunto basal mesozoico y la cubierta volcanosedimentaria cenozoica, se encuentra un intrusivo de composición ácida, conocida como granito Comanja, que aflora a lo largo de casi toda la Sierra de Guanajuato. No muestra metamorfismo regional, pero si una amplia aureola de metamorfismo de contacto que produjo varios tipos de rocas, de acuerdo a la roca encajonante intrusionada (Vasallo y Martínez-Reyes, 1998).

SISTEMA TERCIARIO

Granito Comanja (tgco).

Nombre asignado por Quintero, 1986. Cuerpo intrusivo de dimensiones batolíticas de composición granítica que aflora en toda la SG, presentando sus mejores afloramientos en las inmediaciones de Comanja de Corona, Jalisco. Es una roca granítica sin deformación importante, pero que presenta una aureola de metamorfismo de contacto en sus límites con la roca encajonante.

Forma un batolito de aproximadamente 160 km². Los afloramientos no son continuos, si no que están interrumpidos por las rocas sujetas a la intrusión.

El granito Comanja siempre está aflorando en los sitios donde la cubierta volcánica cenozoica ha sido removida por la erosión, quedando los afloramientos del intrusivo en los llanos y en los bajos topográficos de la Sierra de Guanajuato.

Con lo que respecta a la litología, el Granito Comanja es una roca leucocrática, fanerítica, con fenocristales grandes y de tamaño intermedio de feldespato potásico dentro de una matriz de cuarzo y feldespato con algunos cristales de biotita.

La paragénesis mineral la constituyen (Quintero-Legorreta, 1992): cuarzo anhedral, ortoclasa, plagioclasa, biotita y minerales accesorios (zircón, apatita y fluorita).

La afinidad magmática del Granito Comanja es calciálica (Ortiz-Hernández, 1988); sin embargo, han sido hallados enclaves de rocas graníticas

con tendencia alcalina en el mismo Granito (Chiodi et al., 1987), lo que señala una evolución compleja del magmatismo granítico en la Sierra de Guanajuato.

Esta unidad marca el inicio de una paleogeografía continental en la Sierra de Guanajuato (Martínez, 1989). y se encuentra en discordancia, con todas las unidades que cortó, durante su intrusión (**Figuras 8 y 9**).

La edad absoluta definida para esta unidad según el método K-Ar, en biotita se encuentra entre 55 ± 4 y 58 ± 5 m.a., que corresponde al Eoceno temprano. (Mugica-Albarran, 1983)

Conglomerado Guanajuato (Tcg).

Nombre asignado por Quintero, 1986. Unidad de estratificación gruesa generalmente inclinada, presenta un color rojizo con tonalidades verdosas, constituido en su mayoría por clastos de diverso tamaño y origen, inmersos en una matriz arenosa, cementada por óxidos de hierro y/o carbonatos con horizontes de areniscas, limolitas y lutitas. Aflora en los alrededores de la Ciudad de Guanajuato con una extensión superficial de aproximadamente 26.5 km^2 . Cubre discordantemente al Granito Comanja y subyace en discordancia angular a la Ignimbrita Cuatralba.

Los fragmentos clásticos y la matriz del Conglomerado Guanajuato contienen los productos de la desintegración de varios tipos de rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas, variando la proporción de éstas de lugar en lugar (Quintero-Legorreta, 1992).

Petrográficamente es una roca holocristalina, inequigranular, cuya paragénesis mineral está constituida por cuarzo (anhedral), ortoclasa, (anhedral-micropertítica), plagioclasa (oligoclasa, anhedral a subhedral, zoneada, parcialmente sericitizada), biotita (parcialmente cloritizada), minerales accesorios (zircon, apatito y fluorita).

Con base a relaciones estratigráficas y evidencias paleontológicas reportadas por Ferrusquía (1987) se le asigna una edad Eoceno medio-Eoceno tardío (Figura 9).

Andesita Bernalejo (Tab)

Término utilizado por Quintero, 1986. Unidad andesítica localizada en el poblado de Bernalejo, con una extensión territorial de aproximadamente de 9.5 km².

Roca muy resistente a los procesos erosivos, y excepcionalmente presenta algunas vesículas y fracturas algunas veces rellenas de calcita. En el campo presenta un color gris oscuro con tonalidades violáceas, debido a la presencia de vidrio volcánico y al carácter microcristalino de su matriz. Presenta una textura que va de microcristalina a porfirítica que consiste en fenocristales con zonación de plagioclasa (andesina), embebidos en una matriz microcristalina hialopilitica. Además son identificados fenocristales escasos de clinopiroxeno (augita) y de ortopiroxeno (hiperstenas). (Quintero-Legorreta, 1992)

El contacto inferior de la Andesita Bernalejo no se observa, debido a que los afloramientos son una pequeña ventana entre la Ignimbrita Cuatralba, consecuencia de los procesos erosivos (afloramiento la Joya) y fallamiento (afloramientos La Reserva y norte de San Francisco del Rincón) de esta última unidad; sin embargo se observa una discordancia con el Granito Comanja (Quintero, 1989) En su contacto superior presenta una discordancia con la ignimbrita Cuatralba, separándolas un conglomerado de 1.5 m de espesor (norte de San Francisco del Rincón). Se encuentra en contacto por falla con la unidad Terciario granular indiferenciado (Hernandez-Laloth, 1991).

De acuerdo a su posición estratigráfica y considerando válidas las edades del Conglomerado Guanajuato y La Ignimbrita Cuatralba, a esta unidad se le asigna una edad tentativa del Oligoceno temprano. Además se le correlaciona con la Andesita Bernalejo, con la Andesita El Gigante que aflora en el cerro del mismo

nombre (**Figuras 8 y 9**), ubicado a 20 km al NNw de la Ciudad de Guanajuato (Martínez, 1989).

Ignimbrita Cuatralba (Ticu)

Nombre asignado por Quintero, 1986. Unidad de material volcánico principalmente de origen piroclástico depositado sobre las rocas antiguas de la Sierra de Guanajuato SG. Aflora en la Sierra Cuatralba, en las mesetas que están en las cercanías de León y Lagos de Moreno, y en el borde sudoccidental de la Sierra de Guanajuato con una extensión territorial de aproximadamente 368 km². Que representa los mayores afloramientos, después del material aluvial en toda la zona de estudio. Esta dividida en dos miembros informales, lo cual hace más fácil su descripción:

- Miembro Inferior. Toba masiva de color café claro a crema, poco consolidada compuesta de cenizas, con escasos fragmentos de líticos y pómez, con poca resistencia a la erosión lo que lo hace poco detectable.
- Miembro Superior. Ignimbrita riolítica de espesor variable y textura porfírica, presenta abundancia de fenocristales de cuarzo y escasas plagioclasas empacados en una matriz muy fina. Se pueden observar diaclasas columnares y a diferencia del miembro inferior siempre está presente en los afloramientos de la unidad.

Estas rocas descansan en discordancia sobre el Conglomerado Guanajuato en el flanco sur de la SG; En el SW del Valle de León, el miembro superior descansa en discordancia sobre la Andesita Bernalejo. Por otra parte esta unidad, subyace en discordancia a las unidades Terciario Granular Indiferenciado y Basalto Cubilete (**Figuras 8 y 9**).

De acuerdo a relaciones estratigráficas, le corresponde a la Ignimbrita Cuatralba una edad miocénica, lo que permite correlacionarla con el "supergrupo volcánico superior" de la Sierra Madre Occidental (McDowell y Clabaugh, 1981), cuyas edades fluctúan entre 34 y 23 m.a. (Oligoceno-Mioceno temprano). La Falla

del bajío, que afecta a dicha unidad y pertenece a la Veta Madre del distrito minero de Guanajuato que presenta una mineralización formada hace $29 \pm$ m.a. (Gross, 1975), nos ayuda a sustentar la edad relativa de esta unidad.

También se le correlaciona con la Unidad II y con la parte inferior de la Unidad III de Nieto-Obregón y colaboradores (1985), en el Estado de Jalisco, que corresponde al Mioceno.

Basalto Dos Aguas (Tbda)

Nombre dado por Quintero, 1986. Estructura volcánica de basalto de olivino de color gris oscuro y textura microcristalina, asociado con productos piroclásticos de la misma composición. Ocupa una superficie de aproximadamente 42 km^2 , al noroccidente de la ciudad de León.

Esta unidad forma un solo afloramiento continuo, constituyendo éste un alto topográfico conocido con el nombre de cerro Dos Aguas.

En la porción central del cerro existe una depresión que parece ser el cráter del volcán y por el cual fueron emitidas las lavas basálticas.

Microscópicamente, el Basalto Dos Aguas presenta una matriz constituida por cristales subhedrales de labradorita y cantidades subordinadas de piroxeno subhedral, en un arreglo de textura traquítica. Embebidos en esta matriz, están presentes algunos cristales de olivino interdigitados, así como algunos cristales subhedrales de orto y clinopiroxeno y, escasamente de labradorita (Quintero-Legorreta, 1992).

El Basalto Dos Aguas se encuentra interestratificado con la Ignimbrita Cuatralba, pudiéndose observar el contacto inferior al oriente de Jaramillo de Abajo. El contacto superior es observable sobre los cortes del libramiento de la carretera que comunica a León con Lagos de Moreno, al norte de León.

De acuerdo con su posición estratigráfica, le corresponde una edad miocénica tardía, pudiéndosele correlacionar con el basalto calcialcalino de la

“Unidad III” de la región Santa rosa-San Pedro Anasco, Jal., el cual tiene una edad de 8.5 ± 0.18 m.a. (Nieto-Obregón et al., 1985), correspondiente al Mioceno tardío (Figura 9).

Terciario Granular Indiferenciado (Tgi)

Se le asigna este nombre a todo aquel material sedimentario continental exceptuando al aluvión, que aflora en forma de lomeríos redondeados y abarca una extensión superficial de 275 km^2 , aproximadamente.

Esta Unidad se compone de:

Conglomerados policimáticos de forma masiva y color rojo con clastos que van de subredondeados a redondeados de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, pobremente clasificados.

Areniscas de colores claros interestratificadas en alternancia irregular con limolitas que van de color crema a amarillo y lutitas físciles o compactas que varían de color verde a amarillo, en estratos delgados a medios y grado de compactación variable.

Calizas que varían de microcristalinas a arenosas o arcillosas de color crema a café claro y presentan ocasionalmente nódulos y lentes de sílice, con algunos horizontes que tienden a ser preponderadamente margas.

Sobreyace a la Ignimbrita Cuatralba discordantemente, subyace concordantemente al Basalto el Cubilete, (Figura 9). se encuentra en contacto por falla normal con la Andesita Bernalejo. De acuerdo a relaciones estratigráficas se le da una edad de Mioceno-Pleistoceno (Hernández, 1991).

SISTEMA CUATERNARIO

Gabro Arperos (Qgar)

Unidad denominada con este nombre por Martínez, 1987. Roca hipabisal de dimensiones considerables, emplazado en las unidades estratigráficas anteriores.

Estas evidencias deformativas que afectan a las rocas del basamento nos hacen suponer que el comportamiento actual de las mismas es el de barreras impermeables, que funcionan en el subsuelo como límite impermeable inferior del sistema acuífero del Valle de León.

Por otra parte las rocas volcanoclásticas continentales en cambio fueron afectadas por una tectónica cenozoica distensiva que produjo numerosas fallas normales en la región y que afectó inclusive a las rocas de las unidades basales.

Dentro de los rasgos estructurales que se manifiestan en esta zona, se puede distinguir un estilo de deformación cenozoico, con eventos tectónicos de distensión, causantes de los diversos pilares y fosas tectónicas, que caracterizan a la Región del Bajío.

Es importante mencionar que existen tres sistemas característicos de fallas normales con direcciones preferenciales NW-SE, NE-SW y N-S, bien identificados y que determinan el actual tamaño y geometría del sistema acuífero del Valle de León y por lo tanto tienen vital relevancia en el desarrollo interpretativo del patrón de flujo de agua subterránea (**Figura 10**).

Las edades de estas fallas actualmente son tema de discusión y por lo tanto es difícil asignarles una edad relativa. Estas fallas normales presentan diferentes edades en distintos segmentos dentro de un mismo sistema de fallas e incluso se han podido observar indicios de reactivación en algunas de ellas (Hernández, 1990).

Las fracturas se presentan bien desarrolladas incluso bastante densas en la Sierra de Guanajuato y los Altos de Jalisco. Particularmente las rocas ignimbríticas, los basaltos y las andesitas son las que presentan el mayor fracturamiento dentro del área de estudio, con lo que se demuestra su gran potencial de infiltración.

En la zona de la Sierra de Guanajuato, las fracturas no son lo suficientemente profundas como para argumentar que la infiltración sea lo bastante considerable, como lo demuestran los grandes volúmenes de

escurrimiento que se generan en esta sierra; en cambio en la zona de los Altos de Jalisco, el fracturamiento parece tener mayor importancia en la infiltración del agua meteórica.

Los esfuerzos distensivos son los causantes de pilares y fosas tectónicas, que finalmente pueden conducir a la formación de cuencas hidrológicas y a sistemas acuíferos.

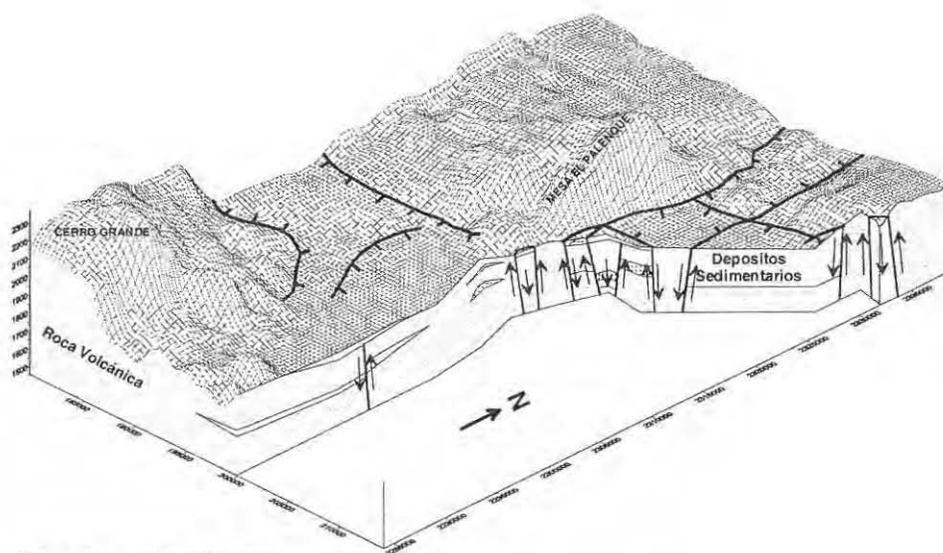
Según los lineamientos estructurales vistos en la cartografía del área, se aprecia que existen varios pilares tectónicos, los que están separados por una serie de escalones estructurales que se van profundizando hacia el centro de los distintos valles de la región hasta formar fosas tectónicas asimétricas, como es el caso del Valle de León, donde probablemente el escalón más profundo sea el que se localiza al sur de la ciudad del mismo nombre, en la zona del poblado Los Ramírez.

Las fosas se encuentran rellenas con grandes espesores de material sedimentario derivado de la desintegración de las partes topográficas más altas que rodean al valle.

Desde el punto de vista hidrológico las zonas de fosas constituyen importantes recéptaculos tanto de sedimentos como de agua, mientras que los pilares suministran los materiales clásticos y tiene la posibilidad de comportarse como zonas de recarga dependiendo de la disposición de las capas en caso de ser sedimentarias, y el fracturamiento tanto en rocas sedimentarias como en rocas volcánicas.

A partir de cortes litológicos de pozos, se construyeron 3 secciones geológicas para conocer mejor la disposición de las rocas en el subsuelo, procurando plasmar en ellas la mayor cantidad de información disponible y tratando de que estas fueran lo más representativas de las condiciones geológico - estructurales presentes en la zona de estudio (**Figura 11**).

Es importante indicar que la información geológica contenida en las secciones, es el resultado de la reinterpretación de los datos consignados en los registros litológicos así como de la información geofísica disponible.



Tomado de Ramos y Rodríguez, 1998.

Figura 10. Bloque diagramático del Río Turbio.

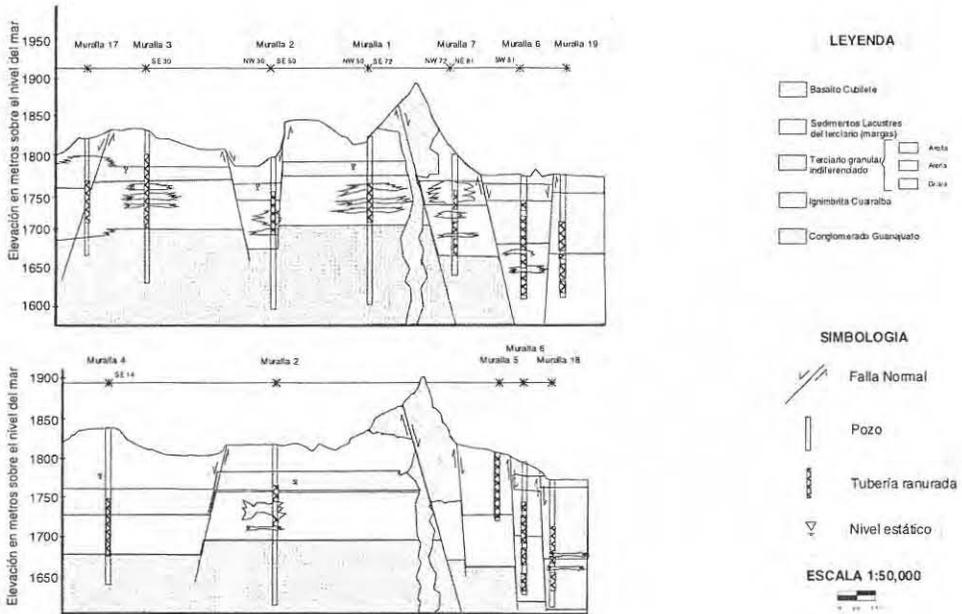


Figura 11. Secciones geológicas y estructurales del área de estudio

III MODELO GEOHIDROLÓGICO CONCEPTUAL.

III.1 Conceptos básicos

Hidrogeología

Estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en las zonas saturada y no saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre (Aparicio, F.J. 1999)

Acuífero

El acuífero es el medio rocoso en que se mueve el agua subterránea.

Normalmente el concepto de acuífero se confina en rocas que conducen cantidades de agua económicamente utilizables (J. Werner, 1996).

Funciones del acuífero

El acuífero es:

- Almacén de agua subterránea
- Transmisor de agua subterránea
- Medio de intercambio geoquímico

Las propiedades hidráulicas más importantes de un acuífero son la de:

- Transmitir agua. Parámetros: Permeabilidad k , conductividad hidráulica K , transmisividad T
- Almacenar agua: Parámetros: Capacidad de almacenamiento (coeficiente de almacenamiento) S , porosidad n , rendimiento específico S_y .

Dentro de los materiales geológicos hay que tener en cuenta una serie de parámetros que influyen en el movimiento del agua.

Porosidad (n)

La porosidad es la parte o porcentaje del volumen de poros en un acuífero rellenado de agua.

Desde el punto de vista cualitativo la **porosidad** es la capacidad de una roca de tener poros, entendiendo por poro cualquier espacio de una masa rocosa que no esté ocupado por un material sólido, sino por un fluido (agua, aire, petróleo,...).

Cuantitativamente, la porosidad se define como el espacio total total ocupado por poros en un volumen determinado de roca.

$$\text{Porosidad total } n = (V_h / V)100$$

V_h : Volumen de huecos

V: Volumen total

Porosidad de algunos tipos de rocas (en %):

Gravas, 25-40; arenas y gravas, 25-30; arenas, 25 a 47; arcillas, 44-50; limos, 34 a 50; caliza, 1-17; arenisca, 4-26; yeso, 4

Pero no todos los poros son iguales, y en función de su tamaño el agua circulará más o menos libremente. A grandes rasgos, distinguimos tres tipos de porosidad:

Microporosidad <0.1 mm

Porosidad capilar 0.1-2 mm

Macroporosidad > 2 mm

Los poros pueden ser el resultado de procesos muy diferentes; unos (*porosidad primaria*) se originan al mismo tiempo que las rocas en los que se encuentran, por ejemplo los que existen entre los diversos fragmentos que constituyen una roca detrítica (arena de una playa o de una duna, depósitos aluviales de un río, etc.); otros (*porosidad secundaria*) se originan con

posterioridad a la formación de la roca y a menudo por procesos completamente diferentes a los que dieron origen a aquella, por ejemplo, fisuras o diaclasas en una roca fracturada, o lo que quizás es mejor conocido, la red de conductos y cavidades producida por disolución de rocas solubles (simas, sumideros o cuevas). (Figura 12).

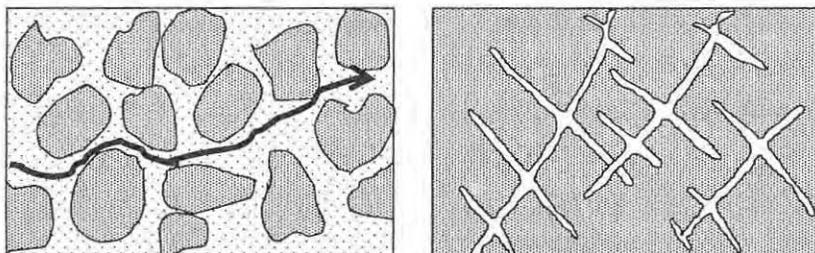


Figura 12. El dibujo de la izquierda podría estar a escala natural o tener 50 X. En cambio, el de la derecha, puede ser a escala o estar representado, una realidad de varios km.

Estas características de porosidad influyen decisivamente en el comportamiento hidrogeológico de las rocas.

Igualmente importantes son también las consecuencias que derivan del hecho de que los poros pueden tener muy distinto tamaño: son muy pequeños los que existen entre partículas de arcilla (muy por debajo de 1 mm), pero pueden ser de orden métrico o superiores los producidos por disolución. En los poros de muy pequeño tamaño el agua está firmemente adherida a las paredes del poro por varios mecanismos, de los que el más importante es la tensión superficial; en tales poros el agua es retenida contra la acción de la gravedad ("*capacidad de retención específica*") y no puede fluir libremente. Por el contrario, en los poros de cierto tamaño una parte del agua (la no retenida del modo descrito) fluye libremente por gravedad ("*agua gravífica*")

En consecuencia, la porosidad describe la capacidad de las rocas para albergar agua, pero no la cualidad -tan importante desde el punto de vista hidrogeológico- de que el agua pueda circular en el seno de la roca. Esta última cualidad es la permeabilidad, que requiere no sólo que la roca sea porosa sino que además los poros tengan un cierto tamaño para contener "agua gravífica"; a la porosidad correspondiente al agua gravífica se la denomina porosidad eficaz.

La porosidad eficaz depende de la forma, tamaño y disposición de los granos; disminuye con el diámetro y aumenta con la uniformidad.

Coeficiente de almacenamiento. (S)

A diferencia de la porosidad, el coeficiente de almacenamiento S es el volumen de agua por unidad de superficie del acuífero, que se extrae o almacena en éste, bajo un cambio unitario de potencial (p.ej. por un descenso del nivel piezométrico) (J. Werner, 1996).

Permeabilidad (k)

Es la capacidad que tiene una roca de transmitir el agua a través suyo. En el caso de las arcillas podríamos decir que son unos materiales muy porosos pero poco permeables, porque sus huecos no están conectados entre sí. (J. Werner, 1996). (Figura 13).

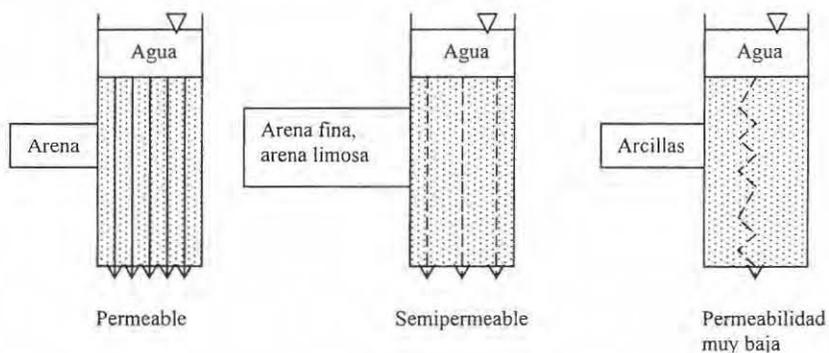


Figura. 13 Tres categorías de sustratos de permeabilidad diferente

Transmisividad (T)

Es la cantidad de agua que transmite un material (k) en una unidad de superficie por unidad de tiempo (b). Ésta es proporcional de la permeabilidad.

$$T = k * b$$

Conductividad hidráulica-permeabilidad intrínseca (K)

La conductividad hidráulica K depende tanto de la permeabilidad del acuífero como de las propiedades físicas del fluido. Por eso el coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica) se refiere al comportamiento del sistema roca-fluido y vale estrictamente sólo para el sistema individual considerado. Dos acuíferos exactamente iguales, pueden tener conductividades hidráulicas diferentes por las temperaturas y viscosidades del agua subterránea diferentes. (J. Werner, 1996).

Anisotropía e inhomogeneidad

Un acuífero (o una parte de el) es isótropo, si sus características físicas (especialmente su permeabilidad) son constantes en las tres direcciones del espacio. En el caso contrario es anisótropo. (J. Werner, 1996). Se diferencia entre anisotropía vertical y anisotropía horizontal. (Figura 14).

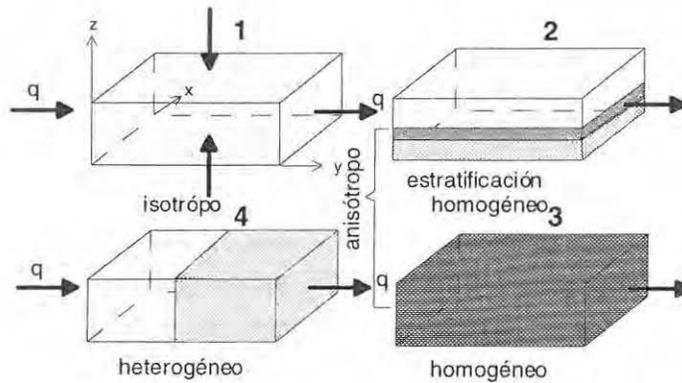


Figura. 14 Cuatro casos de isotropía (1), anisotropía (2,3,4), homogeneidad (1,2,3) y heterogeneidad (4). (Tomado de Werner 1996).

Un acuífero (o una parte de él) es homogéneo si presentan en todos los puntos en el sentido del escurrimiento características físicas constantes. En el caso contrario es heterogéneo. Un ambiente permeable homogéneo puede ser isótropo o anisótropo. Un ambiente permeable heterogéneo siempre es anisótropo (J. Werner, 1996).

Clasificación y características de acuíferos

En función de las características de las rocas, se puede hacer la siguiente clasificación:

Acuifugo: No posee capacidad de circulación ni de retención de agua

Acuicludo: Contiene agua en su interior, incluso hasta la saturación, pero no la transmite

Acuitardo: Contiene agua y la transmite muy lentamente

Acuífero: Almacena agua en los poros y circula con facilidad por ellos.

Desde otro punto de vista, se define un **acuífero** como aquella unidad geológica capaz de almacenar y transmitir agua susceptible de ser explotada en cantidades económicamente apreciables para atender diversas necesidades.

Zonas de un acuífero

Si admitimos que los acuíferos reciben agua de la precipitación (aunque puede recibirla por otras vías), se pueden definir tres zonas: zona de alimentación o recarga, zona de circulación y zona de descarga.

La zona de alimentación es aquella donde el agua de precipitación se infiltra. La zona de descarga es la zona en donde el agua sale del acuífero, como puede ser un manantial o la descarga al mar o a un río. La zona de circulación es la parte comprendida entre la zona de alimentación y la zona de descarga, en donde el agua se desplaza por gravedad.

Tipos de acuíferos.

- Según las características litológicas: detríticos, carbonatados.
- Según el tipo de huecos: poroso, kárstico, fisurado.
- Según la presión hidrostática: libres, confinados y semiconfinados (**Figura 15**).

Acuíferos libres

También llamados no confinados o freáticos.

En ellos existe una superficie libre y real del agua encerrada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica.

El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. Su posición no es fija sino que varía en función de las épocas secas o lluviosas.

Si perforamos total o parcialmente la formación acuífera, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo forman una superficie real: superficie freática o piezométrica, que coinciden.

Acuíferos confinados

También llamados cautivos, a presión o en carga.

El agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. No existe zona no saturada.

Si perforamos, el nivel de agua asciende hasta situarse en una determinada posición que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga.

Si la topografía es tal que la boca del pozo está por debajo del nivel del agua, el pozo es surgente o artesiano; si no es así el nivel del agua ascenderá hasta el nivel correspondiente, pero no será surgente.

La superficie piezométrica es una superficie ideal resultante de unir todos los niveles en diferentes perforaciones que capten el acuífero.

Acuíferos semiconfinados

El muro y/o techo no son totalmente impermeables sino que son acuitardos y permiten la filtración vertical del agua y, por tanto, puede recibir recarga o perder agua a través del techo o de la base. Este flujo vertical sólo es posible si existe una diferencia de potencial entre ambos niveles.

Un mismo acuífero puede ser libre, cautivo y semicautivo según sectores, geográficos.

Acuíferos colgados

Se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.

Acuíferos multicapa

Son un caso particular (y frecuente) de acuíferos en los que se suceden niveles de distinta permeabilidad (k).

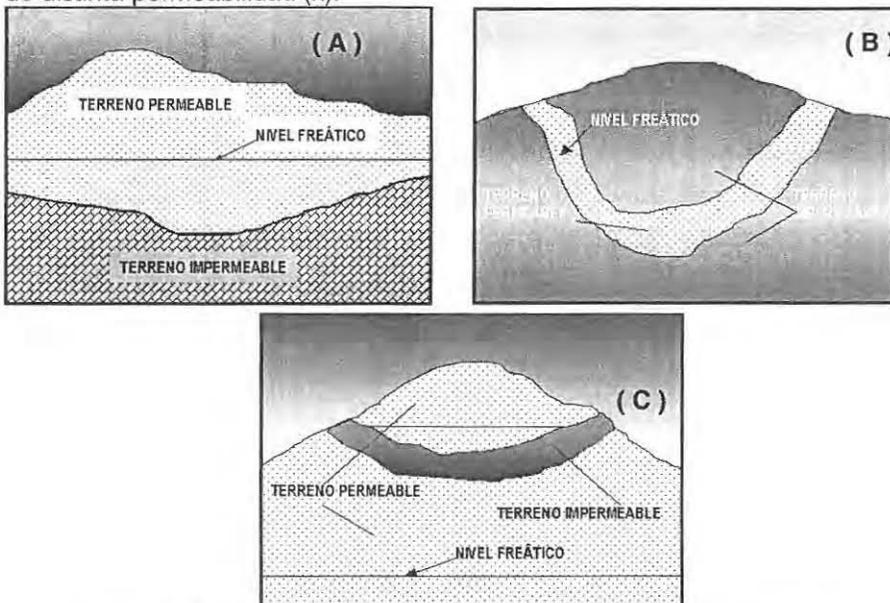


Figura 15. Tipos de acuíferos (A) libre, (B) confinado, (C) Colgado

III.2 Mecanismos de flujo del agua subterránea.

Para poder entender las definiciones descritas es necesario conceptualizar el escenario del flujo del agua subterránea. En este trabajo se toma como base a un diagrama esquemático propuesto por (Tóth, 2000), en donde se incluyen estos conceptos. **(Figura 16).**

Un modelo conceptual se define, como la representación simplificada de la realidad física, para intentar explicar el comportamiento de algunos aspectos que actúan en un determinado sistema, en este caso, el sistema de agua subterránea.

Flujo de agua subterránea.

El movimiento natural del agua tanto en superficie como en el subsuelo puede generar algunos fenómenos como salinidad de suelo, cambio en la composición química del agua subterránea, formación de barrancas, deslizamiento de masas, anomalías geotérmicas positivas y negativas, tipo y calidad de cubierta vegetal, dolomitización de calizas, morfología kárstica, diagénesis de ciertos minerales arcillosos y ciertos tipos de acumulación de hidrocarburos, entre otros. Los sistemas de flujo funcionan como mecanismos de transporte y distribución de estos fenómenos (Tóth, 2000).

En el sistema de flujo del agua subterránea es necesario considerar dos causas fundamentales, las cuales tienen lugar simultáneamente a todas las escalas de espacio y tiempo, aunque con distintas intensidades:

- 1) La interacción del agua subterránea con su entorno, en donde incluye el relieve topográfico, porosidad, permeabilidad y composición de la roca, además de la presión y la temperatura.
- 2) La sistematización, distribución y jerarquización del flujo en donde se incluye la cantidad y composición del agua, además de la geometría del área en estudio.

En una cuenca, el flujo subterráneo es controlado por la topografía y la geología. Esto proporciona la distribución espacial de patrones de aguas subterráneas y sus efectos pueden ser identificados y posteriormente caracterizar

segmentos del flujo subterráneo, es decir, se puede relacionar la causa (flujo subterráneo) con el efecto, así como el conjunto con las condiciones y fenómenos naturales que se producen.

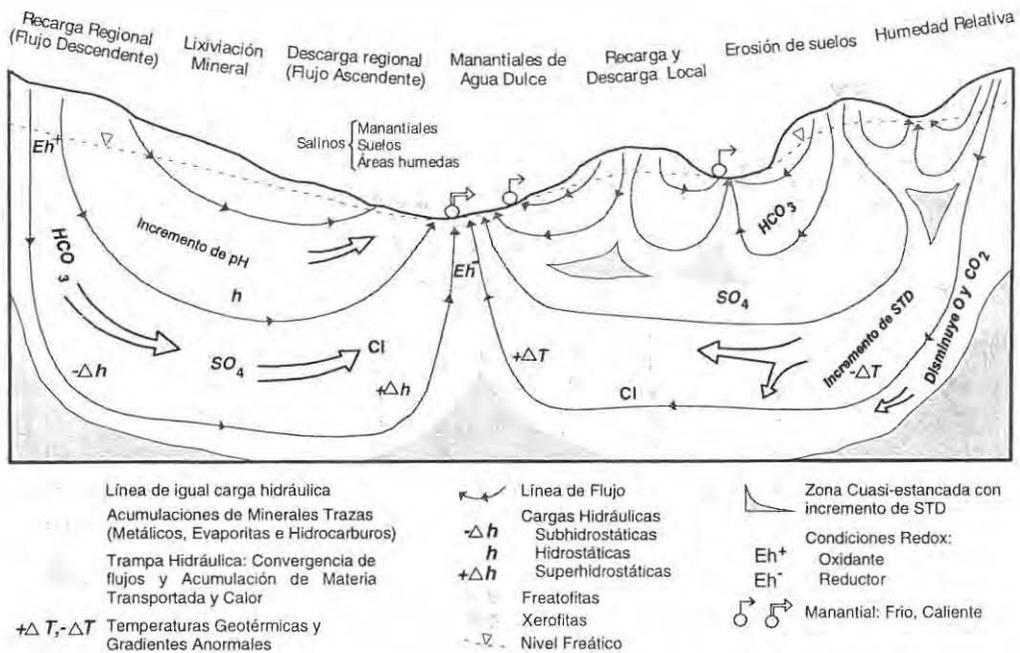


Figura 16. Diagrama conceptual de una cuenca, se aprecian los flujos regionales intermedio y locales, así mismo se aprecia la relación de efectos y manifestaciones debido al flujo del agua subterránea manejado por gravedad, (Tóth 2000).

Tipos de flujo y escenario hidrológico.

Algunos flujos subterráneos generalmente son insuficientes para proporcionar agua subterránea en cantidades significativas, debido a que muchos de estos están autolimitados en tiempo y en espacio. El flujo de agua subterránea regional o de cuenca es un mecanismo capaz de producir y mantener las condiciones de equilibrio requerido para la distribución de fenómenos naturales. Los sistemas de flujos de agua subterránea para su mejor entendimiento pueden ser comparados con bandas transportadoras, desde su región de origen (áreas de movilización y cargamento), hasta sus regiones terminales (áreas de liberación y depositación), pasando por segmentos intermedios que funcionan como ambientes de transferencia de masa y energía relativamente estables.

La distribución del flujo de agua subterránea se debe a las condiciones hidrogeológicas y fenómenos naturales asociados, en donde el flujo es controlado por la gravedad.

Sistemas de flujo

Un sistema de flujo de agua subterránea puede ser definido como un conjunto de líneas de flujo, en el que dos líneas adyacentes de un determinado punto de la región, permanecerán de esa manera a través de todo el dominio del sistema, pudiendo intersectarse en cualquier lugar con una superficie continua, donde el flujo es en una dirección (Tóth, 1963)

La configuración de cualquier sistema de flujo puede ser definida por aquellas superficies que lo engloban .

El patrón de flujo es la distribución espacial de los sistemas de flujo, y el conocimiento del mismo implica conocer la dirección e intensidad del flujo de agua subterránea en un punto cualesquiera de la región (Tóth, 1970)

En la mayoría de las redes de flujo y áreas de campo se pueden diferenciar tres tipos básicos de sistemas de flujo de agua subterránea: locales, intermedios y regionales (Tóth, 1963) (**Figura 17**).

El aspecto topográfico condiciona el desarrollo de los diferentes sistemas de flujo, en donde existe un relieve local despreciable, sólo se desarrollarán sistemas regionales y por lo contrario, donde exista un relieve local pronunciado, se desarrollarán sistemas locales (Freeze and Cherry, 1979)

- *Sistema de flujo local.* Es el sistema de flujo que tiene su área de recarga en un alto topográfico y el área de descarga en un bajo topográfico (Tóth, 1963). Los sistemas locales se pueden correlacionar con aguas de bajas concentraciones de sólidos totales disueltos. La temperatura es uniforme y se aproxima a la media anual debido a que la profundidad de circulación es muy somera y cerca o dentro de las áreas de recarga (Domenico, 1972)
- *Sistema de flujo intermedio.* Es aquel sistema que aunque sus áreas de recarga y descarga no ocupen lugares de elevación alta y baja, respectivamente en la cuenca, uno o más altos y bajos topográficos se localizan entre ellos (Tóth, 1963). En este tipo de sistemas, la concentración de sólidos totales disueltos es intermedia, (mayor que en los sistemas locales y menor que en los regionales), la temperatura varía ampliamente, por que la profundidad de circulación es somera y profunda (Domenico, 1972)
- *Sistema de flujo regional.* Se considera sistema de flujo regional si el área de recarga se encuentra relativamente cerca del parteaguas y el área de descarga se localiza en el fondo de la cuenca (Tóth, 1963). En este sistema de flujo la concentración de sólidos totales disueltos es alta, relativamente a los sistemas locales e intermedios. La temperatura es uniformemente alta, mostrando que el agua subterránea ha circulado por zonas profundas.

Cada uno de los sistemas de flujo está caracterizado por tres componentes

1. Componente de flujo descendente o de recarga; en el que el movimiento del agua se aleja del nivel freático y pertenece (overlain) a el área de recarga.
2. Componente de flujo lateral o de transferencia , con el movimiento del agua más o menos paralelo a el nivel freático y que pertenece (overlain) al área de flujo horizontal (mid-line or hinge-line).
3. Componente de flujo ascendente o de descarga; en el que el movimiento del agua se acerca al nivel freático y pertenece (overlain) a el área de descarga.

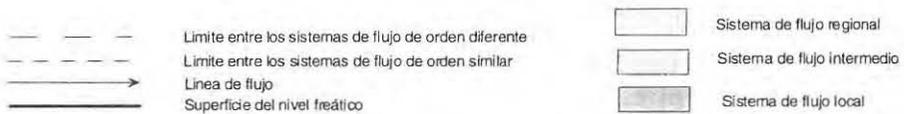
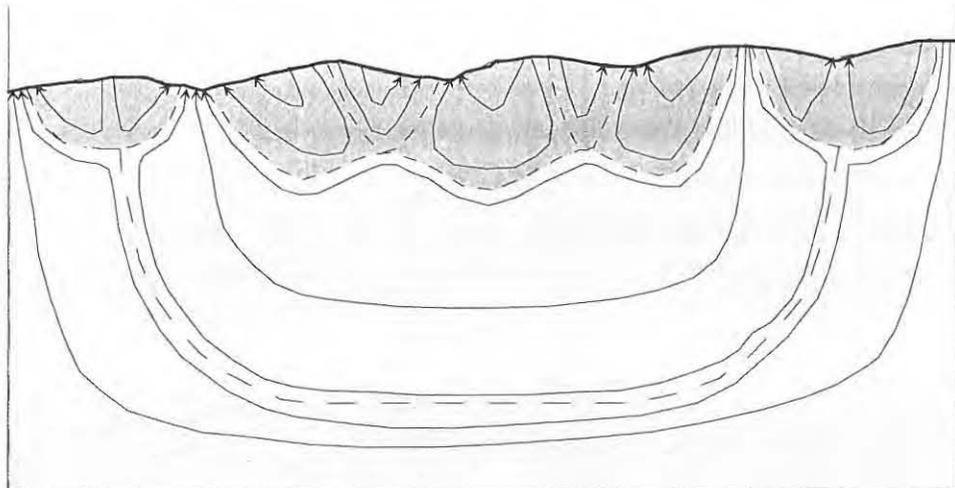


Figura 17. Modelo conceptual de régimen de agua subterránea, (Tomado de Tóth, 1970)

Rasgos Indicadores de sistemas de flujo.

El movimiento del agua en el subsuelo, produce ciertos efectos en la superficie del terreno, en función del tipo de componente del sistema de flujo y del patrón de flujo. Para la comprensión del agua en el subsuelo se requiere del reconocimiento de estos efectos y el conocimiento de la naturaleza de los afloramientos del agua subterránea.,

Características de las áreas de recarga.

- Movimiento descendente de agua subterránea
- Deficiencia de humedad
- Bajo valor de conductividad eléctrica
- Mínimas concentraciones de sólidos totales disueltos
- Niveles estáticos relativamente profundos
- A mayor profundidad la carga hidráulica es más pequeña
- Vegetación escasa
- Ausencia de suelos salinos
- Baja temperatura.

Características de las áreas de descarga

- Movimiento ascendente del agua subterránea
- Mayor humedad por arriba de la zona saturada
- Valores altos de conductividad eléctrica
- Altas concentraciones de sólidos totales disueltos
- Niveles estáticos relativamente someros
- A mayor profundidad la carga hidráulica es más grande
- Vegetación de freatofitas
- Presencia de suelos salinos
- Temperatura relativamente altas

- Presencia de manantiales
- Galerías filtrantes (lloraderos)
- Pozos brotantes

La **Figura 16** muestra un diagrama esquemático de la distribución del flujo subterráneo y de los fenómenos asociados en una sección a escala regional y suponiendo condiciones de flujo gravítico. En la parte izquierda se presenta una cuenca ideal y muy simplificada, con un sistema único de flujo, sin la presencia de flujos locales. En la parte derecha, aparece, en cambio, una jerarquía marcada de flujos a diferentes escalas: local, intermedia y regional. Cada uno de estos sistemas de flujo tiene sus áreas de recarga, de circulación y descarga (Tóth, 2000).

En las zonas de recarga los niveles piezométricos son relativamente altos y decrecen con la profundidad, de modo que existe un flujo vertical descendente y divergente. En las zonas de descarga se invierte el esquema de flujo, de modo que los niveles piezométricos crecen con la profundidad y el flujo es vertical ascendente y convergente. En las zonas de circulación, la altura piezométrica apenas varía con la profundidad, las isolinneas son prácticamente verticales y el flujo es predominantemente horizontal. Los sistemas de flujo interactúan con su ambiente, produciendo efectos ambientales *in-situ*, con el flujo que sirve como mecanismo de movilización, transporte y acumulación (Tóth, 2000).

III.3 Parámetros físico-químicos

III.3.1 Temperatura

Las temperaturas del agua subterránea varían desde el punto de congelación hasta el punto de evaporación y en pozos geotermales el vapor de agua alcanza temperaturas de hasta 300°C. Este rango de temperaturas es causado por mecanismos de descarga, por diferencias en la profundidad de circulación y gradientes de cargas hidráulicas. Debido a que las temperaturas reflejan condiciones hidrológicas, se distinguen tres grupos:

- Aguas subterráneas frías cuyas temperaturas son localmente inferiores a las superficiales, ocurre en grandes altitudes y es causada por la recarga debido a la fusión del hielo.
- Aguas subterráneas con temperatura similar a la temperatura en la superficie, pertenece al ciclo activo de agua poco profundo, ocurre en circulación restringida a 100 m, y raramente 200 m.
- Agua subterránea con temperaturas de 6°C o más sobre el promedio local de temperatura en superficie, en este caso el agua circula a profundidades apreciables, y se debe al gradiente geotérmico.

Los manantiales con temperaturas arriba de los 65°C son comunes en terrenos tectónicamente activos, donde el agua subterránea puede circular a profundidades significativas, o en acuíferos entrampados profundos. Grandes cuencas sedimentarias o sinclinales contienen grandes cantidades de agua subterránea termal (Mazor 1997).

En general, algunas medidas de temperatura en pozos y minas, revelan un incremento en función con la profundidad o con el gradiente geotérmico, el cual varía de una localidad a otra, siendo el promedio de 3°C/100 m. La temperatura del agua subterránea comúnmente está en equilibrio con las rocas del acuífero. Las temperaturas medidas en manantiales o en pozos reflejan las temperaturas presentes a profundidad, y por lo tanto proporcionan información de la

profundidad de circulación. Un cálculo confiable para conocer la profundidad de circulación es la Ecuación 1,

Ec. 1)

$$profundidad(m) = \frac{T_{medida} - T_{superficie}}{\Delta T / 100}$$

Donde:

T_{medida} = Temperatura medida en el pozo o manantial termal,

$T_{superficie}$ = Temperatura promedio anual local en la superficie,

ΔT = es el gradiente geotérmico

Debido a que el agua puede enfriarse durante el ascenso en valores mínimos o insignificantes, la temperatura es una herramienta confiable para establecer la profundidad de circulación, así como para inferir áreas de recarga (Mazor 1997).

III.3.2 Conductividad Eléctrica

La conductividad o conductancia eléctrica es la capacidad de una sustancia para conducir corriente eléctrica. La conductancia específica es la conductancia a través de un cuerpo a una temperatura específica (Hem, 1992) en donde la electricidad se transporta por la migración de los iones en solución. La conductividad se origina a partir de partículas cargadas (electrolitos) que incluyen algunas soluciones. Entre mayor sea el número de cargas disponibles para transportar la electricidad, mayor es la concentración, y por ello más conductora.

La conductividad del agua se define como el recíproco de la resistencia en omhs medidos entre las caras opuestas de un cubo de un centímetro en una solución acuosa, para una temperatura dada. Las unidades reportadas pueden ser microohms por centímetro a una temperatura de 25°C. Las medidas geofísicas de resistividad comúnmente son expresadas en ohms-metro, con referencia a un cubo de un metro. Sin embargo, para el agua la referencia es de un centímetro cúbico. Debido a que la definición especifica las dimensiones de un cubo para el cual la medida es aplicada en la práctica se omite la unidad de longitud por lo que

la conductancia es reportada en omhs o mhos. En las aguas naturales la conductancia específica es $<1 \mu\text{mho}$; para evitar la inconveniencia del punto decimal, los datos se reportan en micromhos.

En el Sistema Internacional (SI) las unidades de conductividad se denominan siemens. Numéricamente un microsiemens (μS) es lo mismo que un micromhos. La conductividad es una función sensitiva de la temperatura. Todas las medidas deben ser corregidas por una referencia estándar de temperatura de 25°C .

El agua pura es de baja conductancia eléctrica debido a que presenta pocas centésimas de micromhos por centímetro a 25°C . Pero en la naturaleza el agua no es pura, la presencia de especies iónicas cargadas hacen que la solución sea conductiva. Cuando la concentración de iones incrementa, la conductancia en la solución incrementa, por lo tanto la medición de la conductancia indica la concentración de iones o bien los sólidos totales disueltos (STD). A mayor STD mayor conductividad eléctrica (CE), e inversamente, a menor STD menor CE. Tanto los STD como la CE se incrementan con el tiempo de residencia y con la distancia a la zona de recarga. Los valores bajos de conductividad pueden estar relacionados con recarga local o con zonas de infiltración, mientras que altos valores de conductividad se relacionan con zonas de descarga.

Los sólidos totales disueltos, son la cantidad de todas las sustancias o sales disueltas en el agua, sean o no volátiles. La concentración puede ser afectada por evaporación del agua y disolución de materia orgánica. La concentración por evaporación opera principalmente en la zona de suelo húmedo y entre eventos de lluvia. En esta zona de suelo, debido a la evaporación de las primeras lluvias, la concentración de sal incrementa y la que se disuelve es transportada hasta el nivel freático por las lluvias subsecuentes. Entre mayor tiempo se manifiesten las altas temperaturas y mayor sean los periodos entre los eventos de lluvias, mayor será la concentración de sal en el agua subterránea.

La concentración por disolución puede también ser un proceso hidroquímico importante cerca de la superficie. La máxima concentración debido a este proceso es limitada por el equilibrio químico entre la roca y el agua. Sin embargo, se tiene un tiempo suficientemente largo para que el agua disuelva algunos minerales en cantidades pequeñas de las rocas, cuya salinidad podría resultar en cantidades relativamente altas en el agua (**Tabla 2**).

II.3.3 pH

Una manera útil de cuantificar la fuerza del ácido en una solución acuosa es la escala de *pH* que se define como el logaritmo negativo de la concentración del ión hidronio en moles por litro (Ecuación 2)

$$pH = -\log[H_3O^+] \quad \text{Ec.2}$$

La actividad del ión hidrógeno es una variable importante del sistema de agua subterránea debido a que participa en muchas de las reacciones químicas que afectan la composición del agua, aún cuando otros solutos estén presentes, pocas moléculas de H₂O pueden romperse en iones H⁺ y OH⁻.

La concentración efectiva, es decir, la actividad de los iones de hidrógeno puede ser expresada en las mismas unidades en que se expresan otras especies disueltas. Sin embargo, las concentraciones de H⁺ en miligramos por litro o moles por litro son muy bajas en soluciones que no son fuertemente ácidas. La actividad del H⁺ es expresada convenientemente en unidades logarítmicas, y la abreviación pH representa el logaritmo negativo de base 10 de la actividad del H⁺ en moles por litro, el pH es una medida relativa y debe estar estandarizada (Hem, 1992).

La escala de pH tiene un rango de 1 a 14. Si el pH es menor de 7 la solución es ácida y cuando el pH es mayor de 7, la solución es alcalina. Cuando la solución tiene un pH igual a 7, la solución es neutra. Las soluciones altamente alcalinas y altamente ácidas son potencialmente tóxicas. El agua potable debe tener un pH de entre 6 y 8 (Kula, 1997). Cabe señalar que las sales al diluirse en



el agua producen un cambio débil en el pH, es por ello que la mayoría del agua subterránea tiene un pH entre 6 y 8.5, y un valor inferior a 4.5 indica que la fuente de iones hidrógeno probablemente sea alguna reacción que involucre la oxidación de especies sulfurosas o bien de hierro ferroso (Hem, 1992). En la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de pH en solución.

Solución	pH Típico
Batería ácida	0.3
Jugo Gástrico	1-2
Jugo de limón	2.4
Vinagre	3
Jugo de naranja	3.5
Vino	4
Orina	4.8-7.5
Agua de lluvia	5.5-6
Agua subterránea	6 – 8.5
Leche	6.5
Ríos no contaminados	6.5 - 8.5
Agua destilada	7
Agua potable	7 – 8
Agua de mar	8.5
Blanqueador doméstico	10.5
Amoniaco doméstico	11.5

Tabla 2.- Soluciones comunes y pH típicos. Se muestran algunos ejemplos de pH, las soluciones altamente alcalinas y altamente ácidas son potencialmente tóxicas. Modificado de Kula,1997.

II.3.4 alcalinidad

En casi todas las aguas naturales la alcalinidad puede ser definida como el total de solutos tales como bicarbonatos, carbonatos, boratos, bisulfuros, aniones orgánicos e hidróxidos contenidos en una solución. En las aguas naturales estos solutos están presentes en concentraciones muy pequeñas en comparación con

los carbonatos y bicarbonatos, es por ello que en la mayoría de los casos se tiene la siguiente relación (Ecuación 3):

$$\text{Alcalinidad total} \cong (\text{HCO}_3^-) + 2 (\text{CO}_3^{2-}) \quad \text{Ec. 3)}$$

La alcalinidad se determina de forma más común que la acidez; ya que la alcalinidad en aguas subterráneas se debe a iones de carbón presentes en la solución, por lo tanto las medidas de alcalinidad se pueden utilizar para determinar las concentraciones de carbonatos y bicarbonatos en el agua subterránea.

Esta medición es importante debido a que los bicarbonatos son frecuentemente los aniones dominantes en agua subterránea somera. La definición de alcalinidad incluye todas las especies disueltas en el agua las cuales potencialmente pueden neutralizar un ácido, por lo tanto la ecuación 3 es solamente una aproximación; la representación completa de la alcalinidad es como sigue (ecuación 4):

$$\text{Alcalinidad}(\text{meq/L}) = m_{\text{HCO}_3^-} + 2m_{\text{CO}_3^{2-}} + m_{\text{H}_3\text{SiO}_4^-} + m_{\text{iones orgánicos}} + m_{\text{OH}^-} - m_{\text{H}^+} \quad \text{Ec. 4)}$$

La Ecuación 4 muestra que la alcalinidad es la suma de las concentraciones (mol/kg) para todas las especies disueltas que pueden aceptar un ión hidrógeno durante la titulación (Deutsch, 1997). Si una especie acepta más de un ión hidrógeno, la concentración se multiplica por el factor apropiado, el factor de dos en la ecuación 4 es correcto debido a que el CO_3^{2-} puede aceptar dos iones de hidrógeno para formar ácido carbónico.

La alcalinidad normalmente es reportada por el laboratorio en mg/l de CaCO_3 , debido a que cada ión de carbonato es capaz de neutralizar dos iones de Hidrógeno. En el agua subterránea normal con valores de pH en el rango de 6.5 a 8.5, las especies de carbón inorgánico son los bicarbonatos (HCO_3^-) con una valencia de 1, por ello, el HCO_3^- es usualmente usado para calcular la cantidad de equivalentes en solución contribuidas por carbón inorgánico.

Cuando el pH es mayor de 9, las especies de carbón inorgánico son los carbonatos (CO_3) con una valencia de 2 llega a ser un constituyente importante.

La acidez puede ocurrir naturalmente como resultado de la solución de gases volcánicos o emanaciones gaseosas en áreas geotérmicas, así como la oxidación de minerales sulfurosos expuestos como el fierro y el aluminio, los cuales son los que contribuyen principalmente para este efecto en aguas ácidas.

La alcalinidad es una medida de la capacidad que tiene el agua para neutralizar un ácido y la acidez es la capacidad que tiene el agua para neutralizar las bases. Considerando que las reacciones "Buffer" tienden a mantener un valor de pH cercano a un valor específico, cuando un ácido o una base es agregado al agua, la alcalinidad y la acidez representan las reacciones acumulativas del consumo de hidrógeno.

La principal fuente de especies de bióxido de carbono que producen alcalinidad en el agua superficial y subterránea es el CO_2 de la atmósfera o los gases atmosféricos presentes en el suelo o en la zona insaturada adyacente entre la superficie terrestre y el nivel freático.

Los valores de pH extremadamente bajos y altos pueden ocasionar daño a los organismos, la acidificación es un problema particular que se manifiesta en una gran variedad de efectos en las plantas y peces debido a que vuelve más solubles a los minerales. Sin embargo, los humanos pueden tolerar grandes extremos de pH en el agua para beber.

IV. HIDROGEOQUÍMICA

IV.1 Muestreo de agua y análisis químico

En el transcurso de cinco campañas se colectaron **205** muestras de agua, principalmente de pozos del SAPAL, integrantes de la red de distribución de agua potable. Otras muestras corresponden a pozos de agua potable particulares y a la red de monitoreo de la CEASG. Dos muestras provienen de agua superficial del Río Turbio.

Según la finalidad de análisis y la fuente, las muestras se distribuyeron así: a) para isotopía: **59**; b) aniones y cationes principales: **44**; c) metales referidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM) 127-SSA1-1994: **38**.

En esta interpretación se incluyen los resultados de análisis químicos con respecto a Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ , Cl^- , $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{CO}_3)^{2-}$, $(\text{SO}_4)^{2-}$, $(\text{NO}_3)^-$ y $(\text{F})^-$, isotópicos: ^{18}O y D , ^{222}Rn y las propiedades físicas y químicas principales: temperatura, conductividad, pH y alcalinidad, determinadas en campo.

Las muestras se colectaron directamente de las descargas de los pozos en operación, previamente a la cloración, con una bomba peristáltica dotada de un tubo de teflón. Todo el material empleado en el muestreo se había prelavado en baño de ácido nítrico y enjuagado con agua destilada. Cada muestra tomada en campo fue acidificada con ácido nítrico ultra puro y las botellas se sellaron y colocaron en bolsas de plástico tratando de mantenerlas almacenadas a bajas temperaturas de aproximadamente 4°C para su posterior transportación a diversos laboratorios para su análisis específico. **(Fotos 1 y 2)**

Los análisis de iones principales se realizaron en la Universidad Old Dominion (ODU), Norfolk, Virginia, EUA. En la mayoría de los balances de aniones y cationes hay valores menores de 10%; en cinco muestras se rebasa este valor. Parcialmente esto se debe a que dos de ellas eran superficiales, procedentes del Río Turbio. Los valores de las tres muestras restantes, obtenidas en pozos, fueron: a) Turbio 7: 10.1, b) Turbio 10: 11.3, y c) Ciudad 14: 14.3. Con valores inferiores a 15% se consideran de buena calidad.



Foto 1.



Foto2.

IV.2 Familias de Aguas.

La Tabla 3 contiene los resultados de los análisis de iones principales, así como de las propiedades físicas y químicas. Esto permitió elaborar diagramas de Piper, Durov y Stiff para delimitar áreas de influencia hidrogeoquímica, así como la distribución de contenido de iones principales.

En la **figura 18** se muestra el diagrama de Piper relativo a las características hidrogeoquímicas de las baterías Río Turbio, Sur, Ciudad, Oriente y Poniente; de este análisis se identificaron tres grupos de agua.

Grupo I. Es de tipo $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$; dentro de este grupo se encuentran los pozos C46, P4a, P5 y T9. Este grupo presenta temperaturas del rango entre 37 y 42°C, además tiene valores de pH de 8.0.

Grupo II. Conforman el más grande y lo componen los pozos C10, C11, C24, C28 C35, C49, O2b, O3 O4, P1, S1, S8, S11, T5, T6, T10, T12, T14, Lagunillas, C41, T13, C10, C11, C24, C28 C35, C49, O2b, O3 O4, P1, S1, S8, S11, T5, T6, T10, T12, T14, Lagunillas, C41, T13; con características químicas de tipo Ca-Na-HCO_3 y Na-Ca-HCO_3 .

Grupo III. Corresponde de forma general al tipo $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$ cuyos pozos son: C42, T4, T1b, C33, C1 y P2. Dicho grupo tiene características similares al manantial Tultitlán (CEASG, 1999); sin embargo sus orígenes son diferentes. Para el manantial Tultitlán, localizado al sur de la Batería de La Muralla, se encontró que su principal componente químico es el ion cloruro, relacionado a la evolución del agua subterránea, cuyas características van de $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$

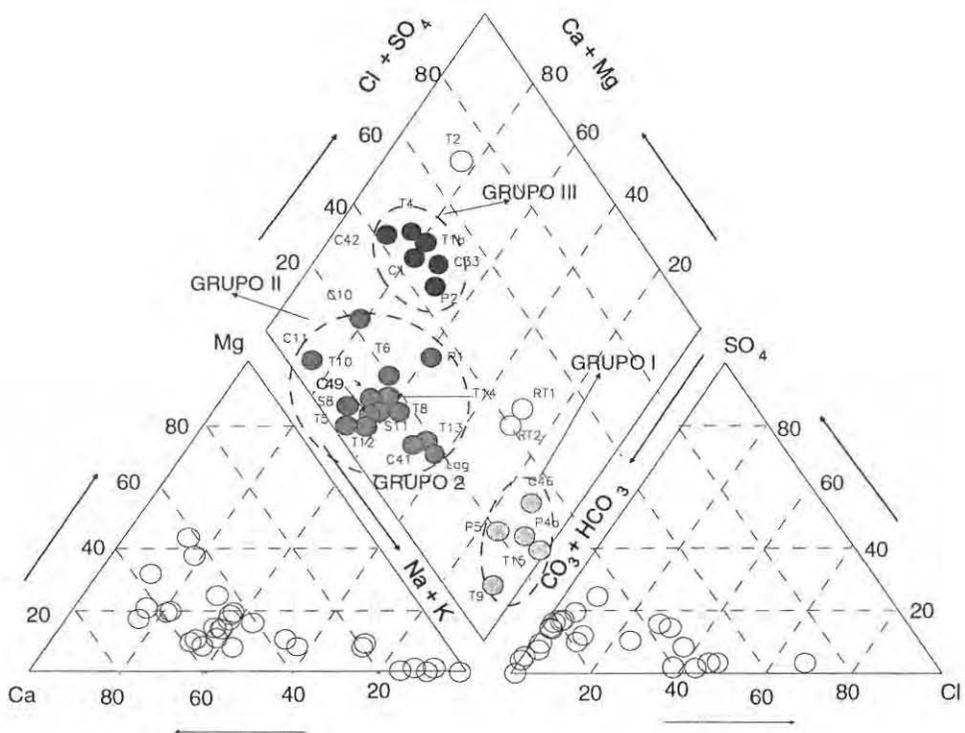


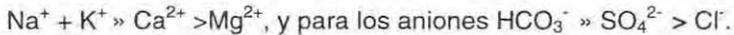
Figura 18. Diagrama de Piper para los pozos de las baterías Río Turbio, Sur, Ciudad, Oriente y Poniente de la Ciudad de León.

(Tóth 1999). En tanto que el componente clorurado del grupo tres se debe a la contaminación de aguas residuales de curtidurías de la Ciudad de León y San

Francisco del Rincón. Las muestras no asociados a estos grupos son el Turbio 2 de tipo Ca - Cl - HCO₃ y las muestras tomadas en el Río Turbio con característica Na-Cl-HCO₃- SO₄. Esta separación de grupos es confirmada con el diagrama de Durov de la **Figura 19**

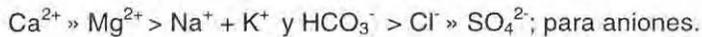
Adicionalmente, se representa gráficamente el **Grupo IV**, formado por el tipo de agua característica de la Batería de La Muralla (**Figura 20**).

La abundancia representativa en equivalentes iónicos para el **Grupo I**, se realizo tomando como el más representativo, el comportamiento del Pozo P4a, resultando de la siguiente manera para cationes:

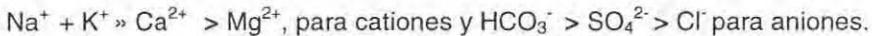


Para el Grupo II con referencia en el pozo S11 los cationes abundantes son: Ca²⁺ ~ Na⁺ + K⁺ » Mg²⁺ para aniones HCO₃⁻ » SO₄²⁻ > Cl⁻.

Para el grupo III en el Pozo T4 se tiene para cationes:



El grupo IV tiene las características químicas siguientes:



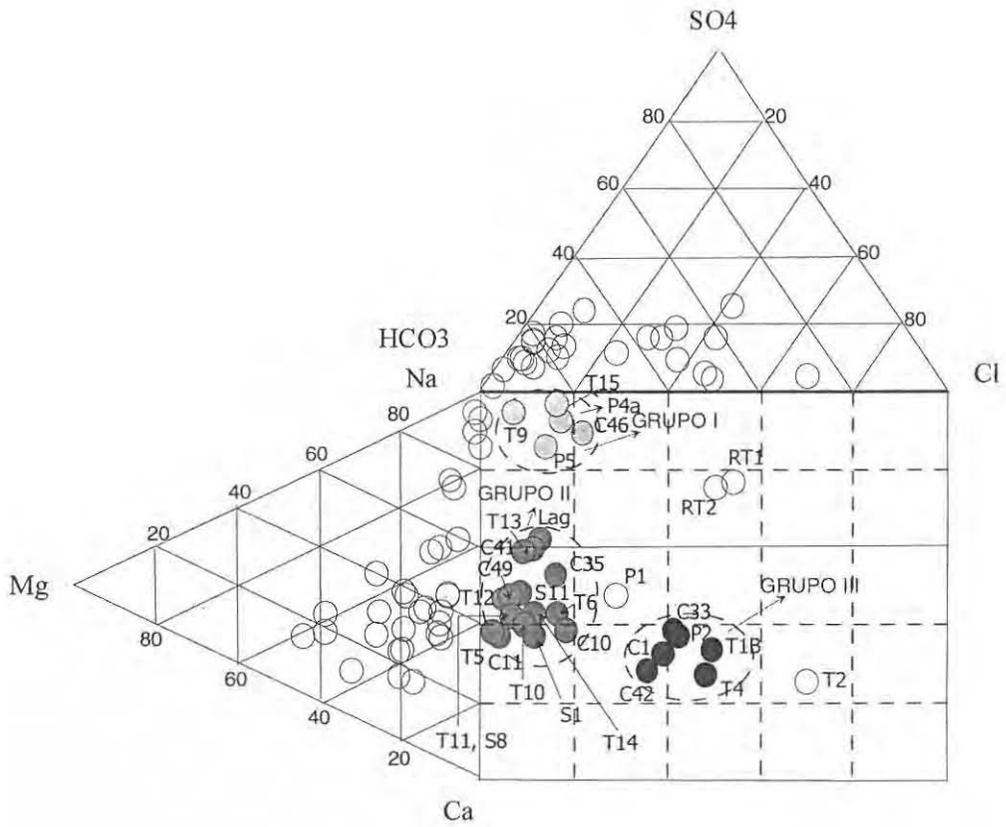


Figura 19. Diagrama de Durov las características de los pozos de la batería de SAPAL.

Pozo	X	Y	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ Mg/l	Li ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ Mg/l	F ⁻ mg/l	STD mg/l	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	pH	Temp °C	Cond µmhos/cm	Bal. %
Turbio 1B	216856	2332003	85.22	18.78	38.63	10.80	0.05	125.31	224.30	13.18	20.55	1.67	538.50	-10.3	-77	7.39	25.0	500.0	0.6
Turbio 2	214831	2330907	169.90	27.42	48.63	14.74	0.21	343.84	248.72	27.72	46.91	1.65	929.70	-9.7	-75	7.28	25.5	1500.0	6.2
Turbio 4	213446	2328995	96.35	19.35	29.20	6.05	0.08	129.51	248.72	15.82	24.32	0.22	569.60	-10.2	-78	7.35	27.6	890.0	3.4
Turbio 5	203076	2321659	64.10	7.56	42.10	11.61	0.27	4.92	404.79	2.17	7.42	1.05	546.00	-9.3	-74	7.43	29.0	500.0	5.9
Turbio 6	201324	2318601	49.59	9.08	39.93	11.46	0.26	20.53	243.87	23.18	9.76	0.93	408.60	-9.2	-72	7.40	28.4	500.0	2.3
Turbio 7	200475	2316132	48.48	10.08	41.41	12.24	0.24	7.56	360.89	25.93	9.39	0.80	517.00	-9.4	-74	7.43	27.8	530.0	10.1
Turbio 9	199091	2322410	4.38	1.11	90.50	3.94	0.10	4.24	234.09	17.00	2.23	1.60	359.20	-9.9	-77	8.41	34.6	510.0	0.2
Turbio 10	199849	2319486	65.00	7.70	46.40	11.10	0.17	13.19	414.54	29.72	7.06	1.16	596.00	-9.1	-74	7.36	31.6	620.0	11.3
Turbio 11	198046	2318889	51.13	9.22	43.61	10.41	0.32	7.13	351.14	24.89	6.94	1.12	505.90	-9.2	-73	7.40	29.8	600.0	6.9
Turbio 12	204967	2320426	39.35	8.85	37.45	9.76	0.35	2.57	277.99	13.50	12.69	1.03	403.50	-10.4	-79	7.92	31.5	500.0	2.5
Turbio 13	204814	2317998	35.85	6.75	63.20	9.35	0.21	5.60	292.62	46.37	8.86	1.64	468.50	-9.7	-75	7.86	33.4	600.0	4.9
Turbio 14	198353	2316238	57.40	7.40	49.25	9.80	0.34	7.36	282.86	37.65	11.94	1.38	465.40	-9.3	-76	7.44	32.8	430.0	2.6
Turbio 15	198835	2322825	1.71		121.75	4.24	0.35	15.08	258.48	58.98	3.40	3.67		-9.8	-78	8.42	43.6	800.0	2.5
Poniente 1	210485	2330016	53.73	5.54	52.91	11.59	0.30	49.66	243.85	31.11	8.79	0.71	458.20	-9.5	-73	7.51	30.0	700.0	1.5
Poniente 2	211358	2330530	87.13	9.56	53.44	10.90	0.20	119.22	302.37	38.10	13.69	0.55	635.20	-9.2	-74	7.36	27.5	890.0	8.2
Poniente 4A	214444	2333766	8.77	0.48	124.98	4.83	0.17	15.90	302.37	63.05	7.89	1.29	529.70	-9.7	-77	8.19	32.8	790.0	5.4
Poniente 5	214195	2333354	15.50	0.70	109.10	4.62	0.44	11.05	307.25	49.21	8.10	1.42	507.40	-9.6	-77	8.09	32.7	700.0	3.5
Ciudad 1	220818	2337141	140.90	29.85	60.20	14.85	0.47	116.30	356.02	79.05	115.45	0.45	913.50	-9.2	-76	7.16	26.6	1290.0	1.2
Ciudad 10	224820	2337300	61.82	33.95	30.60	5.25	0.11	35.72	409.66	50.48	71.24	0.20	699.00	-9.9	-79	7.20	26.1	900.0	14.3
Ciudad 11	227299	2331616	42.25	27.35	17.10	5.65	0.35	2.14	277.96	10.05	16.89	0.20	399.90	-10.3	-82	7.85	26.1	490.0	4.5
Ciudad 24	220435	2341535	76.15	36.45	55.17	5.8		20	388.18	66.5		0.40				7.30			
Ciudad 28	226532	2340671	40.08	17.01	53.25	7.7		4.4	255.7	10.82		0.31				7.32			
Ciudad 33	221362	2338965	113.21	24.17	70.72	10.26	0.02	138.47	375.52	108.35	53.95	0.31	895.00			7.15	27.5	1100.0	9.1
Ciudad 41	225540	2342202	31.99	6.87	54.01	4.60	0.04	4.66	214.59	23.16	6.84	0.71	347.50			7.42	32.0	500.0	4.4
Ciudad 42	222580	2332809	121.88	42.42	29.97	6.81	0.36	115.20	409.66	88.30	81.80	0.15	896.80	-9.7	-76	7.24	24.0	1190.0	7
Ciudad 46	224453	2345658	22.15	2.85	219.20	6.05	0.35	36.09	453.56	129.40		8.79	896.60	-9.6	-78	7.76	37.8	1400.0	1
Ciudad 49	228563	2340162	46.85	12.55	45.50	4.20	2.03	4.20	287.74	19.35	17.14	0.30	439.90	-9.3	-72	7.60	30.6	500.0	1.2
Sur 1	220315	2331576	38.02	12.05	20.10	5.27	0.03	9.84	199.95	13.14	6.76	0.34	305.50			7.61	27.0	400.0	0.3
Sur 8	219164	2324657	33.60	11.95	26.55	7.80	0.45	2.06	243.65	10.80	8.20	0.30	345.60	-10.3	-77	7.58	32.4	490.0	0.4
Sur 11	219282	2321771	33.93	9.54	34.99	6.21	0.11	4.60	229.22	19.74	8.11	0.69	347.10	-9.9	-75	7.72	29.6	490.0	2.2
Oriente 2	229786	2336939	41.36	37.20	20.36	3.35		3.69	268.03	7.02		0.17				7.62			
Oriente 3	229786	2336302	46.10	36.36	13.33	3.42	0.11	3.5	277.27	8.34		0.31				7.56			
Oriente 4	231036	2336406	42.00	26.04	28.63	4.74	0.01	3.48	263.35	18.47	13.24	0.23	400.20			7.66	28.7	540.0	5.6
Lagunillas	213000	2348310	30.42	3.16	58.37	4.09	0.02	7.81	175.57	20.95	10.06	0.72	311.20			7.62	29.0	450.0	8.7
Rio Turbio 1	212026	2319963	72.74	17.30	304.03	27.97	0.36	455.40	658.39	371.10	7.05	0.80	1915.10	-8.8	-73	7.89	26.9		23.1
Rio Turbio 2	204267	2323923	81.41	16.66	310.47	28.22	0.24	453.80	799.82	231.30	11.95	1.10	1935.00	-9.9	-75	7.85	35.4		21.8

Tabla 3. Muestreo de pozos y análisis químicos de aguas subterráneas de las baterías de suministro de agua potable para la Ciudad de León.

IV.3 Análisis de resultados hidrogeoquímicos.

Las características de los grupos de aguas determinados en la zona, son distintas a las imperantes en la batería de pozos de La Muralla Grupo IV, (CEASG-IGFUNAM, 1999), cuya firma química es $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - (\text{HCO}_3)^- - (\text{SO}_4)^{2-}$, vigente en los pozos 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 17, 18 y 19 (**Figura 20**).

En la **figura 20**, mediante círculos se representan los resultados obtenidos en el presente estudio; los triángulos corresponden a los pozos de la Batería de La Muralla, manantiales Comanjilla y Tultitlán, y el pozo Charcas localizado al noroeste de la ciudad de León, los cuales están en zona de recarga.

Las características hidrogeoquímicas de las muestras de los manantiales Comanjilla y Tultitlán, así como del pozo Charcas, son similares a las que rigen en los grupos de la zona.

De los datos relativos al manantial Comanjilla y al Grupo I se infiere que la principal zona de recarga se ubica en la Sierra de Guanajuato. La afinidad de la firma química del pozo Charcas con el Grupo II podría denotar que la zona de recarga de éste radica principalmente en la sierra de los Altos de Jalisco localizada, al norte de León. En el grupo III la característica $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+ - (\text{HCO}_3)^- - \text{Cl}^-$ es similar a la del Manantial Tultitlán; empero su origen es diferente, pues en éste el componente clorurado se debe a evolución del tipo $(\text{HCO}_3)^- - (\text{SO}_4)^{2-} - \text{Cl}^-$, y en el Grupo III, como ya se mencionó, el ion cloruro se debe a contaminación por curtidurías de León y San Francisco del Rincón.

En la **Figura 21** se muestra la distribución espacial de las características químicas representadas en diagramas de Stiff para los cuatro grupos químicos. Las evidencias hidrogeoquímicas indican que el Grupo I, no presenta un solo patrón de distribución zonal; estos pozos se asocian con fallas geológicas que podrían conducir flujos regionales o intermedios.

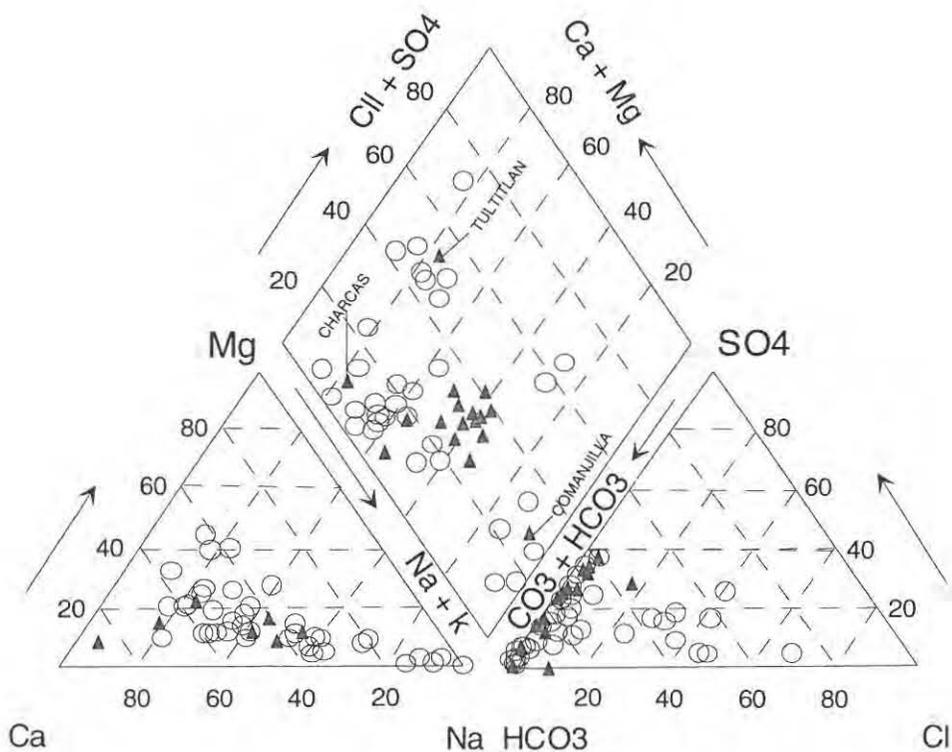
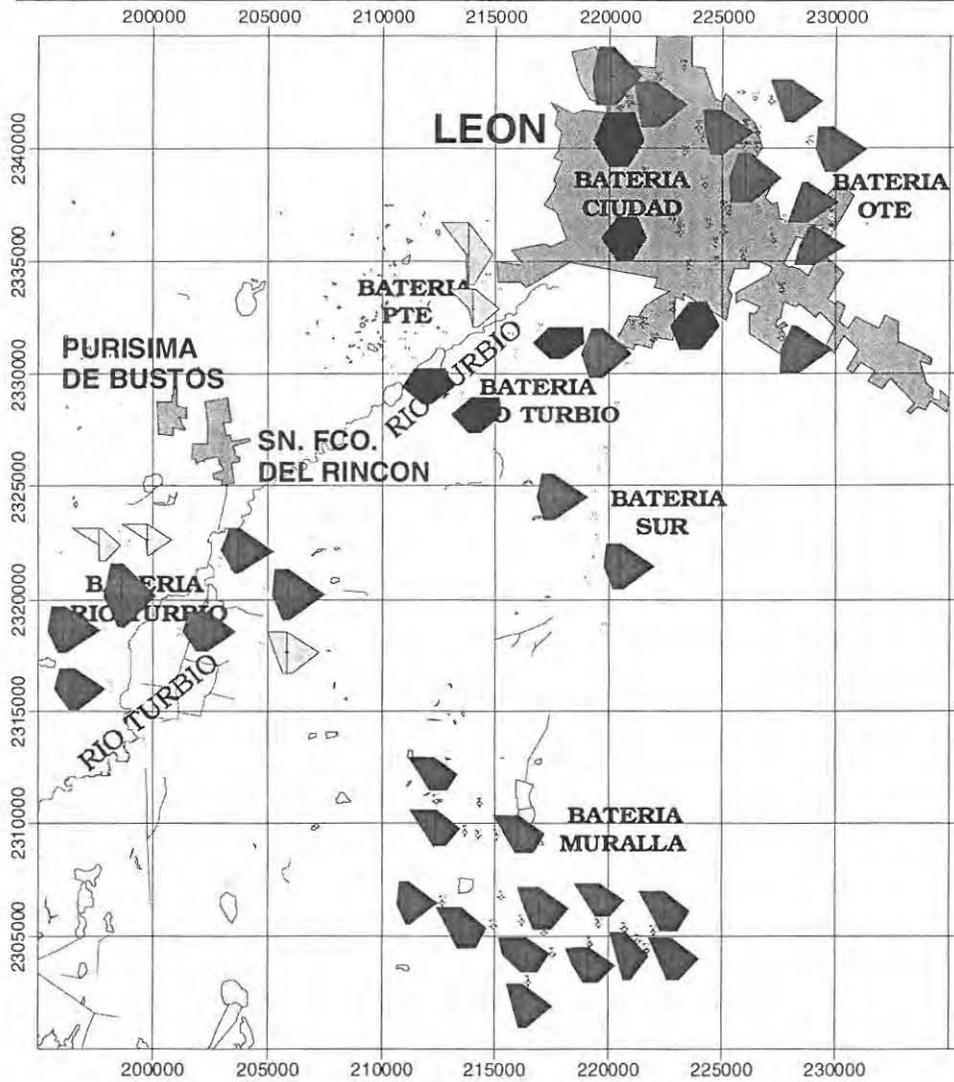
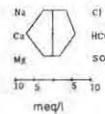


Figura 20. Diagrama de Piper, relativo a las características químicas de los pozos de la Batería de La Muralla y manantiales Comanjilla y Tultitlán, así como del Pozo Charcas (triángulos) [CEASG, 1999]. Los círculos representan la firma química de las baterías Ciudad Oriente y Poniente, y Turbio.



Simbología

- Grupo I
- Grupo II
- Grupo III
- Grupo La Muralla



CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION MEROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
DISTRIBUCION ESPACIAL DE SIIIF	
FIGURA No. 21	JULIO 2004.

Potencial de hidrogeno (pH)

El pH del agua subterránea está dentro del rango normal de agua potable (6-8.5). En los pozos muestreados el valor mínimo fue 7.15; el máximo: 8.42, es decir de prácticamente neutro a alcalino, con media de 7.6 y desviación estándar de 0.33, indicador de homogeneidad (Tabla 3, **Figura 22**).

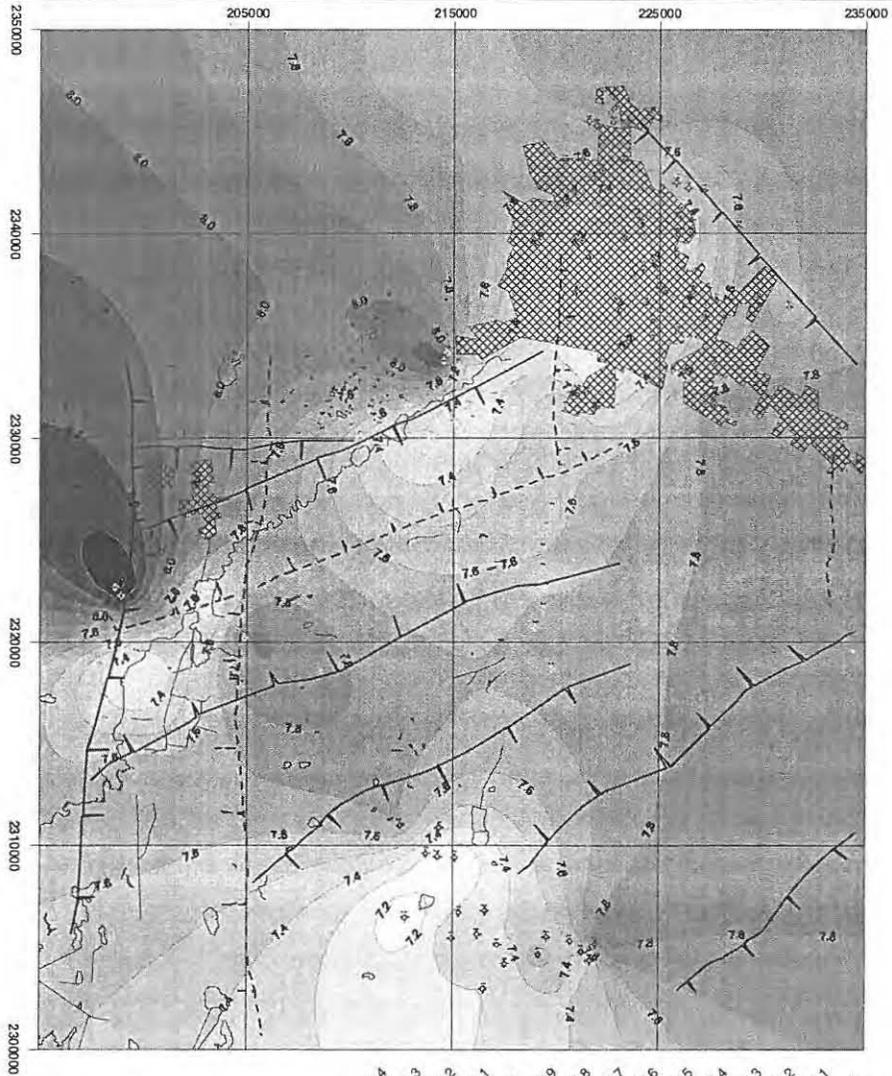
En la **figura 22** se observan rangos de pH de 7.1 a 7.4 en el área de la ciudad de León, y los valores más altos ocurren en aguas cercanas a las poblaciones de San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos.

Temperatura

La mayor temperatura (98°C) registrada en la región ocurrió en el balneario *Comanjilla*. Este valor no se consideró en el mapa de temperaturas por su valor anormalmente alto, pues aportaría mayor complejidad a la configuración térmica del agua subterránea regional, donde los rangos fluctúan entre 18 y 40°C (Fig 24).

Tendencias y zonas anómalas regionales: En las inmediaciones y en la parte meridional de Silao se manifiestan zonas termales relativamente altas. Zonas similares se observan en Silao - Romita, relacionadas con los conos de abatimiento de esa región. En dirección al área de *La Muralla* y en su parte septentrional existen zonas de temperaturas más elevadas. En las proximidades de la parte meridional de la ciudad de León ocurren temperaturas bajas, lo cual podría corresponder a zonas de recarga local.

Las temperaturas revelan gradientes geotermales altos: mínimas del orden de 24°C y máximas de 43°C [24 °C superior a la media anual: 19°C], como es el caso del pozo Turbio 15, con valor de 43.6°C (Tabla 3, **Figura 23**). En la zona de La Muralla ocurre también una anomalía térmica consistente, con temperaturas de 31 a 35°C.



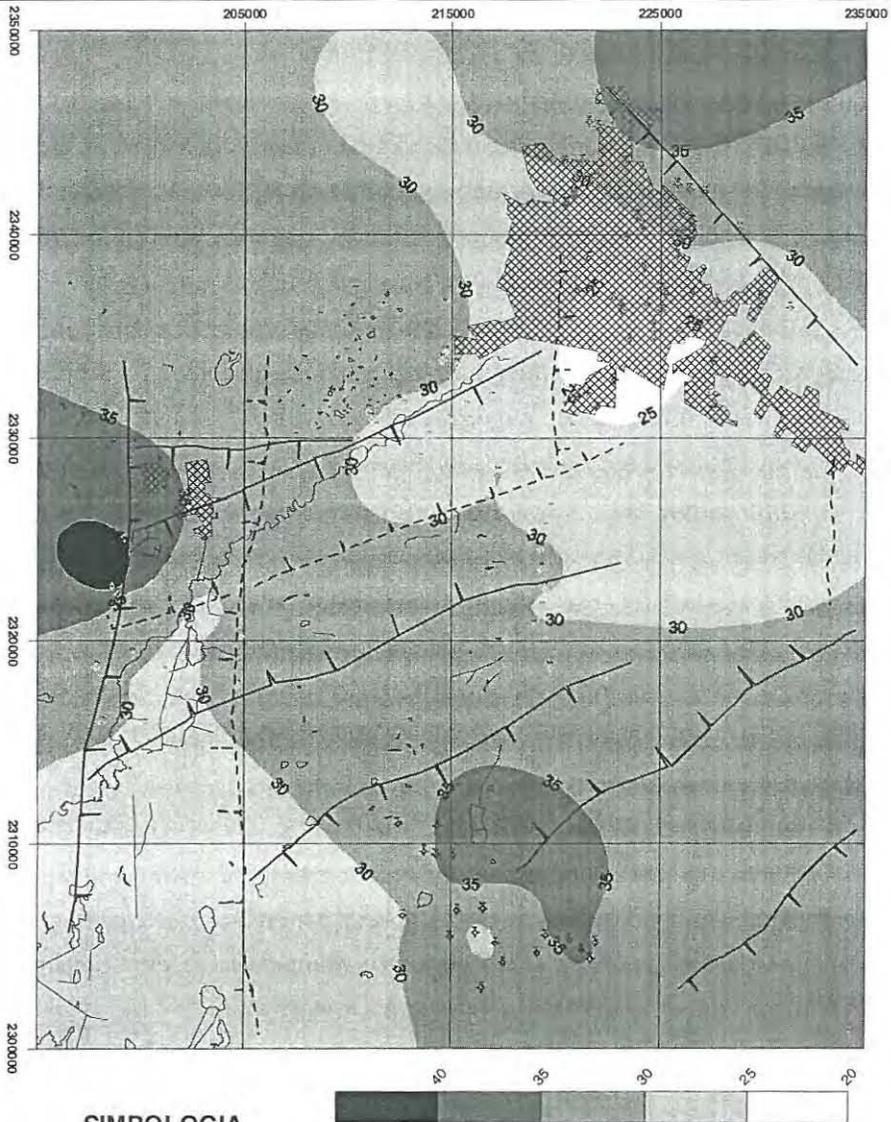
SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR



pH en aguas subterráneas

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZA CON HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL pH	
FIGURA No. 22	JULIO 2004.



SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR DE TEMPERATURA

Temperatura en aguas subterráneas

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DE LA TEMPERATURA °C	
FIGURA No. 23	JULIO 2004.

IV.3.1 Análisis de iones principales

Sólidos Totales Disueltos (STD)

A causa del flujo de agua en los alrededores de la zona de recarga a los de la salida de la subcuenca, el agua subterránea disuelve los minerales de las unidades litológicas, lo cual redundo en incremento de *sólidos totales disueltos* (STD) y de iones específicos: Na^+ y Cl^- .

Procesos naturales y actividades humanas (construcción deficiente, mal estado de pozos, etc.) son fuentes potenciales de salinidad, que en el acuífero generan nexos artificiales con aguas residuales y propician percolación, lo cual ha provocado deterioro substancial de la calidad del acuífero subyacente a la ciudad.

En la **figura 24** se ilustra que el mayor contenido de STD sucede en las salidas de las poblaciones de San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos, con valores hasta de 1 800 mg/l, en el cauce del Río Turbio, que en 800 mg excede a la NOM 127. En el pozo Turbio 2 el contenido es de 929.7 mg/l, y en los pozos Ciudad 42 y 46 es de 896.6 mg/l (Tabla 3). En la zona de la Batería de La Muralla hay valores inferiores a 600 mg/l, debidos no a contaminación, sino a evolución química del agua subterránea.

Ion Calcio y magnesio

El Ca^{2+} y el Mg^{2+} provienen del intemperismo de los minerales removidos por intercambio cationico, que los reemplaza por Na^+ , que ocurre en minerales primarios de arcillas. El intercambio iónico entre calcio y otros cationes (sodio fundamentalmente), retenidos en la superficie de minerales con los que entra en contacto el agua, se potencia notablemente en terrenos arcillosos de baja permeabilidad.

En la **Figura 25** se observa que en el centro de León y hacia la Batería Poniente y los pozos Turbio 1, 2, 2a y 3 los valores del ion Ca^{2+} son altos. Los máximos, de 169 mg/l, se ubican a lo largo de esa batería, y disminuyen hacia el sur de San Francisco del Rincón.

La distribución del ion Mg^{2+} es similar a la del Ca^{2+} , con valores mayores hacia la Central de Abastos y en el sur de la Batería Poniente. Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de magnesio en aguas subterráneas. En ellas, el magnesio es retenido con preferencia al calcio en suelos y rocas.

Los valores menores ocurren en la Batería de La Muralla (**Figura 26**). Estos iones Ca^{2+} y el Mg^{2+} en combinación con el HCO_3^- podrían precipitar fácilmente, pudiendo afectar zonas agrícolas que dependen de la irrigación.

Iones Alcalinos

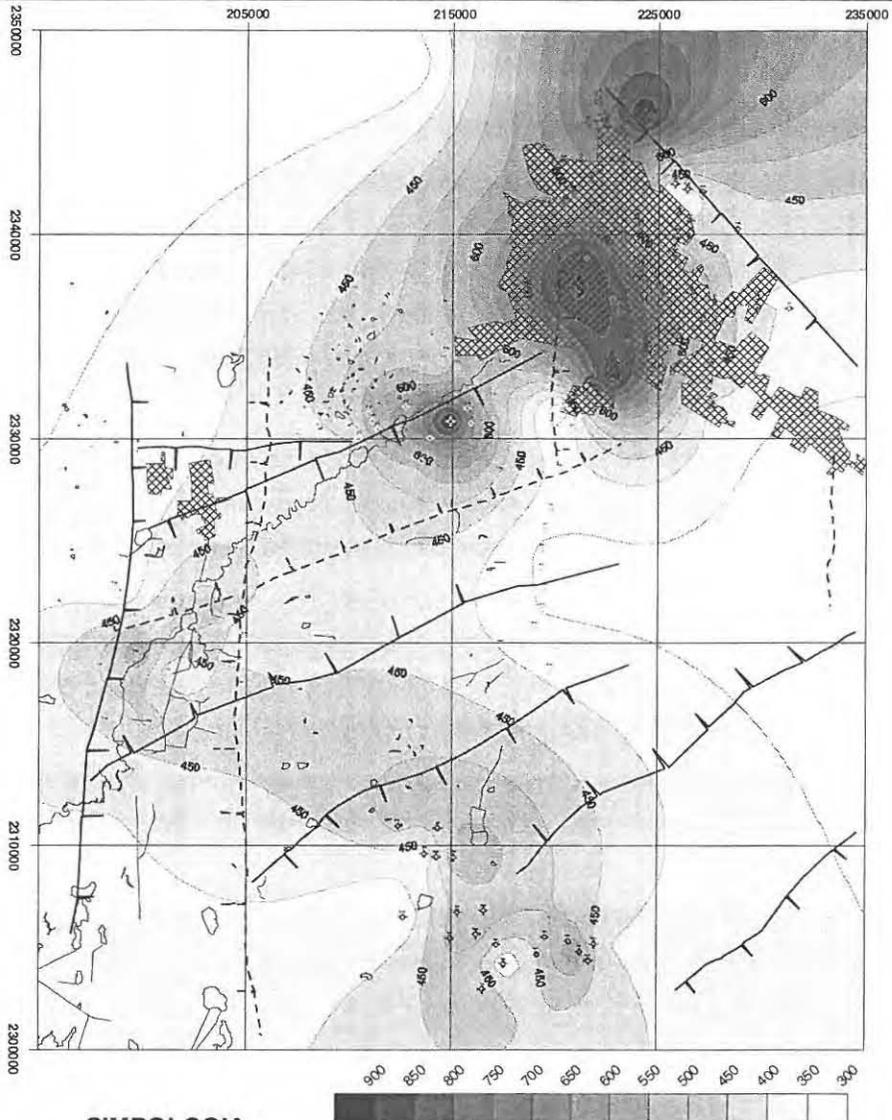
A diferencia del calcio y el magnesio el sodio no se presenta como uno de los constituyentes fundamentales de las rocas; es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl.

La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120.000 mg/l en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 100 ó 150 mg/l en aguas dulces normales.

El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico.

En aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/l, a excepción de algunas salmueras. En ocasiones, más altas concentraciones pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales.

Las concentraciones de $Na^+ + K^+$ ubicados en el sur de San Francisco del Rincón son del orden de 300 mg/l y son de origen antropogénico; los intermedios se ubican en la zona de La Muralla, siendo de origen natural y los valores más bajos en la Ciudad de León (**Figura 27**).



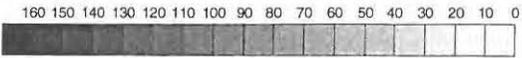
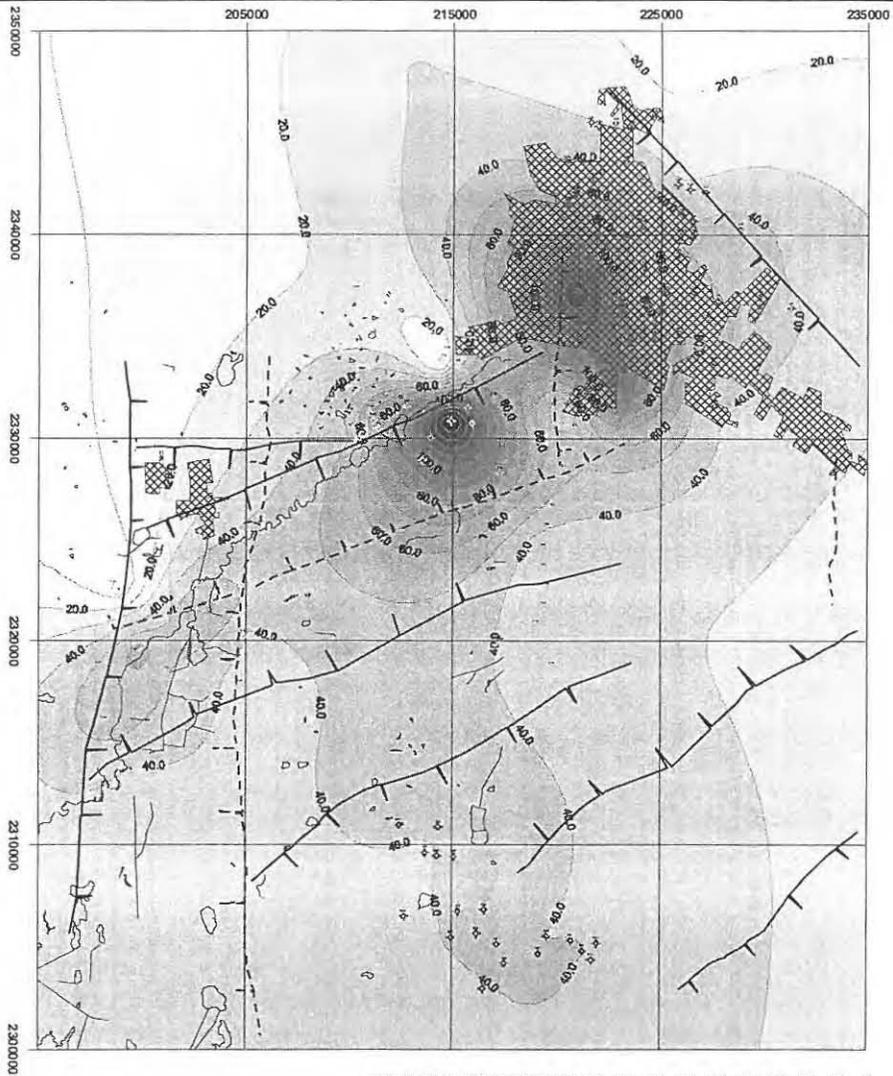
SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR



STD en aguas subterráneas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS	
FIGURA No. 24	JULIO 2004.

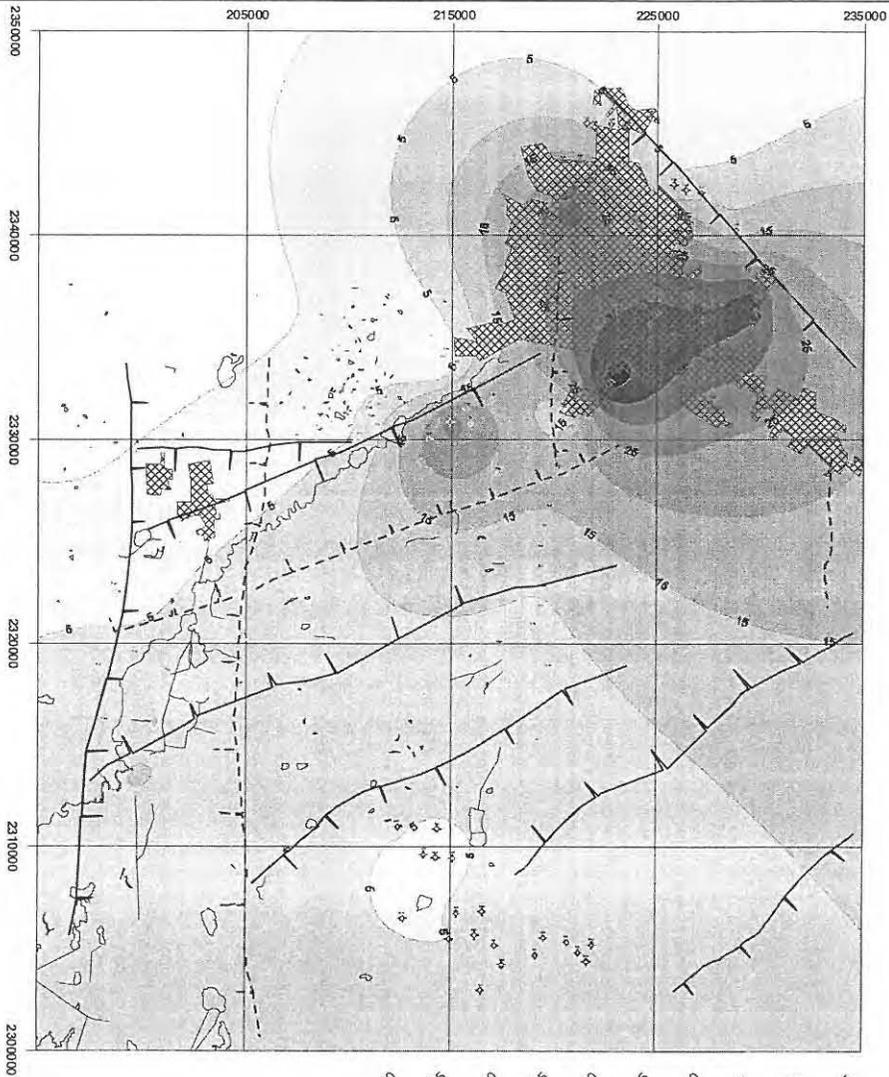


SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR

Calcio en aguas subterráneas mg/l

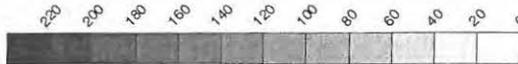
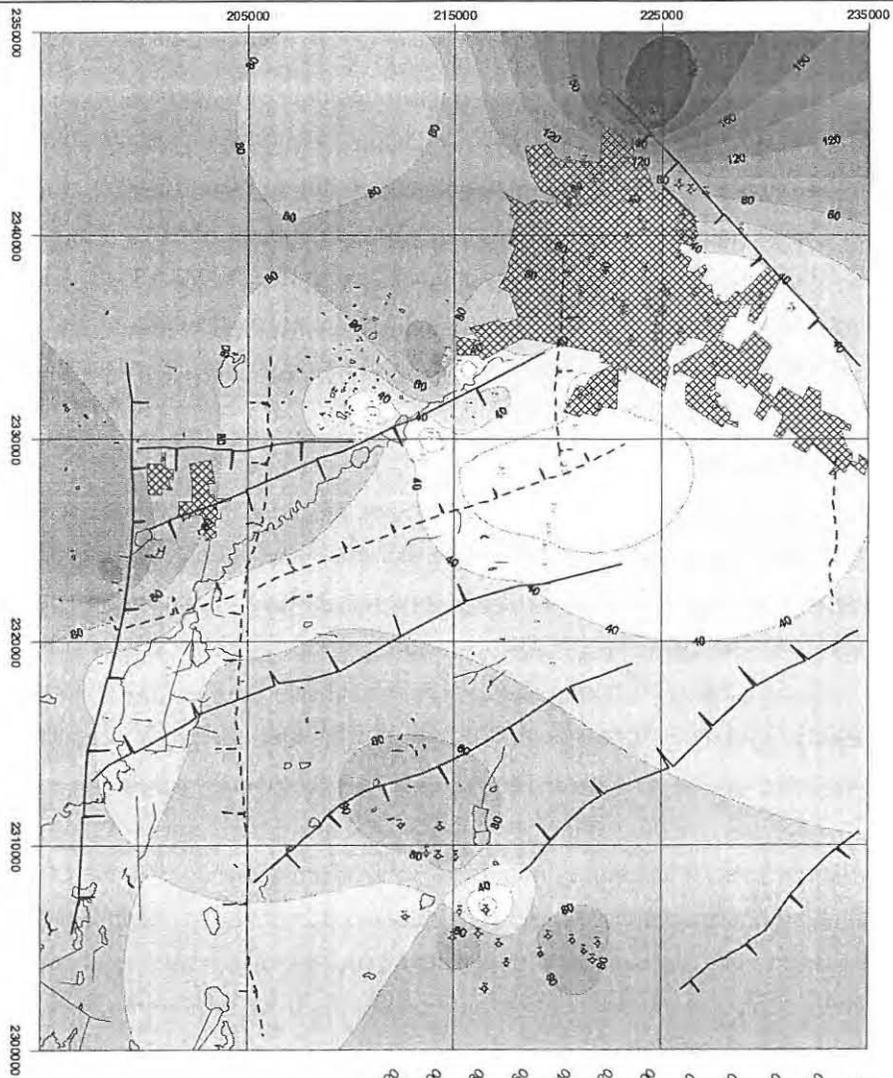
CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL CATION Ca	
FIGURA No. 25	JULIO 2004.



- SIMBOLOGIA**
- POZO
 - POBLADO, ZONA URBANA.
 - RIO
 - FALLA GEOLOGICA
 - ISOVALOR

Magnesio en aguas subterráneas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL CATION Mg	
FIGURA No. 26	JULIO 2004.



Sodio + Potasio en aguas subterráneas mg/l

SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL Na+K	
FIGURA No. 27	JULIO 2004.

Ion Litio

El litio es un trazador conservativo, soluble en aguas a temperaturas elevadas. Típicamente su contenido en aguas geotermales oscila entre 100 y 100,000 veces el relativo a aguas de baja temperatura (no termales)

La configuración de litio presenta valores mínimos de 0.13 y máximos de 2.03, con una media de 0.27 y desviación estándar de 0.34, lo que indica la homogeneidad en el contenido de este ion en los pozos de la baterías de León. (Figura 28), dicha distribución indica la amplia distribución de las rocas de tipo ácido, de donde se deriva este ion.

Ion Cloruro

Si se exceptúan las evaporitas y rocas de origen marino, las rocas por lo común presentan escasa proporción de cloruros. Sin embargo, dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas.

El ión cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal.

Altos valores de cloruros (450 mg/l) se concentran al sur de San Francisco del Rincón y en las inmediaciones de la Batería Poniente. Valores de 100 mg/l se distribuyen hacia el centro de León. Debido a lo puntual de la distribución de este anión en la zona de la Batería Oriente se deduce que los valores altos podrían provenir de infiltración de cloruros antropogénicos a lo largo de la zona del Río Turbio.

Valores de <2 mg/l ocurren hacia la Batería de La Muralla; denotan fuerte circulación activa de recarga de agua meteórica en las proximidades de esta batería (Figura 29).

Se obtuvieron valores mayores de 250 mg/l que rebasan la NOM 127; valores de 343.84 mg/l se obtuvieron en el pozo Turbio 2 y para las dos muestras

tomadas en el Río Turbio se obtuvieron valores de 455.40 y 453.80 mg/l (Tabla 3). Cabe aclarar que los resultados obtenidos en las aguas superficiales no fueron graficadas para ningún ion principal, esto es debido a que solo se configuraron muestras de agua subterránea, además de que las muestras de agua superficial no presenta un balance de carga confiable debido a su proceso de degradación por origen antropogénico.

Ion Sulfato

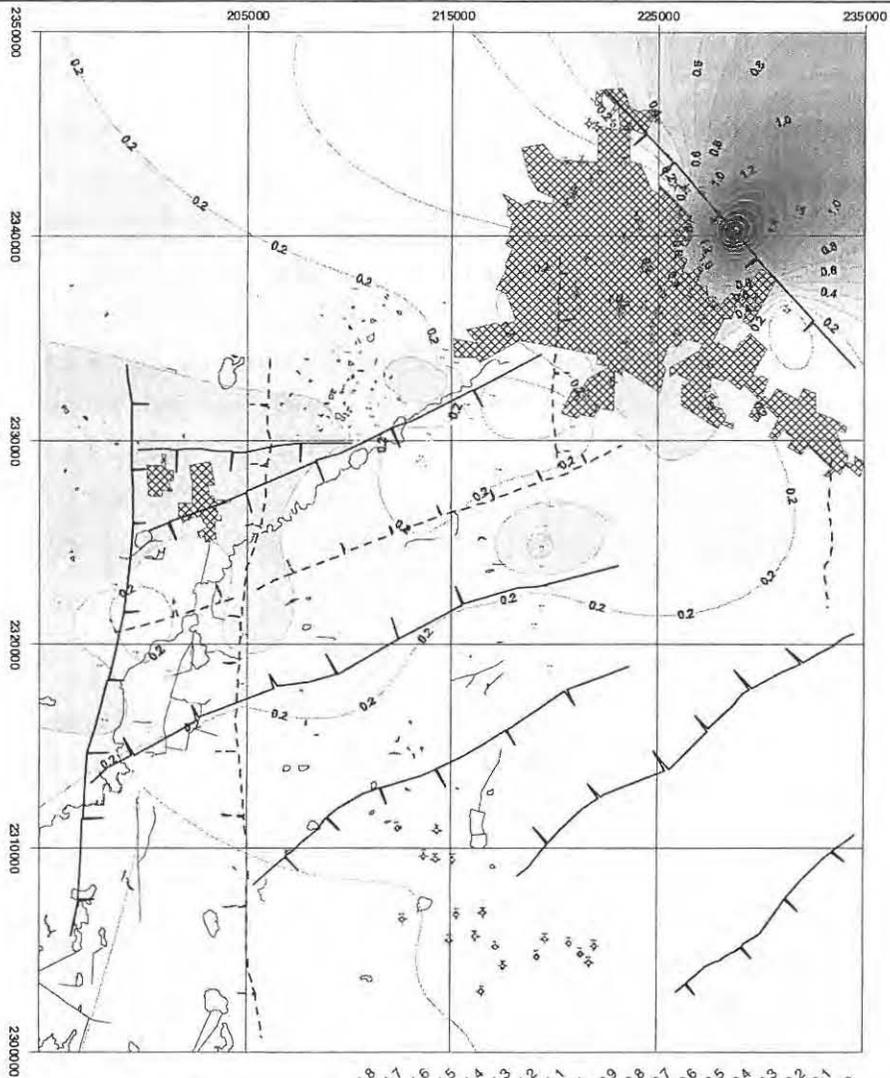
Las concentraciones de sulfatos son altas, al sur de San Francisco del Rincón y corresponden a valores de muestras tomadas de la aguas residuales del Río Turbio, con concentraciones de 371.10 y 231.10 mg/l (Tabla 2). Estos valores no rebasan la Norma 127. En aguas subterráneas se observan concentraciones de hasta 120 mg/l en pozos de la Ciudad de León para este ion, lo cual podría corresponder a contaminación antropogénica asociada a fugas de aguas residuales domesticas (**Figura 30**).

En la Batería de La Muralla, este componente es importante en la firma química que la caracteriza (**Figura 30**), se tienen valores altos, del orden de 120mg/l; sin embargo, por las profundidades de explotación dichas concentraciones podrían indicar la evolución de aguas bicarbonatadas a sulfatadas (flujos intermedios a regionales).

Ion Bicarbonato

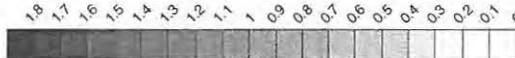
En aguas con pH inferior a 8,3, la mayoría de las aguas subterráneas naturales, la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato. En estas aguas la concentración suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/l. Concentraciones de hasta 1000 mg/l pueden encontrarse en aguas pobres en Ca y Mg o en las que se producen fenómenos de liberación de CO₂ (p.e. reducción de sulfatos) en el acuífero.

Está sujeto a complejos procesos de disolución - precipitación, por lo que es necesario analizarlo "in situ".



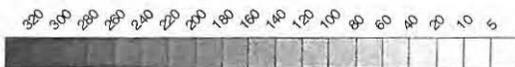
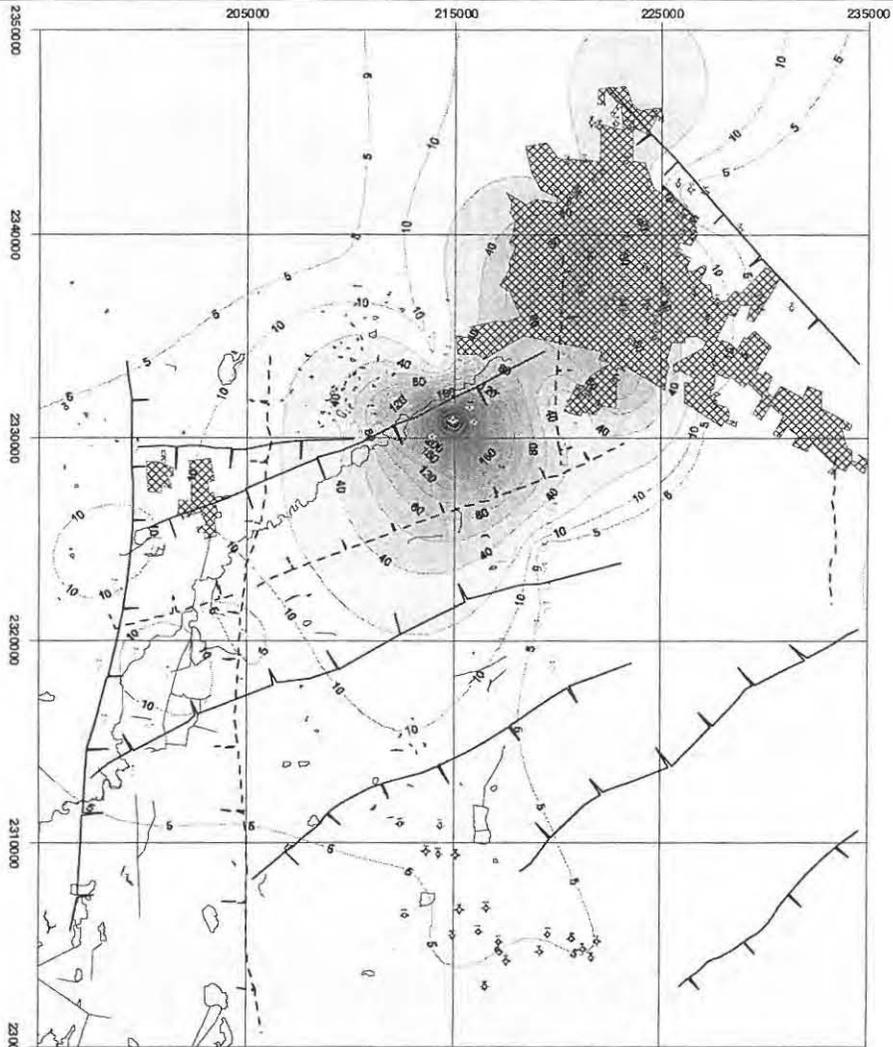
SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR



Litio en aguas subterranas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL CATION LI	
FIGURA No. 26	JULIO 2004.

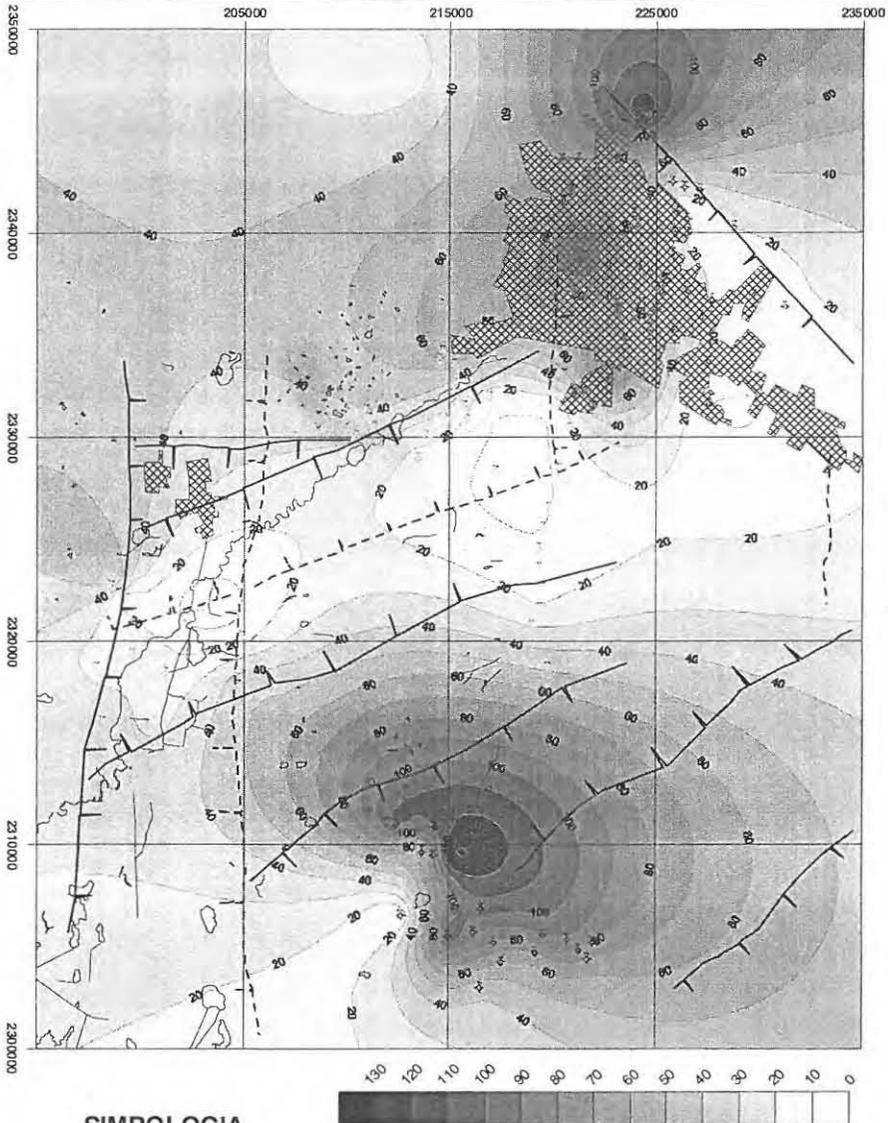


SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR

Cloruros en aguas subterráneas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL ANON CLORURO	
FIGURA No. 29	JULIO 2004.

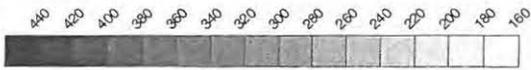
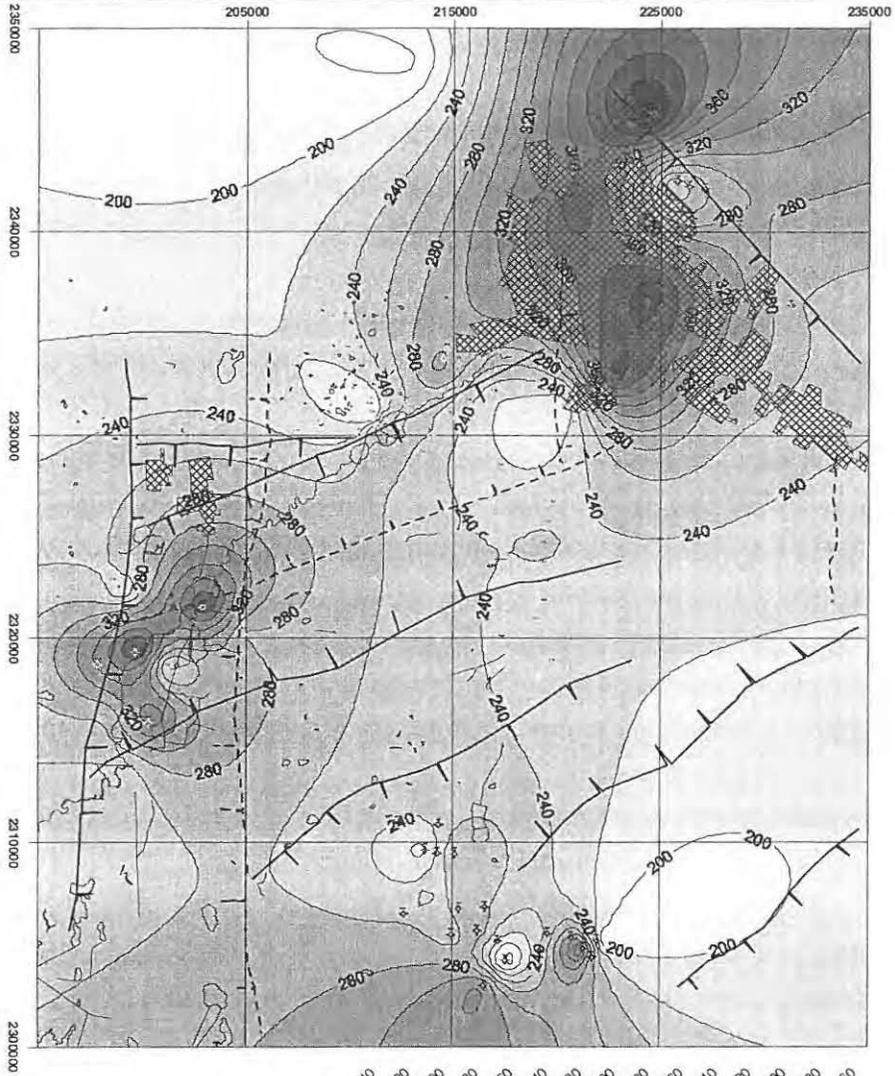


SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR

Sulfatos en aguas subterráneas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL ANION SULFATO	
FIGURA No. 30	JULIO 2004.



SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR

Bicarbonatos en aguas subterráneas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL ANION BICARBONATO	
FIGURA No. 31	JULIO 2004.



La disolución de la calcita es la principal fuente de HCO_3^- en el agua. En el área existen calizas arcillosas donde este anión podría ser el resultado del paso del agua a través de esta formación. La firma química con este componente en todos los grupos indica que toda el área se comporta como zona de recarga (Figura 31).

Ion Nitrato

El nitrógeno puede aparecer en forma de NH_3 , NH_4 y, por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en NO_2 y, finalmente en NO_3 que es la forma más usual y estable.

Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas bien como resultado de la disolución de rocas que los contengan, lo que ocurre raramente, bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede de 10 mg/l.

El origen de los nitratos en las aguas subterráneas no siempre es claro. Son relativamente estables pero pueden ser fijados por el terreno o ser reducidos a nitrógeno o amonio en ambientes reductores. A menudo son indicadores de contaminación alcanzando entonces elevadas concentraciones y presentando, por regla general, una estratificación clara con predominio de las concentraciones más elevadas en la parte superior de los acuíferos libres.

El tipo de contaminación a que es debida su presencia en el agua subterránea está relacionado con las actividades urbanas, industriales y ganaderas, y muy frecuentemente, con carácter no puntual, con las prácticas de abonados intensivos inadecuados con compuestos nitrogenados.

Puesto que las plantas sólo pueden aprovechar el nitrógeno en forma de nitratos, el tipo de fertilizante aplicado condiciona la proporción de nitrógeno utilizable por las mismas y, en consecuencia, la cantidad no aprovechada por ellas que se infiltra hacia el acuífero. La concentración de nitrato en el agua de infiltración depende, pues, del tipo de fertilizante y, además, de la frecuencia,

cantidad y modo de aplicación así como del nitrógeno orgánico o inorgánico ya existente en el suelo, así como de su permeabilidad, grado de humedad, etc..

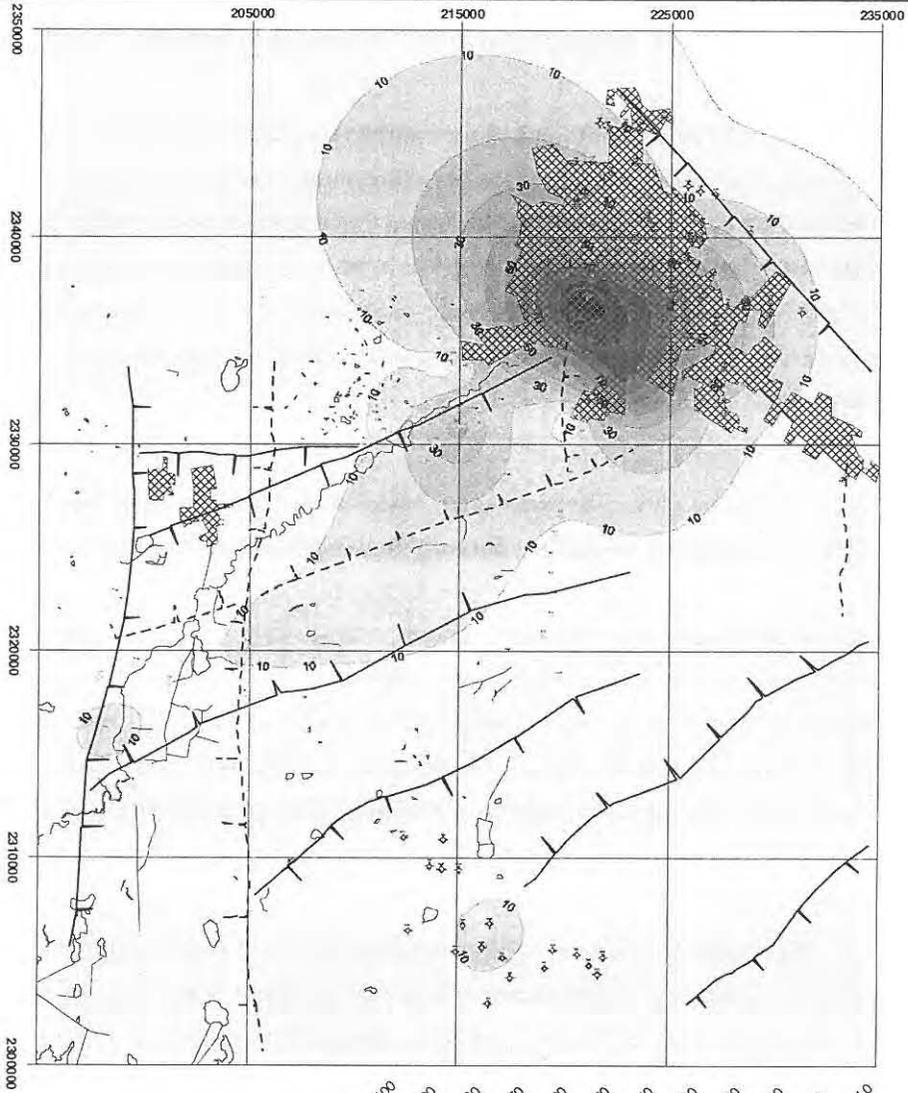
Los valores de nitratos tiene un mínimo de 2.23 mg/l y valores máximos de 113 mg/l. Los valores más altos se concentran en la Ciudad de León. En comparación con la Batería de La Muralla estos valores son casi nulos. En la parte surponiente de la batería del Turbio probablemente, derivado de la contaminación de aguas derivadas de drenajes rotos, así como por el uso de fertilizantes de nitratos y la concentración y descomposición de desechos humanos y animales (**Figura 32**).

Ion Fluoruro

El ión fluoruro parece estar relacionado con la alteración de rocas plutónicas. Los valores del ion fluoruro tienen valores mínimo de 0.15 a 8.7 mg/l para el pozo Turbio 15 con 3.67 mg/l y para el pozo Ciudad 46 con 8.7 mg/l; estos valores altos pueden dar aguas altamente corrosivas para el uso humano o para las actividades industriales. El máximo permitido por la NOM. 127 es de 1.5 mg/l mientras que la Agencia de Protección Ambiental EPA es de 4.0 mg/l por lo que si tomamos en cuenta esta última, solamente el pozo Ciudad 46 la rebasa. Las altas concentración de este ión podrían ser diluidas con la mezcla de agua de otros pozos para servir como complemento en el agua para osificación de los dientes de la población.

El contenido de este anión puede ser de carácter regional por erosión de depósitos naturales ya que altos valores corresponden a los pozos del Grupo I. Dicha característica se suma a las altas temperaturas y pH del orden de 8 que imprimen la firma química al grupo.

Los altos valores de los pozos T1b y T2 podrían estar relacionados con descargas de fabricas de fertilizantes en la zona (**Figura 33**).

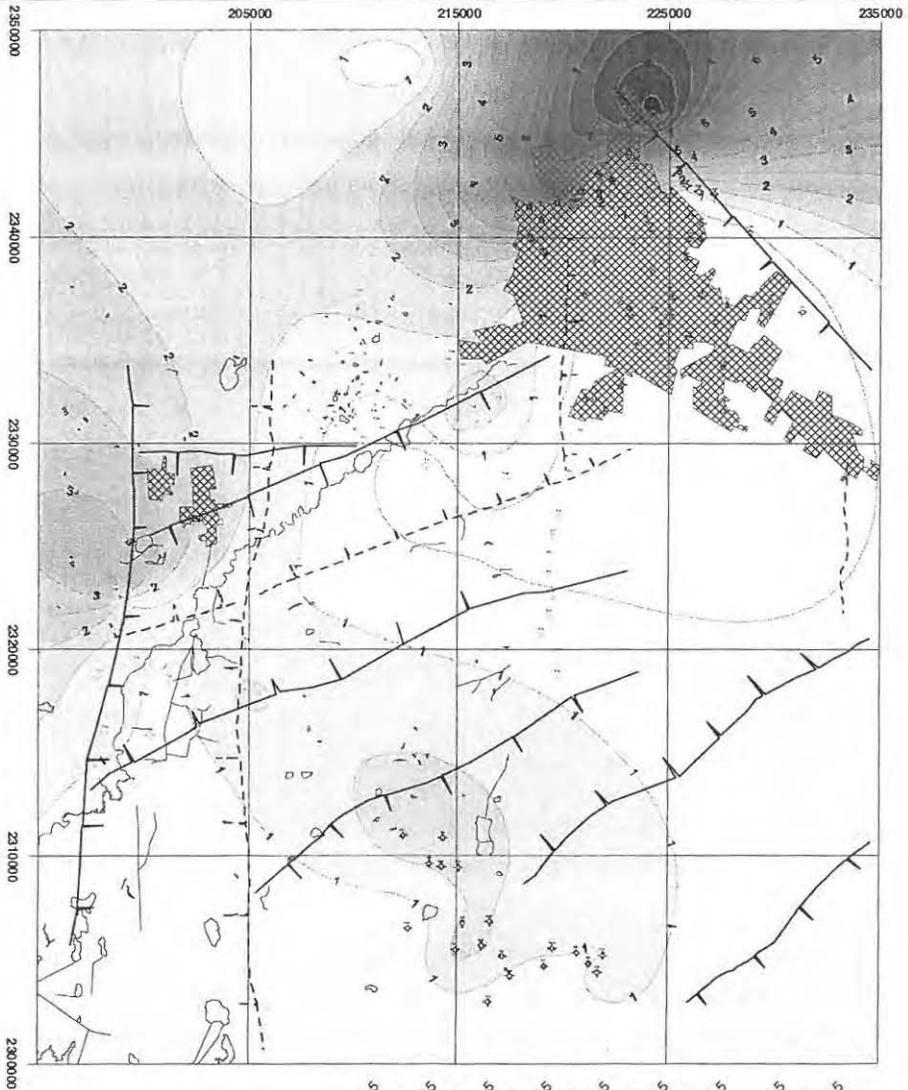


SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR

Nitratos en aguas subterráneas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL ALICÓN NITRATO	
FIGURA No. 32	JULIO 2014.



SIMBOLOGIA

- ◆ POZO
- ▨ POBLADO, ZONA URBANA.
- ~ RIO
- FALLA GEOLOGICA
- 150 ISOVALOR



Flour en aguas subterranas mg/l

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LOS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL ANION FLUOR	
FIGURA No. 33	JULIO 2014.



Gráfica cloruro vs litio

En la **Figura 34** se muestra un diagrama de iones conservativos litio y cloruros en este diagrama se observa el grupo tres con contenidos de cloruros constante. De los demás grupos no se observa una tendencia clara.

Li (mg/l)

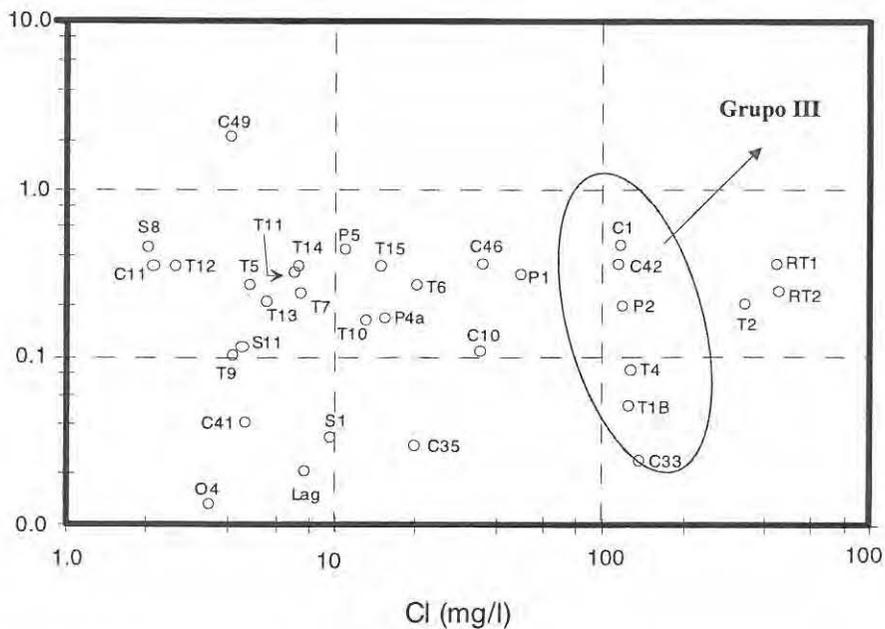


Figura 34. Gráfica Litio vs Cloruros. EL comportamiento de esta gráfica difiere a la que se obtuvo en la Batería de la Muralla (CEASG-IGFUNAM 1999).

Gráfica Magnesio vs Calcio

En la **Figura 35** se graficaron los iones Mg^{2+} y Ca^{2+} con la finalidad de diferenciar aguas contaminadas. Tomando en consideración que la fuente principal de enriquecimiento de estos iones en la naturaleza, se debe a la disolución de componentes de la que interacción agua-roca. En este trabajo se considera que el aumento del calcio y el magnesio puede deberse a los retornos de riego así como pozos influenciados por los ríos León y Turbio.

De aquí se puede observar que las aguas más contaminadas son evidenciadas por los altos contenidos de estos cationes y corresponden al Grupo III, mientras las bajas concentraciones las contienen pozos que conforman el Grupo I.

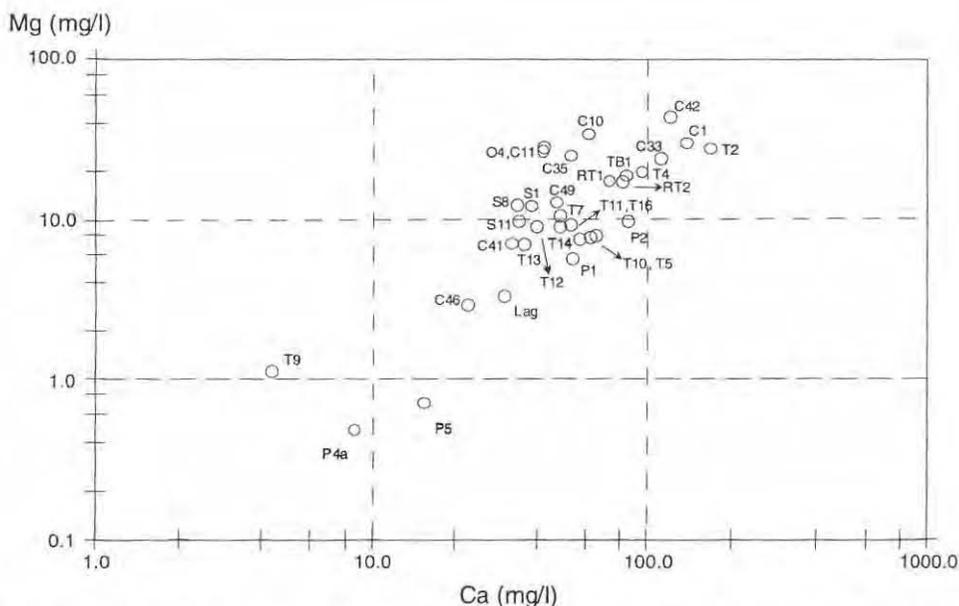


Figura 35. Gráfica magnesio vs calcio. Se muestra la distribución en escala logarítmica de Mg^{2+} y Ca^{2+} las mayores concentraciones corresponden con aguas del grupo tres.

IV.3.2 Análisis de metales

Se realizaron 38 análisis de metales pesados 15 de ellos en el Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica de Querétaro (CIDETEQ), y 23 en el Laboratorio de Plasma del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IGFUNAM), Tablas: 3 y 4, respectivamente.

Las Técnicas utilizadas por el CIDETEQ están acreditadas en la Entidad Mexicana de Acreditación con número Q-112-020/99 y número de referencia 99LP0105; así mismo dicho laboratorio cuenta con certificación NMX-CC-004:1995/ISO9002:194, con registro RSC-224.

La técnica empleada para el Aluminio, Bario, Cobre, Cromo total, hierro, Manganeso, Sodio, y Zinc fue la de Espectrofotometría de emisión de plasma (ICP-MS). El ICP-MS se caracteriza por su gran sensibilidad y sus bajos límites de detección. Estas características y la capacidad de análisis multielemental simultáneo hacen que en los últimos años hayan sido desarrolladas un gran número de aplicaciones en diferentes campos. El mercurio fue analizado mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con generador de hidruros (AA-H).

Para el análisis de Arsenico y Plomo se utilizó espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito.

METAL	Limite de det, (ppb)	bco	42 C	11 T	4 T	8 T	1BT	9 T	3 P	2 T	5 T	3 S	13 T
V	0.030	0.10	19.97	23.61	27.43	54.10	35.07	50.24	48.37	39.74	47.81	31.51	61.90
Cr	0.064	0.12	19.35	12.86	12.83	19.06	15.73	21.20	14.26	15.12	18.08	20.10	18.50
Mn	0.028	0.24	3.97	0.61	0.79	1.73	2.03	1.09	7.13	10.76	1.55	1.29	1.00
Co	0.012	0.04	0.28	0.13	0.23	0.16	0.24	0.07	0.35	0.85	0.15	0.19	0.13
Ni	0.044	3.08	4.21	3.33	3.63	4.73	4.98	3.31	4.33	13.65	4.57	1.67	3.84
Cu	0.096	0.80	4.36	1.64	1.51	1.61	2.38	2.35	12.45	4.50	1.51	1.58	1.29
Zn	0.078	0.40	28.67	8.25	9.35	15.85	5.91	11.46	15.76	20.80	7.34	5.12	11.50
As	0.014	1.50	7.16	11.10	10.13	20.89	14.12	31.62	19.18	13.43	18.12	8.29	32.80
Mb	0.086	1.16	1.95	2.55	1.67	7.58	3.45	5.19	5.15	2.04	5.92	2.89	9.42
Cd	0.018	0.02	0.05	0.02	0.03	0.22	0.07	0.03	0.03	0.07	0.03	0.07	0.03
Sb	0.010	0.45	1.03	1.03	0.85	1.09	0.88	0.83	0.83	0.64	0.83	0.36	0.70
Ta	0.024	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.04	0.02	0.03
Pb	0.052	0.08	0.83	0.53	0.41	0.30	0.42	0.17	1.38	0.42	0.09	0.40	0.06

METAL	Limite de det, (ppb)	1 O	²³ A C	2A P	5P	35	3 O	2 O	1T	4A P	38	10 C	21
V	0.030	12.73	9.57	11.42	16.40	20.13	20.86	23.61	22.40	41.57	22.81	14.27	21.65
Cr	0.064	11.84	5.18	4.27	4.52	5.64	23.93	27.74	15.78	13.52	12.33	12.23	16.97
Mn	0.028	0.19	0.16	0.28	0.12	0.17	0.44	0.53	0.57	0.57	0.60	0.38	0.59
Co	0.012	0.10	0.08	0.03	0.03	0.07	0.19	0.18	0.19	0.07	0.25	0.17	0.28
Ni	0.044	0.11	0.94	0.52	0.53	0.81	1.75	1.67	1.72	0.95	2.00	4.01	2.15
Cu	0.096	1.20	1.36	0.46	0.21	0.94	1.12	1.00	1.10	0.39	0.95	1.63	1.66
Zn	0.078	1.64	3.82	7.44	4.21	2.38	11.61	5.03	7.84	6.63	10.25	9.47	4.57
As	0.014	3.29	6.24	11.44	7.31	4.81	5.98	5.06	9.58	11.87	5.29	4.98	7.96
Mb	0.086	3.37	2.21	2.16	1.53	3.87	5.25	3.84	2.75	3.03	3.91	2.05	3.64
Cd	0.018	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.03	0.06
Sb	0.010	0.49	0.35	0.31	0.26	0.23	0.74	0.54	0.25	0.34	0.21	1.09	0.40
Ta	0.024	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.19	0.04
Pb	0.052	0.13	0.21	0.43	0.09	0.14	0.24	0.14	0.12	0.18	0.16	0.65	0.23

Nota: Las concentraciones están expresadas en ug/lit (ppb).

Tabla. 4 Análisis de metales del laboratorio de CIDETEQ



Metal	2 T	1 BT	42 C	4 T	13 T	11 T	2 PTE	5 T	LMP
CN	Nd	< 0.006	< 0.006	< 0.006	Nd	< 0.006	< 0.006	< 0.006	0.07
Al	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2
As	0.02806	0.03153	0.02949	0.2969	0.0537	0.03031	0.03851	0.03174	0.05
Ba	0.515	0.23	0.146	0.278	0.058	0.05	0.196	0.067	0.7
Cd	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.005
Cu	< 0.005	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	2
Cr	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	0.05
Fe	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.3
Mn	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.164	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.15
Hg	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	0.001
Pb	0.01508	0.0065	0.0067	0.0063	0.00726	0.00635	0.00728	0.00619	0.02
Na	122.6	30.6	30.8	31.1	60.9	1805	50.1	39	200
Zn	0.124	0.07	0.096	< 0.05	0.057	0.053	0.052	< 0.05	5

Metal	8 T	30 CD	46 CD	44 CD	4A PTE	15 T	34 CD	LMP
CN	< 0.006	< 0.006	< 0.006	Nd	< 0.006	Nd	Nd	0.07
Al	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2
As	0.03599	0.02408	0.00662	0.2372	0.029	0.1039	0.02948	0.05
Ba	0.151	0.057	< 0.05	0.115	< 0.05	< 0.05	0.192	0.7
Cd	< 0.001	< 0.001	0.00169	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.005
Cu	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	2
Cr	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	0.05
Fe	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.01	< 0.05	0.3
Mn	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.15
Hg	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	0.001
Pb	0.00637	0.00503	0.01147	0.00714	0.00803	0.0084	0.0079	0.02
Na	37.875	25	213	44.875	112.8	107.2	40.1	200
Zn	< 0.05	< 0.05	0.159	< 0.05	0.063	0.054	< 0.05	5

LMP = Límites Máximos Permisibles para agua potable de acuerdo a la Norma Oficial mexicana NOM-127-SSAI-1994.

Nota: Las concentraciones están expresadas en mg/lit.

Tabla 5. Análisis de metales del laboratorio ICP-IGFUNAM.

IV.3.2 Análisis isotópico

Conceptos básicos de isótopos

Molécula de agua

El agua es un compuesto químico que comprende dos moléculas de hidrógeno y un átomo de oxígeno, compartiendo electrones por medio de ligaduras covalentes entre átomos, su fórmula molecular es H_2O tanto en estado sólido, líquido y gaseoso. (Figura 36)

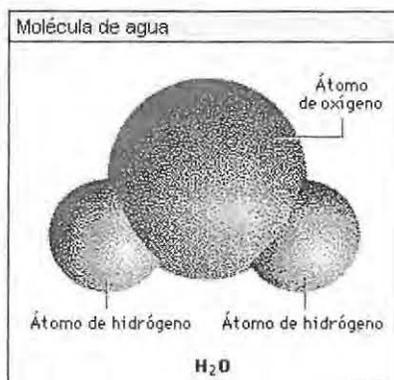


Figura 36. Modelo estructural de una molécula de agua.

Los átomos de hidrógeno son localizados simétricamente con respecto a del oxígeno. Debido a esta estructura y el enlace covalente, el centro eléctrico de las cargas negativas (electrones) tiene una disposición diferente que el de cargas positivas. Esta separación hace a la molécula polar en términos de cargas eléctricas

Las moléculas de agua son unidas por una serie de ligaduras de hidrógenos estas ligaduras interaccionan electrostáticamente entre un hidrógeno y un átomo de oxígeno y producen redes irregulares tetrahedrales (Figura 37). Esta estructura explica algunas de las características únicas del agua, tales como los puntos de congelamiento y de ebullición (Domenico y Schwartz 1998).

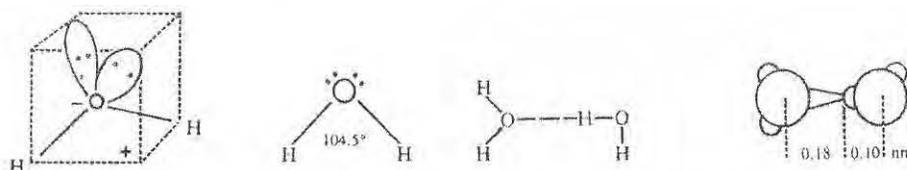


Figura 37. Muestra la disposición espacial de las moléculas del agua misma que le confiere características de particularidad.

Características generales de los isótopos

Los isótopos son átomos del mismo elemento cuyo núcleo contiene el mismo número de protones y diferente número de neutrones, esto es, son especies que tienen el mismo número atómico pero diferente masa atómica. Estas características las hacen prácticamente iguales en sus propiedades químicas y muy diferentes en sus propiedades físicas.

La manera más común de denotar a los isótopos es de la siguiente forma: mE , en donde el índice superior m representa la masa y E el elemento, por ejemplo ^1H , ^{13}C , ^{18}O , ^{34}S , etc. Cada elemento en su forma elemental o como compuesto, tiene diferentes isótopos, los cuales son actualmente utilizados como una herramienta muy útil dentro de las investigaciones en el área de las Ciencias de la Tierra.

Estas especies atómicas pueden ser estables o inestables; las primeras son aquellas que su masa no cambia en el tiempo y las inestables o radioactivas decaen en isótopos de otro elemento, lo cual significa que una cantidad de un isótopo radiactivo en un sistema cerrado, cambia su masa con el tiempo convirtiéndose en otro elemento, (Hoefs, 1980).

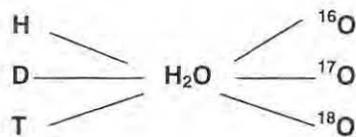
Isótopos estables

Los isótopos estables se encuentran como constituyentes de los elementos que existen en la naturaleza. Para la mayoría de los elementos pesados las cantidades relativas entre ellos casi no varían. Sin embargo, Para elementos ligeros las pequeñas diferencias en masa, traen como consecuencia variaciones en sus propiedades físicas como: diferente punto de ebullición y de condensación, así como diferentes velocidades de reacción (Cortés A., 1985).

Fraccionamiento Isotópico

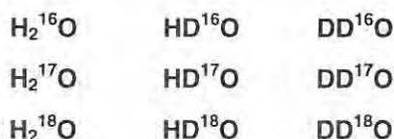
Es la diferencia en la distribución de los isótopos de un mismo elemento que coexisten entre dos compuestos o fases, en mutuo intercambio isotópico. Esta coexistencia no es uniforme debido a las propiedades físicas de los isótopos, por lo tanto, a mayor diferencia relativa de masa entre dos isótopos de un elemento dado, mas significativo será su fraccionamiento y en consecuencia el efecto isotópico será más pronunciado.

Para el caso específico del agua, todas las especies isotópicas del hidrógeno y del oxígeno son incorporadas a su molécula. Por lo que las moléculas formadas por la combinación de los respectivos isótopos estarán presentes en cualquier masa de agua. El hidrógeno ligero 1H es el más común; el hidrógeno pesado se conoce como deuterio ^2H o D; y el Tritio ^3H o T, que es un isótopo pesado. Para el oxígeno, el isótopo más común y ligero es el ^{16}O ; el ^{17}O es un isótopo raro; y el ^{18}O es el más pesado y no es común encontrarlo (Mazor, 1997).





Debido a que existen de manera natural éstos tres isótopos de oxígeno y tres de hidrógeno, se pueden formar 9 variedades distintas de moléculas de agua (Hem, 1992).



Las combinaciones más abundantes e importantes que tienen interés práctico son: $^1H_2^{16}O$ que es la molécula de agua más común y la más ligera; $D^{16}O$ y $H_2^{18}O$ que son las moléculas de agua más pesadas.

Aun cuando los isótopos más comúnmente utilizados son aquellos que constituyen a las moléculas de agua (^{18}O , 2H), en hidrología isotópica se utilizan también algunos otros isótopos ambientales que ocurren en compuestos disueltos tales como Carbono-13 (^{13}C), Carbono-14 (^{14}C), Azufre-34 (^{34}S), y Nitrógeno-15 (^{15}N) que resultan ser muy valiosos en estudios de agua subterránea.

Notación Delta

Dada la dificultad de medir con suficiente exactitud la abundancia absoluta de cada isótopo, se ha preferido medir abundancias relativas con respecto a un Estándar. Estas se obtienen por medio de espectrómetros de masas, tipo Nier (1950), que son instrumentos diseñados para moléculas de acuerdo a su relación carga-masa con base en su movimiento a través de campos eléctricos y/o magnéticos. (McDowell C., 1963).

Los valores relativos de abundancia isotópica de una muestra determinada, con respecto a una referencia se soportan en unidades de “ δ ”, que define como: (Gat J. And Gonfiantini R., 1981)

$$\delta_{m-r} = (R_m - R_r) / (R_r) \times 1000$$

Donde R, es la razón del isótopo pesado o raro al ligero o abundante, para la muestra, m y para la referencia, r. Debido a que las diferencias entre muestras y referencia son pequeñas, es conveniente reportar los resultados en tantos por mil, las relaciones para los diferentes elementos para los isótopos más usados se expresa como: ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), (D/H),...,etc.

Para fines de interpretación, el hecho de que el valor delta sea mayor que cero significa que la muestra se encuentra enriquecida en el isótopo pesado con respecto a la referencia; de igual manera, para deltas menores que cero diremos que la muestra se encuentra empobrecida con respecto a la referencia, (Gonfiantini, 1978).

Patrones de Referencia

Uno de los problemas más serios que se presentaron al inicio de la utilización de los isótopos estables en agua, fue la comparación de resultados obtenidos por los diferentes laboratorios. Es por esto que se ha aceptado internacionalmente que los datos isotópicos sean referidos a patrones de referencia distribuidos por organismos como: IAEA (International Atomic Energy Agency) y el NBS (National Bureau of Standards).

Actualmente los datos son reportados en (‰) con respecto a un patrón internacional, esto es, cada laboratorio debe hacer una calibración del patrón de trabajo interno, con respecto a una referencia obtenida por los organismos mencionados. El patrón de referencia que es universalmente aceptado como base para medir las variaciones de abundancia relativas de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en agua, es el llamado SMOW (Standard Mean Ocean Water). Este patrón corresponde a un tipo de agua “hipotética”, con relaciones



isotópicas iguales de oxígeno e hidrógeno, asociado a este valor el de referencia "cero".

Para muestras de agua, se pueden mencionar las siguientes ventajas de usar la referencia SMOW:

- I) El océano constituye el punto inicial y final del ciclo hidrológico por lo que se puede considerar una referencia lógica para la composición isotópica de aguas naturales
- II) Para agua dulce los valores contra SMOW, representan la evaluación del fraccionamiento isotópico, desde su evaporación en los océanos hasta el momento de la recolección de la muestra, siendo éste el resultado de los procesos físico-químicos que reflejan la historia hidrológica de cada agua.
- III) Los océanos contienen el mayor porcentaje del total de agua contenida sobre la superficie terrestre conservando además, una composición isotópica uniforme.

Muestreo

El muestreo para análisis isotópicos en muestras de agua es un procedimiento muy simple, pero deben tomarse en cuenta algunas precauciones en el manejo y colección. Para cada muestra en cualquier tipo de análisis debe etiquetarse la muestra con los datos más importantes del lugar de colección como son: número de muestra, fecha, localidad, PH, conductividad y temperatura. Todas las botellas deben estar completamente llenas, cerradas con tapa y contratapa. Para el caso específico de oxígeno y deuterio, las muestras deben sellar con cera para evitar evaporación, la cual modifica el valor isotópico original y en consecuencia genera errores en la interpretación de resultados.

Para el caso de oxígeno y deuterio se requiere de una muestra de 70 ml. En botella de vidrio, de preferencia color ámbar, Para evitar la proliferación de microorganismos que pueda contener el agua.

Línea Meteorica Mundial

La concentración de Oxígeno-18 expresada como relación isotópica en la precipitación, se encuentra correlacionada linealmente con la relación isotópica de deuterio. A pesar de los factores que pueden influir en la composición isotópica de aguas meteóricas, la composición isotópica media anual de las precipitaciones se mantiene aproximadamente constante dentro de una misma región geográfica del globo terrestre (**Figura 38**). Esto se debe a que los factores que deciden el fraccionamiento actúan de forma reproducible año con año. Esta propiedad es utilizada en estudios de caracterización global de la composición de isótopos estables durante el ciclo hidrológico a nivel mundial. Debido a que el mayor porcentaje del agua que circula en la litosfera es de origen meteórico resulta muy importante el estudio de la precipitación mundial, con el fin de obtener una mejor evaluación en investigaciones con isótopos estables. Para fines de explotación de los recursos hídricos subterráneos. Con este objetivo, el Organismo Mundial de energía Atómica (IAEA), estableció una red de estaciones meteorológicas alrededor del mundo para determinar el contenido isotópico de Oxígeno-18 y deuterio en agua de lluvia. La red quedó formada por un total de 144 estaciones clasificadas como: Isleñas, Costeras y Continentales, de acuerdo a su localización geográfica, (Cortés A., 1985).

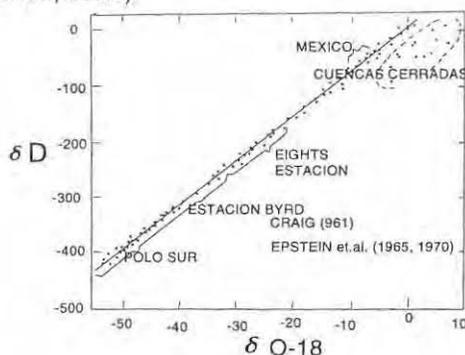


Figura 38. Línea Meteorica Mundial. δD versus $\delta^{18}O$ para variaciones de agua meteórica superficial (Taylor, 1974)

Una evaluación de los datos recolectados durante los primeros 40 meses de este programa, dio como resultado la siguiente relación en el contenido de Oxígeno-18 y deuterio en precipitación, (IAEA. 1981):

$$\delta D = (8.17 + 0.1) \delta O^{18} + (10.56 + 0.64) \text{‰}$$

Con un coeficiente de 0.997. En esta línea se observa gran similitud con respecto a la definida por Craig en 1961 para aguas meteóricas representadas por la ecuación:

$$\delta D = 8\delta O^{18} + 10.$$

Esta relación lineal se puede explicar por el hecho de que, en el equilibrio, la diferencia de presiones entre el agua y su vapor es de aproximadamente 8 veces más grande para la delta de deuterio que para las de oxígeno-18. La relación entre oxígeno-18 y deuterio suele diferir a nivel regional de los valores mencionados, aunque la pendiente de 8 casi siempre se conserva y solo la ordenada al origen puede variar un poco, (Fritz and Fontes 1980).

Con el objeto de relacionar la composición isotópica de cualquier muestra de agua de la LMM, Dansgaard, 1964, definió el "parámetro d" (parámetro del exeso de deuterio), como:

$$d = \delta D - 8\delta^{18}O$$

Los valores de "d" de cualquier muestra pueden ser interpretados como la intersección con el eje δD , para $\delta^{18}O=0$, de la línea cuya pendiente $\Delta\delta D/\Delta\delta^{18}O=8$, la cual pasa precisamente por ese punto.

Los Isótopos Ambientales como Trazadores

En hidrología el término "isótopos ambientales" es generalmente usado para describir isótopos que ocurren de manera natural en el ciclo hidrológico. La mayoría de las masas de vapor atmosférico que llevan el agua a los continentes se originan en el océano; debido a los diferentes cambios físicos que afectan a los elementos que forman a la molécula de agua, estas masas de vapor estarán empobrecidas en los isótopos pesados (O-18 y D), comparadas con el agua

oceánica. Esto se debe principalmente a que el proceso de evaporación en los océanos se lleva a cabo en condiciones fuera del equilibrio e involucra efectos cinéticos y además el proceso de condensación que origina las precipitaciones. (castillo R. 1985).

Por lo anterior, se observa que el contenido de los isótopos pesados del agua en casi todas las precipitaciones será menor que en los océanos. La condensación removerá preferentemente los isótopos pasados de la nube, así el enfriamiento continuo y la condensación progresiva empobrecerán en O-18 y D a la masa de vapor.

El fraccionamiento isotópico durante la condensación en las nubes es un proceso dependiente fundamentalmente de la temperatura a la cual ocurre, (Figura 39).

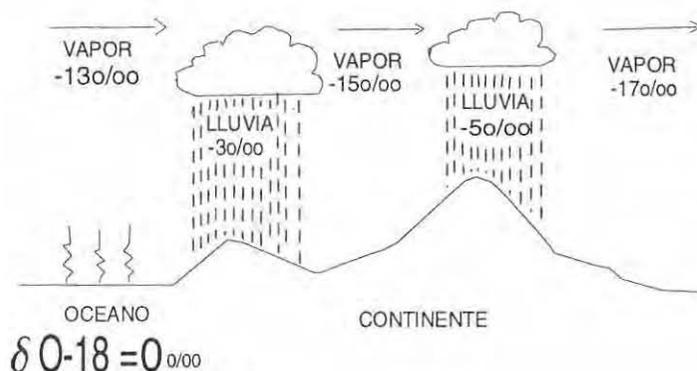


Figura 39. Efecto continental, Tomada de E. Jäger and J.C. Hunziker, 1979

La presión atmosférica del momento de la condensación influye muy poco. Esto se ve reflejado en la relación de la composición isotópica de la precipitación con respecto a la temperatura media anual del lugar.

Variaciones de deuterio y Oxígeno-18 en el Ciclo Hidrológico

Los diferentes tipos de aguas pueden ser clasificados de varias formas. La manera más común de agruparlas es de acuerdo con los diferentes procesos ya sean físicos o químicos esto es, debido a los diferentes procesos termodinámica y de intercambio que sufren durante su historia, (Cortés A., 1985).

Refiriéndonos a las aguas meteóricas, consideradas como aquellas que siguen el ciclo hidrológico; evaporación, condensación y precipitación. Podemos expresar en términos “generales” que las aguas continentales caen dentro de esta categoría y por tanto las que más conciernen al estudio de aguas subterráneas.

Las variaciones, tanto temporales como espaciales, del contenido isotópico de las aguas de precipitación, tienen su origen en la redistribución isotópica que existe durante los cambios de fase a través de ciclo hidrológico. El grado de fraccionamiento isotópico depende de varios parámetros tales como:

la composición isotópica inicial, la velocidad de reacción y las condiciones termodinámica en las cuales ocurre el cambio de fase. La intervención de estos factores, esencialmente la temperatura, en forma individual o combinada trae como consecuencia ciertos patrones de fraccionamiento o como usualmente se le llaman “efectos” que influyen de manera determinante sobre la composición isotópica de la precipitación.

La aplicación de las técnicas está estrechamente ligada a la existencia de los efectos isotópicos, estos estudios han sido derivados de observaciones a largo plazo en las cuales han intervenido varios grupos de investigación a nivel mundial, (Cortés A., 1985)

- Efecto de latitud: La latitud geográfica de un lugar tiene una relación fuerte con la temperatura media anual, por lo que la concentración de isótopos del agua precipitada reflejará el efecto de la latitud. La red mundial establecida por la IAEA reconoció que la estaciones localizadas a grandes latitudes en los hemisferios sur o norte, presentan valores más negativos que las estaciones localizadas cerca del

ecuador. Para Norteamérica el efecto de latitud es de -0.5% en oxígeno por grado de latitud.

- Efecto de altitud: Experimentalmente, se observa que a medida que las masas de aire suben o bajan, dependiendo de la topografía y el clima local se presenta una variación isotópica, reflejando valores más negativos cuando la altitud aumenta. La magnitud de este efecto presenta gradientes de 0.15 a 0.5%, en Oxígeno-18 por cada 100 metros y de 1.5 a 4% en Deuterio por cada 100 metros.

- Efecto de cantidad: Existe también una correlación entre la cantidad de lluvia precipitada y el contenido isotópico; pero este efecto se puede observar principalmente en las estaciones localizadas en las islas tropicales.

- Efecto continental: Se ha observado que a medida que se toman muestras de agua meteórica partiendo de la costa hacia el centro de los continentes, éstas presentan un empobrecimiento en los isótopos pesados de oxígeno e hidrógeno.

- Variaciones estacionales: Las lluvias de invierno, en general, están empobrecidas en isótopos pesados en comparación con las precipitaciones del verano por razones de temperatura, a la cual ocurre la precipitación.

Algunos de los aspectos importantes dentro de estudios hidrológicos, en donde se utilizan isótopos ambientales como trazadores, pueden resumirse de manera general, en la siguiente forma:

- I) Interacción aguas superficiales-aguas subterráneas
- II) Intrusión Salina
- III) Areas de recarga u origen de aguas subterráneas
- IV) Tiempos de residencia

Características isotópicas del agua subterránea y superficial.

Agua Subterránea

La forma de determinar el origen geográfico de la recarga y los procesos que puede sufrir el agua subterránea de alguna región bajo estudio, se encuentra en el hecho de que el contenido isotópico del agua infiltrada se conserva y que se puede relacionar con la composición isotópica promedio del agua de recarga. En términos generales la interpretación isotópica debe estar acompañada por un análisis hidrogeológico y una evolución geoquímica de la zona en estudio., (Cortés A., 1985).

Idealmente la interpretación de datos isotópicos en aguas subterráneas, se puede plantear con base en los siguientes lineamientos:

- 1) Es necesario generar una base de datos sobre las concentraciones isotópicas en el agua de lluvia de la región bajo estudios. Los datos isotópicos de la lluvia, deben ser promedios ponderados con respecto a la cantidad de precipitación debiéndose tomar en cuenta el período en el cual se producen los principales procesos de recarga..
- 2) Posteriormente se determina la composición isotópica en los diferentes acuíferos de la región y se compara con el contenido isotópico de las precipitaciones. Si éste coincide con el mapeo del agua subterránea de la zona, este análisis podrá determinar la altura de recarga, la existencia de recarga local o la posibilidad de flujos regionales. En caso de que se observen discrepancias entre el contenido isotópico de las lluvias y el de las aguas subterráneas, es necesario tomar en cuenta otros factores tales como:
 - I) La existencia de un desplazamiento geográfico de las masas en el agua por escorrentía superficial produciendo variaciones en el contenido isotópico.
 - II) Recarga subterránea por embalses de agua superficial principalmente evaporada, como son: presas, ríos etc., ya que a medida de que estas aguas se



evaporan se enriquecen isotópicamente, alterándose los valores delta de relaciones deuterio y oxígeno-18, en estas aguas de recarga.

- III) Variaciones en el tiempo de la composición isotópica de la precipitación. Esto ocurre porque la recarga se efectuó en el pasado remoto y por lo tanto, bajo condiciones de precipitación distintas a la actual; esto ocurre especialmente en climas áridos o semiáridos en donde las aguas subterráneas se encuentran empobrecidas en isótopos pesados, no pudiendo ajustarse los resultados al contenido isotópico de la precipitación actual.
- IV) Mezclado con cuerpos de agua de origen no meteórico como puede ser salmueras, aguas de mar aguas fósiles o aguas juveniles.
- V) Interacción con formaciones geológicas que conducen a intercambio o fraccionamiento isotópico entre los átomos que componen el agua y las especies químicas que forman el terreno. Un ejemplo de esta interacción son las aguas termales, con temperaturas mayores de 100 grados centígrados, en donde se observa un enriquecimiento de O-18 por intercambio de oxígeno con las rocas; en este caso se mantiene el valor de la delta de Deuterio original del agua debido a que en las rocas, por lo general, hay poca cantidad de hidrógeno con el cual pudiera existir intercambio.

Agua superficial

Ríos. A lo largo del recorrido del agua superficial, procesos como la evaporación la pueden afectar isotópicamente. Puesto que la composición isotópica de los ríos es función de la altura de las cuencas donde se originan y de los procesos que ocurren a lo largo de su cauce, sus aguas se pueden caracterizar por composición isotópica diferente a la integrante de la recarga local. Esto permite determinar la contribución de los ríos al agua subterránea de la región.



Lagos. Imperan variaciones, influidas principalmente por:

- ◇ Zona geográfica de ubicación
- ◇ Composición isotópica del agua confluyente
- ◇ Regímenes de evaporación y precipitación

Debido a la fuerte evaporación a la que están expuestos, los lagos y otros cuerpos similares de agua superficial como las presas se caracterizan por *enriquecimiento* en las especies isotópicas pesadas, con respecto al agua meteórica que los origina.

Otro proceso importante se genera por evaporación y evapotranspiración en zonas de cultivo intensivo.

En suma, el conocimiento del agua superficial en la región de estudio es de vital importancia, pues permite estimar con mayor seguridad su contribución a la recarga del agua subterránea.

En sistemas de agua subterránea los isótopos ^{18}O y deuterio (D) son componentes *conservativos*: hasta por miles de años en acuíferos confinados. La razón fundamental es que son parte de algunas moléculas de agua (el *agua pesada*) que, en condiciones normales, no reaccionan con las rocas del acuífero.

Sus *firmas* (por su traza) se pueden emplear para determinar las proporciones de mezcla de los miembros finales: agua subterránea y pluvial, cuyos valores iniciales $\delta^{18}\text{O}$ y δD son diferentes. Además en el agua subterránea que recarga al mismo acuífero en diversas elevaciones difieren los valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD . Por consiguiente estos valores facilitan la identificación de las diferentes zonas de recarga, (Cortés A., 1985).

COMPORTAMIENTO ISOTOPICO DEL AREA LEON – RIO TURBIO

Desde un punto de vista isotópico, las aguas subterráneas que caen debajo de la línea meteórica local indican que un fraccionamiento secundario ha ocurrido o que las aguas tienen alguna componente antigua y/o que fueron recargadas bajo condiciones climáticas diferentes a las actuales y por lo tanto muestran firmas isotópicas diferentes (**Figura 40**).

Los isótopos ambientales de oxígeno-18 y Deuterio en la región de estudio muestran de manera general, tres líneas diferentes de comportamiento evaporativo. Las líneas representadas por el agua subterránea de Silao-Romita y León, tienen comportamiento semiparalelo entre sí, denotando dos tendencias de evaporación similares; mientras la línea de agua subterránea del Valle del Río Turbio, presenta una mayor pendiente, que intercepta a las anteriores, representando una influencia de mezcla.

El agua mas evaporada de la zona, como es de esperarse, es el agua superficial del Río Turbio, esta agua tiene una fuerte influencia en los pozos más cercanos como se observa en la Figuras 40, 41 y 42. En la figura 40 se incluyó el muestreo de la Muralla, este grupo muestra una firma isotópica diferente a los otros grupos de la zona de estudio.

Por otro lado los valores en donde se intercepta cada línea de evaporación con la línea meteórica local son valores anómalos que no han sido reportados para aguas subterráneas en la región, siendo del orden de -12, en Oxígeno-18 y -85 para Deuterio, mientras en ambientes montañosos los valores registrados para aguas subterráneas son -10 en Oxígeno-18 y -70 para Deuterio (Cortes y Farvolden, 1989).

Estos valores podrían indicar que el origen de estas aguas podría estar relacionado a una mezcla entre la recarga local y aguas asociados a termalismo, en donde se encuentran anomalías hidrogeoquímicas asociadas a fallas regionales.

La diferenciación de estas tres líneas más el comportamiento disperso de las aguas de la Muralla confirma los diferentes procesos evaporativos para cada zona.

La distribución espacial de datos de Oxígeno-18 y Deuterio, realizados en pozos de las baterías que suministra el agua potable a la Ciudad de León, muestra una clara correlación de su distribución con las estructuras geológicas, confirmando su carácter de baja permeabilidad (Figs. 40 y 42).

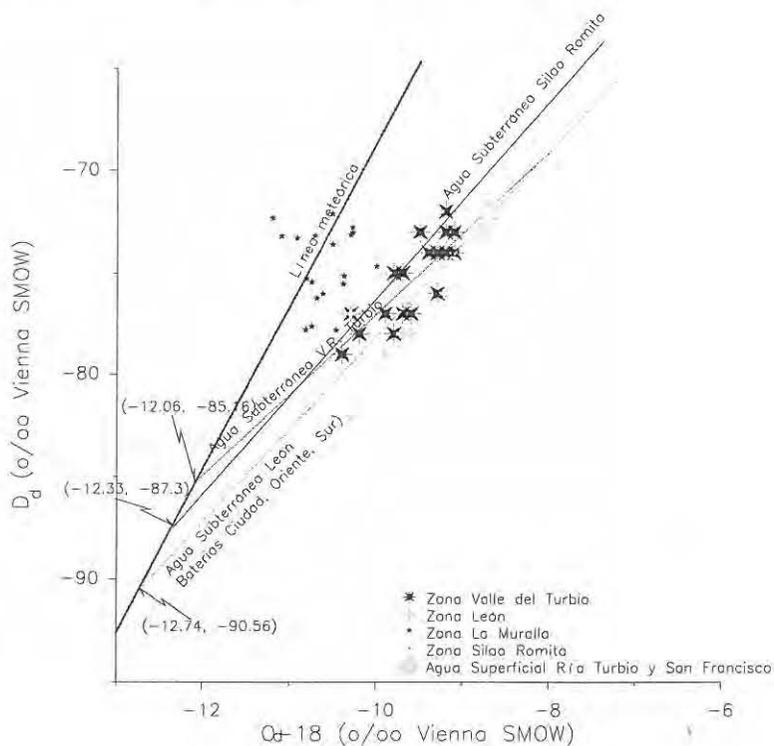
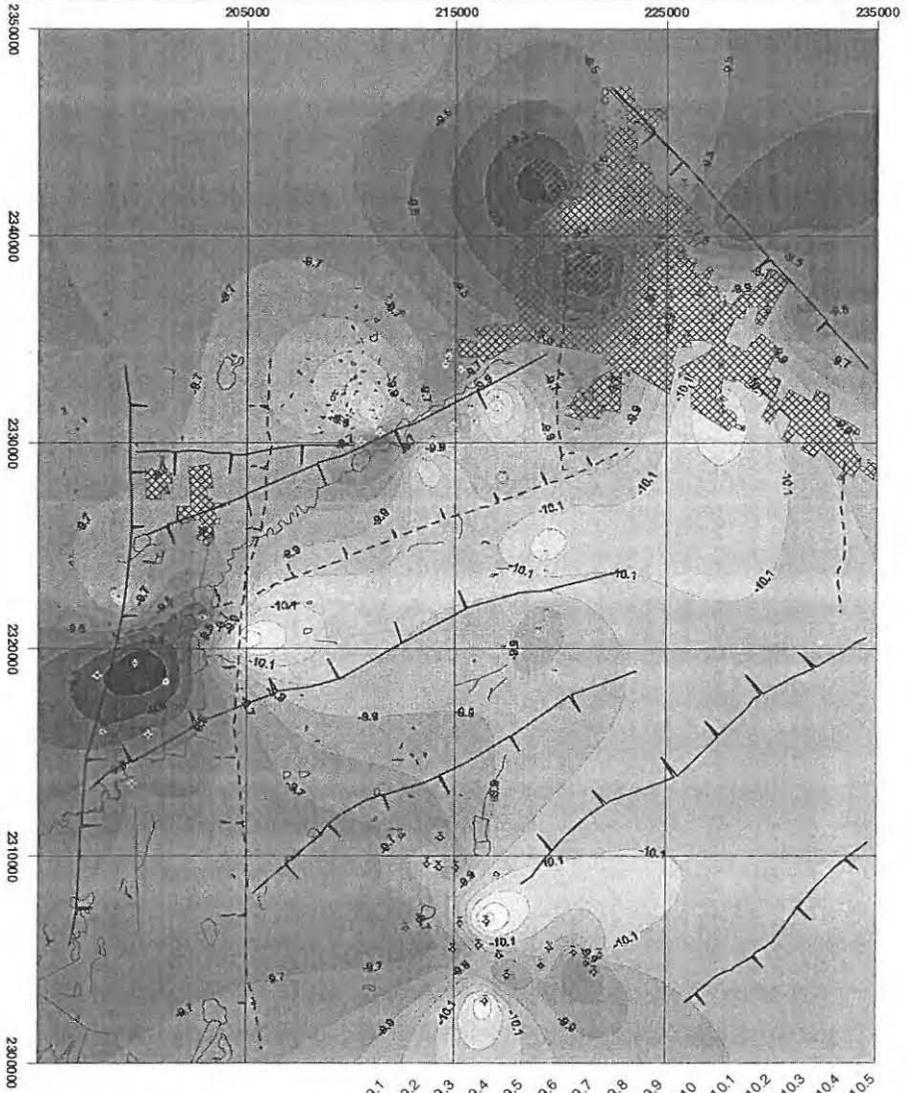
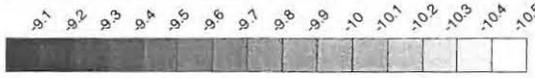


Figura 40. Oxígeno 18 vs Deuterio en la zona



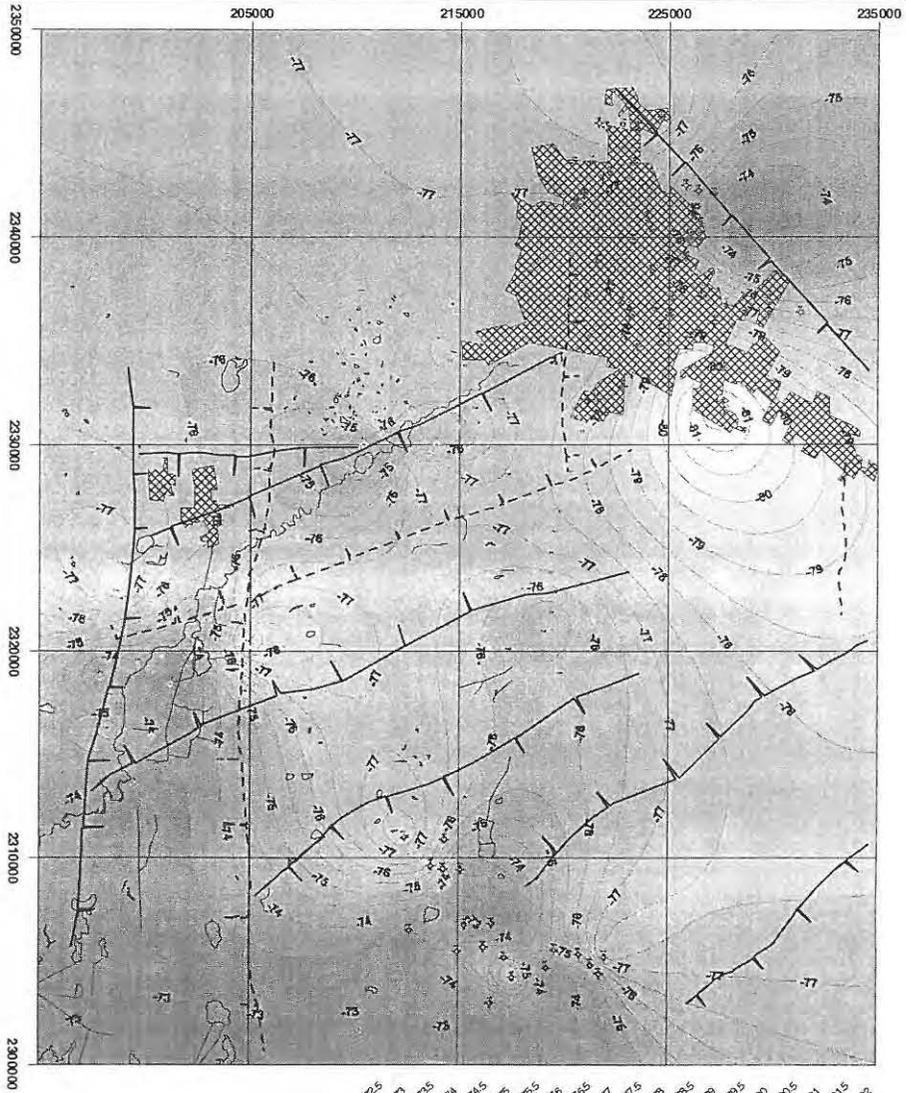
SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR DE TEMPERATURA



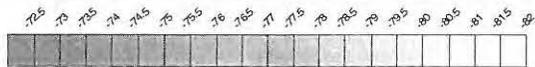
O-18 en aguas subterráneas ‰

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL ISOTOPO O-18	
FIGURA No. 41	JULIO 2004.



SIMBOLOGIA

- POZO
- POBLADO, ZONA URBANA.
- RIO
- FALLA GEOLOGICA
- ISOVALOR DE TEMPERATURA



Deuterio en aguas subterráneas ‰

CARRERA DE INGENIERO GEOLOGO	
CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEON, GUANAJUATO	
CONFIGURACION DEL ISOTOPO DEUTERIO	
FIGURA No. 42	JULIO 2004.

V. GEOHIDROLOGIA

V.1 Unidades hidrogeológicas

Las diferentes unidades litológicas de acuerdo a su comportamiento para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento de aguas subterráneas. Podemos agruparlas en dos tipos de unidades hidrogeológicas: permeables e impermeables. (Tabla 6).

V.1.1 Unidades permeables

Las rocas y materiales cuaternarios correspondientes a los basaltos y los espesores superficiales de gravas y arenas que se encuentran sobre los valles podemos clasificarlos como permeables ya que permiten la infiltración del agua pluvial (Tabla 6).

Las formaciones permeables son:

Andesita Bernalejo: Presenta permeabilidad moderada por fracturamiento que disminuye de modo general a medida que la profundidad y/o edad aumenta. Es un material altamente anisotrópico debido a la diferencia en la orientación del patrón de fracturamiento ajustándose a las características de permeabilidad de rocas andesíticas, como lo advierten Davies and De Wiest (1971).

Ignimbrita Cuatralba: Presenta buena permeabilidad y esta representada por ignimbrita en la parte superior y tobas de baja a mediana compactación en la parte inferior, teniendo permeabilidad primaria para la toba y por fracturamiento para la ignimbrita. Frecuentemente se presenta en gran parte del subsuelo del Valle de León y zona de la Muralla, siendo frecuente también en las márgenes del valle (cortes de las carreteras León-San Francisco del Rincón y León-Guadalajara).

Basalto Dos Aguas: Presenta permeabilidad moderada por fracturamiento, se restringe a un único derrame emplazado al occidente de la ciudad de León y en subsuelo se extiende más al oriente de ésta. Es de gran importancia como

elemento potencial de infiltración de agua meteórica, debido a sus diaclasas y patrón de fracturamiento.

Terciario Granular indiferenciado: Presenta buena permeabilidad en general, pero debido a lo heterogeneo del material y a la compactación del mismo, puede variar el grado de permeabilidad dentro del grupo, según el material que se trate (calizas, gravas, arenas, limos o arcillas), no obstante la unidad en el subsuelo se encuentra saturada y se constituye como parte importante de los materiales que forman el acuífero. En la superficie estas unidades funcionan como áreas de recarga, principalmente las localizadas al pie de las sierras. Aflora en el sur del Valle y descansa sobre la unidad Ignimbrita Cuatralba. Es todo el material que rellena a la fosa tectónica del valle.

Basalto el cubilete: Presenta permeabilidad moderada por fracturamiento, que sirve como vía de infiltración del agua meteórica. En superficie su funcionamiento como áreas de recarga, se ve restringida debido a que los afloramientos no son muy extensos, razón por la cual el área de captación es pequeña. Los basaltos y andesitas fracturados que pertenecen a esta unidad tienen la característica de coronar algunas elevaciones topográficas del noreste, sur y sureste del valle.

Aluvión: Presenta buena permeabilidad por sus características granulométricas, pero con el riesgo latente de degradarse por compactación, con el uso frecuente de maquinaria agrícola. Por ahora es un material con gran capacidad de infiltración que permite el paso de las aguas por retornos de riego y meteóricas hasta alcanzar la zona saturada, que se encuentra en el material de relleno de la unidad Terciario Granular Indiferenciado.

V.1.2 Unidades impermeables

Las unidades impermeables son aquellas que presentan una muy baja o casi nula permeabilidad (**Tabla 6**).

Las unidades clasificadas dentro del Jurásico y Cretácico, a pesar de estar intensamente fracturadas, presentan baja permeabilidad debido a que las

fracturas se encuentran rellenas por el material arcillosos que en ellas abundan, por lo tanto se les considera como unidades impermeables con gran potencial de escurrimiento de agua meteórica que se infiltra al entrar en contacto con rocas de mejor permeabilidad, en el área de estudio estas unidades se encuentran expuestas en el flanco suroccidental de la Sierra de Guanajuato y el funcionamiento hidrológico que desempeñan es únicamente el de provocar el escurrimiento superficial hacia las partes bajas de la sierra.

Las formaciones impermeables son:

Piroxenita San Juan de Oates: Presenta escasa porosidad y permeabilidad, por lo que se considera prácticamente nula, aflora en la sierra de Guanajuato con poca extensión y no se ha observado en el subsuelo del valle.

Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato: Unidad de distribución amplia en la Sierra de Guanajuato, con la característica de un metamorfismo regional, que afecto su estructura, disminuyendo su porosidad y permeabilidad hasta ser casi nula.

Conjunto Plutónico La Luz: Unidad que aflora en la Sierra de Guanajuato con muy poca extensión, es también una roca de escasa porosidad y permeabilidad que se considera prácticamente nula.

Granito Comanja: Unidad de muy baja permeabilidad, que según el patrón de drenaje no permite fácilmente el paso del agua, por tanto forma parte del basamento hidrogeológico.

Conglomerado Guanajuato: Unidad con poca porosidad y permeabilidad en el Distrito minero de Guanajuato y la zona de la Muralla. En general se asume como basamento hidrogeológico.

Gabro Arperos: Su situación se desconoce, pero se infiere un comportamiento semejante al del Basalto el cubilete.

Lacustres del área de la Muralla encontrándose sobreyaciendo a una capa de materiales arcillosos que ocasionan la formación de un nivel de aguas superficiales.

Estas unidades hidrogeológicas clasificadas como impermeables, se considera que forman parte del basamento hidrogeológico, en aquellas zonas del subsuelo donde se lleguen a detectar.

UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	
PERMEABLES	IMPERMEABLES
Andesita bernalejo	Piroxenita San Juan de Oates
Ignimbrita Cuatralba	Complejo Volcanosedimentario SG
Basalto Dos Aguas	Conjunto Plutónico La Luz
Terciario Granular Indiferenciado	Granito Comanja
Basalto El Cubilete	Conglomerado Guanajuato
Aluvión	Gabro Arperos

Tabla 6. Clasificación de unidades hidrógeológicas

V.2 Tipo de Acuífero en el área de León (Medios Granular y Fracturado)

El agua subterránea se desplaza a través de 2 medios físicos diferenciables que son: granular y fracturado.

Las unidades hidrogeológicas de medio granular representadas por las unidades litológicas: Ignimbrita Cuatralba (componente inferior) y Terciario Granular indiferenciado, son las de mayor dimensión en el sistema acuífero del valle de León, alcanzando espesores de hasta 450 y 150 m. Respectivamente.

Por otra parte las unidades hidrogeológicas de medio fracturado corresponden a las unidades litológicas Andesita Bernalejo y al componente superior de la Ignimbrita Cuatralba. Debido a la escasa información que se tiene en el subsuelo, el espesor de la Andesita se desconoce, en cambio, el espesor del



componente ignimbrítico, es de aproximadamente 60 m, aunque puede variar entre los 40 y 80 m aproximadamente.

Los medios granulares en comparación con los medios fracturados, son relativamente pequeños; sin embargo, son de vital importancia dentro del sistema de flujo del agua subterránea.

Cada una de las unidades hidrogeológicas funcionan con características particulares, pero no dejan de tener una interrelación íntima con el entorno, por consiguiente conforman un acuífero libre heterogéneo, que pertenece al sistema acuífero del valle de León. Dentro de esta heterogeneidad no se descarta la posibilidad de la existencia de algunos semiconfinamientos en forma muy local, dependiendo principalmente de la constitución de los materiales.

V.3 Piezometría

Las mediciones piezométricas, son el indicador más directo para determinar el sistema de flujo del agua subterránea.

A partir de los datos piezométricos de la zona de estudio tomados de CEASG, 1998, se establece que el valle de León es una zona eminentemente de recarga en donde existe un cono de abatimiento regional que agudiza más la zona de recarga al aumentar los gradientes hidráulicos que van de la montaña hacia el valle.

En el valle de León, las menores profundidades al nivel estático (PNE), son de 10 a 60 m, y se localizan en la zona de riego con aguas residuales y al oriente del valle; en cambio en el centro del valle las PNE son mayores y van de 80 a 185 m, formándose un cono de abatimiento En la zona de la Muralla las PNE varían de 40 a 100 m. y aumentan conforme más cerca esta el valle de Río Turbio. Por último en los Altos de Jalisco son mayores a 130 m.

De acuerdo a las configuraciones piezométricas se puede ver que en la zona del área de estudio ocurren 3 conos de principales de abatimiento, y en la ciudad de León también existe una gran depresión. (Figuras 43).

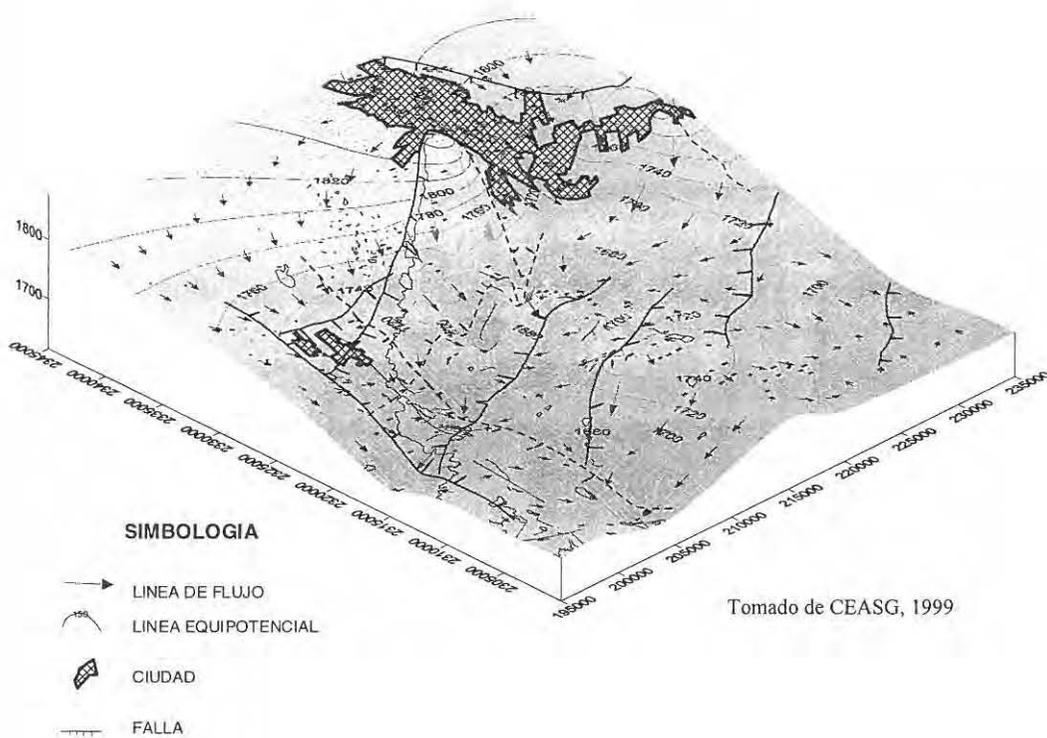


Figura 43. Configuración Piezométrica del área de estudio.

V.4 Modelo geohidrológico del valle de León

V.4.1 Modelo estructural

El Valle de León es originado por fallas normales escalonadas (Hernández, 1991), formando una fosa tectónica la cual está limitada por pilares tectónicos localizados en la Sierra de Guanajuato, Altos de Jalisco, California y Santa Ana del Conde. El graben más profundo se localiza en las inmediaciones de los pozos Sur-4 y Sur-7 de la Batería SAPAL..

V.4.2. Conexiones hidráulicas

Se tiene documentada la presencia de grandes estructuras hacia la parte noreste y noroeste del valle como son las fallas Duarte y del Bajío (**Figura 8**), las cuales tienen gran influencia en el comportamiento hidrodinámico del valle. Por otra parte existen manantiales, como los de Comanjilla y El Cubilete, con temperaturas altas, alineados a estas estructuras, así como pozos que captan aguas termales con valores altos en Litio y Flour característicos de un termalismo asociado a fallas regionales (**Figuras 28 y 33**).

La baja permeabilidad de estas estructuras explica la presencia del cono de abatimiento en el Valle de León, asociado al efecto imagen sobre los niveles piezométricos, este efecto se presenta en las proximidades de fronteras impermeables reproduciendo un efecto similar al producido por dos pozos reales ubicados simétricamente con respecto a la estructura.

Otros efectos como son: el zoneamiento y la presencia de fuertes gradientes en las concentraciones de algunos componentes fisicoquímicos e isotópicos en las cercanías de estas estructuras (**Figuras 33, 31, 29, 28, 27, 23, 22**), corroboran la hipótesis de la baja permeabilidad de la estructura. Esto también explicaría el hecho de que en las zonas de mayor precipitación que se encuentran en la Sierra de Guanajuato (CEASG, 1999), no influyen de manera importante en la recarga hacia el Valle de León. Si el efecto de la recarga influyera

de manera importante, entonces debería observarse mayor influencia en la respuesta de los niveles piezométricos.

Otras estructuras importantes localizadas al sur de León, reportadas por CEASG, (1998, 2000), producen zoneamientos y fuertes gradientes, lo cual indicaría bajas permeabilidades también, en esas estructuras (**Figuras 22, 23, 27**).

V.4.3. Direcciones de flujo y zonas de recarga

La característica hidrodinámica de este valle es la presencia de un gran cono de abatimiento en la zona sur del área urbana. Los flujos subterráneos en el Valle de León son concéntricos, originados por el cono de abatimiento (**Figuras 43 y 44**). Quizás la principal zona de recarga relacionada a este valle se localice hacia la porción norte, en donde además de los flujos procedentes de los Altos de Jalisco existe la influencia de las presas de la zona.

Los flujos provenientes de la zona noreste queda limitada por la presencia de estructuras de baja permeabilidad como son la Falla Duarte y Falla del Bajío, CEASG-GUYSA (1998) reporta fuertes gradientes hidráulicos en esta zona, corroborando esta hipótesis, (**Figuras 8 y 43**).

La correlación encontrada entre el cono de abatimiento y la distribución de componentes fisicoquímicos y mayores, como son temperatura, conductividad eléctrica, cloruros, etc., es indicativo del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, soportando lo anterior.

Los valores más altos en STD en el cono de abatimiento se encuentran en la parte central en donde se tienen rangos de 650-850 mg/l, los valores más bajos (100-130 mg/l) se localizan en los Altos de Jalisco, Sierra de Guanajuato y Sur del Valle de León (**Figura 24**), representando la parte externa del cono. Respecto a la temperatura, estas son menores hacia el centro del cono de abatimiento y son mayores en la periferia, (**Figura 23**). Valores altos en temperatura se encontraron asociados a zonas de grandes fallas.

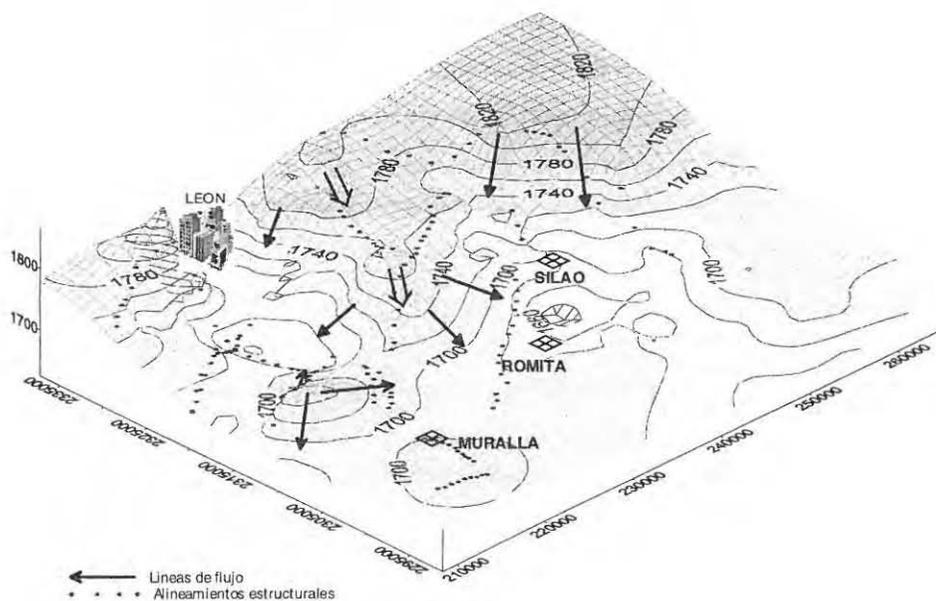


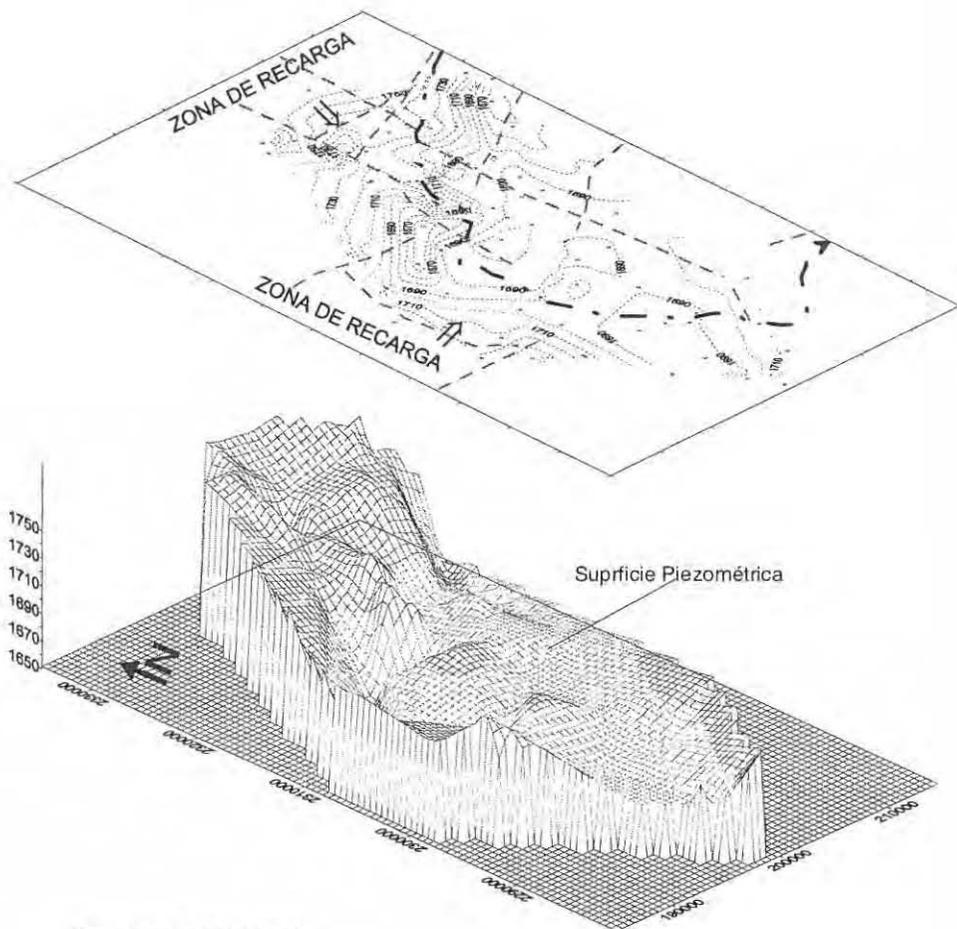
Figura 44. Configuración piezométrica del área León-Silao-Romita

V.5 Modelo geohidrológico del valle del río turbio

En el Valle de Río Turbio se tienen dos tipos de medios acuíferos, uno granular y otro fracturado. El primero se distribuye hacia la parte norte del área en los alrededores de los poblados San Francisco del Rincón, Dolores, San Bernardo, Silva, Morelos y Plan de Ayala. En esta área se encuentran distribuidos gruesos paquetes de material sedimentario como; gravas, arenas, limos y arcillas, con espesores de hasta 400 m, (Ramos y Rodríguez, 1998), con intercalaciones de rocas volcánicas en las periferias del valle (**Figura 8**).

El acuífero en medio fracturado se distribuye en la parte centro y sur del valle. El espesor de los materiales sedimentarios disminuye considerablemente e incluso se tienen zonas en donde no se presentan y predominan principalmente las rocas volcánicas como son tobas, ignimbritas y basaltos. Los espesores de estas rocas volcánicas rebasan los 500m como lo indican los cortes litológicos en la zona.

En la configuración de la elevación del nivel estático puede verse claramente comportamiento del sistema acuífero, para el año de 1995, (**Figura 45**). La distribución de materiales en medios granulares y fracturados, así como la presencia de importantes estructuras tales como son los sistemas de fallas en el área del Valle de Río Turbio, originando dos superficies piezométricas principales. La de mayor elevación se encuentra en la zona comprendida entre de San Francisco del Rincón y Plan de Avala, la de menor elevación se localiza en la parte sur del Valle del Río Turbio, en las zonas de Manuel Doblado, Maravillas, San José Bellavista, Calzada de la Merced etc. (Ramos y Rodríguez, 1998).



Tomado de CEASG, 1999

Figura 45. Configuración piezométrica del área Río-Turbio

V.5.1 Conexiones hidráulicas

El comportamiento geohidrológico del Sistema Acuífero del Valle de Río Turbio es controlado por las condiciones estructurales y la distribución de materiales geológicos en la cuenca (Ramos y Rodríguez, 1998). Los sistemas de fallas que actúan como barreras o conductos hidrológicos que permiten la recarga subterránea del sistema acuífero.

La reducida conexión hidráulica entre los dos acuíferos del Valle del Río Turbio definidos por el comportamiento piezométrico, se manifiesta también en la distribución de los principales componentes mayores y parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas (**Figuras 22, 23, 29, 30, 31, 33**).

El ión cloruro presenta concentraciones mayores a 20 mg/l en la zona norte del valle y valores menores en la zona sur (Ramos 2001) corroborando la hipótesis anterior. En la zona norte estos valores fueron confirmados por el presente estudio, cuando se realizó un muestreo más detallado en los pozos pertenecientes a la Batería Turbio y Batería Poniente. Los valores mas altos (320 mg/l) de este ión, se detectaron en las cercanías de la Presa San Germán, Maztranzo y proximidades del Río Turbio (**Figura 29**).

Respecto a los Sólidos Totales Disueltos (STD) también presenta un comportamiento similar al del ión cloruro, con valores altos (850 mg/l) en los mismos sitios (**Figura 24**).

Valores bajos de temperatura (25°C) en esta misma zona indican procesos de infiltración de aguas residuales del Río Turbio y zonas sujetas a irrigación con aguas residuales (**Figura 23**).

V.5.2 Zonas de recarga

De acuerdo al comportamiento piezométrico, las principales zonas de recarga del Valle del Río Turbio se ubican principalmente en los Altos de Jalisco, Graven de Jalpa y Zona sur de Manuel Doblado (**Figuras 43 y 45**).

La recarga procedente de los Altos de Jalisco es un volumen importante, esto se observa en el comportamiento piezométrico del valle y fue confirmado en el pozo Charcas con el método de balance de cloruros e isótopos estables (CEASG, 1999).

Los flujos subterráneos originalmente procedían del Valle de León al Valle del Río Turbio, sin embargo la presencia del gran cono de abatimiento en el Valle de León ha revertido los flujos.

Basados en dos de los elementos conservativos, como son los iones Cloruro y Litio, la porción oriente del valle (zona de la Muralla) se define claramente como una mezcla ternaria (CEASG, 1999) (**Figura 46**), no hay elementos de comparación de este tipo en la zona sur del Valle del Río Turbio para determinar hidrogeoquímicamente la conexión hidráulica entre estas dos zonas; sin embargo la presencia de manantiales alineados a fallas N-S, el comportamiento de líneas equipotenciales (perpendiculares a las estructuras) indican una baja permeabilidad relacionada a estas estructuras. Por otra parte, la diferencia piezométrica entre el Valle del Río Turbio y la Zona de La Muralla, produce fuertes gradientes entre ambas zonas, lo cual indica nuevamente la baja permeabilidad de la estructura. La diferencia de temperaturas entre las dos zonas, así como la de presencia de un cono de abatimiento en las proximidades de las estructuras N-S, esto aunado a lo anterior confirma la reducida conexión hidráulica entre ambas zonas (CEASG, 1999; Ramos, 2001).

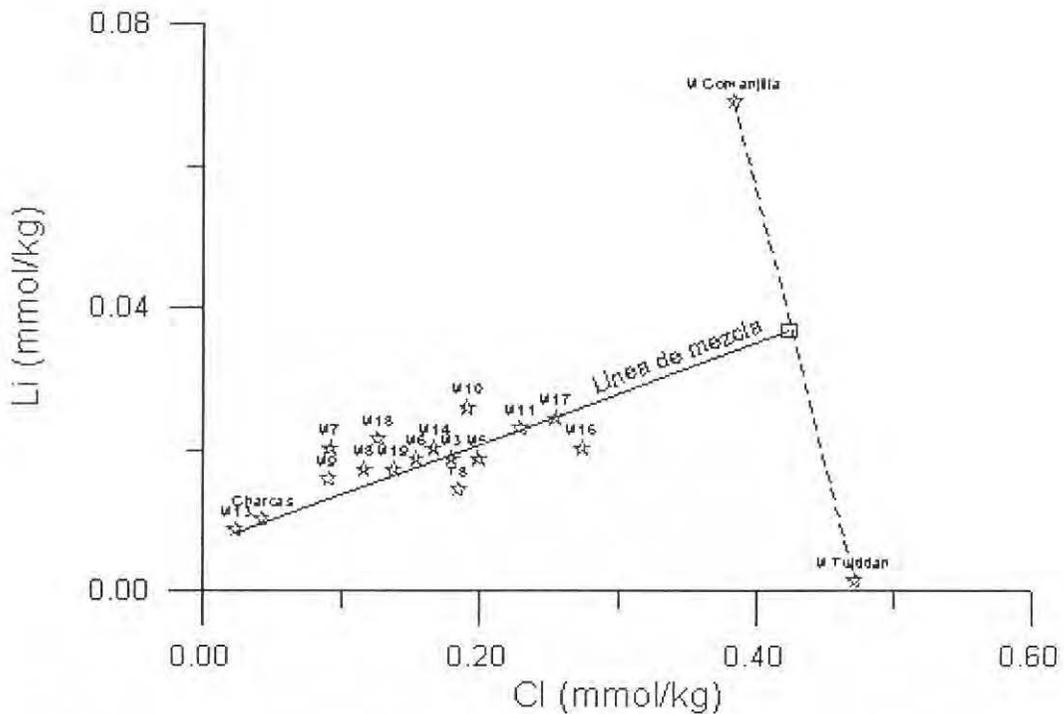


Figura 46. Gráfica de Li vs Cl para la Muralla

Es importante mencionar que las zonas poniente y sur del valle necesitan mayor detalle para cuantificar las recargas provenientes de estas zonas. Los estudios realizados hasta ahora se han enfocado hacia la zona de la Muralla y porción norte del valle.

V.6 Modelo geohidrológico la muralla

La zona de La Muralla se caracteriza por aguas con temperaturas mayores al promedio de la región (**Figura 23**). La zona se ubica cerca de un domo piezométrico, existen datos históricos que indican la presencia de pozos brotantes al sur del área de estudio, lo cual resulta lógico si consideramos esta región como zona de descarga del Valle del Río Turbio y algunos flujos regionales que confluyen en la zona. (**Figuras 43, 44 y 45**).

La caracterización del agua subterránea se llevó a cabo utilizando elementos hidrogeoquímicos e isótopos ambientales, (CEASG, 1999), los resultados indican que el agua subterránea del acuífero de La Muralla representa una mezcla ternaria originada por flujos regionales los cuales ascienden y son diluidos con agua meteórica (CEASG, 1999; Johannesson et al. 2001, Ramos et al. op. cit.).

Se identificaron 3 tipos representativos de agua subterránea (**Figuras 28, 29, 46, 47 y 48**).

1. Tipo Comanjilla (**C**), que procede de la Sierra de Guanajuato y Altos Jalisco, de origen termal con flujo vertical ascendente, tiene altas concentraciones en Li y Cl.
2. Tipo Tultitlan (**T**), que proviene de la Sierra de Penjamo, con altos valores de Cl y bajos en Li
3. Tipo Muralla (**M**), bajo en Li y bajo en Cl, relacionado con la recarga local

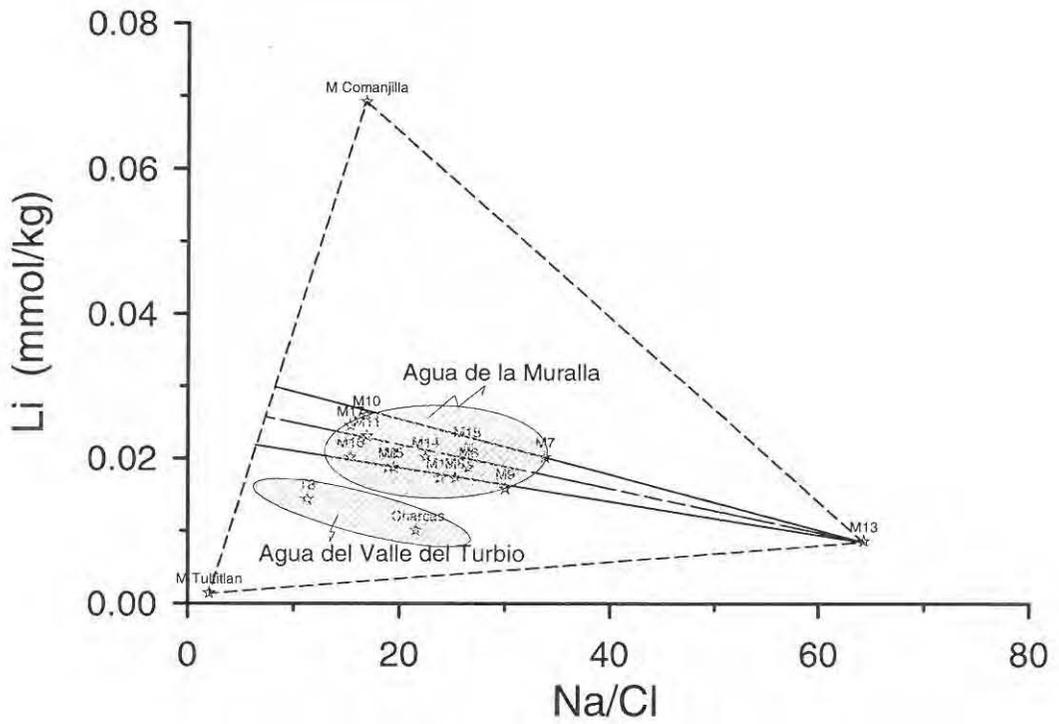


Figura 46. Gráfica de Na/Cl vs Li para la Muralla

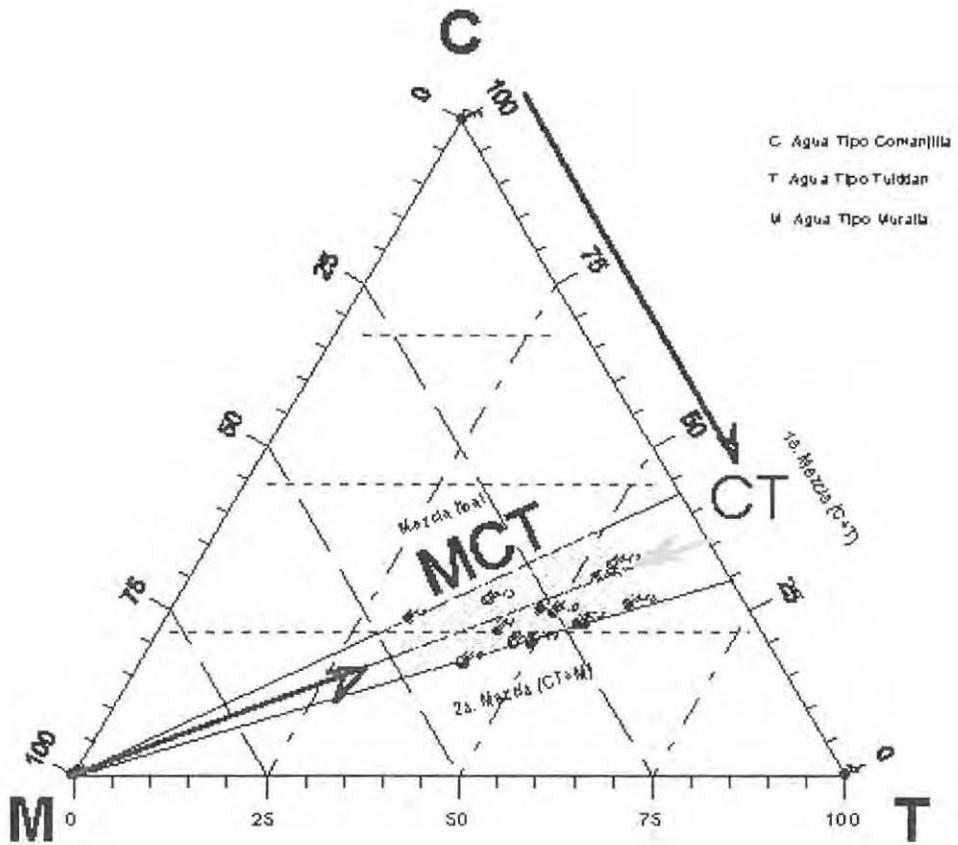


Figura 47. Diagrama ternario de la Muralla

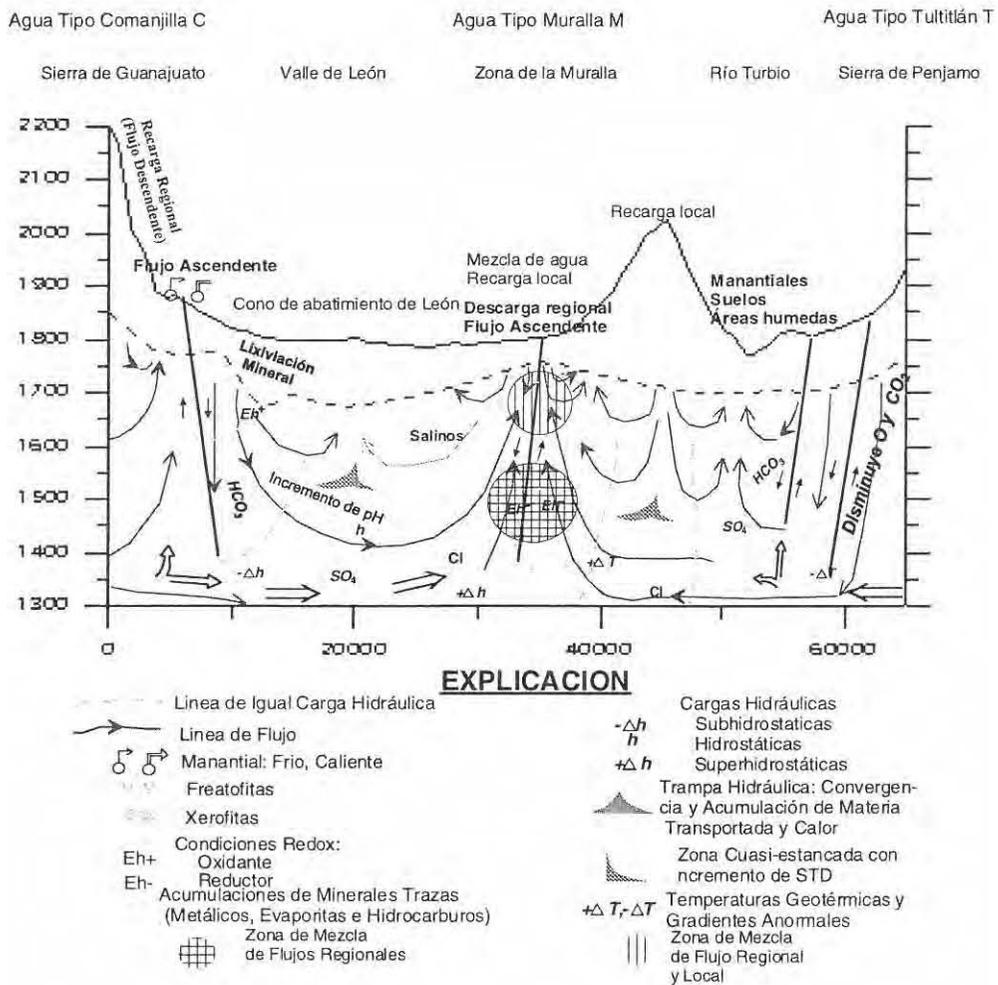


Figura 48. Modelo Geohidrológico conceptual de la Muralla



El análisis de mezcla se realizó con dos elementos conservativos Cl y Li (CEASG, op. cit.), el proceso de mezcla se lleva a cabo secuencialmente en dos etapas (**Figuras 46, 47 y 48**). Si no fuese secuencial la mezcla en lugar de tener línea de mezcla y/o evolución se tendría una dispersión caótica de los datos. En este proceso, primero ocurre la mezcla (C + T) de flujos regionales a profundidad en donde no hay interferencia del tercer miembro (M). Esto ocurre en las cercanías de la zona de descarga. Posteriormente a menor profundidad, se mezclan con aguas de flujo local resultando el tipo CT + M, (Ramos et al. op. cit.).

Si consideramos los ejes del diagrama ternario como líneas de mezcla binaria, podemos observar que no existe mezcla entre los miembros C y M (**Figuras 46, 47 y 48**). El resto de la muestras se agrupan en una línea de mezcla orientada hacia el vértice M, e intercepta al eje C-T, las muestra mas diluida es M-13 y las mas concentradas son M-16 y M-17.

La importancia del entendimiento del modelo de diagrama ternario, es que a profundidades mayores a las actuales la influencia de la recarga actual es menor y el aporte de los miembros C y T (flujos regionales o intermedios), es mayor. Si se extrajera el agua subterránea a una mayor profundidad el agua sería obtenida de la línea de mezcla compuesta por M+(CT) y a mayor profundidad se puede alcanzar la línea de mezcla compuesta por C+T, solo en estas condiciones se podrían alterar las proporciones de mezcla entre C y T.

En la tabla 7 se presentan las proporciones de mezcla en el agua subterránea de La Muralla para la primera etapa (C+T), así como las proporciones de mezcla de la segunda etapa (CT+M).



POZO	<i>Proporciones de la primera mezcla</i>		<i>Proporciones de la segunda mezcla</i>	
	TIPO T	TIPO C	TIPO M	TIPO CT
Muralla-13	66.0	34.0	100.0	0.0
Muralla-9	72.0	28.0	41.0	59.0
Muralla-7	58.0	42.0	45.0	55.0
Muralla-8	70.5	29.5	32.5	67.5
Muralla-18	62.0	38.0	33.0	67.0
Muralla-19	71.0	29.0	30.0	70.0
Muralla-6	67.0	33.0	34.0	66.0
Muralla-14	66.0	34.0	27.0	73.0
Muralla-3	70.0	30.0	21.0	79.0
Muralla-10	61.0	39.0	15.0	85.0
Muralla-5	70.0	30.0	22.5	77.5
Muralla-11	64.0	36.0	16.0	84.0
Muralla-17	62.0	38.0	13.0	87.0
Muralla-16	69.0	31.0	15.0	85.0

Tabla 7. Proporciones y tipos de muestras por etapas

V.6.1 Conexiones hidráulicas

Existen estructuras geológicas (fallas) orientadas Norte–Sur, que actúan como barreras hidráulicas entre ambos valles. A continuación se presentan algunos argumentos que demuestran la baja permeabilidad de estas estructuras (CEASG, 1999):

- Las líneas equipotenciales tienden a orientarse en forma perpendicular a la estructura, lo cual es lógico si se considera como barrera hidráulica dicha estructura.



- La presencia de un cono de abatimiento en las proximidades de la estructura indica su comportamiento de baja permeabilidad.
- La existencia de manantiales alineados con la estructura, es indicativa de un cambio de permeabilidad lateral en la zona de falla (Hernández, 1991).

Para el área del Valle del Río Turbio los datos que generan los diagramas de Stiff son modificados por la influencia de las aguas residuales del Río Turbio. En La Muralla estos diagramas presentan una forma homogénea.

Esto confirma el origen diferente de las aguas subterráneas de la región y es una evidencia de la baja permeabilidad que separa a los acuíferos del Valle del Río Turbio y la zona de La Muralla.

V.6.2 Zonas de recarga

Entre las regiones de León y Silao-Romita se forma un domo piezométrico orientado de Comanjilla a La Muralla; esto implica que en el domo se generan flujos hacia los valles de Silao-Romita, León y La Muralla. Parte de la recarga sucede en las inmediaciones de la Sierra de Guanajuato, caracterizada mediante los análisis hidrogeoquímicos e isotópicos (CEASG, 1999). La orientación del domo coincide con la forma del pilar tectónico Silao-Romita.

La coincidencia de direcciones de flujo con gradientes isotópicos corrobora el modelo de flujo anteriormente descrito, en CEASG (1999), en el que se infiere que la mayor parte de la recarga proviene de la Sierra de Guanajuato a través de la estructura geológica de Santa Ana del Conde.

CONCLUSIONES.

❖ El zoneamiento y presencia de fuertes gradientes piezométricos, así como las concentraciones de algunos componentes fisicoquímicos e isotópicos en las cercanías de las fallas del Bajío y Duarte, manifiestan una baja permeabilidad, indicando que actúan como barrera hidráulica en el sistema.

❖ El abatimiento de los niveles piezométricos en el Valle de León indica, que las zonas de mayor precipitación que se encuentran en la Sierra de Guanajuato no influyen de manera directa en su recarga. Parte del agua que esta sierra capta se distribuye a través de estructuras hacia el sureste del valle a través de flujos intermedios a regionales.

❖ Las concentraciones reportadas en el Valle del Río Turbio para el ion cloruro, altas en la zona norte y bajas en el sur, junto con la presencia de dos superficies piezométricas, indican una baja permeabilidad en una de las estructuras del sistema NE-SW, lo que origina una reducida conexión hidráulica entre ambas zonas del mismo valle, como lo confirman los estudios geológicos e hidrogeoquímicos.

❖ Tomando en cuenta el comportamiento piezométrico, se puede deducir que las principales zonas de recarga del Valle del Río Turbio se localizan en: el Graben de Jalpa, la zona sur de Manuel Doblado y principalmente en los Altos de Jalisco, en este último se refleja en el comportamiento piezométrico del valle en la zona norte, siendo confirmado en el pozo Charcas mediante el método de isótopos estables.

❖ Valores bajos de temperatura (25°C) y altos en algunos iones mayores, indican procesos de infiltración de aguas residuales de la zona urbana de León y del Río Turbio, así como en áreas sujetas a irrigación con esta agua.

❖ La diferencia piezométrica entre el Valle del Río Turbio y la zona de La Muralla presenta fuertes gradientes entre ellas, lo que viene a confirmar la baja permeabilidad de la estructura N-S y la reducida conexión hidráulica que existe



entre ambas zonas. La diferencia de temperaturas corroboran este argumento, así como el cono de abatimiento que se presenta en las proximidades de las estructuras, indicando dos sistemas relativamente independientes.

❖ La Muralla representa una mezcla originada por flujos regionales y/o intermedios, los cuales ascienden y son diluidos con agua meteórica.

❖ En el estudio de CEASG (1999) en la zona de La Muralla, se identificó el origen del agua subterránea, el cual es una mezcla de tres tipos representativos de aguas: el primero *tipo Comanjilla (C)*, que procede de la Sierra de Guanajuato y Altos de Jalisco con influencia termal y flujo vertical ascendente, con altas concentraciones en Li, B y Cl; el segundo *tipo Tultitlán (T)*, que proviene de la Sierra de Pénjamo, con altos valores de Cl y bajos en B y Li; y el tercero, *tipo Muralla (M)*, bajo en Li y Cl relacionado con la recarga local.

❖ En caso de mantenerse las condiciones actuales de extracción y recarga local, la tendencia indica que la línea meteórica y la línea de evolución de cloruros del acuífero se interceptarán, indicando que el acuífero estará agotado.

❖ En términos estadísticos, el promedio de vida en años de los pozos de La Muralla es de 17.4, el mínimo es de 12 años y el máximo de 51.6, con una desviación estándar de 8.8. En términos de fechas, la vida promedio calculada para este grupo de pozos es para el año 2011. Con una fecha mínima al 2005 y la máxima al 2045, tomando como punto de origen el año de 1994.

❖ En los pozos: Ciudad 24, 33, 35 y 42; Poniente 1 y 2; y Turbio 2, 4 y 18, los altos valores de cloruros y otros parámetros fisicoquímicos registrados reflejan una alta influencia de la infiltración de aguas residuales.

❖ Los isótopos ambientales de Oxígeno-18 y Deuterio, muestran tres procesos evaporativos. Dos de estos procesos representan el agua subterránea de Silao-Romita y León, teniendo sus líneas, un comportamiento semiparalelo y denotando tendencias de evaporación similar. El tercer proceso con una línea de mayor pendiente, representa al agua subterránea del Valle del Río Turbio, indicando la mezcla con agua superficial de origen residual más evaporada. La

característica isotópica de este último grupo, se ve reflejada en los pozos más cercanos al cauce del Río Turbio.

❖ La distribución espacial de datos de Oxígeno-18 y Deuterio, muestran una clara correlación de su distribución con respecto a las estructuras geológicas, confirmando su carácter de baja permeabilidad.

❖ Se identificaron cuatro familias de aguas en función de sus iones mayores, el primer grupo de tipo $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$, con rangos de temperaturas de 37 a 42 °C, pH de 8.0 y altos valores de Flúor, este grupo está asociado a estructuras geológicas; el segundo grupo, con características químicas de tipo Ca-Na-HCO_3 y Na-Ca-HCO_3 , influenciados por la recarga local; el tercer grupo de tipo $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$, está relacionado con la mezcla de aguas residuales; y el cuarto grupo es de tipo $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$, influenciado por la mezcla de aguas termales en la zona de La Muralla.

RECOMENDACIONES.

✦ Con base en los resultados, se proponen las siguientes recomendaciones:

✦ Es necesario buscar fuentes alternas de explotación, ya que basados en los resultados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, como son la generación del cono de abatimiento y la degradación en la calidad del agua subterránea, no es conveniente seguir explotando el acuífero en el que sobreyace la ciudad de León.

✦ Es necesario definir un grupo de pozos piloto dentro de la zona de La Muralla para ser monitoreados en los iones Cloruro y Litio, al menos una vez al mes, a fin de conocer la evolución de la mezcla ternaria, así como vigilar el comportamiento de la vida media de los pozos mediante el método de cloruros.

✦ Realizar estudios en la zona sur del Turbio, para conocer el estado actual de las reservas potenciales de la zona y tener un panorama más completo del sistema hidrológico en la región, a fin de racionalizar su explotación.

✦ Implementar las técnicas para calcular Na y K en el laboratorio de SAPAL, ya que dichos iones son importantes para la identificación de los tipos de agua, así como vigilar su evolución y balance iónico.

✦ Muestrear los pozos de toda la red del SAPAL, a fin de corroborar la ausencia de metales pesados, ya que el hecho de no haber encontrado cantidades mayores a la Norma Oficial Mexicana en los sitios seleccionados para este estudio, no es indicativo determinante de que los contaminantes no se encuentren presentes en el sistema.

✦ Cada estudio representa una fotografía instantánea del sistema en ese momento, por lo que es recomendable continuar con estudios periódicos que ayuden a entender el comportamiento y a predecir más certeramente la evolución del agua subterránea con el fin de preservar y racionalizar su explotación.

♣ Realizar estudios de caracterización hidrogeoquímica e isotópica en la zona sur de Valle del Río Turbio, con la finalidad de confirmar algunas de las hipótesis propuestas, así como evaluar su recarga potencial.

♣ Esperando haber cumplido con las expectativas del presente trabajo, reiteramos nuestro compromiso con ustedes, a fin de poder participar en futuros proyectos de investigación.

BIBLIOGRAFIA

- Allison G.A. and Hugues, M.W., 1978. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Aust. J. Soil Res.*, 16: 181-195.
- Angelier, J., Colleta, B., Chorowiczj., Ortlieb, L y Ranging, C., 1981. Fault tectonics of The Baja California Península and the opening of the Sea Cortez, México. *J. Structural Geol.* 3: 347-357.
- Atatwer, T. 1970. Implications of plate tectonics for the cenozoic tectonics evolution of Western Nort
- Bazuhair, A.S. y Wood, W.W. Chloride Mass-Balance Method for Estimating Groundwater Recharge in Arid Areas: Examples from Western Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, 186, 153-159.
- Bevis, M. and Isacks, B. L. 1984. Hypocentral trend surface analysis: Probing the geometry of the Benioff zones. *J. Geophys. Res.* 89: 6153-6170.
- Bromley, J., Edmunds, W.M., Fellman, E., Brouwer, J., Gaze, S.R., Sudlow, J. y Taupin, J.D. 1997. Estimation of Rainfall Inputs and Direct Recharge to the Deep Unsaturated Zone of Southern Niger Using the Chloride Profile Methods. *Journal of Hydrology*, 188-189, 139-154.
- Castillo R., 1985. El Análisis Isotópico y sus Aplicaciones. Instituto de Física, UNAM. Reporte Interno.
- CEASG, (1998b), Seguimiento al Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Río Turbio, Gto. Contrato CEAS-APA-GTO-97-02. Estudio realizado a contrato por GEOPSA.
- CEASG. 1995. Resultados de los Análisis Físicoquímicos y Bacteriológicos realizados dentro del Valle del Río Turbio. Estudio realizado a contrato por Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V. (I.G.C.).
- Clark I and P Fritz (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers. Boca Raton-New York. 328pp.
-

- CNA-BGS-UACH-SAPAL, 1996. Effects of wastewater reuse on urban groundwater resources of Leon, Mexico. BGS Technical Report WD/95/64.
- Cortés A, J Durazo and RN Farvolden (1997). Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico: annotated bibliography and interpretation. *Journal of Hydrology* 198: 346-376.
- Cortés A., 1985. Aplicación de la espectrometría de Masas y Técnicas Isotópicas para la determinación de Oxígeno-18 y Deuterio en problemas Hidrológicos. Tesis Profesional. Fac. De Ciencias, UNAM
- Cothern R. C., and Smith J. E. (1987), *Environmental Radon*, ISBN 0 – 306 – 42707 – 9 Printed In the United States of America.
- Dettinger M., 1989. Reconnaissance Estimates of Natural Recharge to Desert Basins in Nevada, U.S.A., by Using Chloride-Balance Calculations. *Journal of Hidrology*, 106: 55-78.
- Edmonds, W.M. and Gaye, C. B. 1988. Solute profile techniques for recharge estimation in semi-arid and arid terrain. In : I. Simmers (Editors), *Editors, Estimation of Natural Groundwater Recharge*, Proc. NATO Advanced Research Workshop. Reidel Dordrecht, pp. 139-157.
- Edmunds, W.M. y Gaye, C.B., 1994. Estimation the Spatial Variability of Groundwater Recharge in the Sahel Using Chloride. *Journal of Hydrology*, 156, 47-59.
- Faure Gunter (1986), *principles of Isotope Geology*, ISBN 0 – 471 86412 – 9, Printed in the United States of America
- Ferrusquía – Villafranca, 1987. Eubicación geocronológica del conglomerado Guanajuato basada en nuevos mamíferos. Instituto de <geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la sierra de guanajuato, programa , resúmenes y guía de excursión, pp.21-23
- Feth, J.H., 1981. Chloride in natural continental water – a review. U.S. Geolo. Surv. , *Water-Supply Pap.*, 2176, 30 pp.

- Fritz, P. and Fontes, J, CH., (eds) 1980. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Vol. 1. The Terrestrial Environment, A. Elsevier.
- Gat J (1971). Comments on the stable isotope method in regional groundwater investigations. *Water Resources Research* (7): 980-993.
- Gat J. And Gonfiantini R., 1981. "Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle". Technical Reports Series, No. 210, IAEA, Viena, A.
- Gonfiantini R. 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* (London) 271:534.
- Gosselin D. G., Smith M. R., Lepel E. A., and Laul J. C. (1992) Rare earth elements in chloride-rich groundwater, Palo Duro Basin, Texas, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 1495-1505.
- Gross, W.H., 1975. New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, México. *Economic Geology*, v.70, pp.1175-1189.
- Hanna T.M., Stone W.J., Tagawa L. and Stuart Burton S., 1997. Investigation of groundwater recharge using the chloride-ion method at Lowry Landfill, Denver, Colorado. In: *International Conference on Advances In Ground-Water Hydrology – A Decade of Congress. Proc. American Institute of Hydrology*. Pp. 253-258.
- Hernández Laloth, Noel, 1991. Modelo Conceptual del Funcionamiento Hidrodinámico del Sistema Acuífero del Valle de León, Guanajuato. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, Inédita.
- Hoefs J., 1980. "Stable Isotope Geochemistry". Second Edition. Springer-Verlag Heidelberg, New York.
- Johns F. B. et al. (1979) Radiochemical procedures for analysis of environmental samples. EPA Report EMSL-LV-0539-17.
- Karing, D. E. Y Jensky, W. 1982. The protogulf of California. *Earth Planet. Sc. Lett.* 17: 169-174.



- Kimball, B.A., 1981. Geochemistry of spring water, southeastern Uinta Basing, Utah and Colorado, U.S. Geol. Surv., Water-Supply Pap. 2074, 30 pp.
- Mammerickx, J. y Klitgord K. D. 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m. y. B. P. to present. *J. Geophys. Res.* 87: 6751-6759.
- Martínez-Reyes, J., 1989. Síntesis Geológica de la Sierra de Guanajuato. Serie cartas geológicas y mineras del instituto de Geología, UNAM, México, D.F.
- Martínez Reyes Juventino, 1992, Mapa Geológico de la Sierra de Guanajuato, Escala 1:100 000.
- Mazor, E., 1997. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. The Applied Approach. 2a. Edition. Marcel Dekker Ed.
- McDowell, C., 1963. "Mass Spectrometry". McGraw- Hill Book Co., Inc. New York.
- Mixing Sequential Ternary of the Chemical Quality of the Aquifer of La Muralla Guanajuato, Mexico. En Preparación.
- Molnar, P. y Sykes, R. L. 1969. Tectonics of the Caribbean and Middle American region from focal mechanisms and seismicity, *Geol. Soc. Am Bull.* 08: 1639-1684.
- Nier A., 1950 Redetermination of relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argen and potassium. *Phy. Rev.* 77:714.
- Pardo , M. y Suárez, G. 1993a. Steep subduction geometry of the Rivera Plate beneath the Jalisco block in western Mexico. *Geophys. Res. Lett.* 20: 2391-2394.
- Pardo , M. y Suárez, G. 1993b. Shape of subducted Rivera and Cocos Plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. P.H tesis UNAM.
- Quintero, O. , 1986. Geología de los alrededores de Comalja de Corona, Edo de Jalisco. Resumen Primer Simposio de Geología Regional de México. Instituto de Geología, UNAM.
- Ramos L., J. A., Cortés, A., Ramirez, A. G., and Durazo, J., and Johannesson, K.H. 2001. Mixing - Dilution Process Involving Geothermal Fluids in La Muralla Groundwaters, Guanajuato, Mexico.

- Ramos Leal, J.A., Rodríguez Castillo, R, 1998, "Análisis de Vulnerabilidad del Sistema Acuífero, del Valle de Río Turbio, Estado de Guanajuato", 4º Congreso Latinoamericano de Aguas Subterráneas, ALSHUD, Montevideo, Uruguay.
- Ramos L., J.A., 2002. Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: Caso Río Turbio, Guanajuato. Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Ramos, J.A., Cortés, A., Ramirez, A.G., Kevin H. Johannesson and Durazo, J., 2001. Evolution of Chemical Quality of the Aquifer of La Muralla Guanajuato, Mexico. En Preparación.
- Sami, K. y Hughes, D.A. 1996. A comparison of Recharge Estimates to a Fractured Sedimentary Aquifer in South Africa from a Chloride Mass Balance an Integrated Surface-Subsurface Model. *Journal of Hydrology*, 179. 111-136.
- SARH, 1969a. Estudio geohidrológico formal en la zona del Valle de León y Río Turbio, Gto. Informe Técnico il. Estudio realizado a contrato por Ariel Construcciones, S. A. (ACSA)
- SARH., 1979. Actualización del estudio geohidrológico del Valles del Río Turbio, Edo. de Guanajuato. Contrato No. Gza-82-44-EG. Informe Técnico il. Estudio realizado a contrato por Geohidrológica Mexicana, S. A.
- Smith, C.L. and Drever, J.I., 1976. Controls on the chemistry of springs at Teels Marsh, Mineral County, Nevada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40: 1081-1093.
- SPP-INEGI-DGG, 1980. Síntesis Geográfica de Guanajuato. Secretaría de Programación y Presupuesto, México D.F. 198 p. Y Anexo Cartográfico Escala 1:500000.
- SPP-INEGI-DGG, 1988. Carta topográfica. Hoja León (F14 C41) Escala 1:50000.
- SPP-INEGI-DGG, 1988. Carta topográfica. Hoja Nuevo Valle de Moreno (F14 C42) Escala 1:50000.
- SPP-INEGI-DGG, 1989. Carta topográfica. Hoja San Roque de Torres (F14 C51) Escala 1:50000.
- SPP-INEGI-DGG, 1989. Carta topográfica. Hoja Silao (F14 C52) Escala 1:50000.

- Stone, W. J., 1990. Impact of mining on ground water recharge, Navajo Coal Mine, New México: Mining Engineering, November, p. 1269-1272.
- Sukhija, B.S., Ready, D.V., Nagabhushanam, P. y Chand, R., 1988. Validity of the Enviromental Chloride Method for Recharge Evaluation of Coastal Aquifers, India. Journal of Hydrology, 99, 349-366.
- Tóth, J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J Geoph Res 68(16):4795-4812.
- Tóth, J., 1970. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. Journal of Hydrology 10:164-176
- Tóth, J., 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero. Vol. 111-4, 9-26.
- Walker, G.R., Jolly I.D. y Cook, P.G. A new Chloride Leaching Approach to the Estimation of Diffuse Recharge Following a Change in Land Use. Journal of Hydrology, 128, 49-67.
- Werner Joerg., Introducción a la Hidrogeología., 1996 Primera edición. Universidad Autonoma de Nuevo León. pp. 17-25
- Wood S. A. (1990) The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium. 1. Review of the available low-temperature data for inorganic complexes and inorganic REE speciation in natural waters. Chem. Geol. 82, 159-186.
- Wood W.W. and Sanford, W.E., 1995. Chemical and Isotopic Method for Quantifying Ground Water Recharge in a Regional, Semiarid Enviroment, Ground Water, 33(3): 458-486.