

9  
2 ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDRODINAMICO DEL

SISTEMA ACUIFERO DEL VALLE DE

LEON, GUANAJUATO

FALLA DE ORIGEN

NOEL HERNANDEZ LALOTH



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 está 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.

## INDICE

	RESUMEN.....	1
I	INTRODUCCION.....	3
I.1	Antecedentes.....	3
I.2	Estudios previos.....	3
I.3	Objetivos del estudio.....	17
I.4	Metodología y técnicas de trabajo.....	18
I.4.1	Actividades de campo.....	18
I.4.2	Actividades de gabinete.....	20
II	GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO.....	22
II.1	Localización y extensión del área de estudio.....	22
II.2	Vías de comunicación.....	23
II.3	Población, actividad económica y problemática ambiental.....	24
III	FISIOGRAFIA.....	25
III.1	Provincia fisiográfica.....	25
III.2	Hidrografía.....	27
III.3	Clima.....	28
III.4	Vegetación.....	29
III.5	Suelo.....	30
IV	GEOMORFOLOGIA.....	32
IV.1	Caracterización geomorfológica de las unidades litoestratigráficas y definición de unidades hidrogeomorfológicas.....	32
IV.2	Conclusiones.....	36
V	GEOLOGIA.....	37
V.1	Marco geológico regional.....	37
V.2	Estratigrafía.....	38
V.2.1	Eratema Mesozoico.....	38
V.2.2	Eratema Cenozoico.....	41

V.3	Geología estructural.....	49
V.3.1	Pliegues y cabalgaduras.....	49
V.3.2	Fracturas y sistemas de fallas.....	50
V.3.3	Esquema tectónico regional a partir de rasgos lineales y observaciones de campo.....	51
V.4	Geología del subsuelo.....	52
V.5	Síntesis tectónica e historia geológica.....	55
VI	HIDROGEOLOGIA.....	59
VI.1	Unidades hidrogeológicas y medios por donde fluye el agua.....	59
VI.1.1	Unidades hidrogeológicas permeables.....	59
VI.1.2	Unidades hidrogeológicas impermeables.....	61
VI.1.3	Medio granular.....	61
VI.1.4	Medio fracturado.....	62
VI.2	Características hidráulicas del sistema acuífero.....	63
VI.2.1	Pruebas de bombeo.....	63
VI.2.2	Pozos con aforo.....	73
VI.2.3	Relación caudal específico-transmisividad.....	79
VI.2.4	Comentarios a manera de conclusión, concernientes a la relación que guardan los parámetros hidráulicos con el sistema acuífero.....	80
VI.3	Aspectos teóricos acerca de los sistemas de flujo de agua subterránea.....	82
VI.4	Rasgos indicadores de sistemas de flujo.....	85
VI.5	Redes de flujo en perfil.....	92
VI.5.1	Construcción gráfica de la red de flujo en perfil.....	93
VI.5.2	Interpretación cualitativa de la red de flujo en perfil.....	98
VII	HIDROGEOQUIMICA.....	99
VII.1	Diferenciación química del agua subterránea.....	99
VII.2	Correlación entre la química del agua subterránea y los sistemas de flujo.....	104

VIII	MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ACUIFERO...	109
IX	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
IX.1	Conclusiones.....	113
IX.2	Recomendaciones.....	119
	BIBLIOGRAFIA.....	121

## RESUMEN

Se propone un modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico para el sistema acuifero del VL, integrando todos los datos que se lograron obtener en el transcurso de este trabajo de tesis, actuando interdisciplinariamente, con el afán de obtener un modelo más objetivo, que sirva de base para los posteriores estudios que se puedan hacer en esta zona.

En esta propuesta, el sistema acuifero del VL no se puede, ni se debe desligar de un contexto mayor de funcionamiento hidrodinámico, que se llama cuenca de agua subterránea (*groundwater basin*), la cual también engloba al VRT.

Bajo este principio, es que se elaboró un modelo conceptual para los sistemas acuiferos de ambos valles (VL y VRT) y que finalmente resultó en una nueva concepción del conocimiento para esta región.

En el capítulo uno (introducción), se da una visión general del grado de conocimiento que se tiene para esta zona, a partir de los trabajos que anteceden a esta tesis. También se señalan la metodología y técnicas de trabajo que se procuraron seguir durante la elaboración de este estudio.

En el siguiente capítulo, se presentan las generalidades del área de estudio y la problemática ambiental que ocasiona el crecimiento poblacional, industrial, agrícola, etc., de la zona estudiada.

El capítulo tres, muestra las características fisiográficas que enmarcan al área de estudio y que son relevantes, porque son el medio físico donde se desarrollan todos los pormenores que afectan al área de interés.

El cuarto capítulo, es el que se refiere a la geomorfología, donde se intenta hacer de ésta, una ciencia aplicativa a los estudios de carácter hidrogeológico, generando información cualitativa de zonas potenciales de infiltración.

En el capítulo cinco, se ofrece una visión conjunta y esclarecedora de toda la información de carácter geológica hasta ahora realizada, obteniendo con ello, el marco geológico que impera en esta zona.

Del capítulo siguiente (hidrogeología), se puede decir que es uno de los capítulos medulares de esta tesis. Trata sobre las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, de los tipos de medios por donde fluye el agua subterránea, de los rasgos indicadores de sistemas de

flujo y de la construcción e interpretación de la red de flujo en perfil. Todos esta liga de puntos, son las que ayudaron en la conceptualización del sistema acuífero.

Posteriormente, se presenta el capítulo de hidrogeoquímica, que sirve de respaldo a todas las interpretaciones dadas previamente. Además, una de los puntos más importantes de este capítulo, es que aparte de sustentar ideas que le anteceden, pone en evidencia los importantes cambios hidrogeoquímicos que se presentan con relación a los sistemas de flujo del agua subterránea.

Como penúltimo capítulo, se presenta el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del área, que viene siendo una recapitulación de todos los argumentos en favor de este modelo propuesto y de la importancia que tiene su aplicación en la prevención y/o solución de problemas de tipo científico, ingenieril o de manejo de los recursos.

Por último, se presenta el capítulo nueve, donde se presentan las conclusiones del estudio y se ofrecen recomendaciones para la aplicación de este modelo.

## I INTRODUCCION

### I.1 Antecedentes

A partir de 1988 y hasta la fecha, el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica (IGF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) viene realizando un estudio exhaustivo de análisis del comportamiento dinámico de los compuestos de cromo presentes en el sistema acuifero del Valle de León (VL), en el Estado de Guanajuato, como un proyecto de investigación para la Subdirección General de Infraestructura Hidráulica, Urbana e Industrial de la Comisión Nacional del Agua, perteneciente a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Ante los categóricos objetivos de este proyecto y por el impreciso entendimiento de las condiciones de funcionamiento hidrodinámico de dicho sistema acuifero, en relación al foco de contaminación, surgió la necesidad de elaborar un modelo de funcionamiento hidráulico subterráneo que sustente el ulterior análisis y predicción del comportamiento dinámico de la contaminación por cromo en el subsuelo.

De todo esto se desprende el presente trabajo de tesis, que consistió en conjuntar, seleccionar, analizar e interpretar todos los datos obtenidos y finalmente proponer un modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuifero del VL.

### I.2 Estudios previos

Son varios los estudios que se han realizado en esta región del bajo, algunos de carácter geológico o geológico-minero, siendo éstos básicamente, estudios que se extienden hacia la Sierra de Guanajuato (SG); existe otro pequeño número de estudios de índole hidrogeológico que se ocupan de los diversos valles que se ubican en dicha región del bajo. Algunos de estos estudios abarcan parcial o totalmente a la zona del presente estudio, generando así un panorama de la información existente y con ello reflejándose la consistencia o inconsistencia de algunas observaciones e interpretaciones presentadas por los autores de dichos estudios. Aquí se utiliza alguna información previa, acaso veraz, para sustentar ideas y/o reforzar criterios, aportando así un modelo que mejor explique el comportamiento del sistema acuifero en cuestión. Cabe señalar que la selección de estudios previos que a continuación se resumen, son trabajos que por su contenido -de algunos- dan fé de una visión objetiva del

progreso de ideas para la adquisición del conocimiento del VL, durante las últimas tres décadas.

El primer estudio hidrogeológico del que se tiene conocimiento para esta zona, es el realizado por Hernández Serrano en 1957, "...quien realizó una inspección hidrogeológica del Valle de León..." (Ariel, 1982b). Su importancia estriba principalmente, en haber sido el primer trabajo de investigación de tal naturaleza para esa zona de estudio y marca la pauta a seguir para los posteriores trabajos hidrogeológicos en dicha región.

Transcurridos tres años (1960), Mapes y Echevoyén, realizaron un "...reconocimiento y muestreo de rocas ultrabásicas que existen al NE del poblado de Duarte..." (Echevoyén, 1978).

Para 1965, Sánchez Garduño, "...hace una compilación geológica con la que intenta hacer una estimación de las reservas de agua subterránea para el abastecimiento de la ciudad de León..." (Ariel, op. cit.).

En 1968, Mooser elabora la primera fotointerpretación geológica general para una gran extensión como lo es la cuenca del Río Lerma, donde se incluye el VL (Ariel, op. cit.).

Un año después Ariel Construcciones, S.A. (1969), se encarga de estimar el potencial de agua que entra al sistema acuífero del VL, siendo aproximadamente de  $52 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ . También enfatiza la existencia de una interdependencia de este acuífero con el Valle del Río Turbio (Ariel, op. cit. y Ariel 1982a).

Posteriormente en 1970, Ariel Construcciones S.A., obtiene el nuevo valor de  $65 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ , como potencial de agua que entra al sistema. También hace el comentario referente a la existencia de un cono de abatimiento regional en el centro del valle, como consecuencia de una gran sobreexplotación (Ariel, 1982b).

Después, Echevoyén (1978), identifica las diferentes unidades litológicas que afloran en el flanco suroccidental de la SG y evalúa su

potencial minero, aportando nuevos conocimientos de la geología regional de la sierra, aunque con edades relativas un tanto inciertas, para las unidades litológicas descritas.

Es la empresa Geohidrológica Mexicana, S.A., que en 1979 se encarga de elaborar un estudio de actualización del Valle del Río Turbio (VRT). En este trabajo se reportan extracciones de agua del orden de  $127 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año. Como unidades almacenadoras de agua se consideran a las rocas ígneas y sedimentarias marinas fundamentalmente, y en base a las pruebas de bombeo, se obtuvieron para estos materiales transmisividades que varían entre  $0.16 \times 10^{-3}$  y  $3.31 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Proponen como zonas de recarga natural a las porciones montañosas del noroccidente y oriente de la zona de estudio, además de la *"...infiltración del agua de lluvia y de los escurrimientos transitorios que bajan de la sierra, los cuales penetran parcialmente a través de la cubierta alterada de los bordes del valle."* y como zonas de descarga a la parte sur del área de estudio y en pequeña proporción a través del cauce del Río Turbio.

1980 es el año en que la Secretaría de Programación y Presupuesto, publica la Síntesis Geográfica de Guanajuato, donde se resumen las características geográficas más importantes del estado, incluyéndose un apartado de hidrología superficial y subterránea, con poca relevancia para los objetivos de esta tesis, excepto los capítulos de fisiografía y climatología, que si fueron útiles.

En los inicios de 1982, Servais et al., realizan un estudio de las rocas básicas y ultrabásicas de los estados de Sinaloa y Guanajuato, desarrollando una hipótesis sobre la evolución geodinámica del noroeste de México y su relación con los eventos del centro de México (Durango y Zacatecas) y con las zonas ofiolíticas del Estado de Guanajuato. En este estudio se establece un bosquejo geológico del área de San Juan de Otates, donde afloran rocas ultrabásicas y básicas, agrupándolas por su carácter alóctono y ofiolítico, bajo el nombre de Complejo Ofiolítico San Juan de Otates y proponiéndolo formalmente. Aducen que estos elementos ultrabásico y básico, son testigos de un dominio oceánico de afinidad tetisiana del Mesozoico tardío (?), quedando excluidas de los complejos ofiolíticos de

afinidad pacífica del noroccidente de México. También hacen mención, de que esta zona representa el flanco norte de una estructura de fosas tectónicas, representada por la planicie de León, donde la tectónica de fallas normales con buzamiento casi vertical, ligeramente hacia el sur, afectó a las formaciones del Oligoceno-Mioceno y a su basamento, obteniéndose una topografía en "escalera", de donde se extravesó el magma basáltico post-ignimbrítico.

A finales de 1982, la empresa Ariel Construcciones, S.A., realizó dos estudios simultáneos, uno en la Cuenca Alta del Río Turbio y otro en el VL. Para el primero, las magnitudes de extracción fueron del orden de  $82.79 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  y para el segundo de  $204.581 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ . En el estudio del VRT, se consideraron como unidades litológicas acuíferas a las areniscas tobáceas, los depósitos continentales y los derrames andesíticos; como unidades litológicas transmisoras de agua a los depósitos lacustres, fluviales, aluviales y de pie de monte y los basaltos fracturados; por último, como frontera de los acuíferos, a los derrames y tobas riolíticos. Para el VL se omiten estas características geohidrológicas. En base a los estudios realizados a este último valle, se hace una separación entre dos acuíferos, ubicando al primero en los primeros doscientos metros de profundidad y al segundo entre los doscientos y seiscientos metros de profundidad, llamándolos "acuífero superior" y "acuífero inferior" respectivamente. Los valores de transmisividad calculados a partir de pruebas de bombeo para ambos acuíferos, es en promedio de  $6.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . A pesar del desconocimiento del comportamiento del "acuífero inferior", sostienen la versión de que la explotación de éste es mínima en comparación con el "acuífero superior". En lo concerniente al problema de la contaminación de los "acuíferos", esta empresa arguye que dicha contaminación proviene de la laguna de oxidación El Mastranzo, la que afecta al acuífero en un radio de tres kilómetros, y de la infiltración de las aguas negras utilizadas en el riego. Por último, pero con igual relevancia, se afirma que existe una comunicación subterránea a través de las unidades sedimentarias de los valles de León y Río Turbio.

En el siguiente año (1983), la empresa Proyesco, S.A., realizó un estudio de investigación geofísica en el VRT, que consistió en "...conjugarse

*los resultados de la prospección geofísica..." y "...sugerir áreas con posibilidades hidrogeológicas...", "...para la Cd. de León."*

Servais et al., en 1986, publican en el boletín de la Sociedad Geológica de Francia, sus investigaciones y resultados de la evolución geológica del noroccidente de México. En este artículo, proponen un modelo tectónico, basado en los estudios realizados en los diversos afloramientos de rocas básicas y ultrabásicas de Sinaloa y centro de México, concluyendo que a lo largo de la plataforma estable de Coahuila se formó la cuenca de tras-arco Guanajuato-Zacatecas durante el Jurásico tardío, atestiguado por la Ofiolita Guanajuato (Ofiolita San Juan de Otates). En nota adjunta a su publicación, toma como alternativa posible de explicación del origen de la Ofiolita Guanajuato, el modelo propuesto por Carfatan en su tesis de doctorado (1986, p.487), acerca del origen de los diferentes complejos ofiolíticos del sureste de México. Este modelo propone, la existencia de una digitación oceánica, así como una apertura atlántica, que separa las plataformas carbonatadas orientales (Chiapas y San Luis Potosí) de los arcos volcánicos peripacificos (Alisitos-Teloloapan). Esta cuenca llamada "Cuitatéque" de México meridional habría sido abierta durante el Neocomiano hacia el norte y se prolongaría precisamente contra la cuenca de Guanajuato-Zacatecas. Si esta conexión es correcta, existiría un elemento estructural mayor bordeando a la plataforma estable americana a lo largo de 1000 km.

En diciembre de 1986, el Instituto de Geología (IG) de la UNAM, organiza el primer simposio sobre la geología regional de México, conmemorando así el primer centenario de la fundación de dicho instituto. En este simposio se presentaron tres ponencias de interés para este trabajo, las que se resumen a continuación:

- "Geología de la Sierra de Guanajuato" por J. Martínez R. En este trabajo, se diferencian dos conjuntos de unidades litoestratigráficas: una unidad inferior, constituida por una secuencia potente de productos sedimentarios y volcánicos marinos mesozoicos con evidencias de deformación, metamorfismo e intrusión, un evento posterior de intrusión granítica durante el Paleoceno; además, una unidad ultramáfica serpentinizada alóctona, de edad Jurásico tardío (?) y sedimentación

carbonatada aptiana. Como segunda unidad litoestratigráfica, se conoce a una unidad superior constituida esencialmente, por una secuencia volcánica terciaria de composición ácida a intermedia, presentando en su base, rocas clásticas de origen continental de edad Eoceno y en su cima, aluviones y basaltos pliocuaternarios. El conjunto basal está caracterizado por dos periodos de deformación, con orientaciones NW-SE y NE-SW, posteriormente se presenta un periodo de tectónica distensiva, provocando la formación de grandes estructuras y el consecuente levantamiento de la zona. Esta tectónica, manifiesta dos sistemas de fallamiento, perpendiculares entre sí, con direcciones NW-SE y NE-SW, favoreciendo el hidrotermalismo y la mineralización.

- "Geología de los alrededores de Comanja de Corona, Estado de Jalisco" por O. Quintero L. Este autor cartografió diez unidades litoestratigráficas, separándolas en dos grupos que llama "basamento" y "cubierta volcánica". El "basamento" está constituido por una unidad volcanosedimentaria pre-aptiana, una unidad calcárea con clásticos y fósiles del Aptiano-Albiano en su cima, un granito del eoceno, intrusionando a las anteriores unidades, finalmente, el depósito del conglomerado Guanajuato. La "cubierta volcánica", la constituyen: Andesita Bernalejo, Grava Los Lozano, Basalto Dos Aguas, Ignimbrita Cuatralba y una andesita aún no determinada. Todas estas unidades están genéticamente relacionadas con la Sierra Madre Occidental. Actualmente, existe un régimen tensional, posterior al depósito de la andesita, ocasionando la formación de la falla normal que limita a la SG con el bajío.

- "Análisis estructural-petrofísico de las rocas encajonantes de depósitos hidrotermales argento-auríferos en rocas volcánicas continentales del Terciario, un ejemplo en Las Torres, Guanajuato" por L.F. Vassallo. Este autor pone en claro que los dos complejos de rocas que son frontera de la Veta Madre, en la sección de Las Torres, se diferencian notablemente en sus características físico-mecánicas. En el bloque del alto, se desarrollan rocas altamente porosas, permeables y quebradizas de composición riolítica y andesítica. En el bloque del bajo existen conglomerados, que poseen baja porosidad y permeabilidad y alta elasticidad y solidez.

Es en abril de 1987 cuando el IG de la UNAM organiza el primer simposio sobre la geología de la SG, concluyendo con una excursión a este

lugar. Se presentaron dieciocho ponencias, de las cuales se resumen a continuación las más importantes e interesantes para esta tesis:

- "Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la porción meridional de la Meseta Central" por J.J. Aranda G y A.F. Nieto S. En este primer artículo, se resume brevemente la geología general de la sierra, haciendo mención, de la presencia de un límite natural geológico o fisiográfico, conocido como Falla del Bajío, que separa a dos grandes regiones del centro de México, en el sur la altiplanicie neovolcánica y en el norte la meseta central.

- "Análisis de D/H en alteraciones de rocas ultramáficas de San Juan de Otates, Guanajuato" por L. Delgado A. Este autor reconoce la existencia de una secuencia ofiolítica de tras-arco, con evidencia de dos eventos de serpentinización, uno relacionado con el movimiento diapírico de la masa y otro posterior, por efectos de cizallamiento en zona de fallamiento inverso.

- "Una edad cretácica para las rocas basales de la Sierra de Guanajuato" por V.M. Dávila A. y J. Martínez R. Mediante la recolección y estudio de radiolarios fósiles, proponen una edad Valanginiano-Turoniano, cuando menos, para la cima de la unidad volcanosedimentaria conceptualizada como el basamento de la sierra.

- "Reubicación geocronológica del Conglomerado Guanajuato, basada en nuevos mamíferos" por I. Ferrusquía V. Con base en los recientes hallazgos de carnívoros fósiles, transfieren al miembro inferior del Conglomerado Guanajuato al Eoceno medio-Eoceno tardío.

- "Evolución geológica del extremo noroccidental de la Sierra de Guanajuato" por O. Quintero L. Hace un resumen de las unidades litoestratigráficas que afloran en el área de Comanja, Jalisco y sus principales actividades geológicas. De las unidades litoestratigráficas, identificó en orden cronológico de la más antigua a la más joven, las siguientes unidades: una secuencia volcanosedimentaria pre-aptiana, una unidad sedimentaria carbonatada y clástica del Aptiano-Albiano, el granito Comanja del Eoceno, el Conglomerado Guanajuato del Eoceno, la formación de la andesita Bernalejo durante el Oligoceno tardío, movimientos tectónicos a finales del Oligoceno que permitieron la depositación de la Grava Los Lozano, durante el Mioceno temprano se presenta un evento volcánico ignimbrítico formador de la Ignimbrita Cuatralba, en el Mioceno tardío se

manifiestan esfuerzos tensionales que dan lugar a la formación del bajo y se presenta un volcanismo formador de la unidad Basalto Dos Aguas, contemporánea a la postrimería del evento ignimbrítico anteriormente mencionado, después, durante el Plioceno, se forma la Andesita Mesa de Santiago, presentándose sólo en la mesa del mismo nombre y en el Cerro Gordo (noroeste de la ciudad de León), actualmente se desarrolla un régimen tectónico tensional, causante de la Falla del Bajío y formador de la región del mismo nombre.

- "Cuantificación de las alteraciones hidrotermales en depósitos argento-auríferos, un ejemplo: Guanajuato, México" por L.F. Vassallo M. Cabe resaltar de este artículo, las diferencias hidrológicas o físico-mecánicas, como las denomina el autor, de los dos complejos de rocas que guardan a la Veta Madre de Guanajuato, siendo el bloque del alto donde se desarrollan rocas altamente porosas, permeables y quebradizas de composición riolítica y andesítica, y el bloque del bajo, las que poseen una baja porosidad y permeabilidad y alta elasticidad y solidez

- "Estudio pedogenético de los suelos en función de algunas unidades litoestratigráficas de la Sierra de Guanajuato" por G. Hernández S. y L. Flores D. Determinaron la pedogénesis de los suelos derivados de siete, de *"...las 16 unidades litoestratigráficas establecidas y delimitadas por Martínez y colaboradores (1986)..."*. La importancia de estos trabajos, como ellos sostienen textualmente *"... se debe a que constituyen un marco de referencia de los estudios genéticos de los suelos formados en el graben del bajo"*.

- "Riesgo de degradación de los suelos en el Municipio de Salamanca, Guanajuato" por I. Sommer C. y G. Hernández S. Este trabajo está enfocado a conocer el verdadero peligro de degradación del suelo por su mal uso e inadecuado manejo. De las conclusiones obtenidas, se habla de una predominancia de Vertisoles, aunque también existen Feozems, Castanozems y litosoles. Los fenómenos de degradación, están muy ligados con la actividad humana, de donde se derivan los siguientes tipos de degradación observados para esta región del bajo: degradación química actual (sodicidad), degradación química potencial (alcalinidad), degradación por erosión (hídrica), degradación física potencial (compactación) y degradación por contaminación (actividades industriales).

- "Excursión a la Sierra de Guanajuato" por J. Martínez R. Este resumen, previo a la excursión, es la síntesis geológica de las distintas unidades litológicas que afloran en la SG y que el autor ha dividido en dos conjuntos litoestratigráficos bien definidos, llamados: conjunto basal y cubierta volcanoclástica cenozoica. El conjunto basal, está representado por las siguientes unidades litoestratigráficas, mencionadas en orden cronológico de más antigua a más joven: Piroxenita San Juan de Otates, Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, Suite Plutónica La Luz (Diorita La Palma, Tonalita Cerro Pelón y diques ácidos y básicos), Caliza La Perlita y Granito Comanja. La Cubierta volcanoclástica cenozoica, se encuentra representada por la siguiente sucesión de unidades litoestratigráficas, en orden cronológica de más antigua a más joven: Conglomerado Duarte, Andesita El Gigante-Bernalejo, Riolita El Ocote, Ignimbrita Cuatralba, Basalto Dos Aguas, Gravas El Capulín, Basalto El Cubilete y Gabro Arperos.

Trujillo en 1987, hace un estudio de exploración hidrogeológica en la zona de La Muralla, al sur de la ciudad de León. En este estudio, parece ser que lo relevante es haber detectado un acuífero termal confinado a través de perforaciones exploratorias, y concluyendo que este acuífero lo componen ignimbritas riolíticas fracturadas con un espesor medio de 120 m., teniendo "...como confinante inferior, un potente depósito de conglomerados rojos impermeables y como confinante superior un cuerpo estratificado de calizas arcillosas impermeables.". Además, afirma que la producción de agua "...se obtiene principalmente de acuíferos en materiales granulares..." y de "...los acuíferos en rocas volcánicas fracturadas de tipo riolítico y basáltico...". En el problema de la contaminación del agua subterránea, acusa a la planta industrial Química Central, como la principal fuente de contaminación de cromo hexavalente en el sistema hídrico subterráneo local hacia ambos márgenes del Río Turbio, y declara, por otra parte, que la contaminación subterránea también es una consecuencia "...de la infiltración de aguas negras del Río Los Gómez, del embalse de la presa El Mastranzo y de la zona de riego que aprovecha esas aguas."

A fin de año (1987), el IG de la UNAM realiza el segundo simposio referido a la geología regional de México, donde un artículo se ocupa de

la SG. Este artículo es presentado por Cervantes-Sánchez y hace alusión a las características morfoestructurales de la SG, afirmando que "...los movimientos neotectónicos verticales...", "...transformaron la configuración estructural precenozoica...", asimismo, los movimientos diferenciales a través de las deformaciones disyuntivas y las intrusiones, establecieron morfoestructuras geológicas tales como: estructura principal en bloques, estructuras sobrepuestas, estructuras transversales, sedimentación, extravasado, erosión y levantamiento de una cobertura de espesor variable poco deformada, que enmascara las estructuras antiguas.

Al año siguiente (1988), Corona realiza un trabajo de tesis de licenciatura sobre el análisis estratigráfico-estructural de la porción centro-sur de la SG, resaltando que la región estuvo sometida a cinco fases de deformación, divididas en dos etapas, una mesozoica, que incluye a las dos primeras fases de deformación, siendo éstas, de carácter compresivo; posteriormente una segunda etapa en el Terciario, donde incluye a las tres restantes fases de deformación que son de carácter distensivo. La primera fase compresiva, considerada como la más intensa y larga, está relacionada a un evento de metamorfismo regional de facies esquistos verdes. La segunda fase compresiva se relaciona con la Orogenia Laramide, la que se llevó a cabo principalmente durante el Cretácico tardío. La tercera fase de deformación (primera fase distensiva), se caracteriza por un fallamiento normal NE-SW, relacionado con el depósito sedimentario continental en cuencas intermontanas, por lo que se le considera anterior o contemporánea al depósito del Conglomerado Guanajuato. La cuarta fase deformativa (segunda fase distensiva), está relacionada con un fallamiento normal NW-SE y a la actual orientación de la SG. La quinta y última etapa de deformación (tercera fase distensiva), expresa estructuras de fallamiento normal NE-SW, pasando indistinguiblemente a un fallamiento lateral izquierdo. A esta fase se le asigna una edad relativa no menor del Plioceno, pudiendo estar activa actualmente. Aparte de todo esto, el autor arguye que "...la secuencia volcánico-sedimentaria metamorfizada expuesta en la Sierra de Guanajuato, presenta características estratigráfico-estructurales, semejantes a algunas secuencias expuestas en Tierra Caliente..." y también descarta totalmente la digitación del Mar de Tethys propuesta por Servais et al. (1982) para esta región.

El primer trabajo sobre la geología de la SG, para este año (1989), es la tesis de maestría presentada por Quintero. En esta tesis se determinan las distintas unidades litoestratigráficas que afloran en el área de Comanja de Corona, Jalisco (noroccidente de León), tales unidades con sus nombres informales son de la más antigua a la más joven: Ofiolita Barbosa, Unidad Sedimentaria, Caliza La Perлита, Granito Comanja, Conglomerado Guanajuato y el Grupo León, que lo constituyen, la Andesita Bernalejo, Grava Los Lozano, Ignimbrita Cuatralba, Basalto Dos Aguas, Andesita Mesa de Santiago y Grava Los Ranchos. De la geología estructural que interpreta este autor, menciona que existen varios sistemas de fallas normales con orientaciones  $N60^{\circ}W$  y  $N50^{\circ}E$  y otros sistemas de fallas con orientación NNW-SSE y NNE-SSW, en total cuatro sistemas de fallas. El sistema de fallas más antiguo es el de orientación  $N60^{\circ}W$ , al cual pertenece la Falla del Bajío, la que tiene como bloque caído, la llanura del mismo nombre. En conclusión, los efectos iniciales del régimen tectónico distensivo del Cenozoico está representado por el Volcán Dos Aguas, el cual se emplazó en las cercanías de la Falla del Bajío, interestratificándose con la Ignimbrita Cuatralba y constituyendo ambas unidades un vulcanismo bimodal durante el Mioceno. El régimen tectónico distensivo está relacionado con la interacción geodinámica de las Placas Cocos y Norteamericana.

El IG de la UNAM realiza el tercer simposio sobre la geología regional de México (1989), donde hubo un trabajo de interés para esta tesis, el que se tituló "Metamorfismo de contacto en la porción sudoriental del batolito granítico de la Sierra de Guanajuato", preparado por Vassallo y Martínez. Este autor afirma que la estratigrafía de la SG está conformada a grandes rasgos, por un basamento de rocas que representan un arco insular y/o una cuenca oceánica marginal, posteriormente un intrusivo granítico, el cual aporta clastos para la sedimentación eocénica y finalmente, un paquete de rocas de evolución continental post-paleocénica, con eventos de fallamiento y vulcanismo, favoreciendo la acumulación de sedimentos clásticos y material volcánico de diversa composición. De las descripciones referidas al Granito Comanja, argumenta que este tipo de roca aparenta ser homogénea y presenta la siguiente paragénesis mineral: cuarzo anhedral, ortoclasa subhedral, plagioclasa (oligoclasa-andesina), biotita cloritizada y minerales accesorios (zircón, apatita y ocasionalmente fluorita).

La última publicación de 1989, que diserta sobre la geología de la SG, es la elaborada por J. Martínez R. y que se encuentra en proceso de impresión. Este autor hace un análisis de la situación de conocimiento de la geología de la SG; posteriormente realiza la síntesis geológica de las diversas unidades litoestratigráficas cartografiadas e interpreta la evolución tectónica de ellas. Propone nombres informales para algunas unidades litoestratigráficas y reitera las propuestas por otros autores en trabajos anteriores. A continuación se presentan las unidades litoestratigráficas mesozoicas que corresponden al conjunto basal de la sierra, en el orden cronoestratigráfico de más antigua a más reciente: Piroxenita San Juan de Otates (Jpsj), Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato (Kcsg), Diorita La Palma (Kdip), Tonalita Cerro Pelón (Ktcp) y Caliza La Perlita (Kclp). Estas unidades son representativas -según el autor- de un ambiente de arco insular y/o cuenca marginal de afinidad pacífica, excepto la última, que representa los remanentes de una transgresión, indicativa de un paleoambiente de afinidad tetisiana. A principios del Terciario, se emplaza un granito de composición ácida que separa a rocas basales mesozoicas de la cubierta volcánoclastica cenozoica. Este granito marca el inicio de una paleogeografía continental y su orientación sugiere una relación con los procesos tectónicos que dieron fin a los ambientes marinos de afinidad pacífica y tetisiana. Las rocas representativas de la cubierta cenozoica son, de la más antigua a la más joven: Conglomerado Duarte (Tcdu), Andesita El Gigante-Bernalejo (Tagb), Riolita El Ocote (Troc), Ignimbrita Cuatralba (Ticu), Basalto Dos Aguas (Tbda), Toba El Terrero (Ttte), Grava El Capulín (Qgca), Gabro Arperos (Qgar) y Basalto El Cubilete (Qbcu). Estas unidades litoestratigráficas, presentan un sistema de fallamiento normal con orientaciones preferenciales NW-SE y NE-SW, como producto del régimen distensivo que actuó durante distintas épocas del Cenozoico.

Dos de las últimas tres publicaciones que se refieren a la Sierra de Guanajuato y que se encuentran en proceso de edición (1990), en las revistas de los institutos de geología y geografía, de la UNAM, son las realizadas por A. Cervantes S. La primera publicación (1990a), trata lo referente a las principales características estructurales del relieve de la Sierra de Guanajuato, donde se distinguen tres sistemas de lineamientos

predominantes, con rumbos generales N50-70°W, N40-60°E y N10-20°W. Con base en estos sistemas de lineamientos, se agruparon diecinueve estructuras en bloques (horsts y grabens), siendo las más importantes, las que a continuación se mencionan en forma sucinta: 1) Bloque Cuatralba, estructura con rumbo general NW, con pendientes abruptas en el flanco suroccidental y suaves en el NE; 2) Bloque El Gigante, se localiza al sur de la estructura antes mencionada y limita al sur con el bloque Las Mesas, a través de una falla normal E-W; 3) Bloque Las Mesas, estructura con rumbo NW-SE, que limita con el bajío guanajuatense, a través de un sistema de fallas normales. El drenaje fluye hacia el bajío, con una dirección SW; y 4) Graben San Felipe o Villa de Reyes, estructura con rumbo N45°E, que en su extremo meridional, en el área de Nuevo Valle, la estructura se vuelve compleja, debido a bloques elevados y estructuras anulares (domos riolíticos) y que muy probable, se continúen hacia el bajío, donde se localizan altos topográficos, alineados estructuralmente con la orientación del graben. El valle generado a partir de este graben, es de pendientes suaves, con cotas topográficas mayores en el SW y menores en el NE. La segunda publicación (1990b), se refiere al análisis estructural de las formas erosivas, en el extremo suroriental de la SG, concluyendo que: 1) existen cinco sistemas predominantes de elementos rectos, generalmente representados por fallas normales; 2) las estructuras de orientación NW-SE predominan en tamaño y cantidad con relación a las estructuras NE-SW, tal vez, al prolongado tiempo geológico al que estuvieron sometidas y porque su orientación es muy cercana a la orientación de los pliegues del basamento y a la orientación general de la Sierra de Guanajuato; 3) en base a lo establecido anteriormente, se considera que las estructuras de orientación NW-SE, son heredadas y que los campos de esfuerzos que las generaron actuaron desde el Mesozoico, influyendo en los procesos geológicos del Cenozoico; y 4) en el Cenozoico, han predominado los campos de esfuerzo de carácter extensional, reactivando estructuras antiguas y generando un sistema anómalo transversal neotectónico de dirección NE-SW (v.g., Graben San Felipe o Villa de Reyes y Transversal Guanajuato-Calvillo).

El otro artículo, también en vispera de ser publicado, es el realizado por A.F. Nieto S. (1990a), el cual se ocupa de la estratigrafía del suroriente de la Sierra de Guanajuato y la relación que guarda con el

proceso distensivo que actuó durante las diferentes épocas del Cenozoico. En este trabajo de investigación, se lograron cartografiar once unidades litoestratigráficas y los conjuntos estructurales más importantes que acaecieron durante el Cenozoico. Las unidades litoestratigráficas a continuación se mencionan, siendo la primera, la más joven y la última, la más antigua: Conglomerado Guanajuato (Eoceno), Formación Losero (Oligoceno), Conglomerado Calderones (Oligoceno), Andesita El Cedro (Oligoceno), Riolita Chichindaro (Oligoceno), Andesita Presa de Manantiales (Oligoceno tardio-Plioceno), Depósitos Lacustres y Gravas (Plioceno-Pleistoceno), Ignimbritas (Plioceno), Gravas El Capulín (Pleistoceno), Basalto Mesa San José (Pleistoceno) y Gravas (Pleistoceno). Los conjuntos estructurales definidos son: Graben De la Saucedá, fallas del distrito minero de Guanajuato y Falla del Bajío. El Graben De la Saucedá, está definido por la Falla Septentrional, Falla Meridional y Falla De la Gloria, de orientación NE-SW; las fallas del distrito minero de Guanajuato, están representadas por la Falla Veta Madre, fallas Vetas de la Sierra y fallas Vetas de la Luz, de orientación NW-SE y por las fallas Transversales de orientación NE-SW; por último, la Falla del Bajío, que está constituida por un sistema de fallas de orientación NW-SE. El autor, define cinco fases de fallamiento, asociadas con los tres conjuntos estructurales citados anteriormente: la primera con rumbo NE-SW (fallas Transversales), que propició el depósito del Conglomerado Guanajuato en fosas tectónicas, durante el Eoceno; la segunda, del Oligoceno temprano, con orientación NW-SE, considerada posterior al Conglomerado Guanajuato y anterior al Conglomerado Calderones; la tercera fase, que corresponde a las fallas oligocénicas (v.g., Falla Veta Madre), con rumbo NE-NW y que afectan al Conglomerado Calderones; la cuarta fase, es la relacionada con la Falla del Bajío, con rumbo NW-SE, que desplaza rocas del Plioceno-Pleistoceno (v.g., basalto del Cerro El Cubilete y Gravas El Capulín); la quinta y última fase, es el fallamiento generador del Graben De la Saucedá y del desplazamiento de la Falla del Bajío, al menos, para esa zona, durante el Cuaternario. El autor aclara que estas fases "...no indican necesariamente que entre ellas hayan existido periodos de inactividad, o que sean las únicas...", aunque "...es particularmente conspicua la falta de registro litológico y estructural durante el Mioceno...", también resalta que ocasionalmente "...las dos direcciones (NW-SE y NE-SW) del fallamiento se

encuentran presentes en una misma etapa, mientras que en otras se reconoce una sola dirección." Finalmente, afirma que la presencia de las dos direcciones de fallamiento en las distintas fases distensivas, se debe a la profunda relación que existe con las esquistosidades y diaclasamiento presentes en las rocas mesozoicas.

Finalmente, casi de manera paralela a este trabajo de tesis, se elaboró otro, intitulado "Marco geológico del sistema acuífero de la zona sur de la ciudad de León, Guanajuato" sustentado por E. Nava A. y J.A. Guzmán P (1990). Esta tesis tuvo como objetivo principal "...definir el comportamiento de los acuíferos de la zona, empleando diversas técnicas geológicas, geofísicas e hidrogeológicas". Se llegó a la conclusión de haber identificado dos acuíferos "uno en material granular lacustre y otro en rocas ignimbríticas fracturadas (más permeable)". También señalan que "las ignimbríticas y los depósitos lacustres quedan en contacto lateral debido al fallamiento presente en la zona, lo que provoca flujo subterráneo de un acuífero hacia el otro, dando lugar a un sólo sistema acuífero".

### *1.3 Objetivos del estudio*

Los fines de este estudio son varios, pero en primera instancia y como propósito fundamental, se procuró conocer el comportamiento dinámico del agua en el subsuelo del VL, considerando todo un esquema integral interdisciplinario de ciencias, donde se incluyen: geología, hidrología subterránea, hidrogeoquímica, geofísica, geomorfología y otras más. Para poder proponer este modelo conceptual de funcionamiento global, fue necesario definir previa y lógicamente ciertos elementos, que conjugados, dieran una visión objetiva y esclarecedora de los diversos parámetros hidrogeológicos, los cuales juegan un papel muy importante en esta propuesta de funcionamiento totalitario del sistema acuífero y que vendrían a conformar, en suma cuenta, los objetivos parciales del estudio. Dentro de esta serie de objetivos parciales podemos mencionar como puntos determinativos del modelo propuesto, la identificación de las características del flujo subterráneo (dirección y calidad), el tamaño y geometría del sistema acuífero, zonas de recarga y descarga del agua subterránea, identificación de los sistemas de flujo regional, intermedio y local, definición de unidades hidrogeológicas y comportamiento hidráulico

del sistema acuífero, esquematización de superficies potenciométricas, utilización de los rasgos superficiales del agua subterránea, como elementos importantes en la elaboración del modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero, y por último, la aplicación de redes de flujo en perfil, para una mejor conceptualización de este sistema.

#### **I.4 Metodología y técnicas de trabajo**

En ocasiones la obtención de información requerida para un proyecto de investigación es esporádica y aislada, ocasionalmente fortuita, lo que provoca muchas veces una alteración del planteamiento de la metodología de trabajo y que consecuente e inevitablemente modifica las diferentes actividades que se estén desarrollando dentro de un área preestablecida. Atendiendo a ésto, se procuró trabajar con lógica y flexibilidad, proponiéndose metas y planteando actividades congruentes con la realidad concreta, cualidades éstas en la proyección de la investigación desde el punto de vista de la ingeniería.

A continuación se señalan las diferentes actividades que se desarrollaron sistemáticamente y con apego formal, a los diferentes métodos y técnicas de trabajo durante la elaboración de esta tesis. Para hacer más comprensible estas actividades, se han dividido en dos fases: una, actividades de campo y la otra, actividades de gabinete.

##### **I.4.1 Actividades de campo.**

De las primeras actividades de campo, el IGF llevó a cabo la selección de pozos piloto para la ulterior medición periódica mensual de la profundidad del nivel estático, considerando una distribución espacial de los pozos lo más homogénea posible, y ante todo, fácil acceso al sitio de medición y en el caso de los pozos con equipo de bombeo instalado, espacio disponible para la introducción del cable de la sonda. El recorrido periódico mensual de las mediciones potenciométricas se inició en agosto de 1988 y se concluyó en noviembre de 1989, excluyendo diciembre de 1988 y mayo, junio, agosto y octubre de 1989, debido a causas ajenas a los propósitos de este trabajo.

Las mediciones de la profundidad al nivel del agua, se obtuvieron mediante una sonda eléctrica que funciona con corriente continua,

proporcionada por una pila seca. La técnica consiste en introducir en el aprovechamiento, entre la tubería y la columna de succión, un electrodo que pende del extremo del cable de la sonda y descenderlo, girando un carrete mediante una manivela hasta que haga contacto con el nivel del agua, donde automáticamente se cerrará un circuito y mandará la señal a un detector (miliamperímetro) colocado en el carrete de la sonda, indicando el momento preciso de detención de la manivela; posteriormente se mide la longitud de cable utilizado, que obviamente será la profundidad del nivel del agua referido a un plano, generalmente el nivel del terreno o la altura del brocal; finalmente se anota la magnitud medida en una libreta, con hora, fecha y clave del pozo.

La tabla potenciométrica que se generó con estos recorridos de campo es incompleta, debido a obstrucciones en algunos pozos por derrumbe, azolvamiento o mala reinstalación del equipo de bombeo, después de su mantenimiento y/o reparación.

Aunado a esta actividad, se llevó a cabo entre los propietarios de pozos, una encuesta referente a las características constructivas de algunos aprovechamientos piloto o con muestra de agua, poniendo especial interés en su profundidad total.

En la etapa de muestreo del agua que realizó el IGF, para su análisis fisicoquímico, se consideró la distribución espacial de aprovechamientos en operación, tomando la muestra directamente de la tubería de descarga. Para esta actividad, se utilizaron frascos de polietileno de un litro de capacidad con doble tapa, enjuagando varias veces el frasco antes de llenarlas totalmente, evitando la formación y permanencia de burbujas de aire en el líquido, causantes de las reacciones químicas que alteran la composición de la muestra de agua. También se consideraron los datos de localización de pozos, la temperatura ambiente, la temperatura del agua al momento del muestreo, el pH y la conductividad eléctrica del agua; para los últimos cuatro datos, se utilizó un medidor digital de temperatura, pH y conductividad eléctrica marca Markson, modelo 95. Una vez obtenidas las muestras, se remitieron al laboratorio del IGF de la UNAM, donde se efectuaron los análisis fisicoquímicos correspondientes. Es importante señalar que se realizó un segundo muestreo de agua, como complemento del primero, pero en otra selección de pozos, capaces de sustentar o refutar ciertas interpretaciones del comportamiento del flujo subterráneo. A estos

últimos análisis, se les determinó la concentración de sólidos totales disueltos, cloruros y cromo hexavalente, además, sus respectivas propiedades físicas de campo.

En esta siguiente etapa de campo, se llevó a fin la medición de la temperatura de descarga del agua de todos los pozos que estuvieran funcionando. La medición se hizo con un medidor de temperaturas marca Markson, modelo 95, como se especificó en el párrafo anterior.

Con relación a la etapa de trabajo de verificación geológica con motivos hidrogeológicos, es importante señalar que el área de estudio se amplió, con el fin de tener un panorama global de las verdaderas condiciones geológicas imperantes en la región, las que están íntimamente relacionadas con las características de funcionamiento hidrológico subterráneo del sistema acuífero en cuestión. En la comprobación geológica, se tomó como base la cartografía geológica elaborada por el IG de la UNAM. Durante los caminamientos geológicos, se elaboraron secciones geológicas y se describieron los diversos afloramientos y muestras de mano, tomando en cuenta las características mineralógicas, texturales y estructurales, asimismo, grado de alteración y porosidad.

Durante las salidas al campo se mantuvo siempre como objetivo de trabajo, obtener toda la información posible en lo referente a los "afloramientos" o manifestaciones superficiales del agua subterránea.

La última etapa de trabajo en campo, consistió en el análisis y descripción petrológica de las muestras de canal de diversos pozos recién perforados en la zona urbana de la ciudad de León, con base en los datos adquiridos durante la etapa de verificación geológica.

#### **I.4.2 Actividades de gabinete.**

La primera etapa de trabajo de gabinete consistió en seleccionar el área de estudio, por lo que se convino en tomar como tal, al VL, con el firme propósito de tener una extensión superficial representativa de todos los pormenores que participan en la dinámica del flujo de agua subterránea.

Como siguiente actividad de gabinete, se hizo una compilación bibliográfica con el objetivo de hacer un exhaustivo análisis de la verdadera situación de conocimiento de las condiciones hidrogeológicas del valle, concluyéndose que los estudios hechos son más en número que la aportación global que se pudiera esperar de éstos, al menos, en lo

concerniente a la hidrogeología. La importancia que tuvo esta etapa de trabajo, fué poder planificar las actividades de campo que mejor se ajustaran a los propósitos y necesidades del estudio, tomando en consideración, las conclusiones y aportes de los trabajos realizados para este valle.

En esta última etapa de trabajo se pueden englobar las actividades de análisis, procesamiento e interpretación, de toda la información generada durante este período de trabajo. Posteriormente se elaboraron las correspondientes cartas, tablas, figuras, configuraciones y secciones, que se juzgaron convenientes para un mejor entendimiento del modelo que se propone. Finalmente se llegó a obtener el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero, con sus respectivas conclusiones y recomendaciones, expresadas por escrito en este trabajo de tesis.

## II GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO

### II.1 Localización y extensión del área de estudio

El área de estudio se ubica en el centro de la República Mexicana, ocupando la porción noroccidental del estado de Guanajuato, teniendo como límites geográficos aproximados los paralelos  $20^{\circ}54'$  y  $21^{\circ}12'$  de latitud norte y los meridianos  $101^{\circ}23'$  y  $101^{\circ}52'$  de longitud oeste (FIGURA II.1). Durante el presente trabajo de tesis, se presentarán planos con distintas coordenadas, según las necesidades y conveniencias, para una mejor explicación de lo que acontece en la zona de estudio y la relación con áreas adyacentes.

La extensión superficial del presente estudio es de aproximadamente  $1800 \text{ km}^2$ , que representados cartográficamente, abarcan parcialmente cuatro cartas editadas por la Dirección General de Geografía (D.G.G.), las cuales son: Hoja León (F14-C41), Hoja Nuevo Valle de Moreno (F14-C42), Hoja San Roque de Torres (F14-C51) y Hoja Silao (F14-C52), todas a escala 1:50,000.

La zona de estudio corresponde políticamente al municipio de León.

Los límites naturales que colindan con el área de estudio son: al noreste, el flanco suroeste de la Sierra de Guanajuato (SG), al noroeste la depresión de Lagos de Moreno, al sureste los valles de Silao y Romita y al suroeste el Valle del Río Turbio.



FIGURA II.1

## II.2 Vías de comunicación

En general se puede decir que la zona de estudio tiene buen sistema de comunicación (FIGURA 11.2).

La principal vía de acceso a la zona de estudio es la carretera federal número 45, que comunica a la ciudad de León con las ciudades de Querétaro y Aguascalientes. También se cuenta con la carretera estatal número 86, que comunica a la ciudad de León con los poblados San Francisco del Rincón y Manuel Doblado.

A partir de estas carreteras se desprenden una serie de caminos de terracería que facilitan la comunicación entre los poblados más importantes de la zona de estudio y como complemento a ésto, se tienen numerosas veredas que unen a diversos ranchos y caseríos.

En lo que respecta a vías férreas, el área de estudio se encuentra comunicada a través de la línea ferroviaria México-Ciudad Juárez.

El transporte por vía aérea se hace mediante el aeropuerto de San Carlos, cerca de la ciudad de León, el cual está incorporado al Sistema Aeroportuario Nacional.

Respecto a la comunicación telefónica, telegráfica y postal, la ciudad de León cuenta con estos servicios.

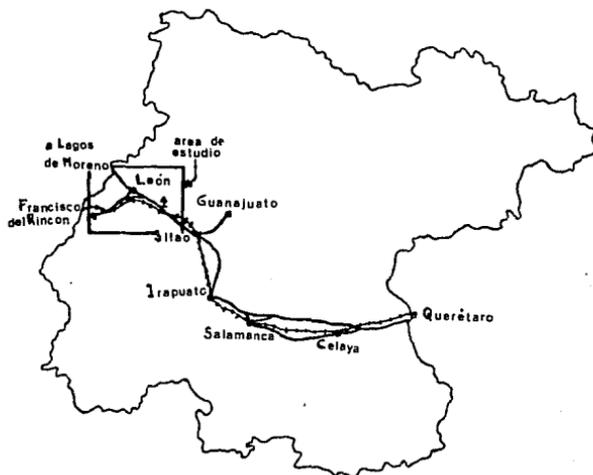


FIGURA 11.2

### II.3 Población, actividad económica y problemática ambiental

El municipio de León cuenta con una población aproximada de 1'900,000 habitantes, según datos estadísticos publicados en la carta urbana de la ciudad de León, Gto., elaborada por el Sr. O. Rodríguez F. (1990) Este municipio tiene como cabecera municipal a la ciudad del mismo nombre y es ahí, donde se desarrollan las principales actividades comerciales e industriales de la región, destacándose la industria del calzado.

El acelerado proceso de industrialización y la gestión inadecuada de los recursos naturales de una ciudad en desarrollo, como es la ciudad León, trae consigo el permanente deterioro del medio ambiente; un problema grave es la contaminación del agua subterránea debido a la mala o nula planeación de la localización de sitios para desechos industriales y de rellenos sanitarios, además, de un inexistente monitoreo eficaz que auxilie en la identificación urgente de focos de contaminación como prevención de alteraciones ecológicas.

### III FISIOGRAFIA

#### III.1 Provincia fisiográfica

Topográficamente el estado de Guanajuato no muestra una uniformidad debido a su gran diversidad de sistemas de topoformas, ejemplo de esto son las sierras, valles, lomeríos, mesetas y llanuras, formadas por rocas de origen ígneo, metamórfico y sedimentario, lo que además crea un paisaje accidentado que consecuentemente hace del estado un complejo mosaico de climas, suelos y vegetación local.

En el estado de Guanajuato se localizan parcialmente tres provincias fisiográficas: en el nororiente, la Sierra Madre Oriental, al norte, la Mesa del Centro y aproximadamente desde la zona media del estado y ocupando toda la parte sur, el Eje Neovolcánico (SPP, 1980), (FIGURA III.1).

Dentro del estado de Guanajuato, el área de interés se ubica en el noroccidente y suroccidente de las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico y Mesa del Centro, respectivamente (FIGURA III.1 Y TABLA III.1).

La provincia Eje Neovolcánico conforma una masa de rocas volcánicas acumuladas en innumerables y sucesivos episodios volcánicos que se iniciaron a mediados del Terciario continuando hasta el Reciente. Estas rocas están expuestas como grandes sierras volcánicas, coladas lávicas, depósitos de arena y cenizas dispersas en extensas llanuras.

En esta zona existen dos subprovincias de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico: el Bajío Guanajuatense, que ocupa la mayor parte del área y el Altos de Jalisco, que sólo ocupa la porción noroccidental. Los sistemas de topoformas Llanuras de aluviones profundos y Lomeríos asociados a mesetas, representan a la subprovincia Bajío Guanajuatense, donde la primera abarca gran parte del valle y la segunda ocupa una pequeña porción del sur del mismo. El sistema de topoformas Mesetas lávicas, que se localiza en el noroccidente del área en cuestión, es la representante de la subprovincia Altos de Jalisco (SPP, op. cit.), (TABLA III.1).

Por otro lado, en la provincia Mesa del Centro, se presenta la discontinuidad fisiográfica Valles paralelos del suroeste de la Sierra de Guanajuato, la que se caracteriza por la forma vertical convexa de sus valles; esta discontinuidad la representa el sistema de topoformas Sierra con valles paralelos, los cuales están separados entre sí por áreas planas

en sus partes altas (SPP, op. cit.), (FIGURA III.1 y TABLA III.1).

Las máximas altitudes que alcanzan algunos sistemas de topoformas mencionados anteriormente, es aproximadamente de 2800 metros sobre el nivel del mar (msnm), pero generalmente la altimetría predominante en el valle es de 1800 msnm.



FIGURA III.1

PROV. FISIOGRAFICA	SUBPROV. FISIOGRAFICA	SISTEMA DE TOPOFORMA
Eje Neovolcánico	Bajío guanajuatense	Llanura de aluviones profundos
		Lomeríos asociados a mesetas
	Altos de Jalisco	Mesetas lávicas
Mesa del Centro	Discontinuidad fisiográfica Valles paralelos del SW de la Sierra de Guanajuato	Sierras con valles paralelos

TABLA III.1

### III.2 Hidrografía

En el Valle de León (VL) se establecen parcialmente las subcuencas hidrológicas Río Turbio-Presa Palote y Río Guanajuato-Silao, que pertenecen a la cuenca hidrológica Río Lerma-Salamanca, de la región hidrológica no.12 Lerma-Chapala-Santiago, la que abarca gran parte del Estado de Guanajuato, situándose al sur del parteaguas continental y drenando sus aguas al Océano Pacífico (SRH, en SPP, op. cit.), (FIGURA III.2).

El principal río que drena en el área de estudio es el Río León o Río Los Gómez, el que se ha convertido en un colector público de aguas residuales de la ciudad de León. Este río 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. Los afluentes principales del Río Los Gómez son los arroyos Los Castillos y Hacienda de Arriba, que igualmente reciben afluentes que intermitentemente bajan de la sierra. Existen también numerosas escorrentias (arroyos San Juan de Otates, La Noria, La Joya, Los Sauces, La Tinaja, Grande, El Salto, por citar algunos) que descienden de la sierra de Guanajuato hasta llegar a las partes bajas del valle, donde se integran al sistema acuifero a través del material granular o son interceptados por el hombre para la construcción de canales de riego (v.gr. canal Los Naranjos).

La configuración regional de la red de avenamiento es heterogénea e intermitente. A grandes rasgos se puede decir que en la porción nororiental de la zona de estudio (Sierra de Guanajuato), coexisten patrones dendríticos, radiales, subparalelos y subdendríticos, asociados a las diferentes unidades litológicas. En lo que respecta a la porción occidental del área de estudio, el avenamiento es subdendrítico, subparalelo y radial, con menor densidad de corrientes comparativamente, que la SG.

Existen algunos manantiales de flujo local que descargan sus aguas cerca de los contactos litológicos del flanco suroccidental de la SG y otros más en el norte del poblado San Francisco del Rincón.

Existen numerosos vasos de almacenamiento y bordos con fines de uso agrícola que se encuentran distribuidos en toda el área, destacando las presas El Palote, Ciudad Aurora, La Primavera, La Gloria, El Barrial, San José, San Antonio, San Germán, Trinidad y Mastranzo, siendo la primera la de mayor volumen y extensión y la última, la principal colectora de los desechos industriales.

De las aguas residuales que son colectadas por los vasos de almacenamiento, parte de ellas son llevadas mediante canales de riego (v.gr. canal Santa Ana del Conde) al campo agrícola, utilizándolas en la irrigación de hortalizas.

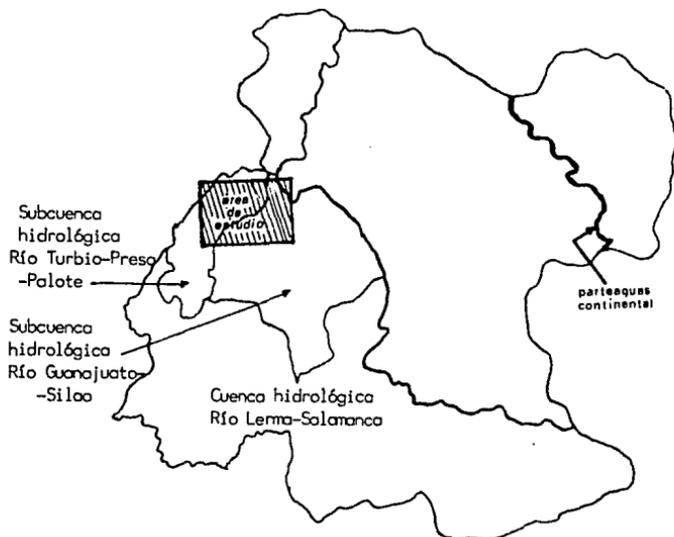


FIGURA III.2

### III.3 Clima

En la hidrogeología, el factor clima es muy importante, debido a que influye determinadamente en el volumen de agua susceptible a infiltrarse.

Con base en los datos obtenidos de la carta estatal de climas, escala 1:500,000 de la Síntesis Geográfica de Guanajuato, editada por la SPP (1980), se observa que la región del VL está caracterizada por tres tipos de clima (TABLA III.2):

a) Clima Semiseco semicálido o Seco estepario semicálido,  $Bs_{1hw}(w)$ . Este tipo de clima abarca toda la parte central del área y se caracteriza porque la evaporación excede a la precipitación.

La precipitación media anual oscila entre 600 y 700 mm, siendo su máxima incidencia durante el mes de agosto con un rango de 150 a 160 mm y su incidencia mínima en mayo con un índice menor de 10 mm.

La temperatura media anual es de  $19^{\circ}\text{C}$ , con un registro máximo de  $24^{\circ}\text{C}$  en el mes de mayo y un mínimo de  $15^{\circ}\text{C}$  en los meses de enero y diciembre.

b) Clima Semicálido subhúmedo (menor humedad),  $(A)C(w_0)(w)$ . Es el clima semicálido menos húmedo que se presenta en el estado de Guanajuato, situándose en la parte inferior de la zona de estudio y en las estribaciones topográficamente bajas del flanco suroccidental de la SG.

El rango de precipitación media anual es de 700 a 800 mm, siendo el mes de agosto el de máxima precipitación (160-170 mm) y el mes de febrero el de menor incidencia pluvial (menos de 5 mm).

En cuanto a temperatura, la media anual es de  $19^{\circ}\text{C}$ , registrándose la mayor temperatura de  $24^{\circ}\text{C}$  en el mes de mayo y la más baja de  $15^{\circ}\text{C}$  en enero.

c) Clima Templado subhúmedo (menor humedad),  $C(w_0)$ . En general, este clima es intermedio en temperatura (mesotérmico), variando el grado de humedad. Se ubica en las partes topográficamente más altas del área de estudio, o sea, el flanco suroccidental de la SG.

La precipitación media anual fluctúa entre 700 y 800 mm, con la mayor incidencia de lluvias en el mes de agosto (170-180 mm) y la menor ocurrencia en el mes de febrero (5 mm).

El registro de temperatura media anual es de  $17^{\circ}\text{C}$ , con una máxima de  $22^{\circ}\text{C}$  en el mes de mayo y una mínima de  $13^{\circ}\text{C}$  en el mes de enero.

CLIMA	PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm)	TEMPERATURA MEDIA ANUAL ( $^{\circ}\text{C}$ )	EVAPORACION MEDIA ANUAL (mm)
$Bs_1 hw(w)$	600-700	19	
$(A)C(w_0)(w)$	700-800	19	S I N
$C(w_0)$	700-800	17	I N F O R M A C I O N

TABLA III.2

#### III.4 Vegetación

El tipo de vegetación y su distribución en el área, dependerá del clima, de la topografía local y del tipo de suelo que se desarrolle en dicha región, por lo que se describirá según el sistema de topoformas (SPP, op. cit.), (TABLA III.3).

En este caso, para el sistema de topoformas Llanuras de aluviones profundos, la vegetación imperante es: mezquital, matorral subtropical, matorral crasicaule (nopalera), pastizal halófilo y pastizal inducido.

Para el sistema de topoformas Lomeríos asociados a mesetas, la vegetación es: matorral subtropical, mezquital y pastizal inducido.

En el sistema de topoformas Mesetas lávicas, el tipo de vegetación es: bosque de encino, matorral subtropical y pastizal inducido.

Por último, para el sistema de topoformas Sierra con valles paralelos, la vegetación que se observa es: matorral subtropical, pastizal inducido y bosque de encino.

A manera de conclusión de este apartado, se puede afirmar que los tipos de vegetación del valle no son buenos indicadores de delineación de zonas de recarga o descarga de algún sistema de flujo de agua subterránea, como ocurre con las freatofitas, las que son plantas indicadoras de zonas de descarga, como lo han hecho notar los trabajos importantes de Meinzer (1927) y Meyboom (1966, 1967).

SISTEMA DE TOPOFORMA	VEGETACION
Llanura de aluviones profundos	Mezquital, matorral subtropical, matorral crasicaule (nopalera), pastizal halófilo y pastizal inducido
Lomeríos asociados a mesetas	Matorral subtropical, mezquital y pastizal inducido
Mesetas lávicas	Bosque de encino, pastizal inducido y matorral subtropical
Sierras con valles paralelos	Matorral subtropical, pastizal inducido y bosque de encino

TABLA III.3

### III.5 Suelo

De manera general se puede decir que en el área de estudio se presentan tres tipos de suelos: unos abundantes, que son los Vertisoles pélicos asociados a Feozems háplicos, distribuidos en la subprovincia Bajío Guanajuatense; un segundo tipo de suelos que son los Planosoles mólicos asociados con Feosem háplico y Vertisoles pélicos con fase pedregosa y dúrica, que se presenta en la subprovincia Altos de Jalisco; por último,

asociación de Feozems háplicos y lúvicos, con litosoles (con fase litica), (SPP, op. cit.).

Lo importante y grave en todo esto, es el peligro de degradación del suelo del VL, debido al mal uso y manejo inadecuado del suelo y sobre todo a la acción irreflexiva del hombre con su medio ambiente. Este puede ser un caso similar al que ocurre en muchas ciudades de México, como es el caso de Salamanca, Gto., donde los principales fenómenos de degradación son el químico actual (sodicidad), química potencial (alcalinidad), por erosión (hidrica), física potencial (compactación) y por contaminación de la actividad industrial (Sommer y Hernández, 1987).

#### IV GEOMORFOLOGIA

No es nada raro percatarse que en trabajos de hidrogeología, a la geomorfología la denotan como una simple descripción de las formas terrestres y meros fenómenos aislados, lo que finalmente no aporta ningún interés satisfactorio de lo que sucede en la interrelación fenoménica de los distintos factores que involucran a esta disciplina, por tal hecho y considerando que la geomorfología es una ciencia que estudia los rasgos superficiales de la Tierra, su forma, naturaleza, origen, desarrollo y sus interrelaciones (Kovács et al., 1981), se sugiere necesario darle una aplicación práctica dentro del contexto de la fenomenología de los hechos, es decir, que participe dinámicamente, generando información útil para la solución de problemas hidrogeológicos, considerando sus alcances y limitaciones, a la vez que sus justificaciones.

Se han dado algunos intentos de hacer de la geomorfología una ciencia aplicativa en el contexto del agua subterránea, sin embargo, estas intenciones han sido hartamente aisladas, de alcance muy limitado y carentes de continuidad, pero asimismo han contribuido al desarrollo interdisciplinario de la geomorfología y la hidrogeología.

##### IV.1 Caracterización geomorfológica de las unidades litoestratigráficas y definición de unidades hidrogeomorfológicas

Siendo congruente con lo expresado con anterioridad, se obtuvieron parámetros morfográficos y morfométricos, mediante técnicas cartográficas que ya han sido descritas por algunos autores, pero considerando como premisa fundamental que el proceso de evaluación de los parámetros se debe hacer con base en las distintas unidades litológicas aflorantes, ya que el comportamiento del agua es diferente en cada una de ellas (Villanueva, 1988; Villanueva y Hernández, 1990) y permite definir su carácter hidrogeológico en zonas desérticas y semidesérticas (Villanueva y Hernández, op. cit.), además, reduce en gran medida la labor que representa dicha parametrización.

Los parámetros geomorfológicos son, sin duda, indicadores fehacientes de la gran relación que existe entre la infiltración y el escurrimiento del agua meteórica, por lo que se consideran de gran ayuda en la caracterización hidrogeológica de las unidades litológicas aflorantes, las que precisamente, se definirán como posibles zonas potenciales o no de

recarga.

El resultado del análisis de la parametrización geomorfológica y su confrontación con aspectos geológicos, climáticos, fisiográficos, hidrológicos, etc., demuestra que la zona de estudio puede ser integrada en tres unidades hidrogeomorfológicas bien definidas y que coinciden con las subprovincias fisiográficas previamente definidas en el capítulo III. La importancia de estas unidades hidrogeomorfológicas estriba en el comportamiento particular del agua en cada una de ellas, entendiendo de antemano, que el término hidrogeomorfológico, se refiere a la parte de la geomorfología que trata los efectos de la circulación del agua natural sobre el relieve y de las condiciones morfológicas por donde circula el agua superficial y subterránea (Castany et Margat, 1977).

Es así, como a continuación se presenta un breve análisis descriptivo e interpretativo de las tres unidades hidrogeomorfológicas en que se ha dividido esta área de trabajo y al final, una tabla con el resumen de la caracterización geomorfológica de cada una de las unidades litoestratigráficas (TABLA IV.1), ésto con el fin de no perder la relación que se establece entre la litología y los factores geomorfológicos dominantes:

a) Unidad Sierra de Guanajuato. Es la zona montañosa más prominente del área de estudio y la constituyen, al menos superficialmente, las unidades litoestratigráficas: Piroxenita San Juan de Otates, Complejo Sierra de Guanajuato, Conjunto Plutónico La Luz, Granito Comanja, Conglomerado Guanajuato, Ignimbrita Cuatralba, Basalto El Cubilete y Gabro Arperos. La unidad en conjunto es muy abrupta y favorable para que en condiciones de gran precipitación, el agua forme torrentes violentos que disectan densamente el relieve, lo que implica un alto índice de escurrimiento y una infiltración restringida. Prueba de lo anterior es el hecho de que en la desembocadura de los cauces principales hacia la planicie, se encuentren presas o bordos de almacenamiento, captadores de los escurrimientos generados en esta unidad hidrogeomorfológica. Sin embargo, es muy importante denotar que gran cantidad del volumen de agua precipitada que se manifiesta como escurrimiento o infiltración, finalmente se integra al sistema de flujo del agua subterránea como lo demuestran los parámetros geomorfológicos y las observaciones de campo. Por otro lado, es obvia la presencia de manantiales locales próximos a los contactos

litológicos de la Ignimbrita Cuatralba o Basalto El Cubilete, con unidades subyacentes de baja o nula permeabilidad, lo que demuestra la gran capacidad de infiltración que desarrollan estas unidades.

b) Unidad Altos de Jalisco. Unidad representada por el conjunto de lomas y mesetas de mediana elevación con relación a la unidad anterior y se distribuye en toda la porción occidental del área y en las partes topográficamente altas del sur del valle. Agrupa a rocas volcánicas del Terciario pertenecientes a las unidades litoestratigráficas aflorantes: Andesita Bernalejo, Ignimbrita Cuatralba, Basalto Dos Aguas y Basalto El Cubilete. La pendiente es muy suave en la cima de estas mesetas y fuerte en las laderas de las mismas, mientras que los valores de los demás parámetros son relativamente bajos, lo que aunado a el fracturamiento que la afecta, le confieren un gran poder de infiltración y, por lo tanto, un escurrimiento sin logros de gran densidad de denudación del relieve. Como se pudo observar en el campo y en el análisis geomorfológico, esta unidad hidrogeomorfológica está principalmente condicionada por fracturas y fallas, lo que significa que gran parte del volumen de agua precipitada llega a formar parte del sistema hidrológico subterráneo.

c) Unidad Zona del Bajío. Unidad constituida por depósitos de material medianamente consolidado (Terciario granular indiferenciado) y sin consolidar (Aluvión), que afloran principalmente en las partes topográficas más bajas del valle. Estas unidades son producto de la actual acción de los factores exógenos niveladores del relieve. Se distinguen, según la litología, dos áreas bien diferenciadas: una, franja de transición (pie de monte) y la otra, planicie acumulativa de nivel de base.

-Fanja de transición (pie de monte). Es una faja transitoria entre las estribaciones montañosas (sierras y mesetas) y la planicie acumulativa de nivel de base del VL. Esta zona se caracteriza por ser vía de infiltración de los escurrimientos que alcanzan esta unidad litoestratigráfica. El drenaje es de tipo paralelo, con máximo orden de corrientes de 2 y un bajo rango de densidad de disección del relieve. Su origen se debe al proceso erosivo-acumulativo que ejercen algunos factores externos, durante cierto lapso de tiempo.

- Planicie acumulativa de nivel de base. Es la de mayor extensión superficial dentro del área de estudio y la que contiene el mayor número de aprovechamientos de agua subterránea y áreas de cultivo, por lo tanto es la que capta el mayor volumen de agua de riego que proviene del acuífero y de las aguas negras que se distribuyen a través de los canales de conducción. No existe una red de drenaje natural importante, excepto el Río Los Gómez, por lo que se considera una zona prácticamente sin drenaje. Por otro lado, el terreno es casi horizontal, por lo que la pendiente tiende a 0 grados.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS										
UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	CLAVE	LITOLÓGICA	ÁREA DE EXPOSICIÓN (km <sup>2</sup> )	RANGO DE ELEVACIÓN (mnm)	TIPO DE DRENAJE	MÁXIMO ORDEN DE CORRIENTES	PENDIENTE (grados)	DENSIDAD DE LA DIRECCIÓN (km km <sup>-2</sup> )	PRINCIPALES FACTORES QUE CONDICIONAN EL DRENAJE	UNIDAD HIDROGEOGRÁFICA A LA QUE PERTENECE
Planicie ALUVIÓN Pie de monte	Gal	Material aluvial	949.1	1750-1900	Prácticamente sin drenaje	0 a 1	<1	0-1	Litología	Zona del Bajío
					1750-2000	Paralelo	2		0-3	
BASALTO EL CUMILETE	Ocu	Basalto y andesita	118.2	1750-2350	Radial	3	6-15 y 3-6	2	Fracturas	Sierra de Guanajuato y Altos de Jalisco
GABRO ARPEROS	Opa	Gabro	3.0	2300-2390	Subdenudítico y subparalelo	4	6-15	6-7	Litología Fracturas	Sierra de Guanajuato
TERCIARIO GRANULAR INDIFERENCIADO	Tgl	cs, m', lu, la y cz	264.4	1750-1850	subdenudítico	3	0-3 y 3-6	2-3	Litología	Zona del Bajío
BASALTO DOS AGUAS	Tbd	Basalto	57.3	1900-2250	Radial y paralelo	4	6-15 y 15-30	4	Litología Fracturas	Altos de Jalisco
IGLUBRITA	Mesa	Ignimbritas y tobas	409.2	1750-2850	Subparalelo a paralelo (anular y radial)	4	0-3 y 3-6 6-30 y >30	2-3 y 4-5	Fracturas Fallas	Altos de Jalisco
CUATRALBA	Laderas	Ticu							Litología	Altos de Jalisco
ANDESITA BERNALEJO	Tab	Andesita	9.5	1900-2000	centripeta y subparalelo	2 a 3	3-6	3-4	?	Altos de Jalisco
CONGLOMERADO GUANAJUATO	Tcp	Conglomerado	26.5	1900-2150	subdenudítico a denudítico	4	15-30	7-9	Litología (fracturas)	Sierra de Guanajuato
GRANITO COMAJA	Tgco	Granito	40.6	2000-2700	denudítico	5	6-15 y 15-30	8-9	Litología Fracturas	Sierra de Guanajuato
COMPLEJO PLUTÓNICO LA LUZ	Kpl	Dioritas y tonalitas	14.5	1900-2400	subdenudítico	3 a 4	6-15 y 15-30	8	Litología Fracturas fallas	Sierra de Guanajuato
COMPLEJO VOLCÁNICO-PLUTÓNICO SIERRA DE GUANAJUATO	Kcsb	Seds. clast. y carbonatados y rocas volc. de origen marino o/bajo metamorf.	101.6	2000-2800	subdenudítico y subparalelo	4 a 5	6-15 y 15-30	7-10	Litología Fracturas fallas	Sierra de Guanajuato
PIROXENITA SAN JUAN DE OTATES	Jps	Rocas ultrabásicas	12.5	2000-2300	Subdenudítico	4	15-30 y >30	6-7	Litología Fracturas fallas	Sierra de Guanajuato

TABLA IV. 1

#### IV.2 Conclusiones

Se concluye que con la aplicación de la geomorfología, se obtuvieron datos que ayudaron a definir a la Sierra de Guanajuato como una región de baja permeabilidad o prácticamente nula, donde se generan escurrimientos importantes que llegan a infiltrarse en el pie del frente montañoso que limita con la zona del bajío, excepto cuando el agua circula a través de zonas donde la Ignimbrita Cuatralba tiene conexión hidráulica subterránea con la zona del Bajío. Por otra parte, la unidad hidrogeomorfológica Los Altos de Jalisco, se comporta como una zona con fuerte potencial de infiltración, al igual que la unidad Zona del Bajío

Como se pudo apreciar, mediante el análisis geomorfológico a partir de las unidades litológicas aflorantes, se dedujo cualitativamente el comportamiento del agua superficial y se definieron zonas potenciales de recarga, lo que por otra parte, apoya a la definición de modelos conceptuales de sistemas acuíferos (Villanueva y Hernández, op. cit.).

Para finalizar este capítulo, es importante señalar que en las primeras etapas de exploración hidrogeológica, es necesario recurrir a estudios geomorfológicos sin el uso extensivo de otros métodos (Kovács et al., op. cit.), lo que facilita tomar decisiones que mejor justifiquen las subsecuentes etapas de los estudios hidrogeológicos.

## V GEOLOGIA

Los estudios geológicos de la Sierra de Guanajuato (SG), han sido realizados, en principio, con un fin meramente económico-minero o minero-metalúrgico, generándose información de una geología muy local de algunos distritos mineros, como es el caso de Guanajuato, sobreviniendo por tal circunstancia, la confusión entre lo que es la geología del distrito minero de Guanajuato y lo que es la geología de la sierra del mismo nombre. Por tal razón, los trabajos regionales fueron escasos y sin un control estratigráfico y fué hasta hace muy poco tiempo, cuando el Instituto de Geología de la UNAM puso relativo orden estratigráfico con sus recientes investigaciones geológicas de la región. Es por este motivo, que para el estudio y verificación geológica del área se tomaron como base, principalmente, los trabajos publicados por dicha institución.

### V.1 Marco geológico regional

Grosso modo, se puede afirmar que la SG y sus alrededores, conforman un conjunto de rocas de diversa litología y edad, agrupadas en dos unidades litoestratigráficas bien diferenciadas y separadas por un intrusivo granítico terciario.

La unidad litoestratigráfica inferior, correspondiente al Mesozoico, está representada por rocas cristalinas, volcánicas y sedimentarias marinas, con un intenso proceso de deformación de carácter compresivo y un incipiente metamorfismo regional.

La unidad litoestratigráfica superior, asignada al Cenozoico, la constituyen: una secuencia sedimentaria clástica continental, una unidad volcanoclástica de composición ácida a intermedia, un evento de basaltos pliocuaternarios y finalmente, depósitos de aluvión.

Estratigráficamente, entre las rocas mesozoicas y cenozoicas, se halla un intrusivo del Paleoceno de composición ácida, con dimensiones batolíticas, emplazado con la misma orientación preferencial que la SG.

De los rasgos estructurales que se manifiestan en esta zona, se pueden distinguir dos estilos de deformación, uno mesozoico, determinado por esfuerzos tectónicos compresivos y otro cenozoico, con eventos tectónicos de distensión, causantes -estos últimos- de los diversos pilares y fosas tectónicas, que caracterizan a la región del bajo.

Por ser los esfuerzos distensivos los causantes de pilares y fosas tectónicas, que finalmente pueden conducir a la formación de cuencas hidrológicas y a sistemas acuíferos, es importante mencionar que existen tres sistemas característicos de fallas normales con direcciones preferenciales NW-SE, NE-SW y N-S, quedando en la incertidumbre y en la discusión sus edades relativas.

## V.2 Estratigrafía

En este apartado se describen las doce unidades litoestratigráficas que se cartografiaron durante el recorrido de verificación geológica, con sus respectivos nombres informales, correspondiendo las primeras cuatro unidades al eratema Mesozoico y las restantes nueve al Cenozoico. Al final de la estratigrafía se presentan la tabla de correlación estratigráfica y carta geológica del área (TABLA V.1 y FIGURA V.1). Las secciones geológicas que complementan a la carta geológica se presentan en el subcapítulo cinco de este mismo capítulo.

### V.2.1 Eratema Mesozoico

#### SISTEMA JURASICO

##### Piroxenita San Juan de Otates (Jpsj).

Nombre asignado por Servais et al. (1982) al complejo ultramáfico que aflora en la SG, a lo largo del arroyo San Juan de Otates, al noreste de León, con una extensión superficial aproximada de 12.5 km<sup>2</sup>. Estos autores fueron los primeros en interpretar el origen de estas rocas, como un complejo ofiolítico y una discutible afinidad tetisiana.

La unidad consiste de rocas masivas cristalinas de color verde oscuro en roca sana y verde claro en roca alterada (serpentinizada). La mineralogía esencial está representada por augita y olivino, predominando la primera; como minerales secundarios o de alteración, antigorita, clorita, talco y minerales opacos; y la actinolita como mineral formado por incipiente metamorfismo regional facies esquistos verdes (Martínez, 1987).

Este complejo ultramáfico sobreyace tectónicamente a rocas metavolcánicas de la unidad Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, como consecuencia de un cabalgamiento de naturaleza ofiolítica y está cubierta en su extremo norte por productos volcánicos terciarios. En ocasiones, la piroxenita es cortada por diques de diversa composición de la

unidad Conjunto Plutónico La Luz.

Para esta unidad no se cuentan con datos radiométricos que permitan asignarle una edad absoluta. Servais et al. (op. cit.), le otorgan una edad Jurásico tardío y aseveran que este complejo ha sido transportado durante las fases tectónicas del Mesozoico tardío (?), o tal vez, particularizando aún más, durante el Turoniano (Servais et al., 1986); por otro lado, Quintero (1989) le infiere una edad Triásico tardío a Jurásico temprano a la Ofiolita Barbosa, siendo ésta, una unidad equivalente litológicamente y con el mismo origen probable que la Piroxenita San Juan de Otates, aunque abre la posibilidad de una edad Jurásico tardío al interpretar su origen para un ambiente de cuenca de tras arco; finalmente, Martínez (op. cit.) le asigna una edad tentativa del Jurásico tardío. Para los fines de este trabajo, la edad puede considerarse un tanto de segundo orden, debido a que no cambian el panorama y propósitos del estudio hidrogeológico, pero se estima que sea del Jurásico tardío, considerando sus relaciones estratigráficas.

#### SISTEMA CRETACICO

##### Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guana juato (Kcsg).

Nombre dado informalmente por Martínez (op. cit.) a un conjunto diverso de facies sedimentarias y volcánicas marinas, que constituyen junto con la Piroxenita San Juan de Otates, el basamento de la SG. 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 km.<sup>2</sup>

Esta unidad se ha dividido en dos componentes que presentan notables diferencias litológicas (Martínez, op. cit.). A continuación las características de cada una de ellas:

-Componente sedimentario. Incluye calizas y lutitas en estratos delgados, abundantes areniscas de color verde en estratificación gradada, presentando fragmentos líticos de origen pélico, menor proporción de fragmentos igneos y mucho menos de caliza y pedernal, ocasionalmente se observan bancos de conglomerados de color verde con clastos redondeados a bien redondeados de diverso origen.

-Componente volcánico. Se caracteriza por la presencia de lavas de composición basáltica, andesítica y dacítica, en estructuras masivas o almohadilladas, con niveles de brechas, tobas y detriticos de la misma composición, generalmente en tonos verdosos. Mineralógicamente estas rocas presentan plagioclasa, clorita, epidota, 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.

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

La relación estratigráfica en la base de la unidad se desconoce y su cima está cubierta por productos volcanoclásticos continentales del Cenozoico.

Con base en los estudios de radiolarios fósiles, Dávila y Martínez (1987), le asignan una edad Valanginiano-Turoniano; por otra parte, Corona (1988), también sobre bases paleontológicas, difiere en la edad, proponiendo una edad que corresponde al Titoniano-Valanginiano. En este trabajo, se considera como válida la edad propuesta por Corona (op. cit.), puesto que abarca un menor rango de tiempo y no se traslapa con la unidad Caliza La Perlita, de edad bien determinada (Albiano) y que se omite en esta estratigrafía, por no aflorar en el área de estudio.

Esta unidad es correlacionable con la Formación Esperanza y con la Formación La Luz del distrito minero de Guanajuato, considerándose a la primera como la unidad basal (componente sedimentario) y la segunda como la unidad suprayacente (componente volcánico).

#### Conjunto Plutónico La Luz (Kcpl).

Con este nombre se señalan los diversos afloramientos expuestos al norte del poblado de Duarte y que en conjunto totalizan 14.5 km<sup>2</sup>. Estos afloramientos son rocas cristalinas dioríticas, tonalíticas, graníticas y excepcionalmente gabroicas, las cuales se encuentran cortadas por numerosos diques doleríticos y basálticos, algunos caolinizados y oxidados.

La mineralogía 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. Por otra parte, a la tonalita la conforman 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 presentan dichas rocas.

Sobreyace tectónicamente a la facies volcanosedimentaria de la unidad anterior.

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

## V.2.2 Eratema Cenozoico

### SISTEMA TERCIARIO

#### Granito Comanja (Tgco).

Con este término utilizado por Quintero (1986), se considera a un 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, Jal., y en lo que se refiere a este trabajo, sus afloramientos quedan localizados al nororiente de la zona de estudio, en poblados como Agua Zarca, Rincón Grande, Rincón Verde, Los Alisos, Piedra del Coche y San José de Otates. La extensión superficial alcanzada dentro del presente estudio es de aproximadamente 34 km.<sup>2</sup>

El Granito Comanja (Granito Arperos, como lo denominó por primera vez González, 1959) es una roca granítica sin deformación importante, pero que presenta una aureola de metamorfismo de contacto en sus límites con la roca encajonante.

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

Esta unidad marca el inicio de una paleogeografía continental en la SG (Martínez, op. cit.).

Esta unidad se encuentra en discordancia, con todas las unidades que cortó, durante su intrusión.

La edad absoluta obtenida para esta unidad, es de  $69 \pm 1.2$  Ma (Taylor, 1971; en Gross, 1975), pero dataciones radiométricas más recientes realizadas por Mújica y Albarrán (1983), han llegado a estimar una edad de  $54 \pm 4$  Ma, que corresponde al Eoceno temprano.

### Conglomerado Guanajuato (Tcg).

Nombre asignado por Wandke y Martínez en 1928 (en Quintero, 1989), a una secuencia clástica continental de carácter conglomerático del distrito minero de Guanajuato.

A los afloramientos de conglomerado dentro de la zona (flanco suroccidental de la SG), Martínez (1987) los denomina informalmente Conglomerado Duarte, pero en esta tesis se utiliza el nombre de Conglomerado Guanajuato, por considerarlo más apropiado, además de evitar la proliferación de nombres de formaciones, que a fin de cuenta, sólo causa confusión y desconcierto en este orden de conceptos.

La extensión superficial es de aproximadamente 26.5 km.<sup>2</sup>

Se trata de un conglomerado polimíctico, bien consolidado, en estratos gruesos, generalmente inclinados, de color rojo y tonalidades verdosas, constituido de clastos de diverso tamaño y origen, empacados en una matriz arenosa, cementada por óxidos de hierro y/o carbonatos; ocasionalmente con horizontes de areniscas, limolitas y lutitas.

El Conglomerado Guanajuato cubre discordantemente al conjunto basal anterior y su contacto superior está en discordancia angular con la Ignimbrita Cuatralba.

Con base en las relaciones estratigráficas y en evidencias paleontológicas reportadas por Ferrusquía (1987), para la parte basal de esta unidad, en el distrito minero de Guanajuato, se puede decir que el depósito ocurrió durante el Eoceno medio-Eoceno tardío.

Es importante mencionar que esta unidad se presenta con una baja porosidad y permeabilidad en el distrito minero de Guanajuato (Vassallo, 1986) y Trujillo (1987), coincide con estas observaciones para la zona de La Muralla, al sur de León; estas propiedades quedaron corroboradas durante la verificación geológica de campo de esta tesis, para los afloramientos que se localizan dentro de esta área de estudio.

### Andesita Bernalejo (Tab).

Denominada así por Quintero (1986) y refiriéndose a el afloramiento andesítico localizado en el poblado de Bernalejo. En este trabajo, la unidad se reduce a los afloramientos que se localizan al poniente del área de estudio, en lugares como: La Joya, La Reserva y norte de San Francisco del Rincón. Estos sitios, son pequeños afloramientos que han quedado al

descubierto por erosión o fallamiento. La distribución superficial aproximada es de 9.5 km.<sup>2</sup>

Roca altamente fracturada y alterada, de color gris oscuro y tonalidades violáceas, muy resistente a los procesos erosivos, con una textura que varía de microcristalina a porfirítica, donde los fenocristales principalmente son de abundante plagioclasa alterada. Excepcionalmente, se presentan vesículas y fracturas, algunas de ellas, rellenas de calcita.

El contacto inferior de esta unidad no se observa, debido a que los afloramientos son una pequeña "ventana" entre la Ignimbrita Cuatralba, consecuencia de los procesos erosivo (afloramiento La Joya) y fallamiento (afloramientos La Reserva y norte de San Francisco del Rincón) de esta última unidad; sin embargo, Quintero (1989), observó una discordancia con el Granito Comanja, en su área de estudio. El contacto superior esta en 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.

La edad tentativa que se sugiere para esta unidad es Oligoceno temprano, basándose en su posición estratigráfica y considerándo válidas las edades del Conglomerado Guanajuato y de la Ignimbrita Cuatralba, además de ser correlacionable con la Andesita El Cedro del distrito minero de Guanajuato, que tiene una edad absoluta correspondiente al Oligoceno (Martínez, 1989 ).

#### Ignimbrita Cuatralba (Ticu).

Se denomina Ignimbrita Cuatralba (Quintero, 1986), a todo el material volcánico de naturaleza piroclástica que conforma a las numerosas mesetas de la SG. Esta unidad es la que presenta los mayores afloramientos, después del material aluvial en toda la zona de estudio, siendo aproximadamente 368 km.<sup>2</sup> Hacia la porción noroccidental de la ciudad de León puede reconocerse la unidad ignimbritica separada por productos volcánicos de la unidad Basalto Dos Aguas. Para efectos prácticos de descripción, la unidad se ha dividido en dos miembros informales, muy fáciles de diferenciar en el campo:

-Miembro inferior. Es una toba masiva, de composición félsica, con un color que varía de café claro a crema, poco consolidada, compuesta principalmente de cenizas, con escasos fragmentos de líticos y pómez sin

colapsar.

-Miembro superior. Está representado por una ignimbrita riolítica bien consolidada de espesor variable y textura porfirítica, con abundantes fenocristales de cuarzo, sanidino y escasas plagioclasas, inmersos en una matriz muy fina (vítrea?). Es característica de esta unidad, las estructuras fluidal, vesicular y de flama (*fiamme*), también se observa el desarrollo de diaclasas columnares.

Es importante mencionar que el miembro inferior no siempre se detecta, tal vez, por su débil resistencia a la erosión; en cambio, el miembro superior, siempre está presente, cada vez que aflora esta unidad. Es difícil estimar el espesor de esta unidad, debido a su variación en el tiempo, a la erosión y porque no siempre está presente el miembro inferior.

La Ignimbrita Cuatralba descansa en discordancia sobre el Conglomerado Guanajuato en el flanco sur de la SG; por otro lado, en el SW del VL, el miembro superior descansa en discordancia sobre la Andesita Bernalejo, siendo este contacto, a través de un vitrófido de 3 m de espesor. Este vitrófido también separa a los componentes de esta unidad, en el occidente del valle. Asimismo, esta unidad, subyace en discordancia a las unidades Terciario Granular Indiferenciado y Basalto Cubilete.

Cronológicamente la unidad se ubica en el Oligoceno, según relaciones estratigráficas, y que es correlacionable con el Supergrupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (34 a 27 Ma), propuesto por Mc Dowell y Clabaugh (1981). Una evidencia estructural que ayuda a sustentar la edad relativa de esta unidad, es la Falla del Bajío, que afecta a dicha unidad y que pertenece a la Veta Madre del distrito minero de Guanajuato, la que presenta una mineralización formada hace  $29 \pm 1$  Ma (Gross, 1975), por consiguiente, la falla y la Ignimbrita Cuatralba, deben ser más antiguas; pero siempre y cuando, este fallamiento del área del distrito minero de Guanajuato, fuese contemporáneo al fallamiento cercano al área del VL.

#### Basalto Dos Aguas (Tbda).

Nombre asignado por Quintero (1986) a los derrames lávicos esparcidos por una estructura volcánica al noroccidente de la ciudad de León, ocupando una superficie aproximada de  $42 \text{ km}^2$ .

La unidad Basalto Dos Aguas la conforma un sólo afloramiento extenso y continuo de basalto de olivino, color gris oscuro, textura

microcristalina, asociado con productos piroclásticos de la misma composición, generados a partir del volcán Cerro Dos Aguas. Estos derrames se encuentran interestratificados con la Ignimbrita Cuatralba, por lo que se le asigna una edad tentativa del Oligoceno, considerándolo, además, como un vulcanismo bimodal, típico de una tectónica distensiva.

#### Terciario Granular Indiferenciado (Tgi).

Se propone el nombre informal de Terciario granular indiferenciado a todo el material sedimentario continental, excepto el aluvión, que se encuentra rellenando la depresión del bajo y que aflora en forma de lomeríos redondeados, en el suroccidente del área de estudio, con una extensión superficial de 275 km.<sup>2</sup> dentro del área de estudio.

Esta unidad se constituye de conglomerados, areniscas, limolitas, lutitas y calizas. A continuación una breve descripción de éstas:

-Conglomerados. Son estos polimícticos, de forma masiva y color rojo con clastos subredondeados a redondeados de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, pobremente clasificados, grado de consolidación variable, ocasionalmente cementados con carbonato de calcio.

-Areniscas. Son de colores claros y se encuentran interestratificadas con limolitas en alternancia irregular, en estratos delgados a medianos y grado de compactación variable.

-Limolitas. Son de tonos claros, variando de crema a amarillo y encontrándose interestratificadas con las areniscas, los estratos se caracterizan por ser delgados y de compactación variable.

-Lutitas. Se presentan en tonos claros, con colores que varían de verde a amarillo; son fisiles o compactas, en estratos delgados.

-Calizas. Varían de microcristalinas a arenosas o arcillosas, con intraclastos subredondeados de composición diversa; son de color crema a café claro y presenta ocasionalmente nódulos y lentes de sílice (?). Algunos de los horizontes tienden a ser preponderantemente margas.

Se desconocen los espesores de estos componentes litológicos, asimismo, las relaciones espaciales que guardan entre sí, tanto vertical como lateralmente.

Sobreyace a la Ignimbrita Cuatralba discordantemente y se encuentra en contacto por falla normal con la Andesita Bernalejo. Subyace concordantemente al Basalto El Cubilete.

La edad asignada a esta unidad, es Mioceno-Pleistoceno, según relaciones estratigráficas, o sea, posterior al primer sistema de fallamiento que dislocó a la Ignimbrita Cuatralba.

#### SISTEMA CUATERNARIO

##### Gabro Arperos (Qgar).

Denominación dada por Martínez (1987), a una roca hipabisal que aflora en los alrededores del poblado de Arperos y en las cercanías del poblado Nuevo Valle de Moreno, con una extensión de aproximadamente 3 km<sup>2</sup>. Se trata de un gabro de color café oscuro, de textura holocristalina, con minerales de labradorita, piroxenos, olivino y minerales opacos (Martínez, 1989).

Es probable que esta unidad se relacione genéticamente con la unidad Basalto El Cubilete, considerando a esta última, el elemento extrusivo perteneciente al Gabro Arperos (Cervantes, 1990).

Esta unidad se considera del Cuaternario, según las relaciones estratigráficas que guarda con las rocas encajonantes (Martínez, op. cit.).

##### Basalto El Cubilete (Qbcu).

Denominación hecha informalmente por Martínez (1987) para los basaltos y andesitas que afloran a lo largo de SG y que en conjunto con los afloramientos de basaltos y andesitas del sur del área, suman aproximadamente 130 km<sup>2</sup>. En lo referente a los afloramientos expuestos en el área del presente estudio, estos son: Cerro Gordo, Mesa El Bajío, Mesa de California, en el poblado El Mogote, Cerro Prieto, Cerro El Timbal, Mesa Las Palomas, Mesa El Zacate y otros más.

Como se mencionó anteriormente, se trata de basaltos de olivino y andesitas de augita y representan las últimas manifestaciones volcánicas de la región.

Esta unidad algunas veces se encuentra en discordancia angular, siendo un ejemplo el contacto con el Complejo Sierra de Guanajuato y en otros casos, en forma concordante, como se observa en el Cerro Gordo, al noroeste de la ciudad de León (Quintero, op. cit.).

Para la edad de esta unidad, Quintero (op. cit.) propone una edad post-pliocénica y Martínez (1989a) la corrobora diciendo que el basalto El Cubilete es Cuaternario.

Aluvi6n (Qal).

En esta 6ltima unidad se agrupan todos los dep6sitos continentales cl6sticos no consolidados (gravas, arenas., limos, arcillas y suelo residual) que afloran en el pie de monte, planicie del valle, cima de algunas mesetas l6vicas y a la vera de los r6os y arroyos que bajan de las distintas elevaciones monta6osas, como producto final temporal del actual r6gimen denudatorio. En conjunto alcanzan una extensi6n superficial de aproximadamente 960 km<sup>2</sup>, siendo la de mayor extensi6n superficial dentro del 6rea. Se considera del Holoceno por ser el 6ltimo evento que se produjo y que actualmente contin6a.

TABLA DE CORRELACION ESTRATIGRAFICA

ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD	AREA DE ESTUDIO	CUENCA DE MEXICO (1)	HIDALGO MERIDIONAL (2,3,4)	DURANGO-JAZATLAN (5)		
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		Aluvi6n	Aluvi6n	R. Volc. Altiplano			
		PLEISTOCENO							
	TERCIARIO	NEOGENO	PLIOCENO		Terciario Granular Indiferenciado	Dep6s. Volc. Pachuca			
			MIOCENO						
		PALEOGENO	OLIGOCENO		IGNIMBRIS DE SAN AGUSTIN TAQUILA	R. Volc. P. Tlalzapala		Super Grupo Volc. Superior	
			EOCENO		ANDESITA BERNALEJUEGA, GUANAJUATO	Grupo Balsas	Grupo El Morro	Super Grupo Volc. Inferior	
			CRETACICO	Tard6o	Mastizamiento		Granito Colotepec		
					Sanantoniano		Fm. Mexcala	Fm. Mezcala	
					Albiano		Fm. Morelos	Fm. El Doctor	
					Barremiano		Fm. Cuicatlan	Fm. Santuario	
MESOZOICO	JURASICO	Tard6o	COMPLEJO PLUTONICO TALLIZ						
			OXFORDIANO		P.x.S. de GATE				
			LIPTONIANO						
			KIMERIDGIANO						
			TRIASSICO						
			PERMIANO						
			TRIASSICO						
			PERMIANO						
			TRIASSICO						
			PERMIANO						

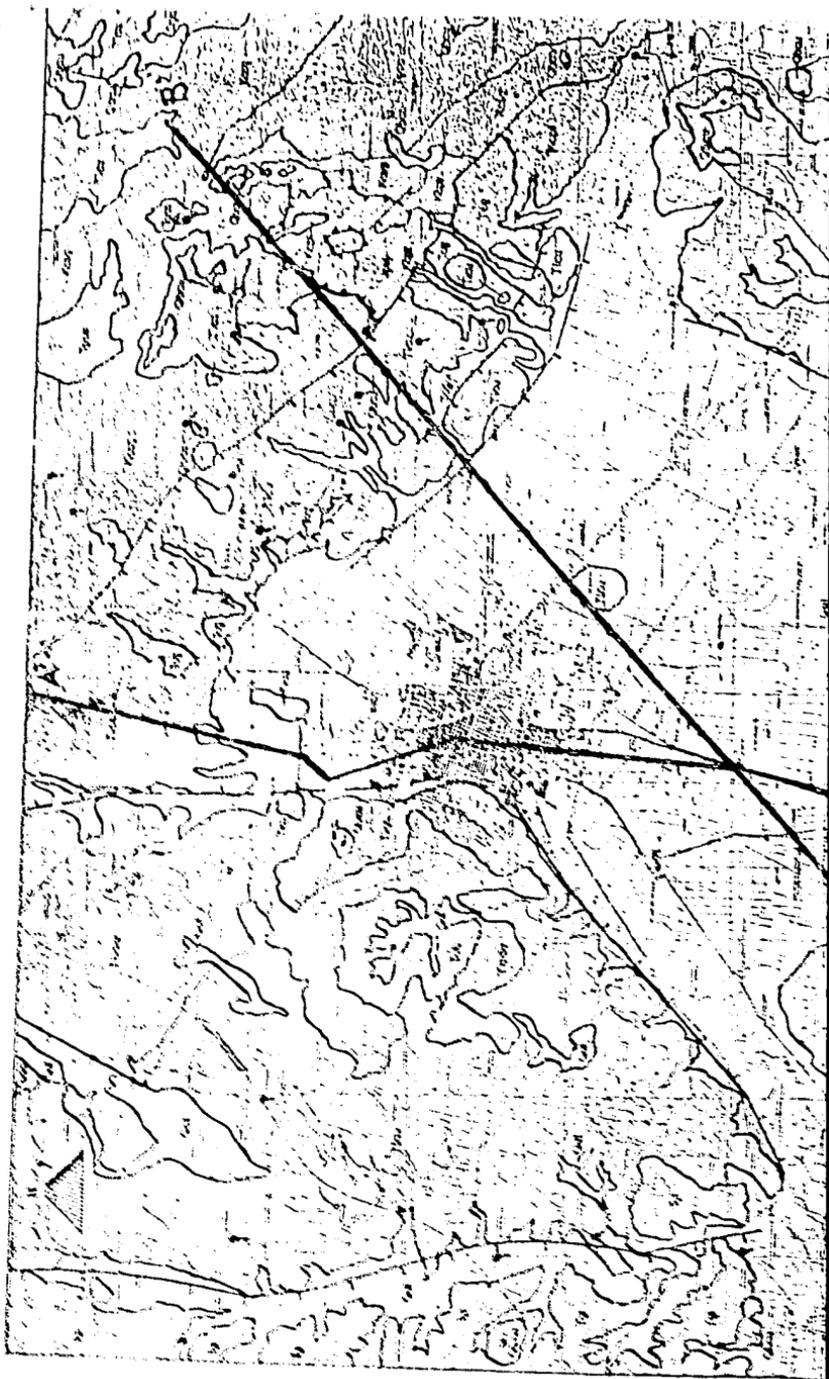
(Seg6n la escala de la GSA, 1983).

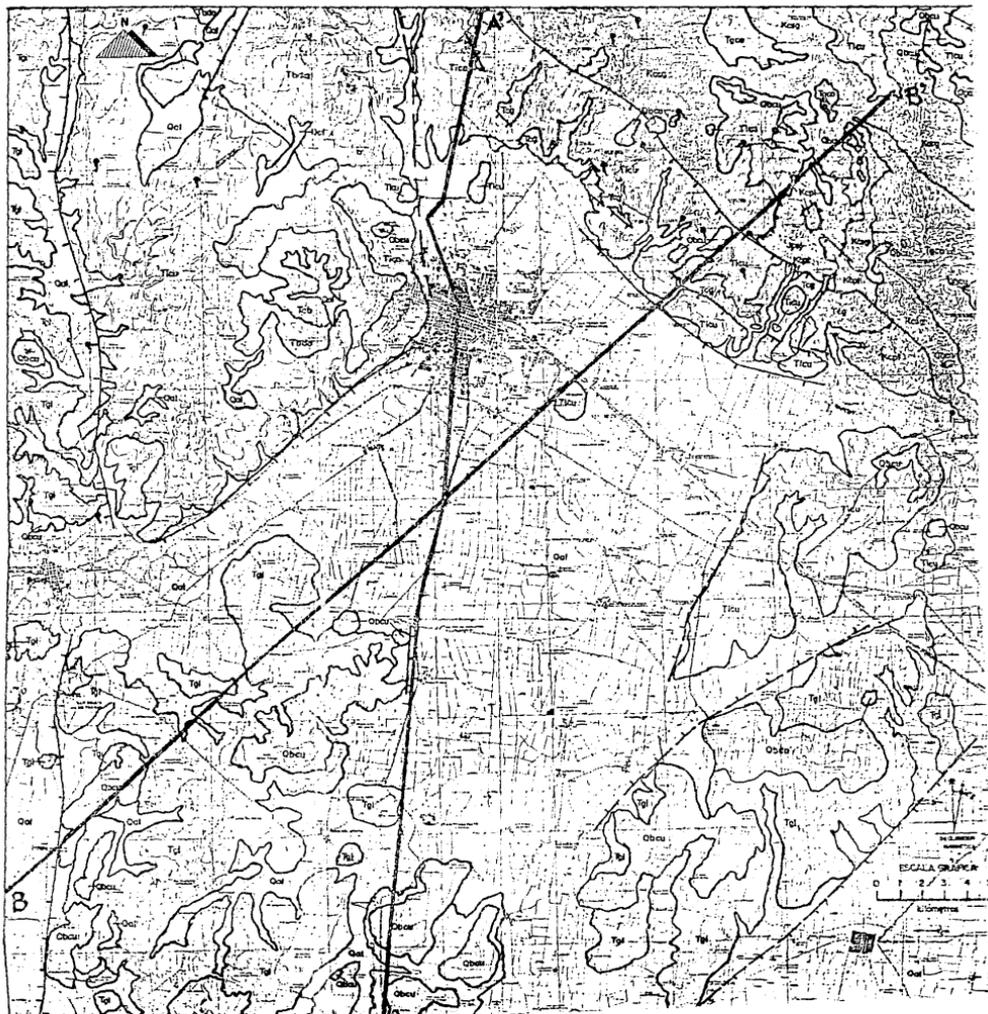
- (1) V6zquez y Jaimes, 1989
- (2) Segerstrom, 1961
- (3) Fries, 1962

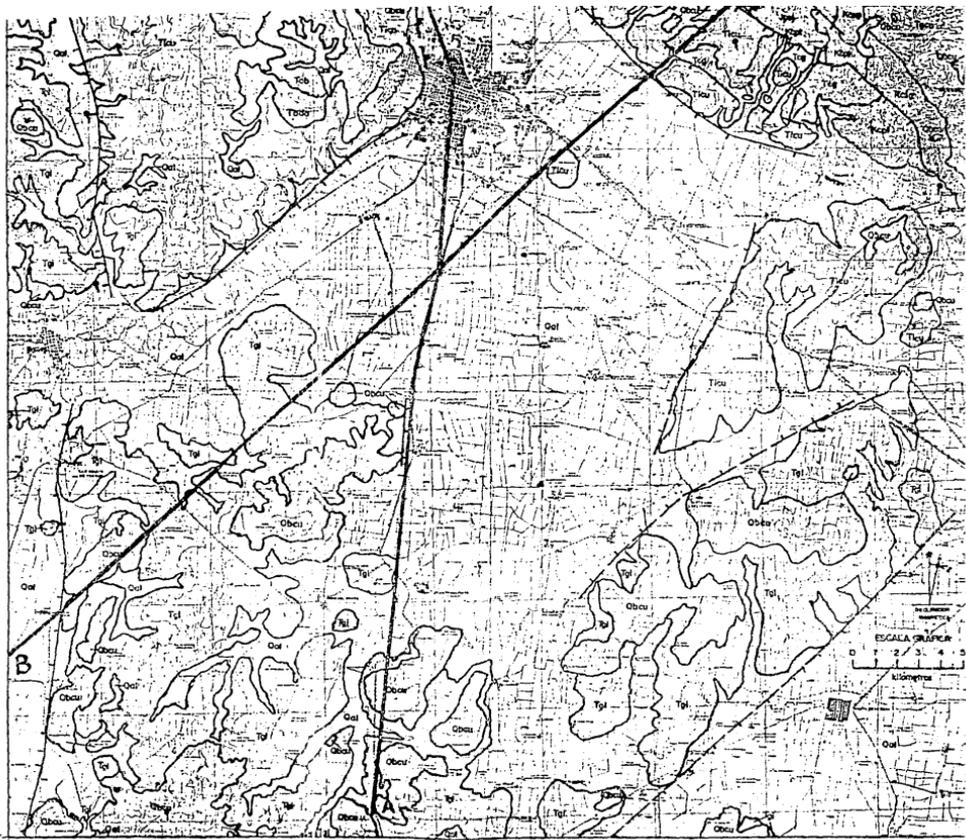
- (4) Geyne et al., 1963
- (5) Mc Dowell and Clabaugh, 1979



TABLA V. 1

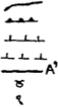






**SIMBOLOGÍA:**

- Contacto litológico
- Falla inversa
- Falla normal
- Falla normal invertida
- Sección geológica
- Volcán
- Manantial



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL

Noel Hernández Laloth

CARTA GEOLÓGICA

NOTA: - Las secciones geológicas que complementan a esta carta geológica, aparecen en la sección de geología estructural.

- Las explicaciones de los unidades litos trontográficas aparecen en lo siguiente hoja (nom. 48).

- Para la elaboración de esta carta, en especial, la Sierra de Guanajuato, se consideró...

# EXPLICACION

## UNIDADES LITOSTRATIGRAFICAS

Qa

**Aluvión:** Son todos los sedimentos (conglomerados, arenas, limas, arcillas y cuarcas residuales) que afloran en la planicie y pie de monte, producto de la disintegración de rocas volcánicas, plutónicas, sedimentarias y metamórficas que afloran en el área.

Qm

**Banajo El Cubilete:** Unidad de basalto de olivino y andesita de aguja, que representa la última manifestación volcánica de la región.

Qm\*

**Cabezo Arparan Curpe:** Espesura de basalto color café obscuro y textura microcristalina con minerales dominantes de labradorita, pirroxeno, olivino y minerales opacos.

Tp

**Turberia Granular Indiferenciada:** Se refiere a todo el material sedimentario de origen continental -excepto el aluvión- que se encuentra consolidado en las depresiones tectónicas del bajo. Este material sedimentario contiene conglomerados, areniscos, limositas, lutitas y calizas.

Tca/Tcb

**Banajo Dos Aguas:** Derrames basálticos con olivino y/o aguja y productos piroclásticos de la misma composición. En ocasiones interdigitado con la Igneírita Central.

**Igneírita Central:** Unidad que agrupa a rocas de naturaleza pluriplutónica. Son rocas de composición rhyolítica en espesas paquetes constituidas por igneíritas bien consolidadas y tabas poco o medianamente consolidadas.

Tb

**Andesita Bernalaje:** Se trata de rocas masivas muy alteradas de composición andesítica de textura microcristalina a porfirítica con abundante plagioclaso. Excepcionalmente muestra vesículas y fracturas rellenas de calcita.

Tg

**Conglomerado Guanajuato:** Roca de estructura media masiva, bien consolidada, color rojo, constituida por clastos de origen volcánico, plutónico, sedimentario y metamórfico esparcidos en una matriz arenosa bien cementada.

Tp\*

**Granito Guanajuato:** Roca intrusiva de dimensiónes basálticas, clasificada como granito calcálcico como granito calcálcico. Le caracterizan numerosas pegmatitas, apatitas y vetillas de torvalita.

Ep

**Conjuntos Plutónicos La Laja:** Cuerpos plutónicos diátricos, tonalíticos y graníticos, intrusivos a un val por sucesivos etapas de composición calcálcica y diátrica, totalmente consolidados y unidos.

Em

**Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato:** Unidad con diversas facies sedimentarias y volcánicas tardías, que en conjunto constituyen una potente sucesión de "rocas verdes". Facies sedimentarias: calizas oligocénicas, lutitas, areniscas y areniscas basales de conglomerado. Sucesión Volcánica: basaltos y andesitas o diátricos, en estructuras hondonas o candelabros con niveles de brechas, tabas y diátricos de la misma composición.

Ap

**Piraxeno San Juan de Guanajuato:** Sucesión de rocas ultrabásicas masivas y cristalinas de origen olivínico con predominio de aguja y en ocasiones con minerales de alteración (serpentinización).

### V.3 Geología estructural

Existen estructuras geológicas derivadas de eventos compresivos y/o distensivos que caracterizan a ciertas regiones del país, por ejemplo la gran estructura tectónica del VL, que fué originada a partir de eventos sucesivos de esfuerzos tensionales y que está caracterizada por una serie de pilares y fosas tectónicas, muy peculiares en esta región del bajo. Líneas abajo se hace una breve revisión de los principales rasgos estructurales que se presentan en la zona de estudio, concatenándolos con los objetivos de esta tesis.

#### V.3.1 Pliegues y cabalgaduras

Se manifiestan dos eventos sucesivos de deformación compresiva en el Mesozoico y que afectan a las dos unidades más antiguas que afloran en la SG (Nieto, 1985; Quintero, 1986; Aranda, 1987; Martínez, 1987; Corona, 1988) y por consiguiente, a las unidades del área de estudio.

La primera fase compresiva está asociada a la Orogenia Nevadiana (?) (Corona, 1988; Quintero, 1989), produciéndose plegamiento, metamorfismo regional de facies esquistos verdes, intrusión y fallamiento inverso (cabalgamiento); este último, causante de la superposición de un complejo ofiolítico en el Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanaajuato, mediante el posible cierre de una cuenca de trasarco, relacionado con un evento tectónico de colisión de placas, durante el Neocomiano, o cuando menos, anterior a la Caliza La Perlita (no aflora en el área), considerada del Aptiano-Albiano (Quintero, 1986) y que no muestra evidencias de esta deformación.

La segunda fase compresiva, caracterizada por presentar bajos efectos de deformación, se asocia a la Orogenia Laramide (Martínez, 1987; Corona, 1988), que actuó durante el Cretácico tardío-Paleoceno temprano y produjo el segundo evento deformativo en las rocas existentes, excepto la Caliza La Perlita, que sólo muestra una primera y única deformación compresiva.

Con evidencias deformativas de este tipo y que afectan a las rocas más antiguas del área, consideradas como rocas del basamento, es fácil suponer que su comportamiento hidrogeológico actual es el de barreras impermeables, funcionando en el subsuelo como límite impermeable inferior del sistema acuífero del VL.

### V.3.2 Fracturas y sistemas de fallas

En el Cenozoico se presentan tres sistemas de fallamiento normal con rumbos NW-SE, NE-SW y N-S bien identificados y que determinan el actual tamaño y geometría del sistema acuífero del VL y por lo tanto, tienen vital relevancia en el desarrollo interpretativo del patrón de flujo del agua subterránea.

Los primeros episodios de esfuerzos extensionales que se han reconocido para esta región, corresponden al Paleoceno tardío-Eoceno temprano y son consecuencia del emplazamiento del Granito Comanja. También se han detectado sistemas de fallas normales que afectan a los diversos depósitos de naturaleza piroclástica del Oligoceno y a rocas más antiguas y que se han asociado con el cambio de régimen de subducción al de transformación, durante el choque de la dorsal del Pacífico con la Placa Norteamericana. Existen otros sistemas de fallas de edad post-oligoceno que se han considerado íntimamente ligadas con el relajamiento de esfuerzos del régimen distensivo que tuvo que ver, con la formación del "proto-Golfo" de California y posteriormente, en el Plioceno, con el evento tectónico de desprendimiento de la Península de Baja California. Como eventos distensivos, aún más recientes, es probable que algunos de los sistemas de fallas se asocien con los actuales eventos distensivos de la porción centro-norte del Cinturón Volcánico Mexicano, por donde se han estado extravasando materiales de composición basáltica y andesítica de la unidad Basalto El Cubilete.

Estas fases distensivas que se han establecido no indican necesariamente que entre ellas hayan existido periodos de inactividad, o que sean las únicas, ya que en ocasiones, las direcciones de fallamiento NW-SE y NE-SW se encuentran presentes en una misma fase deformativa, mientras que en otras sólo se reconoce alguna de las dos (Nieto, 1990a).

Tal como se dijo en el subcapítulo del marco geológico regional, las edades de estas fallas, actualmente son tema de discusión y por lo tanto difícil asignarles una edad relativa. De hecho, 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 (Ing. A. Nieto S., 1990b, comunicación personal). Este es un evento muy similar al ocurrido en el oeste de los Estados Unidos, donde una investigación detallada de la zona de falla en el límite de un

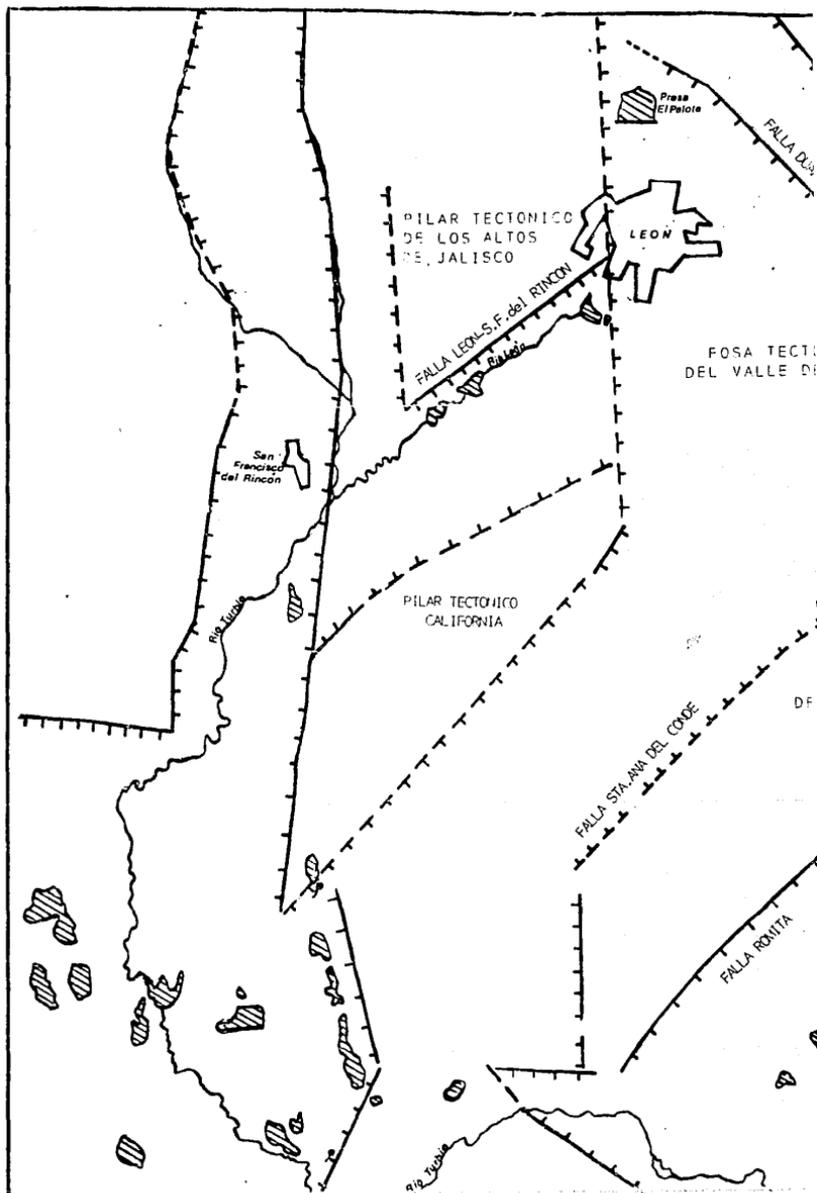
graben, indica que ha habido desplazamiento a todo lo largo de una serie compleja de segmentos de fallas interconectados (Menges, 1981, en Pool, 1985). Por otro lado, en estudios como el de Stewart (1971), se han hallado sistemas de fallas conjugados del Terciario, lo que permite suponer, sin sorprender, que en estructuras tectónicas de este tipo sea frecuente encontrar fosas tectónicas compuestas, con algunas áreas más profundas que otras, lo que también estaría indicando que se han producido movimientos verticales posteriores a la formación de la primera fosa tectónica y/o tal vez reactivación parcial o total de fallas antiguas.

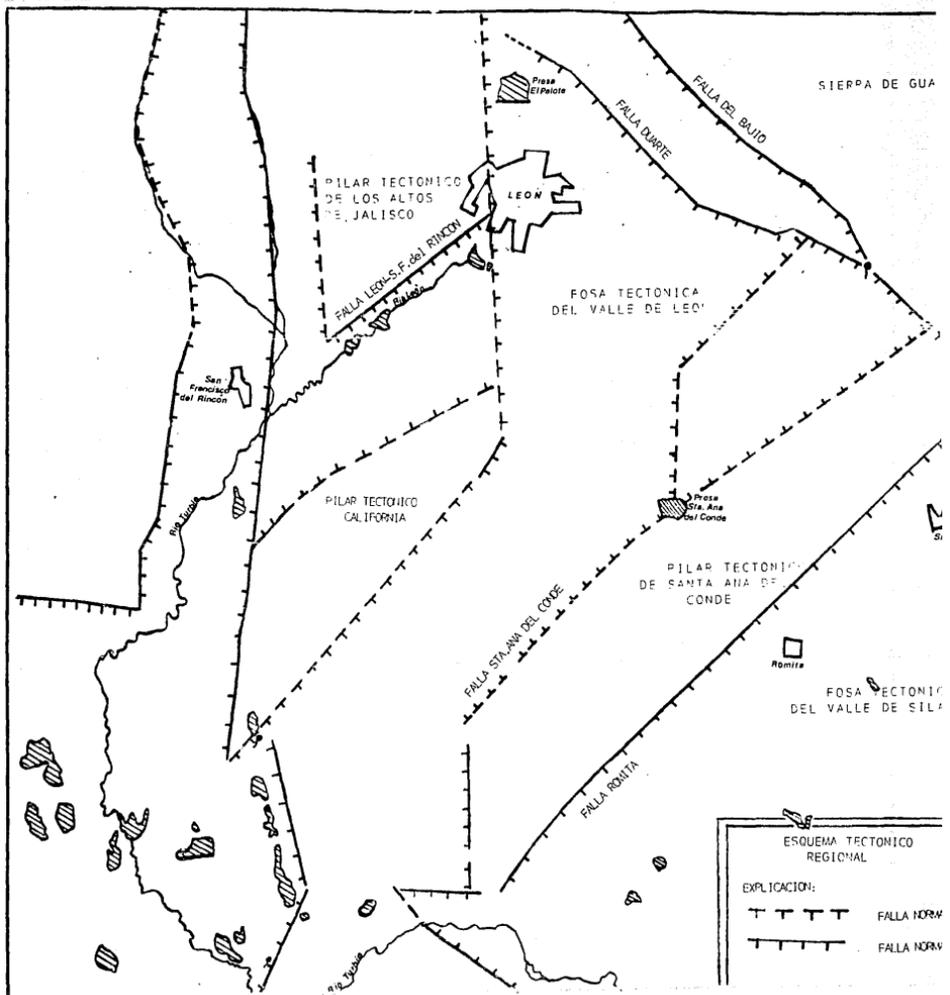
En lo referente a las fracturas, éstas se presentan bien desarrolladas, incluso bastante densas en la SG y en los Altos de Jalisco. Particularmente, las rocas ignimbríticas, los basaltos y las andesitas, son las que presentan el mayor fracturamiento, dentro del área de estudio, con lo que demuestran su gran potencial de infiltración; aunque en la zona de la SG, las fracturas no han de ser 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, para la zona de los Altos de Jalisco, el fracturamiento parece tener una mayor importancia en la infiltración del agua meteórica, como lo han demostrado el análisis geomorfológico y las verificaciones geológicas de campo.

### V.3.3 Esquema tectónico regional a partir de rasgos lineales y observaciones de campo

A partir de las principales formas del relieve, lineamientos, cambios en la topografía y reconocimiento de campo, se elaboró un esquema tectónico regional (FIGURA V.2), donde se observan una serie de pilares y fosas tectónicas que muy bien caracterizan a la zona del bajo.

Es muy importante aseverar que en esta región, según evidencias geológicas y geofísicas, existen bloques "escalonados", que conforman una serie de pilares y fosas tectónicas estructuralmente asimétricas. 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. De hecho el hundimiento de estas fosas estuvo acompañada de procesos de sedimentación clástica continental, los que persistieron aún después de haber cesado el hundimiento de las fosas tectónicas, como en





SIERRA DE GUA

PILAR TECTONICO DE LOS ALTOS DE JALISCO

Leon

FALLA LEON-S.F. DEL RINCON

FALLA DEL BAJO

FALLA DEL NORTE

FOSA TECTONICA DEL VALLE DE LEON

San Francisco del Rincon

PILAR TECTONICO CALIFORNIA

Prose Sta. Ana de Conde

PILAR TECTONICO DE SANTA ANA DE CONDE

Romita

FOSA TECTONICA DEL VALLE DE SILA

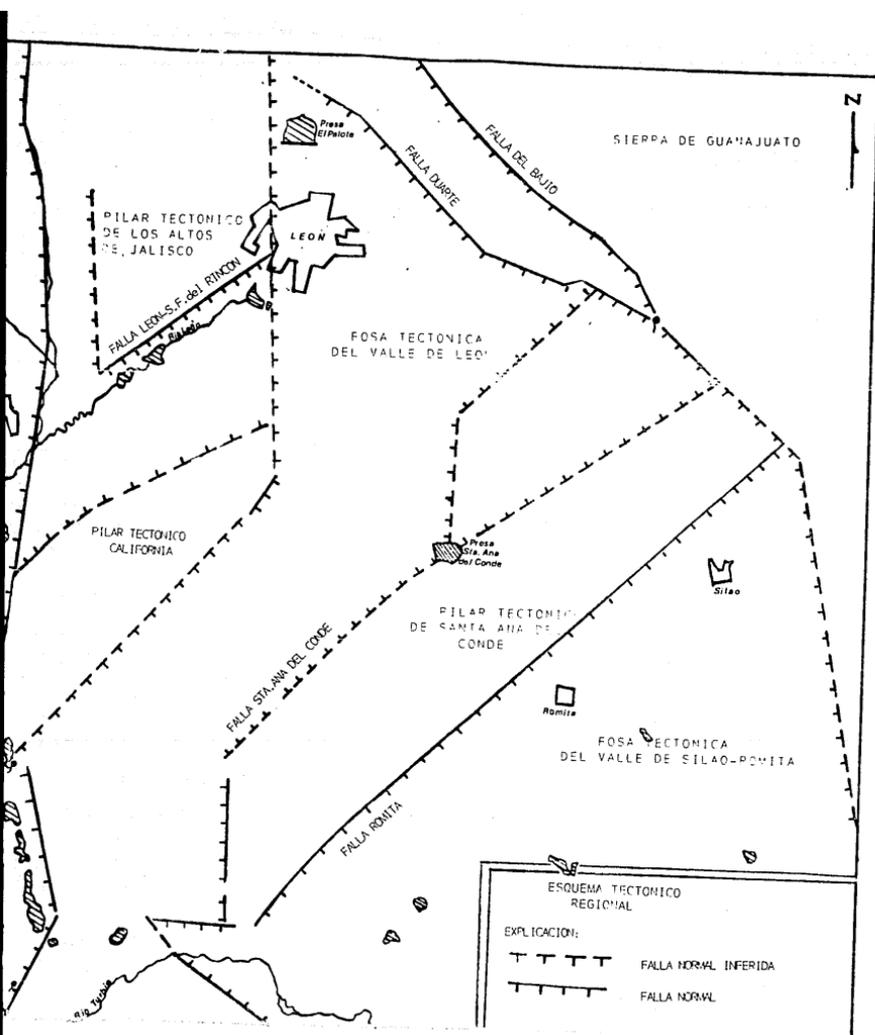
FALLA SANTA ANA DEL COQUE

FALLA ROMITA

ESQUEMA TECTONICO REGIONAL

EXPLICACION:

	FALLA NORW
	FALLA NORW



casos muy similares del sur-centro de Arizona en los Estados Unidos, como lo comenta Anderson (1985).

Según los lineamientos estructurales vistos en la cartografía del área y zonas adyacentes, 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 VL, 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. Asimismo, en el esquema tectónico regional, se aprecian los diversos sistemas de fallas que delimitan a los principales bloques tectónicos (v.g. Falla León-San Francisco del Rincón, Falla del Bajío, Falla Duarte, Falla Santa Ana del Conde, etc.) y que son de vital importancia para una buena interpretación de la geología estructural del subsuelo y de la geometrización de cuencas hidrogeológicas y sistemas acuíferos.

Los pilares tectónicos que rodean al VL, son fáciles de visualizar en campo y en cartografía. Estos bloques corresponden a la SG, Altos de Jalisco, California y Santa Ana del Conde, esta última estructura presenta continuidad hacia los bloques elevados y estructuras anulares de la parte meridional de un bloque inclinado, que se localiza en la parte central de la SG y que Cervantes (1990b) lo denomina graben de San Felipe o Villa de Reyes.

#### **V.4 Geología del subsuelo**

El estudio geológico del subsuelo consistió en identificar las estructuras y unidades litológicas del subsuelo del VL. Con ese fin, se realizó el análisis interpretativo conjunto de los resultados obtenidos a partir de las siguientes actividades:

- Estudio geológico de campo, recabando información de interés, en especial, rasgos litológicos y estructurales.
- Estudio geomorfológico.
- Interpretación de perfiles geoelectricos de trabajos previos.
- Descripción de muestras de canal de pozos perforados en la ciudad de León por el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL).
- Interpretación de registros eléctricos de pozos (potencial espontáneo y resistividad) de las distintas baterías del SAPAL.

La principal estructura del subsuelo del VL es una fosa tectónica, la que se formó durante el descenso relativo de varios bloques a lo largo de fallas normales de gran ángulo. En las secciones geológicas (FIGURAS v.3a y v.3b) se puede apreciar que el bloque que sufrió el mayor descenso relativo es aquel que ocupa la porción centro-norte del actual VL, localizada al sur de la ciudad de León, cercana al poblado Los Arcos. El que este bloque sea el más profundo que aparece en dichas secciones, no necesariamente debe ser el más profundo del valle, ya que como se puede ver en el esquema tectónico regional (FIGURA v.2), es probable que existan bloques de mayor profundidad hacia zonas más centrales del valle. En general, todos los bloques se encuentran "escalonados" e inclinados o basculados, debido a los mismos esfuerzos distensivos que provocaron tales estructuras. Por lo tanto, todas las rocas y sedimentos que conforman a la estructura tectónica, se hallan a diferentes profundidades, dependiendo del punto sobre la superficie que se esté tratando.

Las unidades litológicas más antiguas que se pudieron detectar en el subsuelo, son las correspondientes a las unidades Conglomerado Guanajuato, Andesita Bernalejo e Ignimbrita Cuatralba.

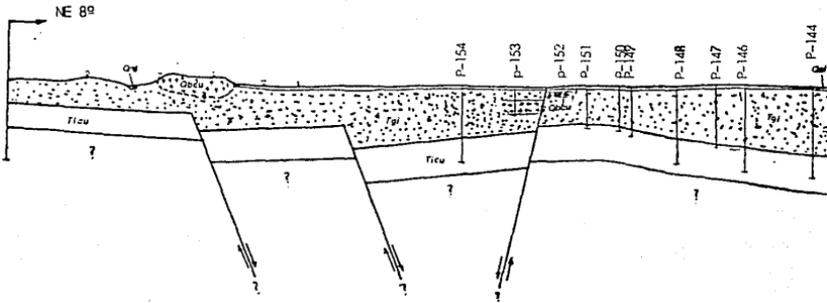
La cima del conglomerado Guanajuato se detectó en los aprovechamientos del SAPAL, Cd-35, Presa El Palote n.4 y San Cristobal, a profundidades de 215, 276 y 305 m, respectivamente y en los pozos exploratorios de la zona de La Muralla (ver Trujillo, 1987), a una profundidad de 300 m, desconociéndose el espesor total.

La unidad Andesita Bernalejo, se reconoció en los aprovechamientos Presa El Palote n.4, Cd-33 y noria La Reserva, a profundidades de 243, 208 y 10 m, respectivamente, sin que ésto indique que sea una unidad de distribución amplia en el subsuelo, o al menos no se ha reconocido en otros pozos del valle. Su espesor en el subsuelo es del orden de los 30 m, aproximadamente

La cima de la Ignimbrita Cuatralba se logró identificar en varios pozos con rangos de profundidad que varían de decenas de metros, en las zonas más cercanas a los frentes montañosos hasta 450 m (P-144), en la zona del poblado Los Arcos. Esta unidad es la que generalmente soporta directamente a la secuencia sedimentaria de la unidad Granular Indiferenciado que ha rellenado la fosa desde su formación. El espesor del componente ignimbrítico de la unidad Ignimbrita Cuatralba en el subsuelo,

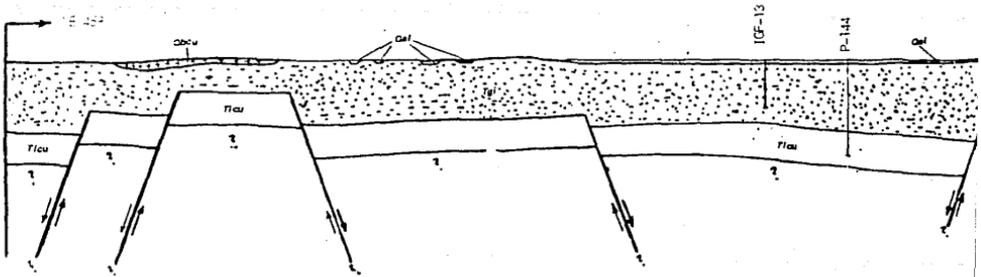
SECCION

A = A'



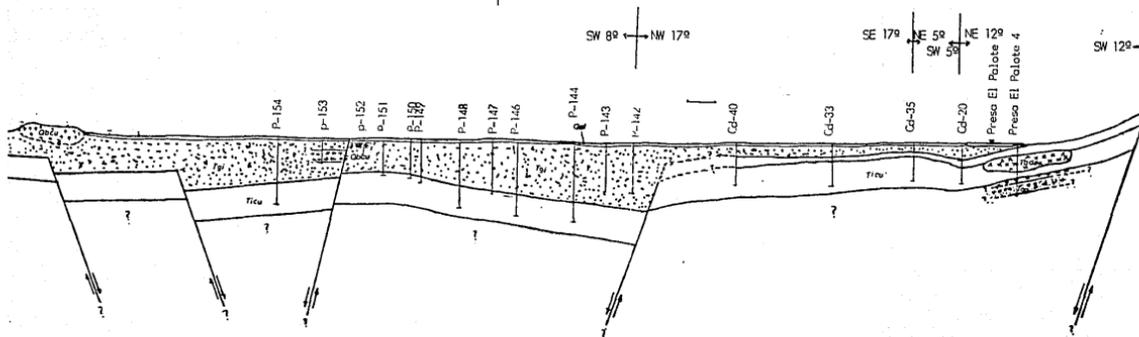
(a)

SECCION B = B'



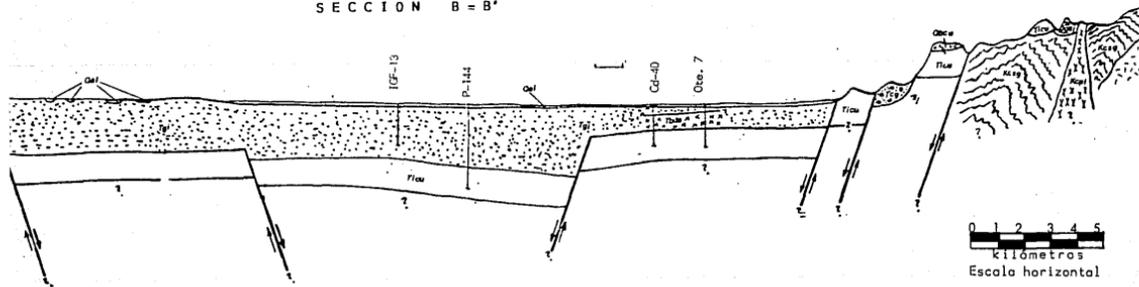
(b)

SECCION A = A'



( a )

SECCION B = B'



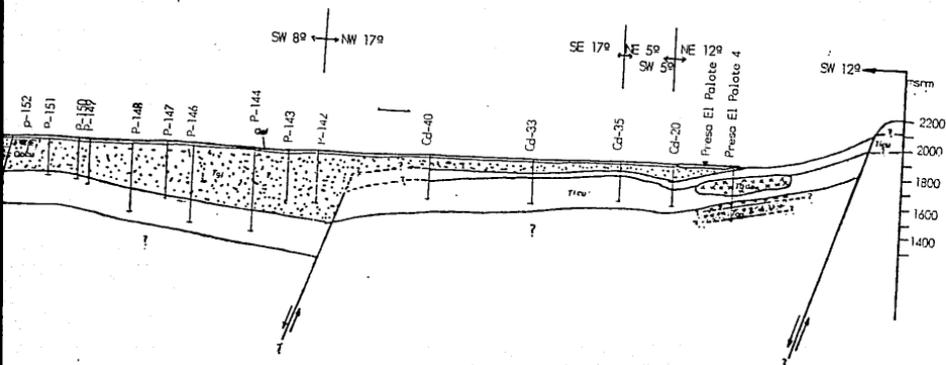
( b )

SECCIONES GEOLOGICAS

FIGURA V.3

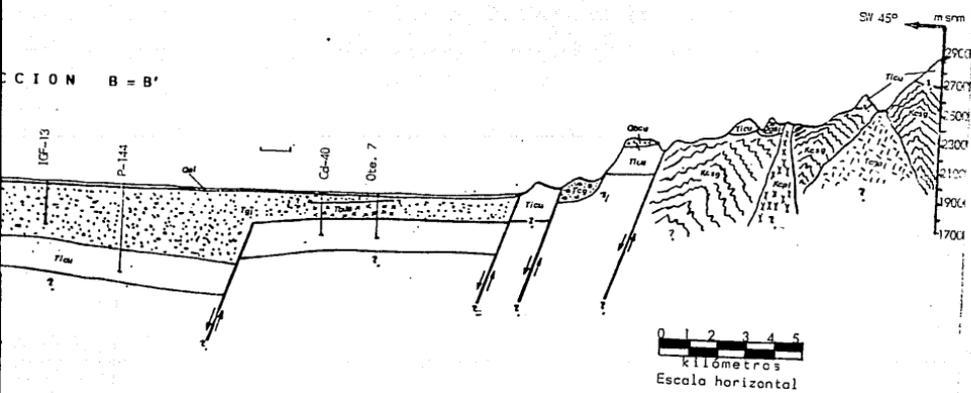
ION

A = A'



( a )

CION B = B'



( b )

SECCIONES GEOLOGICAS

FIGURA V.3

varía entre los 40 y 80 m, siendo en promedio de 60 m; por otra parte, se desconoce el espesor total de la toba que subyace a la ignimbrita.

La unidad Terciario Granular Indiferenciado muestra una composición heterogénea representada por calizas (detectada en superficie), horizontes arcillosos, limos, arenas y gravas, que varían en grado de compactación. Los espesores menores de esta unidad se ubican en las porciones laterales del valle y los mayores en la zona central. Todos los pozos que han atravesado el material de relleno han detectado espesores que varían de unos cuantos metros, hasta alcanzar espesores de 450 m (P-144). Las secciones geológicas demuestran que estos potentes espesores de material de relleno, se localizan en la zona del poblado Los Arcos; sin embargo, como se dijo anteriormente, no se descartan espesores mayores hacia la zona del poblado Los Ramírez, según el marco tectónico definido.

El mecanismo de sedimentación en la fosa del VL puede ser explicado a través de los modelos de Reeves (1977) y Pool (1985), que describen el proceso de relleno en fosas tectónicas. De acuerdo con estos modelos, idealmente al pie de las fosas tectónicas se depositan principalmente sedimentos clásticos gruesos y en las partes centrales los materiales más finos, caracterizados por presentar mayor contenido de arcilla que de otros sedimentos. Sin embargo, en la mayoría de las fosas de este tipo, a través de la historia geológica, los sedimentos migran de un lado a otro, ya sea por movimientos diferenciales de la fosa y/o del frente montañoso (Reeves, 1977), provocando el constante cambio de régimen de depósito de los diversos sedimentos. Asimismo, el material más grueso que se deposita en las partes laterales de la fosa y que se interdigita con el material más fino, también sufre cambios en su posición dentro de la misma (Reeves, op. cit.).

Como se sabe, la sedimentación en este tipo de fosas es un proceso dominante, desarrollándose abanicos aluviales en los frentes montañosos y ligándose para formar amplias superficies aluviales hasta decaer en el centro de las fosas. La mayoría de los depósitos ocurren bajo condiciones de drenaje cerrado, resultando depósitos de sedimentos de grano fino (Pool, op. cit.).

Pool (op. cit.), con base en evidencias estructurales y estratigráficas encontradas en el área de Arizona, divide al material sedimentario de las fosas en relleno de cuenca inferior (*lower basin fill*)

y superior (*upper basin fill*). El material de relleno inferior se depositó durante el tectonismo activo que formó las primeras fosas tectónicas y el material de relleno superior después de que cesó la mayor parte del proceso de hundimiento. El material de relleno inferior generalmente consiste de sedimentos clásticos representativos de zonas laterales locales y una facies central de grano fino que puede incluir evaporitas. El material de relleno superior consiste de depósitos lacustres y fluviolacustres que incluyen arcillas, limos y arenas.

En el VL es muy difícil hacer la distinción entre relleno de cuenca inferior y superior, debido a que no existe un buen control litológico de los pozos, pero es evidente la existencia de material arcilloso en la parte media del espesor del material de relleno (pozos P-145, P-146 y P-147, de la batería sur del SAPAL), pero su disposición no es continua y en otras partes la diversificación granulométrica de las partículas es muy frecuente. Así también Trujillo (op. cit.) ha detectado mediante registros de pozos y muestras de canal, rocas carbonatadas de origen lacustre en pozos de la zona de La Muralla, sin embargo, su continuidad y distribución espacial dentro del paquete de la secuencia sedimentaria no está bien definida.

Actualmente, el material aluvial está restringido a las márgenes de las escasas corrientes que disectan el valle y a las zonas cercanas a los frentes montañosos que la delimitan. El resto del área se considera como material aluvial, pero controlado antropogénicamente para fines de cultivo.

### V.5 Síntesis tectónica e historia geológica

Existe gran controversia en lo referente a los diferentes modelos tectónicos propuestos y la relación que guardan en el contexto geodinámico general de la tectónica de placas. Aún así, aquí se presenta un pequeño esbozo paleogeográfico donde se presentan los principales eventos que estuvieron actuando a lo largo del registro geológico, al menos en los últimos 200 Ma y procuran explicar de manera clara y convincente, el origen y evolución de los diversos estadios geológicos por los que ha pasado el centro de la República Mexicana.

La historia geológica de la región se reconstruye a partir del Triásico tardío o Jurásico temprano, con la fragmentación de la Pangea e inicio de la apertura del Atlántico, caracterizándose por la formación de

pilares y cuencas tectónicas con una posterior transgresión marina extensa, como 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.

Simultáneo a este evento de ruptura continental se desarrolló un margen convergente en el borde occidental de la corteza continental de aquel tiempo, creándose un arco volcánico insular y una cuenca de trasarco, donde se generó corteza oceánica atestiguado por los restos de un complejo ofiolítico que aflora en la SG donde sus componentes ultrabásico y básico están representados por la Piroxenita San Juan de Otates, la que se formó a través de una zona de distensión surgida por una digitación tetisiana (Servais et al., 1982; Servais et al., 1986) durante la apertura atlántica que separó las plataformas carbonatadas orientales (Chiapas y San Luis Potosí) de los arcos volcánicos peripacíficos (Alisitos-Teloloapan), durante su penetración por el México meridional en el Neocomiano (Carfantan, 1986, en Servais, 1986), o tal vez, a partir de un dominio netamente de afinidad pacífica como lo aseveran otros autores (Corona, 1988; Martínez, 1989a). Con la formación del arco volcánico insular, la cuenca de trasarco se caracterizó por un ambiente marino con profundidades que transitaban de aguas someras a profundas en el inicio del Neocomiano, formándose una secuencia de depósitos volcanoclásticos, carbonatos y terrígenos con notables horizontes arcillosos.

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

En el Albiano, después de esta perturbación tectónica, sobreviene la calma y con ello el depósito de calizas arrecifales (Caliza La Perlita) -que no aflora en el área de estudio- en un ambiente de mar somero de afinidad tetisiana.

Para el Cretácico tardío no existen afloramientos que expliquen las condiciones ambientales prevaletientes en el área, pero zonas adyacentes sugieren una continuidad en el ambiente de depósito de esta zona, cuando menos hasta el Campaniano, porque en el Maestrichtiano se inició un segundo evento compresivo, que afecta a todas las unidades presentes hasta ese momento.

Este evento compresivo se ha considerado íntimamente ligado a la Orogenia Laramide, que fué un evento deformacional que se presentó extensamente y a un 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. Con este evento, se lleva a cabo el retiro de los mares y se instala definitivamente, un ambiente totalmente continental.

Con este nuevo ambiente de finales del Paleoceno y principios del Eoceno, se lleva a cabo un intenso magmatismo, ocasionando el emplazamiento del Granito Comanja, considerado como un batolito post-orogénico.

Posterior al emplazamiento granítico, se inicia una acumulación de rocas conglomeráticas (Conglomerado Guajuato) en las depresiones topográficas que se produjeron como consecuencia de la deformación y fallamiento que sufrieran las rocas intrusionadas por el Granito Comanja.

Inmediatamente después de la depositación del Conglomerado Guajuato hace aproximadamente unos 45 Ma, 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 (McDowell and Clabaugh, 1981) y por lo tanto debe su origen al proceso de subducción de la Placa Farallón por debajo de la Placa Norteamericana.

Después de un lapso de tiempo de aproximadamente 11 Ma de inactividad volcánica, esta se restablece en los inicios del Oligoceno, durante un corto periodo de aproximadamente 7 Ma, finalizando por causa de la extinción de la Placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana, cuya subducción fué la alimentadora del vulcanismo ignimbrítico de la región. Para algunos autores, este vulcanismo continuó quizá hasta el Mioceno medio (Demant et al., 1976, en Venegas, 1985). La actividad es de carácter silícico, siendo extravasadas grandes cantidades de tobas e ignimbritas (Ignimbrita Cuatralba) y durante las últimas manifestaciones acompañadas de

derrames basálticos del volcán Dos Aguas.

Es evidente que la consumación de la Placa Farallón a fines del Oligoceno o principios del Mioceno, propició una reorientación mayor en la tectónica distensiva (Atwater, 1970, en Venegas, op.cit.) y que probablemente produjo la apertura del "proto-Golfo" de California y consecuentemente se generara un régimen extensional en el centro y norte de México (Cebull and Shurbet, 1987), produciéndose una zona de pilares y fosas tectónicas. Aparentemente, este régimen extensional pudo continuar activo o tal vez reactivado posteriormente, con la apertura plena del Golfo de California, durante el Plioceno.

Con la formación de estas estructuras tectónicas y el proceso denudatorio prevaleciente durante el Neógeno y Cuaternario, se lleva a cabo la depositación de grandes espesores de la unidad Terciario Granular Indiferenciado, en las distintas cuencas tectónicas de la región, algunas de éstas de tipo endorreico, como lo fué en algún determinado momento el actual VL.

Por otro lado, en el Cuaternario se presenta actividad volcánica en lo que se conoce como 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.

Finalmente, en el Holoceno se generan procesos exógenos que prevalecen sobre los endógenos, al menos así parece y es lógico esperar que así sea la respuesta a los periodos de gran actividad que se manifestaron durante gran parte del tiempo geológico. Aunque no se descarta la posibilidad de que existan aún manifestaciones de procesos endógenos.

## VI HIDROGEOLOGIA

En este capítulo se presentan las características de comportamiento hidrogeológico de las unidades litológicas que existen en el VL y los medios por donde fluye el agua del sistema acuífero, además de presentar el comportamiento hidráulico de dicho sistema, obtenido mediante los métodos de pruebas de bombeo. Por otro lado, se presentan los rasgos indicadores del patrón de flujo del agua subterránea y la relación que guarda en el contexto de lo que se ha denominado sistema de flujo del agua subterránea. Finalmente, se presenta una red de flujo en perfil y su análisis referente a el sistema de flujo del agua subterránea del VL y áreas adyacentes, demostrando con ello la gran importancia que representa esta herramienta analítica.

### VI.1 Unidades hidrogeológicas y medios por donde fluye el agua del sistema acuífero

Con base en la geología, geomorfología e hidrología superficial del área, se logró conocer el comportamiento hidrogeológico de las distintas unidades litoestratigráficas de la región, quedando agrupadas en unidades hidrogeológicas permeables (TABLA VI.1) e impermeables (TABLA VI.2). También se hizo la distinción de los medios por donde fluye el agua del sistema acuífero, el cual se ha considerado regionalmente como un sistema acuífero libre heterogéneo (TABLA VI.3).

#### VI.1.1 Unidades hidrogeológicas permeables

**Andesita Bernalejo.** Presenta permeabilidad moderada por fracturamiento como lo demuestran algunas norias que están emplazadas sobre esta unidad, en el occidente del valle; pero aún así es de esperar que la permeabilidad media de la roca disminuye de modo general a medida que la profundidad y/o la edad aumenten. Se advierte que el material es altamente anisótropo debido a la diferencia en la orientación del patrón de fracturamiento, lo que muy bien se ajusta a las características de permeabilidad esperadas para rocas andesíticas, como lo advierten Davies and De Wiest (1971). Su distribución superficial se restringe a unos cuantos afloramientos en el occidente del área.

**Ignimbrita Cuatralba.** Unidad compuesta por toba en la parte inferior e ignimbrita en la superior. Ambas componentes presentan buena permeabilidad, siendo permeabilidad primaria para la toba y por fracturamiento para la ignimbrita. Esta unidad es de gran importancia debido a su espesor y distribución superficial y de subsuelo, como se puede apreciar en la carta geológica (FIGURA v.1) y en las secciones geológicas (FIGURAS v.3a y v.3b).

**Basalto Dos Aguas.** Roca con permeabilidad moderada por fracturamiento, que se localiza en el noroeste de la ciudad de León y que está representada por el Volcán Dos Aguas. Es de gran importancia como elemento potencial de infiltración de agua meteórica, debido a sus diaclasas y patrón de fracturamiento.

**Granular Indiferenciado.** Unidad que aflora en el sur del valle y que descansa sobre la unidad permeable Ignimbrita Cuatralba. Es todo el material que se encuentra relleno a la fosa tectónica del VL. La permeabilidad es buena en general pero varía según el material que se trate (calizas, gravas, arenas, limos o arcillas). Esto es debido a lo heterogéneo del material y a la compactación del mismo.

**Basalto El Cubilete.** Basaltos y andesitas fracturados que coronan algunas elevaciones topográficas del noreste, sur y sureste del valle, presentan una permeabilidad moderada por fracturamiento, la que sirve como vía de infiltración de agua meteórica.

**Aluvión.** Material aluvial de espesor desconocido que se distribuye en gran parte del valle. Presenta buena permeabilidad, pero con el riesgo latente de degradarse por compactación, debido al uso frecuente de maquinaria agrícola y extracción del agua subterránea. Por ahora es material con gran poder de infiltración y que permite al agua meteórica y de riego llegar a la zona de saturación, que se encuentra en el material de relleno de la unidad Terciario Granular Indiferenciado.

## UNIDADES HIDROGEOLOGICAS PERMEABLES

Andesita Bernalejo  
Ignimbrita Cuatralba  
• Basalto Dos Aguas  
Granular Indiferenciado  
• Basalto El Cubilete  
• Aluvión

- Unidades permeables que funcionan principalmente como zonas potenciales de infiltración.

TABLA VI.1

### VI.1.2 Unidades hidrogeológicas impermeables

Son las restantes unidades litológicas que afloran en el área y que presentan una muy baja o prácticamente nula permeabilidad. Estas unidades están expuestas en el flanco suroccidental de la SG, por lo que se consideran unidades impermeables con gran potencial de escurrimiento de agua meteórica, la que se infiltra al entrar en contacto con rocas de mejor permeabilidad.

## UNIDADES HIDROGEOLOGICAS IMPERMEABLES

Piroxenita San Juan de Otates  
Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato  
Conjunto Plutónico La Luz  
Granito Comanja  
Conglomerado Guanajuato  
Gabro Arperos

TABLA VI.2

### VI.1.3 Medio granular

Se consideran unidades hidrogeológicas permeables de medio granular, al componente inferior (toba) de la unidad litológica Ignimbrita Cuatralba y al material de relleno de la fosa tectónica del VL (Granular Indiferenciado). Las formaciones hidrogeológicas se encuentran separadas en el tiempo y en espacio por el componente ignimbritico superior de la unidad Ignimbrita Cuatralba. Estas unidades hidrogeológicas de medio granular son las de mayor dimensión en el sistema acuífero del VL, alcanzando espesores de hasta 450 y 150 m respectivamente.

#### VI.1.4 Medio fracturado

Se agrupan en este medio fracturado, la Andesita Bernalejo y el componente ignimbrítico de la unidad Ignimbrita Cuatralba, los que se encuentran separados en tiempo y espacio por la toba de la unidad anteriormente mencionada. El espesor de la andesita se desconoce, debido a la escas información que se tiene del subsuelo; en cambio, el espesor del medio fracturado, que corresponde al componente ignimbrítico de la unidad Ignimbrita Cuatralba, es en promedio de 60 m, aunque puede variar entre los 40 y 80 m aproximadamente. Estos medios fracturados, son relativamente pequeños comparados con los medios granulares descritos anteriormente, sin embargo, son de gran importancia dentro del sistema de flujo del agua subterránea.

SISTEMA ACUIFERO LIBRE HETEROGENEO DEL VL	[	Terclario Granular Indiferenciado (medio granular)
		Ignimbrita Cuatralba [ignimbrita] (medio fracturado)
		Ignimbrita Cuatralba [toba] (medio granular)
		Andesita Bernalejo (medio fracturado)

TABLA VI.3

Como conclusión de este subcapítulo, se puede decir que estas unidades hidrogeológicas funcionan con características particulares de cada una de ellas, pero sin dejar de tener una interrelación íntima con el entorno, por lo tanto, conforman un acuífero libre heterogéneo, que pertenece al sistema acuífero del VL, que es un componente importante de un gran modelo de funcionamiento hidrodinámico del flujo subterráneo, denominado sistema de flujo regional de agua subterránea y que puede abarcar una o más cuencas topográficas (Mifflin, 1968) y por lo tanto conectar áreas de recarga con áreas de descarga, además de poder atravesar acuíferos y sistemas acuíferos (Engelen, 1986). Es importante decir que este sistema de flujo de agua subterránea tiene su propia identidad como una unidad coherente de agua subterránea y de materiales terrestres en el espacio y en el tiempo, sin considerar la influencia del hombre (Engelen, op. cit.).

## **VI.2 Características hidráulicas del sistema acuifero**

Dada la escasa información acerca de las características hidráulicas del sistema acuifero del VL, se requirió necesario interpretar los datos de las pruebas de bombeo realizadas por la empresa Ariel Construcciones (1982b) para este valle, obteniéndose valores de transmisividad y con ello la gráfica caudal específico-transmisividad para esta área de interés, con lo cual, posteriormente se obtuvieron transmisividades aproximadas en los pozos de las baterías Río Turbio y Ciudad del SAPAL y pozos de la zona de La Muralla (al sur del VL). Por otro lado, también a partir de los datos de aforo de estas baterías de pozos, se obtuvieron algunos valores de transmisividad mediante la aplicación del método de solución de pruebas de bombeo a caudal variable.

En el apartado VI.2.5, último de este subcapítulo, se comentan los resultados obtenidos y la relación que guardan con las unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuifero del VL.

### **VI.2.1 Pruebas de bombeo**

Como se sabe, la interpretación de las pruebas de bombeo en medios porosos, se basa en soluciones teóricas deducidas de la ecuación diferencial de flujo. Dichas soluciones expresan matemáticamente el comportamiento de los niveles piezométricos en el área que es afectada por el bombeo.

Se interpretaron diez pruebas de bombeo, de las cuales siete corresponden a la etapa de recuperación y tres a la de abatimiento. Los valores de transmisividad obtenidos son representativos de la unidad hidrogeológica Terciario Granular Indiferenciado.

Como se dijo en el subcapítulo de unidades hidrogeológicas y medios por donde fluye el agua del sistema acuifero, este sistema hidrológico subterráneo representa a un acuifero libre heterogéneo, de ahí la consideración de tratar al sistema como acuifero libre y con flujo radial de agua en régimen variable; esta última restricción, debido a la información disponible con que se cuenta.

En general, si en un acuifero libre los abatimientos son pequeños en relación al espesor saturado del acuifero, la interpretación de las pruebas de bombeo se efectúa como si se tratara de un acuifero confinado (Stallman, en Todd, 1980). En este caso se cumple este argumento y por lo tanto se

utilizan los métodos de Jacob y Recuperación de Theis para obtener la transmisividad, sin la necesidad de corregir los abatimientos medidos durante la prueba de bombeo.

Por otro lado, también se satisfacen los siguientes supuestos (Kruseman y De Ridder, 1975):

- Aparentemente, el acuífero tiene una extensión superficial infinita.
- El acuífero, en el área influenciada por la prueba de bombeo, es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme.
- Antes de bombear, la superficie piezométrica y/o superficie freática son (casi) horizontales en el área influenciada por la prueba de bombeo.

-Se bombea el acuífero a caudal de descarga constante.

-El pozo de bombeo penetra totalmente en el acuífero y por ello recibe agua de todo el espesor del acuífero siendo el flujo horizontal.

-Supuestos de Dupuit (1863):

\*La velocidad del flujo es proporcional a la tangente del gradiente hidráulico en vez del seno, como realmente sucede.

\*El flujo de agua es horizontal y uniforme en cualquier parte de un corte vertical que contenga al eje del pozo.

-Sea acuífero libre.

-Exista flujo de agua hacia el pozo en régimen variable.

-Se descarga el agua extraída del almacenamiento al mismo tiempo que se produce el descenso de la carga hidráulica, o sea, no hay efectos de rendimiento retardado.

-El diámetro del pozo es muy pequeño, es decir, se puede despreñar el almacenamiento del agua en él.

Siendo así, a continuación se explican los métodos de solución de Jacob y Recuperación de Theis para las pruebas de bombeo del sistema acuífero del VL.

**Método de solución de Cooper-Jacob.** Este método está basado en la fórmula de Theis, sin embargo, las condiciones exigidas para su aplicación son más restringidas que para los métodos de Theis y Chow (Kruseman y De Ridder, op. cit.).

De la fórmula de Theis (1935):

$$s = \frac{Q}{4\pi kb} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi kb} W(u) \quad (1)$$

Se puede desarrollar la integral exponencial en forma de una serie convergente; por lo tanto, se puede expresar el descenso  $s$  en la forma:

$$s = \frac{Q}{4\pi kb} \left[ -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} \dots \right] \quad (2)$$

De  $u = \frac{r^2 S}{4kbt}$  se puede observar que los valores de  $u$  disminuyen conforme aumenta el tiempo de bombeo  $t$ . En consecuencia, para grandes valores de  $t$  y/o pequeños valores de  $r$ , los términos que siguen a  $\ln u$  en la ecuación se hacen despreciables. Por ello, para valores pequeños de  $u$  ( $u < 0.01$ ) se puede expresar el descenso de la capa de agua  $s$  por medio de la asíntota:

$$s = \frac{Q}{4\pi kb} \left[ -0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4kbt} \right] \quad (3)$$

Reagrupando los términos y cambiando los logaritmos neperianos a logaritmos decimales se obtiene:

$$s = \frac{2.30 Q}{4\pi kb} \log \frac{2.25kbt}{r^2 S} \quad (4)$$

Por lo tanto, la representación del descenso  $s$  en función del logaritmo del tiempo es una línea recta. Si se alarga la recta hasta que corte con el eje del tiempo se obtiene para  $s=0$ ,  $t=t_0$  y sustituyendo estos valores en la ecuación (4) se obtiene:

$$0 = \frac{2.30 Q}{4\pi kb} \log \frac{2.25kbt_o}{r^2 S} \quad (5)$$

Y ya que  $\frac{2.30 Q}{4\pi kb} \neq 0$ , se debe cumplir que  $\frac{2.25kbt_o}{r^2 S} = 1$ , o lo que lo mismo:

$$S = \frac{2.25kbt_o}{r^2} \quad (6)$$

Si  $t/t_o = 10$ , y por lo tanto  $\log t/t_o = 1$ , se puede sustituir el valor de  $s$  por el de  $\Delta s$ , es decir la diferencia de descensos por ciclo logaritmico del tiempo y se obtiene:

$$kb = \frac{2.30 Q}{4\pi \Delta s} \quad (7)$$

Se observará que  $\Delta s = 2.30/4\pi kb$  es la expresión de la pendiente de la línea recta. Esto significa que cuando se ajusta una línea recta a los puntos representados, los valores de  $t_o$  y de  $\Delta s$  quedan determinados.

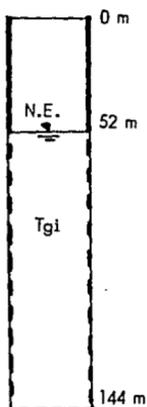
Aparte de los supuestos antes mencionados, también se debe cumplir que:

-Valores pequeños de  $u$  ( $u < 0.01$ ), es decir,  $r$  es pequeño y  $t$  es grande.

La condición de que  $u$  sea pequeño, para acuíferos confinados y moderadas distancias desde el pozo de bombeo, puede satisfacerse en una hora o menos de bombeo; sin embargo, para las condiciones de acuífero libre pueden necesitarse doce o más horas de bombeo.

A continuación se presentan las gráficas de las pruebas de bombeo en su etapa de abatimiento y la solución por el método anteriormente descrito para los pozos P-33, P-69 y P-283 (FIGURAS VI.1 a VI.3):

**POZO P-33**

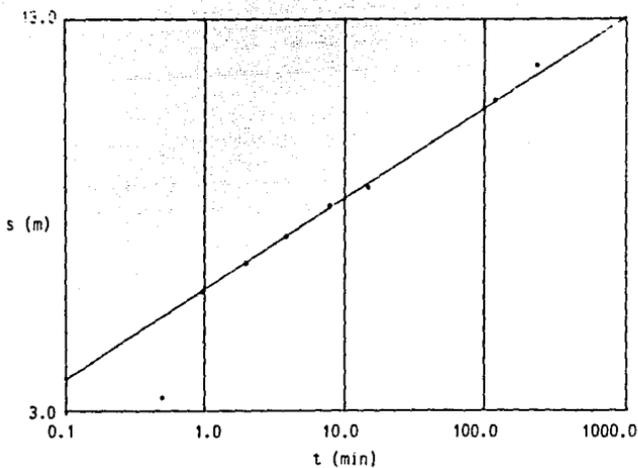


Q=26 lps

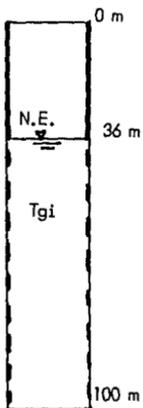
$\Delta s = 2.31$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s} = 20.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



**POZO P-69**

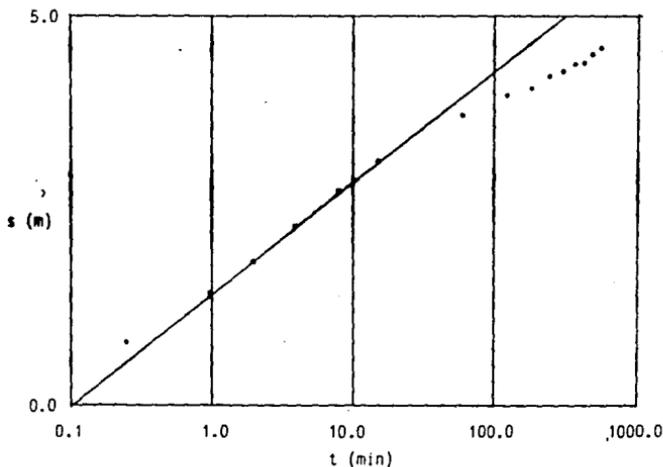


Q=9 lps

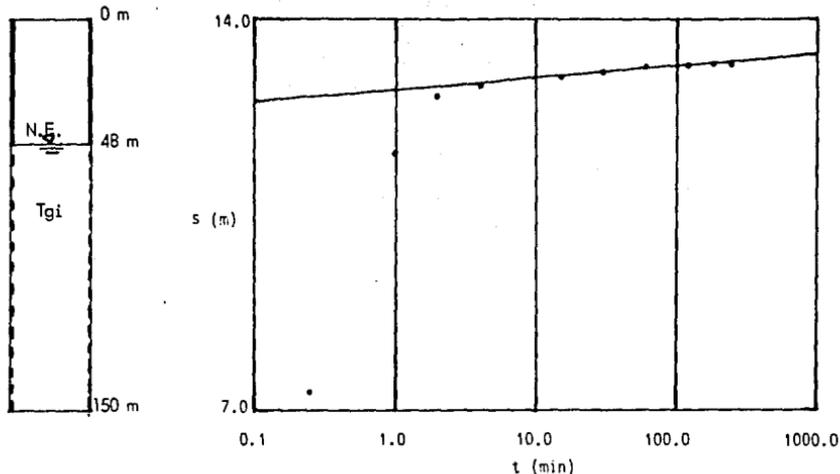
$\Delta s = 1.44$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s} = 11.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



POZO P-283



$$Q=21 \text{ lps}$$

$$\Delta s=2.28 \text{ m/ciclo}$$

$$T=\frac{2.300}{4\pi\Delta s}=16.9 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Método de solución de Recuperación de Theis. Una vez terminado el bombeo de un pozo, el nivel del agua dejará de descender y comenzará a subir hasta alcanzar su posición original. Este periodo de ascenso se llama recuperación del pozo. Se puede medir dicho ascenso del nivel del agua por medio del descenso residual  $s'$ , es decir, la diferencia entre el nivel del agua antes de comenzar el bombeo y el nivel actual, medida en un cierto momento  $t'$  después de finalizado el bombeo (Kruseman y De Ridder, op. cit.).

Este método tiene la ventaja de que durante el periodo de recuperación, el caudal de descarga  $q$  es constante e igual al caudal medio extraído durante el bombeo. Esto significa que durante el periodo de recuperación no se producen las pequeñas diferencias en el descenso, debidas a variaciones en el caudal de descarga del bombeo.

Las pruebas de bombeo en su etapa de recuperación realizadas en el VL, cumplen con los supuestos y condiciones que el método de Cooper-Jacob establece y por lo tanto, se puede utilizar el método de solución de

Recuperación de Theis para calcular las propiedades hidráulicas del acuífero. Según Theis (1935, en Kruseman y De Ridder, op. cit.), el descenso residual  $s'$  durante el período de recuperación viene dado por:

$$s' = \frac{Q}{4\pi kb} \left[ \ln \frac{4kbt}{r^2 S} - \ln \frac{4kbt'}{r^2 S'} \right] \quad (8)$$

donde:

$s'$  = descenso residual en m

$r$  = distancia del pozo de observación al de bombeo en m; si se considera el pozo de bombeo mismo,  $r=r_w$  = radio efectivo del pozo de bombeo

$s'$  = coeficiente de almacenamiento durante la etapa de recuperación, adimensional

$s$  = coeficiente de almacenamiento durante el bombeo, adimensional

$t$  = tiempo desde que comenzó el bombeo, en segundos

$t'$  = tiempo desde que terminó el bombeo, en segundos

$Q$  = caudal de recarga = caudal de descarga, en  $m^3/s$

Si  $s$  y  $s'$  son constantes e iguales y si además  $u=r^2 S/4kbt'$  es suficientemente pequeño, la ecuación anterior se puede escribir de la siguiente forma:

$$s' = \frac{2.30 Q}{4\pi kb} \log \frac{t}{t'} \quad (9)$$

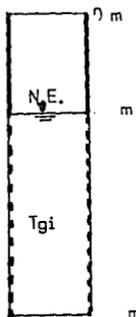
En papel semilogarítmico se representan los valores de  $s'$  en relación con los de  $t/t'$  (estos últimos en la escala logarítmica) y se traza la recta que mejor se ajuste a ellos. La pendiente de esta recta es igual a  $2.30 Q/4\pi kb$ . Del gráfico se puede obtener el valor de  $\Delta s'$ , que es el descenso residual por ciclo logarítmico de  $t/t'$  y se sustituye en la ecuación:

$$kb = \frac{2.30 Q}{4\pi \Delta s'} \quad (10)$$

Cabe aclarar que con este método no se puede obtener el coeficiente de almacenamiento.

A continuación se presentan las gráficas de las pruebas de bombeo en su etapa de recuperación de los pozos P-34, P-43, P-65, P-180, P-532, P-575 y P-763 (FIGURAS VI.4 a VI.10), obteniéndose la solución para cada uno de ellos por el método de Recuperación de Theis:

**P-34**

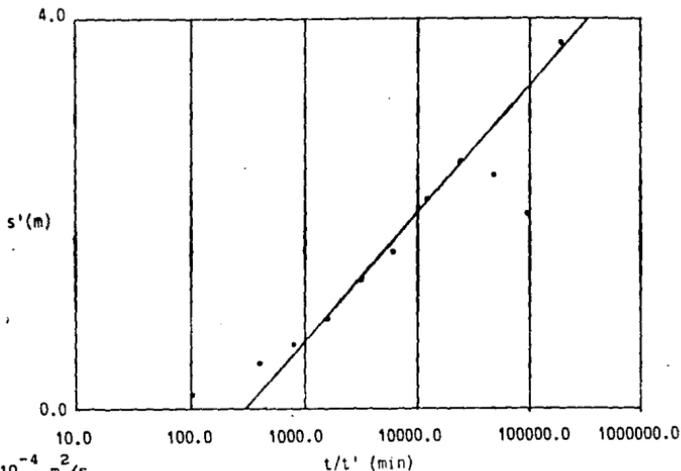


Q=30 lps

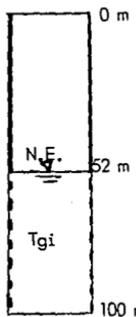
$\Delta s' = 1.35$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2.300}{4\pi\Delta s'} = 40.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



**P-43**

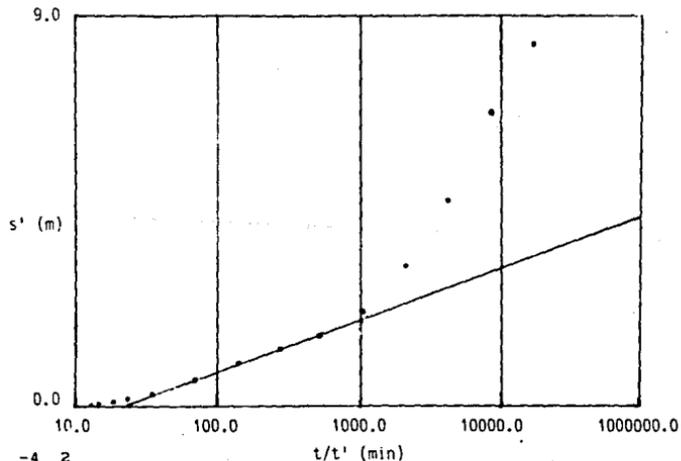


Q=14 lps

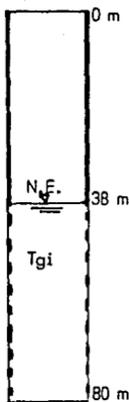
$\Delta s' = 1.20$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2.300}{4\pi\Delta s'} = 21.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



P-65

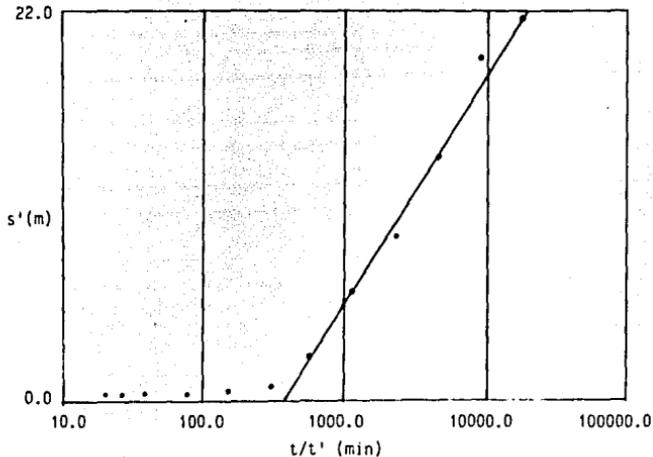


Q=9 lps

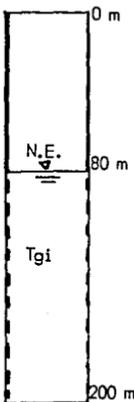
$\Delta s' = 12.7$  m/ciclo

Sustituyendo:

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = 1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



P-180

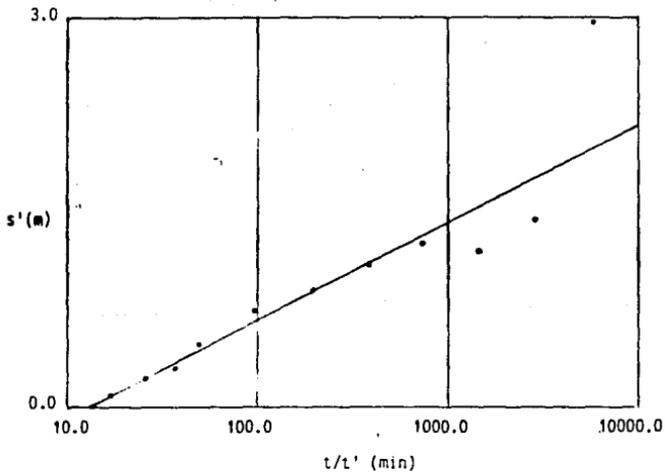


Q=22 lps

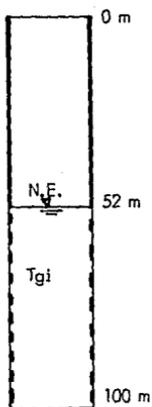
$\Delta s' = 0.77$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} = 52.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



P-532

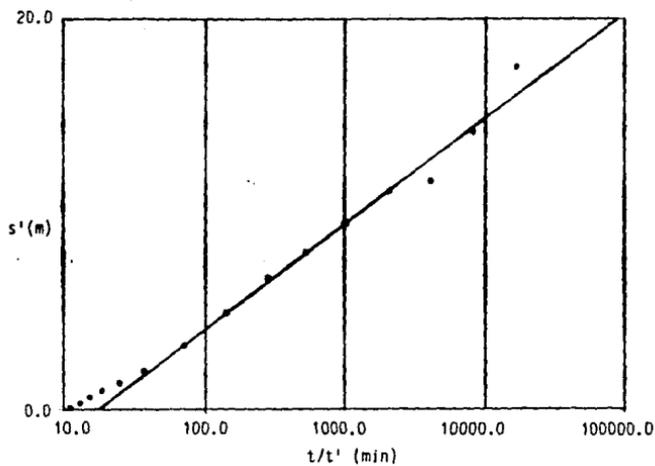


Q=15 lps

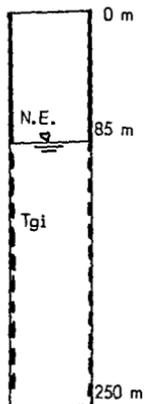
$\Delta s' = 5.4$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2,300}{4\pi\Delta s'} = 5.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



P-575

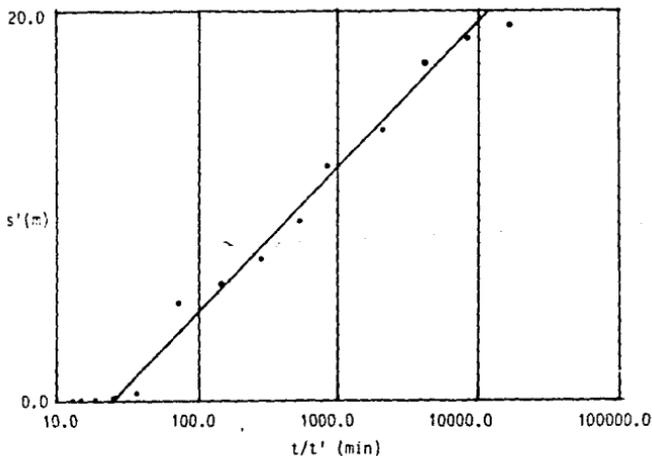


Q=24 lps

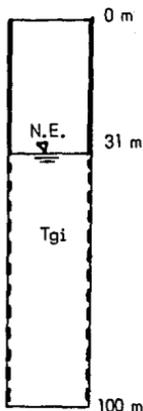
$\Delta s' = 7.5$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2,300}{4\pi\Delta s'} = 5.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



P-763

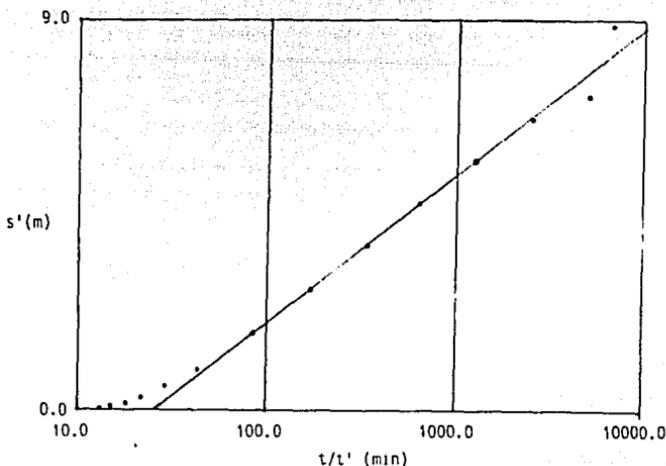


Q=46 lps

$\Delta s' = 3.35$  m/ciclo

Sustituyendo en:

$$T = \frac{2.300}{4\pi\Delta s'} = 25.1 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$



### VI.2.2 Pozos con aforo

Se utilizan los datos de tiempo de bombeo, caudal de descarga y abatimiento del nivel dinámico del agua de los pozos con aforo de las baterías Río Turbio y Ciudad, para obtener valores de transmisividad que ayuden a mejor valorar las características hidráulicas del sistema acuífero del VL, mediante la aplicación del método de solución de Cooper-Jacob para pruebas de bombeo escalonado, o sea, para pozos de bombeo con caudal de descarga variable.

Cabe hacer la aclaración que los aprovechamientos que estén cortando al Terciario Granular Indiferenciado y a la ignimbrita fracturada de la unidad Ignimbrita Cuatralba, estarán dando valores de transmisividad que se consideran representativos del efecto combinado del medio granular (Tgi) y de roca fracturada de la Ignimbrita Cuatralba. Para la interpretación de la prueba de bombeo de estos pozos se consideran las condiciones de flujo en la zona fracturada como de medio granular, debido a que el comportamiento macroscópico del flujo en dicha zona es no unidireccional y por lo tanto es similar al de un medio poroso homogéneo, aunque en realidad, como bien se

sabe, el medio es heterogéneo pues casi siempre existen una o dos direcciones preferenciales (Custodio y Llamas, 1976) de fracturamiento y flujo.

Para la aplicación de este método, se eliminaron todos los pozos que en su gráfica de media logarítmica ponderada del tiempo ( $t^*$ ) versus descenso específico ( $s/Q$ ) presentaran una recta con pendiente negativa, debido a que no es aplicable este método. Las causas que pudieran explicar este comportamiento, es: a) que el pozo esté en desarrollo y no en aforo; b) que el pozo esté recibiendo recarga, o bien; c) ambas cosas.

Será aplicable este método para los pozos que presentan en su gráfica de media logarítmica ponderada del tiempo ( $t^*$ ) versus descenso específico ( $s/Q$ ), una recta con pendiente positiva y que satisfagan los siguientes supuestos y condiciones (Kruseman y De Ridder, op. cit.):

- Los supuestos citados en la página 64, excepto el punto cuatro, que se sustituye por:
- Acuífero bombeado con un caudal de descarga variable.

Los pozos con datos de aforo, aunque no son específicamente pruebas de bombeo con caudal de descarga variable, muy bien pueden considerarse como tales en el sentido amplio de la palabra y tomando los resultados con ciertas reservas, sin que esto impida tener una mejor evaluación hidráulica del sistema acuífero.

El método de análisis consiste en sustituir el valor del descenso  $s$  por el descenso específico  $s/Q$  y aplicando el método de Cooper-Jacob al periodo total de bombeo. Se deberán satisfacer las condiciones específicas exigidas para la aplicación del método de Cooper-Jacob.

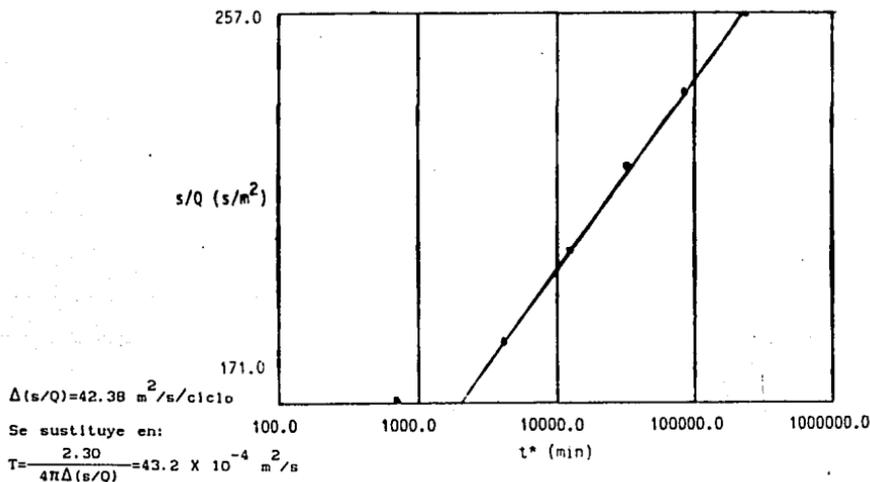
La ecuación (6) del subcapítulo VI.2.1 queda de la forma:

$$k_b = \frac{2.30}{4\pi\Delta(s/Q)} \quad (11)$$

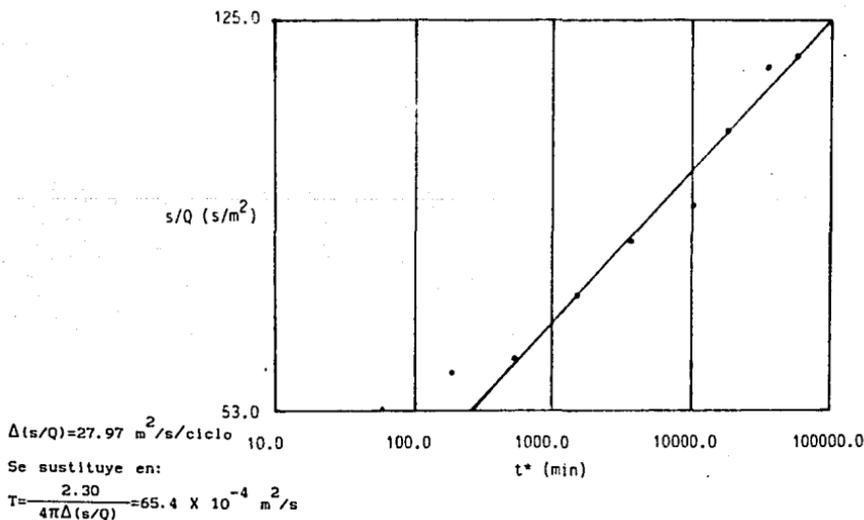
donde  $\Delta(s/Q)$  es la diferencia de descensos específicos por ciclo logarítmico de  $t^*$ . Este último valor corresponde a la media logarítmica ponderada de  $t$  y representa el tiempo en que se producirían los descensos del nivel del agua observados, si se hubiera bombeado a caudal de descarga constante e igual al caudal real durante el tiempo  $t$ .

A continuación se presentan las gráficas de prueba de bombeo escalonado y su respectiva solución para los pozos RT-6, RT-7, RT-9, RT-10, RT-12, CD-11, CD-19 y CD-20 (FIGURAS 11 a 18):

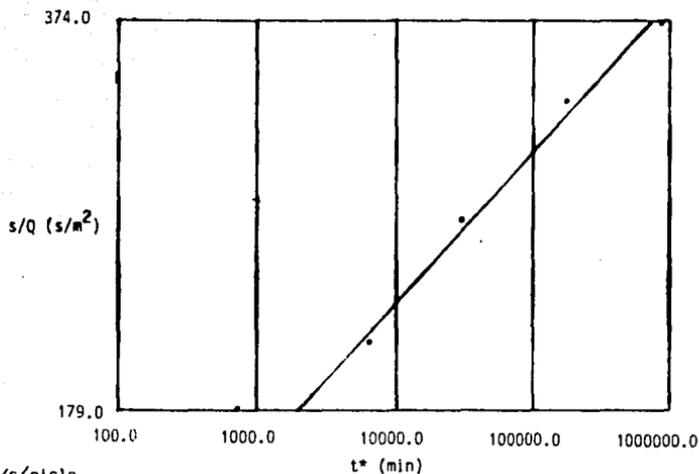
### RT-6



### RT-7



RT-9

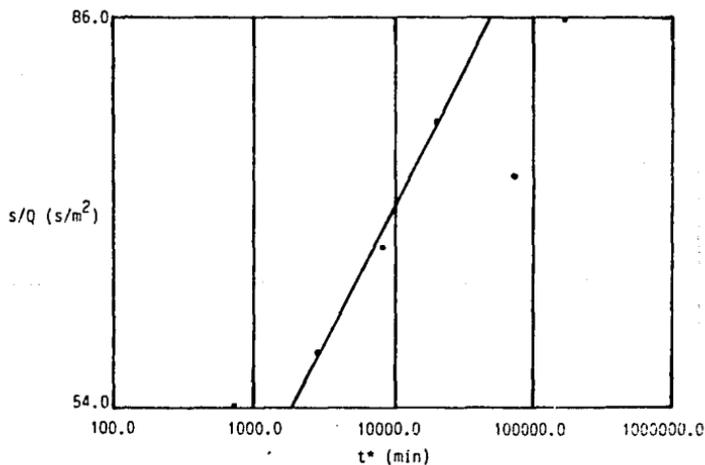


$$\Delta(s/Q) = 74.89 \text{ m}^2/\text{s/ciclo}$$

Se sustituye en:

$$T = \frac{2.30}{4\pi\Delta(s/Q)} = 24.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

RT-10

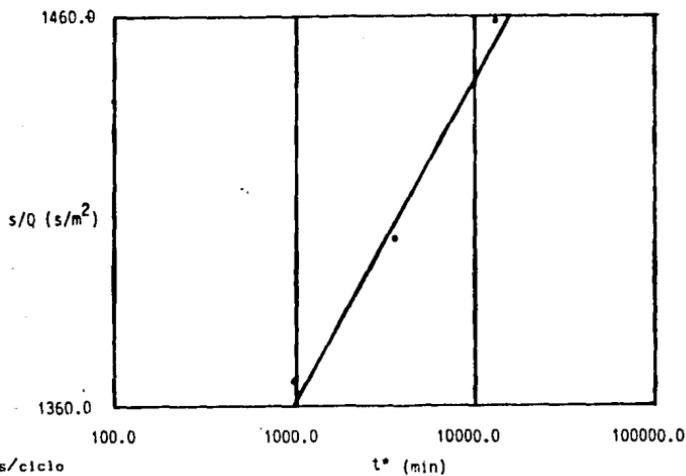


$$\Delta(s/Q) = 22.72 \text{ m}^2/\text{s/ciclo}$$

Se sustituye en:

$$T = \frac{2.30}{4\pi\Delta(s/Q)} = 80.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

RT-12

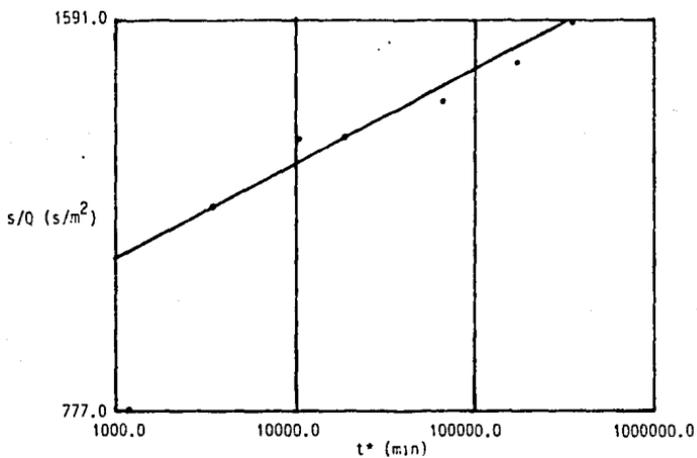


$$\Delta(s/Q) = 84.06 \text{ m}^2/\text{s}/\text{ciclo}$$

Se sustituye en:

$$T = \frac{2.30}{4\pi\Delta(s/Q)} = 22.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

CD-11

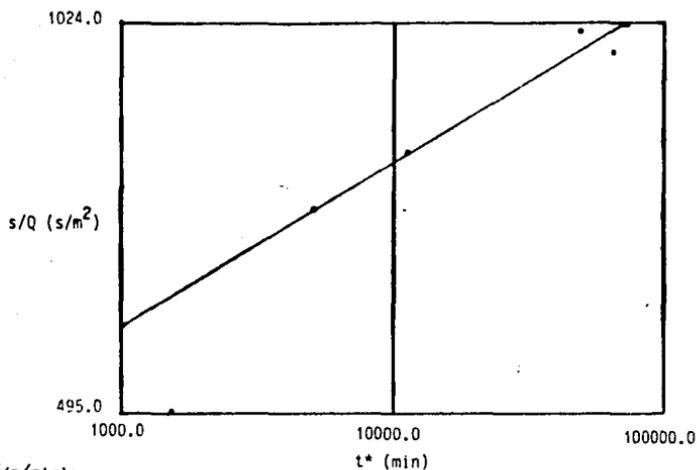


$$\Delta(s/Q) = 198.19 \text{ m}^2/\text{s}/\text{ciclo}$$

Se sustituye en:

$$T = \frac{2.30}{4\pi\Delta(s/Q)} = 9.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

CD-19

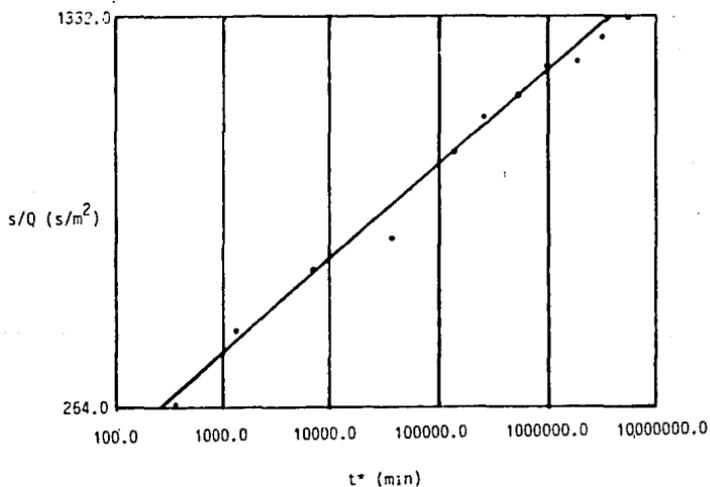


$$\Delta(s/Q) = 222.33 \text{ m}^2/\text{s/ciclo}$$

Se sustituye en:

$$T = \frac{2.30}{4\pi\Delta(s/Q)} = 8.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

CD-20



$$\Delta(s/Q) = 257.71 \text{ m}^2/\text{s/ciclo}$$

Se sustituye en:

$$T = \frac{2.30}{4\pi\Delta(s/Q)} = 7.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

VI.2.3 Relación caudal específico-transmisividad

Debido al escaso número de pruebas de bombeo para el VL, se usaron los datos de aforo de las baterías de pozos del SAPAL y de la zona de La Muralla (de estos últimos, ver Trujillo, 1987) para obtener cuando menos valores aproximados de transmisividad de las distintas unidades acuíferas del VL a partir de la gráfica caudal específico-transmisividad que se elaboró para esta área de estudio, a partir de los datos de gasto específico y transmisividad de los pozos con prueba de bombeo (FIGURA VI.19).

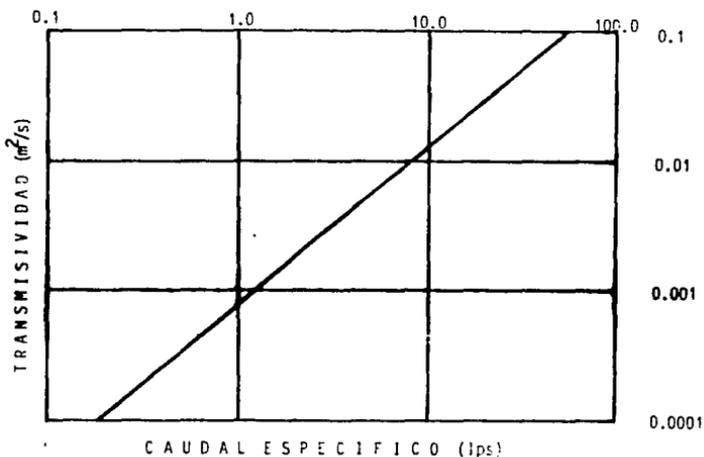


FIGURA VI.19

El método consiste en localizar en los ejes logarítmicos x e y los valores de gasto específico y de transmisividad, respectivamente, de los pozos con prueba de bombeo y encontrar los puntos de intersección y después trazar la recta que mejor se ajuste a tales puntos. Posteriormente se ubican sobre el eje de las abscisas los gastos específicos de los pozos a los que se les desconoce su transmisividad, luego se levantan desde los puntos de gasto específico, rectas ortogonales hasta encontrarse el punto de intersección con la recta de ajuste. Finalmente estos puntos de intersección se proyectan al eje de las ordenadas, conociendo así la transmisividad para cada uno de los aprovechamientos.

En el siguiente y último apartado de este subcapítulo, se presentan los resultados de algunos parámetros hidráulicos obtenidos mediante los

diversos métodos de análisis y la relación que guardan con el sistema acuífero.

### VI.2.4 Comentarios a manera de conclusión, concernientes a la relación que guardan los parámetros hidráulicos con el sistema acuífero

Antes de discutir los resultados hidráulicos obtenidos mediante el trabajo de análisis de las pruebas de bombeo y de la relación caudal específico-transmisividad, se presentan la TABLA VI.4 con los resultados de algunos parámetros hidráulicos y características de construcción de los pozos.

WELL	M.A.	S	D	D <sub>p</sub>	T	S	F.P.	F.T.A.P.	N.E.
		(m)	(ft)	(ft)	(m)	(ft)	(m)	(ft)	(m)
					(m <sup>2</sup> /s)	(m <sup>2</sup> /s)			
F-33	C-2	-	26.0	-	20.6	0.23	144	57-144	52.30
F-34	P-1	-	30.0	-	40.7	0.40	150*	48-160*	47.78
F-45	P-1	-	14.0	-	13.2	0.28	100*	57-100*	52.03
F-65	P-1	-	9.0	-	1.3	0.03	80*	38-80*	38.12
F-65	C-2	-	9.0	-	11.5	0.18	100*	36-100*	35.92
F-101	P-1	-	22.0	-	52.3	0.44	200*	80-200*	79.70
F-263	C-2	-	21.0	-	16.9	0.17	150*	48-150*	47.60
F-527	P-1	-	15.0	-	5.1	0.11	100*	52-100*	52.46
F-575	P-1	-	24.0	-	5.9	0.04	250*	85-250*	84.73
F-743	P-1	-	46.0	-	25.1	0.36	100*	31-100*	31.00
R1-6	P.E.	-	-	-	43.2	0.16	400	130-400	16.17
R1-7	P.E.	-	-	-	65.4	0.21	450	138-450	7.82
R1-9	P.E.	-	-	-	74.4	0.09	400	112-400	45.97
R1-10	P.E.	-	-	-	80.6	0.39	400	195-400	17.08
R1-12	P.E.	-	-	-	22.0	0.09	400	140-400	27.80
R1-11	P.E.	-	-	-	9.2	0.23	70	30-70	33.00
R1-19	P.E.	-	-	-	8.2	0.03	321	30-321	35.15
R1-20	P.E.	-	-	-	7.1	0.04	303	112-303	78.80
R1-1	Dp-1	20.31	11.7	0.574	4.0	0.02	350	150-350	90.87
R1-14	Dp-1	24.15	12.3	0.215	5.7	0.02	400	150-400	31.60
R1-2	Dp-1	25.02	34.9	1.356	7.6	0.04	350	150-350	23.50
R1-4	Dp-1	43.02	29.4	0.684	4.8	0.02	400	200-400	23.00
R1-5	Dp-1	10.34	25.4	2.447	27.0	0.07	400	90-400	56.94
R1-8	Dp-1	14.3	109.9	7.644	95.0	0.38	400	150-400	5.54
R1-13	Dp-2	7.50	56.2	7.707	89.0	0.36	350	100-350	43.00
CO-2	Dp-1	58.02	87.8	1.513	13.0	0.09	200	50-200	52.08
CO-6	Dp-1	34.92	12.2	0.349	2.4	0.01	235	65-235	34.70
CO-12	Dp-1	11.89	20.7	1.685	14.0	0.05	330	60-330	60.75
CO-15	Dp-1	4.40	6.0	2.045	18.5	0.19	150	20-150	52.00
CO-16	Dp-1	53.70	9.3	0.160	1.0	0.01	246	36-246	58.20
CO-17	Dp-1	53.56	18.6	0.368	7.5	0.01	350	30-350	9.50
CO-21	Dp-1	45.00	27.0	0.078	8.2	0.03	300	50-300	6.00
CO-22	Dp-1	13.00	4.9	0.379	2.5	0.01	500	100-500	96.00
CO-24	Dp-1	48.00	32.0	0.666	4.9	0.03	200	50-200	17.00
CO-29	Dp-1	23.54	12.2	0.363	3.9	0.02	300	50-300	89.70
CO-29	Dp-1	39.30	11.4	0.301	1.9	0.01	300	50-300	52.50
CO-37	Dp-1	57.00	13.0	0.225	1.4	0.01	145	20-145	8.40
CO-37-11	Dp-1	33.00	11.1	0.327	2.1	0.01	195	40-195	45.00
CO-37-11	Dp-1	24.23	10.5	0.449	3.0	0.02	215	40-215	64.40
CO-35	Dp-1	45.16	11.4	0.167	1.0	0.01	210	30-210	20.28
CO-36	Dp-1	56.10	15.9	0.283	1.8	0.01	300	50-300	7.35
CO-37	Dp-1	33.32	21.9	0.655	4.6	0.03	228	30-228	8.60
CO-25	Dp-1	6.03	9.3	1.471	12.0	0.08	250	60-250	101.35
CO-47	Dp-1	0.63	6.4	10.020	140.0	0.65	300	60-300	104.85
FLW-1	Dp-1	2.32	19.1	0.220	100.0	0.71	450	120-260	96.08
FLW-2	Dp-1	24.32	44.0	1.670	16.0	0.19	400	114-200	89.70
FLW-3	Dp-1	16.60	55.1	3.320	34.0	0.22	400	60-255	99.38
FLW-4	Dp-1	11.59	60.3	5.200	58.0	0.27	400	160-315	105.65

- APLICACION DE LA LEY DE DARIEN
- MÉTODOS DE ANÁLISIS
- ABASTECIMIENTO
- DIAGNÓSTICO
- ANÁLISIS ESPECÍFICO
- TRANSMISIVIDAD
- EFECTIVIDAD HIDRÁULICA
- F.L.A. PROFUNDIDAD DEL POZO
- F.L.A. PROFUNDIDAD DEL TRAMO DE ADEME BARRURADO
- N.º TUBERÍA ESTÁTICA
- DESCRIPCIÓN TUBO
- C.º RECUPERACIÓN DE THEISS
- E.L. BOMBEO ESCALINADO
- C.º TUBERÍA ESPECÍFICO VERSUS TRANSMISIVIDAD
- E.º TUBERÍA DE USO AGRÍCOLA EN EL VALLE DE LEÓN
- E.º TUBERÍA DE AGUA POTABLE DE LA BATERÍA RIO TURBID (SAPAL)
- E.º TUBERÍA DE AGUA POTABLE DE LA BATERÍA CIUDAD (SAPAL)
- E.º TUBERÍA DE LA ZONA DE LA MUPILLA (cer Trujillo, 1987)
- ANÁLISIS ESTIMADO
- MÉTODOS
- INDICADORES POR SEGUNDO
- INDICADORES POR SEGUNDO METRO
- MÉTODOS POR SEGUNDO

TABLA VI.4

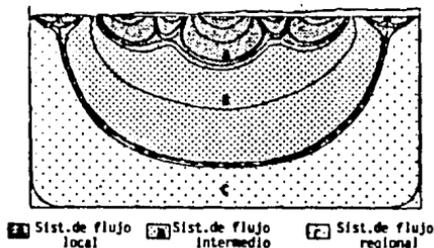
Como se pudo apreciar en la tabla anterior, los valores de conductividad hidráulica obtenidos, varían en valores del orden de  $0.770 \times 10^{-4}$  m/s (pozo CD-11) hasta valores bajos del orden de  $0.005 \times 10^{-4}$  m/s (pozo CD-16). Con el análisis de los valores de transmisividad obtenidos mediante las pruebas de bombeo y el método de caudal específico versus transmisividad y considerando las características de construcción de los aprovechamientos en donde se realizaron dichas pruebas y demás características esenciales, se obtuvieron valores de conductividad hidráulica representativos de la unidad Terciario Granular Indiferenciado y de los componentes de la unidad Ignimbrita Cuatralba. Para la unidad Terciario Granular Indiferenciado se obtuvo como conductividad hidráulica representativa el valor  $0.23 \times 10^{-4}$  m/s, en tanto que para los componentes ignimbrítico y tobáceo de la unidad Ignimbrita Cuatralba valores del orden de  $0.10$  y  $0.19 \times 10^{-4}$  m/s respectivamente. Para la unidad Andesita Bernalejo fué imposible obtener valores aproximados de conductividad hidráulica, debido a la escasa información con que se cuenta de su distribución en el subsuelo y por otra parte a que no se tienen pozos capaces de dar información única del comportamiento hidráulico de esta unidad, o sea, no existen pozos que estén cortando únicamente a esta unidad o por lo menos, que el tramo total de tubería ranurada se encuentre en esta unidad. Regresando al comportamiento hidráulico del Terciario Granular Indiferenciado y de los componentes de la Unidad Ignimbrita Cuatralba, se puede decir que comparativamente los mejores valores de conductividad hidráulica se presentan en unidades hidrogeológicas de medio granular sin que esto signifique que el componente ignimbrítico de medio fracturado de la unidad Ignimbrita Cuatralba presente mala conductividad hidráulica, por lo contrario, esta unidad es importante en el funcionamiento hidráulico subterráneo, como se verá en el subcapítulo de redes de flujo en perfil.

Por otra parte, este sistema acuífero libre heterogéneo sobreyace a un basamento en bloques prácticamente impermeable que puede estar representado por el Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato o por el Conglomerado Guanajuato dependiendo del lugar que se esté tratando y sin que esto cambie el modelo de funcionamiento de flujo del agua subterránea; lo que es muy importante en este tipo de basamento en bloques "escalonados" es la función que desempeñan dichos bloques en la conducción del flujo de agua subterránea, como se verá posteriormente.

### VI.3 Aspectos teóricos acerca de los sistemas de flujo de agua subterránea

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). Por lo tanto, la configuración de cualquier sistema de flujo se puede definir por aquellas superficies que engloban al sistema y la distribución espacial de los sistemas de flujo se llama patrón o distribución de flujo. Un conocimiento de este patrón, implica conocer la dirección e intensidad del flujo de agua subterránea en un punto cualesquiera de la región (Tóth, 1970).

Tóth (1963) sugirió que en la mayoría de las redes de flujo y áreas de campo se pueden diferenciar sistemas locales, intermedios y regionales de flujo de agua subterránea, como esquemáticamente se ilustra en la FIGURA VI.20, aclarando que donde exista un relieve local despreciable, sólo se desarrollarán sistemas regionales y por lo contrario, donde exista un relieve local pronunciado, se desarrollarán sistemas locales. Estos términos no son específicos, pero proveen una estructura cualitativa útil (Freeze and Cherry, 1979) y que Freeze y Witherspoon (1966, 1967, 1968) discuten ampliamente mediante una serie de modelos analíticos y numéricos experimentales de redes de flujo en perfil para sistemas heterogéneos, poniendo gran énfasis en la topografía y geología.



(tomado de Tóth, 1963)  
FIGURA VI.20

A continuación se definen los sistemas de flujo del agua subterránea y las componentes que los caracterizan:

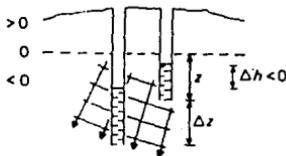
-Sistema de flujo local de agua subterránea. Es el sistema de flujo que tiene su área de recarga en un alto topográfico y el área de descarga en un bajo topográfico, es decir, localizados uno al lado del otro (Tóth, op. cit.).

-Sistema de flujo intermedio de agua subterránea. Es aquel sistema que aunque sus áreas de recarga y descarga no ocupan lugares de elevación alta y baja, respectivamente en la cuenca, uno o más altos y bajos topográficos se localizan entre ellos (Tóth, op. cit.).

-Sistema de flujo regional de agua subterránea. Un sistema de flujo se considera regional si el área de recarga ocupa la divisoria del agua (*water divide*) y el área de descarga se localiza en el fondo de la cuenca (Tóth, op. cit.).

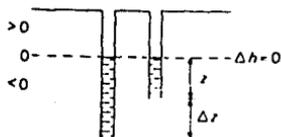
La FIGURA VI.20 ilustra que estos sistemas de flujo presentan tres componentes característicamente diferentes:

1. Un área de flujo vertical descendente (área de recarga), o sea, aquella parte del sistema en que la red de flujo saturada de agua subterránea se aleja del nivel freático (FIGURA VI.21).



(tomado de Domenico, 1972)  
FIGURA VI.21

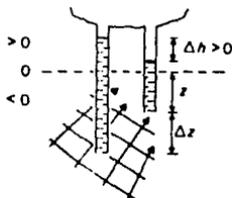
- 2 Un área de flujo lateral u horizontal (área de *mid-line* o *hinge line*), donde el movimiento del agua es aproximadamente paralelo al nivel freático (FIGURA VI.22).



(tomado de Domenico, 1972)

FIGURA VI.22

3 Un área de flujo ascendente (área de descarga), que es la parte del sistema en que la red de flujo saturada de agua subterránea se dirige hacia el nivel freático (FIGURA VI.23).



(tomado de Domenico, 1972)

FIGURA VI.23

En cuencas con materiales geológicos isótropos homogéneos, la topografía puede crear sistemas complejos de flujo de agua subterránea. La única ley inmutable es que los terrenos topográficamente altos son áreas de recarga y terrenos topográficamente bajos son áreas de descarga. Para la mayoría de las configuraciones topográficas más comunes, la línea media (*mid-line* o *hinge line*) se encuentra más cercana a los fondos de los valles que a las partes topográficamente altas (Freeze and Witherspoon, 1967). En una carta hidrodinámica, las áreas de descarga comúnmente constituyen sólo el 5-30 % de la superficie total de una cuenca (Freeze and Cherry, 1979).

Aunque la heterogeneidad y la anisotropía modifican los detalles del patrón de flujo (Freeze and Witherspoon, op. cit.), las propiedades básicas de la geometría del flujo permanecen sin cambiar bajo estas condiciones (Tóth, 1970).

La heterogeneidad geológica es de gran importancia debido a que (Freeze and Witherspoon, 1967):

-Puede tener un efecto profundo sobre el flujo de agua subterránea regional.

y afectar:

-la interrelación entre sistemas locales y regionales,

-al patrón superficial de áreas de recarga y descarga y

-las cantidades de flujo que son descargadas a través de los sistemas.

#### VI.4 Rasgos indicadores de sistemas de flujo

Los rasgos superficiales del flujo de agua subterránea incluye todas las observaciones que pueden ser usadas para averiguar la ocurrencia del flujo; por lo tanto, la comprensión de tal ocurrencia superficial del agua del subsuelo requiere del conocimiento de la naturaleza de los "afloramientos" de agua subterránea (Meyboom, 1966), o sea, de rasgos indicadores de sistemas de flujo.

Los trabajos de Meyboom (1966, 1967), Tóth (1966, 1972), Mifflin (1968) y (Ophori and Tóth, 1989b), muestran la gran relación que existe entre la descarga y recarga hidráulicas del agua subterránea y los fenómenos naturales que ocurren en el campo. Por lo tanto, uno de los principales objetivos de campo consiste en estimar el patrón de flujo del agua subterránea, tanto como las manifestaciones o indicadores de campo lo permitan (Tóth, 1989b).

Los rasgos observados en campo pueden ser producto del agua superficial, del agua subterránea o de ambos. Es evidente, por consiguiente, que áreas donde el agua subterránea se mueve hacia la superficie terrestre, poseerá mayor humedad por arriba de la zona saturada que áreas donde el agua subterránea se aleja de la superficie terrestre. Consecuentemente, áreas de movimiento ascendente del agua subterránea (áreas de descarga) estarán caracterizadas por manantiales, filtración o "lloraderos" (*seepage*), niveles freáticos someros, pozos brotantes, aguas con alta conductividad eléctrica, altos índices de sólidos totales disueltos, freatofitas, precipitación de sales, cosechas "quemadas" ("*burnt crops*"), arenas movedizas, disminución de humedad y algunos tipos de construcciones hechas por el hombre (Tóth, 1972; Ophori and Tóth, 1989b) aprovechando estas circunstancias. En áreas con movimiento descendente del agua subterránea (áreas de recarga) estarán determinadas por: deficiencia

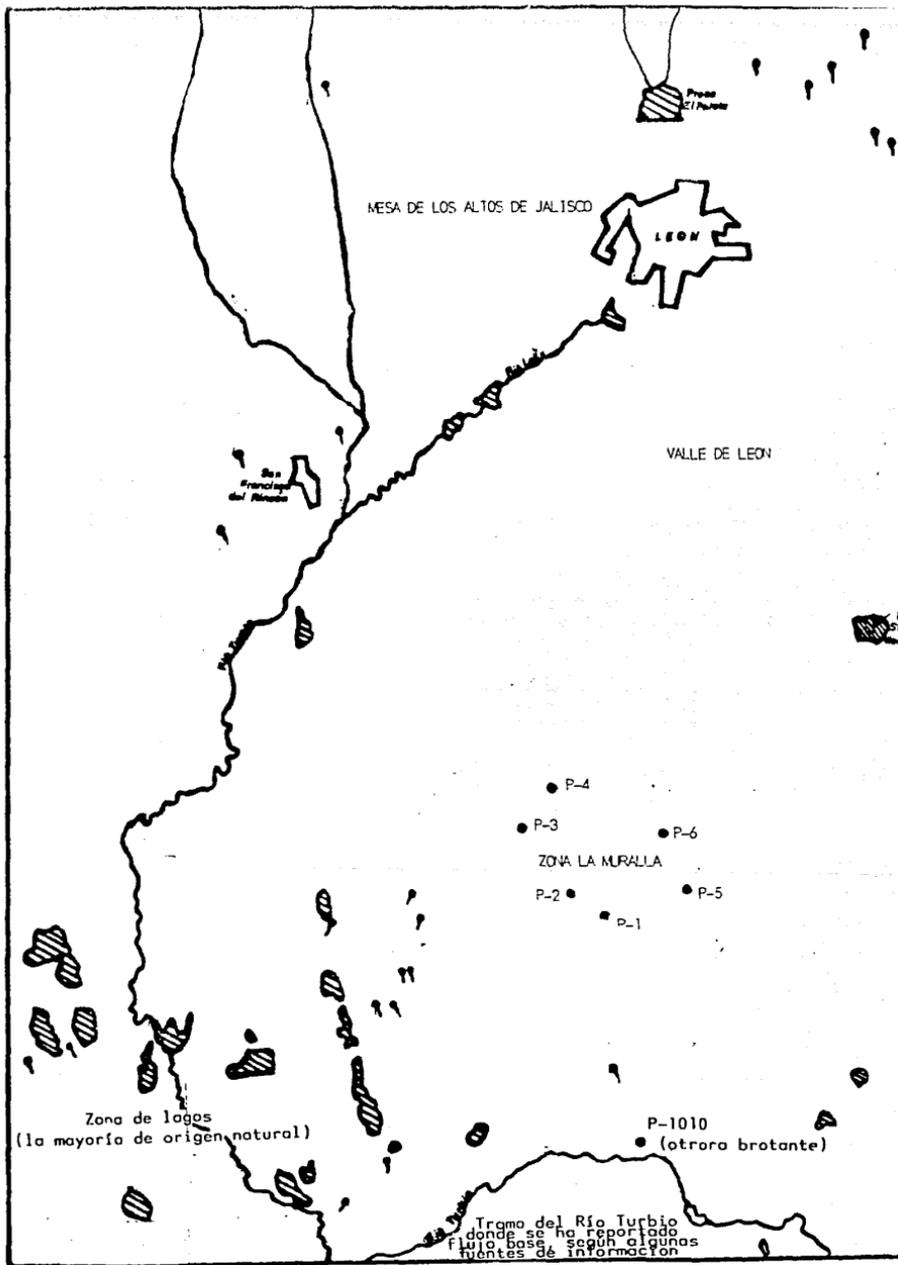
de humedad conteniendo una conductividad eléctrica relativamente baja, mínimas concentraciones de sólidos totales disueltos, freatofilas (pueden o no estar presentes), niveles freáticos relativamente profundos y en general, carencia de rasgos de descarga como los anteriormente mencionados (Tóth, 1972; Ophori y Tóth, 1989b).

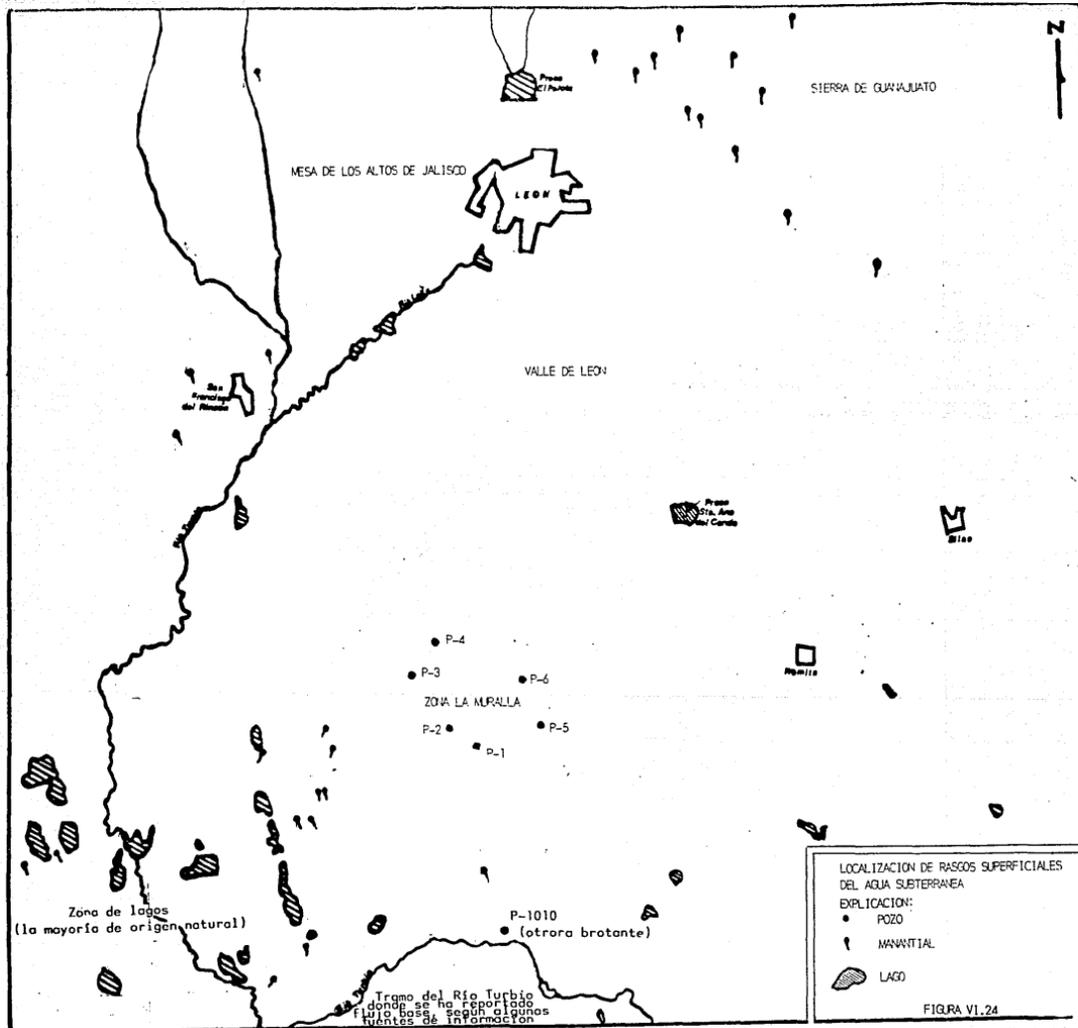
Durante las visitas de campo que se realizaron al área de estudio, se consideraron de utilidad todos los rasgos indicadores de campo para poder estimar el patrón de flujo del agua subterránea. Estos indicadores son: topografía, clima, mediciones piezométricas, patrones hidroquímicos (que se tratarán en el capítulo siguiente), manantiales, pozos brotantes, flujo base (*base flow*) y vegetación. En la FIGURA VI.24 se muestra la localización de estos indicadores de sistemas de flujo.

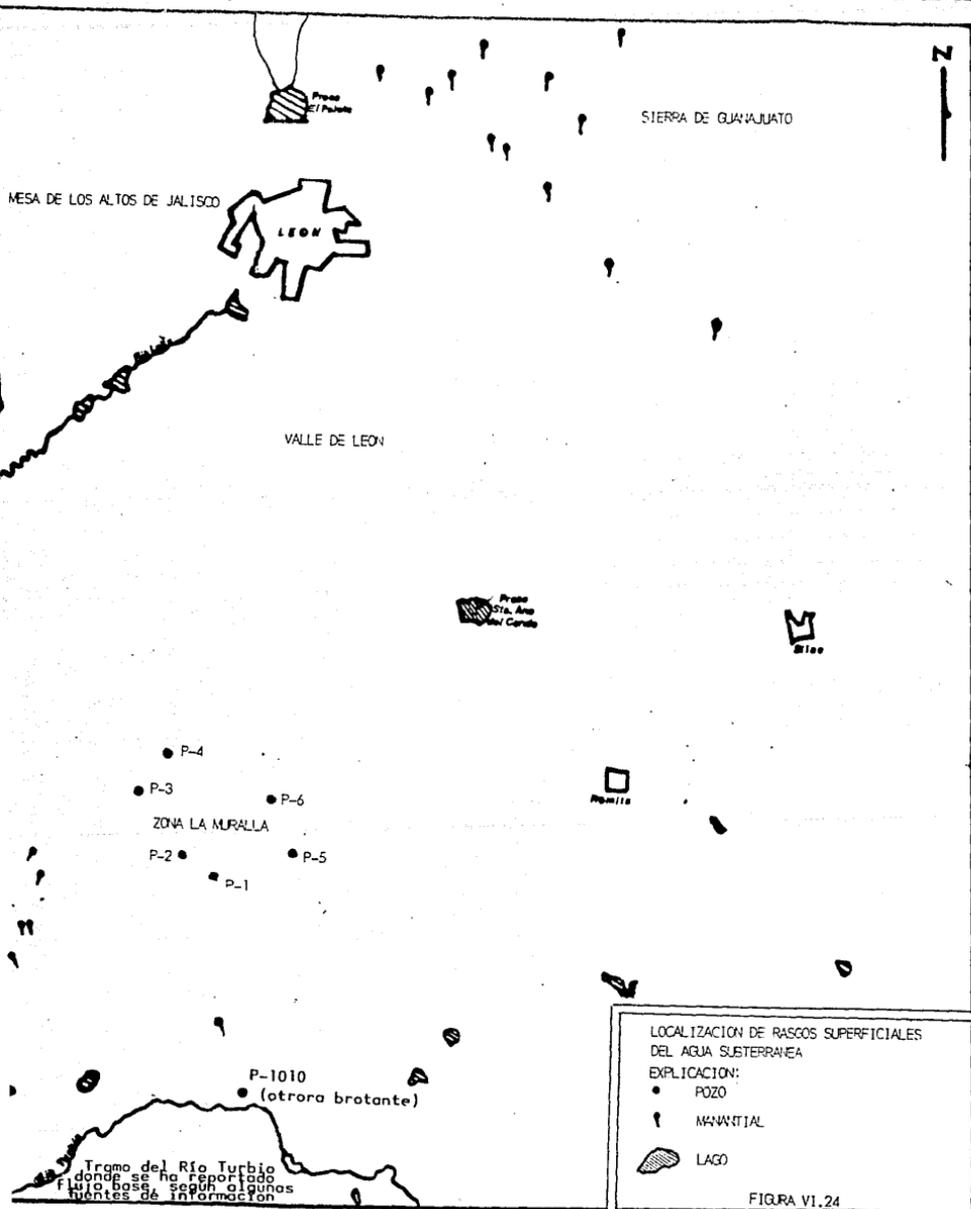
Con la conjunción de estos rasgos se pudo obtener un modelo de caracterización del patrón de flujo del agua subterránea para el VL.

A continuación se hace una descripción de estos indicadores de campo, pero aclarando primeramente, que estos rasgos o indicadores son sólo válidos para regiones áridas o semiáridas, donde el agua no es lo suficientemente abundante como para enmascarar u ocultar los efectos superficiales del flujo del agua subterránea (Domenico, 1972).

**Topografía.** Este indicador es bastante obvio y permite suponer que la dirección de flujo del agua subterránea se dirige de las partes topográficamente altas (áreas de recarga) hacia las partes topográficamente bajas (áreas de descarga) o como lo define Hubbert (1940), el flujo siempre ocurrirá de regiones donde los valores de carga hidráulica son altos hacia regiones con valores bajos de carga hidráulica. Entonces, como es de suponer, la dirección del flujo en el área de estudio, es de la SG y Altos de Jalisco hacia la zona del VL o hacia zonas más alejadas y con menor valor de carga hidráulica, como es el caso del VRT. Esto quiere decir que el VL no necesariamente es una área de descarga, al menos en condiciones actuales, como se probará posteriormente. Bien vale la pena manifestar en este momento que el movimiento del agua a través de la zona de saturación ocurre en respuesta a las fuerzas de gravedad y presión. La gravedad, de hecho, actúa de forma tal que hace que el agua descienda, sin embargo, las fuerzas de presión pueden provocar movimiento del agua en flujo ascendente, por lo tanto, generalmente no es correcto decir que "el agua se mueve







cuesta abajo (*downhill*)" cuando se refiere al agua del subsuelo (Anderson, 1987).

También es importante señalar que la configuración del nivel freático tiene gran influencia y control sobre el patrón de distribución de flujo del agua subterránea y de su velocidad. En áreas donde la configuración del nivel freático es una réplica de la topografía, las propiedades de las características geométricas de la superficie terrestre pueden ser sustituidas con buena aproximación para calcular los patrones de flujo (Tóth, 1970). En el VL, actualmente esta superficie potenciométrica se encuentra distorsionada, distinguiéndose claramente un cono de abatimiento en el centro del valle, debido al constante bombeo de los aprovechamientos de uso agrícola y potable principalmente. Esto quiere decir que no existe una superficie freática -por lo menos en el VL- que se aproxime a la configuración topográfica del terreno en tiempos actuales. Ahora bien, bajo condiciones iniciales, es de suponer que hubo una gran aproximación entre la topografía del terreno y la superficie freática del sistema acuífero. Esto probablemente pone en evidencia la existencia de áreas de descarga en el VL, como bien se puede ver en las redes de flujo en perfil bajo condiciones iniciales, pero esto corresponde al subcapítulo VI.5.

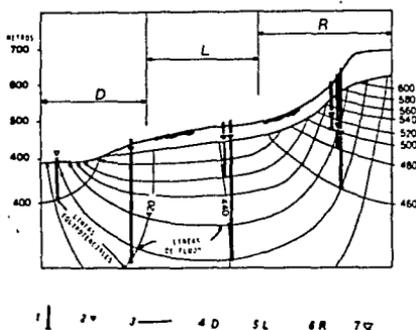
Actualmente la topografía del VL, presenta una pendiente descendente dominante NNE-SSW.

Existen pequeñas componentes de flujo subterráneo en dirección NE-SW y NW-SE, pero que pueden ser asumidas como regionalmente despreciables comparadas con la componente NNE-SSW; por consiguiente, este flujo puede ser considerado principalmente bidimensional y con esta última dirección.

Clima. Los principales factores climatológicos que afectan ciertas parámetros del régimen del agua subterránea son la precipitación, la temperatura del aire y la evapotranspiración actual. Por lo tanto, dentro de una región con una topografía y geología dada, el balance entre la recarga y descarga atmosférica determinan la configuración del nivel freático, que a la sazón de las cosas es el límite superior de la región de flujo saturado y los factores mencionados son los que controlan el desarrollo del patrón de flujo (Tóth, 1970). En regiones con un exceso de precipitación, el nivel freático será una réplica más exacta de la topografía, resultando en un máximo de posible diferencia de flujo

potencial, en cambio en áreas con precipitación deficiente, el relieve del nivel freático es menos acentuado resultando en una menor diferencia de potencial de flujo y bajo número de sistemas de flujo local (Tóth, op. cit.). En el caso del VL, muy bien se puede ver que pertenece a una región de clima semiárido, donde la superficie freática en principio, guardaba una estrecha relación con el relieve de terreno, pero actualmente esta relación ha ido a menos, teniendo actualmente una superficie freática distorsionada por la constante extracción del agua subterránea

**Mediciones piezométricas.** El indicador más directo para determinar el sistema de flujo del agua subterránea son las mediciones piezométricas, aunque rigurosamente, una superficie potenciométrica es sólo válida para flujo horizontal en acuíferos horizontales; por lo tanto, la condición de flujo horizontal sólo se encuentra en acuíferos con conductividades hidráulicas mucho más altas que en capas confinantes asociadas (Freeze and Cherry, 1979). Realmente, esto quiere decir que si un plano potenciométrico se configura a partir de datos obtenidos de pozos con diferentes profundidades, la superficie obtenida es un compuesto de mediciones de potencial (Domenico, 1972), debido a que en la realidad se presentan componentes de flujo vertical, como se muestra didácticamente en la FIGURA VI.25 modificada de Mifflin (1968).



1. Piezometro; 2. Nivel estático; 3. Nivel freático; 4. Área de descarga;
5. Área de flujo lateral; 6. Área de recarga; 7. Pozo brotante

(modificado de Mifflin, 1968)

FIGURA VI.25

Mediante la gráfica generalizada de profundidad del pozo versus profundidad del nivel estático del agua, propuesta por Freeze y Cherry (1979), se pudo establecer que en el VL, existen componentes de flujo descendente asociados a áreas de recarga (FIGURA VI.26a). En zonas tectónicas, como el caso de la región del bajío, se presentan componentes verticales tanto ascendentes como descendentes, asociados a sistemas de flujo de agua subterránea y que están fuertemente influenciados por la topografía y geología; en este último caso la litología y las estructuras tectónicas (bloques "levantados" y "caídos") del basamento impermeable son de gran relevancia en el movimiento del flujo del agua subterránea en el plano x-z. Abundando más en este tema, se puede decir que también se localizaron en este tipo de gráfica, los pozos con profundidad del nivel estático del VRT (FIGURA VI.26b), del estudio de Geohidrológica Mexicana (1979), con lo que se hace una comparación rápida entre la piezometría actual para el VL y la piezometría del VRT de hace diez años, donde se hace evidente que los pozos del VL corresponden a una zona de flujo descendente (área de recarga) y los del VRT a zonas de flujo lateral y de flujo ascendente (área de descarga). Generalmente, la comparación piezométrica se debe hacer en pozos con lecturas piezométricas del mismo mes y año, sin embargo, a falta de datos piezométricos actuales para el VRT, se consideraron los de Geohidrológica Mexicana (1979), sin que esto obstaculize la interpretación del flujo del agua subterránea.

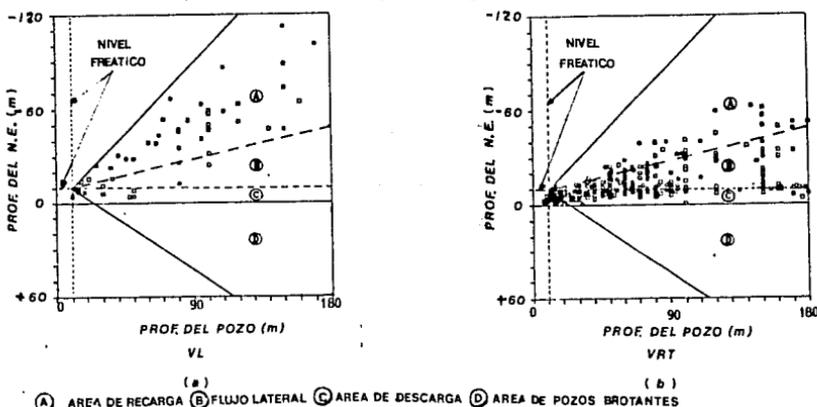


FIGURA VI.26

También a partir de la piezometría se pudo establecer que en el VL, las profundidades del nivel estático son mayores con respecto a las del VRT (FIGURA VI.26a y VI.26b), lo que aunado a zonas de componentes verticales asociadas con áreas de recarga y descarga, significa que el VL es una área de recarga y en el VRT es donde se descargan los sistemas de flujo regional del agua subterránea. Esto está relacionado con el hecho de que en zonas de recarga, el nivel estático será más profundo, conforme la profundidad del pozo aumente, mientras que en zonas de descarga, el nivel estático será menos profundo, cuanto más profundo sea el pozo.

Vale la pena no desdeñar que durante la medición piezométrica se pudo constatar -como un indicador más- que en algunos pozos se lograba escuchar como el agua caía desde la zona saturada hacia el NE del pozo (comúnmente se dice "le llueve al pozo") lo que apoya aún más la propuesta de flujo descendente (área de recarga) en el VL.

El análisis de la dirección del flujo del agua subterránea se hizo a partir de secciones verticales (redes de flujo en perfil), pero en principio, se elaboraron los planos compuestos de configuración de profundidad y elevación del nivel estático del agua (FIGURAS VI.27 y VI.28), los que presentaron una dirección general del flujo desde los límites del valle hacia el centro, es decir, que la dirección de flujo del agua subterránea converge en un punto central del valle, formando un cono de abatimiento inducido por el constante bombeo del agua subterránea. Esta dirección de flujo inducida por el hombre, existe pero no es la única ni la principal dirección de flujo; esto quiere decir que existe una dirección general de flujo del agua subterránea que se dirige aproximadamente de NNE a SSW, desde zonas con alto valor de carga hidráulica (áreas de recarga) hasta descargarse en zonas con menor valor de carga hidráulica. Este aseveración es válida, debido a que no se encontró ninguna clase de indicador que refutara tal argumento, por el contrario, existen evidencias de componentes de flujo vertical ascendente en el VRT. Las evidencias más obvias son los diversos manantiales y lagos naturales que "afloran" en esta área, además del pozo surgente P-1010.

Con todo esto, se puede decir que los planos del nivel del agua únicamente representan la dirección general del flujo del agua subterránea (Tóth, 1966), pero siempre y cuando no interfiera en ello un cono de abatimiento; esto tal vez no pueda ser una generalización, pero al menos en

21° 11' 15" N

20° 57' 30" N

101° 05' W

A AGUAS CALIENTES

LEON DE ALVARO  
CARRANZO DE TORRES

CO-37 PALOTE-4  
CO-38 CD-36  
PRESA  
EL PALOTE  
CO-20 CO-21

LEON

PLAN DE AYALA

PURHOMA DE REYDON

SAN FRANCISCO  
DEL MONTE

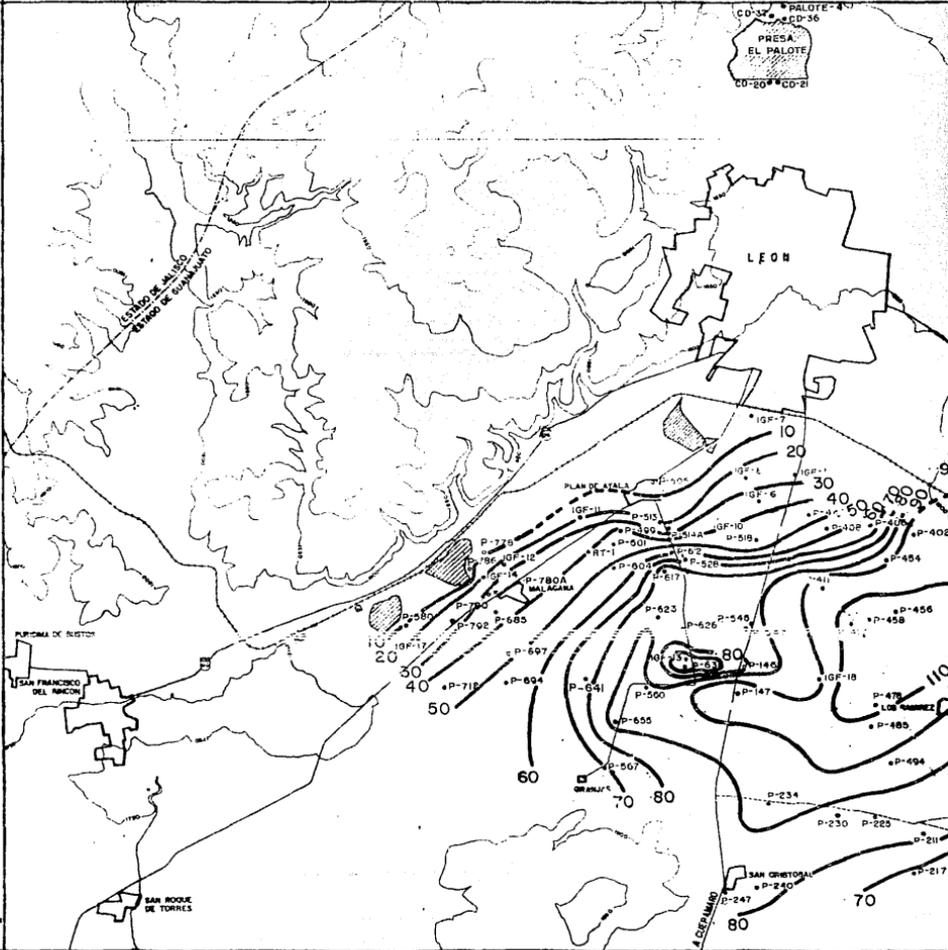
780A  
MALAGARA

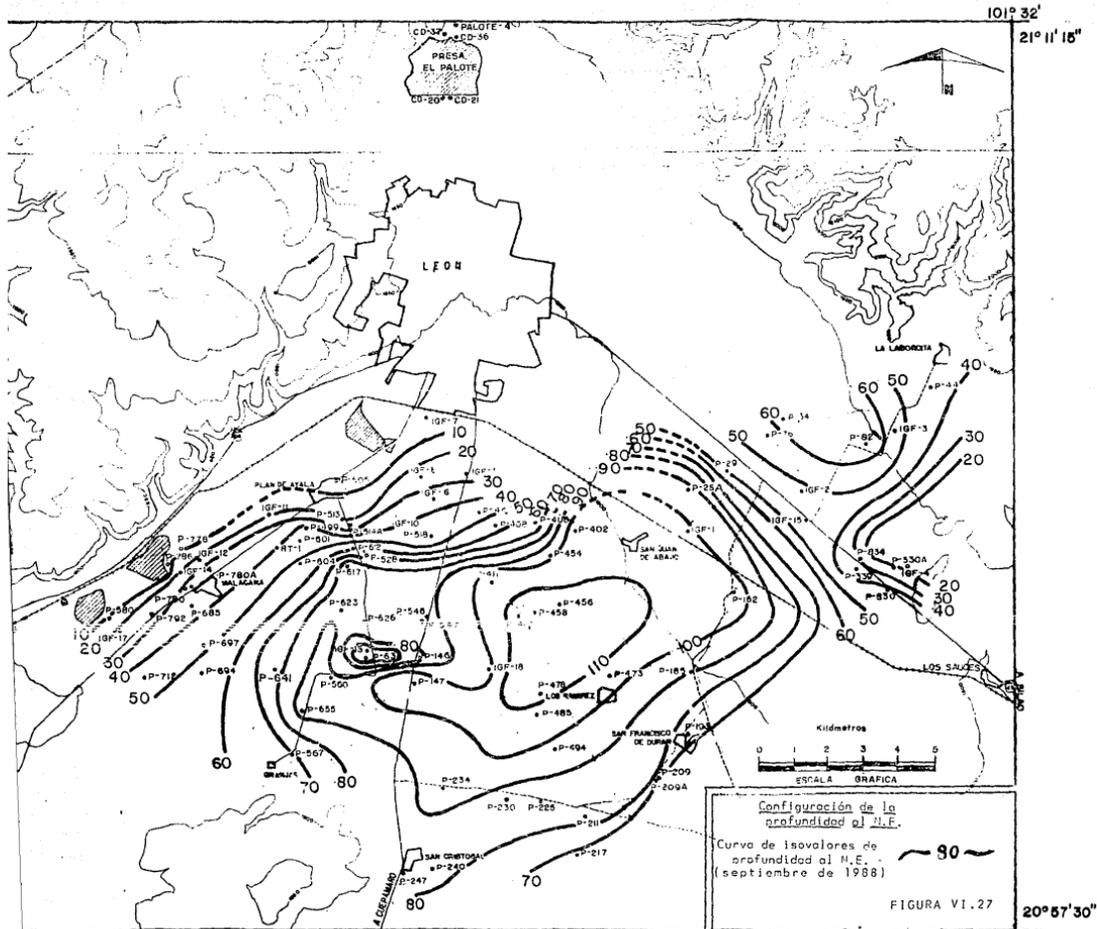
SAN ROQUE  
DE TORRES

SAN CRISTOBAL

A DEFAMAS

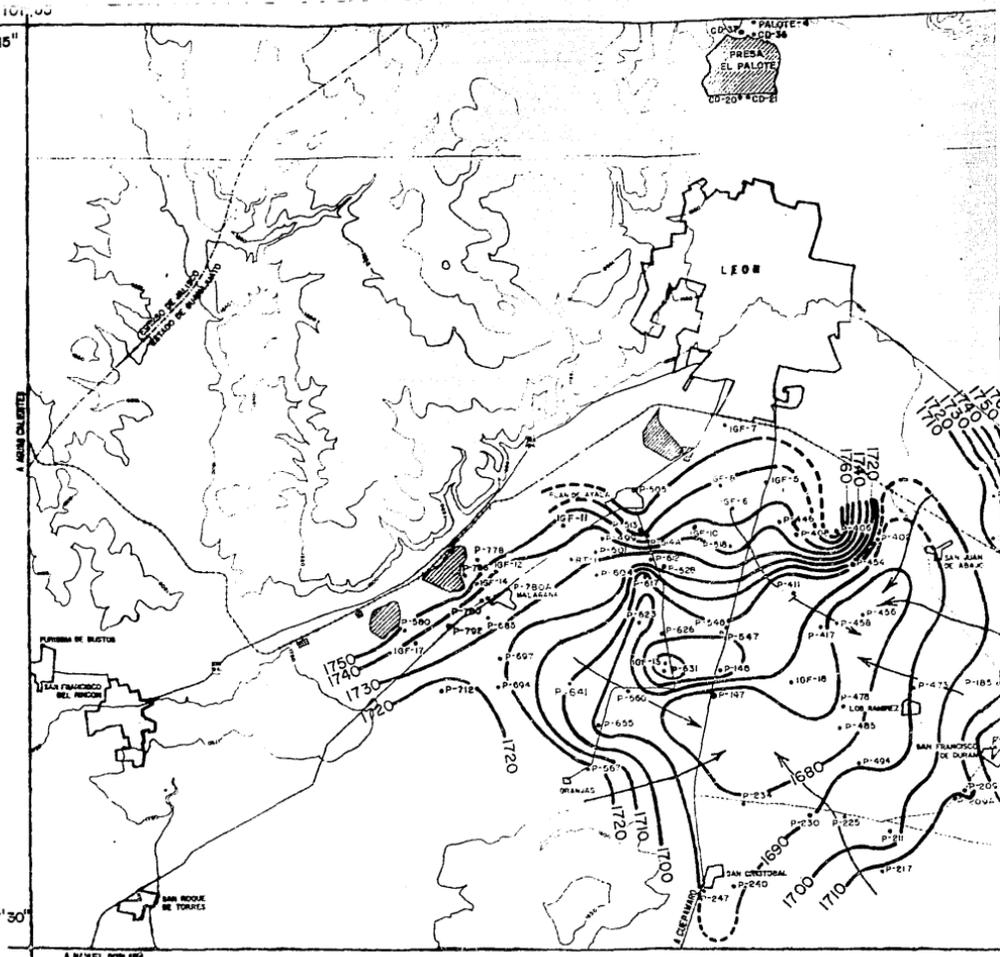
A MANUEL DOBLADO





101.00  
21° 11' 15" N

20° 57' 50" N



101.00  
A MICHAEL DOBLAS



el VL así ocurre. Por eso, es de vital importancia considerar siempre el comportamiento del flujo subterráneo en planta y en secciones e interpretar gráficas de profundidad del pozo versus profundidad del nivel estático del agua.

**Manantiales.** Conociendo las características físicas y químicas de los manantiales y su localización dentro del ambiente hidrogeológico, éstos son indicadores de campo importantísimos en la búsqueda de zonas de descarga de sistemas de flujo. En el VL se localizan algunos manantiales (FIGURA VI.24) en las parte altas que rodean al valle (Sierra de Guanajuato y Altos de Jalisco) representando pequeñas áreas de descarga de sistemas de flujo local, los que están controlados por factores estratigráficos y/o estructurales; por ejemplo, cuando el agua subterránea discurre a través de materiales permeables de poco espesor, ocasionando que las trayectorias de flujo sean pequeñas, constituyendo sistemas de flujo local.

En el VRT existe otro número de manantiales (FIGURA VI.24) no tan reducido como los del VL, que están descargando aguas de sistemas de flujo tanto local como regional y que son bien diferenciados a partir del análisis comparativo de la calidad química del agua y de la temperatura.

**Pozos brotantes.** Los principales factores que controlan la presencia de un pozo brotante son la topografía y el ambiente geológico de un lugar determinado. En el sur del VRT existe el pozo P-1010, otrora brotante, el cual se encuentra principalmente controlado por la topografía. Anticipadamente, se puede decir que este pozo no está explotando agua del sistema en cuestión, sino en la zona de descarga del sistema adyacente, como se puede apreciar en la red de flujo en perfil que se presenta en el siguiente subcapítulo.

**Flujo base (base flow).** El análisis del flujo base de los ríos a partir de la información de Geohidrológica Mexicana (1979) y Ariel (1982a), ofrece fundamentos para reiterar que el VRT funciona como área de descarga del agua subterránea. Esta información previa señala que en años anteriores hasta antes de la década pasada, los ríos del sur del VRT siempre llevaban agua y en "aguas arriba" sólo en épocas de lluvias, lo que significa que en esta área el agua subterránea se descargaba continuamente. Actualmente,

esta evidencia no existe, debido a que los grandes volúmenes de agua subterránea que se extraen de este sistema acuifero (VRT) han provocado que el abatimiento del nivel freático esté por debajo de los cauces de los ríos.

**Vegetación.** La vegetación en general no fué buena indicadora del comportamiento del agua subterránea. Particularmente las freatofitas, que son buenas indicadoras de zonas de descarga y recarga, como lo han hecho notar los trabajos de Meinzer (1927) y Meyboom (1966, 1967), para el VL no fueron funcionales.

Con todo lo dicho hasta ahora, ya se puede entrever que para hacer el análisis de las condiciones hidrodinámicas del sistema acuifero del VL, es necesario recurrir a todas las opciones posibles que ayuden a mejor conceptualizar a dicho sistema, pero sin caer en elucubraciones inoperantes.

A continuación se tratará el subcapítulo de redes de flujo en perfil, donde se darán detalles acerca de su construcción, aplicación e interpretación en el análisis de los sistemas de flujo del agua subterránea.

#### **VI.5 Redes de flujo en perfil**

Un sistema de flujo de agua subterránea puede ser representado por un conjunto tridimensional de superficies equipotenciales y líneas de flujo correspondientes. Si a través de este sistema tridimensional se selecciona una sección bidimensional, el conjunto de líneas equipotenciales y líneas de flujo es lo que se conoce como red de flujo. La construcción de las redes de flujo es una de las más importantes herramientas analíticas para el análisis del flujo del agua subterránea (Freeze and Cherry, 1979).

A manera de breve semblanza, se puede decir que Hubbert (1940) fué el primero en presentar una red de flujo (FIGURA VI.29) dentro del contexto de lo que se conoce como flujo regional y probablemente lo hizo de manera gráfica, pero fué Tóth (1962, 1963) quién lo llevó formalmente a cabo de manera matemática (Freeze and Cherry, 1979). La contribución más importante de estos dos artículos de Tóth, es el concepto básico de que el exacto patrón de flujo del agua subterránea puede ser obtenido matemáticamente

como solución a formales problemas de valor límite (Freeze, 1969). Finalmente, Freeze y Witherspoon (1966, 1967, 1968) realizan un análisis teórico del flujo de agua subterránea regional a partir de modelos analíticos y numéricos de redes de flujo en perfil bajo régimen permanente, observando el efecto general que imponen la topografía, la geología y la relación entre la profundidad del sistema con respecto a su extensión lateral en la distribución de sistemas de flujo de agua subterránea. Posterior a estos trabajos de investigación, se hicieron una serie de estudios de carácter hidrogeológico con la aplicación de estos principios teóricos referentes al estudio hidrodinámico en cuencas de agua subterránea (*groundwater basins*); como ejemplos clásicos, destacan los trabajos de Mifflin (1968), Freeze (1969b) y Hitchon (1969a, 1969b). Actualmente no son raros los estudios hidrodinámicos del agua subterránea aplicando redes de flujo en perfil en algunas partes del mundo, pero en México desafortunadamente ocurre lo contrario.

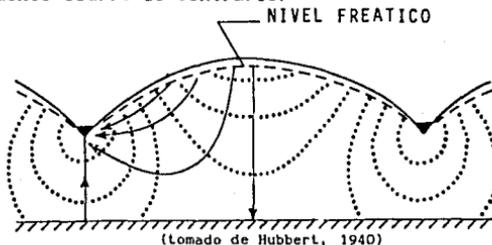


FIGURA VI.29

#### VI.5.1 Construcción gráfica de la red de flujo en perfil

En la construcción de la red de flujo en perfil, se juzgó conveniente utilizar la sección geológica A-A' (FIGURA v.3a), debido a que cruza al área de estudio con una orientación aproximada NNE-SSW, además de presentar datos interpretativos del subsuelo lo suficientemente fehacientes como para no caer en errores de este tipo. Por otra parte, esta sección geológica se tuvo que ampliar hasta el VRT, en su intersección con el río del mismo nombre, cercano al poblado San Juan de La Puerta, zona que se considera como parte del área de descarga del sistema de flujo regional, como quedó establecido con los rasgos indicadores de sistemas de flujo.

Considerar a esta sección geológica como la conveniente para la construcción de una red de flujo en perfil, no es un caso fortuito, sino

que concuerda ampliamente con lo expuesto por Freeze y Witherspoon (1967), donde establecen que una sección bidimensional será la representativa de una cuenca tridimensional, siempre y cuando esta sección atraviese totalmente a una cuenca de agua subterránea (*groundwater basin*) en forma paralela a la dirección de buzamiento o inclinación del nivel freático (Freeze and Witherspoon, 1967), en otras palabras, esto quiere decir que una red de flujo en perfil debe ser paralela a la dirección general del flujo subterráneo.

Una vez elegida la sección geológica como futura red de flujo en perfil, se convino en:

- Cambiar convenientemente la escala vertical de la sección geológica para una mejor exposición e interpretación de la red de flujo.
- Construir la sección, utilizando las unidades hidrogeológicas y sus componentes como unidades independientes y delimitándolas en todo su contorno. Esto se llevó a cabo de forma tal, que finalmente se obtuvo una sección idealizada en la que sobresalen las unidades Terciario Granular Indiferenciado, los componentes ignimbrítico y tobáceo de la Ignimbrita Cuatralba, el Basalto Dos Aguas y el Basalto El Cubilete.
- También se obtuvo la geometría del basamento impermeable que contiene a todo el sistema acuífero y que juega un papel muy importante en la distribución de los sistemas de flujo del agua subterránea.
- Posteriormente, se establecieron los límites de la red de flujo. Para el establecimiento de estos límites se estimó necesario considerar lo propuesto por Hubbert (1940), quien fué el primero en solucionar cualitativamente el problema de las condiciones de límite. Este autor sugiere que en una sección bidimensional con un sistema de flujo en un medio isótropo homogéneo habrá una simetría suficiente como para considerar la mitad del sistema de flujo, creándose así límites verticales por debajo del parteaguas topográfico y del fondo del valle a través de los cuales no existe flujo (FIGURA VI.29). Estos límites impermeables imaginarios son conocidos como divisorias de agua subterránea (*groundwater divide*). En topografías y ambientes hidrogeológicos más complejos estos límites no serán verticales, como es el caso de esta tesis, pero que en principio se asumieron como límites verticales impermeables, por el simple hecho de desconocer su disposición al inicio de la construcción de la red de flujo. El

límite inferior que subyace al sistema acuífero se consideró como límite impermeable irregular debido a su origen tectónico y según lo manifiesta la interpretación "topográfica" del basamento de las secciones geológicas presentadas anteriormente. Este basamento es de gran importancia en el control del patrón de flujo del agua subterránea, como se puede apreciar en la red de flujo. Finalmente, se optó por considerar el nivel freático como límite superior no impermeable del sistema, dando por hecho que existen condiciones de régimen permanente, debido a que la posición del nivel freático es relativamente estable durante la recarga anual por precipitación, como se pudo constatar al conocer las evoluciones piezométricas anuales del área de interés, o sea, comparativamente las fluctuaciones anuales del nivel freático son pequeñas ante el espesor total vertical del sistema. Si esto es válido para condiciones actuales, aún con los grandes volúmenes de extracción de agua subterránea mediante los innumerables aprovechamientos de la región, es de esperarse que en condiciones iniciales, esta suposición es más válida, debido a la nula explotación del agua subterránea. Por lo tanto, la configuración del nivel freático se supuso como una réplica del nivel del terreno, con una profundidad cercana a los diez metros, pensando en que esa magnitud está dentro de los límites normales esperados, en un nivel freático, para condiciones naturales.

Una vez obtenida la sección representativa del ambiente hidrogeológico del sistema (FIGURA VI.30), se le asignó a cada unidad hidrogeológica o a sus componentes, el valor de conductividad hidráulica horizontal representativa de cada una de ellas, tomados de los resultados de las pruebas de bombeo y caudal específico versus transmisividad. Posteriormente, hubo la necesidad de asignarles valores de conductividad hidráulica vertical, con el fin de obtener un modelo hidrodinámico más cercano a la realidad, para eso fué necesario asumir las siguientes decisiones: 1) el sistema acuífero del VL es un sistema acuífero libre heterogéneo anisótropo, pero parcialmente tratado bajo ciertas condiciones particulares, apropiadas para el manejo idóneo de todas las definiciones teóricas que sirven en la conceptualización de este sistema, pero siempre y cuando estas suposiciones sean en principio válidas; 2) las unidades de

medio granular fueron consideradas anisotrópicas homogéneas y, para fines prácticos, se les asignó una conductividad hidráulica vertical veinticinco órdenes menor que la permeabilidad horizontal, lo que estaría dentro de los rangos reportados por Hantush (1964), Freeze y Cherry (1979) y Ophori y Tóth (1989b), para estos tipos de material; 3) las unidades de medio fracturado se consideraron isotrópicas homogéneas, porque presentan patrón de fracturamiento cuando menos en las direcciones x y z, los cuales corresponden a direcciones de permeabilidad intrínseca horizontal y vertical de características muy similares y por lo tanto, misma conductividad hidráulica. Esta última aseveración se basa en que el material granular al momento de depositarse, sus partículas buscan la mejor disposición de acomodo, formando estratificaciones y por lo tanto una mejor permeabilidad en el plano x que en el plano z, caso que no ocurre con el medio fracturado, donde el patrón de fracturamiento es muy similar en ambos planos preferenciales x y z; con estos argumentos es sencillo entender porque se ha considerado a los medios granulares como anisótropos homogéneos y a los medios fracturados como isotrópicos homogéneos.

El siguiente paso consistió en colocar el mayor número posible de datos de carga hidráulica de igual número de aprovechamientos que estuvieran lo más cercano posible a la sección. Para eso fué necesario hacer lo siguiente: 1) proyectar en la sección los aprovechamientos con carga hidráulica; 2) localizar en el punto medio del tramo de tubería ranurada el valor promedio de carga hidráulica de la porción de acuífero que esté en comunicación con ese aprovechamiento (Custodio y Llamas, 1976; Anderson, 1987); 3) hacer la corrección del valor de carga hidráulica, de forma tal que el valor obtenido sea lo más cercano a las condiciones iniciales del sistema, para eso fué necesario conocer, a partir de información piezométrica de estudios anteriores, cómo pudo ser el comportamiento evolutivo anual de los niveles estáticos y así obtener cargas hidráulicas en tiempos cuando menos anteriores al inicio de las verdaderas etapas no despreciables de explotación del agua subterránea de esta región, que bien pudo ser en la década de los 30's y que si bien no son condiciones iniciales, son casi iniciales, que ya es una buena aproximación.

Posteriormente se configuraron isovalores de carga hidráulica. Esta configuración se lleva a cabo considerando la Ley de la Tangente, que tiene

sus fundamentos en el principio que establece que cuando líneas de flujo de agua subterránea cruzan un límite geológico entre dos formaciones con diferente conductividad hidráulica, éstas se refractan, tal como lo hace la luz cuando pasa de un medio a otro. Sin embargo, en contradicción a la Ley de Snell, que es la Ley del Seno, la refracción del agua subterránea lo hace obedeciendo a la Ley de la Tangente, que expresada matemáticamente es (Freeze and Cherry, 1979):

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} \quad (12)$$

Para una explicación más exacta de esta ley y su aplicación, el lector se puede remitir a autores como: Hubbert (1940), Freeze y Witherspoon (1967), Freeze (1969), Domenico (1972), Custodio y Llamas (1976), Freeze y Cherry (1979), Todd (1980), etc.

Otro punto importante en esta configuración de cargas hidráulicas de igual valor, es la intersección de las líneas equipotenciales con los límites del sistema. Por un lado, cuando las equipotenciales se encuentran con un límite impermeable, su comportamiento no necesariamente tiene que ser el de una línea que se interrumpe ortogonalmente, sino que presenta un cierto ángulo de inclinación, debido a que en realidad el sistema es un medio anisótropo; y por otro lado, cuando las equipotenciales se interrumpen con el nivel freático, el cual es el límite superior del sistema, el comportamiento no necesariamente será de ortogonalidad, sino que presentará al igual que las líneas de flujo, un ángulo oblicuo, debido a las características anisotrópicas del medio.

Una vez realizada la configuración, el siguiente paso consiste en trazar las líneas de flujo, considerando que cuando estas líneas son interrumpidas por algún límite impermeable, éstas serán desviadas cambiando su trayectoria hasta llegar a zonas de flujo ascendente (área de descarga). Estas líneas de flujo no serán ortogonales a las líneas equipotenciales, cuando estén fluyendo en medios anisótropos, como es el caso de la unidad Terciario Granular Indiferenciado ( $K_h=0.23 \times 10^{-4}$  m/s y  $K_v=0.0092 \times 10^{-7}$  m/s) y componente tobáceo de la unidad Ignimbrita Cuatralba ( $K_h=0.19 \times 10^{-4}$  m/s y  $K_v=0.0076 \times 10^{-7}$  m/s). Cuando el medio por donde fluye el agua subterránea se considere isótropo, como el caso del componente ignimbrítico de la unidad Ignimbrita Cuatralba ( $K=0.10 \times 10^{-4}$  m/s), la relación que guardan en

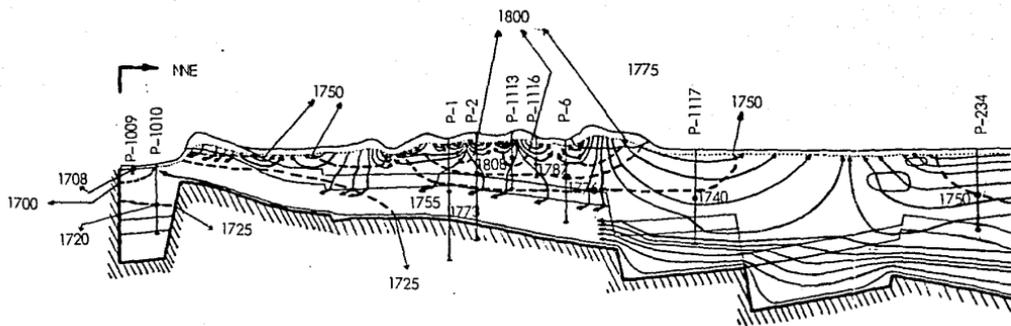
el espacio las líneas de flujo y equipotenciales será de ortogonalidad. Como los medios granulares de este sistema son de carácter anisótropo, fué necesario recurrir a la construcción de la elipse inversa de conductividad hidráulica, para la determinación de la dirección real del flujo, tomando como válida la relación de conductividades hidráulicas horizontal y vertical, igual a veinticinco órdenes ( $K_x/K_z=25$ ), ésto con base en lo explicado anteriormente (pp.95-96). Para la aplicación de esta elipse inversa de conductividad hidráulica el lector se puede remitir a la fuente original (Liakopoulos, 1965) o también a Freeze y Witherspoon (1967), Freeze (1969), Freeze y Cherry (1979), entre otros más.

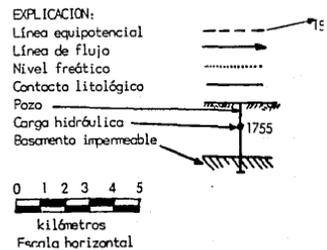
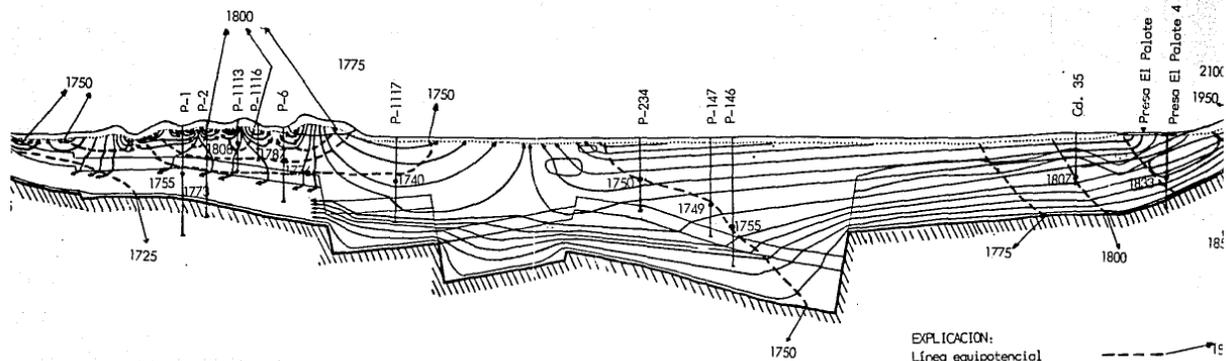
Construida la red de flujo en perfil (FIGURA VI.30), la siguiente fase de trabajo es la interpretación cualitativa de la misma y que se tratará en el siguiente apartado.

#### VI.5.2 Interpretación cualitativa de la red de flujo en perfil

La red de flujo en perfil construida (FIGURA VI.30), muestra la ubicación de las áreas de recarga, flujo lateral (*midline*) y áreas de descarga de la cuenca de agua subterránea (*groundwater basin*) y los tipos de sistemas de flujo y su distribución espacial para condiciones iniciales. Resulta claro apreciar en esta red de flujo bajo condiciones iniciales, que esta cuenca de agua subterránea (*groundwater basin*) estaba caracterizada por los tres tipos de sistemas de flujo (local, intermedio y regional). Los sistemas de flujo local se localizaban en la zona de La Muralla, zona que se caracteriza por estar conformada por pequeños lomerios; los sistemas de tipo intermedio se presentaban en la zona de La Muralla y en el VL (actualmente, parece ser que no existen sistemas de flujo intermedio en el VL); por último, los de tipo regional, que como su definición lo indica, son las líneas de flujo que se recargan en las partes topográficamente más altas y se descargan en el fondo del valle, o sea, en las cercanías del Río Turbio (VRT).

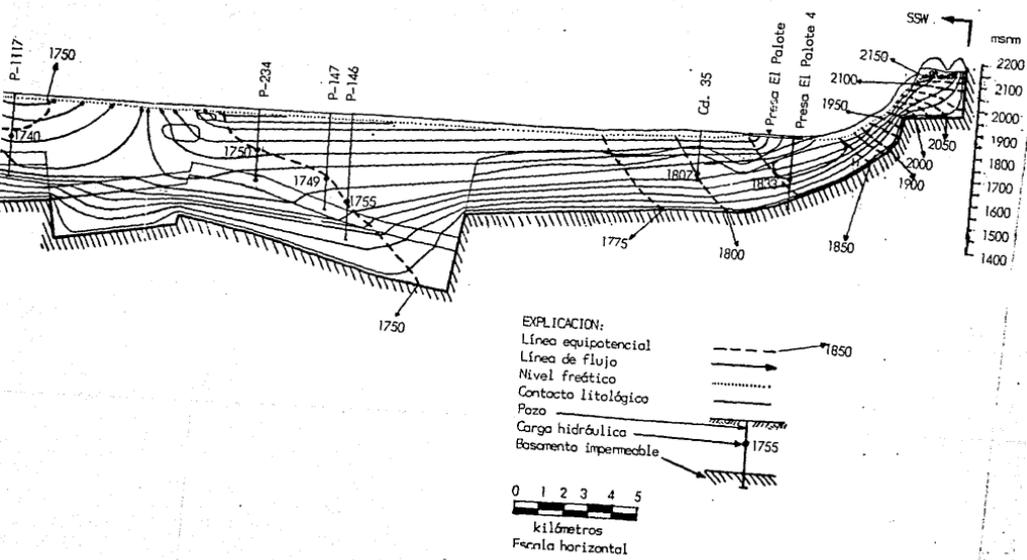
Es importante recalcar que en condiciones iniciales, existían sistemas de flujo intermedio que descargaban sus aguas en el sur del VL (al norte del poblado Plan de Guajuato), pero que actualmente no existen, debido a las alteraciones hidrodinámicas provocadas por el constante bombeo de los pozos de uso agrícola, potable e industrial principalmente.





RED DE FLUJO EN PERFIL EN CONDICIONES INICIALE

FIGURA VI.30



RED DE FLUJO EN PERFIL EN CONDICIONES INICIALES

FIGURA VI.30

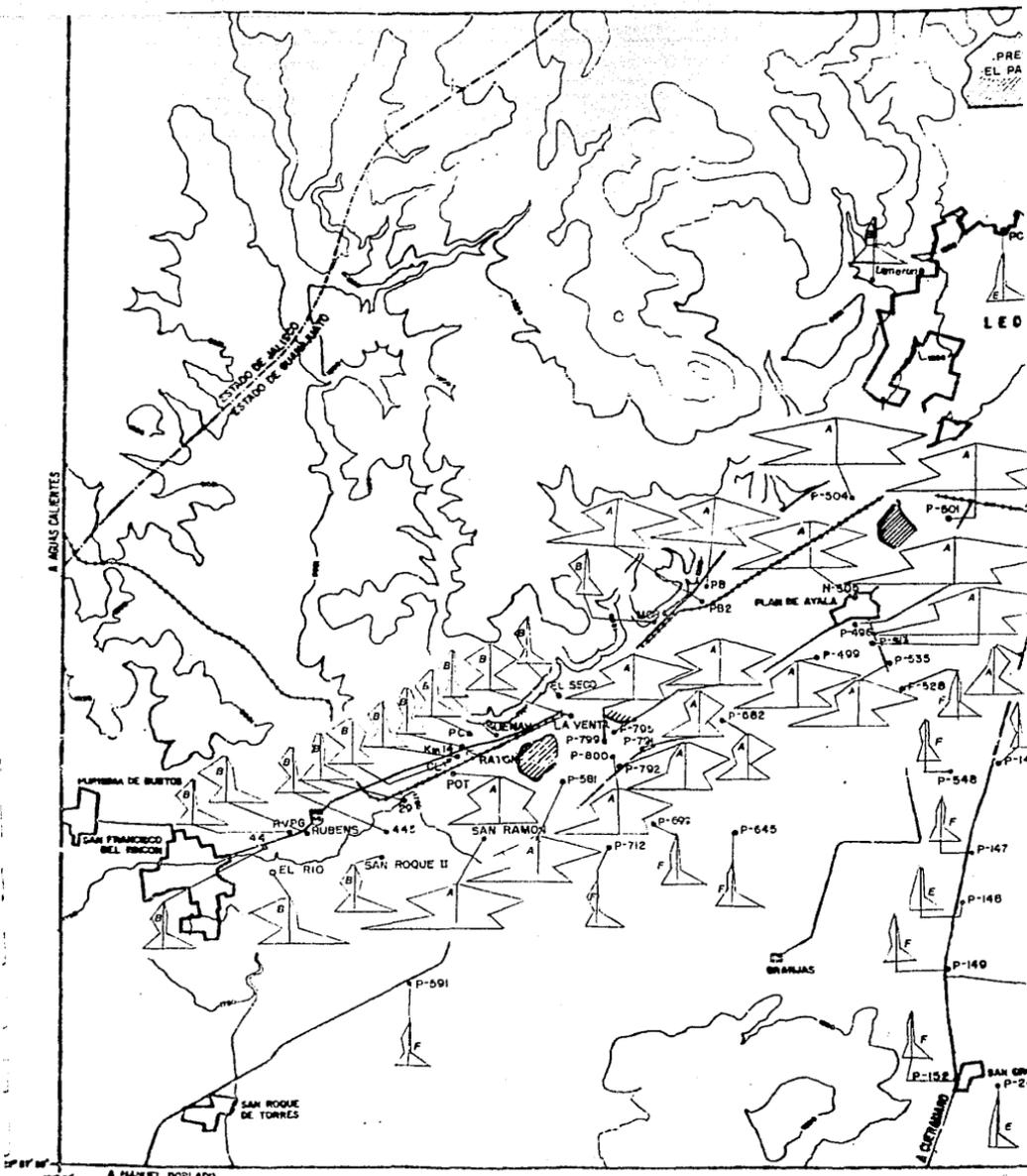
## VII HIDROGEOQUIMICA

### VII.1 Diferenciación química del agua subterránea

El conocimiento de la calidad química del agua subterránea y su distribución espacial es importante desde el punto de vista de la disponibilidad para el abastecimiento de agua y para la información que puede dar acerca de la dirección de movimiento del agua y extensión de los sistemas de flujo del agua subterránea (Erdélyi and Gálfi, 1988).

De la recolección de muestras de agua, llevadas a cabo por el IGF (1991) se pudo determinar, entre otros elementos, el contenido de materia disuelta en los distintos puntos del sistema acuífero. Para eso fué necesario en esta tesis, que los resultados de las muestras fueran interpretadas con el conocimiento disponible de las características constructivas de los pozos. Si el pozo admite agua de todo el material saturado, el agua bombeada representará una mezcla de la calidad del agua en el sentido vertical y estará en función del espesor y transmisividad del medio, ubicación de la zona ranurada del pozo y tiempo de bombeo; por eso fué importante juzgar el intenso bombeo de los pozos, ya que trae como consecuencia, aumento del espesor de mezcla de agua subterránea. Por lo tanto los resultados se manejaron con la mayor discreción posible con el fin de no caer en errores de interpretación, que a la postre fueran adversos en la conceptualización del sistema acuífero del VL.

**Diagramas de Stiff.** Con los resultados de los análisis químicos de las muestras de agua, se construyeron los diagramas de Stiff, que facilitan la inspección y comparación visual de los resultados químicos de cada uno de los elementos analizados (FIGURA VII.1). Con esta representación gráfica se pudieron establecer seis grupos bien diferenciados de agua subterránea del sistema acuífero del VL (grupos A, B, C, D, E y F), de los cuales, los tres primeros (ver FIGURA VII.1) se consideraron aguas contaminadas, como lo demostraron los altos contenidos de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , y  $\text{Ca}^{++}$ ; además de los altos índices de Cr y  $\text{NO}_3^-$ , en algunas de estas muestras. El origen de la contaminación es principalmente por las actividades industrial, agrícola y doméstica que se han acrecentado notablemente en los últimos años. También huelga decir que existen factores naturales, responsables de los cambios en la calidad química del agua subterránea, como puede ser el incremento en Cr y  $\text{Mg}^{++}$ , detectados en algunas muestras de agua del oriente del valle, tal



PRE  
EL PA

LEO

A AGUAS CALIENTES

ESTADO DE YUCATAN  
ESTADO DE QUINTANA ROO

Leonardo

PLAN DE AYALA

LA VENTRA

RAICAN

RUBENS

SAN RAMON

EL RIO

SAN ROQUE II

SAN ROQUE DE TORRES

LA CAYMAN

SAN FRANCISCO DEL RINCON

A DANIEL DOBLADO

A SAN FRANCISCO DEL RINCON

A SAN ROQUE II

A SAN RAMON

A SAN ROQUE DE TORRES

A CAYMAN

A SAN FRANCISCO DEL RINCON

A SAN ROQUE II

A SAN RAMON

A SAN ROQUE DE TORRES

A CAYMAN

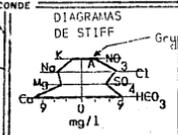
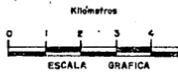
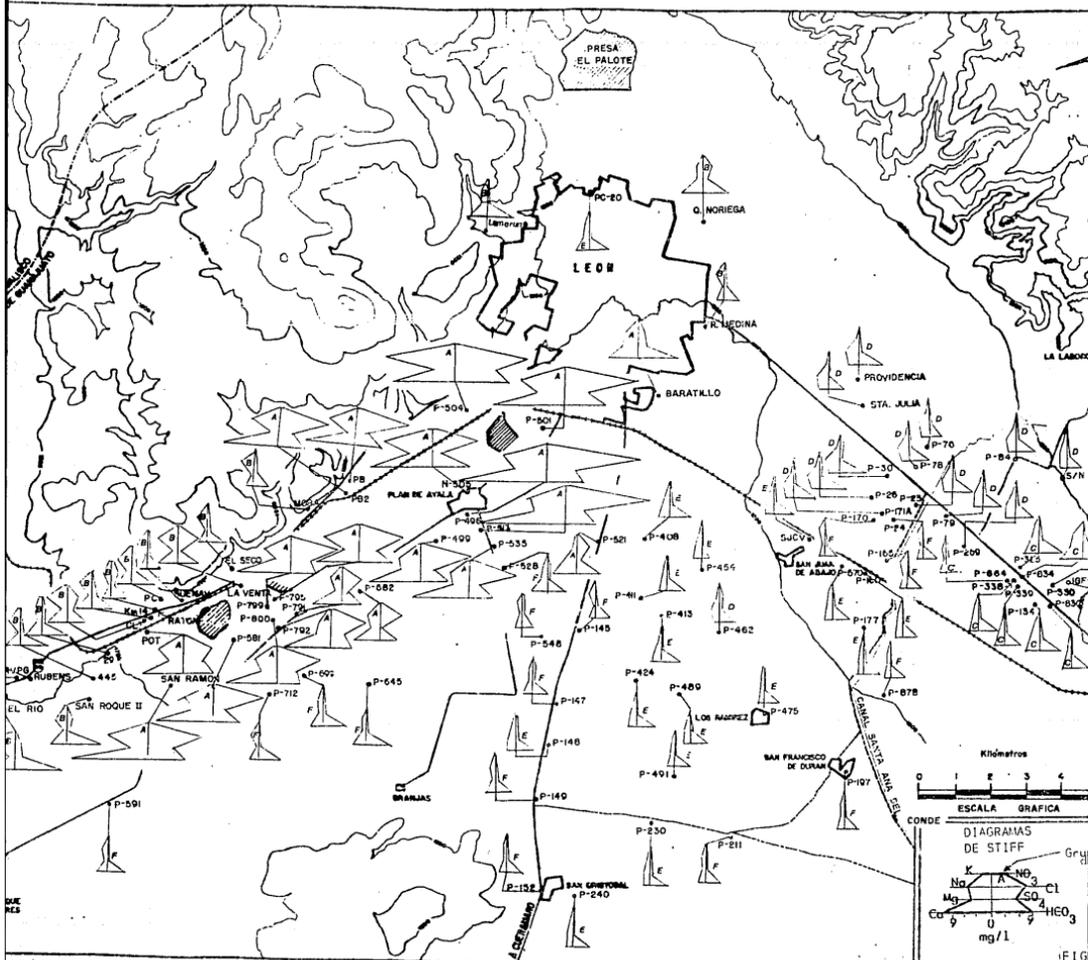
A SAN FRANCISCO DEL RINCON

A SAN ROQUE II

A SAN RAMON

A SAN ROQUE DE TORRES

A CAYMAN



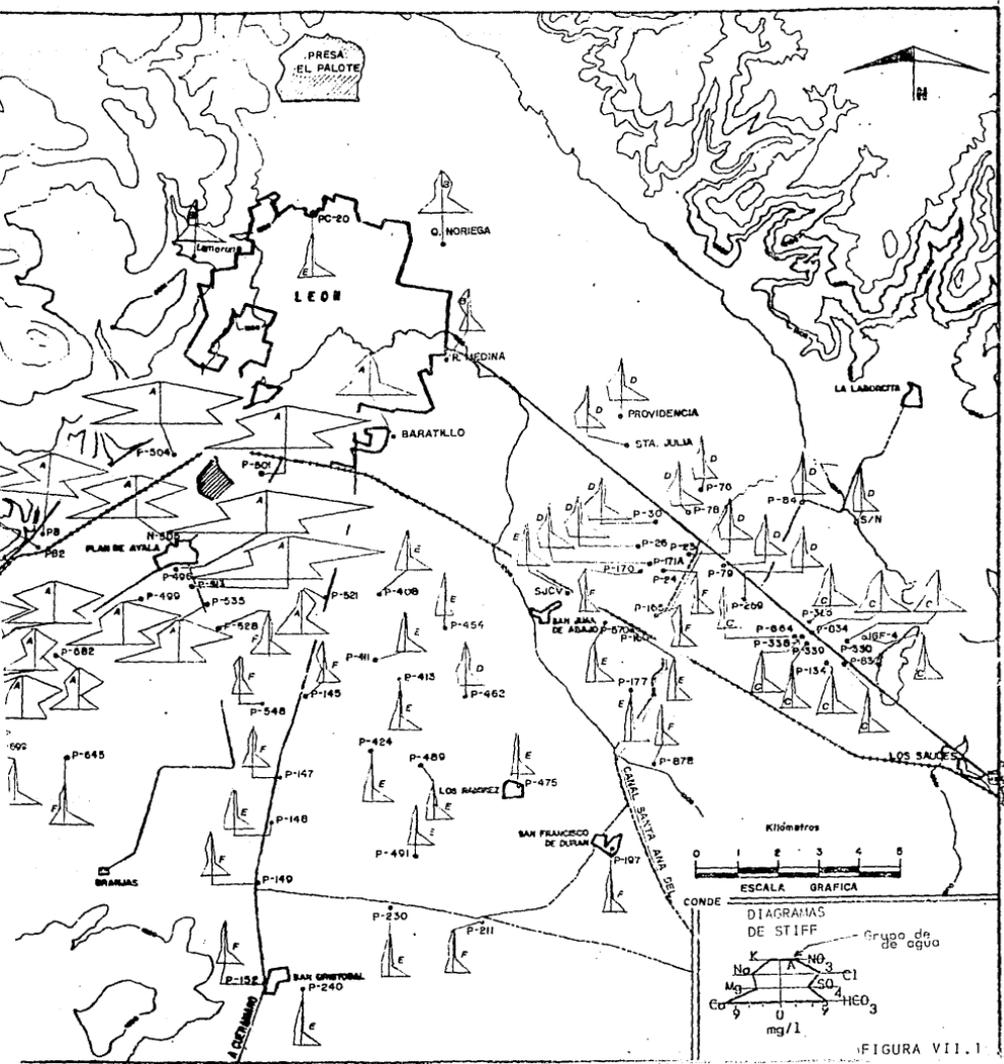
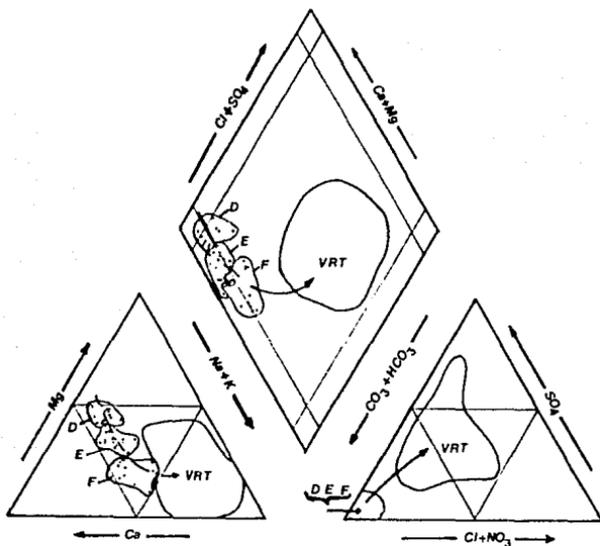


FIGURA VII.1

vez como consecuencia de la disolución de rocas básicas y ultrabásicas de la unidad Piroxenita San Juan de Otates, que aflora en la Sierra de Guanajuato.

Una vez diferenciados estos tipos de aguas, se optó por discriminar a los grupos que manifestaron cierto grado de contaminación, para evitar que interfirieran en la correlación de la hidrogeoquímica con el sistema de flujo del agua subterránea.

Diagrama triangular de Piper y facies hidroquímicas. Los tres grupos restantes (D, E y F), se ubicaron en el diagrama triangular de Piper (FIGURA VII.2) donde muestran la relación de cationes ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ ) y aniones ( $\text{HCO}_3^{-} + \text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{Cl}^{-} + \text{NO}_3^{-}$ ).



D } = Grupos de aguas del VL  
E }  
F }

VRT = Región donde se agrupan las aguas del VRT

↘ = Dirección general del flujo y de evolución química del agua subterránea

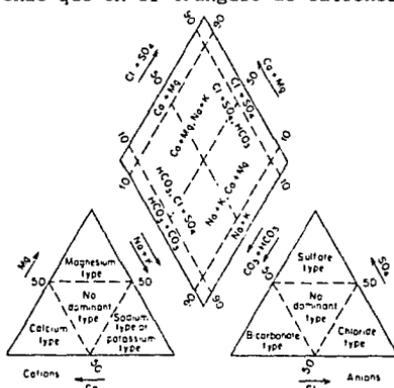
GRAFICA VII.2

Los diagramas que se presentan, son útiles para visualizar diferencias en la química de los principales iones en los sistemas de flujo del agua subterránea, pero surge también la necesidad de poder referir de manera conveniente la composición de los distintos grupos de aguas con el ambiente geológico. Con ese propósito se aplica el concepto de facies hidroquímicas desarrollado por Back (1961, 1966), Morgan y Winner (1962) y Seaber (1963). La definición de facies hidroquímicas es una paráfrasis de la definición de facies usada por los geólogos: "facies es el conjunto de partes identificables de distinta naturaleza pertenecientes a un cuerpo o sistema genéticamente relacionado" (Freeze and Cherry, 1979). La facies hidroquímica es una zona que tiene concentraciones de aniones y cationes que es posible describir como pertenecientes a categorías composicionales definidas (Freeze and Cherry, op. cit), es decir, son zonas diferenciables que tienen concentraciones de cationes y aniones descriptibles dentro de categorías de composición definida (Ophori and Tóth, 1989a).

El concepto de facies hidroquímicas ofrece medios para la detección de relaciones regionales entre el carácter químico del agua subterránea, litología y patrones de flujo regional (Back, 1961).

Por lo común las categorías composicionales se basan en las divisiones propuestas por Back (1961), Morgan y Winner (1962) y Back (1966).

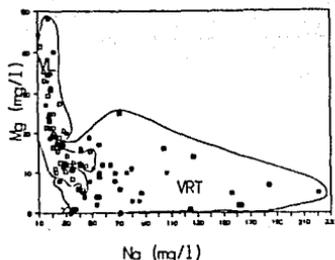
Del diagrama de Piper (FIGURA VII.2) y con la división de facies hidroquímicas (FIGURA VII.3), propuesta por los autores anteriormente citados, se desprende que en el triángulo de cationes:



(Tomado de Back, 1966)

GRAFICA VII.3

- Existe una diferenciación catiónica bien clara entre los tres grupos de agua, pero a pesar de eso, no existe tipo de agua dominante.
- El  $\text{Ca}^{++}$  se mantiene en proporción más o menos constante (45 % meq/l aproximadamente) en los tres grupos de aguas (D, E y F). El origen del  $\text{Ca}^{++}$  se debe a la disolución de piroxenos, anfíboles y feldespatos de las rocas ígneas y metamórficas de la región y/o por la disolución del material carbonatado de la unidad Terciario Granular Indiferenciado.
- El  $\text{Mg}^{++}$  se presenta en proporciones bien diferenciables en los tres grupos de aguas, habiendo mayor contenido en el grupo D (45 % meq/l aproximadamente) y menor en el F (20 % meq/l aproximadamente). Este elemento debe su origen a aguas procedentes de basaltos olivínicos y serpentinas (unidad Piroxenita San Juan de Otates), que afloran en el nororiente del valle.
- El contenido de  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  es variable en los grupos D, E y F. El grupo F es el que contiene mayores proporciones de  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  (40 % meq/l aproximadamente), mientras que el grupo D sólo alcanza valores del orden de 15 % meq/l. El origen del sodio y potasio se infiere a partir de la disolución incongruente del vidrio volcánico y/o plagioclasas de las rocas ígneas y metamórficas de la región y por intercambio catiónico, como se explica en el siguiente párrafo.
- Considerando la disposición de los grupos en el triángulo de los cationes (FIGURA VII.2) y según la relación con el sistema de flujo propuesto, es posible interpretar que existe un intercambio catiónico entre el agua subterránea y el material arcilloso de la unidad Terciario Granular Indiferenciado, fijando iones de  $\text{Mg}^{++}$  y liberando iones de  $\text{Na}^+$ , como se puede ver en la gráfica de sodio versus magnesio (FIGURA VII.4). Aunado a este fenómeno químico que provoca la disminución del contenido de  $\text{Mg}^{++}$ , existe también el fenómeno físico de la dispersión, que hace que el  $\text{Mg}^{++}$  se diluya, conforme el flujo de agua subterránea se aleja de esta zona (FIGURA VII.4).



GRAFICA VII.4

Con estos fenómenos es fácil explicar que la dirección de flujo se dirige -en este caso- de las zonas más someras y cercanas a la Sierra de Guanajuato hacia zonas más profundas y alejadas de la misma, pasando en el mejor de los casos, de la unidad Terciario Granular Indiferenciado a las ignimbritas y tobas de la unidad Ignimbrita Cuatralba hasta descargarse en zonas distales (VRT).

En el triángulo de aniones no se aprecia una diferenciación clara entre los tres grupos de aguas (FIGURA VII.2), debido a que todos ellos se concentran cercanos al vértice  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{=}$ , sin embargo, los tres grupos de aguas representan al tipo de agua bicarbonatada, que es el ión dominante.

Basándose en los principales contenidos de cationes y aniones del agua analizada y utilizando la división de facies hidroquímicas, se reconoció que los tres grupos de aguas (D, E y F), pertenecen a la facies 1 ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ), lo que significa que estas aguas, aunque se encuentran bien diferenciadas por grupos, todas ellas pertenecen a una misma facies hidroquímica; esta diferenciación de grupos dentro del área de recarga es debido a que existen fenómenos físico-químicos importantes que hacen que el agua subterránea tenga importante variación composicional. Por otro lado, se realizó el mismo procedimiento para el VRT (datos de Geohidrológica Mexicana, 1979), donde se estableció que estas aguas pertenecen a la facies hidroquímica 2 ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ), que contrasta por mucho de la facies hidroquímica anteriormente mencionada; además, estas aguas (VRT) presentan en el triángulo de los cationes aguas predominantemente sódico-potásicas y ningún tipo dominante de anión, lo que finalmente guarda gran significado en el contexto de sistemas de flujo del

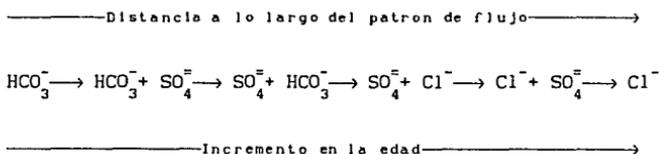
agua subterránea.

Establecidas las facies hidroquímicas de las aguas subterráneas del VL y del VRT, se pasará al siguiente subcapítulo, donde se aplicarán estas facies, junto con otros parámetros para correlacionar la química del agua subterránea con los sistemas de flujo.

### VII.2 Correlación entre la química del agua subterránea y los sistemas de flujo

A medida que el agua subterránea se mueve en la zona saturada de acuerdo con el patrón de flujo, desde las zonas de recarga hasta las de descarga, generalmente se incrementa el contenido de sólidos disueltos. Está bien establecido que en áreas de recarga existen menores cantidades de sólidos totales disueltos que en el agua más profunda del mismo sistema, y este a su vez, posee menor cantidad de sólidos totales disueltos que el agua de la áreas de descarga.

De acuerdo con Chebotarev (1955), el agua subterránea tiende a evolucionar químicamente hacia la composición del agua de mar, siendo comunes los siguientes cambios regionales en los aniones dominantes:



Estos cambios ocurren conforme el agua se mueve de zonas someras de flujo muy activo, pasando por zonas intermedias hasta llegar a zonas donde el flujo es muy lento y el agua muy antigua.

La secuencia se debe evaluar desde el punto de vista geológico, sobre todo con respecto al tiempo, pues intervienen variables como la calidad del agua inicial, tipo de roca, tiempo de interacción agua-roca, tipo de permeabilidad, procesos geoquímicos (Cardona, 1990), asimismo, movilidad del elemento y longitud del patrón de flujo, que hacen que esta secuencia no necesariamente se desarrolle completamente o en el orden indicado.

En grandes cuencas sedimentarias, la secuencia de Chebotarev puede ser correlacionada con la profundidad y descrita verticalmente en tres zonas

(Domenico, 1972; Freeze and Cherry, 1979):

1. Zona superior. Aguas principalmente bicarbonatadas y bajo contenido en STD.
2. Zona intermedia. Altos índices de STD y  $\text{SO}_4^-$  como anión principal.
3. Zona inferior. Altas concentraciones de STD y  $\text{Cl}^-$ .

Tóth (1966) indicó una tendencia aparente de las aguas de un sistema de flujo de desviar su carácter químico desde el tipo bicarbonatada hacia la facies sulfato mientras se mueve hacia las áreas de flujo ascendente; esto significa, que las aguas subterráneas evolucionan naturalmente de facies bicarbonatada en áreas de recarga a facies predominantemente sulfatadas o cloruradas en áreas de descarga (Ophori and Tóth, 1989a).

Ophori y Tóth (1989a) demostraron que los sistemas de flujo local se pueden asociar a aguas con bajos índices de STD y altos porcentajes de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ; los sistemas de flujo intermedio con cantidades medianas de STD y altos porcentajes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ ; y los sistemas de flujo regional con altos índices de STD y altos porcentajes de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , con relación a los sistemas locales e intermedios.

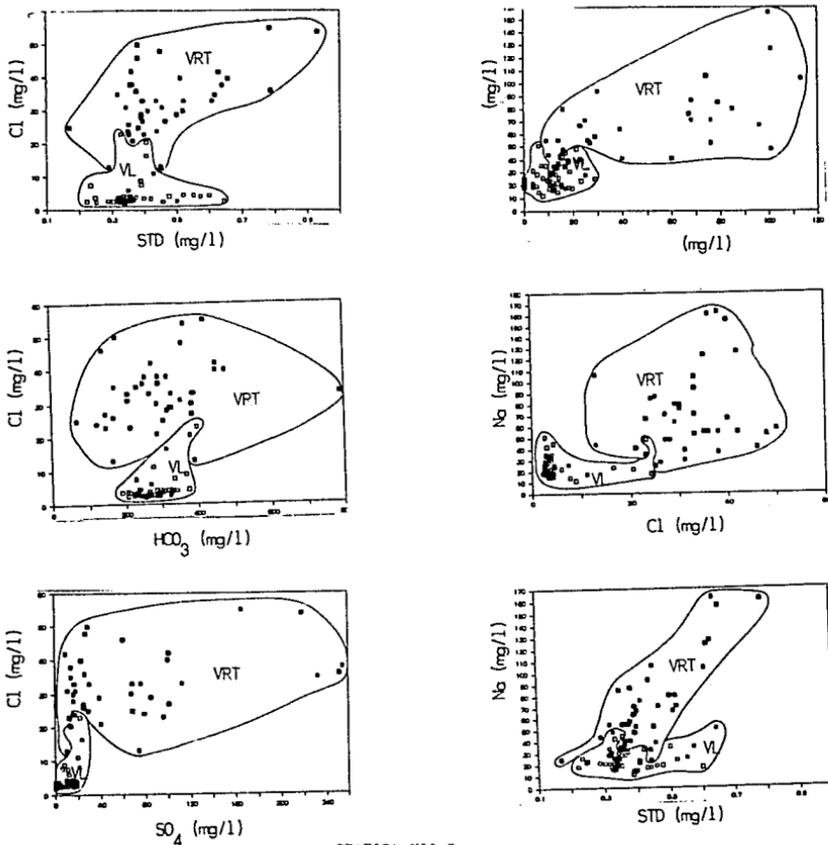
A lo establecido en el párrafo anterior, se le debe de añadir que muestras de aguas subterráneas con características de bajos índices de STD y altos porcentajes de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , no se asocian únicamente a sistemas de flujo local, debido a que también se pueden relacionar a áreas de recarga de otros tipos de sistemas de flujo, los cuales apenas están iniciando su recorrido en el patrón de flujo del agua subterránea.

La secuencia de evolución de los aniones y la tendencia de los sólidos totales disueltos a incrementarse a lo largo de los patrones del flujo del agua subterránea, son generalizaciones que cuando se emplean en el contexto de un razonamiento geoquímico más riguroso, puede proveer información considerable sobre la historia del agua subterránea (Freeze and Cherry, 1979).

Las zonas del VL y VRT, consideradas como partes elementales de una gran cuenca de agua subterránea (*groundwater basin*), presentan características de comportamiento hidrogeoquímico muy claras de discernir y que por lo tanto, ayudan a entender el comportamiento hidrodinámico de esta cuenca.

De acuerdo con los aspectos teóricos y prácticos previos, las aguas

subterráneas del VL se pueden correlacionar con áreas de recarga, ya que pertenecen a la facies hidroquímica 1 ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ), con bajas concentraciones de cloruros, sodio y sulfatos y alto contenido de bicarbonatos. Con respecto al agua subterránea del VRT, esta se ubica en la facies hidroquímica 2 ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ), con altas concentraciones de cloruro, sodio y potasio. Estas diferencias tan marcadas en el contenido de algunos iones concuerdan con las propuestas dadas por Chebotarev (1955), Tóth (1966), Domenico (1972), Freeze y Cherry (1979) y Ophori y Tóth (1989a), como se pueden ver en los diagramas x-y de la FIGURA VII.5.



GRAFICA VII.5

Con el fin de tener mayores elementos de juicio que respalden lo hasta ahora argumentado, se recurrió a la construcción de la sección hidroquímica mostrada en la FIGURA VII.6.

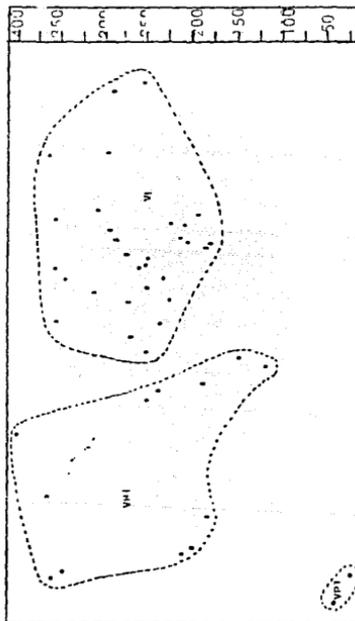
Se considera que esta sección debe ser paralela a la dirección de inclinación de la carga hidráulica, aunque también puede ser construida a todo lo largo de una línea de flujo de agua subterránea específica (Lloyd and Heathcote, 1985), abarcando toda la cuenca de agua subterránea (*groundwater basin*), es decir, desde el área de recarga (en este caso la Falla del Bajío) hasta la de descarga (Río Turbio, en el valle del mismo nombre). En esta sección se ubicaron los contenidos de  $\text{STD}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  de las muestras de agua de pozos que estuvieran lo más cercano posible a dicha sección. En este caso se seleccionaron únicamente los elementos químicos que mejor representan al modelo hidrodinámico propuesto. Posteriormente se hizo el análisis de la sección hidroquímica, donde se pudo advertir que:

- Los contenidos de  $\text{STD}$  y  $\text{Cl}^-$  aumentan conforme se alejan de la zona de recarga (Falla del Bajío) o se acercan a la zona de descarga en el VRT.
- En general, el incremento gradual en los  $\text{STD}$  tiende a corresponder con el incremento de los sulfatos y del cloro.
- El bicarbonato, aunque se presenta en grandes proporciones, su gráfica no muestra tendencia o uniformidad, por el contrario, se observa un tanto caótico debido a que en principio su origen es derivado del  $\text{CO}_2$  de la zona de suelo y posteriormente, en zonas más alejadas del área de recarga, por la disolución del carbonato de calcio de la unidad Terciario Granular Indiferenciado por agua meteórica rica en  $\text{CO}_2$  a lo largo de los patrones de flujo del agua infiltrada y por disolución de rocas ígneas.
- El catión  $\text{Na}^+$  se hace notablemente presente y con una cierta tendencia al incremento conforme se aleja del área de recarga, debido principalmente a que el ambiente hidrogeológico por donde fluye el agua está constituido de rocas ricas en feldespatos (principalmente la unidad Ignimbrita Cuatralba, la que vuelve aflorar en el sur del VRT). Las arcillas de la unidad Terciario Granular Indiferenciado, también son importantes de considerar, debido a que bajo ciertas condiciones pueden liberar grandes cantidades de  $\text{Na}^+$  intercambiable (Renick, 1925; Foster, 1942; Piper et al., 1953; en

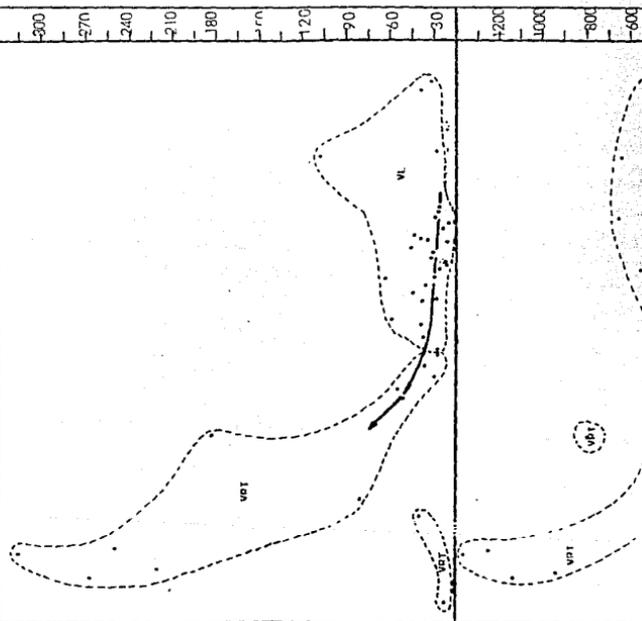
Davies y De Wiest, 1971).

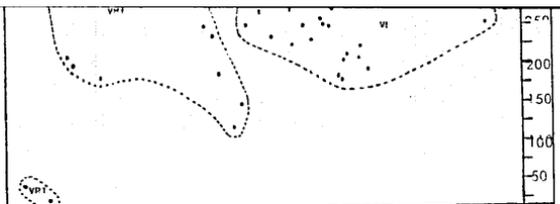
-Los puntos de la gráfica que se apartan de la tendencia evolutiva general del agua, se debe a que pertenecen a manantiales que están descargando agua de sistemas de flujo local, como lo demuestran sus bajos índices de concentración de sólidos disueltos, temperatura de descarga y por la relación que guardan con los rasgos indicadores de campo; por ejemplo, los manantiales P-1017 y P-1019 del VRT (ver Geohidrológica Mexicana, 1979). En comparación a estos manantiales, existen otros cercanos que presentan altas concentraciones de sólidos disueltos y altas temperaturas de descarga, lo que significa que están íntimamente ligados con sistemas de flujo regional, como son los manantiales La Playa y A (ver Ariel, 1982a).

HCO<sub>3</sub> (mg/l)

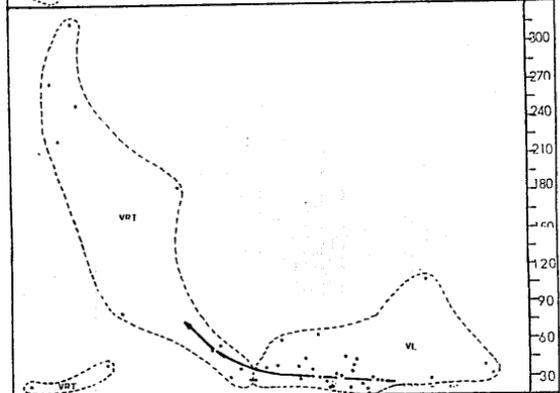


Hb (mg/l)

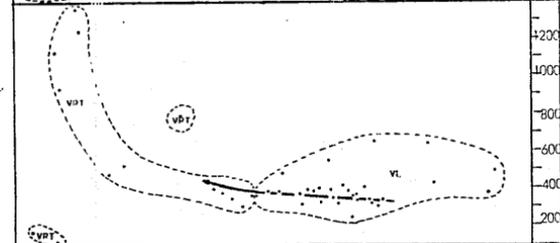




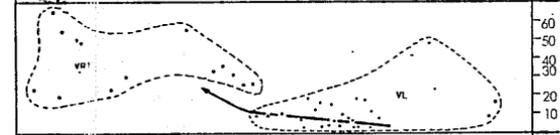
$\text{HCO}_3^-$  (mg/l)



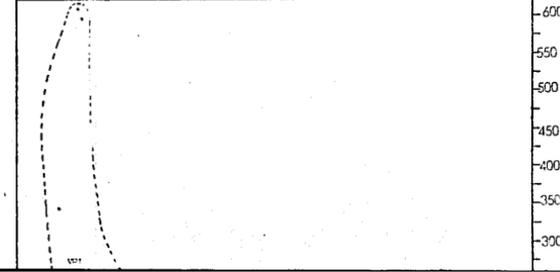
$\text{Na}^+$  (mg/l)



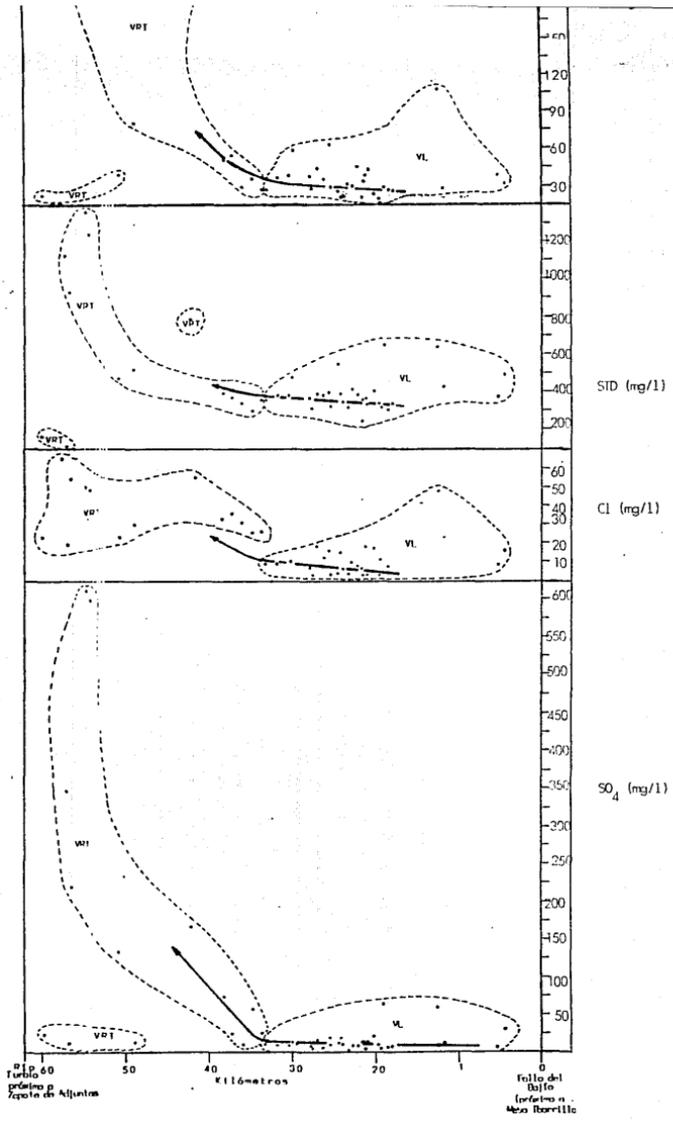
STD (mg/l)



$\text{Cl}^-$  (mg/l)



$\text{SO}_4$  (mg/l)



SECCION HIDROQUIMICA

FIGURA VII.6

## VIII MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ACUIFERO

Antes de explicar el funcionamiento hidrodinámico global del área de estudio y su interrelación con áreas aledañas, es importante definir primero, el término modelo conceptual.

Un modelo conceptual se define, como una 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. Debido a que estos sistemas físicos están caracterizados por una gran complejidad de fenómenos integrados, los modelos conceptuales que resulten de tales estudios, siempre serán menos complejos que el mismo sistema real al que representan; sin embargo, el modelo que se proponga, procurará explicar ampliamente y de la manera más fiel y convincente, el comportamiento de todos o algunos de los aspectos que estén influyendo en el sistema físico.

Con esta definición de modelo conceptual, es obvio entender que el funcionamiento hidrodinámico del sistema acuifero del VL, ya se ha venido explicando en cierta medida, durante el transcurso de esta tesis.

Para explicar este modelo de funcionamiento hidrodinámico, fué necesario manejar en conjunto a los sistemas acuiferos del VL y del VRT, debido a que están íntimamente ligados en el funcionamiento dinámico del agua subterránea, por lo tanto, pertenecientes a una misma cuenca de agua subterránea (*groundwater basin*).

Los resultados del estudio del ambiente hidrogeológico del VL, son concluyentes y definen a este sistema a escala regional, como un sistema acuifero libre heterogéneo; aunque existen algunas zonas aisladas y muy locales donde el comportamiento puede tener cierto grado de semiconfinamiento. El sistema acuifero está esencialmente constituido por materiales de medio granular y fracturado.

El sistema del VRT, se ha considerado que presenta un ambiente hidrogeológico muy similar al del VL y probablemente con el mismo origen, por lo tanto, también se ha definido regionalmente como un sistema acuifero libre heterogéneo, representado por las mismas unidades hidrogeológicas y con zonas muy locales con características de semiconfinamiento.

El sistema acuifero del VL, junto con todas las partes topográficamente altas que rodean al VRT se consideran que representan casi totalmente áreas de recarga de los sistemas acuiferos del VL y VRT, como lo

han demostrado todas las evidencias que se han tratado en este trabajo. Asimismo, existen pequeñas áreas aisladas de descarga (principalmente en el flanco sur de la SG) de aguas subterráneas de sistemas de flujo local a través de una serie de manantiales que están controlados principalmente por el espesor del material permeable y por las características estratigráficas y estructurales del medio hidrogeológico.

Las características generales de estas áreas de recarga son: movimiento descendente del agua subterránea, deficiencia relativa de humedad por arriba de la zona saturada, mínimas concentraciones de sólidos totales disueltos, aumento de la profundidad de los niveles estáticos conforme se incrementa la profundidad de los pozos, aguas subterráneas con bajos valores de conductividad eléctrica y nivel freático relativamente profundo, estos dos últimos comparados con la zona del VRT.

El tipo de recarga, es otro punto importante en la conceptualización del sistema acuífero en cuestión, por lo que se puede argumentar que ésta ocurre principalmente a través de la infiltración del agua meteórica hasta alcanzar la zona saturada; esta infiltración puede ser recarga inmediata durante la precipitación o como recarga de agua que aportan los arroyos, lagos y presas al sistema acuífero. También existe recarga, a partir del riego con aguas negras y por los aportes que ceden las lagunas de oxidación al sistema acuífero, causando cierto grado de contaminación; estas lagunas de oxidación pueden estar funcionando como fronteras de carga constante.

La única evidencia actual de descarga dentro del área de este sistema, o sea, lo que corresponde estrictamente a la zona del VL, es la que se descarga artificialmente a través del gran número de pozos y norias, lo que ha generado un gran cono de abatimiento en la parte central del valle; ésto es importante mencionarlo, para aclarar que ésto no necesariamente implica una sobreexplotación, si acaso, sobrebombeo y/o mala distribución en el bombeo del sistema acuífero.

Con esta observación, se puede comprender aún mejor, que el agua que se descarga artificialmente en el VL, es sólo una parte del agua que sale del sistema, la otra parte es la que se descarga naturalmente en la zona del VRT; este razonamiento surge de la consideración de que existen líneas de flujo que no son cortadas de su trayectoria natural por el bombeo generador del cono de abatimiento, como lo han demostrado todos los argumentos hasta ahora tratados. Ahora bien, un aumento irracional en la

explotación del agua subterránea, puede causar mayor desequilibrio en el sistema, de manera tal, que todas las líneas de flujo que tienden a desplazarse hacia el VRT, sean interceptadas por el desmesurado bombeo dentro del VL; con ésto queda bien claro que la distribución espacial de los sistemas de flujo, influyen de sobre manera en la intensidad de la descarga natural del agua subterránea. Estas últimas apreciaciones, aunque no están sustentadas bajos parámetros cuantitativos, pueden ser válidas, si se consideran como resultado del análisis del modelo conceptual propuesto, el cual se encuentra muy bien respaldado por la teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea.

Por otra parte, el VRT se caracteriza por ser área de flujo lateral y de descarga, donde las características esenciales son: mayor humedad por arriba de la zona saturada y nivel freático somero comparados con la zona del VL, disminución de la profundidad de los niveles estáticos conforme aumenta la profundidad de los pozos perforados en áreas de flujo ascendente, aguas con gran conductividad eléctrica, altos índices de sólidos totales disueltos, presencia de pozos brotantes, aprovechamientos con marcada diferencia en la temperatura de descarga y mayor número de manantiales con descarga de aguas subterránea de distintos tipos de sistemas de flujo, comparados con la zona del VL.

La descarga natural en esta zona (VRT), es primordialmente a través de manantiales, lagos, presas, bordos y evapotranspiración, aunque para esta última no se contó con datos de evapotranspiración, se cree que el potencial de descarga no es nada despreciable, debido a la poca profundidad del nivel freático y a la relativa abundancia de vegetación, comparada con la zona del VL. En cuanto a la descarga artificial, ésta se lleva a cabo a través del gran número de pozos y norias que existen en el valle.

En ambos valles se pudieron detectar para condiciones actuales, sistemas de flujo local y regional, pero sin poder identificar los sistemas de flujo intermedio. Sin embargo, en el modelo conceptual en condiciones iniciales, quedaron bien establecidos los tres sistemas de flujo, como se aprecia en el modelo conceptual de la FIGURA VIII.1.

Es importante agregar que el modelo conceptual del sistema en condiciones actuales, difiere del modelo propuesto bajo condiciones iniciales, debido a que actualmente no existe ningún tipo de descarga natural de agua subterránea en el VL, en tanto que para condiciones

iniciales, parece ser que si hubo tal descarga, al menos en la porción sur del valle.

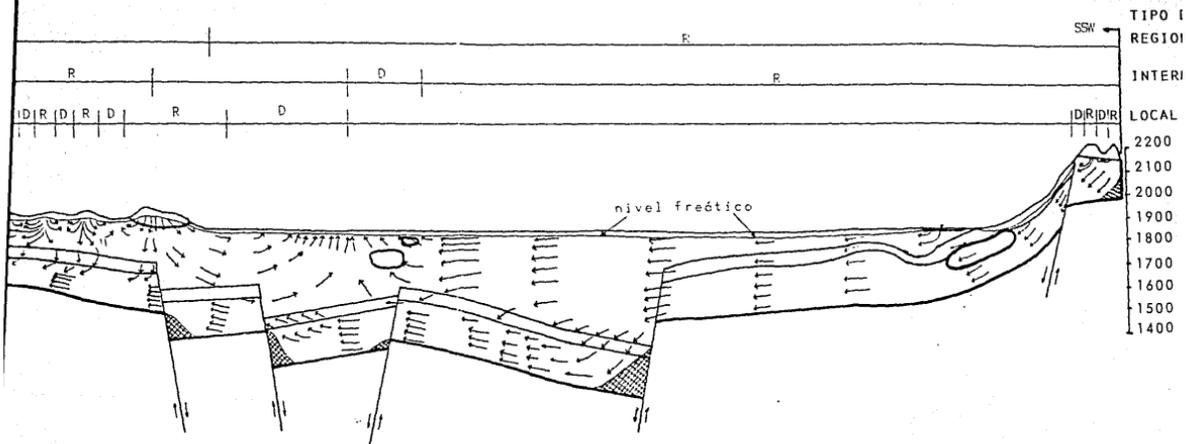
Por último, el alto grado de contaminación que existe en algunas partes del VL es un aspecto que debe de ser tratado con gran cuidado, debido a que su movimiento en la zona saturada, está en función de las características del medio y del sistema de flujo. De hecho, haciendo la comparación entre la vulnerabilidad del sistema acuífero del VL, con el del VRT, se entiende que el primero presenta una mayor capacidad de vulnerabilidad, por el hecho de ubicarse en zonas donde el flujo de agua subterránea es descendente, por lo tanto es agua que está recargando al sistema acuífero. Por otra parte, el VRT se ubica en una zona donde el flujo subterráneo es principalmente ascendente (área de descarga), lo que implica que fuentes de contaminación situadas en esta zona, pueden tener un menor impacto en el sistema, debido a que la dispersión hidrodinámica en la expansión de la pluma contaminante será menor, por avanzar en sentido contrario al flujo de agua subterráneo. Sin embargo, la determinación de la vulnerabilidad del sistema no es tan sencilla, ya que la difusión en determinadas condiciones, puede tener un efecto importante.

Esta comparación demuestra claramente la gran importancia que tienen los sistemas de flujo, en la prevención y/o solución a problemas de contaminación.

En lo concerniente a estos tipos de problemas de contaminación, es evidente, que éstos se pueden atacar mucho mejor y más hábilmente, si se relacionan con los sistemas de flujo de agua subterránea, en el sentido más amplio y profundo de su definición.

Para concluir este capítulo, sólo resta decir, que se han presentado estos modelos conceptuales, con el mayor apego posible a la realidad, para que puedan ser funcionales en la solución de problemas de tipo científico, ingenieril o de manejo de los recursos.





EXPLICACION:

- Línea de flujo
- Zona de recarga
- Zona de descarga
- Zona de estancamiento



0 1 2 3 4 5  
 kilómetros  
 Escala horizontal

MODELO CONCEPTUAL  
 EN CONDICIONES INICIALES

FIGURA VIII.1



## IX CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### IX.1 Conclusiones

-El sistema acuífero del VL, se define regionalmente, como un sistema acuífero libre heterogéneo, constituido principalmente por las unidades: Terciario Granular Indiferenciado, Ignimbrita Cuatralba y Andesita Bernalejo. Aunque en zonas muy locales y aisladas de este sistema acuífero, puede haber cierto semiconfinamiento, dependiendo principalmente del tipo de material de esa zona.

-Regionalmente, el sistema acuífero del VL, junto con el del VRT, forman parte de un gran modelo denominado sistema de flujo regional de agua subterránea.

-Los rasgos indicadores de sistemas de flujo más útiles en el área de estudio son: la topografía, las mediciones piezométricas, los manantiales, los pozos brotantes y el flujo base.

-Con la topografía se supuso la dirección del flujo en el área de estudio, es de la SG y Altos de Jalisco hacia zonas más alejadas del VL y con menor carga hidráulica, como es el caso del VRT. Además, existen pequeñas componentes de flujo subterráneo en dirección NE-SW y NW-SE, pero que se consideran regionalmente despreciables comparadas con la componente NNE-SSW; por lo consiguiente, en este sistema tridimensional, el flujo de agua subterránea puede ser considerado principalmente bidimensional (plano x-z), con dirección NNE-SSW, en simetría lateral.

-Con la gráfica generalizada de profundidad del pozo vs. profundidad del nivel estático, se pudo establecer que:

- a) En el VL, existen componentes de flujo descendente asociados a áreas de recarga y en el VRT, zonas de flujo lateral y ascendente relacionados con áreas de descarga.
- b) En el VL, las profundidades del nivel estático del agua son mayores con respecto a las del VRT, lo que está relacionado con el hecho de que en zonas de recarga, el nivel estático es más profundo, conforme la profundidad del pozo aumenta, mientras que en zonas de descarga, el nivel estático es menos profundo, cuanto más profundo es el

pozo, lo que significa una vez más, que el VL es una área de recarga y en el VRT es un área de descarga.

-En las parte altas que rodean al VL, (Sierra de Guanajuato y Altos de Jalisco) existen pequeñas áreas de descarga de sistemas de flujo local, los que están controlados por factores stratigráficos y/o estructurales. En el VRT existe otro número de manantiales, que están descargando aguas de sistemas de flujo tanto local como regional y que son bien diferenciados a partir del análisis comparativo de la calidad química del agua y de la temperatura.

-En el VRT, existe un pozo (P-1010), otrora brotante, el cual se encuentra principalmente controlado por la topografía. Este pozo, no está explotando agua del sistema en cuestión, sino del sistema adyacente. Esto es un indicador indirecto para poder afirmar que la zona de VRT, funciona como zona de descarga.

-El flujo base que existía en el sur del VRT, en el río del mismo nombre, ofrece fundamentos para reiterar que el VRT funciona como área de descarga del agua subterránea. Actualmente, esta evidencia no existe, debido a que los grandes volúmenes de agua subterránea que se extraen de este sistema acuífero (VRT) han provocado que el abatimiento del nivel freático esté por debajo de los cauces de los ríos.

-En el VL existen dos direcciones principales de flujo del agua subterránea: a) La dirección inducida por el bombeo, que hace que el flujo converga en el centro del valle, y b) la dirección general del flujo (NNE-SSW) que no es interceptada por el bombeo y que descarga sus aguas en el VRT.

-Fue imposible identificar la dirección general de flujo del agua subterránea del VL, con sólo planos de igual profundidad y elevación del nivel estático del agua, debido a que el cono de abatimiento que abarca gran parte del VL, lo enmascara. Por lo tanto se tuvieron que interpretar secciones y gráficas de profundidad del pozo versus profundidad del nivel estático del agua, además de otros rasgos indicadores de sistemas de flujo.

-El sistema acuífero libre heterogéneo del VL, sobreyace a un basamento en bloques prácticamente impermeable que puede estar representado por el Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato o por el Conglomerado Guanajuato, dependiendo del lugar que se esté tratando.

-Para esta región del bajío, existe gran asociación, entre los movimientos verticales del agua subterránea y las estructuras tectónicas del subsuelo (basamento impermeable de los sistemas acuíferos del VL y VRT), como lo demuestra la red de flujo en perfil.

-Con la red de flujo en perfil para condiciones iniciales, se pudo establecer que:

- a) La zona del VL, era zona de recarga y descarga y el VRT, únicamente de descarga.
- b) La zona del VL y del VRT, estaban caracterizadas por los tres tipos de sistemas de flujo (local, intermedio y regional). Los sistemas de flujo local se localizaban en la zona de La Muralla; los sistemas de tipo intermedio se presentaban en la zona de La Muralla y en el VL (actualmente parece ser, que no existen sistemas de flujo intermedio en el VL); por último, los de tipo regional, se recargan en las partes topográficamente más altas y se descargan en el fondo del valle, o sea, en las cercanías del Río Turbio (VRT).

-Actualmente no existe el área de descarga en el sur del VL, debido a las alteraciones hidrodinámicas provocadas por el constante bombeo de los pozos de uso agrícola e industrial principalmente.

-En condiciones actuales, únicamente se pudieron detectar los sistemas de flujo local y regional, deducidos a partir de todas las evidencias utilizadas en esta tesis para ese fin.

-Las unidades hidrogeológicas permeables del área de estudio son:

- a) Unidades con permeabilidad primaria: Componente tobáceo de la unidad Ignimbrita Cuatralba, Terciario Granular Indiferenciado y el Aluvión; esta última unidad funciona principalmente como zona potencial de infiltración.

b) Unidades permeables por fracturamiento: Andesita Bernalejo, componente ignimbrítico de la unidad Ignimbrita Cuatralba, el Basalto Dos Aguas y el Basalto El Cubilete; estas dos últimas unidades funcionan principalmente, como zonas potenciales de infiltración.

-Las unidades hidrogeológicas impermeables son: Piroxenita San Juan de Oates, Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, Complejo Plutónico La Luz, Granito Comanja, Conglomerado Guanajuato y Gabro Arperos.

-A partir de pruebas de bombeo, bombeo escalonado, pozos con aforo y de la relación caudal específico-transmisividad, se obtuvo el comportamiento de la conductividad hidráulica representativa de las principales unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero del VL, el cual es el siguiente:

Ignimbrita Cuatralba (toba) =  $0.19 \times 10^{-4}$  m/s

Ignimbrita Cuatralba (ignimbrita) =  $0.10 \times 10^{-4}$  m/s

Terciario Granular Indiferenciado =  $0.23 \times 10^{-4}$  m/s

-El agua subterránea que fluye en el sistema acuífero del VL, lo hace a través de:

a) Medios granulares: toba de la unidad Ignimbrita Cuatralba y Terciario Granular Indiferenciado.

b) Medio fracturado: componente ignimbrítico de la unidad Ignimbrita Cuatralba.

-Las unidades hidrogeológicas de medio granular son las de mayor dimensión en el sistema acuífero del VL, alcanzando espesores que exceden los 450 m (Terciario Granular Indiferenciado) y 150 m (Toba de la Ignimbrita Cuatralba).

-La unidad hidrogeológica de medio fracturado (componente ignimbrítico de la Ignimbrita Cuatralba), es la que separa en tiempo y espacio, a las unidades de medio granular anteriormente citadas. Su espesor es variable, alcanzando espesores de hasta 80 m, o tal vez más.

-Con el estudio hidrogeoquímico, se explica que la dirección de flujo del agua subterránea, se dirige de las zonas más someras y cercanas a la Sierra de Guanajuato hacia zonas más profundas y alejadas de la misma, pasando en el mejor de los casos, de la unidad Terciario Granular Indiferenciado a las ignimbritas y tobas de la unidad Ignimbrita Cuatralba hasta descargarse en zonas distales (VRT).

-Con la representación gráfica (diagramas de Stiff) de los análisis químicos del sistema acuífero del VL, se pudieron establecer seis grupos bien diferenciados de agua subterránea (A, B, C, D, E y F), de los cuales, los tres primeros se consideraron aguas contaminadas, debido principalmente por las lagunas de oxidación y el riego con aguas negras.

-También existen cambios en la calidad química, debido a efectos naturales de disolución de algunas rocas ricas en minerales de magnesio y cromo, como puede ser las rocas básicas y ultrabásicas (v.g., Piroxenita San Juan de Otates), que aflora en la Sierra de Guanajuato.

-Basándose en los principales contenidos de cationes y aniones del agua analizada y utilizando la división de facies hidroquímicas, se reconoció que los tres grupos de aguas no contaminadas (D, E y F), pertenecen a la facies 1 ( $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ , Ca + Mg, Na + K), lo que significa que estas aguas, aunque se encuentran bien diferenciadas por grupos, todas ellas pertenecen a una misma facies hidroquímica.

-Esta diferenciación de grupos dentro del área de recarga es debido a que existen fenómenos físico-químicos importantes que hacen que el agua subterránea tenga importante variación composicional.

-Por otro lado, la interpretación de los análisis químicos de la zona del VRT, establecen que estas aguas pertenecen a la facies hidroquímica 2 ( $\text{Cl} + \text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ , Na + K, Ca + Mg), que contrasta por mucho de la anterior facies hidroquímica.

-Las aguas subterráneas del VL se pueden correlacionar con áreas de recarga, ya que pertenecen a la facies hidroquímica 1 ( $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ , Ca + Mg,

Na + K), con bajas concentraciones de cloruros, sodio y sulfatos y alto contenido de bicarbonatos. Con respecto al agua subterránea del VRT, esta se ubica en la facies hidroquímica 2 ( $Cl + SO_4, HCO_3, Na + K, Ca + Mg$ ), con altas concentraciones de cloruro, sodio y potasio, relacionándose con áreas de descarga.

-El calcio se mantiene en proporción más o menos constante en los tres grupos de aguas no contaminadas y debe su origen a la disolución de piroxenos, anfíboles y feldespatos de las rocas ígneas y metamórficas de la región y/o por la disolución del material carbonatado de la unidad Terciario Granular Indiferenciado.

-El magnesio se presenta en proporciones diferenciables en los tres grupos de aguas no contaminadas. Este elemento debe su origen a aguas procedentes de basaltos olivínicos y serpentinas (unidad Piroxenita San Juan de Otates), que afloran en el nororiente del valle y disminuye su contenido en la dirección de flujo del agua subterránea debido al fenómeno físico de la dispersión y al intercambio catiónico de este tipo de agua con el material arcilloso de la unidad Terciario Granular Indiferenciado.

-El contenido de  $Na^+ + K^+$  en los tres grupos de aguas no contaminadas, deben su origen a la disolución incongruente del vidrio volcánico y/o plagioclasas de las rocas ígneas y metamórficas de la región y por intercambio catiónico, entre el agua subterránea y el material arcilloso de la unidad Terciario Granular Indiferenciado, mediante la fijación de magnesio y liberación de iones de sodio.

-Con la sección hidroquímica representativa de esta zona, se puede advertir que:

- a) El bicarbonato, aunque se presenta en grandes proporciones, su gráfica no muestra tendencia o uniformidad, por el contrario, se observa un tanto caótico debido a que en principio su origen es derivado del  $CO_2$  de la zona de suelo y posteriormente, en zonas más alejadas del área de recarga, por la disolución del carbonato de calcio de la unidad Terciario Granular Indiferenciado por agua meteórica, rica en  $CO_2$  a lo largo de los patrones de flujo del agua

infiltrada y por disolución de rocas ígneas.

- b) El catión sodio se hace notablemente presente y con una cierta tendencia al incremento conforme se aleja del área de recarga, debido principalmente a que el ambiente hidrogeológico por donde fluye el agua está constituido de rocas ricas en feldespatos (principalmente la unidad Ignimbrita Cuatralba, la que vuelve aflorar en el sur del VRT). Las arcillas de la unidad Terciario Granular indiferenciado, también son importantes de considerar, debido a que bajo ciertas condiciones pueden liberar grandes cantidades de sodio intercambiable.
- c) Los puntos de la gráfica que se apartan de la tendencia evolutiva general del agua, se debe a que pertenecen a manantiales que están descargando agua de sistemas de flujo local. Existen otro grupo de manantiales cercanos a éstos, pero que están íntimamente ligados con sistemas de flujo regional; lo anterior se basa en las diferencias físicas y químicas del agua.

-La zona de estudio puede ser integrada en tres unidades hidrogeomorfológicas bien diferenciadas, que coinciden con las subprovincias fisiográficas presentes en esta región. Estas unidades son: a) Sierra de Guanajuato, b) Altos de Jalisco y c) Zona del Bajío; esta última unidad, la constituyen, el área de transición (pie de monte) y la planicie acumulativa de nivel de base. Con las características hidrogeomorfológicas de estas unidades, se puede definir a la Sierra de Guanajuato como una región impermeable, donde se generan escurrimientos importantes que llegan a infiltrarse en la zona del Bajío, la cual se comporta como una zona de infiltración al igual que la porción Altos de Jalisco.

#### IX.2 Recomendaciones

-Llevar este modelo conceptual a soluciones cuantitativas para una mejor evaluación de los recursos subterráneos.

-Aplicar el modelo conceptual en la prevención y/o solución de problemas. Por ejemplo, la contaminación del sistema acuífero por aguas negras, por las lagunas de oxidación o por desechos industriales.

-Utilizar la modelación matemática, para afinar este modelo conceptual y llevarlo a condiciones actuales, así se podrá tener una mejor visión de la evolución hidrodinámica de este sistema.

-Con la misma aplicación de la modelación matemática se pueden hacer ajustes y predicciones, para una mejor administración del abastecimiento de agua potable.

-Considerar los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el subsuelo, para una mejor comprensión de los sistemas de flujo del agua subterránea.

-Utilizar estos procesos hidrogeoquímicos de una forma más rigurosa para obtener mejores alternativas en la solución de problemas de contaminación.

-Confrontar este modelo conceptual con trabajos posteriores, para una mayor depuración o robustecimiento de este modelo de funcionamiento hidrodinámico, lo que finalmente conduce a subir un peldaño más, en la búsqueda de un mejor entendimiento de las cosas que nos atañen y afectan.

## BIBLIOGRAFIA

Anderson, T.W., 1985. Hydrologic setting, objectives, and approach of the southwest alluvial basins, RASA study. In Regional aquifer systems of the United States, edited by T.W. Anderson and A. Ivan Johnson, American Water Resources Association, pp.5-16.

Anderson, M.P., 1987. Hydrogeologic framework for groundwater protection. In Planning for groundwater protection, edited for G. William Page, Academic Press, Inc., pp.1-27.

Aranda-Gómez, J.J. y A.F. Nieto-Samaniego, 1987. Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la porción meridional de la meseta central. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, programa, resúmenes y guía de excursión, pp.10-12.

Ariel Construcciones, S.A., 1982a. Estudio geohidrológico cuantitativo de la Cuenca Alta del Río Turbio, Estado de Guanajuato. Informe interno, SARH, contrato GZA-82-44-EG, t.I-II, 174 p.

Ariel Construcciones, S.A., 1982b. Estudio geohidrológico del Valle de León, en el Estado de Guanajuato. Informe interno, SARH, contrato GZA-82-67-EG, t.I-II, 188 p.

Bredehoeft, J.D., W. Back and B.B. Hanshaw, 1983. Regional ground-water flow concepts in the Unites States: Historical perspective. In Recent trends in hydrogeology, edited by T.N. Narasimhan, special paper 189, The Geological Society of America, University of California, Berkeley, California, U.S.A., pp.297-316.

Back, W., 1961. Techniques for mapping of the hydrochemical facies. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 424-D, pp.380-382.

Back, W., 1966. Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in northern part of atlantic coastal plain. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 498-A, 42 p.

Cardona B., A., 1990. Caracterización fisico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí: Su relación con el sistema de flujo. Tesis profesional, M. en C. (Hidrología subterránea), Fac. de Ingeniería Civil, UANL, Monterrey, N.L., 97 p.

Carfantan, J.C., 1983. Les ensembles géologiques du Mexique meridional. Evolution géodynamique durant le Mesozoique et le Cénozoique. Geofísica Internacional, v.22, n.1, pp.9-37.

Castany, G. et Margat, J., 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie. Bureau de Recherches Géologiques et Minières Service géologique national, 249 p.

Cebull, S.E. and D.H. Shurbet, 1987. Mexican Volcanic Belt: an intraplate transform? Geofísica Internacional, v.26, n.1, pp.1-13.

Cervantes-Sánchez, A., 1987. Características morfoestructurales de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., segundo simposio sobre la geología regional de México, programa y resúmenes, pp.26-28.

Cervantes-Sánchez, A., 1990a. Principales características estructurales del relieve de la Sierra de Guanajuato. Revista del Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., en prensa.

Cervantes-Sánchez, A., 1990b. Análisis morfoestructural de los elementos lineares de las formas erosivas en el extremo suroriental de la Sierra de Guanajuato. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F., en prensa.

Chebotarev, I.I., 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. Geochim. Cosmochim. Acta, 8, pp.22-48, 137-170, 198-212.

Coney, P.J., 1983. Un modelo tectónico de México y sus relaciones con América del Norte, América del Sur y el Caribe. Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, v.XV, n.1, 6-15.

Corona Ch., P., 1988. Análisis estratigráfico-estructural de la porción centro-sur de la Sierra de Guanajuato. Tesis profesional, Lic. en ingeniería geológica, Esc. Sup. de ingeniería y arquitectura, IPN, México, D.F., 60 p.

Custodio, E. y M.R. Llamas, 1976. Hidrología subterránea. Primera edición, ediciones Omega, S.A., Barcelona, España, t.I-II, 2359 p.

Dávila-Alcocer, V.M. y J. Martínez-Reyes, 1987. Una edad cretácica para las rocas basales de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, programa, resúmenes y guía de excursión, pp.19-20.

Davies, S.N. y R.J.M. De Wiest, 1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel, Barcelona, España, 563 p.

Delgado-Argote, L.A., 1987. Análisis de D/H en alteraciones de rocas ultramáficas de San Juan de Otates, Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., programa, resúmenes y guía de excursión, pp.16-17.

Domenico, P.A., 1972. Concepts and models in groundwater hydrology. International series in the earth & planetary sciences, McGraw-Hill Book Company, New York, 405 p.

Echegoyén S., J., 1978. Yacimientos minerales de la Sierra de Arperos y Comanja, Estado de Guanajuato. Geomimet, v.3, n.93, pp.45-71.

Engelen, G.B., 1986. Water systems, methodology and definitions. In Developments in the analysis of groundwater flow systems, edited by G.B. Engelen and G.P. Jones, published by the International Association of hydrological Sciences, IAHS publication n.163, 356 p.

- Erdélyi, M. and J. Gálfi, 1988. Surface and subsurface mapping in hydrogeology. A Wiley-Interscience Publication, published in co-edition with Akadémiai Kiadó, Budapest, printed in Hungary, 384 p.
- Ferrusquía-Villafranca, 1987. Reubicación 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.
- Freeze, R.A., 1969a. Theoretical analysis of regional groundwater flow. Inland Waters Branch, Department of energy, mines and resources, Ottawa, Canada, scientific series n.3, 200 p.
- Freeze, R.A., 1969b. Regional groundwater flow -Old Wives Lake Drainage Basin, Saskatchewan. Can. Inland Waters Branch, Sci. Series n.5, 245 p.
- Freeze, R.A. and J.A. Cherry, 1979. Groundwater. Prentice-Hall, New Jersey, U.S.A., 604 p.
- Freeze, R.A. and P.A. Witherspoon, 1966. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. Water Resources Research, v.2, n.4, pp.641-656.
- Freeze, R.A. and P.A. Witherspoon, 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. Water Resources Research, v.3, n.2, pp.623-634.
- Freeze, R.A. and P.A. Witherspoon, 1968. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. Quantitative interpretations. Water Resources Research, v.4, n.3, pp.581-590.
- Fries Jr., C., 1962. Resumen de la geología de la Hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México. Hoja Pachuca 14 Q-c (11), escala 1:100,000. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F.
- Geohidrológica Mexicana, S.A., 1979. Estudio geohidrológico del Valle del Río Turbio, Guanajuato. Informe interno, SARH, contrato GZA-79-15-GD, 58 p., más figuras, tablas y planos.
- Geological Society of America, 1983. Geological time scale. Boulder, Colorado, U.S.A.
- Geyne, R.V., C. Fries Jr., K. Segerstrom, F.R. Black y F.I. Wilson, 1963. Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, Mex. CRNR, México, D.F.
- González-Reyna, J., 1959. El intrusivo granítico de Arperos y su influencia en la mineralización de Guanajuato, Gto. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, t.22, pp.9-18.
- Gross, W.H., 1975. New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, Mexico. Economic Geology, v.70, pp.1175-1189.

Groundwater Survey TNO, 1976. Geophysical well logging for geohydrological purposes in unconsolidated formations. F. Walter, editor, reproduced by National Technical Information Service, U.S. Department of commerce, Springfield, Va., 112 p.

IGF-UNAM, 1991. Estudio hidrogeoquímico y modelación matemática del acuífero del Río Turbio, para definir las acciones encaminadas a proteger de contaminantes a la fuente de abastecimiento de agua, de la ciudad de León, Gto. Informe interno, Comisión Nacional del Agua, México, D.F., en prensa.

Hantush, M.S., 1964. Hydraulics of wells. Advances in hydrosience, edited by Ven Te Chow, v.1, pp.281-432.

Hernández-Silva, G. y L. Flores-Delgadillo, 1987. Estudio pedogenético de los suelos en función de algunas unidades litoestratigráficas de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato programa, resúmenes y guía de excursión, pp.43-46.

Hitchon, B., 1969a. Fluid flow in the Western Canada Sedimentary Basin. 1. Effect of topography. Water Resources Research, v.5, n.1, pp.186-195.

Hitchon, B., 1969b. Fluid flow in the Western Canada Sedimentary Basin. 1. Effect of geology. Water Resources Research, v.5, n.2, pp.460-469.

Howard, A.D., 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v.51, n.11, pp.2246-2259, 4 figs., 1 table.

Hubbert, M.K., 1940. The theory of groundwater motion. Journal of Geology, v.48, pp.785-944.

Kovács, G., J. Gálfy and N. Pataki, 1981. Subterranean hydrology. Water Resources Publications, 978 p.

Kruseman, G.P. y N.A. De Ridder, 1975. Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Holanda, 212 p.

Liakopoulos, A.C., 1965. Variation of the permeability tensor ellipsoid in homogeneous anisotropic soils. Water Resources Res., 1, pp.135-141.

Lloyd, J.M. and J.A. Heathcote, 1985. Natural inorganic hydrochemistry in relation to the groundwater. An introduction. Clarendon Press-Oxford, England, 296 p.

Mc Dowell, F.W. and S.E. Clabaugh, 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico. Geol. Soc. Amer. Special Paper 180, pp.113-123.

Mc Dowell, F.W. and S.E. Clabaugh, 1981. The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of western Mexico. *Revista del Instituto de Geología, UNAM, México, D.F.*, v.5, n.2. pp.195-206.

Martínez G., R., 1989. Redes de flujo en perfil. Primer curso internacional de geohidrología y contaminación de acuíferos, división de educación continua, Fac. de ingeniería, UNAM, México, D.F., pp.

Martínez-Reyes, J., 1986. Geología de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., primer simposio sobre la geología regional de México, programa y resúmenes, pp.34-36.

Martínez-Reyes, J., 1987. Excursión de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, programa, resúmenes y guía de excursión, pp.50-91.

Martínez-Reyes, J., 1989. Síntesis geológica de la Sierra de Guanajuato. Serie cartas geológicas y mineras del Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., en prensa.

Meinzer, O.E., 1927. Plants as indicators of groundwater. *U.S. Geol. Surv., Water Supply Papers* 577, 91 p.

Meyboom, P., 1966. Unsteady groundwater flow near a willow ring in hummocky moraine. *Journal of hydrology*, v.4, pp.38-62.

Meyboom, P., 1967. Groundwater studies in the Assiniboine River drainage basin. Part II: Hydrologic characteristics of phreatophytic vegetation in south-central Saskatchewan. *Geological Survey of Canada, Department of energy, mines and resources, bulletin* 139, 64 p.

Mifflin, M.D., 1968. Delineation of groundwater flow systems in Nevada. *Desert Res. Inst. Tech. Rept. Ser. H-W*, n.4, Reno, Nevada, 111 p.

Morgan, C.O. and M.D. Winner, 1962. Hydrochemical facies in the 400 foot and 600 foot sands of the Baton Rouge Area, Louisiana. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 450-B, pp.B120-121.

Mújica-Mondragón y J. Albarrán, 1983. Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas del Altiplano. Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección de Tecnología de Exploración, informe interno, proyecto C-1156, 78 p.

Nava A., E. y J.A. Guzmán P., 1990. Marco geológico del sistema acuífero de la zona sur de la ciudad de León, Guanajuato. Tesis profesional, Lic. en ingeniería geológica, Fac. de ingeniería, UNAM, México, D.F., 88 p., más anexo cartográfico.

Nieto-Samaniego, A.F., 1985. Análisis estructural del Distrito minero de Guanajuato. Informe interno, Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., 42 p.

Nieto-Samaniego, A.F., 1990a. Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la porción suroriental de la Sierra de Guanajuato. Revista del Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., en prensa.

Nieto-Samaniego, A.F., 1990b. Comunicación personal.

Ophori, D.U. and J. Tóth, 1989a. Patterns of ground-water chemistry, Ross Creek Basin, Alberta, Canada. Ground Water, v.27, n.1, pp.20-26.

Ophori, D.U. and J. Tóth, 1989b. Characterization of ground-water flow by field mapping and numerical simulation, Ross Creek Basin, Alberta, Canada. Ground Water, v.27, n.2, pp.193-201.

Pool, D.R., 1985. Aquifer geology of alluvial basins of Arizona. In Regional aquifer systems of the United States, edited by T.W. Anderson and A. Ivan Johnson, American Water Resources Association, pp.25-35.

Proyesco, S.A., 1983. Investigación geofísica complementaria Valle del Río Turbio, León, Guanajuato, localizados en el Estado de Guanajuato. Informe interno, SARH, contrato CC-83-311-D, 54 p., más tablas, figuras y planos.

Quintero-Legorreta, O., 1986. Geología de los alrededores de Comanja de Corona, Estado de Jalisco. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., primer simposio sobre la geología regional de México, programa y resúmenes, pp.37-39.

Quintero-Legorreta, O., 1987. Evolución geológica del extremo nor-occidental de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, programa, resúmenes y guía de excursión, pp.25-29.

Quintero Legorreta, O., 1989. Contribución al conocimiento de la geología de la Sierra de Guanajuato, en la región de Comanja de Corona, Jalisco. Tesis profesional, M. en C. (geología), Fac. de ciencias, UNAM, México, D.F., 87 p.

Quiñones G., H., 198. El sistema fisiográfico de la dirección general de geografía. Revista de Geografía, México, D.F., v.1, n. pp.13-19.

Reeves Jr., C.C., 1977. Intermontane basins of the arid western United States. Geomorphology in arid regions, D.O. Doehring editor, proceedings volume of the eighth annual geomorphology symposium held at the State University of New York at Binghamton, pp.7-25.

Robertson, F.N., 1985. Occurrence and solubility controls of trace elements in ground water in alluvial basins of Arizona. In Regional aquifer systems of the United States, edited by T.W. Anderson and A. Ivan Johnson, American Water Resources Association, American Water Resources Association, pp.69-79.

Rodríguez F., O., 1990. Carta urbana de la Ciudad de León de Los Aldama, Gto. Escala 1:10,000.

Sánchez-Rubio, G., 1987. Algunos fenómenos geológicos relacionados con el gablo de Arperos, Gto. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, programa, resúmenes y guía de excursión, pp.18-19.

SAPAL, 1989. Compilación de información de las baterías de pozos de abastecimiento de agua potable para la Cd. de León, Gto.: características constructivas, datos de aforo, registros eléctricos y muestras de canal.

Seaber, P.R., 1962. Cation hydrochemical facies of groundwater in the Englishtown Formation, New Jersey. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 450-B, pp.B124-B126.

Segerstrom, K., 1961. Geología del SW del Edo. de Hidalgo y del NE del Edo. de México. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol., XIII, 3 y 4.

Servais, M., E. Cuevas Pérez et O. Monod, 1986. Une section de Sinaloa à San Luis Potosí nouvelle approche de l'évolution du Mexique nord-occidental. Bull. Soc. geol. Fr., t.II, n.6, pp.1033-1047.

Servais, M., R. Rojo Y. y D. Colorado L., 1982. Estudio de las rocas básicas y ultrabásicas de Sinaloa y Guanajuato: postulación de un paleogolfo de Baja California y de una digitación tethysiana en México central. Geomimet, v.3, n.115, pp.53-71.

Sommer-Cervantes, I. y G. Hernández-Silva, 1987. Riesgo de degradación de los suelos en el Municipio de Salamanca, Gto. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, programa, resúmenes y guía de excursión, pp.46-49.

SPP-INEGI-DGG, 1980. Síntesis geográfica de Guanajuato. Secretaría de Programación y Presupuesto, México, D.F., 198 p. y anexo cartográfico.

SPP-INEGI-DGG, 1988. Carta topográfica. Hoja León (F14-C41), 4a. impresión, escala 1:50,000.

SPP-INEGI-DGG, 1988. Carta topográfica. Hoja Nuevo Valle de Moreno (F14-C42), 5a. impresión, escala 1:50,000.

SPP-INEGI-DGG. 1989. Carta topográfica. Hoja San Roque de Torres (F14-C51), 4a. impresión, escala 1:50,000.

SPP-INEGI-DGG. 1989. Carta topográfica. Hoja Silao (F14-C52), 4a. impresión, escala 1:50,000.

Stewart, J.H., 1971. Basin and range structure: a system of horsts and grabens produced by deep-seated extension. Geological Society of American Bulletin, v.82, pp.1019-1044, 13 figs.

Todd, D.K., 1980. Groundwater hydrology. Second edition, John Wiley & sons, New York, U.S.A., 535 p.

Tóth, J., 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. Journal of Geophysical Research, v.67,

Tóth, J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, v.68, n.16, pp.4795-4811.

Tóth, J., 1966. Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a prairie environment, Alberta, Canada, *Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, 11, n.2, pp.1-49.

Tóth, J., 1970. Relation between electric analogue patterns of groundwater flow and accumulation of hydrocarbons. Reprinted from *Canadian Journal of Earth Sciences*, published by The National Research Council of Canada, v.7, n.3, pp.988-1007.

Tóth, J., 1970. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of hydrology*, v., n. , pp.164-176.

Tóth, J., 1972. Properties and manifestations of regional groundwater movement. *Proc., 24th Int. Geol. Cong., section 2*, pp.153-163.

Tóth, J., 1978. Gravity-induced cross-formational flow of formation fluids, Red Earth Region, Alberta, Canada: analysis, patterns and evolution. Reprinted from *Water Resources Research*, v.14, n.5, S05-S43.

Tóth, J., 1980. Cross-formational gravity-flow of groundwater: a mechanism of the transport and accumulation of petroleum (the generalized hydraulic theory of petroleum migration). Reprinted from *Problems of petroleum migration, American Association of petroleum geologist (AAPG) studies in geology n.10*, pp.121-167.

Trujillo C., J.A., 1987. Exploración geohidrológica de la zona de La Muralla, para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de León, Gto. Informe interno, SARH, 26 p., más sección y plano.

Vassallo-Morales, L.F., 1986. Análisis estructural-petrofísico de las rocas encajonantes de depósitos hidrotermales argento-auríferos en rocas volcánicas continentales del Terciario, un ejemplo en Las Torres, Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., primer simposio sobre la geología regional de México, programa y resúmenes, pp.39-41.

Vassallo-Morales, L.F., 1987. Cuantificación de las alteraciones hidrotermales en depósitos argento-auríferos, un ejemplo: Guanajuato, México. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, programa, resúmenes y guía de excursión, pp.33-35.

Vassallo-Morales, L.F. y J. Martínez-Reyes, 1988. Metamorfismo de contacto en la porción sudoriental del batolito granítico de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., tercer simposio sobre la geología regional de México, programa y resúmenes, pp.78-80.

Vázquez-Sánchez y R. Jaimes-Palomera, 1989. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, v.28, n.2, pp.133-190.

Villanueva Sánchez, S., 1988. Análisis geomorfológico aplicado a la prospección geohidrológica, en la subcuenca del Arroyo San Bruno, Municipio de Comodú, B.C.S. Tesis profesional, Lic. en Ingeniería geológica, Fac. de Ingeniería, UNAM, México, D.F., 82 p.

Villanueva Sánchez, S. y N. Hernández Laloith, 1990. Definición de zonas potenciales de recarga del Sistema acuífero del Valle de León, Guanajuato, a partir de parámetros geomorfológicos. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F., Segunda Reunión de Geomorfología, programa y resúmenes, p. 33.