



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

*ANÁLISIS PARA OPCIONES DE MANEJO DE LA
SUBCUENCA DEL RÍO TURBIO
EN EL ESTADO DE GUANAJUATO*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
(Aguas Subterráneas)

P R E S E N T A

ING. MARTHA ANGÉLICA SALAS MARTÍN

DIRECTOR DE TESIS: DR. MARIO REBOLLEDO VIEYRA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis con todo mi amor:

- ☞ A Dios por darme la oportunidad de vivir y la fortuna de crecer dentro de una familia maravillosa.*

- ☞ A mi madre Rosario Martín a quien le debo todo lo que tengo y todo lo que soy. Y que si con palabras pudiera demostrarle toda la admiración y el amor que siento por ella, todas las palabras maravillosas del mundo no me bastarían para poder hacerlo.*

- ☞ A mis hermanas Rosario y Cristina que han estado siempre conmigo, compartiendo tristezas, alegrías, secretos y aventuras, que sólo se pueden vivir y compartir entre hermanos que se quieren tanto.*

- ☞ A mi esposo Sergio por estar a mi lado y contribuir para crear el tesoro más maravilloso de toda mi existencia que es:*

- ☞ Mi adorada hija Danna Regina, que llena de ilusión toda mi vida, convirtiéndose en el motor que me da la fuerza y el aliento para seguir luchando y salir siempre adelante, tratando de ser día con día una mejor persona de la que ella se pueda sentir orgullosa.*

AGRADECIMIENTOS

- ☞ *Al Dr. Mario Rebolledo por toda su ayuda, apoyo y brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia en un marco de confianza, afecto y amistad, que fueron fundamentales para la concreción de esta tesis.*
- ☞ *A los Drs. Oscar escolero y Luis Marín por su asesoría, comentarios y consejos, que fueron de gran ayuda para el desarrollo de este trabajo de tesis.*
- ☞ *A los Drs. José Alfredo Ramos, Antonio Cardona y Graciela Herrera, por su tiempo, sugerencias y comentarios en la revisión de este trabajo.*
- ☞ *Al Ing. Francisco Cafaggi, por su amistad, apoyo y la oportunidad de permitirme trabajar a su lado compartiendo su experiencia y conocimientos que han sido de mucha utilidad para mi desarrollo profesional.*
- ☞ *A la Fis. Alejandra Cortes, a quien quiero y admiro mucho por su cariño, comprensión y apoyo en todos los sentidos sin condiciones ni medida. “Gracias Ale por ser mi maestra y amiga. Por permitirme ser parte de tu grupo de trabajo, por tus consejos, paciencia y opiniones que sirvieron para hacerme crecer como persona y profesional”.*
- ☞ *A la secretaria del posgrado Araceli Chaman por su permanente disposición y desinteresada ayuda.*
- ☞ *Al Instituto de Geofísica por darme la oportunidad de formar parte del grupo de estudiantes-investigadores de su programa de posgrado.*
- ☞ *Al Servicio Geológico Mexicano por haberme proporcionado valiosa información para realizar mi trabajo de tesis.*
- ☞ *Al CONACyT, por la beca que me otorgó, para hacer posible continuar con mis estudios de maestría.*

RESUMEN

Para manejar adecuadamente el recurso subterráneo agua, es necesario conocerlo ampliamente y de una manera cuantitativa. Entre mayor sea este conocimiento, a partir de una cuantificación precisa de los diferentes procesos físicos-químicos que lo controlan, mayores serán las probabilidades de manejarlo adecuadamente y conservarlo para garantizar su disponibilidad en el futuro.

El siguiente trabajo de tesis se llevó a cabo en la subcuenca del Río Turbio en un área de aproximadamente 4,635 km², ubicada entre los estados de Guanajuato y Jalisco, con el objeto de proporcionar información necesaria para el desarrollo de un modelo hidrogeológico, que sirva como base para generar y evaluar alternativas de manejo del agua subterránea.

El trabajo incluye compilación e integración de información previa, verificación hidrogeológica de campo, actualización piezométrica, levantamientos gravimétricos, muestreo para análisis físico-químicos, y reinterpretación de pruebas de bombeo. De la compilación, interpretación e integración de resultados se postula un modelo de funcionamiento hidráulico y se plantea un modelo matemático de simulación del comportamiento del acuífero para corto y mediano plazo.

Proyecciones del modelo matemático para 2007 muestran que, al continuar los patrones de extracción, la zona más afectada es el Valle de León y sus alrededores, con abatimientos anuales promedio de 2.6m. Para 2009 la mayor parte de la subcuenca se verá afectada por el descenso de niveles estáticos. La zona más afectada seguirá siendo el Valle de León y sus alrededores con abatimientos entre 12 y 15m con velocidades promedio de 2.7 m/año. En la parte central de la subcuenca también predominará el abatimiento, descendiendo los niveles hasta 60m a razón de 2m/año.

De los resultados obtenidos y su interpretación, se desprende la conveniencia de fijar diferentes volúmenes de extracción en zonas de mayor abatimiento a fin de que éste reduzca su velocidad hasta alcanzar un estado de equilibrio.

ABSTRACT

To properly manage the resource underground, it is widely known and need a quantitative way. The more this knowledge, based on a precise quantification of various physical and chemical processes that control it, the greater the chance of handling it properly and maintained to ensure their availability in the future.

The following thesis work was carried out in sub-basin Turbio River in an area of approximately 4,635 km², located between the states of Jalisco and Guanajuato, to provide information necessary for developing a hydrogeological model to serve as base to generate and evaluate alternative management of groundwater.

The work includes compilation and integration of prior information, check hydrogeological field, piezometric update, gravimetric surveys, sampling for physical-chemical analysis, and interpretation of pumping tests. The compilation, interpretation and integration of results suggest a model of hydraulic operation and is a mathematical model simulating the behavior of the aquifer for short and medium term.

Mathematical model projections for 2007 show that, by continuing the extraction patterns, the most affected area is the Leon Valley and surrounding areas, with annual average of 2.6m despondency. By 2009 most of the sub-basin are affected by declining levels of static. The area most affected will be the Leon Valley and its environs with depression between 12 and 15m with average speeds of 2.7 m/year. In the central part of the sub-basin also dominate the gloom, falling levels of up to 60m at a rate 2m/año.

From the results obtained and their interpretation, shows the desirability of different volumes of extraction in areas of higher abatement so that it reduces its speed until it reaches a steady state.

ÍNDICE

CAPITULO 1.

1. GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	8
1.3. Justificación	10
1.4. Hipótesis	11
1.5. Objetivo General	11
1.5.1. <i>Objetivos particulares</i>	11
1.6. Estudios Previos	11
1.7. Metodología	14
1.7.1. <i>Compilación e integración de estudios previos</i>	14
1.7.2. <i>Actividades de Campo</i>	14
1.7.3. <i>Actividades de gabinete</i>	21
1.8. Localización del área de estudio.....	22
1.9. Vías de comunicación	24
1.10. Fisiografía	25
1.11. Hidrografía	28
1.12. Clima.....	30
CAPITULO 2.	
2. MARCO GEOLÓGICO	33
2.1. Geomorfología.....	33
2.2. Geología General	35
2.3. Estratigrafía	38
2.3.1. <i>Unidad ultramáfica San Juan de Otates (JsUm)</i>	41
2.3.2. <i>Diorita Tuna Mansa (JsD)</i>	41
2.3.3. <i>Basaltos La Luz (JsBa)</i>	42
2.3.4. <i>Unidad Volcano-sedimentaria (JsVs)</i>	43
2.3.5. <i>Conglomerados Duarte – Cenicera (TpaeCgp)</i>	43
2.3.6. <i>Rocas volcánicas del Oligoceno (ToR, ToR-Ig, ToTR, ToR-TR)</i>	44
2.3.7. <i>Rocas Volcánicas del Mioceno (TmA-B)</i>	45
2.3.8. <i>Unidades sedimentarias del Mioceno y Plioceno (TnAr-Cgp, TplCz)</i>	46
2.3.9. <i>Depósitos sedimentarios recientes (Qal, Qal-Tb)</i>	47
2.3.10. <i>Intrusivos terciarios (TpgGr, ToGa)</i>	48
2.4. Geología estructural	49

2.5. Exploración Geofísica.....	53
2.5.1. Secciones Gravimétricas.....	57
CAPITULO 3.	
3. HIDROGEOLOGÍA	63
3.1. Distribución de unidades hidrogeológicas	63
3.1.1. Secciones Geológico - Hidrogeológicas.....	68
3.2. Piezometría	76
3.2.1. Redes de Monitoreo y datos piezométricos.	77
3.2.2. Niveles piezométricos históricos.....	83
3.2.3. Niveles piezométricos recientes	92
3.3. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	105
3.3.1. Mecanismos de flujo del agua subterránea.....	105
3.3.2. Flujo de agua subterránea.....	105
3.4. Funcionamiento hidráulico del acuífero.....	112
3.4.1. Zonas de recarga y descarga.....	112
3.4.2. Parámetros Hidráulicos.	119
3.5. Modelo Hidrogeológico del área de estudio	133
3.5.1. Geometría y tipo de funcionamiento	135
3.5.2. Condiciones de frontera	138
CAPITULO 4.	
4. HIDROGEOQUÍMICA.....	139
4.1. Toma de muestras y parámetros obtenidos en campo para cada aprovechamiento. ..	141
4.1.1. Manejo de muestras y laboratorios	144
4.2. Análisis de resultados hidrogeoquímicos.....	145
4.2.1. Familias y calidad del agua	172
4.2.2. Características isotópicas de la zona de estudio.....	181
CAPITULO 5.	
5. MODELO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA.....	190
5.1. Antecedentes en la zona.	191
5.2. Objetivos	194
5.3. Metodología	194
5.4. Calibración del modelo.....	206
5.5. Resultados del modelo.....	210
5.5.1. Zonificación acuífera para manejo de agua subterránea	217

CAPITULO 6.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	222
6.1. Conclusiones.....	222
6.2. Recomendaciones	231

CAPITULO 7.

7. BIBLIOGRAFÍA.....	233
ANEXO PRUEBAS DE BOMBEO.....	241

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Panorama general del agua subterránea

El crecimiento y sostenimiento de las sociedades humanas siempre ha estado íntimamente relacionado a la disponibilidad y fácil acceso de agua dulce para consumo directo, riego, cría de animales y mantenimiento de la infraestructura industrial. En otras palabras, la disponibilidad de agua para el consumo, está relacionada directamente con el crecimiento y desarrollo de la población.

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

Se puede considerar al agua como un recurso renovable, considerando que el ciclo hidrológico no tiene fin, pero por otro lado, no debemos olvidar que mientras la cantidad de agua dulce disponible es constante, la demanda humana está creciendo continuamente. Con lo cual el tiempo de recuperación de los mantos acuíferos es cada vez mayor y en algunos casos, se puede ir a tiempos incalculables anticipándose finalmente un déficit en el suministro de agua para una población en constante crecimiento.

El tiempo de residencia del agua subterránea varía desde algunas semanas hasta periodos de miles de años, dependiendo de las condiciones topográficas, geológicas e hidrogeológicas de la región que se considere en su análisis (*Tóth, 1966*). Este concepto, de residencia del agua en el subsuelo, determina si el recurso es renovable o no a escala humana, lo que debe derivar en los criterios para su manejo y conservación.

Existen áreas donde se presentan problemas de disponibilidad de agua de buena calidad y las ciudades dependen del agua subterránea para todas sus necesidades por lo que en la mayoría de los casos esta fuente sufre riesgos de contaminación y sobreexplotación; si aunado a esto mencionamos, los problemas causados por el Cambio Climático Global, en donde las variaciones climáticas son capaces de alterar los regímenes de lluvias y de sequía, pudiendo cambiar en forma importante la recarga de los acuíferos en los próximos años, encontramos un panorama preocupante que nos estimula a la planificación de exploración, caracterización y monitoreo de recursos acuíferos.

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

La desventaja más grande del agua subterránea es el desconocimiento que se tiene acerca de su potencial. Con frecuencia se actúa de manera indiscriminada, pensando que este recurso es inagotable y se pasa por alto que la capacidad de estos sistemas es limitada y una sobreexplotación que exceda la capacidad natural de recarga al subsuelo, provocará una gran cantidad de daños que se han manifestado en diversas partes del país; una de las consecuencias prácticamente irreversibles y más notable del efecto que provoca la sobreexplotación del agua subterránea, es el descenso acelerado de los niveles, lo que origina procesos de compactación de las unidades hidrogeológicas provocando el problema de subsidencia. Este fenómeno, es un reflejo de la compactación del material, que reduce de manera irreversible, el espacio de almacenamiento. Por otra parte el asentamiento que sufre el terreno daña las estructuras civiles además de generar agrietamientos en el terreno que favorece la

entrada de contaminantes al subsuelo. Estos fenómenos de manera individual o combinada afectan los sistemas de distribución y conducción del agua potable.

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

Manejo del Agua Subterránea

El interés y desarrollo en el estudio de aguas subterráneas, ha crecido dada la necesidad de obtener este vital elemento con una mayor facilidad y una mejor calidad tanto para el consumo doméstico como para el uso industrial, agrícola y municipal.

Un buen manejo del agua, se ha convertido en una de las principales preocupaciones para asegurar la calidad de vida y el desarrollo económico sostenible de la sociedad.

Para manejar adecuadamente el recurso subterráneo, es necesario conocerlo ampliamente y de una manera cuantitativa. Entre mayor sea este conocimiento, a partir de una cuantificación precisa de los diferentes procesos físicos-químicos que lo controlan, en diferentes escalas de espacio y tiempo, mayores serán las probabilidades de manejarlo adecuadamente y conservarlo para garantizar su disponibilidad en el futuro.

Conocer el agua subterránea significa entender el sistema de flujo y sus controles, a través de sus evidencias en superficie (suelo, vegetación, evidencias de agua subterránea tales como manantiales, pozos, etc.), además de sus propiedades químicas e isotópicas. Los isótopos ambientales como los isótopos de la molécula del agua: oxígeno-18 y deuterio permiten determinar el origen y la elevación de las zonas de recarga y en el caso del tritio se puede determinar la edad en los últimos 50 o 60 años. La geología de superficie y subsuelo se estudia por medio de técnicas geológicas, métodos geofísicos y por medio de pozos. El comportamiento físico y

químico obedece a leyes fundamentales cuyo comportamiento puede predecirse por medio de modelos numéricos y soluciones analíticas.

Para un buen manejo, aprovechamiento o explotación de los sistemas de aguas subterráneas de un área, es necesaria la realización de una secuencia de estudios que permitan caracterizar estos sistemas y así obtener una mejor comprensión y evolución del sistema acuífero estudiado.

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

Importancia de los estudios hidrogeológicos

Los estudios hidrogeológicos que se llevan a cabo en un área determinada, proporcionan la información necesaria para poder desarrollar, calibrar, validar y aplicar un modelo hidrogeológico, que sirva como base para generar y evaluar alternativas de manejo del agua subterránea.

Para evaluar y comprender el comportamiento del acuífero en el área de estudio, es importante obtener la mayor cantidad de datos sobre la forma de ocurrencia del agua subterránea; profundidades del nivel del agua subterránea; espesores de los materiales y su litología, química de las aguas, parámetros hidráulicos y otros datos técnicos de relevancia. Por lo tanto es necesario realizar los siguientes estudios:

Estudios geológicos

La geología es la base científica para la explotación de los recursos naturales y para la búsqueda de soluciones a problemas ambientales. El conocimiento geológico se obtiene partiendo del contexto regional hacia el contexto local, para una mejor visión y análisis integral de la situación.

Los estudios geológicos (estratigrafía, sedimentología, análisis estructural, petrología, geoquímica) permiten definir la naturaleza y características de las formaciones presentes, los límites del acuífero o de los acuíferos y su volumen aproximativo; la calidad de las formaciones (permeables, semipermeables, impermeables, calidad geoquímica) y la presencia de varias capas. Permiten establecer mapas, estructurales a partir de curvas de nivel y curvas isopacas (igual espesor) para conocer el techo y la base del acuífero en cuestión. Esta información constituye la base de los estudios hidrogeológicos.

Caracterización hidrodinámica del acuífero:

Para completar los estudios geológicos y confirmar hipótesis de trabajo es necesario definir la dinámica del acuífero. El estudio de la hidrodinámica permite identificar y clasificar los tipos de acuíferos, precisar la dinámica del agua, establecer modelos de flujos subterráneos, precisar las interconexiones con los medios adyacentes, y respuesta del acuífero a incitaciones exteriores. La definición de la calidad y estudio del uso de las aguas para los diversos fines (abastecimiento humano, industrial, agricultura u otros usos) brinda herramientas para la protección adecuada de los acuíferos.

Para establecer las características hidrodinámicas del acuífero es necesario establecer mapas piezométricos es decir, mapas que nos indiquen el nivel del agua en el acuífero. Por eso es indispensable iniciar el trabajo de campo con el censo de los pozos existentes, los cuales deben estar georeferenciados (datos x, y, z).

La superficie piezométrica representa el límite superior del acuífero, el cual varía en el tiempo y el espacio. Por esto es necesario tener una red de medición la mas densa posible y efectuar el monitoreo varias veces al año para tener una idea de la dinámica

del acuífero y su evolución temporal bajo efectos de explotación de las aguas o cambios naturales (sequías, movimientos de terreno,...). El monitoreo de los niveles piezométricos permite conocer el sentido del flujo y la interconexión y límites de acuíferos.

Las pruebas de bombeo permiten la medida in-situ de los parámetros hidrodinámicos del acuífero como Transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S). Estos ensayos permiten el estudio de las características particulares de los acuíferos como las condiciones a los límites, estructura, heterogeneidad, goteo,... y permiten la observación directa de los efectos de la explotación del acuífero (descenso de nivel en función de los caudales bombeados) y estimación de la reserva de agua subterránea.

Todos estos parámetros nos brindan las llaves para desenvolver un modelo conceptual.

En resumen, para establecer el modelo conceptual es necesario determinar la distribución espacial de las formaciones permeables y almacenadoras de agua, sus áreas, espesores, litología, granulometría, extensión, composición mineralógica, tipo de permeabilidad, fracturamiento, cavidades de disolución y demás propiedades relevantes.

Estudios Hidrogeoquímicos

Dentro de los estudios efectuados para la definición del modelo hidrogeológico en una zona de estudio, es necesario, en problemas de abastecimiento de agua subterránea, conocer la calidad de la misma, ya que es un factor limitante para cualquier uso que se le quiera dar, como industrial, agrícola, doméstico, etc.

Los estudios hidrogeoquímicos son indispensables a los estudios hidrogeológicos y se deben complementar con información geológica, hidráulica e hidrogeológica.

La hidroquímica es una herramienta hidrogeológica básica capaz de aportar valiosa información sobre el origen y distribución del agua subterránea y los procesos físico-químicos que la afectan.

Las condiciones básicas del estudio hidrogeoquímico son un muestreo representativo y un método analítico preciso y fiable, incluyendo el tratamiento y almacenamiento de las muestras.

El objetivo de un estudio hidrogeoquímico es el análisis del flujo del agua en el sistema acuífero, como vehículo de transporte de las características físico-químicas, químicas, isotópicas y ambientales. Por lo tanto, la observación de la distribución espacial de esas características y la explicación de sus variaciones puede informar sobre el movimiento del agua subterránea (recarga, circulación, almacenamiento, descarga) y dar bases de cuantificación.

La hidrogeoquímica al proveer información sobre la distribución de los elementos y su evolución espacial y temporal en sistema hídrico, ayuda a caracterizar los acuíferos y definir problemas ambientales y plan de remediación. El conocimiento de los procesos que ocurren en los ambientes acuáticos es fundamental para caracterizar y planear el manejo del recurso y en particular, para planear su aprovechamiento. Los elementos disueltos, como los isótopos del agua, permiten tener información sobre la renovación de las aguas en los acuíferos (recarga), identificación de aguas antiguas (origen y edad del agua), interconexiones hidráulicas entre varios acuíferos, mezcla de aguas de origen diferente, hidrodinámica de los acuíferos (flujos y edad), disolución de evaporitas, vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (origen y circulación de los contaminantes), entre otros.

Modelos de simulación de acuíferos

La complejidad de los medios geológicos, así como el que cada vez más se requieran estudios de mayor detalle, ha provocado un gran auge en el empleo de modelos numéricos en hidrogeología, fundamentalmente de flujo de agua.

Una herramienta que permite integrar las acciones sobre el sistema acuífero con sus propiedades hidrogeológicas, geométricas y de estado, es la modelación numérica del mismo (*Hernández A.O. et al 2001*).

En hidrogeología los modelos matemáticos son ampliamente utilizados, siendo una herramienta muy útil para lograr establecer el pronóstico del comportamiento del sistema acuífero tanto en el establecimiento de estrategias de explotación como para evaluar su comportamiento por la influencia de obras de ingeniería con las cuales tengan interacción. Sin embargo, no debemos olvidar que para desarrollar modelos numéricos exitosos es necesaria una clara definición del modelo conceptual que describe los principales componentes y mecanismos hidrogeológicos que se simularán.

Los modelos numéricos del flujo de agua subterránea son importantes ya que permiten integrar los datos hidrológicos y predecir de qué manera los niveles de agua en un acuífero responderán a la extracción. Simulan la relación estímulo–respuesta en los sistemas acuíferos, en donde el estímulo puede ser el bombeo en pozos y la respuesta el abatimiento de los niveles de agua.

La aplicación de la tecnología de la modelación matemática de acuíferos contribuye a mejorar el conocimiento de las disponibilidades de estos recursos y a desarrollar políticas racionales de administración que garanticen su desarrollo sustentable.

1.2. Antecedentes

El acelerado crecimiento de la sociedad y el desarrollo económico en Guanajuato a provocado un aumento en la demanda de agua, de tal forma que para poder satisfacer las necesidades de la población se a incrementado en gran medida el número de perforaciones de pozos en la región (en la actualidad hay aproximadamente 17,000 pozos en el Estado) y como consecuencia un constante abatimiento en los niveles de agua subterránea. Hoy por hoy, el balance de agua subterránea en Guanajuato presenta un déficit de 1,200 millones de metros cúbicos por año, mientras que el nivel de almacenamiento en las presas ha mostrado variaciones considerables a través del tiempo. (*Montoya, 2004*)

Desde 1998 los esfuerzos del Gobierno del Estado de Guanajuato, han estado enfocados a la realización de estudios y modelos matemáticos de los acuíferos, iniciando un proceso de planeación participativa del agua en el Estado para diseñar

estrategias y políticas hidráulicas para un mejor manejo del agua con una visión de largo plazo.

Como apoyo para dichos estudios, el grupo de Hidrología Isotópica del Instituto de Geofísica de la UNAM, en colaboración con el SGM (Servicio Geológico Mexicano) han venido realizando en la zona del Bajío desde el año 2003 una serie de trabajos que incluyen la actualización de gran parte de la información hidrogeológica sobre las subcuencas de los ríos Turbio y Guanajuato y en los cuales la que suscribe ha sido participe.

A partir de la información bibliográfica, el trabajo de campo, y el análisis e interpretación de datos y resultados geológicos, geoquímicos e hidrogeológicos realizados por la Ingeniera Martha Angélica Salas Martín, durante el desarrollo de estos trabajos para contribución de los mismos; se desprende el siguiente trabajo de tesis de maestría para la elaboración de un modelo más completo del funcionamiento acuífero de la Subcuenca del Río Turbio.

Con este trabajo, se pretende contribuir a la planificación de estrategias de protección de las aguas subterráneas y ser una referencia para investigaciones futuras en el área de estudio.

La Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), aportó información previa, guías de campo, redes de monitoreo piezométrico y de calidad de agua y diversas bases de datos georreferenciadas, así como ideas y comentarios sobre los resultados y su interpretación.

En la zona de estudio los trabajos de carácter hidrológico tradicionalmente se han elaborado para acuíferos, mismos que están limitados por medio de poligonales simplificadas cuyos nombres y extensiones fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF), de fecha 5 de diciembre del año 2001. A diferencia de lo anterior, la zona a la cual se enfoca este trabajo está enmarcada por una subcuenca (Río Turbio).

Desde un punto de vista administrativo, la región de estudio se encuentra el Distrito de Riego No. 011 *Alto Lerma*, enmarcado en la Región Hidrológico-Administrativa VIII

Lerma-Santiago-Pacífico. Esta región ha sido motivo de diferentes tipos de veda para la explotación de aguas subterráneas y actualmente toda la zona está sujeta a una Veda del tipo Rígida.

Dentro de la Subcuenca del Río Turbio se localizan tres acuíferos: *Río Turbio*, *Valle de León* y *Pénjamo - Abasolo*, el primero se encuentra contenido en su totalidad mientras que los otros lo están parcialmente.

La zona en estudio es de gran importancia económica desde el punto de vista agrícola, por lo que requiere grandes volúmenes de agua, siendo la subterránea la principal fuente de abastecimiento para el riego de los cultivos, aunque también se aprovecha el agua del Río Turbio, mismo que recibe y transporta descargas residuales de las poblaciones que se encuentran a su paso, primordialmente de León y San Francisco del Rincón.

1.3. Justificación

En este trabajo de tesis se pretende presentar un modelo preliminar del flujo de aguas subterráneas en donde la modelación matemática se emplea para la caracterización del sistema acuífero, como una metodología para verificar y contrastar las diferentes hipótesis de funcionamiento del mismo. Los mapas y datos hidrogeológicos generados durante el desarrollo del estudio con características locales y regionales, son una herramienta fundamental de apoyo para la modelación.

Los resultados mostrados tienen implicaciones importantes en relación a la extracción de agua subterránea que se está realizando en la actualidad y con las posibilidades de manejo futuras.

Un buen manejo del agua propicia la explotación, uso y aprovechamiento racional del acuífero, a fin de evitar la sobreexplotación y contaminación, a través de la formulación de programas y acciones para su estabilización y recuperación.

1.4. Hipótesis

La hipótesis plantea que el análisis de los estudios hidrogeológicos requiere de importantes aportaciones de datos geológicos y geoquímicos, que contribuyen a la elaboración de un modelo de simulación más completo del sistema acuífero, lo que permite programar un mejor manejo del agua, haciendo posible optimizar su uso.

1.5. Objetivo General

➤ El objetivo principal de este trabajo, es la elaboración de un modelo de simulación matemático a partir de un estudio hidrogeológico, para predecir el comportamiento del agua subterránea de la subcuenca del Río Turbio y proponer alternativas para su manejo.

1.5.1. Objetivos particulares

- Llevar a cabo una verificación hidrogeológica y geológica de las diferentes unidades litológicas que afloran en la región.
- Determinar las principales zonas de recarga natural y las direcciones preferentes de flujo de agua subterránea.
- Determinar el funcionamiento y geometría de acuífero por medio de la elaboración de un modelo conceptual.

1.6. Estudios Previos

Dada la importancia agrícola e industrial de la región, la zona de estudio ha sido objeto de numerosos estudios de carácter hidrogeológico, la mayoría por encomienda de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y organismos que le antecedieron o CEAG. También existen compendios y cartografía de tipo regional, desarrollados y publicados por el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI) y por el SGM. A continuación se hace una breve reseña de algunos informes consultados.

En 1969 la empresa Ariel Construcciones, S. A., realiza uno de los primeros trabajos al noreste de la zona de estudio, particularmente en el Valle de León, para dar continuidad a los trabajos piezométricos llevados a cabo en años anteriores. Fueron

observados descensos en los niveles piezométricos (7 metros para un periodo de 21 años, 1948-1969) mismos que fueron atribuidos a la incipiente sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos.

A partir de 1997 CEAG encomendó a diversas empresas el hacer estudios de carácter hidrogeológico con el objeto de programar el manejo de los acuíferos. Por lo cual, en 1998 la empresa Lesser y Asociados, S.A. de C.V. elaboró el *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero Pénjamo-Abasolo*. De este estudio se destaca la presencia de 3 horizontes acuíferos: somero, intermedio y profundo, de los cuales al somero e intermedio se les consideró prácticamente agotados.

También en 1998 Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., llevó a cabo el *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de León, Gto.* Del anterior se desprende que el tipo de acuífero es libre, heterogéneo y anisotrópico, con un abatimiento anual de 1.6 m y con un cambio de almacenamiento negativo de 68 Hm³, obteniéndose una nueva visión de la geometría espacial del subsuelo y se definieron 8 unidades hidroestratigráficas. Se concluye que existe una tendencia marcada de la dirección del flujo subterráneo a converger radialmente hacia un cono de dimensiones regionales que se localiza al centro del valle.

En el mismo año la empresa Geopsa, S.A. de C.V., llevó a cabo el *Estudio Hidrogeológico del Acuífero del Valle del Río Turbio*. Incluyó 22 pruebas de bombeo con las que se asignó valores de transmisividad a diferentes conjuntos litológicos. Valores de recarga de 51 Hm³ se atribuyeron a la zona norte y oeste del valle –Altos de Jalisco-, mientras que se asignó un valor de 63 Hm³ a la recarga vertical, de tal modo que la recarga total asignada fue de 121 Hm³. Se establece que el Río Turbio es el principal agente contaminante del valle y a la vez se recomienda establecer políticas de control y saneamiento de las descargas. También se indica que el sistema acuífero funciona como libre y está integrado por unidades litológicas de tipo granular y fracturadas que se comunican hidráulicamente entre si.

En 1999 el estudio denominado *Desarrollo de un Modelo Integral para el Análisis Coordinado de las Aguas Subterráneas y Superficiales en las Subcuencas de los Ríos*

Turbio y Guanajuato, fue llevado a cabo por Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V. De entre las actividades importantes destacan la elaboración de un balance de aguas subterráneas, dando como resultado un déficit de 207 Hm^3 y el balance de aguas superficiales que arrojó infiltración de 303 Hm^3 . Se propuso la existencia de un acuífero de tipo libre, sin marcados contrastes de conductividad hidráulica entre unidades hidroestratigráficas. Se definieron parámetros hidráulicos del sistema por medio de la información arrojada en 53 pruebas de bombeo.

En el mismo año el Instituto de Geofísica de la UNAM llevó a cabo el *Estudio isotópico para la caracterización del agua subterránea en la zona de la Muralla, Gto.* En dicho trabajo se hace la caracterización isotópica del agua subterránea y se determina el origen de la misma.

En el 2001 CEAG inicia la conformación de la red estatal para el monitoreo de la calidad del agua subterránea, la cual se realiza por etapas, incorporando pozos existentes, representativos para la calidad del agua subterránea y su evolución con el tiempo. Por tal motivo, en ese mismo año, el Instituto de Geofísica de la UNAM, elaboró el primer estudio *Definición de red para la caracterización e la calidad fisico-química del agua subterránea para el Acuífero de Pénjamo – Abasolo*. En este estudio, como su nombre lo indica, se propone una red de monitoreo para la calidad de agua y a la vez se sugiere el monitoreo constante de la misma.

En 2002 Ramos Leal elaboró su tesis doctoral sobre *Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental, caso Río Turbio, Guanajuato*. El trabajo presenta mapas de vulnerabilidad acuífera utilizando el método DRASTIC. Asimismo se indica la presencia de dos acuíferos, uno relacionado a un medio granular y otro enmarcado en un medio fracturado.

Para 2004 el SGM llevó a cabo el estudio *Potencial Hidrogeológico del Graben de León*, el cual está enmarcado en la Subcuenca del Río Guanajuato. Destacan puntos como el espesor de las rocas y materiales con potencial acuífero que va de 400 hasta cerca de 1000 m, con un grosor promedio de 350 m para la parte granular. El acuífero a nivel de subcuenca es de tipo libre, con la presencia de horizontes arcillosos que, de

forma local, forman condiciones de semi-confinamiento, se infiere la presencia de fosas profundas sepultadas bajo rellenos sedimentarios, de entre las mas importantes resalta el Graben de León. Se llevaron a cabo líneas de exploración gravimétrica cuya interpretación permitió delimitar la configuración del basamento hidrogeológico, además del espesor y morfología del paquete granular y fracturado favorable para el almacenamiento de agua.

1.7. Metodología

El trabajo se desarrollo en varias etapas, que se hicieron en campo, gabinete y laboratorios:

1.7.1. Compilación e integración de estudios previos

Inicialmente se revisó información existente de diversos estudios proporcionados por el IGF, CEAG, además de bibliografía propia del SGM. Del conocimiento previo que se tenía sobre la vecina subcuenca del Río Guanajuato, más el análisis de la información previa y los comentarios y observaciones de los técnicos de CEAG, se estableció una idea general de las condiciones de la zona de estudio, particularmente sobre piezometría, geología, funcionamiento del acuífero y de las principales características físicas y químicas del agua subterránea.

1.7.2. Actividades de Campo

1.7.2.1 Verificación Geológica

Después de analizar la información geológica previa, se visitaron sitios donde afloran las diferentes unidades litológicas para corroborar o describir las características litológicas, texturales y estructurales descritas en informes previos, así como sus espesores, dimensiones y ubicaciones correctas (Fotografías 1.1 a 1.4). Durante esta etapa se puso especial interés en el seguimiento de estructuras geológicas locales y regionales, las cuales pudieran estar relacionadas directamente con el comportamiento del sistema acuífero.



Fotografías 1.1 y 1.2 Ubicación y recorrido de puntos de verificación geológica.



Fotografías 1.3 y 1.4 Descripción y verificación de unidades litológicas

1.7.2.2 Verificación Hidrogeológica.

Posteriormente se llevó a cabo la verificación hidrogeológica de campo, en la cual se caracteriza de manera cualitativa a las unidades litológicas que afloran en la zona de estudio conforme al marco geológico preliminar. Entre otros, se observaron rasgos litológicos, estructurales, de alteración y grado de fracturamiento, así como las características del mismo (apertura, continuidad, tipo de relleno, facilidad para el tránsito de agua a través de estas estructuras, etc.). Como resultado de la verificación se estableció la susceptibilidad de las rocas y material granular a transmitir o almacenar agua, es decir, se definió cualitativamente si corresponden a unidades de muy baja, baja, mediana o alta permeabilidad, en función de las características de la roca intacta y de sus discontinuidades. Se estableció si el o los acuíferos se emplazan en materiales granulares o en roca fracturada, además se definió que unidades son propias para recarga natural al sistema acuífero y cuales operan como barrera natural, es decir que generan cierto confinamiento de los acuíferos.

1.7.2.3 Censo de Aprovechamientos

Con dos brigadas de campo se realizó un barrido en la zona de estudio, donde se detectaron aprovechamientos de agua superficial (manantiales y presas) y subterránea (pozos y norias).

En los mismos aprovechamientos censados, con el auxilio de aparatos portátiles para la medición de multiparámetros, se tomaron los siguientes parámetros físico – químicos: conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), pH, Eh, salinidad, oxígeno disuelto y temperatura del agua. (Fotografías 1.5 y 1.6)

A los aprovechamientos censados se le asignó un número progresivo con las siglas del Servicio Geológico Mexicano con la finalidad tanto de tener un control interno como para control en posteriores censos, cada sitio censado se marcó en el campo con pintura y se obtuvo la fotografía electrónica correspondiente (Fotografías 1.7 y 1.8).



Fotografías 1.5 y 1.6 Toma de parámetro fisicoquímicos de los aprovechamientos.



Fotografías 1.7 y 1.8 Censo y marcado de aprovechamientos.

1.7.2.4 Recolección de muestras y análisis físico - químico.

Se llevo a cabo una campaña de muestreo de agua, tanto superficial como subterránea. La selección de pozos a muestrear fue hecha tomando en cuenta la distribución geográfica de la zona, además, buscando muestrear los diferentes niveles a los que se encuentra el agua a profundidad.

Directamente en el sitio de muestreo se hicieron las determinaciones de pH, Eh, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y salinidad; también en campo, por medio de titulación se determinó la concentración de carbonatos y bicarbonatos en las muestras.

Para la toma de muestras se siguió un riguroso plan de muestreo, siguiendo el protocolo del Manual de Muestreo de Aguas Subterráneas de CNA (1999), con el objeto de evitar contaminación desde su punto de recolección hasta su entrega al laboratorio correspondiente. (Fotografías 1.9 y 1.10)

Con el fin de determinar un posible origen del agua se tomaron muestras para análisis de Oxígeno 18 y Deuterio, además, se incluyeron análisis de tritio, el cual es un elemento que brinda un panorama general sobre la edad del agua.

La cantidad de muestras tomadas, así como los elementos analizados, los laboratorios que hicieron los análisis y la interpretación de los mismos, se describen ampliamente en el Capítulo de Hidrogeoquímica.



Fotografías 1.9 y 1.10 Toma de muestras en aprovechamientos.

1.7.2.5 Mediciones Piezométricas.

Con el propósito de conocer la profundidad del nivel del agua subterránea en la zona, así como la posición de la carga hidráulica y con ella la dirección del flujo subterráneo, se midieron los niveles estáticos y/o dinámicos de los aprovechamientos subterráneos que permitieron la introducción de una sonda eléctrica para tal fin. (Fotografías 1.11 y 1.12)

Se llevó a cabo una campaña de monitoreo piezométrico para el periodo Secas 2004, la cual consistió en medir los niveles estáticos de la redes piezométricas Valle de León, Río Turbio y Pénjamo Abasolo, que fueron proporcionadas por CEAG, además de mediciones llevadas a cabo en pozos que no forman parte de dichas redes con el fin de complementar y enriquecer los resultados piezométricos. Con los resultados de esta campaña y la compilación de datos históricos se generaron mapas de profundidades, elevaciones y evoluciones de niveles estáticos, a la vez que se determinaron las principales zonas de recarga.

Para la campaña de campo se contó con el apoyo de personal técnico de CEAG.

1.7.2.6 Pruebas de Bombeo

Para la estimación de parámetros hidráulicos del acuífero se llevaron a cabo siete pruebas de bombeo en pozos propuestos por CEAG (Anexo 1), se reinterpretaron 21 pruebas desarrolladas previamente por una firma contratista y se consideraron los resultados de 17 pruebas más de otra firma. Se utilizó el programa AquiferTest V3.5 a fin de obtener valores de transmisividad, conductividad y coeficiente de almacenamiento, mismos que se representaron en mapas de isovalores para las etapas de abatimiento y recuperación (Fotografías 1.13 y 1.14).



Fotografías 1.11 y 1.12 Mediciones piezométricas en pozos.



Fotografías 1.13 y 1.14 Pruebas de bombeo en pozos propuestos por CEAG

1.7.3. Actividades de gabinete

1.7.3.1 Funcionamiento hidráulico del acuífero.

Se elaboraron una serie de planos, diagramas y figuras donde se destacan, entre otros aspectos, las diferentes unidades hidrogeológicas que afloran en el área; así como, la distribución de las mismas y de las zonas de recarga y descarga que imperan en la zona. Con el apoyo de los mapas de piezometría se marcaron las principales direcciones de flujo subterráneo, lo cual permitió observar una tendencia bastante clara del flujo a invertirse hacia dentro de la subcuenca.

Como resultado de esta actividad se elaboró una representación esquemática del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, *modelo conceptual*, la cual incluye, entre otros aspectos, geometría espacial del sistema, tipo de funcionamiento del acuífero, condiciones de frontera y los regímenes de flujo subterráneo.

1.7.3.2 Caracterización Hidrogeoquímica

Se interpretaron e integraron los resultados físico-químicos e isotópicos de las muestras de agua a fin de apoyar a que el modelo conceptual hidrogeológico describa con la mayor certidumbre las características del agua para la zona de estudio, además de la dinámica del flujo subterráneo, calidad del agua, origen de la misma y el de diversos contaminantes.

Utilizando el programa ArcView 8.3 se elaboraron representaciones espaciales apoyadas en mapas de isovalores de concentraciones para elementos y parámetros considerados importantes, de la misma forma, con el programa Aquachem 4.0 se logró la caracterización de la calidad del agua tomando en cuenta los diagramas de Piper y Stiff, entre otros.

1.7.3.3 Simulación hidrodinámica

Utilizando el programa Visual ModFlow Pro se generó un modelo de simulación hidrodinámica, el cual representa las condiciones iniciales y actuales del sistema acuífero. A fin de lograr una proyección de las condiciones piezométricas a tres y cinco años se cargaron al programa una serie de parámetros como geometría y espesores

de las capas del subsuelo, piezometría inicial, transmisividades, conductividades, caudales de bombeo e inyección, ubicación de los aprovechamientos, etc.

A través del manejo del modelo de simulación se predice el comportamiento de los niveles del acuífero bajo los regímenes hidrológicos y administrativos que imperan en la actualidad, además se elaboraron una serie de recomendaciones para la administración del agua subterránea.

1.7.3.3 Edición de la Tesis

Finalmente, se preparó el informe del trabajo de tesis, mismo que incluye la reseña de las actividades llevadas a cabo, los resultados obtenidos e interpretación de los mismos, además de las conclusiones y recomendaciones que se desprendieron.

1.8. Localización del área de estudio

La Subcuenca del Río Turbio se encuentra ubicada en la porción centro occidental del Estado de Guanajuato, en su límite con el Estado de Jalisco, entre los paralelos 20°18' y 21°15' de Latitud Norte y los meridianos 101°25' y 102°15' de Longitud Oeste, dentro de los municipios de León, San Francisco del Rincón, Manuel Doblado, Cuerámara, Abasolo, Purísima del Rincón, Romita y Pénjamo del Estado de Guanajuato, y Lagos de Moreno, Unión de San Antonio, San Diego de Alejandría y Jesús María en Jalisco, cubriendo una extensión aproximada de 4,635 km². Los límites de la subcuenca son, al noreste y norte la Sierra de Guanajuato, al noroeste y oeste los altos de Jalisco, al suroeste la Sierra de Pénjamo, al sur el Río Lerma, al sureste la Sierra de Abasolo y el Valle de Irapuato y al oriente el Valle de Silao – Romita y la zona de La Muralla (Fig. 1.1)

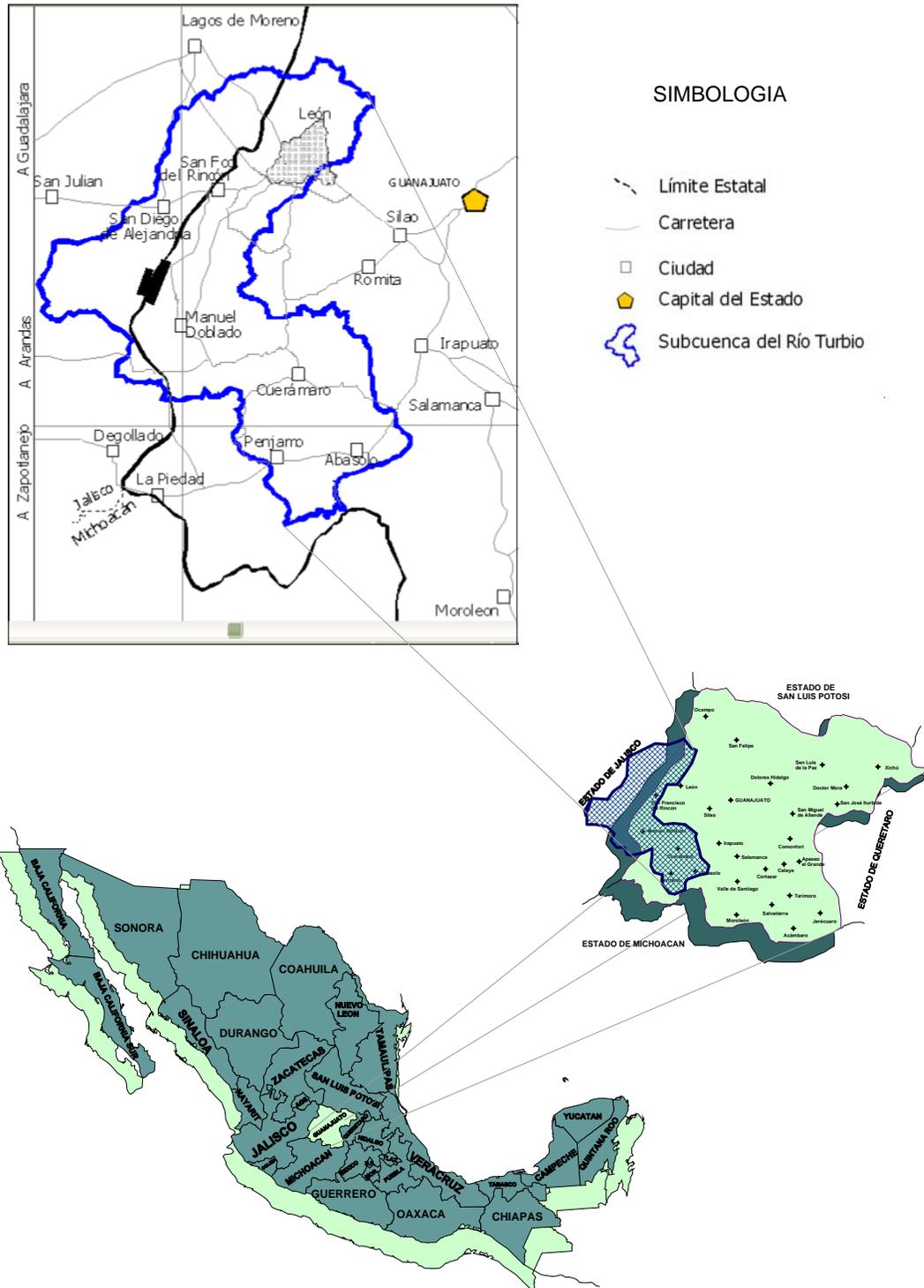


Figura 1.1 Localización del área de estudio

1.10. Fisiografía

La zona de estudio se encuentra ubicada principalmente dentro de dos provincias fisiográficas: al noroccidente del Eje Neovolcánico, que abarca aproximadamente un 90% del área, y al suroccidente de la Mesa del centro que está representada por la zona que corresponde a la Sierra de Guanajuato que representa aproximadamente un 10% del total de la superficie de la subcuenca (Figura 1.3)

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

En esta zona existen dos subprovincias que son (SSP,1980):

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

- Franja de transición (Pie de monte). Vía de infiltración de los escurrimientos que alcanzan esta subprovincia. Su origen se debe al procesos erosivo-acumulativo que ejercen algunos factores externos.

- Planicie acumulativa nivel de base. Es la más extensa y donde se emplazan el mayor número de aprovechamientos de agua subterráneas y áreas de cultivo con aguas subterráneas y residuales.

2. Los Altos de Jalisco, que abarca solamente la parte noroccidental del área y se caracteriza por sus sierras altas de cumbres escarpadas. Agrupa a rocas volcánicas del Terciario pertenecientes a las unidades litoestratigráficas aflorantes. La pendiente es muy suave en la cima de estas sierras y fuerte en las laderas de las mismas, lo que aunado al fracturamiento que las afecta, le confiere un gran poder de infiltración, lo que logra que gran parte del volumen de agua precipitada llega a formar parte del sistema hidrológico subterráneo.

La provincia de la Mesa del Centro en la que se presenta la discontinuidad fisiográfica Valles Paralelos del suroeste de la Sierra de Guanajuato, ocupa el extremo norte de la subcuenca y está constituida por elevaciones de hasta 2,850 m sobre el nivel del mar (msnm), así como por mesetas drenadas por valles más o menos paralelos, que se caracterizan por su convexidad vertical, lo que indica diversas etapas de erosión, resultado de movimientos tectónicos.

El principal rasgo orográfico está constituido por la Sierra de Guanajuato, la cual tiene aproximadamente 85 km de longitud y anchura entre 15 y 20 km. Se alza a unos 12 km al oriente de Lagos de Moreno y se extiende en dirección sureste por la zona norte de León, hasta unos 15 km hacia el sureste de la Ciudad de Guanajuato.

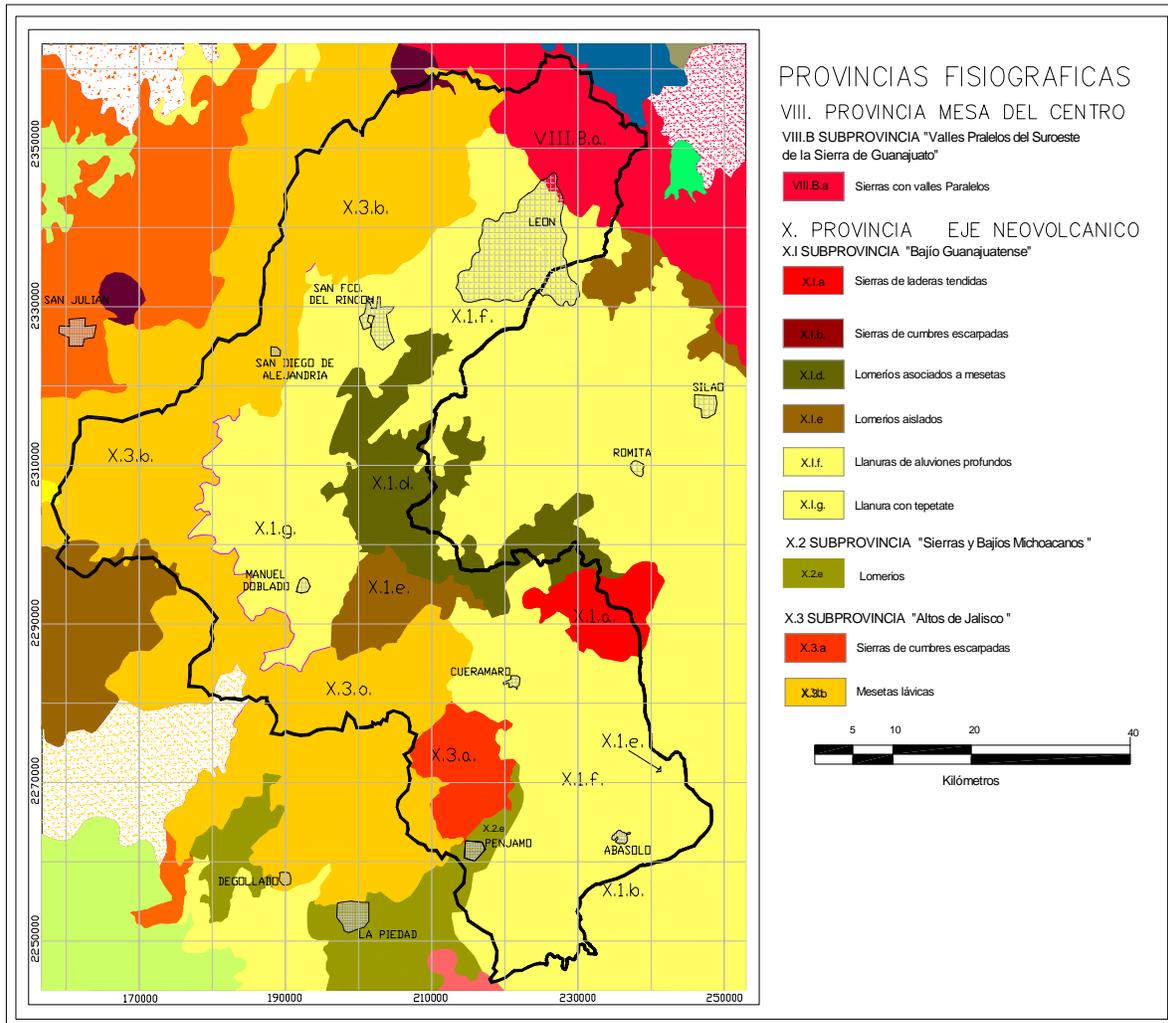


Figura 1.3 Mapa fisiográfico de la Subcuenca del Río Turbio.

1.11. Hidrografía

La cuenca principal del área de estudio es la del Río Lerma-Salamanca, que abarca la porción central y suroriental del estado de Guanajuato y pertenece a la región hidrológica Río Lerma-Santiago. El drenaje está constituido por corrientes de régimen intermitente y perenne. Las subcuencas hidrológicas principales son: Río Turbio-Río Los Gómez-Presa Palote y Río Guanajuato-Silao (Figura 1.4).

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

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

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

En la Sierra de Guanajuato, el Río Turbio tiene como principales afluentes a las corrientes Hacienda de Arriba y Los Castillos, que descargan en la presa El Palote y hacia el canal Los Gómez, éste último cruza la ciudad de León. También en la misma sierra, los arroyos Ojo de Agua Los Reyes, Rancho La Virgen y Puerto Colorado; al norte de San Francisco del Rincón los arroyos Las Cruces y El Molino que alimentan la presa El Barrial. Al sur de Manuel Doblado se le unen los arroyos Ayo y Providencia.

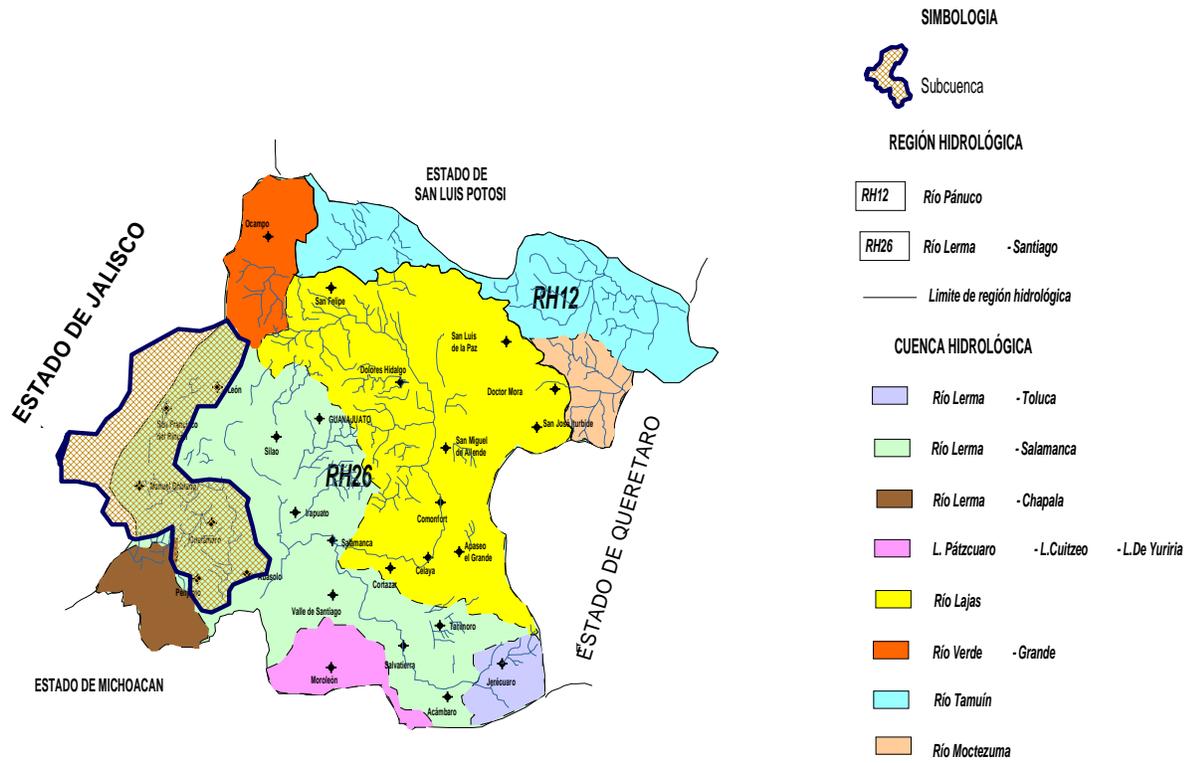


Figura 1.4 Mapa de cuencas y drenaje

Hacia la zona de los Altos de Jalisco se observa una red de drenaje poco desarrollada; prácticamente no hay corrientes perennes, con excepción del arroyo Agua Negra que alimenta la Presa Nueva de Jalpa.

El Río Turbio se une al Río Lerma cerca de la comunidad de Atarjea de Crucitas situada a unos 3 Km al poniente de la población de Pastor Ortiz.

La red hidrográfica es de densidad moderada con patrones dendríticos, subparalelos y radiales. A gran escala el Río Turbio presenta inflexiones en su dirección general a 90° en un patrón zigzagueante, lo que tiene relación directa con los sistemas de fallamiento dominantes en la región.

El escurrimiento más importante para el área de estudio es el propio Río Turbio, sus aguas son retenidas y reguladas poco después de su nacimiento por la presa El Palote localizada al norte de León, después sus aguas son captadas por una serie de represas menores como San Germán y El Mastranzo, al suroeste de la misma población. Aguas abajo sus aguas son nuevamente captadas y reguladas por la Presa El Sitio, ubicada al noreste de Manuel Doblado, para después fluir libremente al sur hasta su confluencia con el Río Lerma a la altura del poblado Pastor Ortiz.

Al Río Turbio vierten sus aguas innumerables afluentes, entre los principales se encuentra el Arroyo La Primavera, al noroeste de San Francisco del Rincón, el cual es regulado poco antes de su confluencia con el Río Turbio por la Presa El Barrial, ubicada al norte de la misma población. Caso similar ocurre con el Arroyo Frío, ubicado al suroeste de Cuerámara y cuyas aguas son retenidas y distribuidas por la Presa El Aguacate. La zona poniente de la subcuenca se caracteriza por tener una serie de arroyos cuyas aguas fluyen principalmente al oriente y antes de unirse al Río Turbio se retienen y regulan por varias presas pequeñas como Santa Isabel, Bordo Grande, El Salitre y San Juan, para después fluir por una serie de canales y ser aprovechadas para riego agrícola principalmente.

1.12. Clima

La ubicación geográfica, así como las diferentes alturas de los valles, planicies y serranías del estado de Guanajuato, dan como resultado una gran variedad de climas que se pueden clasificar en tres tipos: semi-seco, templado y semi-cálido (SSP 1980. Carta de climas de Guanajuato, escala 1:500,000). El clima semi-seco comprende la porción noreste de la entidad y una parte central del estado, el templado comprende casi toda la porción sur del estado y el semi-cálido varias porciones pequeñas dentro de la entidad sobre todo en la parte centro-poniente (Figura 1.5).

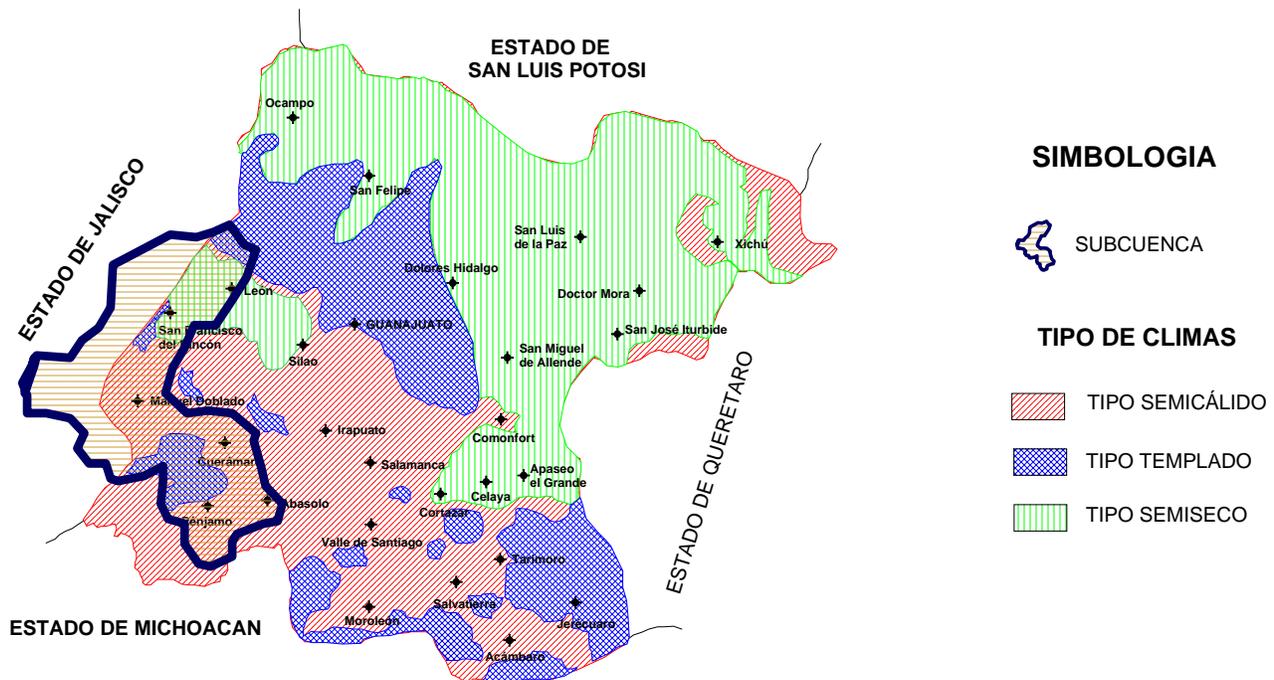


Figura 1.5 Mapa de Climas

Las temperaturas más altas en el área de estudio se registran en los valles del Río Turbio y León de 18 a 19°C y en el área de Silao de hasta 20°C. Las temperaturas menores que van de 14 a 16°C se registran en las zonas de la Sierra de Guanajuato y Cerro Grande (SAPAL, 2001).

Las precipitaciones pluviales mayores (800 mm) que se registran son las de las zonas topográficamente altas y las menores que van del rango de 600 a 650 mm son las que suceden en los valles (SAPAL, 2001).

Con lo que respecta a la evapotranspiración real, de acuerdo al método de Lturc, en la Sierra de Guanajuato se ubican los valores más bajos del orden de 85 mm y en el Cerro Grande los valores más altos del orden de 590 mm

Las cifras menores de recarga neta (precipitación pluvial menos evapotranspiración real) 85 mm, corresponden a los valles del Río Turbio y Silao. Los valores más altos 380 mm se ubican en la Sierra de Guanajuato ya que su mayor parte es de baja permeabilidad, con escurrimiento superficial dominante. Estas propiedades cambian en el conglomerado aflorante en la zona que bordea la sierra y en algunas estructuras geológicas más permeables, donde ocurre la infiltración principal.

El clima predominante de la región, según la clasificación de Köppen, modificada por García (1981), es de tipo Templado – Sub-húmedo “C (wO) (w)”. La temperatura media anual es de 18 °C, con mínimas promedio de 10 °C y máximas de 25 °C. A partir del balance de aguas superficiales elaborado para este trabajo, se calculó la precipitación media anual de 670 mm, a la vez que se calcularon la evapotranspiración media anual, resultando del orden de 594 mm, y escurrimiento medio anual, de unos 127 Hm³.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Geomorfología

Las distintas formas de relieve en el área son un reflejo y consecuencia de la historia geológica de la región. Las unidades geológicas, al igual que las topoformas derivadas de ellas, pueden agruparse, de manera general, en dos dominios. 1) sierras altas y bajas, bastante disectadas; así como, lomeríos de formas suaves, que acusan una larga historia de intemperismo y erosión. 2) Formas juveniles, consistentes en mesas, abanicos aluviales, planicies de rellenos sedimentarios, así como algunas sierras altas, bajas y lomeríos de origen volcánico reciente, que muestran redes de drenaje poco desarrolladas. (COREMI, 2004)

El primer grupo de topoformas se presenta principalmente en la Sierra de Guanajuato, en el extremo norte del área; estas formas corresponden a las unidades geológicas más antiguas, de la Era Mesozoica y del Terciario temprano, que incluyen rocas metasedimentarias volcanoclásticas e intrusivas, principalmente, así como volúmenes menores de conglomerados consolidados. La sierra se extiende a lo largo de una franja de orientación general NW-SE, coincidente con trazas de fallamientos de tipo normal e inverso. Dentro de la misma sierra pueden observarse cañadas y lineamientos subparalelos de orientación NE-SW, más o menos perpendiculares al tren general de la sierra al que parecen intersectar.

En las unidades más antiguas de la Sierra de Guanajuato el patrón de drenaje es dendrítico y bastante denso, aunque se nota claramente la influencia de las grandes fracturas y fallas mencionadas anteriormente. La red de drenaje es claramente más densa en las unidades geológicas mencionadas que en las rocas más recientes; sin embargo, dentro de la misma sierra se encuentran algunos cuerpos de basaltos y rocas ácidas del Terciario Superior y Cuaternario, cuya morfología juvenil contrasta con la de las unidades subyacentes. (COREMI, 2004)

Son comunes las mesas volcánicas de amplios bordes escarpados producidos ya sea por fallamientos normales (Altos de Jalisco y Sierra de Pénjamo) o erosión remontante (mesas La Cuatralba, El Toro y El Gato). En el resto del área se observan formas de escasa antigüedad constituidas por lomeríos y sierras bajas con grados intermedios a incipientes de erosión asociadas a materiales volcánicos del Terciario Medio al Cuaternario, así como a depósitos y rellenos aluviales (*SSP. 1980*)

En la zona Norte y en pequeñas zonas del centro poniente del área se presenta, en general, un desarrollo geomorfológico de madurez, con zonas rejuvenecidas hacia el resto del área. Dentro de las formas juveniles se presentan mesetas volcánicas, sierras y lomeríos de rocas ácidas intermedias y básicas terciarias y cuaternarias. Estos rasgos son más claros en el extremo sur del área con la presencia de algunos aparatos volcánicos muy recientes. En estas formas de relieve la red de drenaje es pobre o casi inexistente, aunque se aprecian algunas cañadas de claro control estructural. En este sentido los fallamientos normales del Terciario Medio y Cuaternario han contribuido al desarrollo de rasgos juveniles, como los ya mencionados escarpes y sistemas serranos del extremo poniente y norte de Pénjamo con orientaciones generales ENE-WSW y en menor medida, E-W y N-S. La denudación de estas formas ha originado rellenos sedimentarios, en ocasiones de tipo lacustre y depositos de abanicos aluviales.

Las mesas de origen volcánico se presentan en posición casi horizontal o levemente basculada y disectadas por corrientes fluviales de tipo consecuente y subsecuente. Estas formas se observan en toda el área, incluso hacia ambas vertientes de la Sierra de Guanajuato, donde coexisten con un paisaje más antiguo. (*COREMI, 2004*)

Más del 50% de la superficie de la subcuenca está dominada por la presencia de rellenos sedimentarios recientes que conforman zonas llanas o de suaves lomeríos, como ocurre con los valles de León y San Francisco del Rincón, Manuel Doblado, Cuerámara y Pénjamo-Abasolo. En la zona sur del área se manifiesta la presencia frecuente de cenizas volcánicas cuaternarias, mezcladas con los sedimentos aluviales y lacustres así como suelos residuales.

2.2. Geología General

Estratigráficamente hablando podemos decir que la Sierra de Guanajuato y sus alrededores esta constituida por dos conjuntos litológicos: uno inferior mesozoico y otro superior cenozoico, claramente definidos por un conjunto de rocas de diversa litología y edad separadas por un intrusivo granítico terciario, que marca el límite entre ambos conjuntos (*Martínez-Reyes, 1992*). (Figura 2.1).

La Unidad litoestratigráfica inferior está representada por una secuencia de facies sedimentarias y volcánicas marinas de edad cretácica, deformadas, metamorfoseadas e intrusionadas, primeramente por un complejo plutónico de composición intermedia a ácida y posteriormente por un intrusivo de constitución granítica con dimensiones batolíticas y que ocupa la parte central de la Sierra de León Guanajuato y su edad data del Paleoceno. Completando la estratigrafía de este conjunto se tiene una unidad ultramáfica, serpentizada, alóctona, de edad probablemente jurásica tardía; así como, pequeños testigos de una sedimentación carbonatada aptiana. (*Salas M., 2004*)

La unidad litoestratigráfica superior cubre en discordancia angular a las rocas mesozoicas y está representada principalmente por facies volcánicas de composición ácida a intermedia de edad terciaria, principalmente del Oligoceno. Hacia su base aparece una unidad sedimentaria clástica continental de edad eocénica, y hacia la cima derrames basálticos pliocuaternarios finalizando con depósitos de aluvión. (*Salas M., 2004*)

Los depósitos continentales están ampliamente distribuidos en los valles de León, Silao-Romita y del Río Turbio; estando constituidos por conglomerados fluviales sin consolidar con clastos de ignimbrita, andesita, cuarzo e intercalaciones de arenisca y calizas lacustres, (*Ramírez et al., 1999*)

Estratigráficamente, las rocas mesozoicas y cenozoicas han sido intrusionadas por cuerpos pequeños del Cenozoico, de composición ácida, intermedia y básica, con lo cual podemos completar la columna estratigráfica de la región, que varía del Jurásico hasta el Reciente u Holoceno. (**Figura 2.2**)

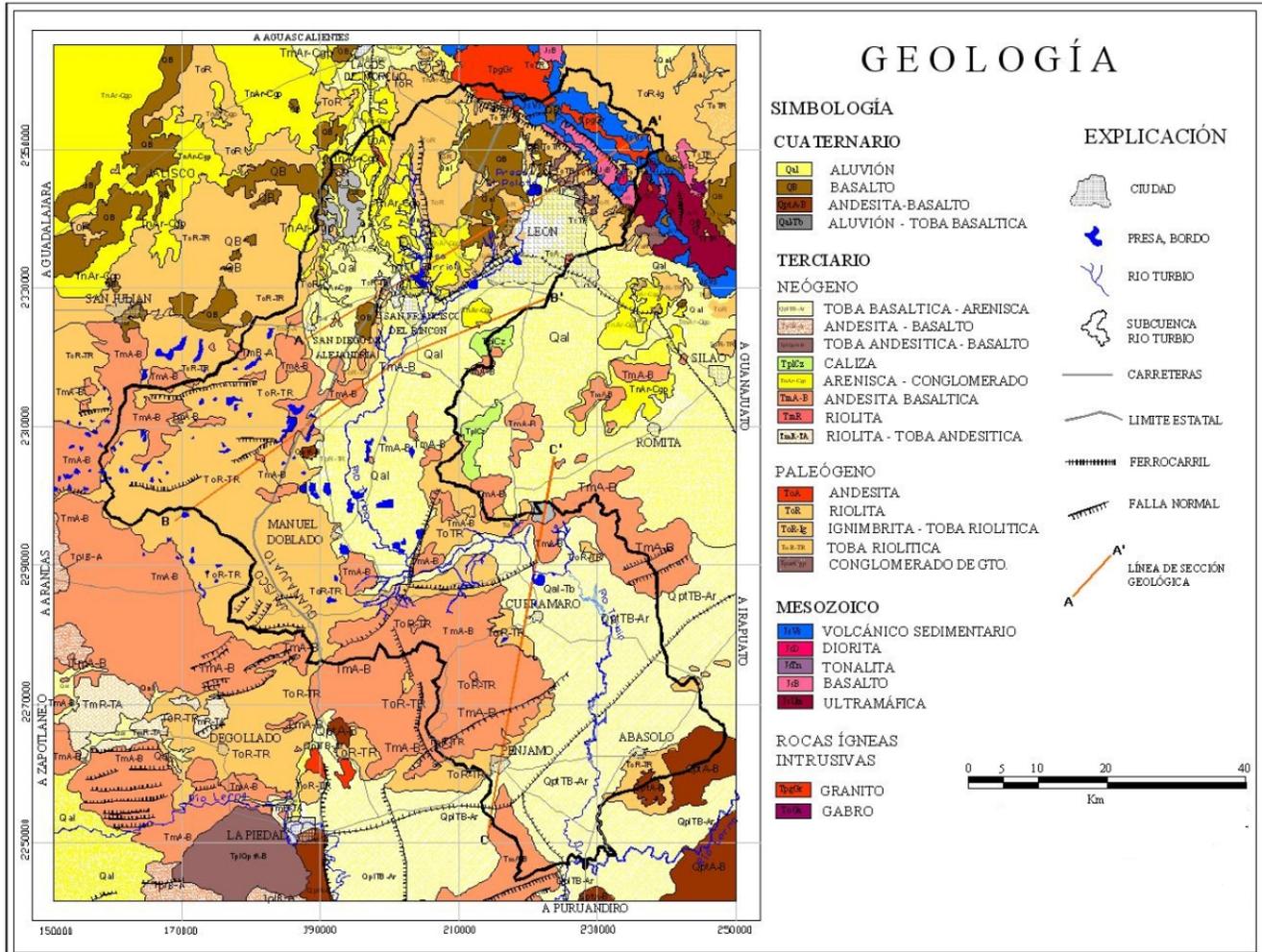


Figura 2.1 Geología General (Tomado y modificado de COREMI, 2000)

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

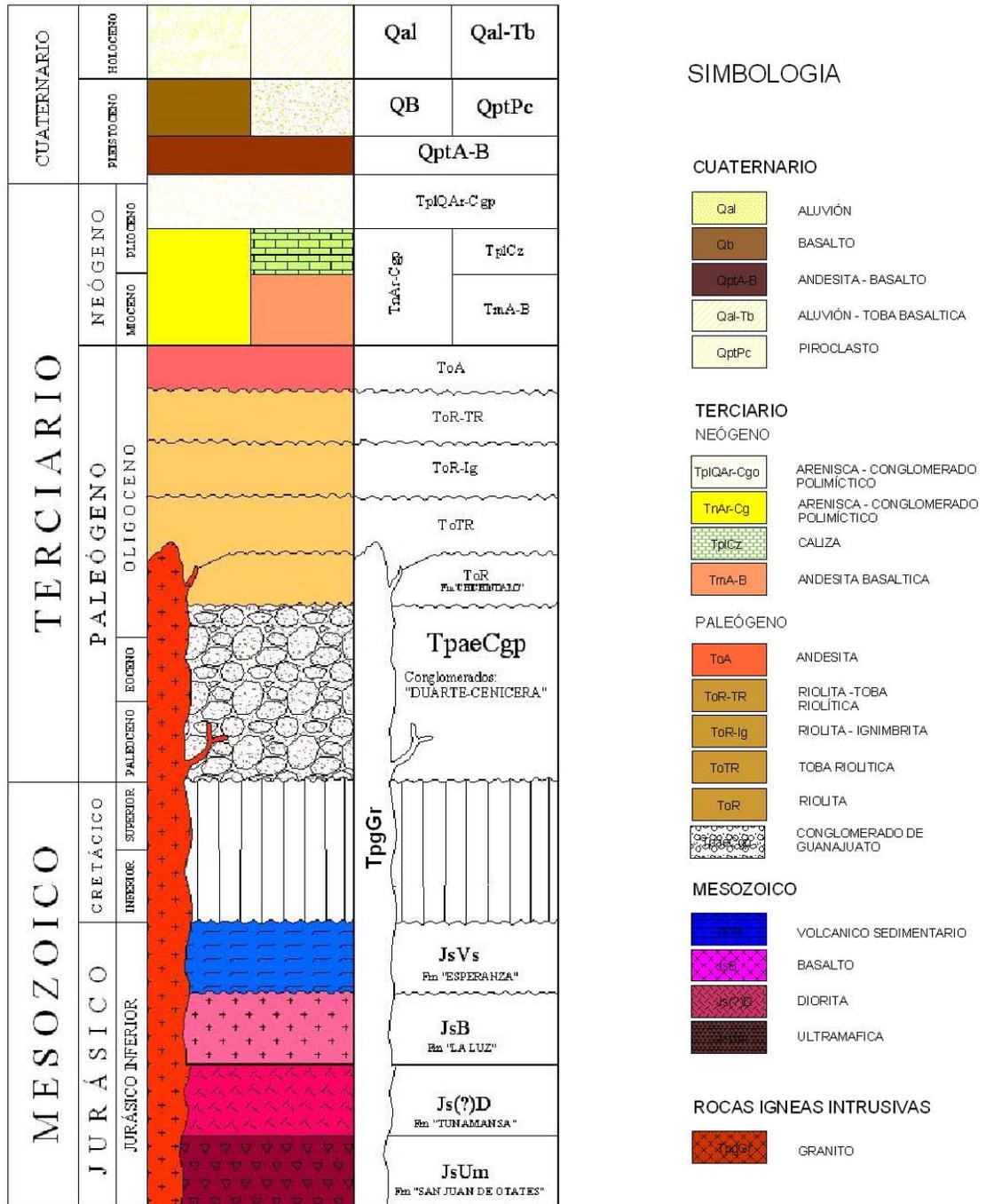


Figura 2.2 Columna Estratigráfica del área de estudio (Tomado y modificado de COREMI. 2000)

2.3. Estratigrafía

En la cartografía del área estudiada se manifiesta la presencia de varias unidades litoestratigráficas, de diversa naturaleza, con sus respectivos nombres informales, correspondiendo las primeras cinco unidades al eratema Mesozoico y las restantes al Cenozoico. A continuación se hace una descripción y presentación detallada de cada una de ellas en orden de la más antigua a la más joven.

La geología plasmada en la planta se obtuvo de la cartografía de las hojas geológicas escala 1:250,000 del COREMI, la cual fue parcialmente modificada durante la verificación de campo, particularmente en los empates entre las mismas.

Las unidades más antiguas que afloran en el área como se mencionó anteriormente corresponden a la Era Mesozoica y constituyen un complejo plutónico – volcánico - metasedimentario cuya litología está atribuida a la existencia de un antiguo arco volcánico intraoceánico que fue acrecionado a Norteamérica hacia finales del Período Cretácico (*Arco de Guanajuato, Monod et al., 1988, 1990; Ortiz Hernández, 1993*). Todas estas unidades afloran en la sierra de Guanajuato, junto con una potente unidad de conglomerado rojo tipo molasa (conglomerados Guanajuato, Duarte y Cenicera) así como con emisiones volcánicas del Terciario y Cuaternario.

El conjunto litológico del arco se encuentra disociado, está compuesto por 5 unidades alóctonas superpuestas mediante planos de cabalgadura: Unidad Ultramáfica San Juan de Otates, Diorita Tuna Mansa, Tonalita Cerro Pelón, Basaltos La Luz y Unidad Volcano-sedimentaria (Formación Esperanza). Fotografías 2.1 a 2.8



Fotografía 2.1. Unidad ultramáfica San Juan de Otates, en el arroyo del mismo nombre, al noreste de León. Gto. (Cortesía Ing. Héctor Alvarado, COREMI).



Fotografía 2.2. Superficies erosionadas en la Sierra de Guanajuato. Aspecto característico de la Fm. Cerro Pelón. Gráfica tomada al NW de la ciudad de Guanajuato.



Fotografía 2.4. Tobas riolíticas de la Formación La Bufa (ToR-TR), cubriendo discordantemente al Conglomerado Rojo Guanajuato (TpaeCgp).



Fotografía 2.5. Afloramientos de rocas riolíticas (TmR) a lo largo de la carretera Guanajuato - San Miguel de Allende.



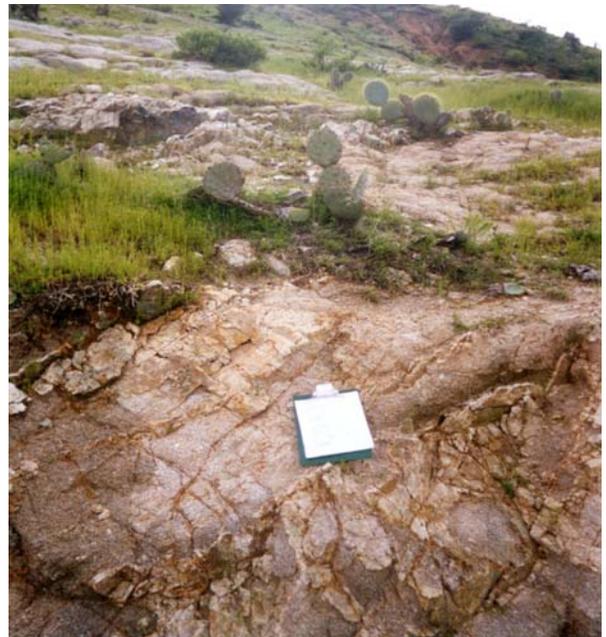
Fotografía 2.5. Caliza lacustre (TplCz) 1Km al Este de Jesús del Monte, Mpio. de Romita.



Fotografía 2.6. Estratos areno-tobáceos (Qal-Tb) cubiertos por cenizas y derrames basálticos; cercanías de la Ciudad de Irapuato.



Fotografía 2.7. Andesitas del Terciario Superior (TmA-B). Tomada en los alrededores de la Presa El Zapote; Zapote de Cobarrubias, Gto.



Fotografía 2.8. Intrusivo granítico (TpgGr) en la localidad de Mangas de la Estancia. Sierra de Guanajuato.

2.3.1. Unidad ultramáfica San Juan de Otates (JsUm)

Se considera la unidad más antigua de las rocas mesozoicas que afloran en la Sierra de Guanajuato. Está formada por serpentinitas, peridotitas, clinopiroxenitas serpentinizadas y gabros con texturas de acumulación. Por su posición y naturaleza alóctona, al igual que las demás rocas del Arco de Guanajuato, se le asigna una edad tentativa del Jurásico Superior (*Martínez Reyes et al., 1992*).

La unidad aflora en la Sierra de Guanajuato, al norte del poblado San Juan de Otates y en el arroyo del mismo nombre, en el extremo NE de la Subcuenca. Existen otros afloramientos en las rancherías El Jitomatal y El Paxtle. La roca presenta color gris verdoso claro a oscuro con tonos parduscos. Muestra intenso fracturamiento, aunque las múltiples discontinuidades son cerradas. Superficialmente la unidad se muestra bastante intemperizada y con intenso fracturamiento, aunque en algunas zonas más sanas se presenta masiva y compacta. El espesor de la cubierta muy intemperizada es variable y puede ir desde un par hasta probablemente algunas decenas de metros.

2.3.2. Diorita Tuna Mansa (JsD)

La Diorita Tuna Mansa designa a diversas fases cristalinas de composición diorítica, esencialmente granítica y ocasionalmente gabrónica, que constituye una serie de testigos tectónicos. La unidad es cortada por numerosos diques granofílicos, doleríticos y basálticos que en conjunto forman un enjambre complejo de filones. En la zona la Luz-El Cubilete-Guanajuato este enjambre ha sido denominado Complejo Filoniano Santana. Afloran en diversas localidades a lo largo de la Sierra de Guanajuato, donde se observa a la Diorita descansar sobre una unidad volcano-sedimentaria y otra basáltica. Se han reportado edades radiométricas que sitúan a la unidad en el Cretácico Inferior. (*COREMI, 1997*)

La unidad Tuna Mansa tiene sus más extensos afloramientos en dirección NW de la ciudad de Guanajuato, 1.5 km al oriente del poblado de Tuna Mansa y en las cercanías de Jitomatal. En la Subcuenca del Río Turbio la Diorita Tuna Mansa aflora escasamente

en la sierra, a unos 14 km hacia el NE de León, en las cercanías del rancho El Garabatillo. (*Echegoyen, 1970*)

El Complejo Filoniano Santana intrusióna claramente a la Formación Esperanza y se encuentra en contacto tectónico con el Conglomerado Guanajuato a lo largo de la Falla de Aldana. Lateralmente se encuentra en contacto transicional con la Tonalita Cerro Pelón, con el que está estrechamente relacionado (*García y Aguirre, 1990*).

2.3.3. Basaltos La Luz (JsBa)

Como Basaltos La Luz (*Wandke y Martínez, 1928; Randall, 1982; Monod, et al., 1990*) se reconoce a una sucesión de derrames de lava basáltica y andesitas basálticas, con estructura masiva y almohadillada, de 1,000 m de espesor, distribuida a lo largo de la Sierra Guanajuato. La unidad tiene sus mejores afloramientos en los alrededores de la localidad de La Luz, a unos 10 km al NW de la Ciudad de Guanajuato y a lo largo del camino que la une con el Cerro del Cubilete. En la Subcuenca del Turbio esta unidad aflora en varios puntos a lo largo de la sierra al NE de León.

La unidad está constituida principalmente por lavas y brechas compactas de colores que varían del verde oscuro al verde manzana; con estructuras masivas o almohadilladas; éstas últimas cementadas ocasionalmente por material calcáreo. Las brechas están constituidas por fragmentos angulosos en matriz afanítica o ligeramente cristalina. Son frecuentes las amígdalas de calcita y epidota tanto en las lavas como en las brechas.

Los Basaltos La Luz cabalgan a la secuencia volcano-sedimentaria de la Formación Esperanza; el contacto es subhorizontal y está caracterizado por la presencia de milonitas (*Monod et al., 1990*). Tal contacto no ha sido reconocido en superficie sino a través de perforaciones y obras mineras (Mina Bolañitos). Una edad radiométrica por K/Ar asigna 108.4 ± 6.2 m.a. (*Ortiz y Monod, 1990*) a una roca basáltica intercalada con pedernal y piroclásticos pertenecientes a la Formación La Luz, esto sitúa a la unidad en el intervalo Aptiano-Albiano.

2.3.4. Unidad Volcano-sedimentaria (JsVs)

La Unidad Volcano-sedimentaria, también denominada informalmente como Formación Esperanza (*Echegoyen et al., 1970*), se encuentra ampliamente distribuida en toda la Sierra de Guanajuato. Aflora a lo largo de la Sierra de Comanja y en gran parte de la sierra al NE de León, en los alrededores de las poblaciones de Buenos Aires, Santiago y Cerro Alto.

La unidad consiste en lutitas, limolitas, areniscas, abundante pedernal negro y calizas micríticas con laminaciones de limolita y ocasionales bancos de conglomerado. La formación incluye algunas lavas y brechas, basálticas y andesíticas, de estructura masiva o almohadillada. Toda la unidad está afectada por metamorfismo regional de bajo grado y en ocasiones alteración hidrotermal. La unidad es de carácter predominantemente arcilloso.

La edad de esta unidad no ha sido fijada con precisión, aunque se le han asignado edades del Jurásico Inferior al Superior (*Chauvé et al., 1985; Ortiz Hernández et al., 1990*); por radiolarios y dataciones radiométricas de las facies volcánicas, *Dávila y Martínez (1987)* le asignaron una edad correspondiente al Jurásico Inferior (Berrasiano). Se le relaciona con la Formación San Juan de la Rosa (Jurásico Superior) que aflora en el área de Tolimán, Querétaro. Por su similitud litológica se le asocia también con los sedimentos de edad triásica de Zacatecas.

El espesor total de la unidad no se conoce pues no aflora la base de la unidad, aunque por los trabajos en las minas de Valenciana, Rayas y Monte de San Nicolás, se estima que el espesor de la formación es superior a los 500m.

2.3.5. Conglomerados Duarte – Cenicera (TpaeCgp)

Se trata de conglomerados tipo molasa análogos a la Formación Guanajuato (*Bostford, 1909; Wandke, 1928; Guiza, 1949 y Edwards, 1956*); son similares y se correlacionan con ésta. Se compone de conglomerado polimíctico mal clasificado, constituido por fragmentos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, con fragmentos de cuarzo, caliza, granito y andesita, cementados por una matriz arcillosa.

Se ha descrito la presencia de un horizonte de andesita intercalada con el conglomerado.

La matriz del conglomerado es preponderantemente arenosa, de color pardo rojizo característico, aunque a profundidad, en las obras mineras llega a presentarse de un color verde claro por los efectos de la alteración hidrotermal. Su espesor al N y NE de León se estima en unos 1,000 m. Esta unidad es conocida informalmente como Conglomerado Rojo de Guanajuato. (*Ferrusquía 1987*) ubica al conglomerado en el Eoceno, según el fechamiento paleontológico de vertebrados.

2.3.6. Rocas volcánicas del Oligoceno (ToR, ToR-Ig, ToTR, ToR-TR)

Con las claves **ToR** (riolita), **ToR-Ig** (riolita-ignimbrita), **ToTR** (toba riolítica), y **ToR-TR** (riolita-toba riolítica) se incluyen a una serie de rocas volcánicas ácidas del Oligoceno, que afloran en la sierra de Guanajuato, lo mismo que en extensas zonas hacia la parte poniente de León y al sur y poniente de Manuel Doblado. (*Labarthe y otros 1982*). En general, estas rocas presentan bajo grado de alteración y porosidad baja a media, y permeabilidad que puede llegar a alta dependiendo del grado de fracturamiento.

En el caso de estas unidades raramente existen nombres formacionales dado que se trata de un conjunto de emisiones volcánicas emplazadas en distintos momentos a lo largo del período Oligoceno-Mioceno, que implican diferencias en textura, tipo de emplazamiento, espesor y coloración, siendo difícil establecer correlaciones precisas.

Con la clave **ToR**, se designa a una serie de afloramientos de riolita que forman parte de las zonas bajas de la vertiente SW de la sierra de Guanajuato, al N, NE y E de León. Otros afloramientos más extensos se observan en las lomas que limitan la misma ciudad en su zona poniente y a lo largo de la carretera que la une con Lagos de Moreno. La unidad se correlaciona con la *Riolita Chichíndaro* que aflora en el Distrito Minero Guanajuato, hacia el noreste de la capital estatal. El color de la roca es gris claro con tonos rosados. El espesor que presenta varía de 150 a 400 m. Presenta alteración y fracturamiento moderados, con discontinuidades escasas y abiertas.

Este conjunto oligocénico de rocas preponderantemente riolíticas se encuentra cubierto por andesitas basálticas del Mioceno, de manera muy similar a la secuencia volcánica superior descrita para la Sierra Madre Occidental con la cual son correlacionables (*Nieto, et al., 1992; Ortega, 1992*).

Sólo en algunos casos se han asignado algunos nombres, como ocurre con la *Ignimbrita Cuatralba*, (*Martínez R., 1992*) unidad **ToR-Ig**. Esta unidad aflora hacia la parte más alta de la Sierra de Guanajuato, en el extremo NE del área de estudio y en la Mesa Cuatralba. Consiste de tobas riolíticas soldadas, estratificadas en estratos de 10 a 40 cm de espesor, de color pardo a amarillo ocre con tonos rojizos. El espesor de la unidad es variable debido a que sus emisiones rellenaron fosas y depresiones; aunque la altura de los mayores escarpes no supera los 200m, sin embargo el espesor total puede ser mayor. La unidad presenta alteración y fracturamiento moderados y baja porosidad primaria, aunque las fracturas existentes son bastante continuas y llegan a ser entreabiertas. La Ignimbrita Cuatralba sobreyace discordantemente a las rocas mesozoicas del Arco de Guanajuato; su edad ha sido determinada entre 25 y 27 m.a.

Esta unidad conforma espectaculares escarpes que dominan el paisaje de la parte alta de la sierra, visibles claramente a lo largo de la carretera que comunica León con la Sierra de Lobos y San Felipe. La roca presenta fenocristales de cuarzo y feldespatos en una matriz de ceniza vítrea, que llega a mostrar estructuras de flujo.

2.3.7. Rocas Volcánicas del Mioceno (TmA-B)

Durante el Mioceno continúa la actividad volcánica con la emisión de lavas andesíticas y riolíticas, cuyas edades son de 11 a 16 m.a. (*Carrasco N., et al., 1989; Pérez V., et al., 1996*). En la subcuenca del Turbio no se observan afloramientos de riolitas miocénicas, pero sí de andesitas y basaltos incluidos en la unidad **TmA-B**. Estas rocas tienen extensos afloramientos al SW de Cuerámara y N y NW de Pénjamo en un gran macizo serrano de orientación general SW-NE, conocido como *Levantamiento Neotectónico de Pénjamo*. Este alto topográfico está constituido por un gran pilar (*horst*) que se alza cerca de 400 m por encima de los valles circundantes.

Los productos basálticos se presentan de color gris oscuro a claro con tonos cafés ocres y rojizos de oxidación. Por lo general se encuentran muy fracturados, con múltiples discontinuidades que en su mayoría son semi-cerradas a entreabiertas, aunque parcialmente rellenas por arenas y arcillas, producto de erosión e intemperismo.

2.3.8. Unidades sedimentarias del Mioceno y Plioceno (TnAr-Cgp, TplCz)

Durante el Terciario Superior se verifica el relleno de la depresión del Bajío con sedimentos continentales: arenas, conglomerados y depósitos lacustres clásticos y químicos, además de algunos derrames de lava y depósitos de cenizas (COREMI, 2004).

La unidad **TnAr-Cgp** (arenisca-conglomerado polimíctico) consiste en una secuencia de horizontes de arenas e intervalos conglomeráticos, frecuentemente con una matriz arcillo limosa o material tobáceo en la forma de ceniza fina. Los clastos están constituidos por fragmentos redondeados y sub-redondeados de rocas volcánicas y prácticamente de todas las rocas preexistentes en la vertiente sur de la Sierra de Guanajuato; el tamaño de los fragmentos varía desde arenas hasta guijarros de 10 a 15 cm de diámetro. El material se encuentra compacto pero, en general, sin consolidación. El color de los depósitos es gris claro con tonos cafés ocres claros (COREMI, 2004).

La unidad **TplCz** representa a cuerpos de caliza lacustre que afloran localmente al oriente de San José de la Calera, a una decena de kilómetros al sur de León, en las cercanías de los poblados de Jesús del Monte y el Sáuz de Armenta. La caliza es arcillosa y se presenta de color blanco con tonalidades ocre amarillo y café claro.

Rocas volcánicas intermedias a básicas del Reciente (QptA-B, QB, QptPc) (COREMI, 2004).

Durante el Plioceno y hasta el Pleistoceno se tiene actividad volcánica en la zona sur de la región, que corresponde al dominio de la Faja Volcánica Transmexicana, con numerosos aparatos que emiten brechas, tobas y flujos de composición intermedia a básica.

La unidad **QptA-B** (Basaltos y andesitas de edad cuaternaria) presenta escasos afloramientos hacia el extremo SE de la subcuenca, en las sierras bajas que se alzan al SE de Abasolo. Se trata de una serie de aparatos volcánicos formados por basaltos de olivino, lamprobolita y andesíticos, con textura afanítica y porfírica, de color negro a gris. La roca se presenta muy fracturada, con discontinuidades relajadas y múltiples oquedades; es decir, con alta porosidad secundaria. La unidad cubre discordantemente a todas las unidades precuaternarias.

La unidad **QB** tiene afloramientos en la zona norte de la subcuenca, en algunas pequeñas zonas en la sierra de Guanajuato y principalmente al norte y noroeste de León, a lo largo de la carretera León – Lagos de Moreno. Los basaltos conforman zonas de suaves lomeríos y mesas. También pueden observarse rellenando algunas cañadas. Los basaltos muestran coloraciones que van del gris verdoso al pardo rojizo; se presentan bastante fracturados y con zonas de bloques.

La unidad **QptPc** (material piroclástico de composición basáltica, del Cuaternario) designa a los depósitos de cenizas tipo lapilli, arenas y bloques de escoria (*tezontle*) que forman los conos cineríticos.

Aunque estos materiales se encuentran principalmente conformando los cuerpos de conos cineríticos, también llegan a extenderse formando importantes depósitos hacia los valles, donde se hallan intercalados e interdigitados con sedimentos aluviales, particularmente hacia la parte sur del área.

2.3.9. Depósitos sedimentarios recientes (Qal, Qal-Tb).

Los depósitos aluviales (unidad **Qal**) cubren la mayor parte de las zonas llanas de los valles de León, San Francisco del Rincón y Manuel Doblado. En esta unidad se engloban a sedimentos depositados durante el Cuaternario, consistentes en arenas, limos, arcillas y gravas, con espesor máximo aproximado menor al centenar de metros. Los depósitos constituyen el relleno superficial de los valles; en ocasiones se encuentran intercalados con sedimentos lacustres, cenizas y/o derrames volcánicos. Dentro de la unidad se engloba también a la cubierta de suelo orgánico que sustenta a las zonas de cultivo (COREMI, 2004).

Por lo general los sedimentos tienen colores claros, de blanco, café, ocre y gris. Las proporciones de los diferentes tamaños de las partículas son variables, se pueden presentar desde horizontes casi conglomeráticos hasta paquetes constituidos por arcillas. De la misma forma, la porosidad y permeabilidad de estos materiales puede ser de alta a baja.

Hacia la parte sur, en los valles de Cuerámara, Abasolo y Pénjamo se llegan a observar extensos depósitos de cenizas volcánicas basálticas finas y arenosas, así como de tipo lapilli, intercaladas con los sedimentos aluviales (**Qal-Tb**). Estos depósitos, de hasta algunas decenas de metros de espesor, han sido originados por la actividad reciente de aparatos volcánicos y conos cineríticos pertenecientes al dominio de la Faja Volcánica Transmexicana.

Estos materiales recientes se presentan con bajo grado de alteración y alta porosidad.

2.3.10. Intrusivos terciarios (TpgGr, ToGa)

Un gran cuerpo intrusivo denominado Granito Comanja (**TpgGr**) aflora en varias zonas a lo largo de la Sierra de Guanajuato. Los afloramientos más extensos se presentan hacia la parte norte de la subcuenca y al sur de la localidad tipo, el poblado de Comanja. La edad radiométrica reportada para el intrusivo es de 55 +/- 4 m.a. (*Mújica y Jacobo, 1983*). La unidad se sitúa en el límite Paleoceno-Eoceno; la roca es de color pardo y gris claro, forma lomas y peñas de perfil convexo.

También en la Sierra de Guanajuato se observan afloramientos de un intrusivo de composición gabrónica, conocido como Gabro Arperos (**ToGa**), (*Martinez R., 1987*) que aflora en los alrededores del poblado del mismo nombre, en el extremo norte del área de estudio, aunque no se observan afloramientos dentro de la subcuenca del Turbio. El intrusivo es de color café oscuro a negro con cristales visibles de olivino, plagioclasa y piroxenos.

2.4. Geología estructural

Las principales estructuras geológicas que se han generado a lo largo del tiempo geológico, se localizan en el N y NW del estado de Guanajuato y están representadas por una serie de cuencas, pilares, fallas y fracturas que propiciaron la formación de valles (Figura 2.3). En particular el Valle de León se originó por fallas normales escalonadas que forman una fosa tectónica (graben) limitada por pilares tectónicos ubicados en la Sierra de Guanajuato, Altos de Jalisco, California y Santa Ana del Conde (SAPAL 2001).

Los principales rasgos estructurales de la zona de estudio corresponden a fracturas y fallas de tipo normal, algunas de gran magnitud, asociadas probablemente con la formación del eje Neovolcánico.

Los rasgos estructurales de la Sierra de Guanajuato manifiestan en general dos estilos de deformación claramente definidos, correspondientes a esfuerzos tectónicos compresivos y distensivos, respectivamente.

Las rocas mesozoicas de la Sierra de Guanajuato están afectadas por deformación dúctil, con foliación, pliegues isoclinales y cabalgaduras que revelan esfuerzos compresivos de dirección suroeste-noreste SW-NE. En la región, sólo las rocas del Arco de Guanajuato están afectadas por este tipo de deformación. Es posible que el efecto de deformación pertenezca al que generó la acreción de los arcos magmáticos del sur de México durante el Cretácico Superior.

Durante el Cenozoico se presenta una fase distensiva que produjo una serie de fallas normales, dando origen a pilares y fosas tectónicas, entre las que destacan el Graben de Villa de Reyes, de orientación NE-SW y el Horst de la Sierra de Guanajuato, limitado al pie de su vertiente SW por un gran fallamiento normal, de orientación NW-SE, conocido como Falla del Bajío (Fotografías 2.9 y 2.10).

Las estructuras más antiguas afectan a las rocas del complejo plutónico volcano-sedimentario del Arco de Guanajuato. Estas estructuras consisten en foliación, micropliegues, pliegues y cabalgaduras a escala de afloramiento, que se observan en

todas las rocas volcanosedimentarias de este complejo. La foliación tiene rumbo general NE 50° – 80° con 20° a 40° de inclinación en dirección al NW.

Las estructuras asociadas a las rocas mesozoicas se relacionan con la fase de deformación orogénica que afecta a las unidades de arco y su cubierta sedimentaria en la etapa de emplazamiento de las cobijaduras regionales.

Las fallas y fracturas de las rocas miocénicas se asocian al emplazamiento y evolución de las fajas volcánicas del occidente y centro del territorio mexicano (Sierra Madre Occidental) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Los lineamientos y enjambres de conos cineríticos están orientados según estructuras ENE – WSW y N - S, relacionadas a la actividad de la FVTM.

Los rasgos estructurales mayores se muestran en los planos geológico y estructural de las figuras 2.1 y 2.3 y fueron extraídos de la cartografía del SGM, de los informes y archivos electrónicos facilitados por CEAG, previa revisión de ambos, de la interpretación de imágenes de satélite y de la interpretación cualitativa de las cartas de magnetometría aérea y de las líneas gravimétricas, recientemente levantadas también por el SGM.

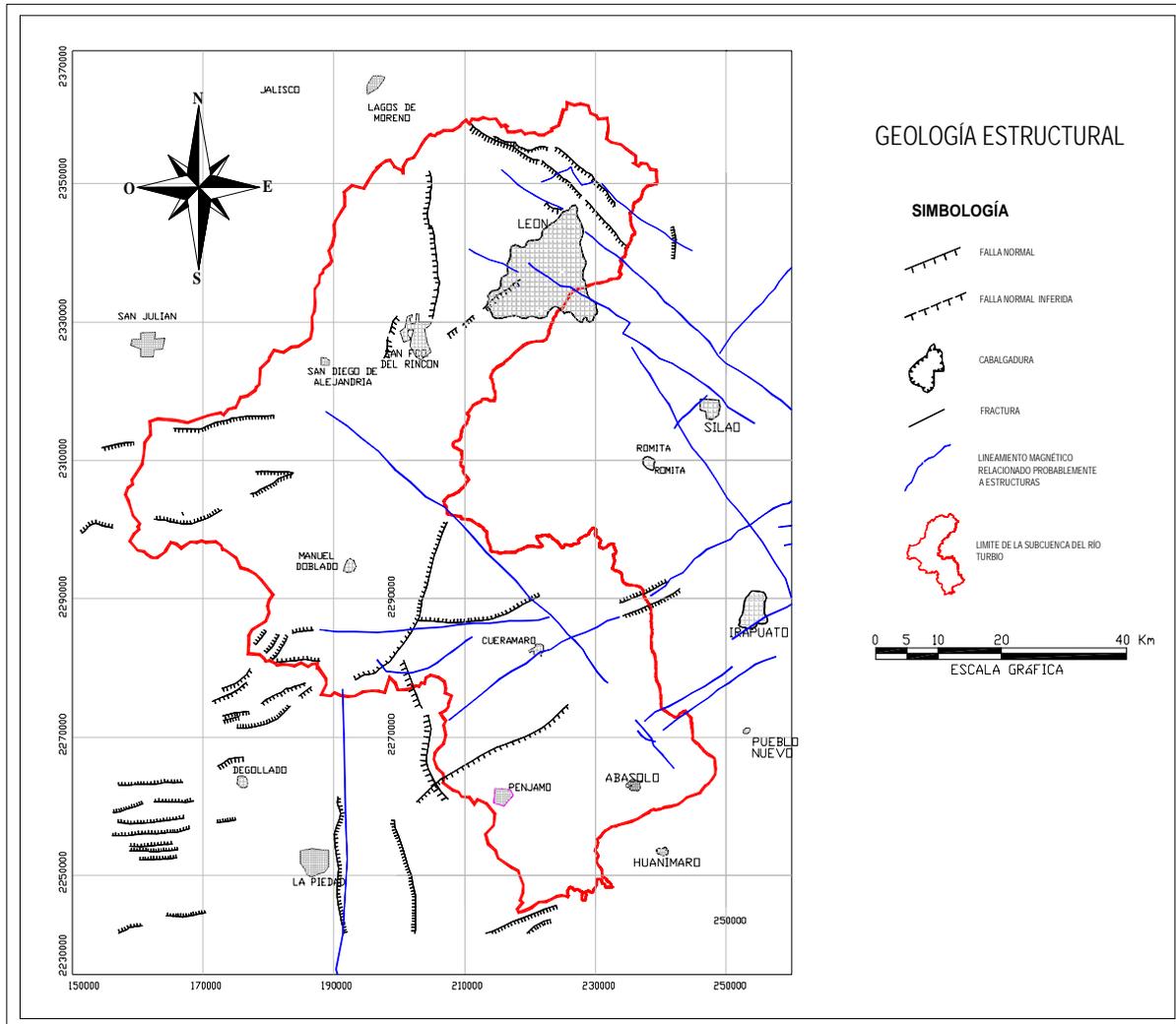


Figura 2.3 Geología Estructural



Fotografía 2.9 Falla de tipo normal, paralela a la Falla del Bajío, que pone en contacto tectónico a las unidades San Juan de Otates con rocas riolíticas terciarias.



Fotografía 2.10 Traza y brecha de falla normal, paralela a la Falla del Bajío, hacia la vertiente SW de la Sierra de Guanajuato; 14 Km al E de León.

2.5. Exploración Geofísica

Las técnicas de exploración geofísica se apoyan en la utilización de equipos de medición especializados para medir las propiedades físicas de la tierra y con ello contribuir a la localización de yacimientos minerales, petróleo y aguas subterráneas entre otros. El método gravimétrico es una de éstas técnicas que mide las variaciones en el campo gravitacional de la tierra causado por diferencias de densidad en las rocas del subsuelo; apoyado en este principio se ha empleado con éxito en la exploración hidrogeológica para delinear valles enterrados y determinar los espesores de relleno de cuencas sedimentarias y definir de ésta forma la profundidad al basamento hidrogeológico.

En este trabajo de tesis se utilizó información gravimétrica realizada por COREMI para apoyar la definición de la profundidad al basamento hidrogeológico, así como definir las zonas de falla regionales de origen profundo.

Como resultado del análisis cualitativo de los datos aeromagnéticos de campo total de las cartas Guanajuato (F14-7), Querétaro (F14-10) Aguascalientes (F13-9) y Guadalajara (F13-12) escala 1:250 000, se identificaron diversos dominios magnéticos. La Subcuenca del Río Turbio está representada en su mayor parte por una franja magnética definida por monopolos y dipolos magnéticos de eje dipolar corto, que se distribuyen caóticamente formando amplias zonas de alto gradiente magnético con intensidades que varían de -540 a 360 nT (Figura 2.4). Esta franja magnética tiene un ancho de 45 km y una longitud mayor de 75 Km que se extiende hacia el NW y el SE, fuera de los límites de la Subcuenca del Río Turbio.

La intensidad y la extensión de esta franja magnética están controladas por la distribución de las rocas volcánicas de composición intermedia a básica pertenecientes al Faja Volcánica Transmexicana. Se ubica entre las poblaciones de San Francisco del Rincón y San Diego de Alejandría.

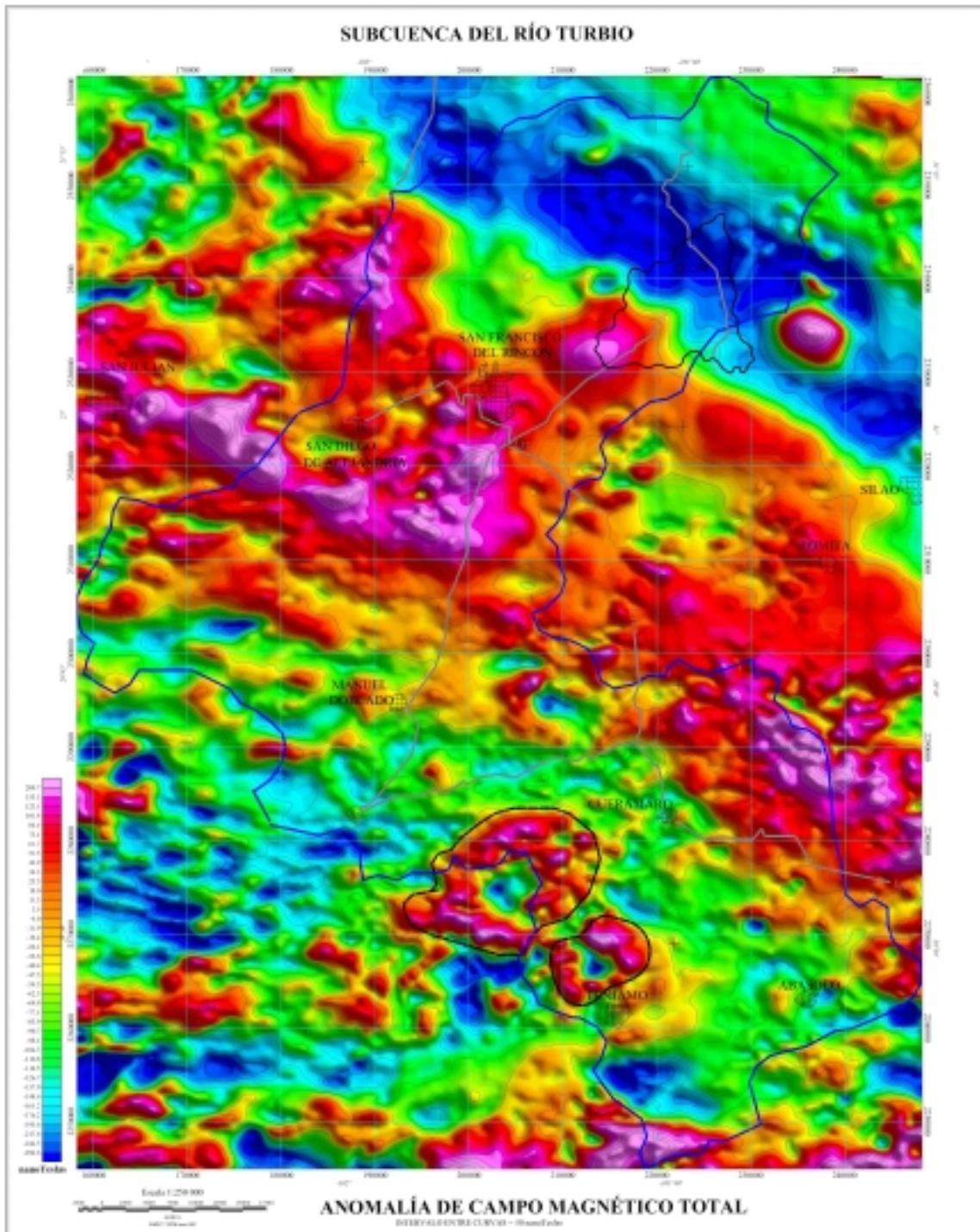


Figura 2.4 Anomalía de campo magnético total.

Hacia el extremo norte de la Subcuenca del Río Turbio se detecta un dominio magnético alargado en dirección NW-SE, con zonas de muy baja intensidad, con anchura que varía de 10 a 15 kilómetros y extensión mayor de 50 kilómetros, prolongándose, fuera de los límites de la Subcuenca. Se atribuye a una fosa o graben que fue rellenado por depósitos detríticos que alternan con algunas coladas basálticas. Esta depresión tectónica se ha propuesto como Graben de León y constituye el límite entre la Faja Volcánica Transmexicana y la Mesa Central.

Entre las poblaciones de Cuerámara y Pénjamo, al sur de la Subcuenca del Río Turbio, se obtuvo un campo volcánico representado por altos magnéticos y delimitados con línea negra en la Figura 2.4, los cuales posiblemente definen cuellos volcánicos constituidos en el centro por rocas no-magnéticas o de composición félsica.

Dentro de la Subcuenca del Río Turbio COREMI realizó 9 mediciones gravimétricas, cuya longitud y localización se indican en la Tabla 2.1 y se muestran en la Figura 2.5. Se aprovecharon 377 estaciones de gravedad absoluta levantadas por PEMEX en sus proyectos de La Piedad y de Abasolo y las estaciones fueron referidas a los bancos de nivel del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). El DATUM de referencia fue NAD27 en coordenadas Universal Transversa Mercator (UTM), zona 14 y esferoide de Clarke 1866.

Tabla 2.1 Líneas de exploración gravimétrica

Línea	Kilómetros lineales	Inicia	Termina
6	27.212	Crucero Comanja de Corona	Vía del tren, al Sureste de la Ciudad de León Gto.
7	14.214	Carretera Mesa San Isidro, Jalisco.	Entrada a Lagos de Moreno, Jalisco
10	51.316	León, salida carretera a Manuel Doblado	Entrada a Manuel Doblado
11	32.590	Rancho Ayo el Grande	El Saucillo, entronque carretera Cuerámara León
12	21.014	Deportivo en Cuerámara	La Muralla
13	10.488	El Maguey, crucero carretera León a Manuel Doblado	Jesús del Monte
15	13.951	Entrada a Manuel Doblado	Ayo el Grande
16	26.005	Salida de Cuerámara a carretera del crucero Irapuato Abasolo	Crucero Irapuato - Abasolo
17	24.32	San Diego de Alejandría, salida a El Maguey	El Maguey, crucero carretera León a Manuel Doblado
Total 9	221.11		

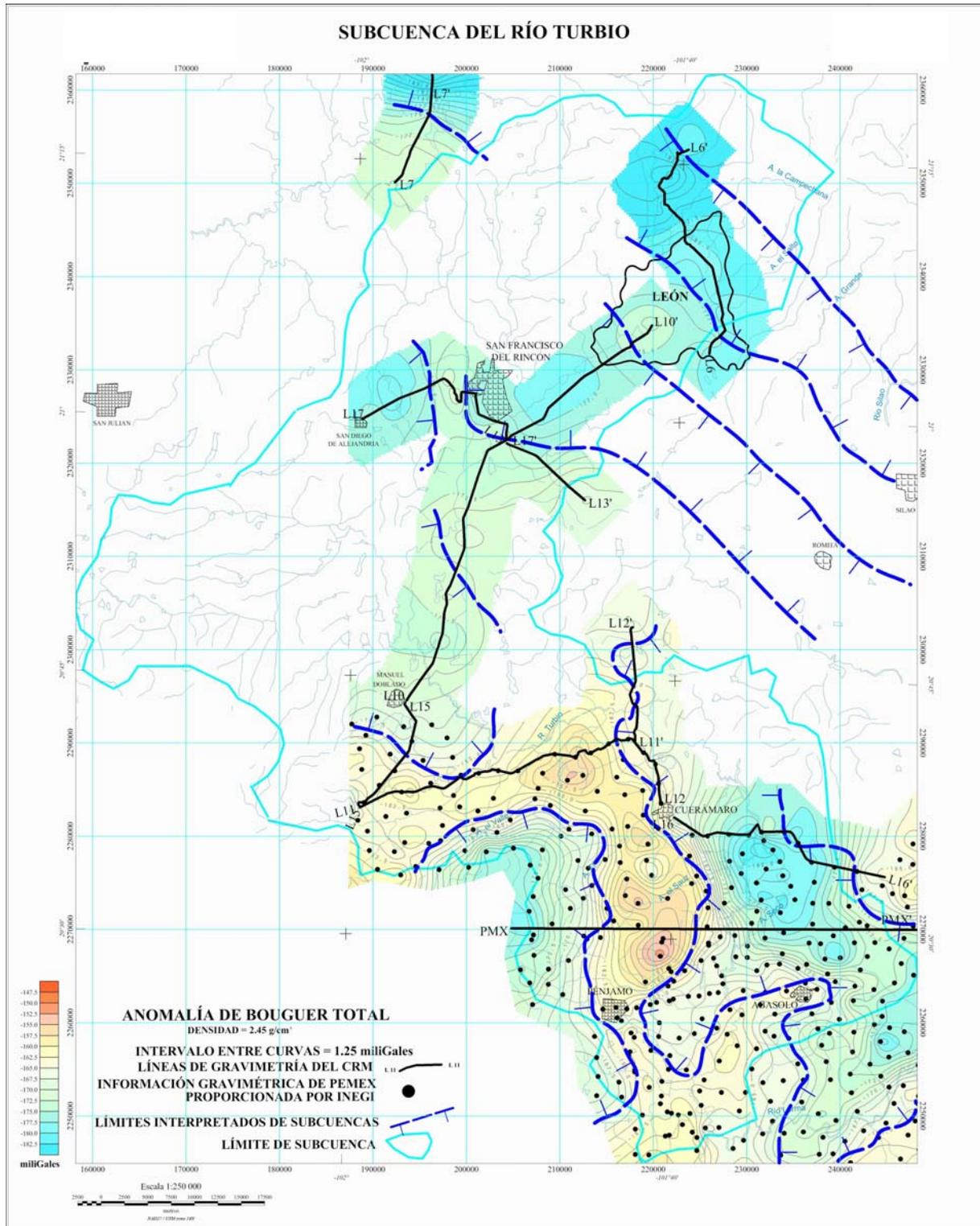


Figura 2.5 Configuración de Anomalia de Bouguer Total.

2.5.1. Secciones Gravimétricas

El modelado de los datos gravimétricos se realizó a lo largo de 5 secciones sobre las líneas 6, 10, 15, 12, 16 y una sobre la coordenada 2 270 000 que incluye los datos de PEMEX, las densidades asignadas a las diferentes capas fueron tomadas de las tablas elaboradas por Telford et al. (1990), ya que no fue posible realizar mediciones in situ (Figura 2.5). Los valores de las densidades para modelar las secciones fueron: para las formaciones del mesozoico y de la Formación Guanajuato 2.4 gr/cc, las cuales constituyen el basamento geohidrológico; para las unidades granulares (arenas, gravas, arcillas) y volcanoclásticos de 2.0 gr/cc, denominadas Terciario Granular Indiferenciado, las cuales sobreyacen al basamento y es la capa potencial para la captación de acuíferos, y de 2.5 gr/cc para los derrames basálticos y andesíticos.

Los modelos obtenidos, figuras 2.6 a 2.10, muestran una profundidad variable al basamento geohidrológico que llega alcanzar los 500 metros sobre el nivel del mar en la figura 2.10.

Por otra parte, en la planta de la Anomalía de Bouguer Total, Figura 2.5, se observan bajos gravimétricos (indicados en azul) que se correlacionan con las cuencas de San Francisco del Rincón, Abasolo- Cuerámara y Pénjamo.

Hacia la parte Norte de la Ciudad de Pénjamo se observa un alto gravimétrico el cual geológicamente se correlaciona con el Levantamiento Neotectónico de Penjamillo.

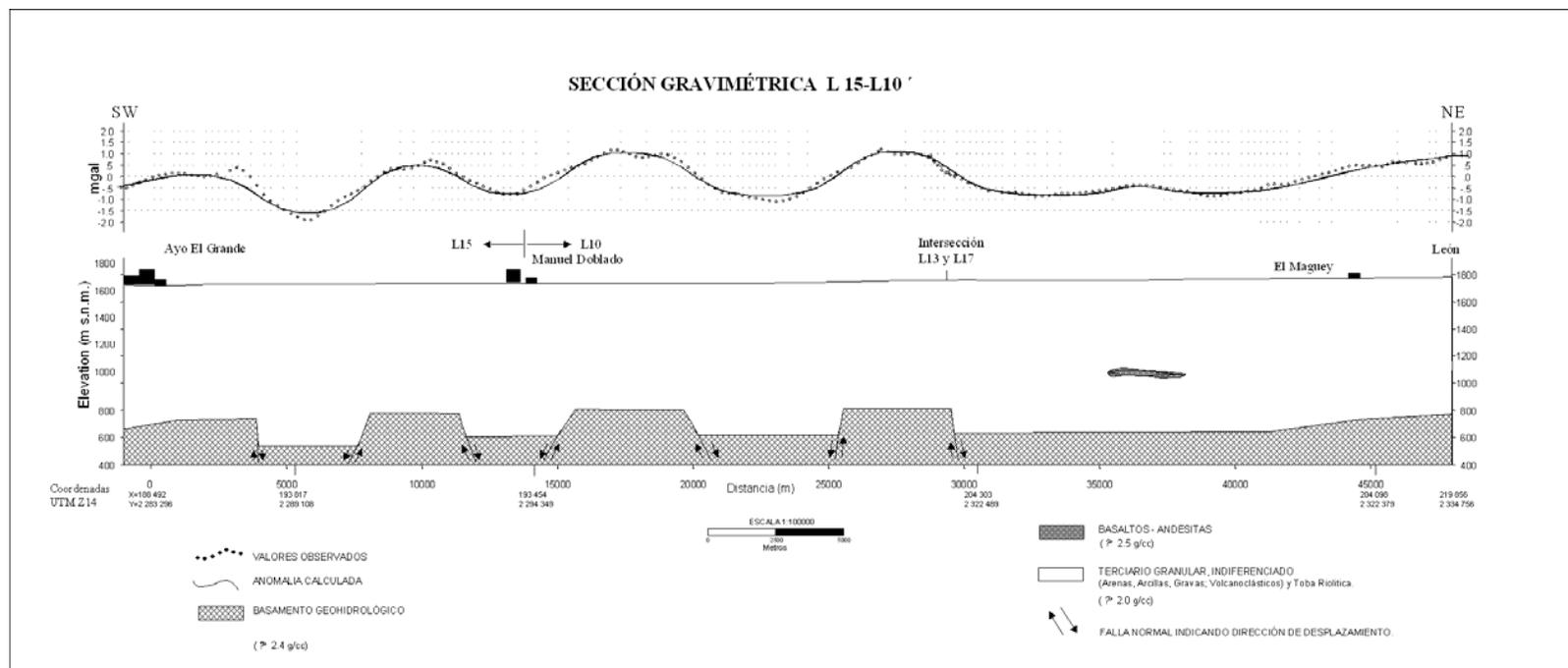


Figura 2.6 Sección gravimétrica L15 – L10.

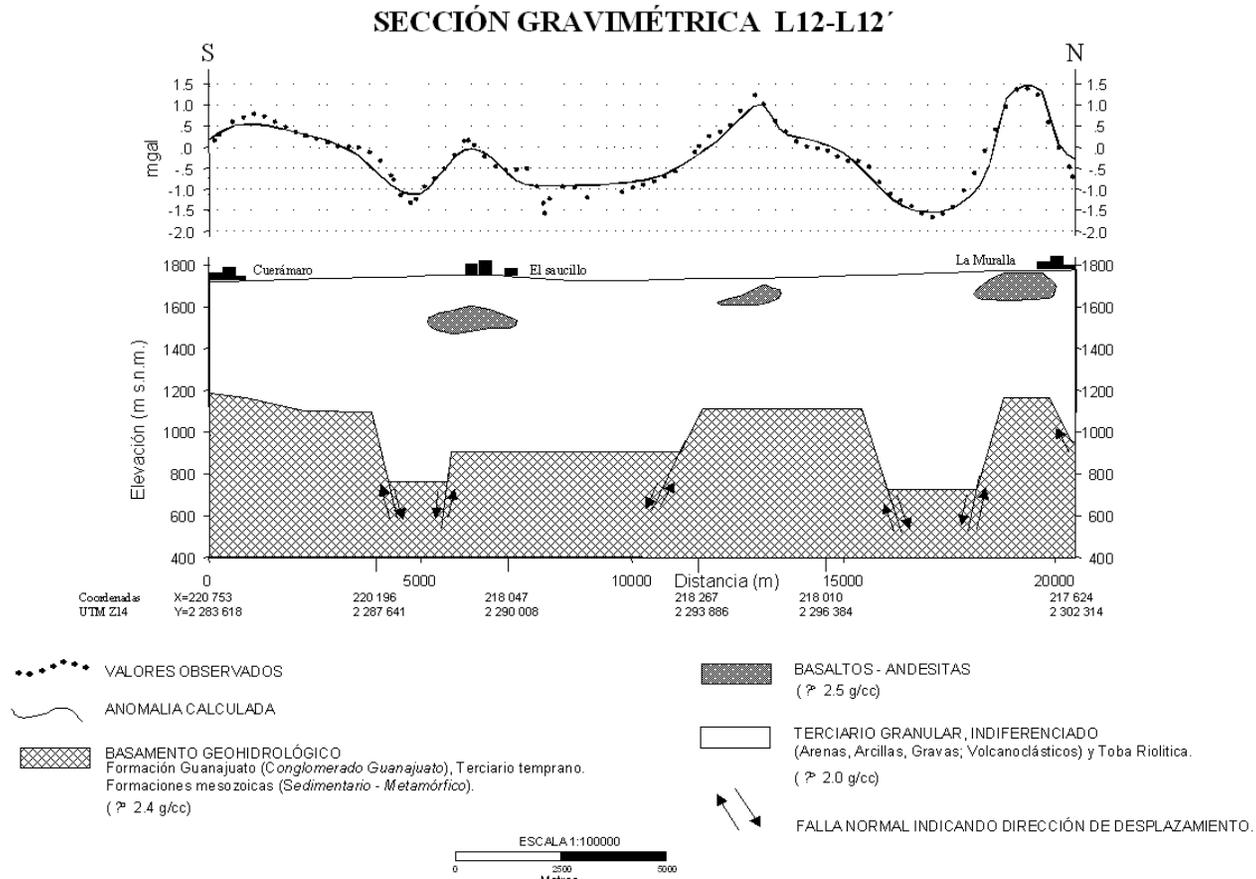


Figura 2.7 Sección gravimétrica L12 – L12'.

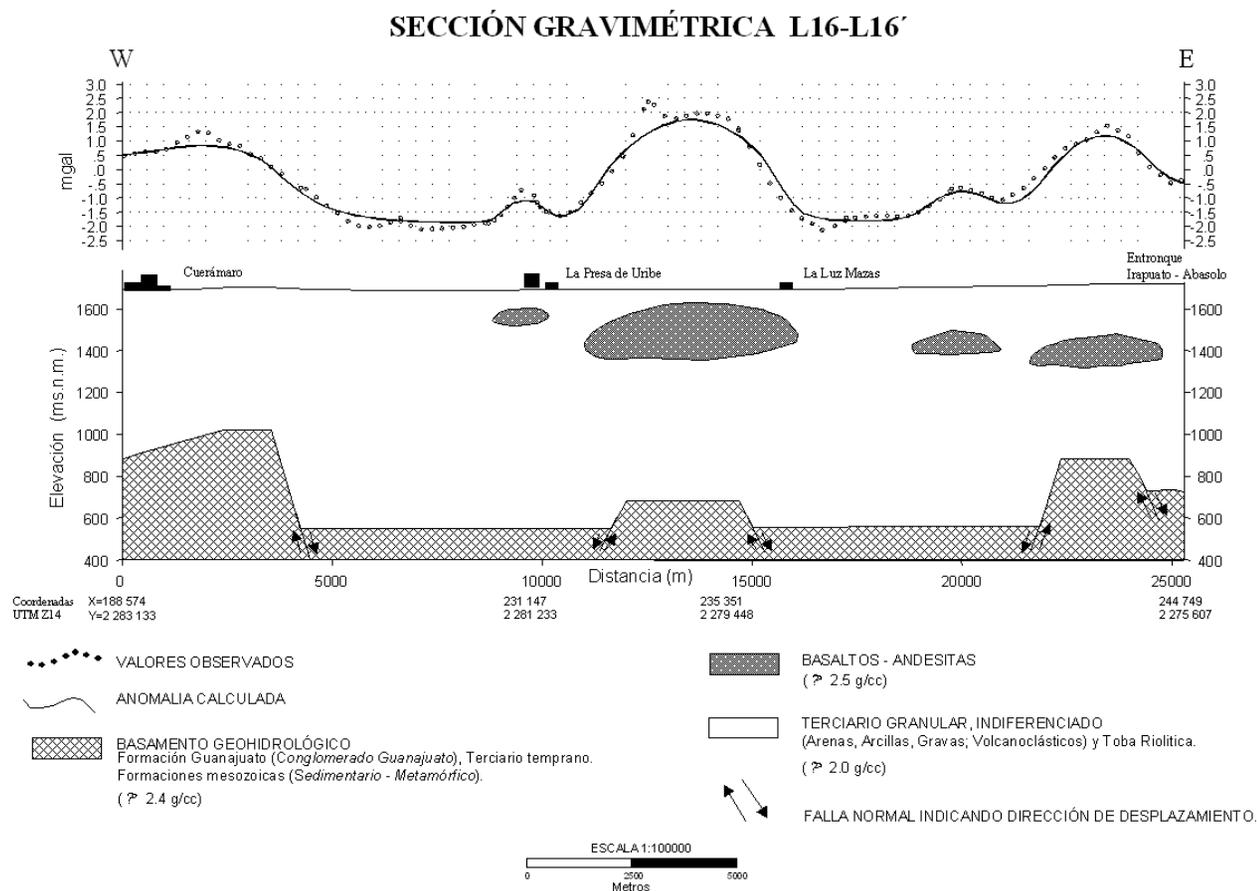


Figura 2.8 Sección gravimétrica L16 – L16'.

SECCIÓN GRAVIMÉTRICA L6-L6'

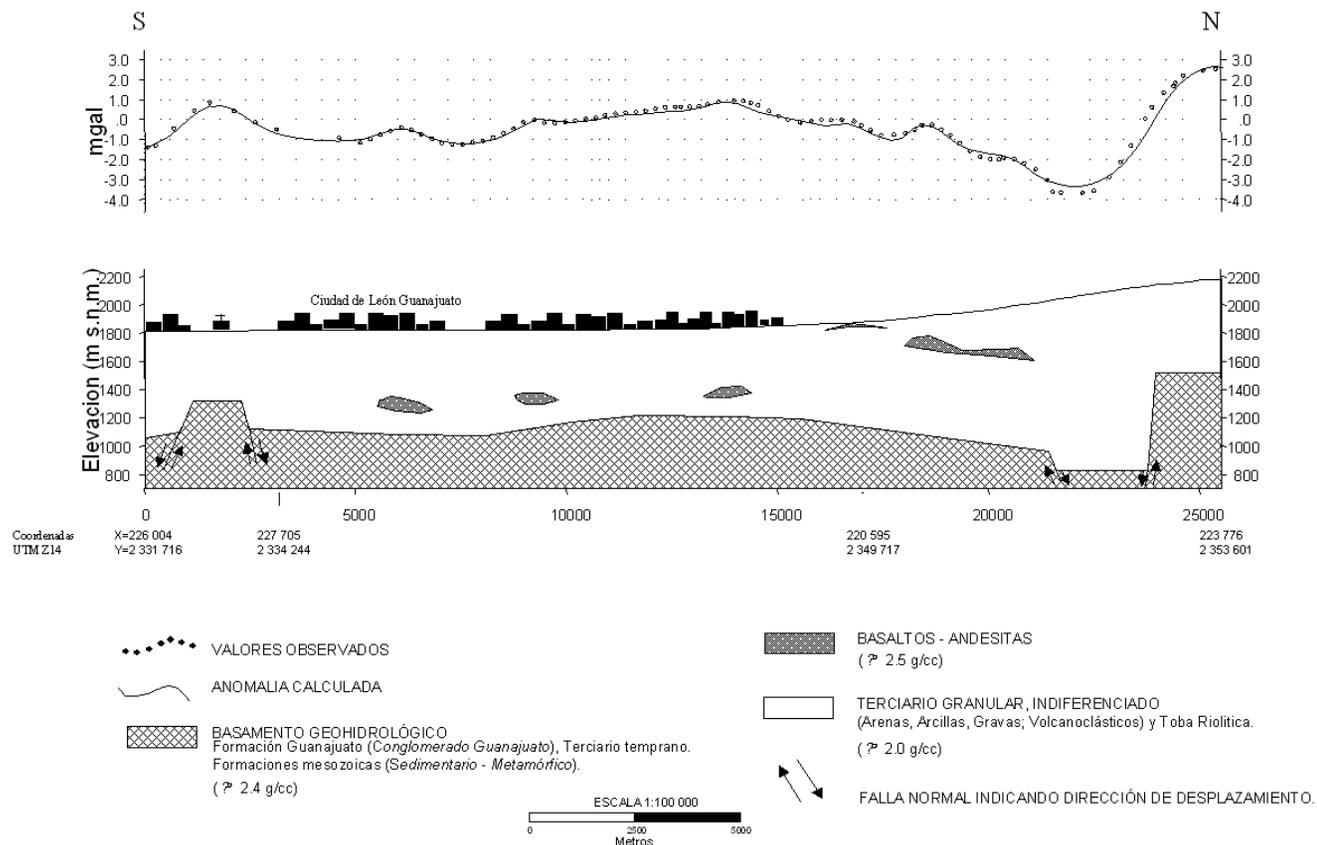


Figura 2.9 Sección gravimétrica L6 – L6'.

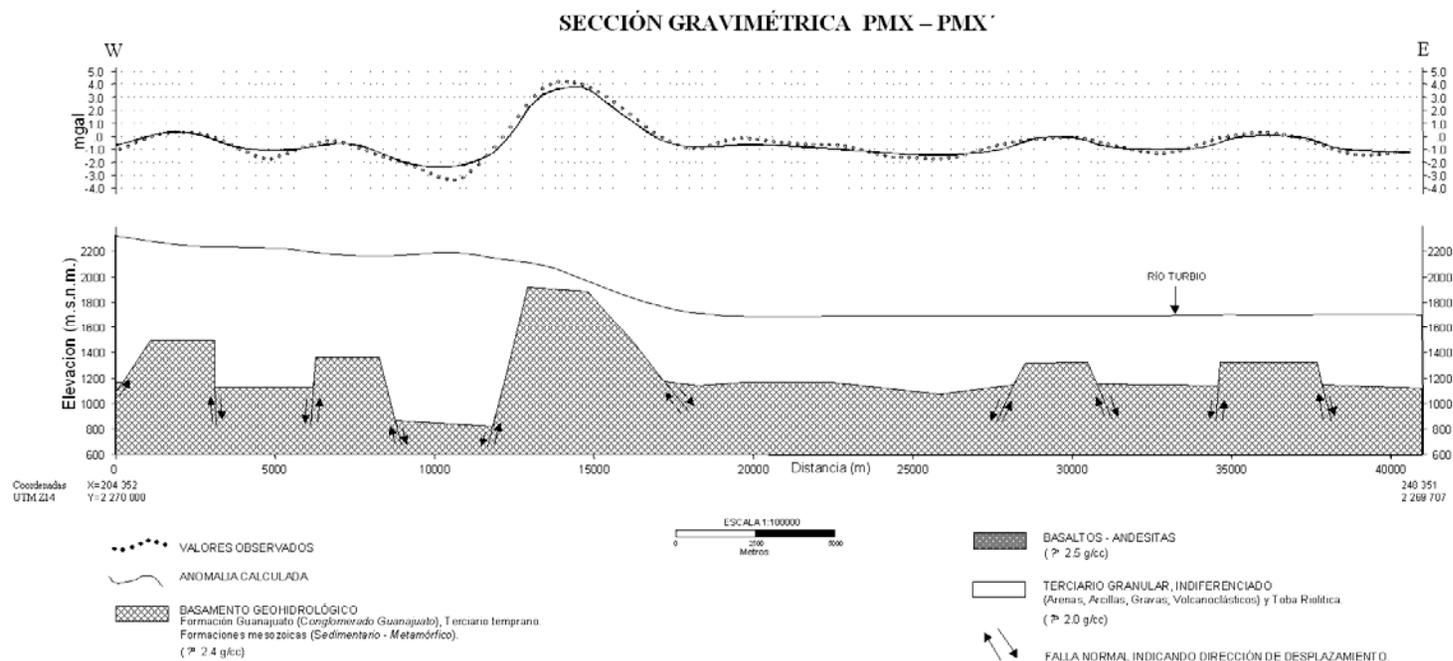


Figura 2.10 Sección gravimétrica PMX – PMX'.

3. HIDROGEOLOGÍA

Para detectar la influencia que tienen las rocas que constituyen la zona de estudio sobre el comportamiento del agua y determinar el funcionamiento hidrodinámico de éstas, es necesario considerar sus características hidrogeológicas (porosidad, permeabilidad, conductividad, coeficiente de almacenamiento y transmisividad), la posición en la columna estratigráfica y su disposición dentro del marco estructural. De esta manera podemos agrupar a las diferentes unidades litológicas de acuerdo a su comportamiento para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento de aguas subterráneas en dos tipos de unidades hidrogeológicas: permeables e impermeables.

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

Las unidades clasificadas dentro del Jurásico y Cretácico, a pesar de estar intensamente fracturadas, presentan baja permeabilidad debido a que las fracturas se encuentran rellenas por el material arcilloso que en ellas abunda, por lo tanto se les considera como unidades impermeables con gran potencial de escurrimiento de agua meteórica que se infiltra al entrar en contacto con rocas de mejor permeabilidad, en el área de estudio estas unidades se encuentran expuestas en el flanco suroccidental de la Sierra de Guanajuato y el funcionamiento hidrológico que desempeñan es únicamente el de provocar el escurrimiento superficial hacia las partes bajas de la sierra.

3.1. Distribución de unidades hidrogeológicas

Tomando como base estudios previos consultados, mapas geológicos del COREMI, la verificación hidrogeológica de campo en donde se observaron a partir del marco geológico los rasgos litológicos, estructurales, de alteración y grado de fracturamiento, así como las características hidráulicas de los distintos materiales de la zona; se estableció la susceptibilidad de las rocas y material granular a transmitir o almacenar agua, es decir, se definió si corresponden a unidades de nula, baja, mediana o alta

permeabilidad, quedando finalmente definidas y cartografiadas seis unidades hidrogeológicas (Figura 3.1).

UNIDAD I. Unidad granular con permeabilidad alta. Se caracteriza por sedimentos cuaternarios de composición variable, principalmente por aluvión. *Guysa (1998)* le atribuye un grosor que varía de unos centímetros hasta 15 m. Cuando a estos sedimentos se les encuentra intercalados con tobas y conglomerados poco consolidados y mal clasificados, el *COREMI (1999)* les asigna espesor de 100m. Si el agua infiltrada a través de esta unidad es obstruida en su descenso por lentes arcillosos, se forma un acuífero superior el cual tiene alto potencial hidrogeológico debido a que es poco explotado (sólo por algunas norias), y además recibe recarga constante a través del agua infiltrada por el retorno de riego agrícola y por las precipitaciones ocurridas en época de lluvias.

UNIDAD II. Unidad granular con permeabilidad media. Corresponde con la unidad geológica de Areniscas y Conglomerados Terciarios (TmAr-Cgp). Los materiales que constituyen esta unidad, de manera general son areniscas compactas y con moderado contenido de cuarzo; los conglomerados tienden a estar mal clasificados y contienen una matriz areno arcillosa. A profundidad conforma el medio granular por donde circula la mayor cantidad de agua subterránea y donde está perforada la mayor parte de los pozos, la granulometría que presenta es variada, desde material grueso hasta muy fino; éste último tiende a formar lentes de arcilla que, a su vez, provocan fenómenos locales de semi-confinamiento, lo cual se ve reflejado con pozos aledaños que tienen notables contrastes en la profundidad de sus niveles estáticos.

Superficialmente se distribuye al norte y noroeste de San Francisco del Rincón; a profundidad se le encuentra en todas las zonas de valles, con un grosor que varía de 250 a 400 m.

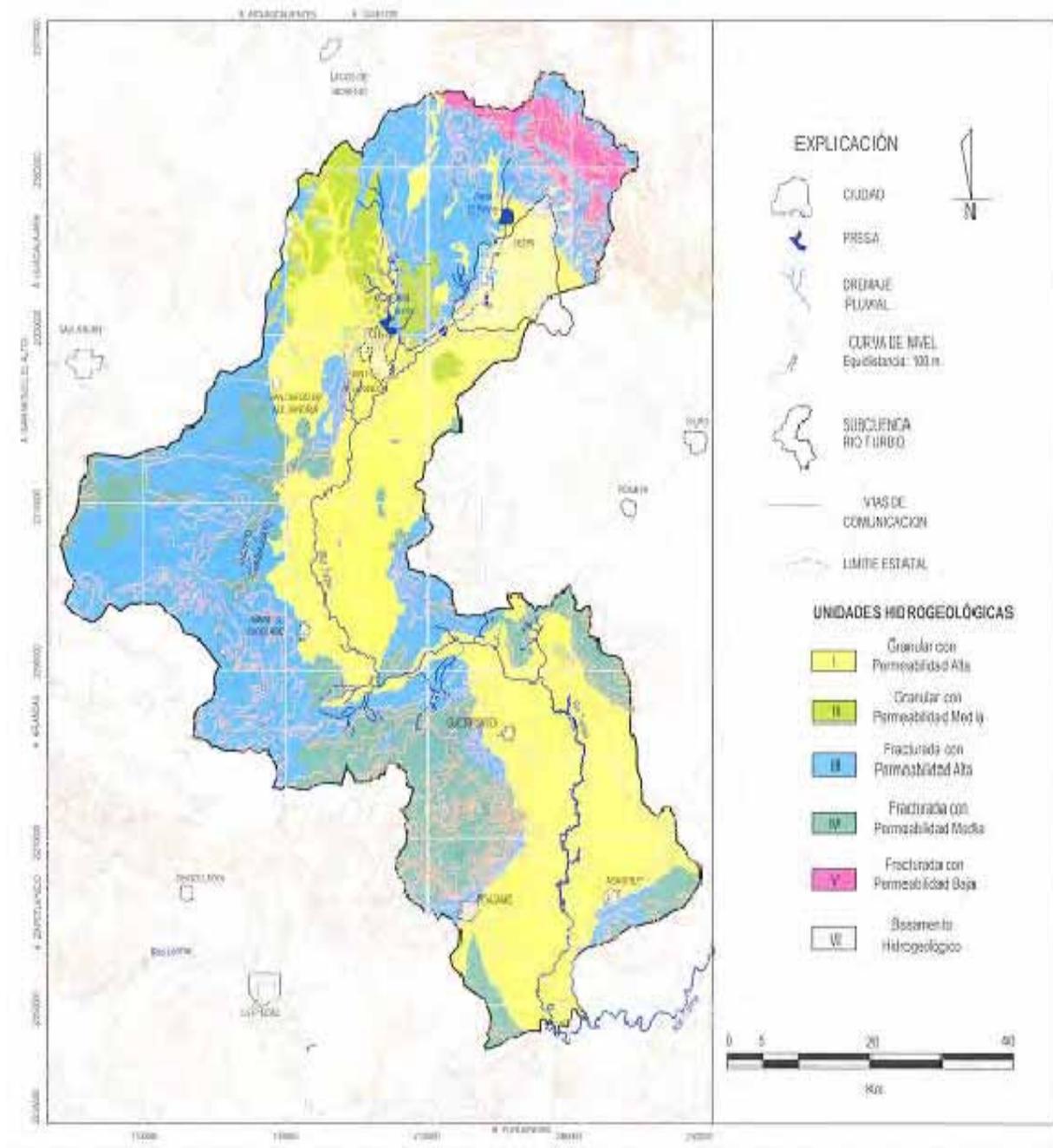


Figura 3.1. Distribución de unidades hidrogeológicas

UNIDAD III. Unidad fracturada con permeabilidad alta. Rocas con diferentes características litológicas conforman a esta unidad: Basaltos Cuaternarios (QB), intensamente fracturados y oxidados, de aspecto masivo y compacto, que en superficie se muestra laminado y, debido al interperismo, es quebradizo. También se incluyen a los Basaltos del Jurásico Superior (JsB), que es una secuencia de lavas almohadilladas y masivas, *Ortiz y otros (1993)* le asignan 1,000 m de espesor, su fracturamiento es intenso por lo que permite el paso y almacenamiento de agua.

Terciario volcánico, Ignimbrita Cuatralba (ToR-TR), riolitas y tobas riolíticas de baja a mediana compactación, con textura piroclástica y estructura masiva que forma columnas; localmente presenta pseudo-estratificación y abundante fracturamiento (diaclasas), se le relaciona con fallas regionales que a su vez forman pilares y fosas tectónicas, *Guysa (op. cit.)* le asigna 100 m de espesor.

Riolitas del Oligoceno (ToR), presentan estructura columnar así como textura fluidal, su fracturamiento es intenso y está relacionada con domos riolíticos, *COREMI (op. cit.)* le asigna un espesor que varía de 127 a 470 m. Diversos parámetros hidráulicos indican que es ha través de estas riolitas por donde el acuífero recibe una importante fuente de recarga proveniente de la parte centro occidental de la subcuenca (ver apartado 3.4.3)

Calizas del Plioceno (TplCz), corresponde a depósitos de origen lacustre, fuertemente fracturados, con vetillas y costras de calcita; su matriz varía de microcristalina a arenosa. Estas calizas afloran al sureste de San Francisco del Rincón, sin embargo, hacia la zona de La Muralla éstas tienen permeabilidad menor debido a que presentan intercalaciones con margas.

La unidad está distribuida al norte, poniente y centro, de la subcuenca, con algunas exposiciones hacia el extremo sureste. En el subsuelo se le encuentra prácticamente a todo lo largo y ancho del área de estudio. Se considera como una fuente potencial de recarga para el acuífero, a profundidad se comporta como un medio saturado por debajo de la Unidad II. Debido a la poca profundidad de los pozos, la explotación de esta unidad es mucho menor que la anterior, por lo que su potencial acuífero es atractivo, el espesor de esta unidad es variable, entre 300 y 400m.

UNIDAD IV. Unidad fracturada con permeabilidad media. Se refiere a un basalto andesítico del Terciario Medio, alterado y deformado, sin vesículas y con abundantes fracturas frecuentemente rellenas por calcita y azufre. Guysa (*op. cit.*) le asigna permeabilidad baja, pero considerando el fuerte fracturamiento que lo afecta y que no todas las fracturas tienen rellenos que las sellen, se le puede asignar permeabilidad media, sin descartar la posibilidad de que esta sea baja localmente; particularmente en la Sierra de Pénjamo de acuerdo a los datos piezométricos. Cuando esta unidad forma grandes bloques, su permeabilidad es baja y tiende a funcionar como una barrera natural al flujo subterráneo, su distribución en superficie se concentra principalmente al sur y poniente del área de estudio; el espesor medio de esta unidad es desconocido.

UNIDAD V. Unidad fracturada con permeabilidad baja. Las unidades geológicas que componen esta unidad hidrogeológica son varias. Incluye a:

Jurásico Superior Diorita (Js?D).- La roca se presenta forma masiva cristalina, de composición diorítica; su fracturamiento es leve y está relleno por calcita.

Terciario Paleógeno Granito (TpgGr).- Cuerpo intrusivo de dimensiones batolíticas de composición ácida, muy compactado, con fracturamiento incipiente relleno por calcita (*COREMI, 1997*).

Jurásico Superior Volcanosedimentario (JsVs).- Es una secuencia de rocas sedimentarias (lutitas, limolitas, areniscas, calizas, conglomerados), volcánicas (lava basáltica, andesita y toba andesítica) y metamórficas (esquistos y filitas, entre otras), se encuentran alteradas por movimientos orogénicos y la acción de cuerpos intrusivos que han provocado metamorfismo regional de bajo grado y alteración hidrotermal (*Martínez Reyes, 1992*). Su espesor es desconocido puesto que su base no aflora, pero mediante obre minera se estima que es mayor a 500 m. (*COREMI, op. cit.*).

Superficialmente, la unidad se caracteriza por generar escurrimientos los cuales drenan a las partes con topografía baja, el fracturamiento es intenso, sin embargo es considerada de permeabilidad baja ya que sus discontinuidades son rellenas por diversos materiales o se cierran hacia el interior del macizo rocoso, cuando esto no

ocurre la unidad aporta cantidades menores de agua al acuífero. Aflora en la parte norte de la zona.

UNIDAD VI. Unidad fracturada con permeabilidad muy baja (Basamento Hidrogeológico). Constituida por el Conglomerado Guanajuato y por una secuencia meta-sedimentaria del Jurásico Superior, aflora al norte de la ciudad de León y noroeste de San Francisco del Rincón. Superficialmente genera escurrimientos y a profundidad constituye el basamento hidrogeológico del sistema acuífero, la profundidad y morfología de éste se interpreta a través de diversas secciones geológicas regionales elaboradas en base a perfiles de pozos y a resultados geofísicos que, a su vez, tienen continuidad con la Subcuenca del Río Guanajuato.

3.1.1. Secciones Geológico - Hidrogeológicas

Sección Geológico - Hidrogeológica A – A’

La sección geológico-hidrogeológica A – A’ tiene longitud de casi 60 Km y rumbo de 60° en dirección suroeste-noreste; se extiende desde San Diego de Alejandría hasta la parte norte de León y hasta la Sierra de Guanajuato (figuras 2.1 y 3.2). La sección se construyó a partir de la información de 7 cortes de pozos y de la cartografía geológica a escala 1:250,000 elaborada por el COREMI.

La profundidad de los perfiles de pozos utilizados varía desde 150 hasta un máximo de 410 m. En todos los casos los cortes muestran una sucesión de materiales volcánicos que incluyen material aluvial superficial de poco espesor (hasta un máximo de 60 m), riolitas, basaltos, tobas riolíticas y algunos horizontes de materiales arcillosos y aglomerados; los pseudoestratos volcánicos se encuentran dislocados por varias fallas normales de orientación general N-S. Esta sucesión de materiales se extiende hacia la mayor parte de la sección, desde su extremo suroeste hasta unos 43 km hacia el noreste.

Un tercio de la sección, el extremo noreste, corresponde en su mayor parte a las rocas mesozoicas del Arco de Guanajuato. Este conjunto de rocas junto con las

unidades de conglomerado del Paleoceno-Eoceno (Conglomerados Duarte-Cenicera) constituyen el basamento hidrogeológico del área.

El espesor de los intervalos de rocas volcánicas en los cortes de pozos, varía desde una decena hasta un centenar de metros aproximadamente, tanto en los materiales riolíticos como en los basaltos. Las rocas basálticas se han incluido dentro de la unidad TmA-B, a la que en esta zona se le ha atribuido una permeabilidad alta. Las rocas riolíticas quedan comprendidas en las unidades ToR-TR, ToR y ToTR. Los afloramientos de estas rocas riolíticas presentan grados de permeabilidad variable, casi siempre permeabilidad secundaria, dependiendo del grado de fracturamiento y alteración. Un alto grado de alteración generalmente redundando en el relleno arcilloso de las discontinuidades y, por consiguiente, una reducción de la permeabilidad. El grado de permeabilidad de estas rocas va desde alta a incluso baja, para las tobas riolíticas de grano fino, escasamente fracturadas; pero de manera general se ha atribuido permeabilidad media para este conjunto de rocas. Se ha observado que en varios pozos de la región las riolitas proporcionan un aporte de agua importante a los caudales de estos aprovechamientos.

Las rocas mesozoicas de la Sierra de Guanajuato tienen relaciones estratigráficas complejas pues están afectadas por fallas de cabalgadura, intrusiones plutónicas y fallamientos normales escalonados. Las diferentes unidades mesozoicas se han indicado en la sección de manera muy simplificada y se han englobado en una sola unidad hidrogeológica: material consolidado con permeabilidad baja.

Aunque estas rocas son en general de escasa permeabilidad, existen fallas inversas y normales que las afectan y que se intersectan entre sí por lo que en forma local pueden constituir zonas favorables para la transmisión de importantes volúmenes de agua. Asimismo, la cubierta superficial de material intemperizado y relajado, particularmente en los granitos y otras rocas cristalinas tiene mayor permeabilidad que la roca madre intacta, lo que también favorece las infiltraciones. El espesor de esta cubierta superficial es variable y puede tener desde una decena hasta cerca de un centenar de metros.

En la construcción de las secciones hidrogeológicas se utilizó la información del subsuelo arrojada por los tendidos geofísicos. En el caso de la sección A-A' proporcionaron información sobre la probable profundidad a la que se encuentra la superficie del basamento hidrogeológico. La información gravimétrica sugiere la existencia de bloques estructurales desplazados a profundidad y que forman una serie de pilares y fosas, en las que se estima que la superficie de las rocas del basamento se encuentra a una profundidad de entre 500 y 600m aproximadamente.

- Sección Geológica – Hidrogeológica B – B'

La sección tiene longitud de casi 65 km y un rumbo general suroeste-noreste de 60° (Figuras 2.1 y 3.3). Inicia en su extremo suroeste en las cercanías del rancho conocido como La Cantera de Moyas, situado a unos 20 km al este de Arandas, Jalisco. Desde este punto, la línea de sección se extiende con una dirección de 54° hacia el noroeste, hasta el extremo norte de la Presa Silva, que se encuentra a unos 6 km hacia el sur de San Francisco del Rincón. En este punto, la sección tiene una ligera inflexión de rumbo noreste con 70°, misma que mantiene hasta el extremo nororiental de la misma. La sección cruza por las localidades de Jalpa de Cánovas, San Roque de Torres y termina en las cercanías de San Pedro del Monte. Para la construcción del perfil se utilizó la información de 11 cortes de pozos con profundidades de 90 a 410 m.

La información de estos cortes muestra la presencia de un relleno de material granular de 150 a más de 250 m de espesor, que se extiende desde la parte centro hasta el extremo noreste de la sección. El material clástico rellena una fosa tectónica formada por el desplazamiento de un substrato de rocas riolíticas a causa de fallamientos normales de orientación general norte-sur. El relleno consiste en un depósito aluvial formado por una mezcla de arcillas, arenas y gravas. Estos depósitos han sido clasificados como materiales granulares de permeabilidad general media.

En el resto de la sección, según afloramientos superficiales, se revela la predominancia de rocas riolíticas con algunas intercalaciones de basaltos y lentes de material aluvial y lacustre de poco espesor, por lo menos hasta la profundidad de unos 500 m. Es notable que la mayoría de los pozos estén perforados en las riolitas de donde

se obtienen caudales importantes. Es común en esta área que en las perforaciones se busque encontrar riolitas fracturadas por su buen potencial acuífero.

Las rocas riolíticas muestran por lo general baja permeabilidad primaria, pero la permeabilidad secundaria debida al grado de fracturamiento puede ser bastante alta, por lo que de manera general estos materiales se han clasificado como material consolidado con permeabilidad media.

Para la configuración del basamento hidrogeológico se utilizó la información de las líneas gravimétricas de Geofísica. El basamento hidrogeológico está constituido por unidades de baja permeabilidad entre las que se incluyen a los cuerpos cristalinos intrusivos, las rocas mesozoicas que afloran en la Sierra de Guanajuato y los conglomerados tipo molasa del Terciario Inferior (conglomerados Duarte-Cenicera).

La sección muestra a dicho basamento formado por una serie de bloques desplazados por fallamientos normales que forman una serie de fosas y pilares de tamaño y desplazamiento variables. La mayor profundidad a la que se encuentra el basamento se estima en aproximadamente 1000 m, hacia el extremo noreste de la sección y que corresponde a la zona central del valle aluvial que se extiende al oriente de San Francisco del Rincón.

- Sección Geológico-Hidrogeológica C – C'

Se ubica en la parte sur de la subcuenca, tiene longitud de 57 km y se extiende desde unos 10 km al sur de Pénjamo hasta unos 3 km al norte de Monte de Hoyos. (Figuras 2.1 y 3.4) La sección se construyó con la geología superficial y la información de 5 cortes de pozos con profundidades de entre 120 y 250 m.

La información disponible sugiere la presencia en el área de un substrato de rocas volcánicas riolíticas con menores intercalaciones de basalto, aglomerados, toba y algunos pequeños lentes de gravas y arcillas. El conjunto rocoso está afectado por varias fallas normales que dan origen a pilares y fosas, así como bloques escalonados. En la parte centro sur de la sección se aprecia un gran alto topográfico y estructural que se conoce como Levantamiento Tectónico de Pénjamo. La base de este macizo serrano

está formada por rocas riolíticas, que se encuentran coronadas por lavas y tobas andesítico-basálticas. El espesor del paquete riolítico observado en la sierra mencionada y en los cortes de pozos suma por lo menos 500 m y puede aún ser considerablemente mayor.

Intercalados con los estratos riolíticos existen intervalos y lentes de rocas basálticas, aglomerado, material arcilloso y aluvial que pueden tener varias decenas de metros de espesor. Con ayuda de la información gravimétrica del SGM, se estimó una profundidad al basamento de aproximadamente 300 m desde la base de la sierra de Pénjamo y de hasta 800m en el valle que se extiende al sur de la ciudad del mismo nombre. En esta zona se infiere, con gravimetría y geología superficial, un relleno constituido principalmente por horizontes de riolitas, andesitas y basaltos intercalados con sedimentos, así como una cubierta granular superficial de unos 200 m de espesor.

La mayor profundidad hasta el basamento se presenta en el extremo norte de la sección, que ya corresponde a la subcuenca vecina del Río Guanajuato, con aproximadamente 1000m. Una gran proporción de los materiales que descansan sobre las rocas mesozoicas del basamento corresponde a lavas y tobas riolíticas con subordinados volúmenes de basaltos y andesitas.

Por referencias de estudios previos (*COREMI, 2004*) se sabe que en esta zona la cubierta de material granular reciente es de al menos 300m, pudiendo alcanzar hasta 500 m.

En el estrecho valle que se extiende desde Cuerámara hasta el límite norte de la Subcuenca del Río Turbio (en el km 43.5 de la sección) los perfiles de pozos y la geología superficial sugieren que el relleno granular superficial no tiene un gran espesor en esta zona, que puede ser hasta de unos 300 m aproximadamente.

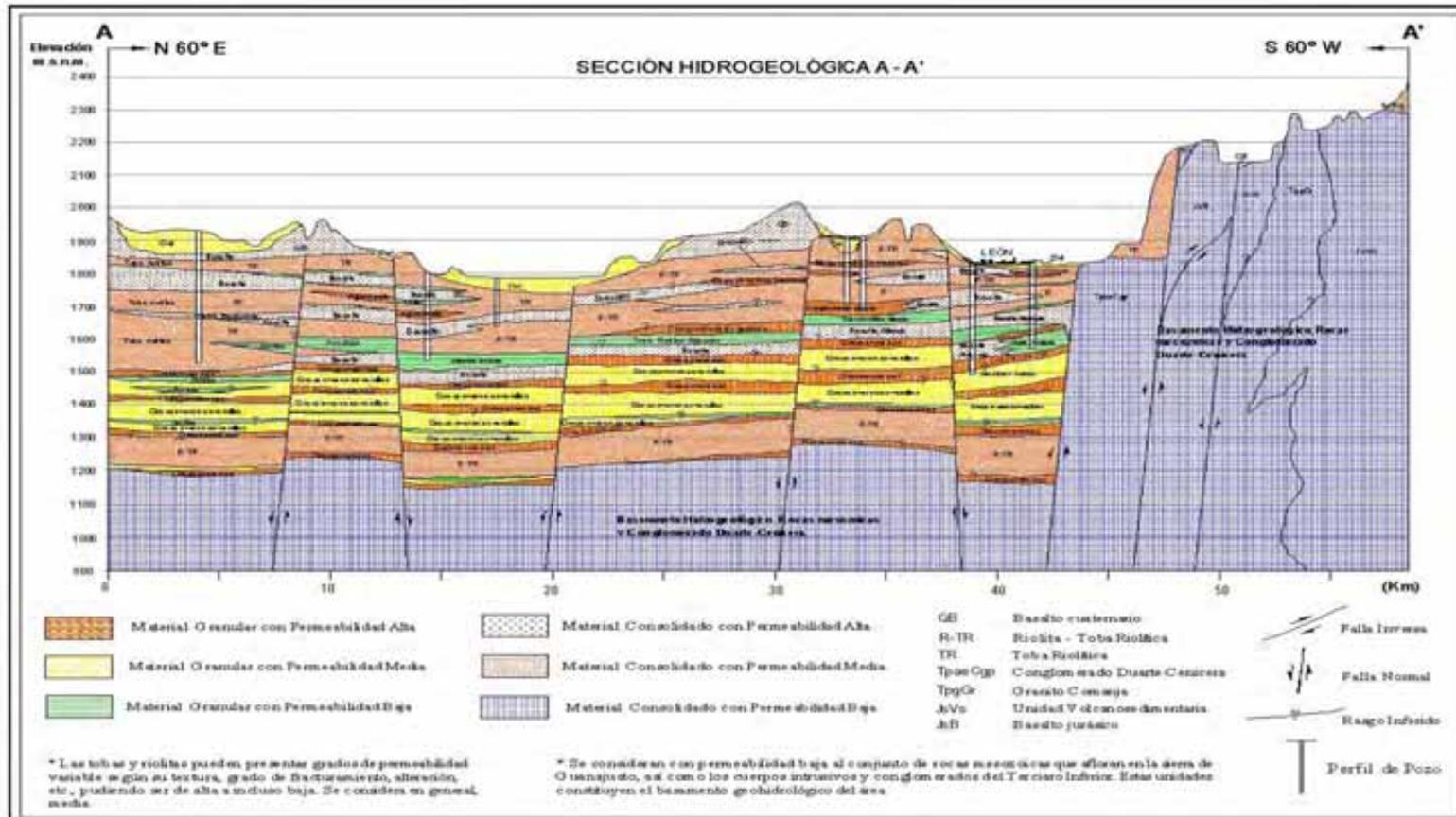


Figura 3.2 Sección Geológico – Hidrogeológica A – A'

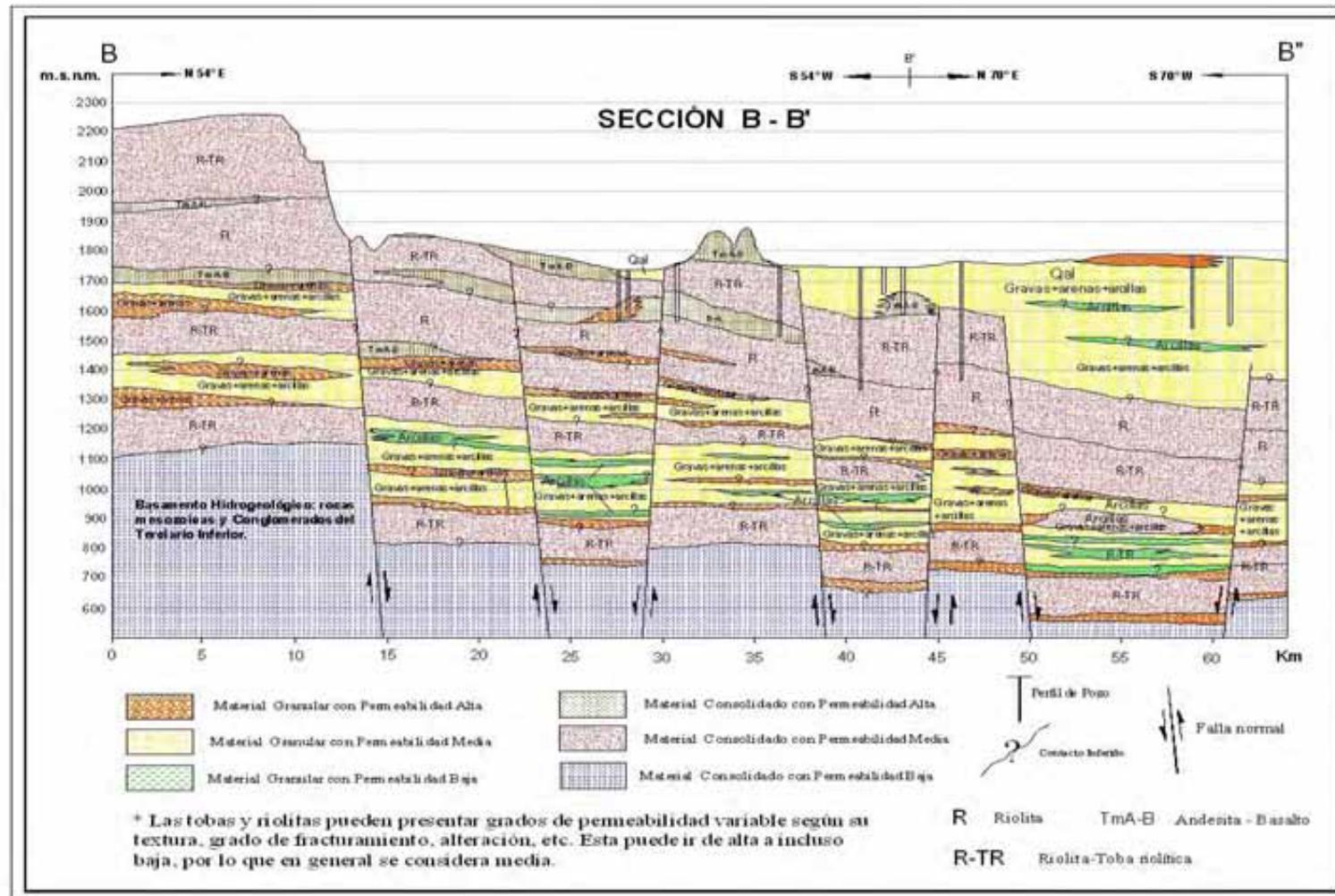


Figura 3.3 Sección Geológica – Hidrogeológica B – B'

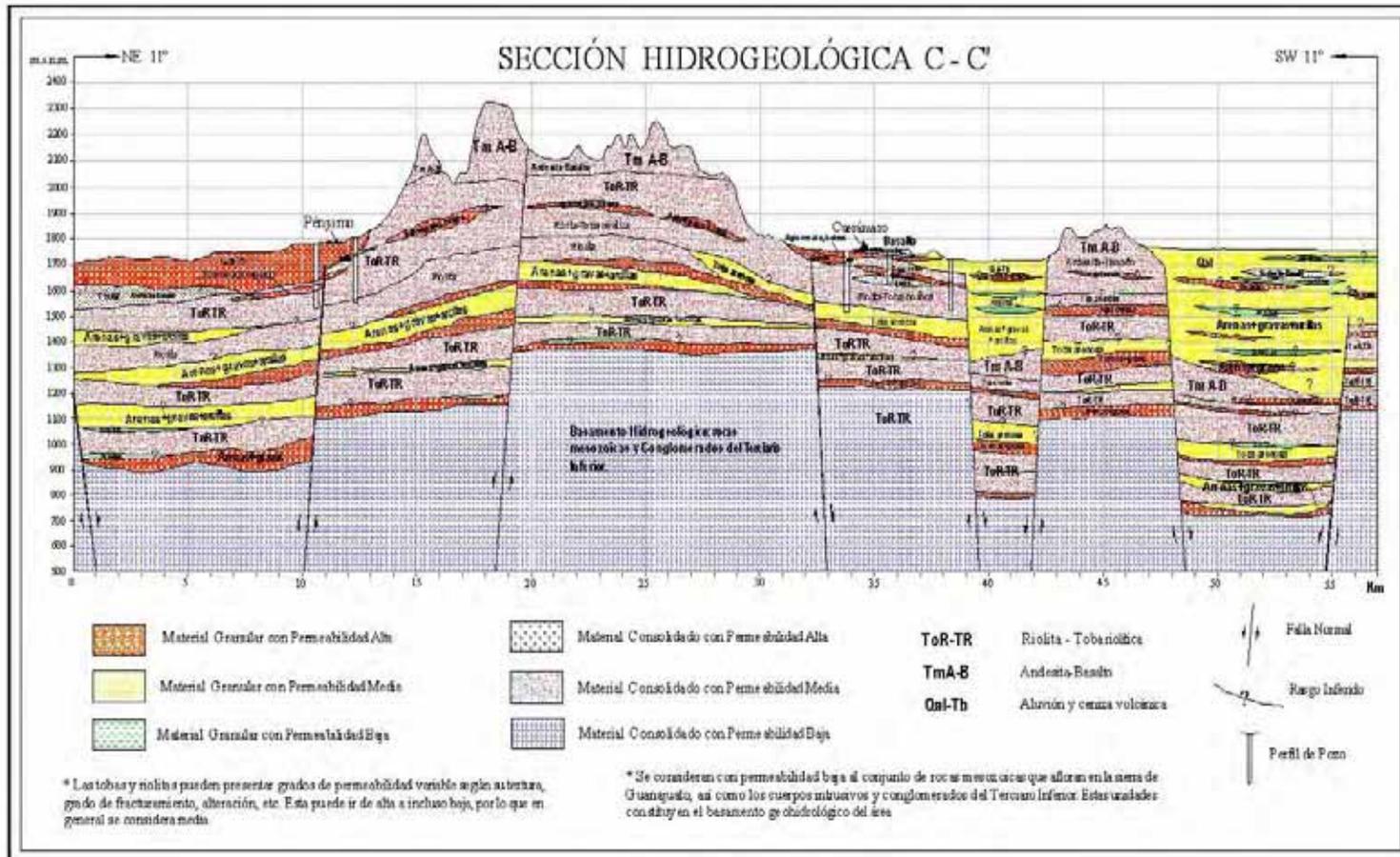


Figura 3.4 Sección Geológico – Hidrogeológica C – C'

3.2. Piezometría

La piezometría es una herramienta muy útil para conocer el estado actual, así como los procesos de evolución y dinámica de los acuíferos. Es una representación gráfica y esquemática de los niveles de agua subterránea con respecto al nivel de referencia, usualmente el nivel medio del mar, de tal forma que se pueden detectar fácilmente las áreas donde el acuífero se encuentra sobreexplotado o, por el contrario, delimitar domos de recarga. También con el uso de esta herramienta se pueden delimitar zonas de frontera, así como zonas de recarga y descarga; al determinar o delimitar los parámetros anteriores se pueden tomar medidas de prevención o mitigación para el sistema acuífero, dependiendo del estado en que se encuentre.

El agua es un recurso vital en el desarrollo de la sociedad, particularmente en la zona de estudio hay diversos registros piezométricos que muestran como el agua subterránea ha sido aprovechada a través del tiempo.

Actualmente existe una intensa presión y competencia por el recurso agua entre diferentes sectores productivos y sociales en la región (agrícola, industrial, comercial, municipal e incluso estatal); lo cual ocasiona una gran extracción de agua en la zona, lo que provocó que los niveles piezométricos cambiaran su comportamiento para formar grandes conos de abatimiento.

En el Estado de Guanajuato el problema se ha enfatizado en las últimas dos décadas, (*Guerrero, 1999*). Al no existir un control que permitiera regular estrictamente la perforación de pozos se propició que la extracción de agua subterránea sobrepasara la recarga natural del acuífero, de tal manera que en el Estado se extraen aproximadamente tres metros cúbicos por cada dos que se recargan (*Ham Chi, 1999*).

3.2.1. Redes de Monitoreo y datos piezométricos.

La mayoría de los estudios hidrogeológicos realizados en la zona de estudio se limitan a los acuíferos definidos por CNA y/o CEAG, mismos que fueron delimitados conforme a criterios que no implican necesariamente la distribución de cuencas, subcuencas o microcuencas. En este caso, el área de nuestro estudio está delimitada por la Subcuenca del Río Turbio. Para la zona, CEAG tiene considerados cuatro acuíferos: Valle de León, Río Turbio, Pénjamo-Abasolo y La Muralla; la región que cubre éste último no es muy significativa para el presente estudio debido a que la parte que se incluye en la subcuenca tiene pocos pozos y se encuentran en superficies topográficamente altas. Es importante mencionar que los límites de acuíferos en la parte poniente del área son a la vez el límite estatal entre Guanajuato y Jalisco (Figura 3.5). En esta misma figura se observan los límites de acuíferos publicados el 31 de enero de 2003 en el Diario Oficial de la Federación, donde se establece un acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y los planos de localización.

Con el objeto de desarrollar una piezometría que vaya acorde con estudios anteriores, CEAG proporcionó sus *Redes de Monitoreo Piezométrico* a fin de que se les diera continuidad para el periodo de secas 2004 y lograr una mejor visión del comportamiento acuífero por medio del análisis continuo de los niveles piezométricos.

Tal como se observa en la Figura 3.5, los límites de los acuíferos sobrepasan al límite de la subcuenca, por lo que se optó por sondear sólo los pozos que se ubicaran dentro de la misma y aquellos que no excedieran una distancia aproximada de 7 Km fuera del parteaguas de la misma.

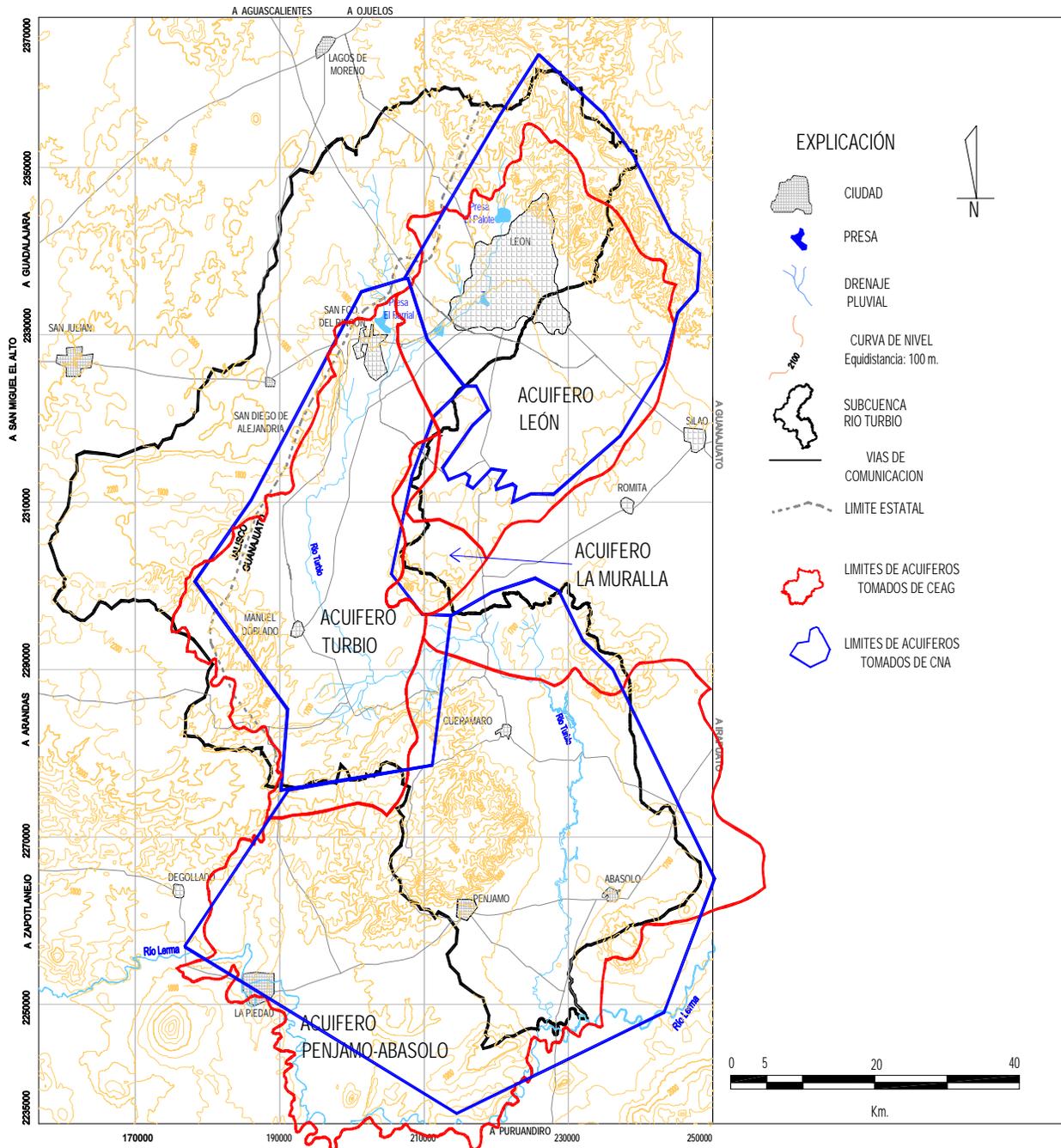


Figura 3.5 Delimitación de los acuíferos que cubren a la zona de estudio.

Existe una red de monitoreo para cada acuífero. La red del acuífero Valle de León se compone de 107 pozos piloto, de los cuales 22 no se sondearon por exceder la distancia límite, 12 corresponden a distintos organismos operadores y CEAG facilitó las lecturas para dicho periodo (secas 2004). La ubicación de estos pozos tiende hacia la parte norte y noreste del área y la mayoría se encuentra en el límite de la subcuenca y cubriendo el Valle de León. La red del acuífero Río Turbio se compone de 53 pozos, de los cuales tres no se sondearon por ser piezómetros de CEAG, por lo que ésta dependencia proporcionó los valores piezométricos correspondientes. Los pozos de esta red se localizan en la parte central de la Subcuenca del Río Turbio y tienen una densidad mucho menor al de las otras dos redes.

Respecto a la red del acuífero Pénjamo-Abasolo, la integran 96 pozos, de los cuales 34 no se sondearon por estar alejados más de 7 Km del límite del área; al ubicar estos pozos pilotos se puede observar que cubren la parte sur de la zona con una densidad similar a la de la red del acuífero Valle de León.

La campaña de piezometría que se llevó a cabo fue para el periodo secas 2004, paralela a ésta, los COTAS de Valle de León y Pénjamo-Abasolo llevaron a cabo su propia campaña de monitoreo de los mismos pozos pilotos. Al momento de integrar y comparar ambas mediciones fue notorio que en algunos puntos las mediciones contrastaban, por lo anterior, se programaron una serie de medidas adicionales, a manera de verificación, con personal de CEAG, COTAS de Valle de León y el SGM. De esta manera se asegura que los resultados de la campaña de piezometría son precisos, con excepción de un par de pozos, donde los escurrimientos a través de las paredes del ademe dificultan el sondeo de los mismos.

Con las redes de monitoreo proporcionadas por CEAG y las mediciones realizadas por el SGM se generó una base de datos con la cual se hicieron las configuraciones de profundidad, elevación y evolución de los niveles piezométricos, además de que se analizó su comportamiento histórico (tablas 3.1, 3.1a y 3.1b).

Tabla 3.1 Pozos de monitoreo de la red del acuífero Valle de León que se localizan dentro de la subcuenca en estudio. Se observa el historial piezométrico proporcionado por CEAG y las mediciones del SGM para el periodo secas 2004.

CLAVE CEAG	OTRA CLAVE	LOCALIDAD O PROPIETARIO	ELEVACION DEL BROCAL (m.s.n.m.)	COORDENADAS CEAG		COORDENADAS COREMI		N.E. SECAS 1999 (m)	N.E. SECAS 2000 (m)	N.E. SECAS 2001 (m)	N.E. LLUVIAS 2002 (m)	N.E. LLUVIAS 2003 (m)	N.E. SECAS 04 (m)		ALTURA DEL BROCAL (cm)	
				X	Y	X	Y						CEAG	COREMI		
G-45	GZA-60	Junta de Agua Potable Duarte	1787.12			237473	2334217	82.64	83.25	86.45	85.90	93.83			80.92	15
G-46	GZA-69	Fichoy Casimiro Soto	1825.74			237466	2334347				17.72	10.27			14.29	0
G-51	P-68	Taurina Tavarez	1856.93			235307	2332904	80.64	80.15	83.35	81.37	82.05			80.20	0
G-61	P-58	Manuel Gutiérrez M.	1850.94			233640	2332467	68.54	68.05	68.85	68.21	66.15			60.10	52
G-62	GZA-56	J. Luz López	1855.09			234275	2333133	49.25	48.60	51.62	50.21	51.85			43.90	55
G-64	GZA-55	Gabino Morales	1850.94			234493	2333414	51.61	51.54	53.77	53.73	49.42			59.22	23
G-89	GZA-52	Gilberto Luna	1863.91			234291	2334574	60.32	69.77	62.82	63.18	58.01			47.29	29
G-90		Felade Aguilar	1866.43			234509	2334559	76.36		operando	83.38	84.93			54.91	32
G-91	GZA-43	Rancho Don Eli	1872.79			234580	2335409	52.15	95.26	113.56	103.27	105.40			32.05	0
G-95		Salvador Garcia	1855.01			233504	2333743	59.60		61.98	60.25	58.99			57.14	0
G-96		Rodolfo Urquieta Velázquez	1863.91			233330	2333697	79.96	68.75	71.36	69.58	70.81			63.14	0
G-211	P-35	Alberto Garcia	1837.57			231122	2334563	66.40	65.87	71.56	68.51	67.85			66.64	18
G-218		Francisco Arenas (Repte)	1834.38			230755	2335951	73.45	72.40	74.51	tapado	75.22			109.50	0
G-220	R-4.P-46	Ej.San Nicolas de González	1829.69			230355	2336441	75.70	76.67	81.46	81.96	80.46			78.93	29
G-236	CD-8	SAPAL	1809.00	226341	2337047						58.78	59.30	60.94		s/d	
G-245	CD-13A	SAPAL	1835.00	225167	2342248						121.04	118.04	119.55	121.2	s/d	
G-247	CD-46	Barrio de Guadalupe	1880.00	224336	2345796						98.39	96.37	95.40		82.58	62
G248B		SAPAL	1795.00	224700	2335000							101.86	98.87		s/d	
G-261	CD24	SAPAL	1825.00	220866	2340740						99.20	112.20	113.6		s/d	
G-264	CD-40	SAPAL	1793.00	224376	2335073						96.46	93.18	tapado		s/d	
G-277	P-148	SAPAL(pozosur7)	1777.98	219338	2325620				135.80	140.87	139.51	145.12	144.74		s/d	
G-296	CD-20	SAPAS	1832.00	220788	2343404				110.32	110.43	99.20	98.41			s/d	
G-308	P-343	Pedro Zuñiga	1822.94			232604	2329443				8.27	10.28			8.53	0
G-315	P-339.R-13	Everardo Hernandez	1821.37			231889	2330225	34.97	35.35	35.63	34.60	33.88			32.80	23
G-316		A.P.Col. Arboledas de Los López	1822.50			231940	2329905	56.60		59.26	60.20	60.81			59.43	37
G-339	P-171	Benjamin Pérez	1814.68			228556	2331553	133.10	133.40	140.96	140.23	139.54			139.40	0
G-343		Santiago Bustamante	1821.41			231679	2330429	68.23	63.35	69.90	71.69	69.12			62.87	50
G-344	P-335	Pop.San José del Clavel	1820.88			231504	2330534	67.07	66.34	66.16	67.37	66.73			60.84	65
G-374	P-23	Moises Muñoz Durán	1820.97			229327	2332155	49.32	49.60	51.32	50.37	51.67			50	0
G-375		Paula Muñoz	1817.50			229104	2332465	49.51	49.61	51.42	50.31	50.96			49.05	0
G-381	P-26	José María López	1815.50	228751	2332403			48.02		51.49	48.83	49.22			53.18	s/d
G-385	P-32	3 Hermanos S.A. De C.V.	1818.84			229221	2333016	52.86	53.05	55.07	53.29	53.94			53.60	0
G-410	P-501	Emerardo Hernández	1785.00			219541	2334502				9.11	8.22			4.44	25
G-438B		SAPAL	1792.00	222820	2335890							23.70	24.72		s/d	
G-462		J.Mercad Muñoz	1767.48			212610	2329660	33.15	32.35	34.73	31.38	32.41			31.46	0
G-466	P-786	Celso Muñoz Becerra	1768.34			212680	2330253				13.80	15.50			13.77	0
G-469	P-777	Pablo Sánchez Becerra	1769.06			213338	2330120		36.28	36.70	32.40	34.26			32.47	33
G-498	P-409	Raul Garcidueñas	1789.65			222599	2330653		104.57	111.96	99.03	110.45			112.00	0
G-499	P-410	Simón Vargas	1788.63	222628	2329925			131.47	130.27	134.55	128.40	129.63			133.78	s/d
G-512-A		J. Santos Servin	1781.98			217744	2332598				3.50	3.05			2.57	25
G-548	P-523	Agropecuaria Sanfandila	1784.02			218745	2329674	85.90	80.57	85.36	78.36	79.94			80.34	34
G-567	P-606	Manuel Alvarez Ornelas	1776.52	216607	2329700			70.00	59.15	62.36	57.00	58.11			61.73	s/d
G-593	P-618	Francisco Fuentes e Hijas.	1780.46			218129	2329870	86.77	90.42	87.03	88.06	88.06			86.36	37
G-604		A.P.Sn Pedro del Monte	1779.44			217857	2327887		82.36	82.83	operando	81.67			74.83	0
G-605-A	P-623	Antonio Garcia Padilla	1775.81	217616	2328962			127.50	122.60	128.76	123.93	126.80			131.20	s/d
G-609-A		Roberto Elias Orozco	1779.59			217674	2327720	80.00	80.76	81.76	77.07	79.72			77.30	0
G-650		A.P. San José de la Calera	1809.49	212535	2321684			148.72		156.66	155.78	157.13			159.29	s/d
G-652	P-801	Carlos Puente Pérez	1768.49			212152	2328613	39.15	39.80	41.84	39.60	40.29			34.63	0
G-698	P-547	Jorge Vega	1780.80	219908	2328443			119.40	120.84	125.96	133.45	134.42			141.76	s/d
G-724	P-176	Antonio Baldovino	1805.00			227775	2329326			141.10	136.11	132.02			133.64	16
G-729	P-163	Agustín González	1810.10			228594	2329673	139.87	128.33	130.36	128.79	131.52			131.68	37
G-735	P-179	Rafael Fuentes Valdovino	1802.70			227539	2328783	129.58	129.35	137.72	133.41	130.66			132.56	25
G-740	P-183	Tomás Ponce Fuentes	1822.33			228538	2328570	128.85	128.92	139.66	131.92	132.79			131.25	0
G-741		Tomás Ponce Fuentes	1806.16			228018	2327675	127.10	126.73	135.60	129.97	129.98			128.61	63
G-749		Crecencio Rivera	1809.12			230599	2325985	97.76		102.70	100.26	99.97			98.87	28
G-750		J.A.P.Pop El Culje	1809.00			230054	2326786	103.98	103.55	109.90	108.91	110.03			106.17	48
G-755		Beatriz Ramirez	1808.29			229710	2326900	106.13	108.50	114.85	109.65	113.40			104.78	49
G-757		Samuel Ramirez	1808.98			230978	2325174	87.52	87.40	89.93	86.95	88.2			87.96	36
G-759-A		Manuel Ramirez	1810.52			231549	2325092	83.70	83.40	85.05	86.70	85.90			82.59	28
G-776		Leónides Bustos	1800.46			227536	2327090	120.98	121.96	129.40	126.83	125.06			137.35	15
G-778		Miguel Fuentes Valdovinos	1798.44			227172	2328200	99.10	115.90	121.74	115.48	116.31			122.79	38
G-860		Allonso Durán Llamas	1816.16			210920	2317701	141.25	142.35	147.56	145.74	146.33			147.65	40
G-862	R-16.L-129	A.P.Pop. Sn Isidro	1817.00	208467	2309276			143.40	113.20	114.92	116.97	117.81			121.12	s/d
G-867		Clemente Aviña	1798.00			211476	2312540				26.96	26.55			24.46	28
G-869		Ricardo Romero	1796.00			211076	2313778	64.27	66.35	69.96	69.90	69.11			63.30	20
G-904	P-198	Rafael Pérez Prieto	1795.48	228229	2324739			103.05	105.25	113.50	109.31	110.80			110.15	26
G-912		J. Andrade Espinoza	1790.72	227102	2325063			105.86	107.36	111.30	109.12	110.73			112.14	s/d
G-1065	P-239	Grupo Fox	1765.00			220342	2321692	120.85	122.29	127.66	127.32	128.19			128.73	37
G-1094		Fidel Castillo	1767.00			221988	2318416	67.02	68.70	69.55	68.57	68.82			59.27	0
G-1137	GZA-159	Jaime López	1753.08			234032	2326334	82.58	83.04	84.94	81.99	86.57			87.93	60
G-1153	R-6	Santiago Ramirez	1800.37			231965	2324673	83.33	83.31	87.36	83.37	85.02			84.60	44
G-1292		Francisco Herrera	1778.46			214195	2315904	67.40	68.50	66.72	65.04	66.20	</			

Tabla 3.1a Pozos piloto de la red del acuífero Río Turbio que se localizan dentro de la subcuenca en estudio. Se observa el historial piezométrico proporcionado por CEAG y las mediciones del SGM para el periodo secas 2004.

CLAVE CEAG	OTRA CLAVE	LOCALIDAD O PROPIETARIO	ELEVACION DEL BROCAL (m.s.n.m.)	COORDENADAS CEAG		COORDENADAS COREM		N.E. SECAS 1999 (m)	N.E. SECAS 2000 (m)	N.E. SECAS 2001 (m)	N.E. LLLUMAS 2002 (m)	N.E. LLLUMAS 2003 (m)	N.E. SECAS 04 (m)		ALTURA DEL BROCAL (m)
				X	Y	X	Y						CEAG	COREM	
1		Agua Potable Sn. Antonio	1788.13			205704	2335100				14.10	10.32		10.17	107
7		Agua P. Estación FF. CC.	1775.00			206313	2328688	62.20	63.03	65.35	66.00	66.00		64.30	0
37		Felix López	1772.31			199262	2324786	52.30	25.85	41.23	25.90	25.55		30.6	17
60		Bartolo Sandoña Marquez	1745.00			201558	2321097				6.75			4.28	47
105		Agua Potable El Tecolote	1740.00			195783	2312404				60.47			59.13	61
109		Ramón Pedroza	1738.00			197251	2312588	56.20	54.60	60.23	nohaypaso	56.96		54.65	80
129	G-861	Agua Potable Santsidro	1825.00			208346	2308544	144.90	143.40	152.06	150.75	150.22		146.82	38
132		Javier Valdez	1735.00			204177	2305520				65.38	63.90		62.4	0
139		Delirio Acosta	1730.80			202323	2306503	56.80	55.05	61.03	57.75	58.30		55.91	47
192		Luis Raúl Madrigal	1732.00			197840	2308155	53.20	51.85	57.40	55.07	54.05		54.47	0
215		Etrén Rodríguez	1739.00	199925	2314802			25.70	26.96	34.30	31.55	22.66		21.95	s/d
215A		Ej. San Roque camino CañadadeN.	1742.00	199820	2316785						20.10			12.05	s/d
234		Alejandro Marquez	1743.00			201079	2317924				11.30	5.40		6.55	50
249		Enrique Contreras	1780.00			207437	2315910			111.16	107.00	102.87		103.22	25
359	R-9	Luis Gerardo Moreno	1755.06			192771	2313081	83.55	70.63	73.25	71.85	71.30		70.3	40
360		Sergio López	1748.00			192449	2312630				61.40	61.70		60.27	15
365		Manuel Torres	1729.01			191477	2308339	53.95	52.20	57.45	55.72	54.83		54.55	0
388B		Luz Salinas	1728.00			190334	2298962				41.40	39.62		37.04	26
402		Juan Nuñez	1725.22			193872	2300558				25.30	27.81		24.52	33
439		Felix Verdin	1754.00			207398	2323963	56.64	55.40	58.76	56.30	45.92		54.54	26
460		Vicente Guerrero López	1760.00			209723	2320559	55.70	54.54	57.68	55.00	53.90		45.34	16
470		Jesús Muñoz Pérez	1770.00			213044	2326784				69.60			68.87	26
505		José Luis Árenda	1740.00			201013	2286704	52.55	51.45	57.06	52.40	50.55		50.99	47
526		Mta. Guadalupe León	1748.00			198089	2285206	58.30	56.50	62.70	55.50	53.17		47.8	0
544		Bartolo Vazquez	1740.59			194435	2291516	66.60	63.80	69.55	62.60	60.49		61.78	12
547		Agua Potable ElCharcón	1719.00			196946	2295182				10.40	7.33		7.24	38
566		Comunidad La Manga	1771.85			207574	2296676	67.20	66.30	71.56	73.70	74.69		76.03	s/d
582		Fernando Carbajal Aguilera	1720.94			201272	2295498	42.30	operando	50.73	43.40	42.08		43.71	22
608B		Ej. Puerta de Llave	1720.00			197183	2300282				9.80			9.07	18
630		Ejido El Tucán 4	1728.30			200128	2304312	29.24	29.60	35.86	33.00	29.47		28.51	43
675B		Rutilio Botello	1742.00			204480	2308851				69.30	66.07		66.83	41
676		Antonio Alvarez	1729.00			204284	2302967	95.60	94.36	94.85	89.85	88.26		84.75	55
698	G-436	Raynaldo Chavez	1764.18			211717	2309217	32.43	32.95	35.97	31.10	25.16		21.14	36
789		Ignacio A. Montiel	1766.54			209064	2329505	operando	30.56	32.32	32.00	29.49		32.8	0
808		Cruz Pérez	1780.00			213450	2325332	operando	seco	154.45	136.40	126.86		127.19	18
831		Tenería Eco-Azul	1792.74			201200	2332752				25.85	26.58		26.59	8
833		Wenceslao Hernández	1845.00			197094	2332036	70.40	70.78	71.50	71.40	71.37		71.4	10
835		Norte del Bañeario Girasoles	1788.00			200247	2330824				37.10			26.22	58
839		Agua Potable el Tanco	1742.60			811104	2300845	44.70	43.20		nohaypaso	Nohaypaso		42.6	20
843		Pedro Espinoza	1719.00			192893	2308843	49.70	48.38	50.40	43.80	42.32		44.3	30

s/d: Dato no tomado

Tabla 3.1b Pozos piloto de la red del acuífero Pénjamo-Abasolo que se localizan dentro de la subcuenca en estudio. Se observa el historial piezométrico proporcionado por CEAG y las mediciones del SGM para el periodo secas 2004.

CLAVE CEAG	OTRA CLAVE	LOCALIDAD O PROPIETARIO	ELEVACION DEL BROCAL (m.s.n.m)	COORDENADAS CEAG		COORDENADAS COREM		NE SECAS 1999 (m)	NE SECAS 2000 (m)	NE SECAS 2001 (m)	NE LLLUMAS 2002 (m)	NE LLLUMAS 2003 (m)	NE SECAS 04 (m)		ALTURA DEL BROCAL (cm)
				X	Y	X	Y						CEAG	COREM	
101	R-20	Abelardo Zapien	1708.00			242846	2276217	88.94	88.62	115.30	102.80	82.00		92.29	33
150	R-15	Agua P. Purisimado Cobambias	1707.73	2281625	241245			69.10	70.10	73.85	73.26	72.25		75.12	s/d
227		Ramón González	1695.59			234862	2280547	93.65	83.30	84.85	83.20	69.00		95.25	40
263	PYPSA-315	Austreberta Fuerte	1697.00			231528	2282872	47.80	50.50	54.40	46.20	33.41		22.78	25
420		Clara Bartolotti	1714.00	2286646	220376				50.86	53.44	54.05	51.32		53.81	s/d
422	R-6	A.P.Fraco California	1735.00			220459	2284411	49.40	50.80	54.88	55.06	52.47		53.55	86
707	R-25	A.p.San Antonio de Bernaldes	1698.00	2269702	245944				68.50	69.10	62.24	66.40		66.57	s/d
778	R-24	Agua P. Los Vogotes	1696.00			241210	2268123	81.88	80.35	89.23	74.40	68.29		76.54	70
892		Elena Constantini	1695.00			233562	2269047	48.75	48.10	50.20	45.90	30.42		43.40	6
906		Fernando Mendoza	1693.00			235994	2269377	80.05	65.03	58.70	50.90	49.95		46.34	40
914	YPSA-744-R	Canaderial Marco Schiavon	1696.02			236734	2275746	40.85	operando	41.43	32.00	42.31		41.81	47
1101	R-18	A Potable Soledad de Negrete	1697.00			231441	2274678		36.67	37.27	38.54	36.02		36.32	52
1239		José Jaime	1708.00			224216	2280254				24.20	23.00		13.85	25
1267		Jesús Alvarado	1688.00			230741	2270690				15.02	14.27		11.68	s/d
1282		José Frías	1687.00			226494	2270225				10.30	7.73		11.35	48
1317	R-31	A Potable Sn José de Peralta	1700.00	2265396	248917				30.95	40.10	42.70	38.05		39.16	s/d
1407		Emiliano González	1726.00			247012	2286513	83.00	85.15	84.50	82.02	81.98		85.25	23
1518		Agua P. Rancho Seco	1697.00			219332	2253004	75.95	73.75	101.50	73.20	68.78		78.29	45
1541B		Granja Vali	1750.00			206692	2256365			105.30	104.10	148.81		112.00	0
1575		Aristeo Valdez Lemus	1720.00			210768	2253236	81.20	operando	89.70	83.20	81.46		83.52	22
1579	R-48	Ejido Colorado de Saavedra	1718.00			213402	2253437	75.20	78.10	79.40	80.45	79.10		74.44	83
1597	R-57_GZA270	Agua potable Trojes de Paul	1696.86			210643	2249473	52.70	56.20	58.40	57.97	57.50		59.13	52
2159	P-27	Isaías Gómez	1624.90			220882	2264251				110.14	137.42		121.48	32
2182	GZA119.R-40	Ejido La Granjera	1692.00			222699	2257902	92.25	92.88	85.32	75.90	75.55		101.60	40
2219	GZA-43	Ejido Estación Pénjamo	1693.00			223443	2261506		88.50	80.02	78.86	79.14		66.63	47
2261	R-28	A Potable Estación Corralejo	1687.00			226755	2265523				17.00	10.85		14.37	18
2301		Ricardo Campos	1687.60			224474	2255992	78.10	87.65	91.52	72.95	74.19		97.05	20
2364		Tomas Carracho	1694.00			227527	2249534	39.07	40.05	42.20	40.40	9.00		42.78	48
2384	R-59.P-64	Ejido Maritas Pozo 2	1692.00			223080	2249097	41.70	42.77	45.50	40.20	40.20		45.94	38
2394	R-50.ZA-291	Adolfo Serratos	1690.00			227304	2252149				7.25	6.00		4.81	s/d
2413		Ricón de Martínez	1693.00			230006	2249979	40.50	41.10	45.60	38.35	29.80		41.93	30
2449		Agua Potable Monte Blanco	1695.00			236154	2252850	59.02	48.78	49.85	46.35	46.61		51.85	s/d
2455		Antonio Contreras	1708.00			230456	2255384	81.64	82.07	84.75	83.29	87.00		84.20	17
2482		Ejido San Juan Grande	1703.00			235887	2254063	58.30	59.80	54.70	53.00	56.90		61.08	72
2488		Ejido Joroches	1692.00			237396	2249807	44.20	44.95	45.00	42.00	33.14		29.71	47
2514		A Potable La Rosa	1695.00			228366	2259855	71.09	73.87	77.15	74.22	73.45		75.36	38
2544		Pedro Vazquez	1697.00			232383	2260682	80.79	82.60	87.10	87.14	87.08		84.50	5
2582		Franco Fuentes	1690.00			231100	2264335	78.75	78.63	78.10	75.13	cerrado		80.93	30
2615		Repte. Daniel González	1720.00	2253900	238273			78.20	78.23	80.35	76.20	81.01		81.18	s/d
2622		San Juan Grande	1692.00			236996	2251985	55.30	49.05	53.45	47.30	50.50		52.32	62
2635		Ej. San Cristobal	1692.00	2250403	236430			54.20	57.15	59.45	60.59	61.14		63.28	s/d
2697		Napoleón García	1709.00			247201	2259311	65.15	69.07	70.13	68.00	71.55		73.53	19
2777	R-51.ZA-285	Samuel Cabrera	1698.00			230660	2252310	52.30	53.55	55.10	55.90	40.04		42.88	30

s/d: Dato no tomado

3.2.2. Niveles piezométricos históricos

En el caso específico de la Subcuenca del Río Turbio, es en la década de los cuarenta del siglo pasado cuando de manera general inicia la explotación del acuífero a través de pozos someros. A partir de entonces las redes de flujo natural comienzan a cambiar. Para la década de los cincuenta se inicia la perforación de pozos a gran escala, misma que alcanza su mayor intensidad en los setenta (*Guysa, 1999*).

Como se mencionó anteriormente, los estudios hidrogeológicos existentes en la zona tradicionalmente están delimitados por acuíferos, por lo que es difícil abordar datos históricos a nivel de subcuenca, debido a lo anterior, a continuación se hace una breve reseña sobre el comportamiento de la piezometría histórica para los tres valles ó acuíferos que cubren a la zona de estudio (Figura 3.5), para, finalmente integrarlos de manera general a nivel de subcuenca.

El abatimiento de los niveles estáticos es causado principalmente por la alta densidad de pozos y, por ende, por las grandes cantidades de agua que extraen. Para el Valle de León, *Guysa (1998)* actualizó el censo de aprovechamientos reportando 1433 pozos, de los cuales 1156 eran pozos activos, 201 inactivos, 59 secos, 14 tapados y 3 en perforación. De los activos, 797 son agrícolas, 245 de uso potable, 100 para abrevadero, 12 industriales y 2 recreativos. Si se toma en cuenta que el área aproximada del acuífero es de 1,100 km², se puede hacer un cálculo de la densidad general de pozos, resultando de 1.3 pozos/Km², para la totalidad de estos aprovechamientos, y de 1.05 pozos/km² tomando en cuenta sólo pozos activos.

Para 1998, en la parte oriente del Valle de León, las profundidades del nivel estático fluctuaban entre 10 y 60 m, en la parte central (donde existe una mayor densidad) las profundidades variaban entre 80 y 185 m, en cambio para la zona de La Muralla los niveles se encontraban entre 40 y 100 m y para los Altos de Jalisco los niveles superaban la profundidad de 130 m. El abatimiento medio anual se consideraba en ese entonces de 1.6 m/año, con valores de hasta 6 m/año en zonas de mayor extracción, principalmente al centro del valle (*Guysa, 1998*).

Según la sinopsis del Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero Valle de León, Gto. (*Guysa, 1998*), el cono de abatimiento del valle existía desde hace varias décadas. El análisis de piezometría elaborado en dicho estudio cubre un período desde 1948 hasta 1998, permite concluir que el área es una zona de recarga continua. Al analizar las gráficas de la elevación del nivel estático, para 1998 se observa cómo la piezometría indica que todas las zonas topográficamente altas, que rodean al valle, funcionan como zonas de recarga natural al acuífero, lamentablemente el volumen de la misma se ve superado por la extracción.

En lo que respecta al acuífero Río Turbio, (*Geopsa 1998*) levantó un censo de aprovechamiento en el área, resultando 1036 aprovechamientos, de los cuales 902 son pozos, 111 norias, 9 manantiales, 2 represas, 3 rebombes y 9 galerías filtrantes. De la totalidad de pozos, 734 estaban activos, 52 inactivos, 2 en perforación y 57 se encontraban fuera de servicio temporal por estar sujetos a rehabilitación o por falta de suministro de electricidad. Es importante mencionar que el número de pozos totales (902) no coincide con la sumatoria del *status* de los pozos (845), son 57 pozos a los que no se les asignó el estado en que se encontraban.

Los aprovechamientos en este valle se propagaron considerablemente, en 1979 la empresa Geohidrología Mexicana S.A. reporta sólo 415 aprovechamientos, de la misma forma la empresa Ingeniería Geológica Computarizada S.A., en 1995 plantea la existencia de 851 aprovechamientos, lo cual significa que en sólo 16 años (1979-1995) se crearon 436 nuevos aprovechamientos y, más recientemente, en el periodo 1995 a 1998 fueron 185 adicionales.

La densidad general de los pozos tiende a ser baja, si se toma en cuenta que la superficie de la zona es de 3,203 km², es del orden de 0.22 pozos/km², dicha densidad aparentemente es saludable, pero no es representativa de la zona ya que para obtener una densidad real es necesario restar el área de sierras y lomeríos al área total; por lo que más adelante se aborda nuevamente este tema.

Para 1998 en esta región las profundidades piezométricas más someras se encontraban en la parte norte, particularmente en los alrededores de la Presa San

Germán (niveles de hasta 10 m) y de San Francisco del Rincón (niveles de hasta 50 m), es necesario mencionar que dichos niveles se encontraban en pozos con hasta 100 m de profundidad. Para la zona de Peñuelas, al oriente del valle, los niveles alcanzaban profundidades de hasta 60 m, mismos que se incrementaban hacia el oriente llegando a superar los 140 m de profundidad. En la parte central las profundidades oscilaban entre 35 y 40 m, incrementándose al poniente y sur hasta llegar a niveles del orden de 60 a 70 m.

Al menos desde la década de los noventas en la parte central del valle existía una gran depresión piezométrica provocada por la intensa extracción de agua, debido a este cono de abatimiento el flujo original del agua se interrumpió, por lo que ya no fluye de manera natural hacia el sur y sureste de la zona. Respecto a la zona oriente del valle, desde 1995 se identificó un fuerte cono de abatimiento, tan solo en el lapso de 4.5 años los niveles estáticos descendieron entre 10 y 15 m, lo cual da un abatimiento promedio de 2 a 3 m/año para esta zona. El abatimiento promedio del toda área correspondía a 1.85 m/año (*Geopisa, 1998*).

Referente al Valle Pénjamo-Abasolo la situación es prácticamente la misma que en las zonas anteriores, se han generado conos piezométricos que, sin lugar a dudas, afectan al sistema acuífero. La empresa Lesser y Asociados, S.A de C.V., en 1997 (informe de 1998) actualizó el censo de aprovechamientos en la zona, determinando un total de 2,926; de éstos 2,769 corresponden a pozos, 152 norias y 5 manantiales. De la totalidad de los pozos 2,519 se encontraban activos, 24 estaban en perforación, 74 en rehabilitación y 309 ya no operan por razones diversas. El uso de los pozos activos está distribuido de la siguiente forma: 83% agrícolas, 12.7% para agua potable, 2.9% para abrevadero y 1.4% para el sector industrial. Si se considera un área de 2,140 km², la densidad de pozos activos en la zona es de 1.17 pozos/km².

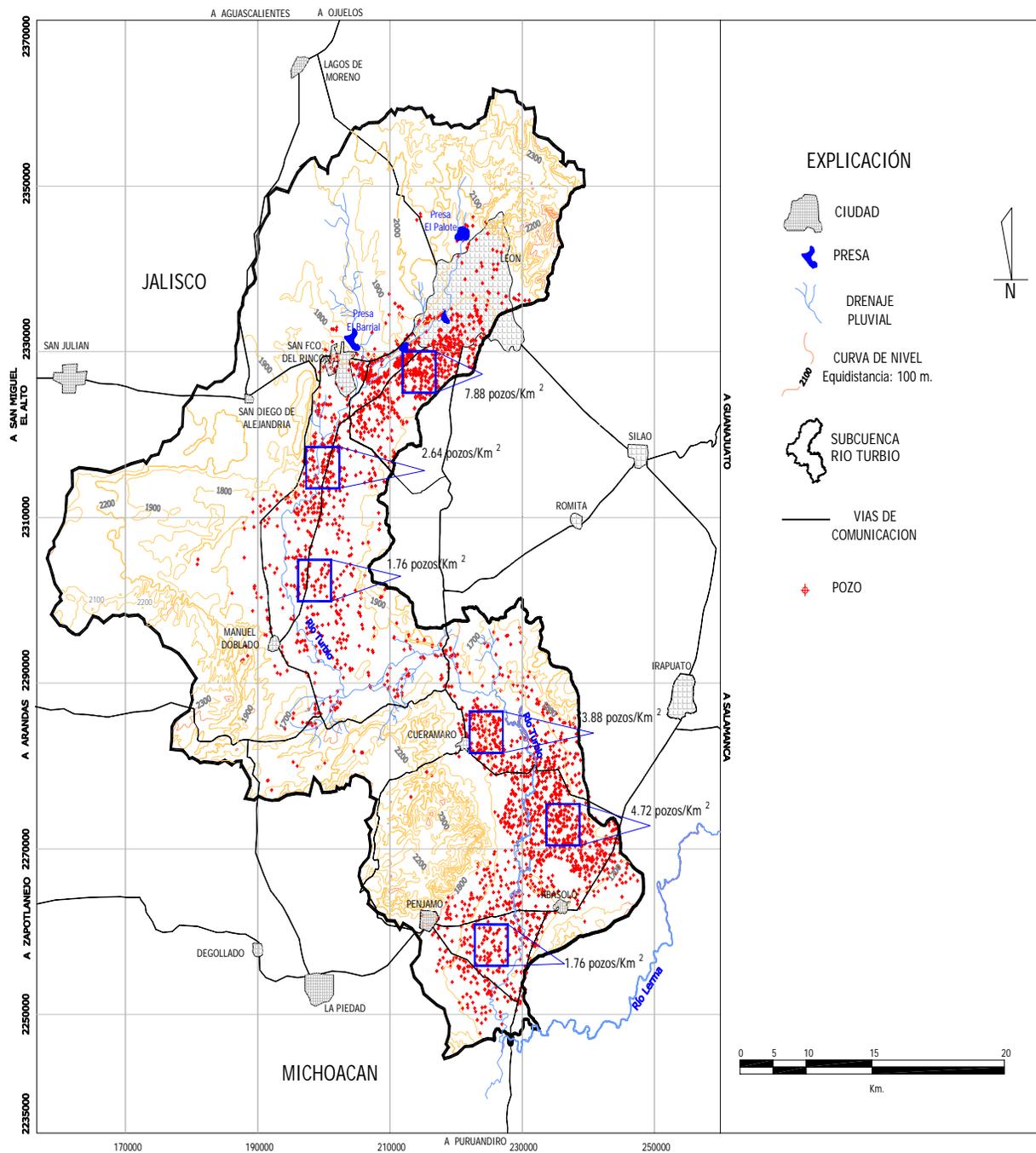
Respecto a la profundidad de los niveles estáticos, para 1997 al norte de la zona particularmente en el poblado Cuerámara y al sur del mismo fluctuaban entre 50 y 70 m, llegando a alcanzar los 90 m al norte de Abasolo. Al sur y poniente del valle los niveles

alcanzaban profundidades entre 50 y 60 m y éstos, a su vez, aumentaban hacia la parte noroeste, en los alrededores de Pénjamo, llegando a alcanzar hasta los 125 m.

El abatimiento promedio anual para esta zona era de 3 m/año (*Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 1998*) con valores máximos de 4 m/año, al suroeste de Pénjamo, y mínimos de 0.5 m/año, en la parte central del valle sobre las márgenes del Río Turbio; los valores mínimos pudieran estar relacionados con una fuerte interacción río-acuífero, donde el primero cede agua al segundo (principalmente en época de lluvias), además de que parte de la Sierra de Pénjamo es una zona de recarga que puede estar ayudando a que se mantengan estos bajos niveles de abatimiento.

A nivel de subcuenca, para 1998 el abatimiento promedio anual era de 2.15 m/año, con valores máximos de hasta 4 m en el extremo sur del área y mínimos de 0.5 m al sur de la ciudad de León, así como al oriente de la comunidad Manuel Doblado. Las mayores profundidades de nivel estáticos fluctuaban entre 120 a 150 m al poniente del poblado La Muralla y en los alrededores de Pénjamo. Por el contrario, los niveles más someros se encontraban entre 10 y 30 m, en las cercanías a San Francisco del Rincón y en el pequeño valle que se forma entre las ciudades de Cuerámara y Manuel Doblado.

Al sumar los aprovechamientos de cada uno de los ó acuíferos resulta que existen un total de 5,405, de los cuales 5,104 son pozos, y de éstos 4,435 están activos y 669 inactivos. Según el censo proporcionado por CEAG para el desarrollo del presente estudio, son 2,945 los pozos que caen dentro de la subcuenca (Figura 3.6), dando como resultado (al considerar el área de 4,635 km²) una densidad general de 0.63 pozos/km².



Figuras 3.6 Ubicación de los pozos existentes en la zona (censo de CEAG) y densidad de los mismos por zonas.

Esta densidad de pozos, así como las mencionadas anteriormente, están determinadas de manera general y no son representativas del área, por lo que al tomarlas en cuenta se puede incurrir en errores, debido a lo anterior, en la Figura 3.6 se hace alusión a densidades de pozos confiables las cuales varían de 1.76 a 7.88 pozos/km².

Con el fin de conocer a fondo el comportamiento dinámico del acuífero, CEAG proporcionó el historial piezométrico de sus redes de monitoreos para los periodos de sequía 1999, 2000, 2001, 2002 y 2003, con los datos históricos se generaron configuraciones para los periodos 1999 y 2002 (Figuras 3.7 y 3.8).

Para 1999 las condiciones de los niveles estáticos eran muy similares que en el año anterior, las mayores profundidades se registraban en las inmediaciones de Pénjamo con valores de hasta 125 m, al igual que para la parte centro oriental del área, con profundidades que varían entre 135 y 145 m. Es precisamente en las zonas anteriores, curvas en rojo en la Figura 3.6, donde se desarrollan los conos de abatimiento más profundos, los cuales casualmente no están relacionados con altas densidades de pozos, ya que el promedio de la misma es de 0.53 pozo/km², tampoco se les puede relacionar con fuertes gastos, ya que al menos dentro de la subcuenca en estudio son muy variables (de 4 a 35 l/s), lo más probable es que en esas zonas tanto el coeficiente de almacenamiento como los valores de conductividad y transmisividad sean muy bajos; lo anterior se aborda más adelante dentro del apartado correspondiente a Parámetros Hidráulicos.

Las zonas con mayor recuperación para dicho periodo se localizaban al norte y sur de la comunidad de Cuerámara, donde se observaban dos domos de recuperación sobre las márgenes del Río Turbio, con niveles estáticos de entre 20 y 30 m (líneas en azul en la Figura 3.7). Esta zona en particular se presentaba como una de las menos afectadas por la extracción de agua subterránea.

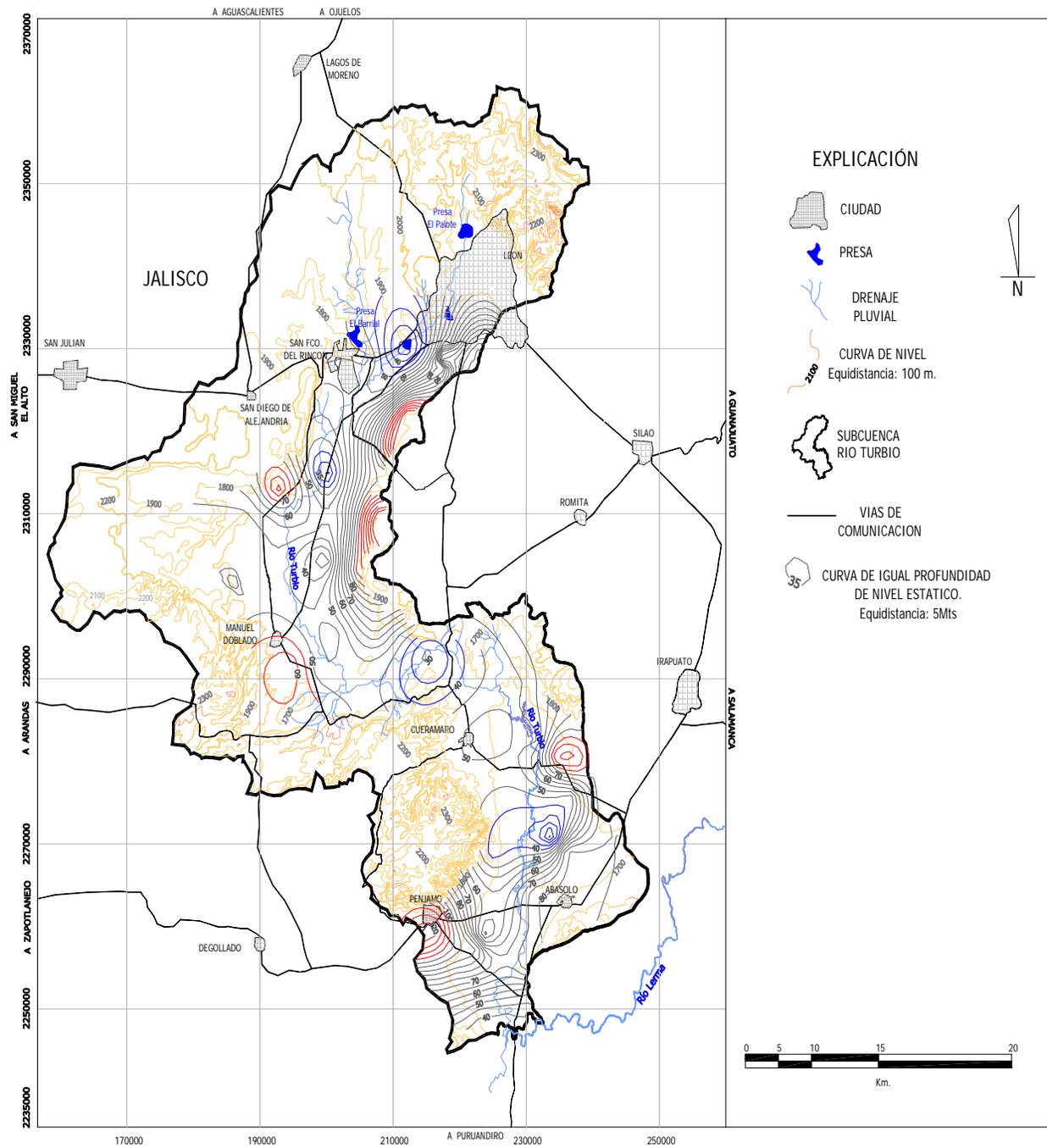


Figura 3.7 Configuración de la profundidad del nivel estático para 1999.

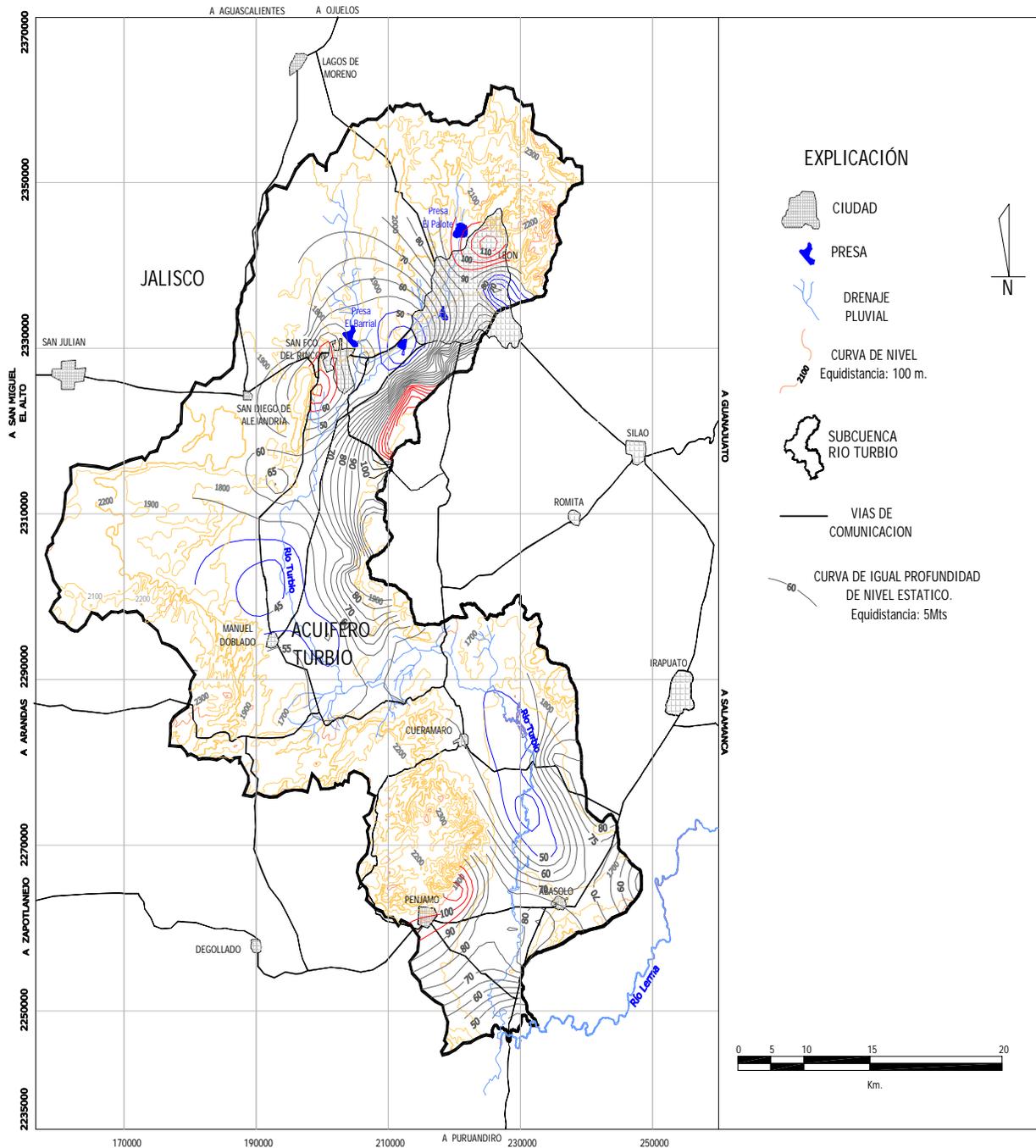


Figura 3.8 Configuración de la profundidad del nivel estático para el año 2002.

En tan solo 3 años (1999-2002) las condiciones piezométricas de la zona cambiaron significativamente. Para el año 2002 (Figura 3.8) se formó un nuevo cono de abatimiento en los alrededores de San Francisco del Rincón con profundidades que variaban entre 60 y 65 m; de manera semejante, el cono que ya existía en el norte de la Ciudad de León se profundizó más, alcanzando niveles de hasta 110 m.

Lo anterior indica que, al no cambiar las condiciones de extracción y recarga, a futuro se formaría un solo cono con dimensiones mucho mayores.

En ese mismo lapso de tiempo el domo que existía en 1999 al noroeste de Cuerámara desapareció, para formar en el 2002 una zona de equilibrio. Al sur de Manuel Doblado se formó un nuevo cono con niveles piezométricos entre 55 y 60 m, al norte de la misma comunidad, tres años atrás, existía la evidencia de la nueva formación de un cono mismo que, para el 2002, ya se había desarrollado completamente con niveles hasta de 80 m de profundidad.

La piezometría del 2002 también muestra que no todo tiende a ser negativo en lo que respecta a las condiciones piezométricas de la zona, el domo localizado al oriente y sureste de Cuerámara incrementó sus dimensiones con respecto a 1999, aunque descendió un poco su nivel; lo anterior a pesar de la tendencia general de la zona a abatirse. De 1948 a 1969 el abatimiento fue de 7 m (Geopsa, *op. cit.*).

Los conos más profundos en 1999, en los alrededores de Pénjamo y sureste de San Francisco del Rincón, recuperaron su nivel en un promedio de 7 a 10, m lo cual sólo significa que la situación mejoró un poco; sin embargo la sobreexplotación continúa. Al oriente de la ciudad de San Francisco del Rincón continúa existiendo el domo que se definía a fines de la década de los noventa, lo anterior puede ser efecto de una fuerte recarga proveniente de la parte norte de la misma ciudad. Este punto se retoma en el apartado de zonas de recarga y descarga que se aborda más adelante.

La Ciudad de León es el mayor centro industrial y comercial de la zona de estudio, por lo que es conveniente mencionar que para el año 2002 existían dos domos de recuperación (Figura 3.8), al oriente y al suroeste de ésta ciudad (los niveles de este último son muy someros y posiblemente estén alimentados por la recarga vertical por

retorno de riego), dichos domos son efecto de la rápida recarga natural que prevalece en la zona. Sin embargo, el historial piezométrico de esta área nos dice que las expectativas para esta zona no son alentadoras, en 1948 los niveles fluctuaban entre 3 y 22 m, para 1999 éstos ya se encontraban entre 40 y 90 m. (Guysa, *op. cit.*), ya para el segundo año del siglo XXI se encontraban entre 50 y 100 m, lo cual no deja buenas expectativas para años venideros. Los niveles actuales nos muestran que la tendencia no se ha revertido y éstos siguen descendiendo.

3.2.3. Niveles piezométricos recientes

Para el análisis y configuración de la piezometría actual se utilizaron los datos de los pozos sondeados por el SGM para el periodo secas 2004 correspondientes a las tres redes de monitoreo ubicados dentro de la subcuenca y los que se localizan fuera de la misma a una distancia aproximada de 7 km, además de los proporcionados por CEAG correspondientes a piezómetros sondeados por diversos organismos operadores (Figura 3.9).

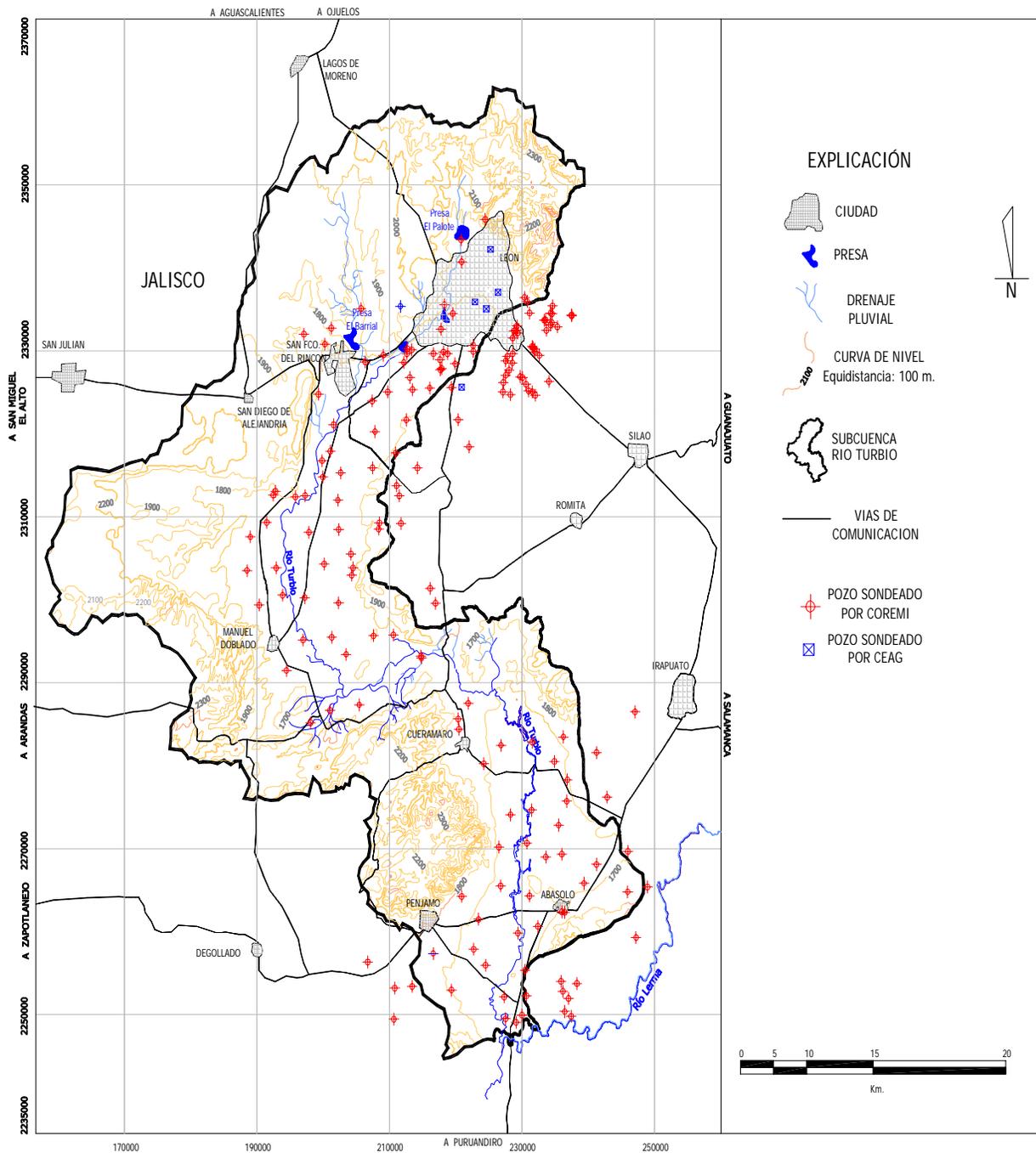


Figura 3.9 Pozos de las redes de monitoreo de CEAG sondeados durante el período de secas 2004.

Antes de generar las configuraciones que representen el estado actual de los niveles piezométricos de la zona (figuras 3.10 y 3.11), se analizó la continuidad en los niveles estáticos de los pozos con el objeto de no tomar en cuenta las medidas que excedieran 5 m de un año con respecto a otro, particularmente entre 2003 y 2004. Desde un punto de vista práctico, una recuperación o abatimiento anual mayor a 5 m se considera anómalo.

En la zona de estudio hay dos tendencias características respecto al comportamiento de los niveles estáticos, en una los niveles fluctúan entre 5 y 30 m, mientras que la otra tiene niveles de entre 45 y 150 m. También se presentan algunos niveles entre 30 y 45 m, pero son locales y difícilmente logran establecer una tendencia clara.

Se reitera que con el objeto de elaborar configuraciones de profundidad y elevación que representen la situación que prevalece en la zona, no se tomaron en cuenta los niveles inferiores a 30 m, ya que estos pudiesen generar errores y representar niveles someros cuando en realidad el potencial del acuífero es más profundo.

El análisis de la piezometría actual permite proponer que el sistema acuífero en estudio tiene una dinámica ágil, similar a la evidenciada por la piezometría y la isotopía para la Subcuenca del Río Guanajuato (*COREMI, 2004*); en la parte sur de la zona, alrededores de Pénjamo, los niveles actuales se mantienen similares a los que prevalecían en el año 1999, sin embargo, en el año 2002 éstos se habían recuperado 15 m para abatirse la misma cantidad de metros en los dos últimos años.

Comportamiento similar al anterior se registra al norte de Abasolo, sobre la confluencia del Río Turbio, específicamente donde éste se alinea en dirección norte-sur, los niveles actuales se comportan de igual manera que los de 1999, sólo que en el 2002 éstos habían descendido un promedio de 15 m, los cuales se recuperaron de manera sorprendente en los últimos 2.5 años para igualar a las condiciones de hace 5 años.

Los casos anteriores muestran variaciones piezométricas heterogéneas en la parte sur del área de estudio, éstas se consideran producto de las altas velocidades de infiltración en la parte sur de la Sierra de Pénjamo, originadas por el intenso fracturamiento de riolitas y tobas riolíticas terciarias y por la influencia de la recarga producida por el retorno de riego agrícola en la parte norte de Abasolo.

La parte central de la subcuenca mantiene condiciones piezométricas favorables, dos domos de recuperación, al norte de Cuerámara y de Manuel Doblado, hacen que esta parte del acuífero no sea considerada sobreexplotada.

En esta misma zona también prevalece una piezometría con características dinámicas fuertes, lo más significativo es un domo localizado al norte de Cuerámara, el cual no existía en el año 2002, ya que esa zona se encontraba en equilibrio, a diferencia de 1999 que se manifestaba un domo con características similares a las actuales. Nótese que se presenta la misma situación que en la parte sur del área. El domo localizado al norte de Manuel Doblado ya existía en el 2002 y para 1999 apenas se mostraban indicios de su formación, este domo pudiese estar alimentado principalmente por medio de un sistema de recarga horizontal proveniente de la parte centro occidental del área y en una menor proporción por recarga proveniente del retorno de riego.

La parte norte del área de estudio es sin duda la más afectada. Al sureste de San Francisco del Rincón se manifiesta un gran cono de abatimiento con profundidades de hasta 155 m (líneas rojas en la Figura 3.10). Este cono ya se manifestaba al menos desde 1999 y en tan solo 5 años su abatimiento ha sido de 25 m, sin ninguna recuperación momentánea que se pudiese considerar importante. El origen de éste puede estar relacionado con la batería de pozos de SAPAL localizada en La Muralla y alrededores, que ha operado en la zona en por lo menos los últimos 20 años.

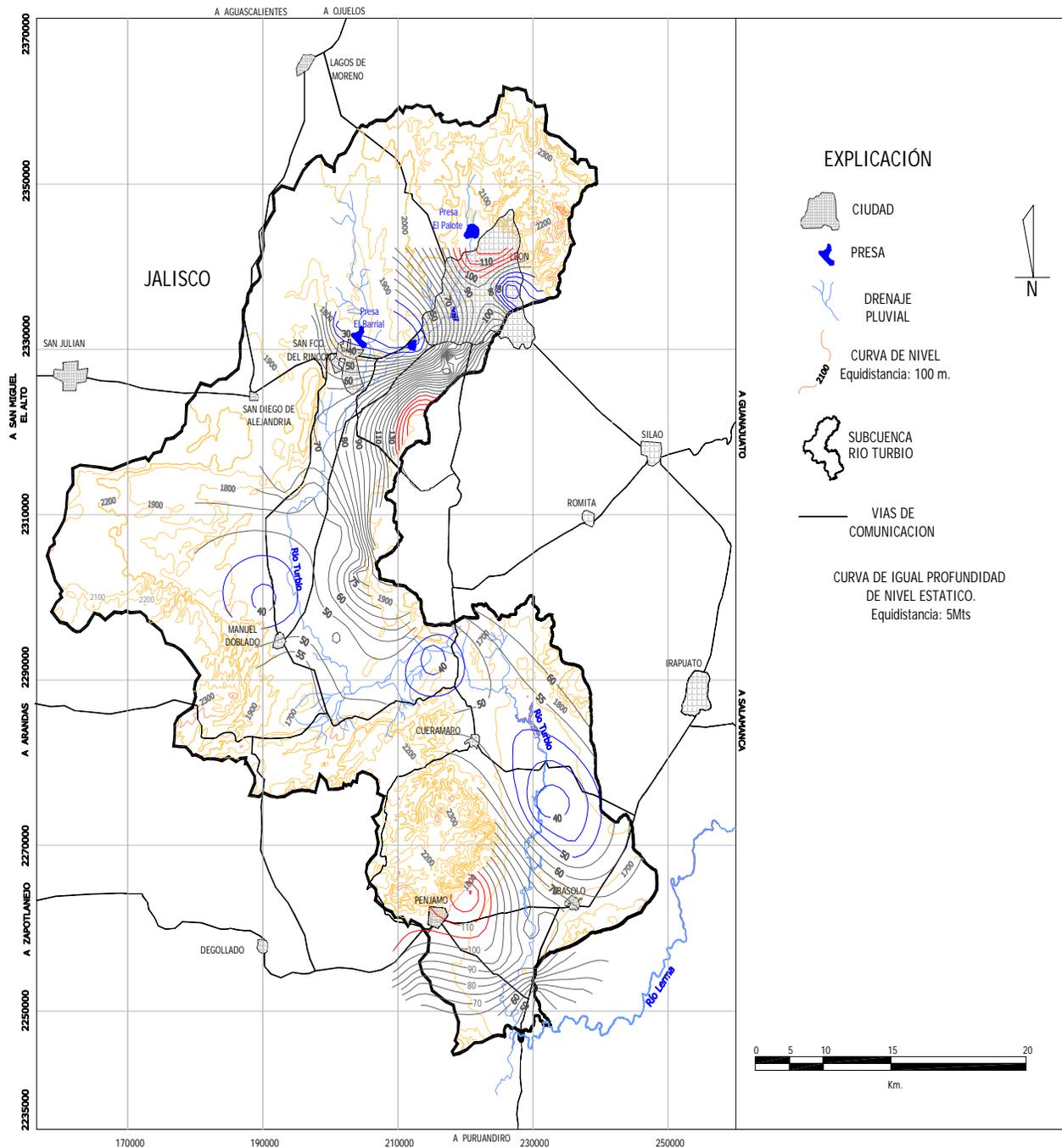


Figura 3.10 Configuración de la profundidad del nivel estático para el año 2004.

Los pozos de alto rendimiento localizados en La Muralla proveen a León un gasto de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$; a pesar de que es una zona de recarga natural, ésta se ve sobrepasada considerablemente por los niveles de extracción. Durazo (2001) estimó que: “...*el ritmo de extracción provocará que para el año 2009 los niveles se abatan por completo...*”, para este mismo año la concentración promedio de cloruros del agua subterránea será igual a la que se tiene en la precipitación, por lo que la infiltración directa será la única fuente de agua para el acuífero en la zona.

El cono de abatimiento de La Muralla no sólo afecta a la zona, al observar las direcciones de flujo subterráneo, descritas más adelante, es interesante notar que al menos la parte norte del valle del Río Turbio está cediendo agua subterránea a ese sistema de pozos desde 1999; lamentablemente para la realización de este estudio no se contó con datos piezométricos más antiguos, no pudiendo determinar desde cuando prevalece esta situación.

Al sur de San Francisco del Rincón, sobre las márgenes del Río Turbio, se hace evidente. Las equipotenciales muestran como en 1999 la profundidad del agua subterránea oscilaba entre 55 y 60 m, para el 2002 ésta ya se encontraba a una profundidad entre 65 y 70 m y actualmente su nivel piezométrico fluctúa entre 75 y 80 m. Bajo condiciones normales ya se hubiese formado un cono de abatimiento, sin embargo éste no se ha generado debido a que el agua subterránea está viajando al oriente para alimentar el cono ubicado en la zona de La Muralla.

Son las comunidades rurales asentadas a los alrededores de la batería de pozos de SAPAL las más afectadas. Al ritmo de extracción actual los pozos del sistema abatirán sus niveles piezométricos al grado que deberán ser reubicados en otras zonas.

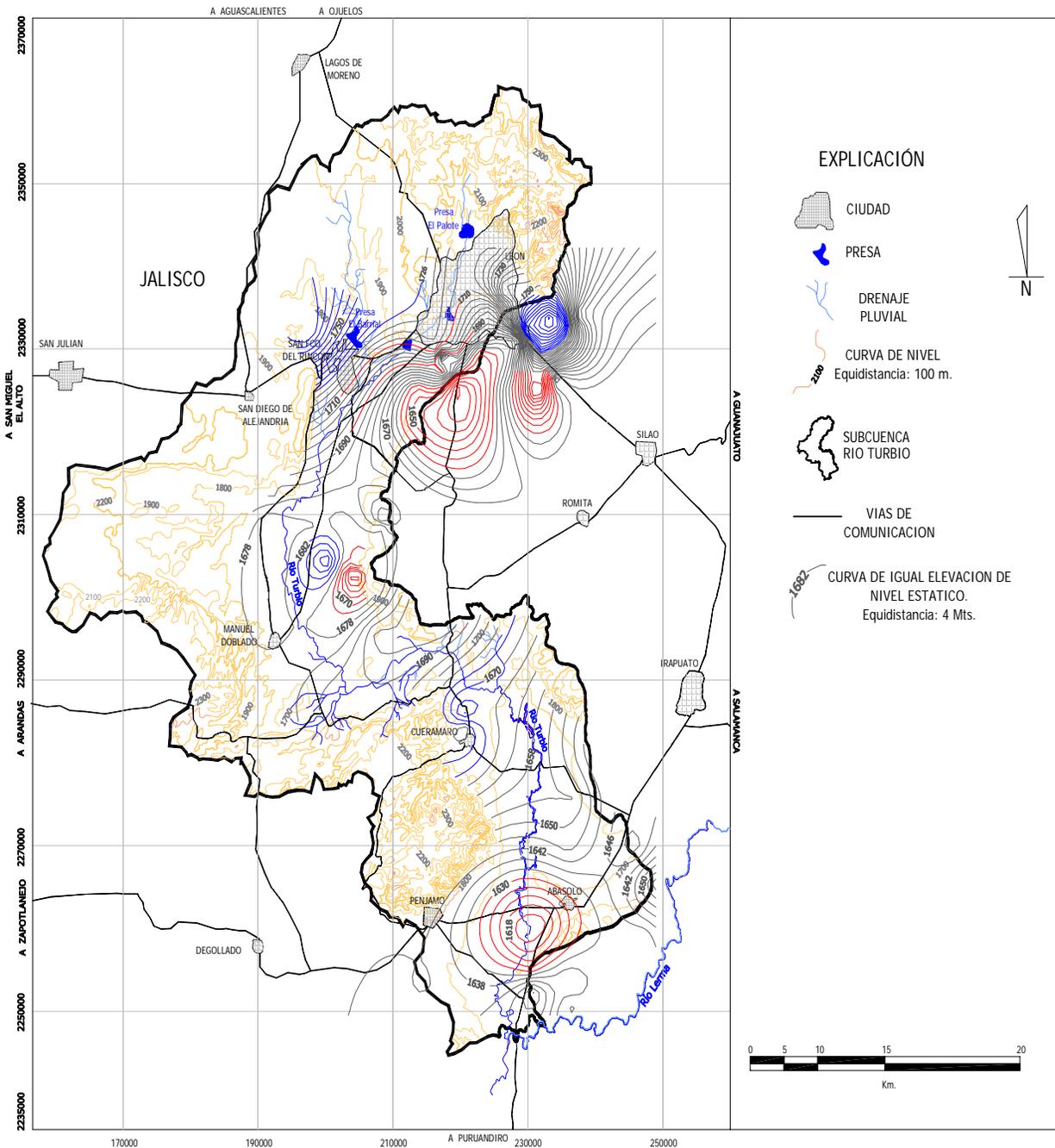


Figura 3.11 Configuración de elevación del nivel estático para el año 2004.

Al suroeste de León, en los alrededores de la Presa El Barrial se encuentra un domo que ya se evidenciaba en 1999 y que a la fecha ha crecido en dimensiones y su nivel piezométrico cada vez es más somero. Con la información analizada es difícil determinar el potencial real de este domo, es difícil ver si el comportamiento o tendencia de éste representa las condiciones de la parte profunda del acuífero, o si sólo se ha mantenido gracias a que se extrae poca agua de los niveles superiores del acuífero. Lo que se puede afirmar es que el domo se mantiene gracias a una fuerte recarga proveniente de la parte norte del área de estudio y a su vez por la originada por el retorno de riego agrícola.

Las condiciones piezométricas que imperan en los alrededores de la Ciudad de León son muy variables, mientras que al norte existe un cono con marcada tendencia al abatimiento continuo, al oriente se ha mantenido un domo estable al menos desde el año 2002. En cuanto la parte sur y sur-poniente, los niveles tienden a descender continuamente un promedio de 3 m/año y si bien, hasta el momento no han logrado formar un cono que se considere significativo, es probable que con el ritmo actual de extracciones los niveles se integrarán a los que prevalecen en la parte norte formándose un sólo cono de abatimiento con dimensiones y profundidades mayores.

Respecto a las elevaciones de los niveles estáticos, las menores se localizan al sur, específicamente en la parte central del valle que forman las comunidades de Pénjamo y Abasolo, con valores de 1,614 msnm y 1,642 msnm en la confluencia del valle con la Sierra de Pénjamo. En la parte central de la subcuenca los valores oscilan entre 1,690 msnm. al noreste de Cuerámara y 1,654 msnm al noroeste de Manuel Doblado, asimismo, en la parte norte se presentan valores de 1,726 msnm, mientras que los valores máximos ocurren al poniente de León con cotas de hasta 1,800 msnm.

3.2.1 Evolución piezométrica.

El ritmo al que se recupera o explota un acuífero está determinado por la evolución piezométrica del mismo con respecto al tiempo. Para el caso de la zona de estudio, la evolución se determinó para los periodos 1999-2004 y 2003-2004 (figuras 3.12 y 3.13). La falta de datos piezométricos históricos más relevantes hizo que no fuera posible analizar el comportamiento del acuífero en un lapso de tiempo mayor.

No existen datos puntuales de cuando inició la sobreexplotación del acuífero en el área de estudio (Geopsa, en 1998), reporta evoluciones negativas de los niveles estáticos desde la década de los ochentas para el Valle del Río Turbio, con valores promedio de dos m/año. Ariel Construcciones, en 1982, reporta evoluciones del mismo carácter, con promedio de 2.35 m/año, para la misma zona en el período de 1979 a 1982.

Referente al Valle de León, Guysa en 1998 indicó evoluciones negativas la parte central del valle de hasta 1.5 m/año las cuales disminuían hacia las márgenes del mismo, asimismo, Guysa en 1999, reporta evoluciones de carácter negativo con un promedio de 2.7 m/año, además de que reporta la presencia evoluciones con carácter positivo representadas por domos de recuperación particularmente en el poblado El Camaleón, al sur de la Muralla de Cadillac, entre otros.

Respecto a la zona de Pénjamo-Abasolo, Lesser, en 1997, reporta evoluciones negativas de 2 m/año en la zona de laderas de montaña, 0.5 m/año en la confluencia del Río Turbio y de hasta 4 m/año al poniente de la ciudad de Pénjamo.

Es importante señalar que al igual que en el análisis piezométrico, al elaborar las configuraciones actuales de la evolución de niveles estáticos no se tomaron en cuenta valores que excedieran a cinco metros entre los años 2003 y 2004, ya que por su magnitud se considera que pudo haber anomalías en las mediciones de uno u otro año, de cualquier manera queda registrada la profundidad de las campañas utilizadas a fin de que puedan ser aprovechadas en campañas posteriores (Tabla 3.1).

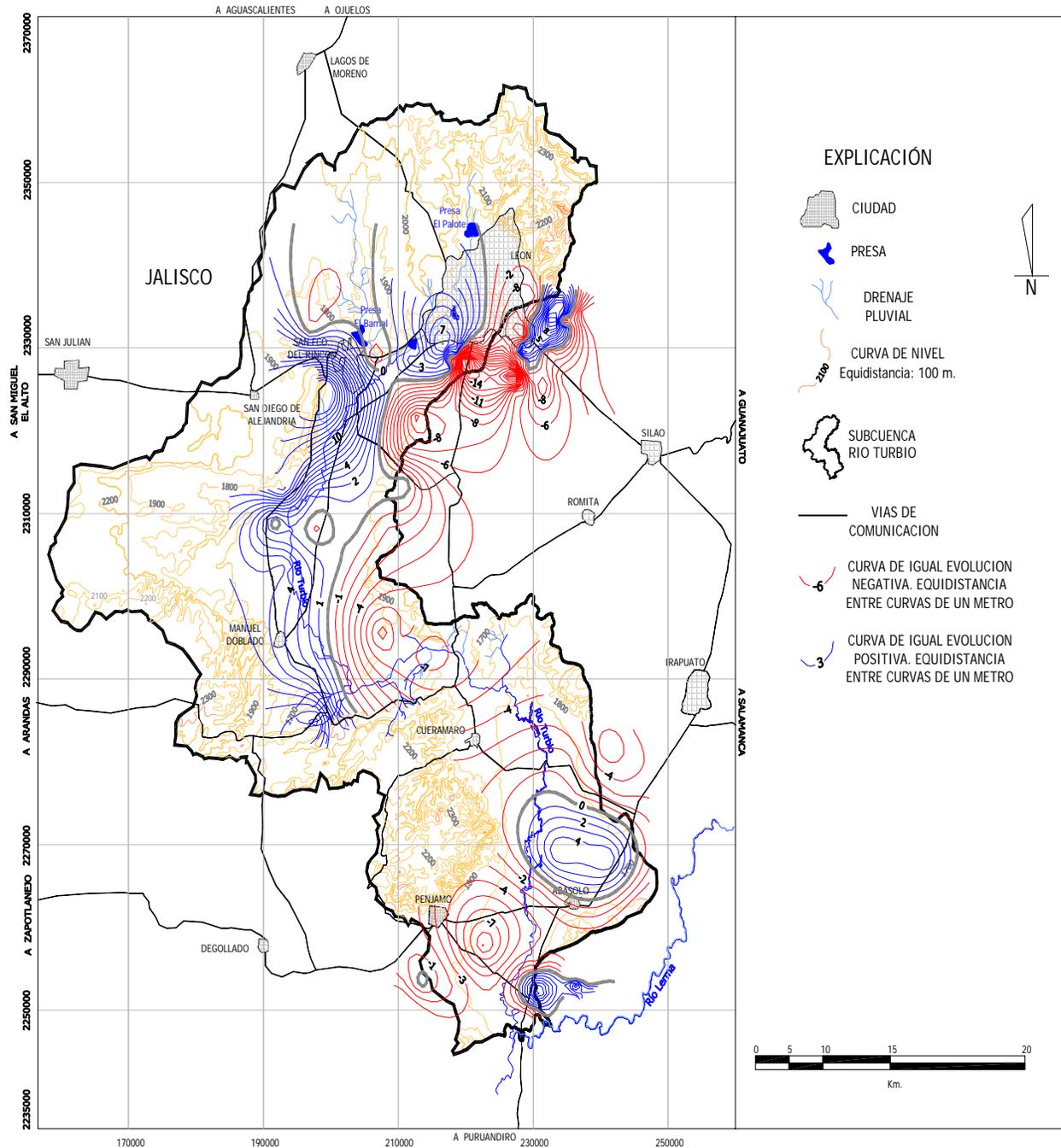


Figura 3.12 Evolución de niveles estáticos para el período 1999-2004

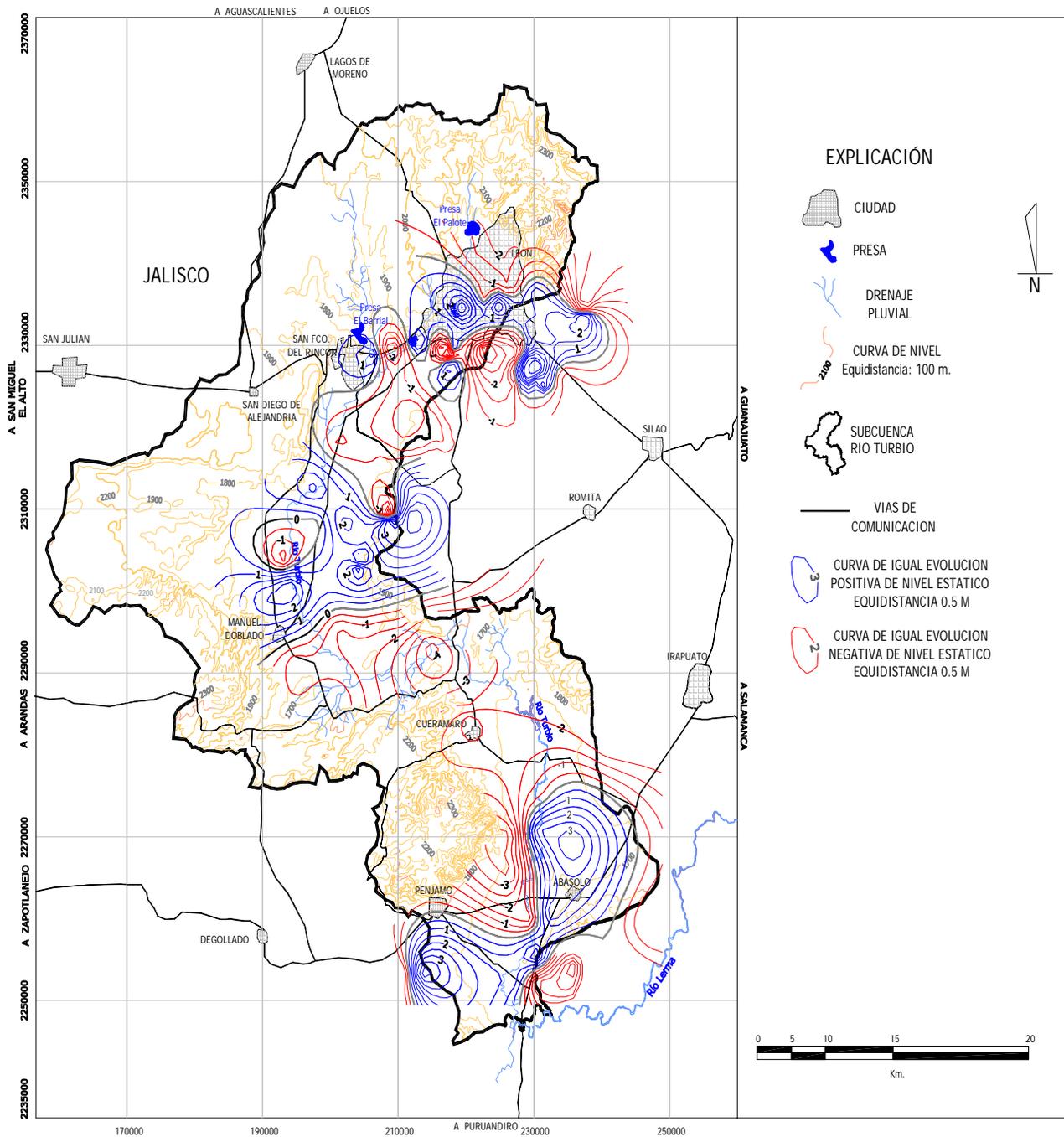


Figura 3.13 Evolución de la profundidad del nivel estático para el periodo 2003-2004

La evolución de niveles en el período 1999-2004 indica, de manera general, dos tendencias muy claras respecto al comportamiento de los niveles estáticos, una se comporta de manera positiva en la parte norte y poniente de la zona de estudio, representada por valores entre 18 y 7 m al suroeste de San Francisco del Rincón y de la Ciudad de León, asimismo, esta tendencia positiva continúa en dirección norte-sur sobre las márgenes y parte del valle de la zona poniente.

Al oriente de León y norte de Abasolo existen dos zonas cuyos niveles estáticos se han visto favorecidos en el transcurso de los últimos 5 años, ambas zonas con evoluciones positivas pueden estar relacionadas a sistemas de recarga natural provenientes de las sierras cercanas (al noreste de León y Cuerámara), las cuales tienen las condiciones hidrológicas necesarias para transportar hacia los valles el agua de lluvia que se infiltra sobre ellas.

La segunda tendencia sobre la evolución del sistema acuífero es negativa. La zona más afectada es el Valle de León, con descenso de niveles de hasta 20 m en sólo cinco años, la zona conocida como La Muralla también ha evolucionado de manera negativa alcanzando valores entre 8 y 10 m, asimismo, la parte centro oriental de la subcuenca con cifras negativas entre 1 y 7 m. En los alrededores de Cuerámara y Pénjamo se han alcanzado valores máximos de descenso de 4 y 9 m, respectivamente. La situación anterior es preocupante, ya que en gran parte del área donde se manifiesta dicha tendencia está directamente relacionada con los centros de mayor población y por ende de mayor actividad económica.

Nuevamente las condiciones piezométricas reflejan la dinámica bastante ágil del acuífero, las tendencias tan claras que se observan al analizar la evolución para el periodo 1999-2004 ya no prevalecen de una manera tan consistente en el periodo 2003-2004, para este último lapso de tiempo se observa como parte del acuífero tiene la capacidad de evolucionar ya sea positiva o negativamente, hasta 4 m en tan sólo un año.

Las zonas más afectadas se ubican al sur de León, noreste de Cuerámara y Pénjamo con evoluciones negativas de hasta 4 m/año. Con cifras negativas pero de un orden menor están las zonas ubicadas al sureste de Manuel Doblado, Cuerámara y San Francisco del Rincón, así como el norte de León, con valores que fluctúan entre 0.5 y 2 m/año.

Destaca el área que comprende desde Manuel Doblado hasta el sur de Cuerámara, en esta zona las configuraciones actuales tanto de profundidad como de elevación de niveles estáticos muestran como una parte del acuífero prevalece en equilibrio, e inclusive se observa la presencia de domos de recuperación. Al observar la configuración de evoluciones para el periodo 2003-2004 se nota como la misma zona ha evolucionado de forma negativa, por lo que de continuar esa tendencia seguramente desaparecerán tanto las áreas en equilibrio como los domos que se observan actualmente. Una situación similar ocurre al oriente y sur de San Francisco del Rincón, las mismas configuraciones actuales de niveles estáticos muestran a la zona aparentemente no sobreexplotada e inclusive con tendencia a la recuperación.

Las zonas que muestran evolución de carácter positivo se ubican al sur de Pénjamo, norte de Abasolo, la parte central de la subcuenca, además de una zona orientada E-W y que pasa prácticamente por el centro de la Ciudad de León. No cabe duda que estas evoluciones positivas son el reflejo de varios sistemas de recarga natural que se han visto favorecidos por las copiosas y extraordinarias lluvias ocurridas en los dos últimos años. Si bien la parte oriente del valle de León se ha visto beneficiada con la recuperación de sus niveles estáticos, esto no significa que el acuífero deja de estar sobreexplotado, ya que la tendencia general de los niveles es a evolucionar de una forma negativa.

De manera general, las principales actividades económicas de la zona de estudio son la industria y la agricultura, que requieren de un abastecimiento continuo de agua subterránea que al no ser controlado propicia la contaminación y el agotamiento de los acuíferos.

3.3. Modelo Hidrogeológico Conceptual

Para poder entender las definiciones descritas es necesario conceptualizar el escenario del flujo del agua subterránea. En este trabajo se toma como base a un diagrama esquemático propuesto por Tóth, (2000), en donde se incluyen estos conceptos. (Figura 3.14).

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

3.3.1. Mecanismos de flujo del agua subterránea.

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

3.3.2. Flujo de agua subterránea.

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

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

En una cuenca, el flujo subterráneo es controlado por la topografía y la geología. Esto proporciona la distribución espacial de patrones de aguas subterráneas y sus efectos pueden ser identificados y posteriormente caracterizar segmentos del flujo subterráneo, es decir, se puede relacionar la causa (flujo subterráneo) con el efecto, así como el conjunto con las condiciones y fenómenos naturales que se producen.

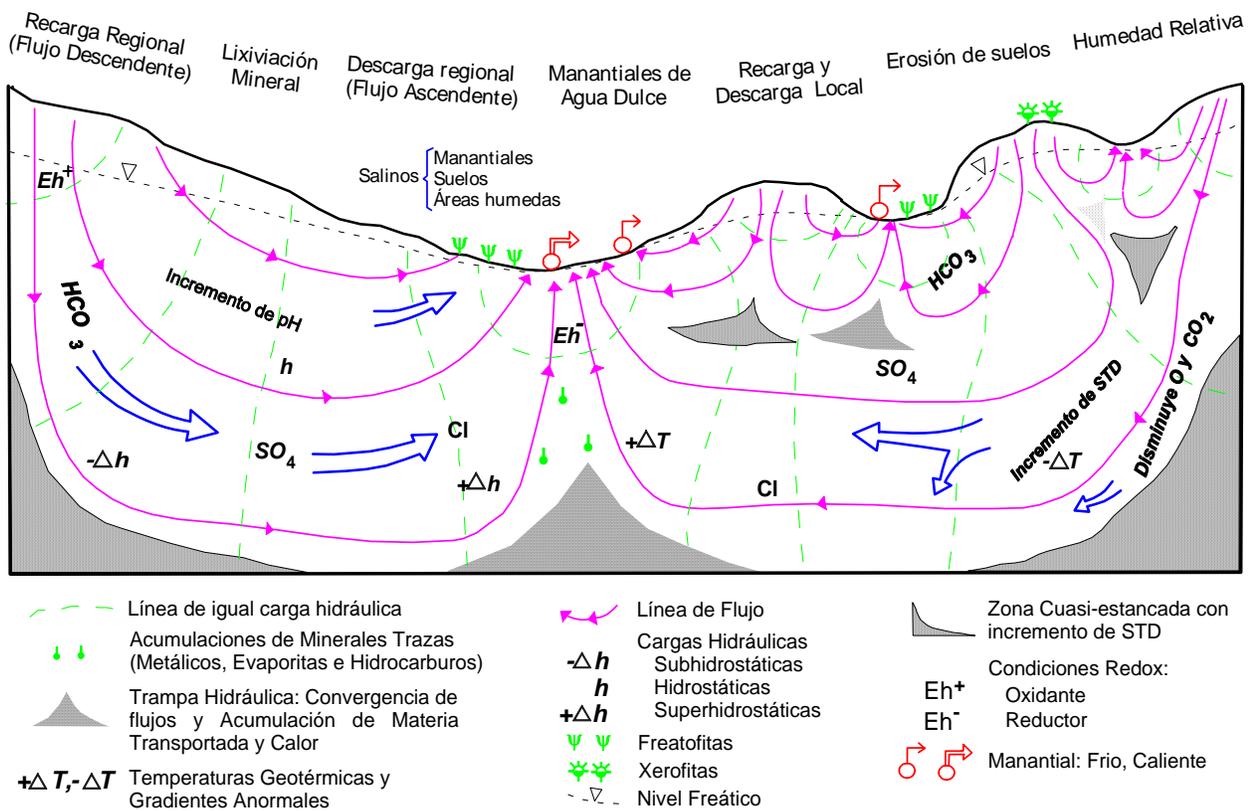


Figura 3.14. Diagrama conceptual de una cuenca, se aprecian los flujos regionales intermedios y locales, así mismo se aprecia la relación de efectos y manifestaciones debido al flujo del agua subterránea manejado por gravedad, (Tóth 2000).

3.3.2.1 Tipos de flujo y escenario hidrológico.

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

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

3.3.2.2 Sistemas de flujo

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

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

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

En la mayoría de las redes de flujo y áreas de campo se pueden diferenciar tres tipos básicos de sistemas de flujo de agua subterránea: locales, intermedios y regionales (Tóth, 1963) (Figura 3.15).

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

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

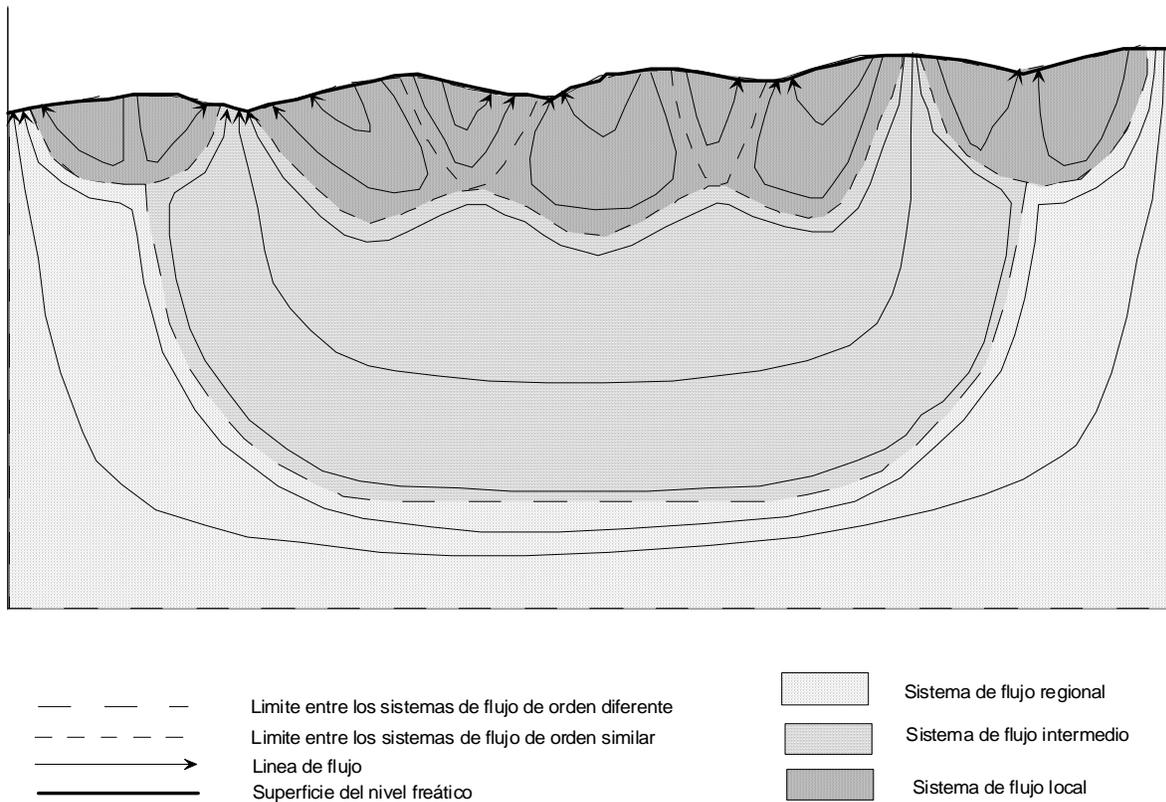


Figura 3.15. Modelo conceptual de régimen de agua subterránea, (Tomado de Tóth, 1970)

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

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

3.3.2.3. Rasgos Indicadores de sistemas de flujo.

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

Características de las áreas de recarga.

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

Características de las áreas de descarga

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

- Temperatura relativamente altas
- Presencia de manantiales
- Galerías filtrantes (lloraderos)
- Pozos brotantes

La Figura 3.14 muestra un diagrama esquemático de la distribución del flujo subterráneo y de los fenómenos asociados en una sección a escala regional y suponiendo condiciones de flujo gravitacional. En la parte izquierda se presenta una cuenca ideal y muy simplificada, con un sistema único de flujo, sin la presencia de flujos locales. En la parte derecha, aparece, en cambio, una jerarquía marcada de flujos a diferentes escalas: local, intermedia y regional. Cada uno de estos sistemas de flujo tiene sus áreas de recarga, de circulación y descarga (*Tóth, 2000*).

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

3.4. Funcionamiento hidráulico del acuífero

3.4.1. Zonas de recarga y descarga

De manera general, un acuífero es una unidad geológica capaz de almacenar agua suficiente para ser extraída y aprovechada por el ser humano. La fuente de alimentación de dicho acuífero tiene dos componentes principales: horizontal y vertical (mismos que pueden ser de carácter natural o inducidos)

En la zona de estudio la componente vertical ingresa al sistema de varias formas:

1) Producto de la lluvia precipitada en la subcuenca y que se infiltra hasta alcanzar las zonas saturadas en los valles a consecuencia del escurrimiento en las serranías; su velocidad y tiempo de tránsito están directamente relacionados con la litología y con la profundidad del nivel estático.

2) Volúmenes menores por infiltración que ocurre en los ríos y arroyos en época de lluvias, además de varias presas (El Barrial y El Palote, entre otras) y pequeños vasos de almacenamiento.

3) Infiltración (inducida) por medio de la red hidroagrícola, ya que la mayoría de sus canales carecen de revestimiento, y por retorno de riego producto de la actividad agrícola. La cantidad de agua aportada al acuífero por este último sistema es importante, ya que está directamente relacionado con el transporte de contaminantes, principalmente a la parte somera del acuífero.

En cuanto al componente horizontal, se genera a partir del agua de lluvia que precipita en las partes topográficamente altas de la subcuenca, siempre y cuando las rocas tengan permeabilidad por fracturamiento que permite el flujo. Este flujo horizontal se identifica al analizar las equipotenciales resultantes de la elevación del nivel estático.

En la zona en estudio se identifican 3 zonas principales de recarga natural, la primera se localiza en la porción norte y noroeste de la subcuenca, particularmente al noreste de la Sierra de León y al norte y noroeste de San Francisco del Rincón, en la zona conocida como Altos de Jalisco, ocurre a través de areniscas, conglomerados y riolitas del Terciario (Figura 3.16). La segunda y más importante zona de recarga se

localiza al poniente del área de estudio, entre las comunidades Manuel Doblado y San Diego de Alejandría, la configuración actual de la elevación de niveles estáticos no permiten ver de manera clara esta zona de recarga, sin embargo, son varios los estudios que la refieren (*Geopsa, op. cit.; Ramos, 2003, entre otros*). Actualmente, en esta zona se observa un pequeño domo de recuperación y probablemente esté relacionado con esta fuente de recarga, la cual ocurre por medio de andesitas y basaltos terciarios, además de tobas riolíticas de la misma edad.

La tercer zona de recarga natural se ubica al sur del área de estudio en las inmediaciones de la ciudad de Pénjamo, en el lugar afloran tobas riolíticas terciarias, por donde se infiltra el agua que alimenta a esta parte del acuífero. Cabe mencionar que este fenómeno sólo se presenta en la parte sur de la Sierra de Pénjamo, ya que el resto de la misma se compone por Andesitas y Basaltos del Terciario, donde la configuración de las curvas equipotenciales sugiere permeabilidad baja.

De manera general, la zona de estudio tiene varias y muy importantes zonas de recarga natural, las copiosas lluvias que se han presentando en los últimos años sin duda alguna se han visto reflejadas en la mayoría de las márgenes de las sierras, así como en los pies de montes, ya que es en estos lugares donde la recarga se refleja de una manera más rápida. Contrario a lo anterior, en gran parte de los valles es menor la influencia de este sistema de recarga, ya que ésta se ve superada en gran medida por los volúmenes de extracción.

Así como el acuífero tiende a ser alimentado por un sistema de recargas ya sea natural o inducido, es de la misma forma como éste descarga sus aguas. Un sistema ideal sería que las extracciones fuesen de un orden similar a las recargas.

A finales de la década de los sesentas el acuífero descargaba sus aguas de forma natural, el sistema de descarga tendía a comportarse de forma similar a la topografía y con orientación paralela al Río Turbio, hasta descargar en su confluencia con el Río Lerma. En la década de los setentas las salidas naturales disminuyeron por la extracción de agua subterránea que comenzó a superar a la recarga.

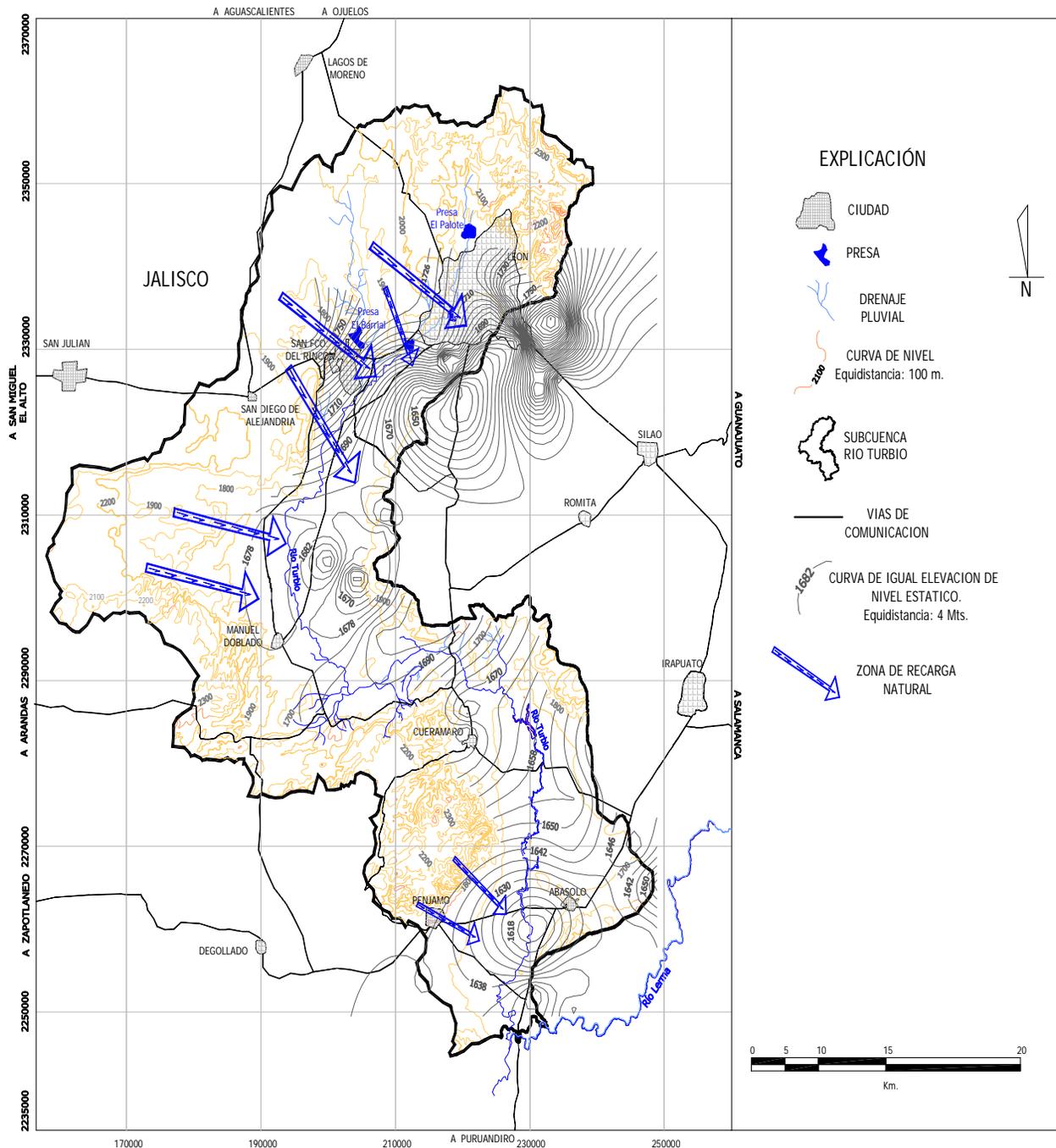


Figura 3.16 Delimitación de las principales zonas de recarga natural.

Dirección de flujo subterráneo.

En condiciones iniciales, el flujo subterráneo en el acuífero estaba directamente relacionado con las zonas de descarga natural, éste se desplazaba horizontalmente a través de los depósitos granular y fracturado con una dirección preferente norte-sur siguiendo la traza del Río Turbio hasta su confluencia con el Río Lerma.

Al analizar la topografía se pueden definir antiguos sistemas de flujo subterráneo, además de sistemas actuales donde no se han generado conos de abatimiento, puesto que en condiciones normales el nivel estático tiende a comportarse de forma similar a la topografía. Si se parte de la consideración anterior, en la zona de estudio el agua se mueve de las zonas con mayor carga hidráulica a las de menor carga, el desnivel medio del terreno es de 750 m, generado por elevaciones promedio de 2,500 msnm en la Sierras de León y Pénjamo y de 1,750 msnm en los valles, por lo que se origina un escurrimiento superficial de las sierras hacia los valles y éste viaja a través del Río Turbio hasta el Río Lerma. Contrariamente, en las zonas de valles las direcciones de flujo subterráneo ya no están influidas por condiciones y desniveles topográficos, sino que se invirtieron debido al abatimiento de niveles piezométricos.

Las elevaciones del nivel estático para el período secas 2004 ponen en evidencia como dichas direcciones se han invertido en la mayor parte de los valles de la zona excepto al norte y oriente de Cuerámara y en las inmediaciones de San Francisco del Rincón, ambas zonas, tal como se explica en el apartado de zonas de recarga y descarga, constituyen una de las entradas mas importantes de agua al acuífero (Figura 3.17).

El análisis de las direcciones de flujo permite asegurar que si bien existen algunas barreras naturales de flujo, también existe continuidad hidráulica al menos entre las Subcuencas del los Ríos Turbio y Guanajuato, particularmente en la zona conocida como La Muralla, donde gran parte del agua subterránea de los valles ubicados al sureste de San Francisco del Rincón y suroeste de León es atraída a por el cono de abatimiento.

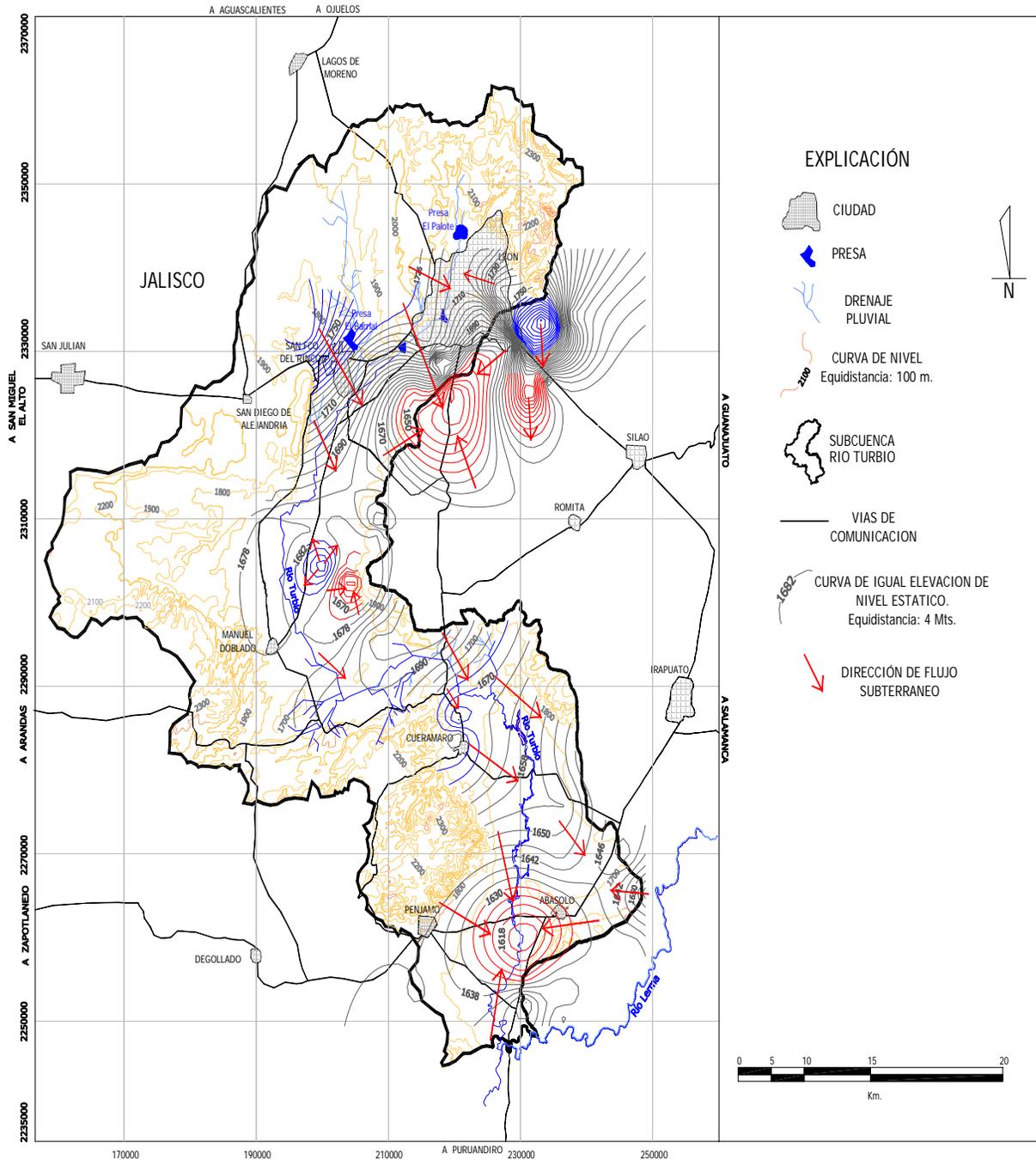


Figura 3.17 Direcciones de flujo subterráneo.

La disposición espacial de los depósitos aluviales así como la alteración, fracturamiento y fallamiento de las unidades consolidadas controlan los regímenes de flujo subterráneo, para el caso de la Subcuenca del Río Turbio se observan tres sistemas de flujo (Figura 3.18).

-Flujo Local, es generado por agua meteórica de reciente infiltración, la cual viaja en forma vertical y se ve reflejada en una recarga prácticamente instantánea de los acuíferos someros. Este flujo representaba la descarga natural del sistema antes de que se generaran los conos de abatimiento.

-Flujo Intermedio, su origen está relacionado a las partes topográficamente altas en donde existan las condiciones apropiadas de permeabilidad para su infiltración, son las curvas equipotenciales de la elevación de niveles estáticos las que ponen en evidencia este sistema de flujo. La infiltración que no es interrumpida por barreras naturales y que viaja hacia el acuífero profundo lo hace a través de un sistema de este orden. Es importante mencionar que este tipo de flujo sustenta la mayor parte del volumen de agua que se extrae del acuífero.

-Flujo Regional, Dadas las condiciones geológicas y estructurales de la zona, además de algunas manifestaciones hidráulicas superficiales como el termalismo, evidenciado éste por la temperatura del agua en algunos pozos y manantiales, se propone la presencia de este tipo de flujo, cuyo medio de circulación posiblemente se relaciona con rocas fracturadas que tienen profundidades entre 800 y 1,000 m. Otra evidencia de este sistema de flujo se discute en un estudio isotópico elaborado por el Instituto de Geofísica (1999) en la zona La Muralla, donde se propone la existencia de una recarga horizontal alimentada por un flujo de carácter regional cuyo origen es externo a la subcuenca.

Es probable que las zonas de recarga ubicadas al poniente de la subcuenca y al noroeste de San Francisco del Rincón estén influenciadas por este tipo de flujo regional, lo anterior también se hace evidente al observar la distribución de familias de agua subterránea donde para ambas zonas se presenta una familia con características diferentes.

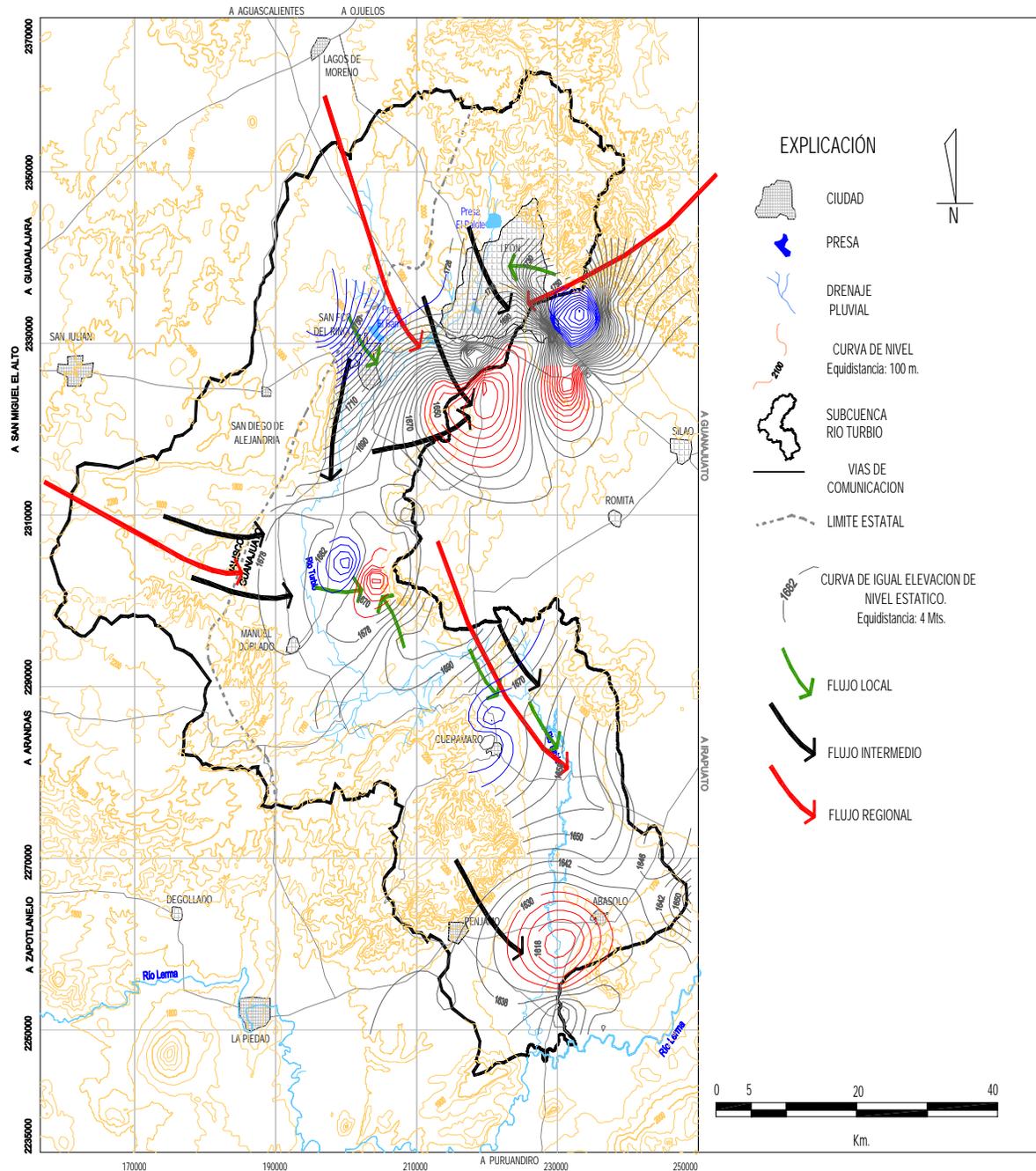


Figura 3.18 Sistemas de flujo subterráneo.

3.4.2. Parámetros Hidráulicos.

Para poder resolver problemas de Hidrología Subterránea en pequeña o gran escala, nos encontramos frecuentemente ante la situación de poder obtener valores confiables y representativos de las características hidráulicas de los acuíferos. Entre los principales métodos para determinar dichas características, está el análisis de los resultados de las pruebas de bombeo.

Aunque las pruebas de bombeo son un método práctico para calcular las propiedades hidráulicas del acuífero, no se puede confiar totalmente en la validez y exactitud de los resultados ya que son sólo representativos del área abarcada por el radio de influencia (efecto local) y por tanto están afectados por la escala de mediciones. Además, aunque muchas veces la interpretación puede ser muy sencilla, en otras ocasiones, la naturaleza y/o las obras de captación son tan complejas y heterogéneas que nos encontramos con resultados que pueden catalogarse como interpretables.

Antes de efectuar o interpretar una prueba de bombeo es importante contar con una recopilación de datos geológicos, para obtener conocimiento en aspectos tales como: Presencia de barreras o bordes impermeables, áreas de recarga, litología del material del acuífero, etc. Lo cual sirve para valorar previamente, entre que márgenes deberían variar los parámetros hidrogeológicos y hacer un análisis de los factores que pueden influir en los resultados de las pruebas de bombeo.

La información de parámetros hidráulicos del acuífero en estudio se obtuvo aprovechando la información generada por COREMI a partir de la ejecución de 7 pruebas de bombeo en pozos propuestos por CEAG (Tabla 3.2) y (Anexo 1), y de la reinterpretación de 21 de las 22 pruebas elaboradas por Geopsa (*op. cit.*), para el Valle del Río Turbio (Tabla 3.3). Así como de los valores obtenidos de 17 de las 53 pruebas de bombeo reportadas por Guysa (*op. cit.*), para las subcuencas Turbio y Guanajuato (Tabla 3.4), éstas últimas no se reinterpretaron ya que el informe de donde se tomaron sólo muestra los resultados y no así los datos de campo. La ubicación de todas las pruebas de bombeo tomadas en cuenta, se observa en la Figura 3.19.

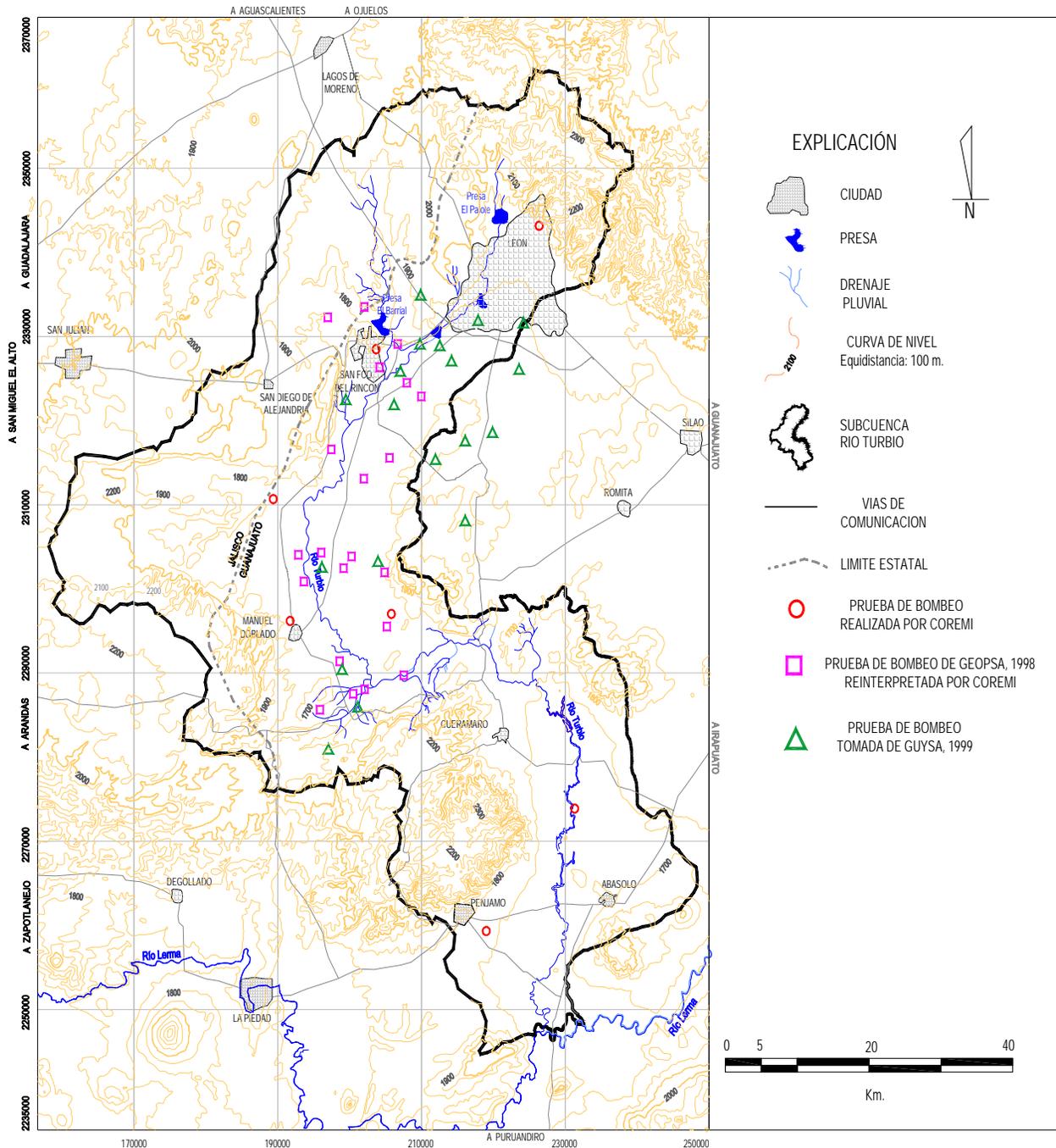


Figura 3.19 Localización de pruebas de bombeo.

Tabla 3.2 Datos obtenidos en las pruebas de bombeo propuestas por CEAG.

Clave de pozo	X	Y	Localidad	Propietario	Abatimiento		Recuperación		Coeficiente de Almacenamiento
					Transmisividad (m ² /d)	Conductividad (m/d)	Transmisividad (m ² /d)	Conductividad (m/d)	
Pozo Paraiso	203673	2328407	San Francisco del Rincón	SAPAF	285.12	1.14	285.12	1.140	0.726
GEO-363	189276	2310585	Guadalupe de Jalpa	Agua Potable de la Comunidad	7.86	0.04	7.87	0.031	0.0016 *
L-2273916	231310	2273916	Soledad de Negrete	Pascual Negrete Guerra	165.02	1.65	165.02	1.650	0.748
841	191003	2295883	Granja Santa Lucía		55.12	0.22	55.12	0.220	0.053
R-24	205745	2297060	San Pablo	Agua Potable de la Comunidad	26.78	0.27	26.78	0.270	0.0001 *
s/c	209461	2323692	Pénjamo		5.86	0.06	5.60	0.055	s/d
s/c	226376	2343096	León		93.31	0.08	166.75	0.650	0.590

* Dato no utilizado para la configuración de iso-valores
s/d Sin dato
s/c Sin clave

La reinterpretación y realización de las pruebas de bombeo en el caso del COREMI, además de llevarse acabo para obtener información de los parámetros hidráulicos, fue para aplicar un método moderno para su evaluación que es el Aquifer Test v3.5. De acuerdo a los resultados obtenidos, en las tablas 3.2 y 3.3 se pueden observar valores fuera de lugar, los cuales deben ser tomados con ciertas reservas.

Asiendo un análisis de los valores de las tablas y los resultados de las pruebas se desprenden los siguientes comentarios:

Para el caso de las pruebas realizadas por COREMI.

1. Los datos de recuperación no coinciden final abatimiento-inicio recuperación (pruebas 1, 2 y 4).
2. En la tabla de datos de recuperación, debe ponerse le nivel dinámico máximo y llamarlo así, en lugar de nivel estático.
3. En la tabla de recuperación, debe indicarse nivel de recuperación, en lugar de abatimiento
4. Los valores de Transmisividad y Conductividad hidráulica parece que se forzaron tanto en abatimiento como en recuperación para que fueran iguales.
5. En general fue poco el tiempo de bombeo, aunque algunas pruebas muestran cierta estabilización en los niveles

6. La prueba 1 parece que está bien interpretada
7. En la prueba 2 aun no se alcanzaba la estabilización del nivel y fue poco el tiempo de bombeo por lo que los valores obtenidos pudieran cambiar ligeramente
8. La prueba 3 no es interpretable por los datos de abatimiento y recuperación tan inconsistentes.
9. Las pruebas 4, 5 y 6 parecen que están bien interpretadas.
10. La prueba 7 tiene mal los datos de abatimiento y recuperación, por lo que habría que reinterpretarla en su caso.

Tabla 3.3 Pruebas de bombeo elaboradas por Geopsa (1998).

Clave del pozo	x	y	Propietario	GEOPSA 1998	GEOPSA 1998	COREMI 2004 "ABATIMIENTO"		COREMI 2004 "RECUPERACIÓN"		
				"ABATIMIENTO"	"RECUPERACION"	Transmisividad (m ² /d)	Conductividad (m/d)	Transmisividad (m ² /d)	Conductividad (m/d)	Coefficiente de Almacenamiento
RT-21	206770	2329080	Rubén Hernández C.	27.5	21.70	16.24	0.06515	20.22	0.08	0.00433 *
RT-843	192845	2304046	Pedro Espinoza	2491.5	1712.90	2384.64 *	9.504 *	2073.6 *	10.368 *	0.997
L-1063	207402	2289670	Comunidad del Vado	222	118.60	46.48	0.16589	138.24	1.38	0.178
S/N	204710	2302020	Ejido Laurel	17.24	47.43	19.70	0.06549	40.35	0.16	0.081
RT-90	197450	2316665	Sergio Fuentes	117	130.00	38.62	0.24106	87.26	0.35	0.206
RT-26	202230	2333540	Benito Bustamante	13.6	10.54	10.02	0.08726	15.90	0.16	0.030
RT-833	197037	2332247	Wenceslao Hernández	3280	S/D	614.30 *	3.07584	584.064 *	2.34	0.042
RT-656	200300	2303850	Federico Quiroz	56.92	227.70	39.14	0.15638	86.05	0.86	0.566
RT-648	195827	2304297	Adán Salazar Nicasio	47.43	130.40	33.78	0.22550	105.41	1.05	0.291
RT-501	202030	2287973	Rigoberto Villanueva	26.63	25.94	18.40	0.09158	30.67	0.15	0.067
RT-508	200500	2287540	Ernesto de la Vega	1457	S/D	1131.84 *	3.97440	343.872 *	1.72	0.021
RT-528	195725	2285670	Bias Penilla Rocha	108.7	164.00	127.01	0.50890	214.27	0.71	1.73 *
RT-539	198691	2291424	Mauricio Vazquez	5115.39	s/d	393.12 *	1.31328	378.432 *	1.89	2.79 *
RT-561	205200	2295440	José Martínez	7.01	4.21	9.42	0.04692	5.94	0.03	0.011
RT-626	199200	2302485	Ambrosio Pérez P.	67	78.30	61.08	0.35942	74.39	0.74	0.061
RT-209	202130	2313180	José Felipe Cisnero	262	458.50	89.86	0.29808	324 *	1.30	1.06 *
RT-245	205547	2315556	Banrural 1	7.8	6.80	11.23	0.03758	17.02	0.07	0.182
RT-315	209857	2322869	Ignacio González	79	75.89	57.11	0.19008	108.86	0.43	0.329
RT-402	193790	2300890	Ejido San José del Paso	115	132.00	69.21	0.60221	92.45	0.92	0.140
RT-442	208000	2324470	Sebastián Guerrero	11.29	11.29	9.94	0.09072	9.76	0.10	0.0072 *
RT-473	204190	2326440	Maurilio Lozano	75	84.90	9.50	0.03154	22.81	0.09	0.111

* Datos no considerados para las configuraciones de iso-valores

En el caso de las pruebas de Geopsa parece que están bien, excepto la RT 656, 608, 209, 402 y 478, donde no son congruentes los valores del COREMI con los de Geopsa.

Tabla 3.4 Pruebas de bombeo tomadas de Guysa (1999).

Clave de pozo	X	Y	Transmisividad (m ² /d)	Conductividad (m/d)
L-0542	217878	2331444 (2)	0.0033 *	0.03
L-0488	209886	2334459 (2)	0.0044 *	0.05
L-1411-A	211953	2314922 (2)	0.0052 *	0.06
245	203700	2303200 (1)	10.600	0.1
561	199100	2290200 (1)	7.000	0.1
L-0892	223500	2326000 (1)	0.01 *	0.11
L-0701	224200	2331161 (2)	0.0083 *	0.14
L-1296	216000	2317500 (1)	0.022 *	0.38
626	209700	2329000 (1)	68.900	0.52
648	206100	2321800 (1)	47.400	0.73
L-0651-A	212543	2328451 (2)	0.13 *	1.12
528	200900	2285900 (1)	108.700	1.14
209	195900	2302500 (1)	262.000	1.54
90	199400	2322400 (1)	117.000	2.23
508	214100	2327000 (1)	1457 *	28.52 *
539	196800	2280900 (1)	5115 *	32.38 *
833	206800	2325800 (1)	3278 *	65.22 *

(1) Coordenada tomada Guysa (1998)

(2) Coordenada tomada sel Censo de pozos de CEAG

* Dato no tomado en cuenta para la configuración de iso-valores

Con los datos generados a partir de la reinterpretación y realización de las pruebas, se dibujaron mapas de distribución de los diferentes parámetros hidráulicos apoyándose en el programa ArcView versión 8.3, utilizando el método de interpolación de Kriging.

La distribución de las pruebas de bombeo (Figura 3.19), es suficiente para la parte central y Norte del área de estudio, no así para la parte sur y poniente de la misma, por lo que las configuraciones no cubren dichas zonas.

En la zona de estudio son diversas las empresas y organismos que han determinado parámetros hidráulicos a través de la ejecución de pruebas de bombeo; Geopsa determina transmisividad media para el acuífero Río Turbio de entre 100 y 500 m²/día y un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.016. También reporta transmisividades máximas de 3,278 a 5,115 m²/día relacionadas a pozos que extraen agua del medio fracturado. Transmisividades mínimas también son reportadas por esta misma empresa, éstas son del orden de 4.8 a 7.0 m²/día atribuidas al medio Guysa reporta conductividades de 0.864 m/día en los primeros 100 m de profundidad para las

subcuencas Turbio y Guanajuato, asimismo, valores de 0.0864 m/día de 100 a 300 m para la misma zona. Para el acuífero Valle de León, Guysa afirma que en dicha zona no hay marcados contrastes de conductividad, asimismo, designa a la Ignimbrita Cuatralba como la unidad que posee las características de conductividad más importantes y le asigna un valor de 0.05 m/día. Al medio fracturado se le atribuye una variación de 0.2 a 0.35 m/día.

Para la zona Pénjamo-Abasolo la información consultada fue escasa, Lesser (*op. cit.*) reporta un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.05, propio de un acuífero libre.

Para fines de interpretación, así como reinterpretación de las pruebas de bombeo, se consideró un espesor promedio de 250 m para el sistema granular, mientras que para el fracturado el espesor medio asignado fue de 300 m. Cabe mencionar que estas características son muy similares a las que prevalecen en la Subcuenca del Río Guanajuato.

Para la Subcuenca del Río Turbio los parámetros hidráulicos definidos son muy variables en cuanto a la transmisividad y conductividad, según se observa en las figuras de distribución (figuras 3.20 a 3.23), tanto para la etapa de recuperación como para el abatimiento. Para fines prácticos, los datos representativos de la zona son los arrojados por la etapa de recuperación, puesto que el abatimiento pudiera verse influido por medios ajenos al sistema acuífero, tales como potencia y diseño de la bomba y falta de mantenimiento de los pozos, entre otros más.

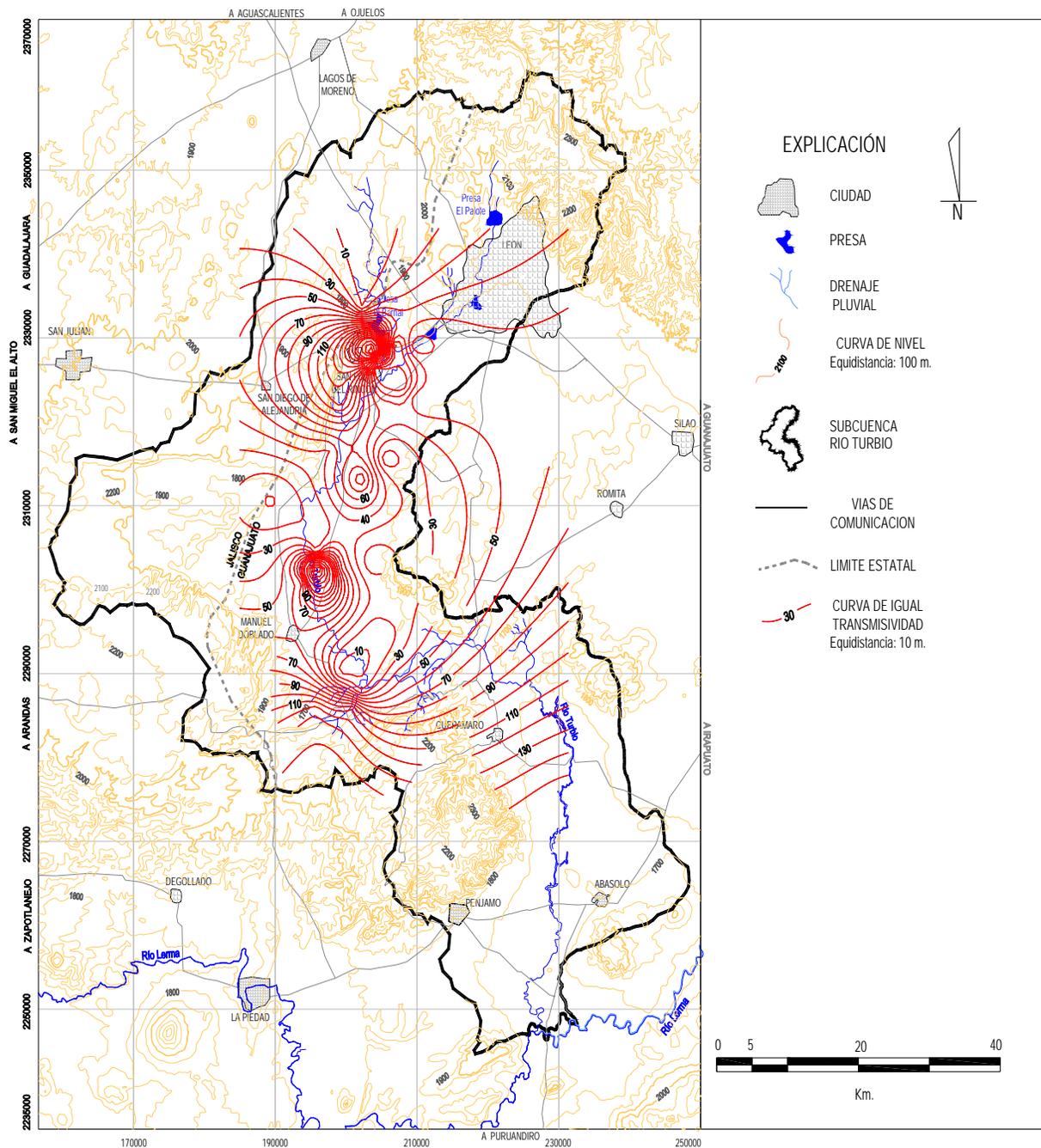


Figura 3.20 Transmisividad en etapa de abatimiento, curvas en $m^2/día$.

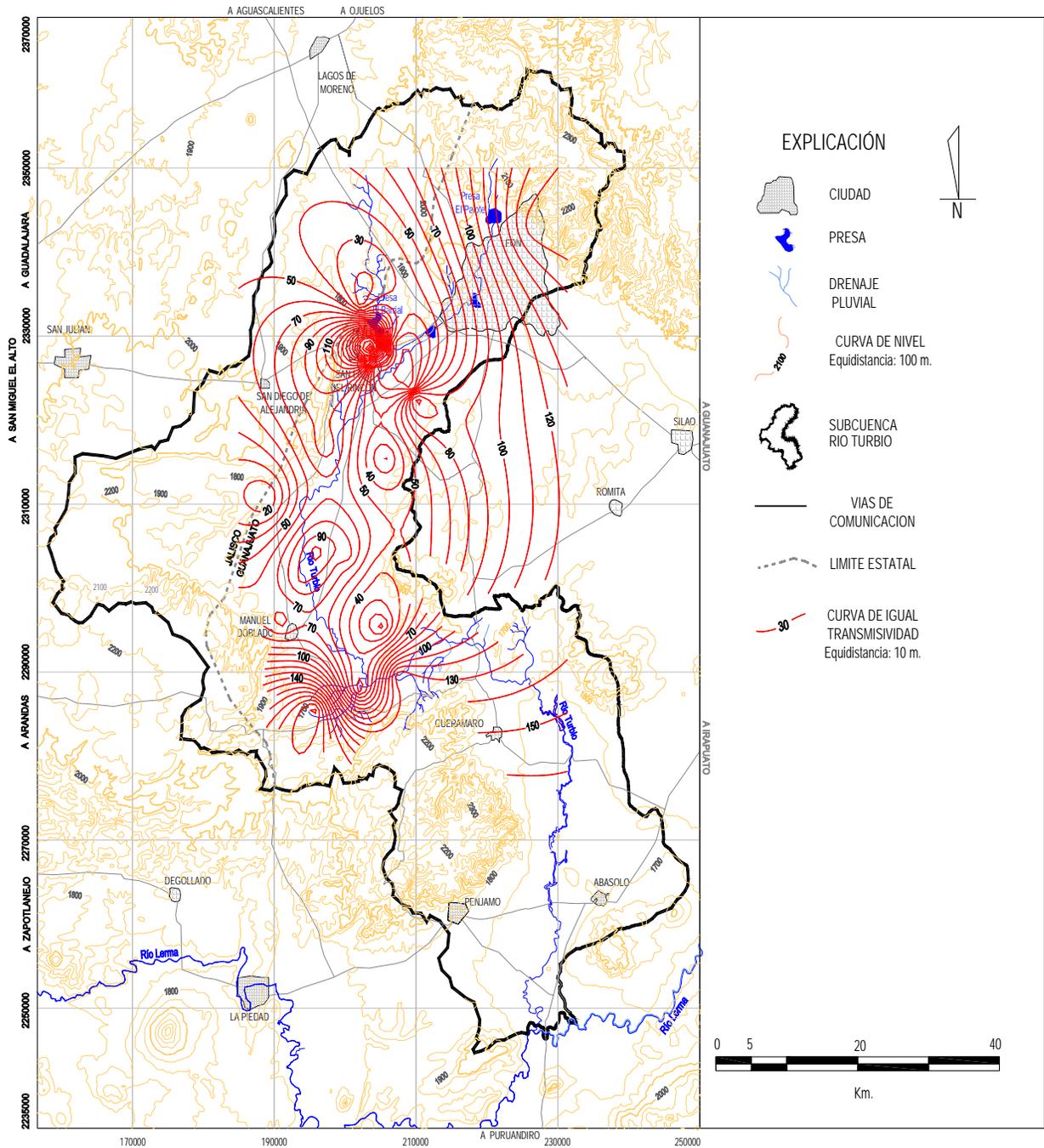


Figura 3.21 Transmisividad en etapa de recuperación, curvas en $m^2/día$.

Al Oriente de Manuel Doblado, Poniente de La Muralla, Norte de San Francisco de Rincón y Sur de San Diego de Alejandría, se observan transmisividades bajas, el orden de estas oscila entre 10 y 30 m²/día, lo cual puede significar que en estas áreas existen lentes confinantes muy potentes, mismos que reducen la velocidad de abatimiento, así como la de recuperación; al menos las tres primeras zonas, están relacionadas con evoluciones de niveles estáticos de carácter negativo (Figura 3.12). El área ubicada al Sur de San Diego de Alejandría tiene un rasgo particular, ya que a pesar de tener una transmisividad baja generada por Andesitas Basálticas del Terciario, funciona como una zona importante de recarga para la parte central de la subcuenca (Figura 3.16), por lo cual se puede deducir que los sistemas de flujo descritos para esa zona (Figura 3.18), ocurren en el medio fracturado a través de riolitas y tobas riolíticas terciarias.

La transmisividad media para el sistema acuífero de la Subcuenca del Río Turbio (parte centro y norte) oscila entre 90 y 150 m²/día, lo anterior, sin considerar los valores extremos; 5,115, 3,278 y 2,073 m²/día, entre otros, así como 0.003, 0.01, 0.13 m²/día. Si se tomaran en cuenta dichos valores para obtener una transmisividad media, esta sería del orden de 375 m²/día, sin embargo, y como ya se mencionó con anterioridad, dichos valores no se consideraron puesto que la gráfica que se obtendría no sería representativa de la zona.

La conductividad hidráulica, fue otro de los parámetros determinados a raíz de la interpretación y reinterpretación de las pruebas de bombeo (figuras 3.22 y 3.23), este parámetro indica las zonas de mayor velocidad del agua en el medio saturado, con lo cual se pueden determinar paleo-cauces, zonas con mayores caudales, así como áreas atractivas para perforación de pozos.

Se determinó una conductividad media para el acuífero de 0.68 m/día, la anterior, así como los mapas de distribuciones, se especificaron utilizando los datos de las etapas de recuperación de las pruebas de bombeo.

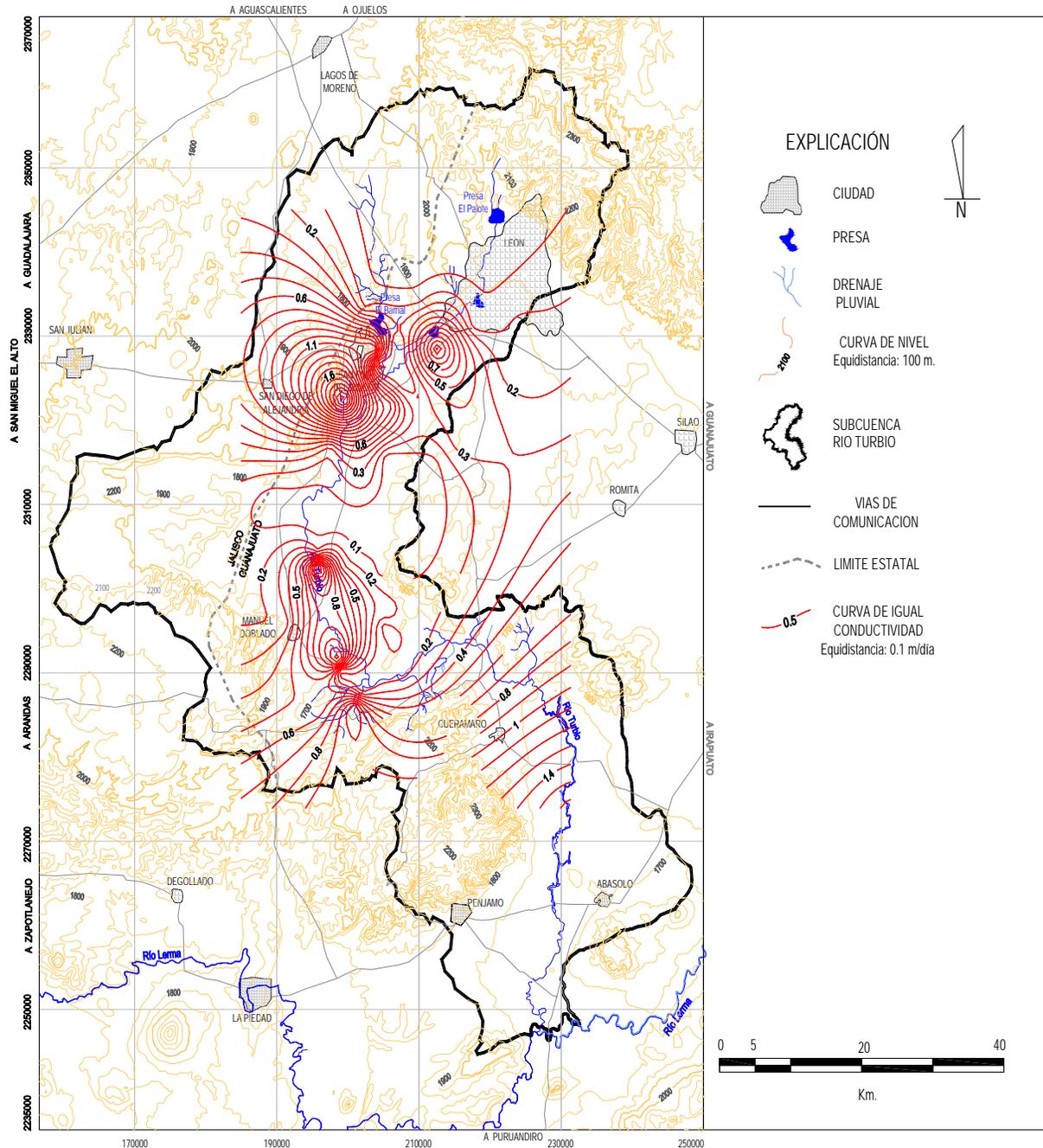


Figura 3.22 Conductividad hidráulica en etapa de abatimiento.

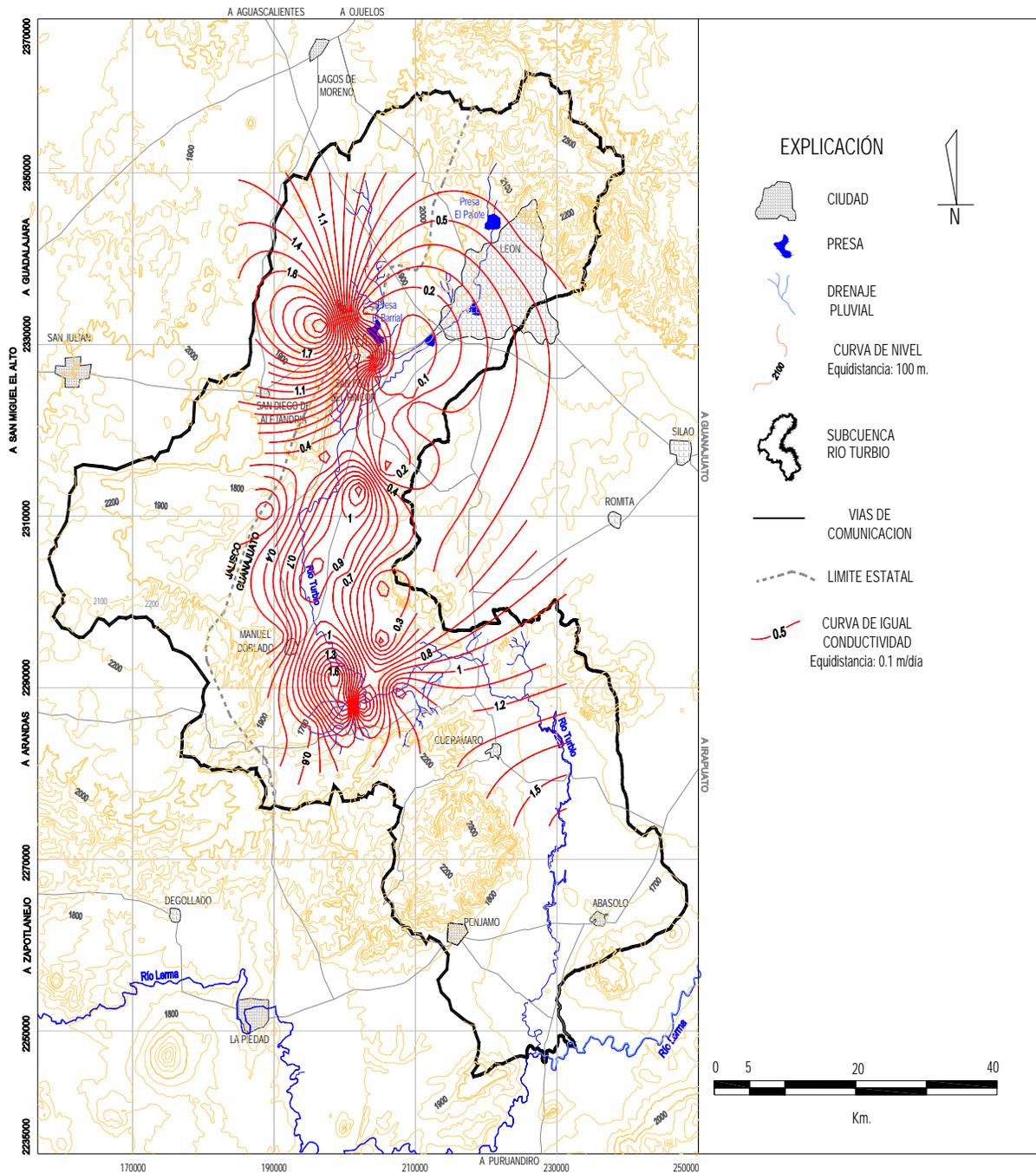


Figura 3.23 Conductividad hidráulica en etapa de recuperación.

Los datos de conductividad mostrados en el presente trabajo son para la componente horizontal, ya que para la zona de estudio no existe información relacionada con la conductividad hidráulica vertical o de su relación con ésta; sin embargo y de manera general, Domenico y Schwartz (1988), establecen que para medios porosos, la conductividad hidráulica vertical oscila entre uno y dos órdenes de magnitud menor que la horizontal.

Guysa (op. cit.) afirma que en el medio volcánico la conductividad hidráulica vertical es igual a la horizontal, por el hecho de ser un medio fracturado, asimismo, en general propone la siguiente relación entre ambas conductividades:

$$K_{horizontal} / K_{vertical} = 5$$

Las conductividades mayores prevalecen al Sureste de Manuel Doblado, igualmente en la parte central de la subcuenca en las cercanías del cauce del Río Turbio, así como en los alrededores de San Francisco del Rincón, los valores oscilan entre 1.6 m/día para el primer caso, 1.3 m/día para el segundo, y 2.1 m/día para el último; de la misma manera, se presentan valores hasta de 1.6 m/día al norte del Río Turbio, (Figura 3.23). De lo anterior se desprende que, al menos para las tres primeras zonas, conductividades altas están directamente relacionadas evoluciones de niveles estáticos de carácter positivo (ver Figura 3.16), de la misma forma, las regiones que tienen altas transmisividades coinciden con valores altos de conductividad, por lo que se deduce que el potencial hidrogeológico en el subsuelo es bueno.

A las áreas donde se manifiesta una conductividad alta, al menos en la parte central de la subcuenca y alrededores de San Francisco del Rincón, se les puede relacionar con zonas de recarga natural (ver Figura 3.16), de la misma forma, con distintos regímenes de flujo subterráneo (Figura 3.18), se puede afirmar que dichas zonas son las principales fuentes de agua subterránea al acuífero de la subcuenca, y que las riolitas y tobas riolíticas terciarias, así como las areniscas y conglomerados, también del Terciario, son las unidades geológicas por donde circula la mayor cantidad de agua al acuífero.

Valores mínimos de conductividad se observan en la parte centro occidental de la subcuenca, así como al Poniente de Manuel Doblado, donde la conductividad oscila entre 0.1 y 0.3 m/día. Es posible que dichos valores estén relacionados o influenciados por Andesitas Basálticas del Terciario Medio, las cuales tienen una permeabilidad media a baja. La conductividad también puede verse disminuida por lentes de arcilla, por lo que se recomienda al lector ver las secciones geológico - hidrogeológicas construidas para este trabajo.

El Coeficiente de Almacenamiento es un parámetro importante para determinar y conocer el comportamiento de un acuífero, los valores altos indican un porcentaje mayor de saturación del medio con respecto a los valores bajos. Para el caso de la Subcuenca del Río Turbio la configuración de isovalores elaborada sólo es representativa de la parte central y norte, no fue posible interpolar hacia la parte sur por motivos ya expresados (Figura 3.24).

En la parte central de la subcuenca, así como los alrededores de San Francisco del Rincón y la confluencia del Río Turbio, se presentan los valores altos de este parámetro (0.7 a 0.9), puesto que en esas mismas zonas la transmisividad y conductividad también tienen valores altos, se reafirma la presencia de al menos dos zonas importantes de recarga, una en la parte central de la cuenca proveniente del poniente y que circula a través de Riolitas y Tobas Riolíticas del Terciario y la segunda al norte de San Francisco del Rincón, transportándose por un medio sedimentario constituido por Areniscas y Conglomerados Terciarios.

Al noroeste de Cuerámara, donde la conductividad y transmisividad es alta, el Coeficiente de Almacenamiento es bajo (0.1), debido a lo anterior, se refuerza la teoría de que la falla normal que cruza por esa zona, funciona como medio de recarga adicional al acuífero.

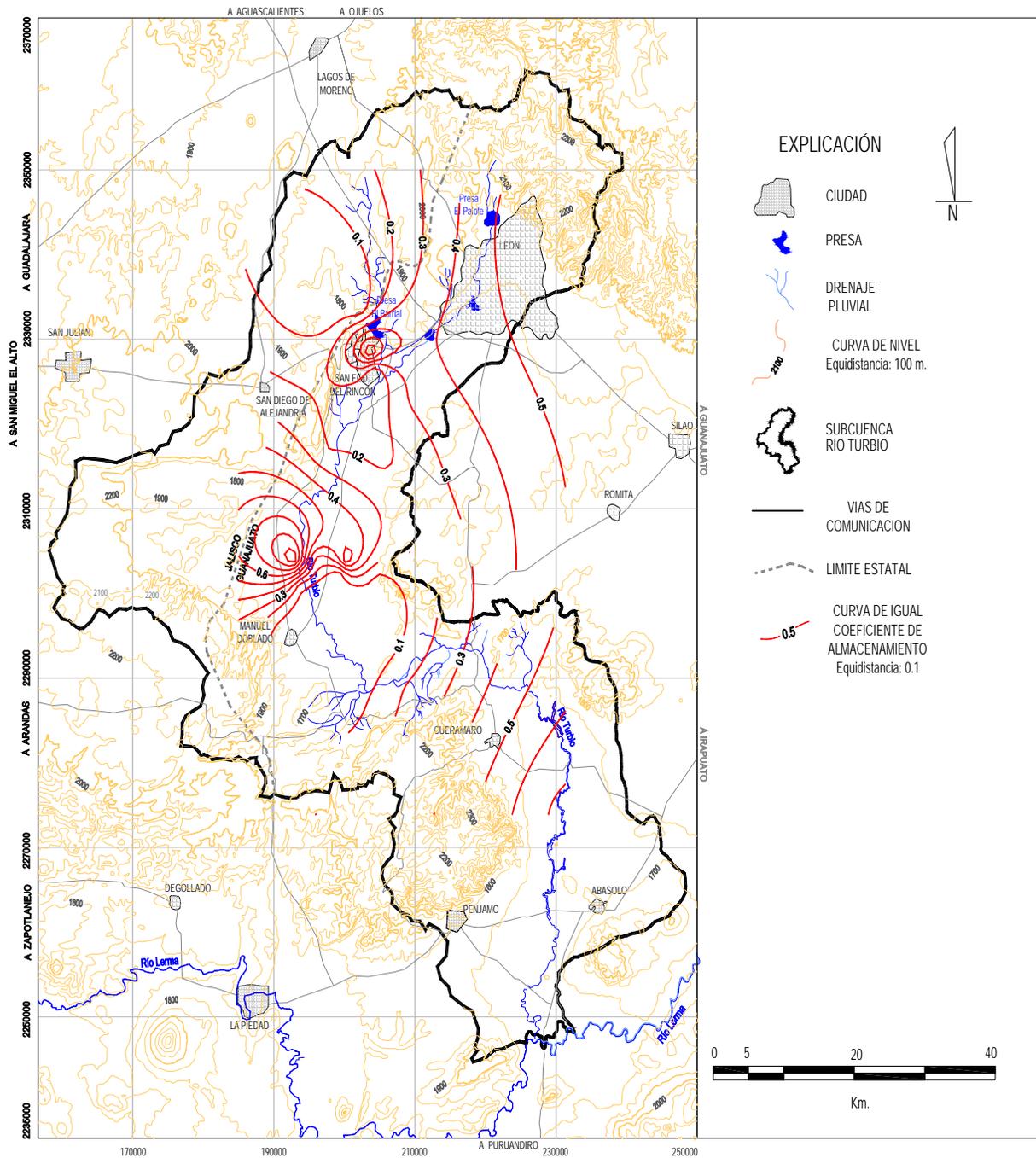


Figura 3.24 Coeficiente de Almacenamiento.

3.5. Modelo Hidrogeológico del área de estudio

La elaboración de un modelo conceptual representa un importante paso durante el desarrollo e implementación de esquemas de planeación y aprovechamiento de agua subterránea, se trata de un esquema simplificado, pero válido, de las condiciones hidrológicas de la zona en estudio y se plantea a partir del análisis conjunto de la información geofísica, geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica, ya que a los factores anteriores se les considera como rasgos indicadores del comportamiento de flujo, así como de la dinámica, e hidráulica del acuífero.

El modelo sugerido aplica a toda la Subcuenca del Río Turbio ya que las condiciones hidrológicas a profundidad tienen características y comportamientos similares en toda la zona. Guysa (*op. cit.*) para la parte norte de la subcuenca (Acuífero León), señala que la dinámica del agua subterránea ocurre en un sistema acuífero libre, heterogéneo, de continuidad hidráulica regional; además establece que el agua se desplaza a través de tres medios físicos: granular, fracturado y granular-fracturado. Referente a la parte central de la subcuenca (Acuífero Río Turbio), Geopsa (*op. cit.*) advierte la presencia de un sistema acuífero integrado por unidades litológicas de tipo granular y fracturadas, asimismo indica que el acuífero es de tipo libre con fenómenos locales de semi-confinamiento. Para la parte sur de la subcuenca (Acuífero Pénjamo-Abasolo), el modelo conceptual no es claro, por lo que con el apoyo de secciones geológicas elaboradas a partir de cortes de pozos y de los resultados de gravimetría, en este estudio se propone un modelo de funcionamiento similar a que se tiene en la parte central y norte de la subcuenca

El modelo conceptual de funcionamiento acuífero para la subcuenca en estudio tiene comportamientos y patrones similares con el modelo de la Subcuenca del Río Guanajuato. Al igual que en algunos estudios previos, se propone la existencia de un sistema acuífero donde el agua circula por dos medios, uno integrado por unidades de tipo granular y otro por rocas fracturadas; el primero tiene características heterogéneas y su granulometría varía desde gravas a arcillas, mientras que el segundo medio está formado por rocas volcánicas de composición riolítica, basáltica y andesítica; las

particularidades de ambos medios de circulación son discutidas y descritas ampliamente en el capítulo de Geología.

El basamento hidrológico está constituido por una secuencia de unidades meta-sedimentarias mesozoicas y por el Conglomerado Guanajuato del Terciario Inferior, las rocas anteriores afloran en la parte norte de la Subcuenca del Río Turbio (Sierra de Guanajuato), lo cual sugiere un comportamiento impermeable de la misma. Sin embargo, al observar la distribución de unidades hidrogeológicas (Figura 3.1), se distingue una unidad fracturada con permeabilidad alta; la cual genera aporte considerable de agua al acuífero. Lo anterior es evidenciado por las bajas concentraciones de sólidos totales disueltos en las muestras de manantiales y pozos tomadas al pie de la sierra (como se verá mas adelante en el capítulo de hidrogeoquímica), además de que la configuración de curvas de igual elevación del nivel estático muestran aporte de agua de la sierra al acuífero, sin embargo, en este estudio dichas configuraciones no se pudieron extender hacia la parte alta de la Sierra de Guanajuato debido a la falta de datos piezométricos. Por otro lado, en el estudio *Potencial hidrogeológico del Graben de León (SGM, 2003)*, donde se trata a la Subcuenca del Río Guanajuato, los datos piezométricos y sus configuraciones equipotenciales pusieron en evidencia algún grado de permeabilidad de la sierra.

En la zona existe diversidad de niveles piezométricos en pozos ubicados a poca distancia uno de otro, el efecto anterior es causado por la geología estructural en el subsuelo, la cual manifiesta eventos tectónicos que han afectado al valle, dando a lugar a altos y bajos estructurales producto de la tectónica distensiva terciaria, misma que originó una discontinuidad de la litología del subsuelo, lo cual es factor importante para proponer la existencia de un acuífero regional.

3.5.1. Geometría y tipo de funcionamiento

Como resultado del análisis hidrogeológico de la zona, se propone la existencia de un sistema acuífero de tipo libre a semi-confinado localmente; en los primeros 30 metros se encuentra un acuífero superior y por debajo de este se encuentra un acuífero regional, de amplia extensión y de composición variable, cuyo espesor puede llegar hasta 800 m (Figura 3.25).

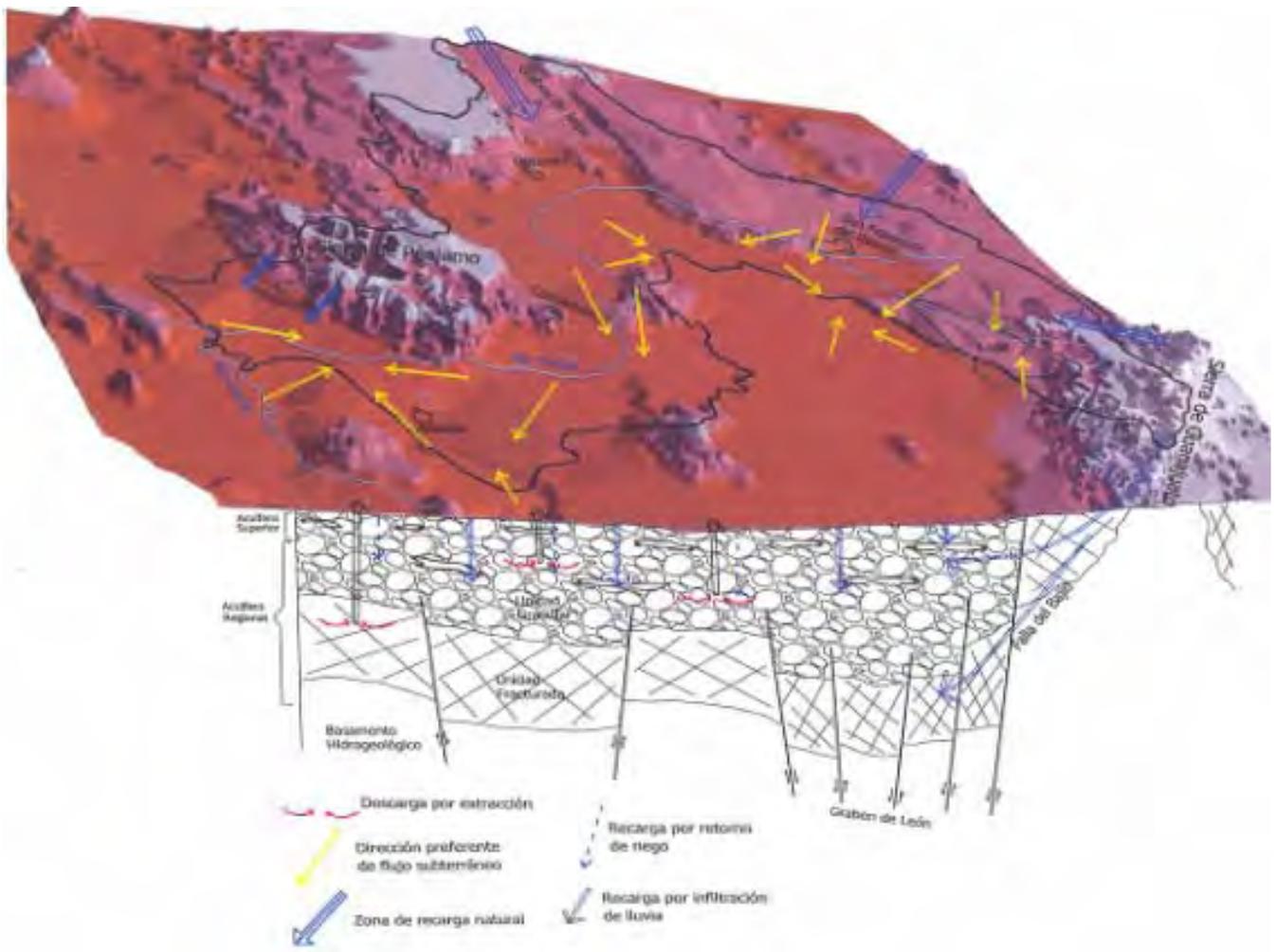


Figura 3.25 Modelo conceptual esquemático de funcionamiento acuífero en la Subcuenca del Río Turbio.

El medio geológico determina las zonas en las que circula el agua, controla las magnitudes y direcciones de flujo, así como el volumen y distribución de agua almacenada (*Toth, 2000*), en la parte norte de la subcuenca (acuífero Río Turbio), existe un sistema de fallas E-W y NE-SW que permiten la recarga subterránea del sistema acuífero (*Ramos, 2002*). En esa misma zona y con dirección preferente NW-SE, se localiza el Graben de León, controlado por una serie de fallas de tipo normal, constituye una estructura con un alto potencial hidrogeológico el cual no ha sido explotado debido a su profundidad (hasta 800 m).

Con el objeto de reforzar la hipótesis de que el funcionamiento acuífero está relacionado a fallas de tipo regional, además de que el movimiento del agua subterránea está en función de la geología estructural y de la disposición espacial de las unidades, en la Figura 3.26 se observa como algunos pozos con caudales similares, siguen una dirección definida por la traza de algunas fallas. Aunque no se descarta la posibilidad de que en algunos casos dicho arreglo sea casual y pueda estar influido por el equipamiento del pozo, tipo y diseño de la bomba, profundidad del pozo, litología, etcétera; no deja de llamar fuertemente la atención de esta relación de gasto similar-fallamiento regional.

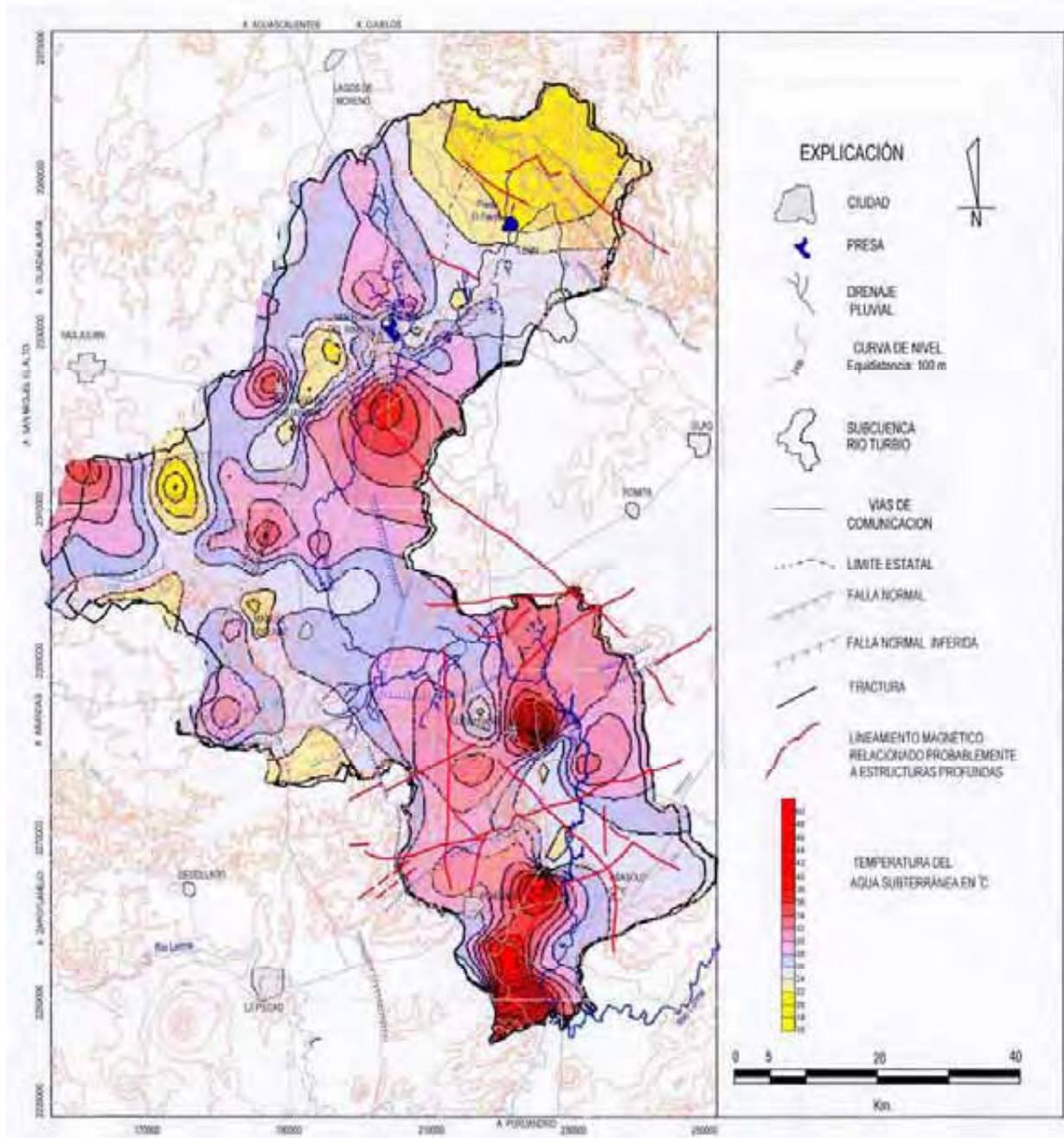


Figura 3.26 Gasto promedio que extraen los pozos en la zona de estudio.

3.5.2. Condiciones de frontera

La frontera entre los dos acuíferos que se proponen en el modelo conceptual se manifiesta por numerosos lentes de arcilla, los cuales se pueden observar en los perfiles geológicos y cortes litológicos de pozos. El origen de los lentes está relacionado con facies distales de abanicos aluviales, al formarse un gran número de abanicos también se formaron innumerables lentes arcillosos con espesores y orientaciones variables, cuya peculiaridad es la discontinuidad entre los mismos.

Las fronteras horizontales del sistema acuífero son: al norte, las unidades hidrogeológicas V y VI (Figura 3.1), siendo la primera una unidad fracturada con permeabilidad baja, mientras que la segunda funciona como basamento hidrogeológico del acuífero. Al suroeste (Sierra de Pénjamo) por andesitas y basaltos del Terciario, a pesar de que forman una unidad con permeabilidad media, existen bloques consolidados que proveen de una frontera horizontal al acuífero, aunque sólo localmente.

Al noroeste, sureste, oriente y poniente de la subcuenca, el acuífero no está restringido de manera horizontal, por lo que se presume una comunicación hidráulica con las subcuencas aledañas, lo anterior se evidencia con la presencia de varios sistemas de flujo subterráneo (Figura 3.17), particularmente por el sistema de flujo regional que proviene del poniente, noroeste y noreste de la subcuenca, otra evidencia de la comunicación hidráulica entre subcuencas se muestra en la Figura 3.16, correspondiente a las direcciones de flujo subterráneo y donde se aprecia como la Subcuenca del Río Guanajuato cede agua a la del Río Turbio, particularmente en la zona de La Muralla.

Referente a las fronteras verticales, éstas se definen por la presencia del basamento hidrogeológico, descrito en el apartado de Geología y cuya morfología se muestra a través de secciones geológicas regionales elaboradas en este estudio. Lentes discontinuos de arcillas constituyen otra frontera vertical y delimitan al acuífero superior del regional.

4. HIDROGEOQUÍMICA

El objetivo del presente capítulo es interpretar e integrar los resultados físico-químicos e isotópicos de las muestras de agua a fin de apoyar a que el modelo conceptual hidrogeológico describa con la mayor certidumbre las características del agua para la zona de estudio, además de la dinámica del flujo subterráneo, calidad del agua, origen de la misma y el de diversos contaminantes.

En la zona de estudio la geoquímica del agua ha sido abordada por diversos autores, de manera general los trabajos se han enfocado a determinar familias de agua y a su vez identificar la calidad de la misma, en la mayoría de los casos los resultados son interpretados como espacios independientes dentro de un sistema hidrológico, como la Subcuenca del Río Turbio.

A fin de conocer la caracterización y comportamiento del agua superficial y subterránea de la zona de estudio, utilizando los programas ArcView 8.3 y Surfer 8 se elaboraron representaciones espaciales apoyadas en mapas de isovalores de concentraciones para elementos y parámetros considerados importantes, de la misma forma, con el programa Aquachem 4.0 se logró la caracterización de la calidad del agua tomando en cuenta los diagramas de Piper y Stiff .

Se muestrearon 168 aprovechamientos (Figura 4.1), de los cuales 147 son pozos, ocho manantiales, seis norias, cinco presas y dos muestras de río. A fin de cumplir con los requerimientos oficiales de calidad para el muestreo de agua, se consideró la Guía de Muestreo de Aguas Subterráneas y el Manual de Equipamiento de Pozos de Monitoreo (CNA, 1999).

Todos los envases fueron etiquetados a fin de identificar la muestra, se utilizó una clave propia para cada muestra misma que se colocó en cada una de las etiquetas adheridas a las botellas, donde se anotó lugar de colección, fecha, coordenadas, conductividad eléctrica, pH y temperatura del agua.

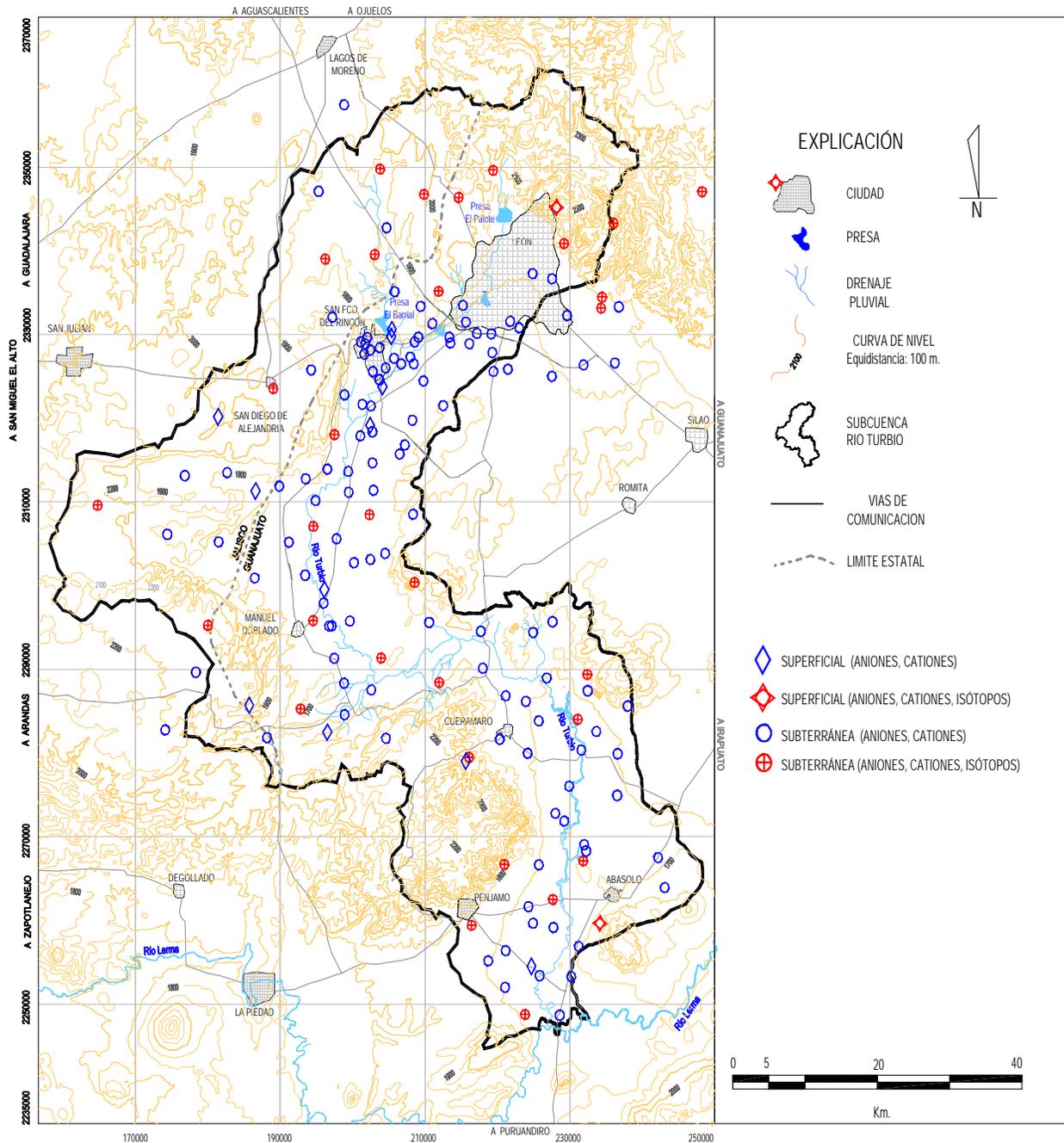


Figura 4.1 Ubicación de los aprovechamientos muestreados

Para las determinaciones isotópicas, se tomaron 35 muestras para ser analizadas por los isótopos O18, Deuterio y Tritio, de las cuales dos son estaciones de lluvia, cuatro manantiales, una noria y 28 muestras de pozos (Figura 4.2). Para la distribución de las murestras se tomaron en cuenta factores como: a) que estuviesen incluidas todas las regiones geográficas del acuífero, b) que se captara el acuífero superior y el regional, c) que el muestreo fuese lo suficientemente denso como para determinar particularidades isotópicas del mismo.

Para la toma de muestras analizadas por isótopos se utilizó el protocolo definido por el Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA), el cual está regido por la Organización Internacional de Energía Atómica.

4.1. Toma de muestras y parámetros obtenidos en campo para cada aprovechamiento.

En la totalidad de los aprovechamientos muestreados y a fin de cuantificar diversos parámetros físicos del agua *in situ*, se utilizaron dos equipos portátiles, Potenciómetro digital marca Conductronic, modelo PC18, y marca Hach y modelo Sension-156, el primero se calibró para cada muestra previo a la medición de parámetros, mientras que el segundo una vez por día al iniciar la toma de la primer muestra, a menos que las lecturas entre ambos fuesen contrastantes se calibró en dos o más ocasiones. (Fotografía 4.1 y 4.2)

Todas las botellas deben estar completamente llenas, cerradas con tapa y contratapa. Para el caso específico de oxígeno y deuterio, las muestras deben sellar con cera para evitar evaporación, la cual modifica el valor isotópico original y en consecuencia genera errores en la interpretación de resultados.

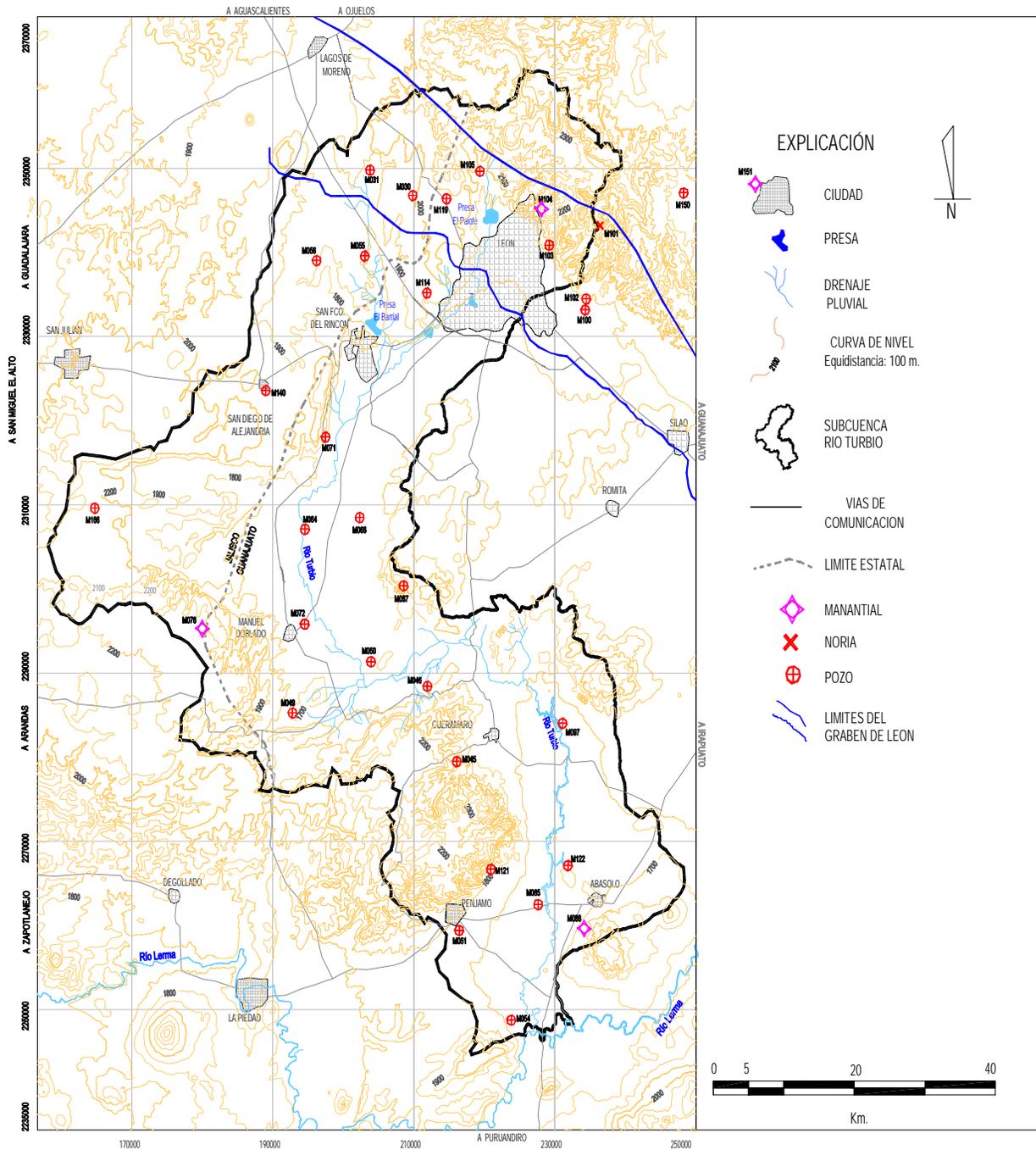


Figura 4.2 Localización de las muestras analizadas por isótopos.

Oxígeno-18 y Deuterio



Fotografía 4.1 Medición de parámetros fisicoquímicos



Fotografía 4.2 Calibración para medición del pH

Al mismo tiempo que se tomaron muestras de agua para cada aprovechamiento, se determinaron los parámetros: potencial de hidrógeno (pH), potencial de óxido reducción (Eh), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), salinidad, temperatura del agua, titulación por contenido de carbonatos y bicarbonatos, se tomó nota de turbiedad, olor y color, así como de las coordenadas UTM. (Fotografías 4.3 y 4.4)



Fotografía 4.3 Titulación por contenido de carbonatos



Fotografía 4.4 Toma de características físicas (olor, color, etc.)

4.1.1. Manejo de muestras y laboratorios

Las muestras fueron preservadas a temperatura aproximada de 4°C. y se enviaron para su análisis a diversos laboratorios; los aniones se analizaron en el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), ubicado en el *campus* Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Los cationes fueron analizados por COREMI, en su Centro Experimental Oaxaca; asimismo, las determinaciones isotópicas fueron llevadas a cabo por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), localizado en Jiutepec, Morelos. Los diferentes laboratorios se apegan a normas oficiales mexicanas e internacionales para las determinaciones efectuadas. (Tabla 4.1)

Tabla 4.1 Determinación de Análisis Químicos de algunos aprovechamientos de la Subcuenca del Río Turbio.

Orden No. 876/2004
Remitente GERENCIA DE ESTUDIOS ESPECIALES
Dirección BLVD.FELIPE ANGELES S/N
Colonia VENTA PRIETA
Municipio PACHUCA
Estado HIDALGO
Procedencia SUBCUENCA DEL RIO TURBIO
Fecha Entrada 03/31/2004
Fecha Salida 04/16/2004

C/2003	IDE CAMPO	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm						
		Al	Sb	As	Ba	Be	Bi	Cd	Ca	Co	Cu	Cr	Sc	Sn	Sr
22118	TM-001	N.D.	0.02	0.06	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	20	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
22119	TM-002	N.D.	0.02	0.05	0.13	N.D.	N.D.	N.D.	55	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.6
22120	TM-003	N.D.	0.01	0.10	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	62	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.6
22121	TM-004	N.D.	0.02	0.08	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	81	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.1
22122	TM-005	N.D.	0.01	0.05	0.26	N.D.	N.D.	N.D.	226	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.2

C/2003	IDE CAMPO	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
		Fe	P	Te	Mg	Mn	Mo	Ni	Ag	Pb	K	Se	Na	Tl	U
22118	TM-001	N.D.	N.D.	N.D.	1	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	10	N.D.	60	N.D.	N.D.
22119	TM-002	N.D.	N.D.	N.D.	16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	22	N.D.	67	N.D.	N.D.
22120	TM-003	N.D.	N.D.	N.D.	10	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	17	N.D.	176	N.D.	N.D.
22121	TM-004	N.D.	N.D.	N.D.	18	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	33	N.D.	165	N.D.	N.D.
22122	TM-005	N.D.	0.1	N.D.	59	2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	28	N.D.	177	N.D.	N.D.

C/2003	IDE CAMPO	ppm	ppm	ppm	ppm
		W	Zn	SiO2	Hg
22118	TM-001	N.D.	N.D.	77	N.D.
22119	TM-002	N.D.	N.D.	70	N.D.
22120	TM-003	N.D.	N.D.	70	0.01
22121	TM-004	N.D.	N.D.	64	N.D.
22122	TM-005	N.D.	N.D.	53	N.D.

MÉTODO UTILIZADO: LECTURA DIRECTA DE LA SOLUCIÓN EN EL I. C. P. INTREPID II

Observaciones : N. D. = NO DETECTADO POR EL MÉTODO UTILIZADO.

LÍMITES DE DETECCIÓN EN ppm: Ag 0.004, Al 0.14, As 0.006, Ba 0.002, Be 0.001, Bi 0.02, Ca 0.014, Cd 0.0004, Co 0.0006, Cr 0.005, Cu 0.004, Fe 0.20, K 0.23, Mg 0.06, Mn 0.01, Mo 0.001, Na 0.07, Ni 0.003, P 0.08, Pb 0.02, Sb 0.006, Se 0.0003, Si 0.0003, Sn 0.01, Sr 0.0006, Te 0.008, Tl 0.01, U 0.10, W 0.09, Zn 0.0006, Hg 0.002, SiO2 0.001

La muestra con DPL es un duplicado del numero de muestra que le antecede, considerado solo como un control de calidad.

4.2. Análisis de resultados hidrogeoquímicos

Distribución de Sólidos Totales Disueltos (STD)

Los sólidos totales disueltos, son la cantidad de todas las sustancias o sales disueltas en el agua, sean o no volátiles.

Cuando la concentración de iones incrementa, la conductancia en la solución incrementa, por lo tanto la medición de la conductancia indica la concentración de iones o bien los sólidos totales disueltos (STD). A mayor STD mayor conductividad eléctrica (CE), e inversamente, a menor STD menor CE. Tanto los STD como la CE se incrementan con el tiempo de residencia y con la distancia a la zona de recarga. Los valores bajos de conductividad pueden estar relacionados con recarga local o con zonas de infiltración, mientras que altos valores de conductividad se relacionan con zonas de descarga.

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

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

De la configuración de líneas de igual concentración de sólidos totales disueltos (Figura 4.3) salta a la vista que las mayores concentraciones ocurren en aprovechamientos cercanos al curso del Río Turbio, particularmente en el tramo que se extiende desde la parte SW de León hasta la parte sur de San Francisco del Rincón.

Otras zonas con sólidos totales elevados se observaron en los alrededores y parte noreste de Manuel Doblado; así como, una zona hacia el noroeste de Abasolo, en las cercanías de las poblaciones de Corralejo y San Gregorio.

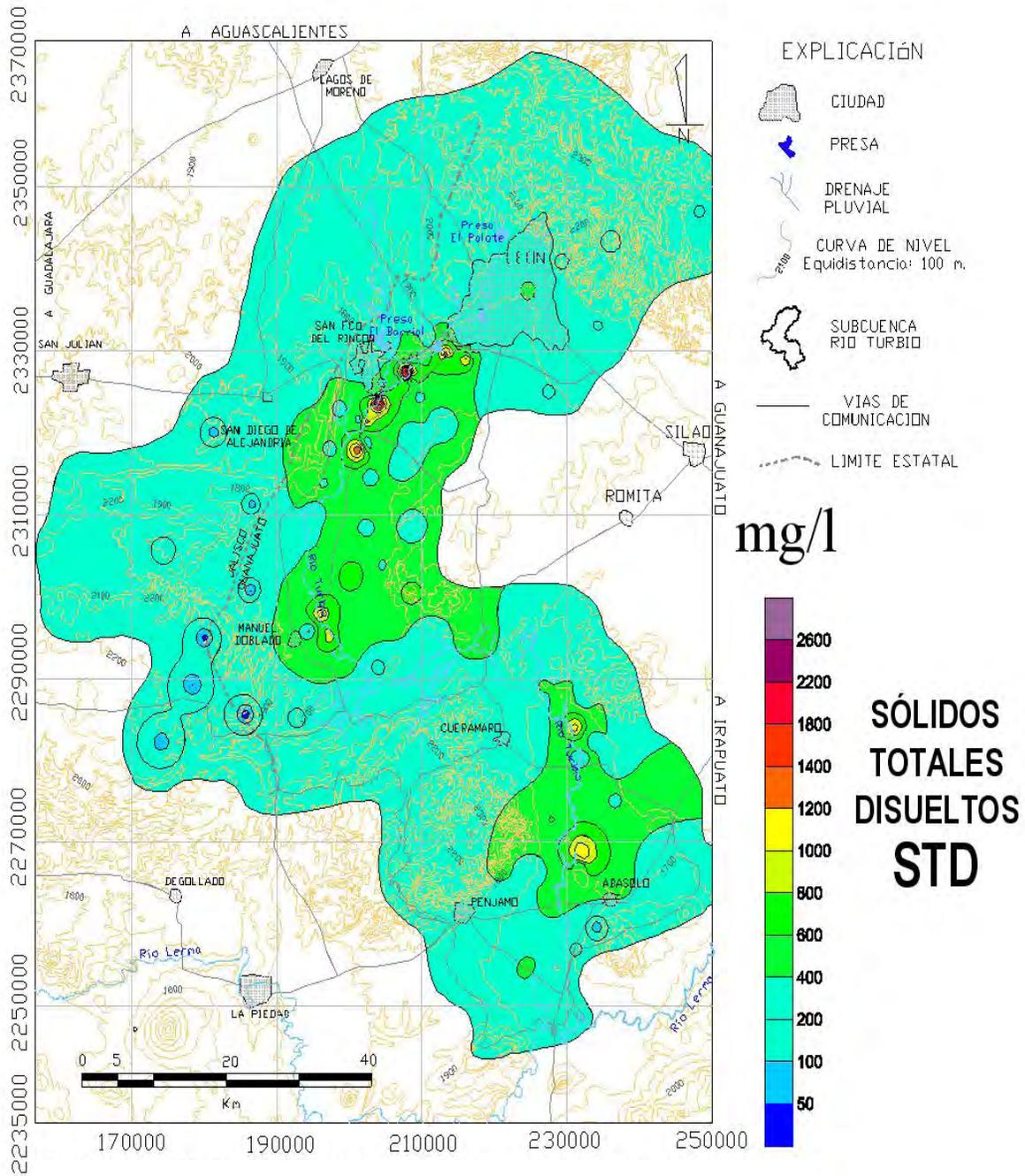


Figura 4.3 Concentración de sólidos totales disueltos (STD) en muestras de agua.

Distribución de pH

Este parámetro señala el grado de acidez o basicidad de la misma, en un rango de 1 a 14. El agua pura tiene un pH neutro, con un valor de 7. Valores menores a 7 señalan una creciente acidez y mayores a 7 indican una mayor basicidad. Para el agua potable se recomienda un rango admisible de pH de entre 6.5 y 8.5. El carácter de las sustancias disueltas en el agua puede modificar su pH.

Los mayores valores de pH medidos en el muestreo se encontraron en muestras superficiales, en las presas de El Sitio y De Silva, con valores de 8.73 y 8.84, respectivamente. En la zona se registraron relativamente pocos aprovechamientos con valores de pH por encima de 8.0, la mayoría de ellos se ubicaron en una zona que se extiende desde la parte SE de Pénjamo hasta la zona de confluencia entre los ríos Turbio y Lerma (Figura 4.4). El resto de los valores altos se distribuyen en todo el valle del Turbio; al S y SW de León y dos más de ellos se localizan un poco más alejados, hacia la parte NW de San Francisco del Rincón y oriente de León.

La ausencia de importantes formaciones carbonatadas puede explicar en parte que la mayoría de los valores de pH de las muestras se encuentre por debajo de 8.0; son más frecuentes los valores de pH por debajo de 7.5 e incluso 7.0. Los valores bajos, ligeramente ácidos, son frecuentes hacia las zonas serranas y de lomeríos, como ocurre en la parte norte de la Subcuenca, hacia las elevaciones que se sitúan al SW de Manuel Doblado, sur de Abasolo y en la parte oeste del área, ya en el Estado de Jalisco.

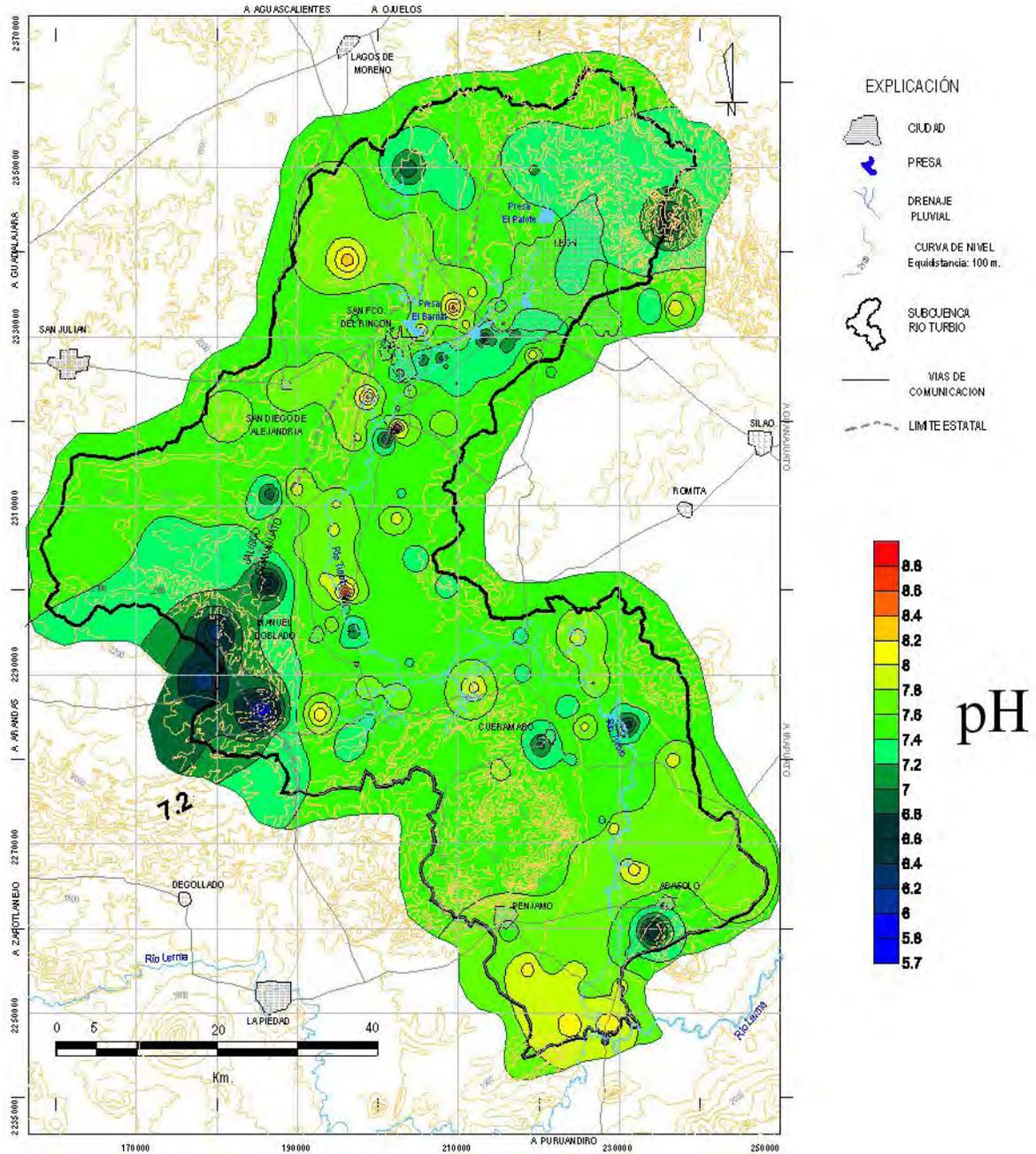


Figura 4.4 Configuración de valores de pH en muestras de el agua.

Oxígeno Disuelto (OD)

La cantidad de oxígeno disuelto (OD) en el agua es un buen indicador del grado de interacción que ha tenido el agua desde el momento de la precipitación hasta el momento del muestreo, dado que el oxígeno, como elemento activo, se combinará con otros compuestos con los que entra en contacto en el subsuelo. La actividad microbiana afecta también la cantidad de oxígeno disuelto en el agua; de manera que aguas empobrecidas en OD, sobre todo en fuentes superficiales, sugieren algún tipo de contaminación orgánica.

Altos valores de OD se obtuvieron, por lo general, en aprovechamientos ubicados en zonas elevadas que coinciden con zonas de recarga y donde prácticamente se muestreó agua de reciente infiltración. Destacan la sierra baja y lomeríos que se extienden desde el NE de Las Playas hasta San Pedro del Monte, la zona de Chamacua, las elevaciones volcánicas del sur de Abasolo y las zonas de lomas y mesas que se extienden al W y NW de Manuel Doblado. La muestra M090 del poblado de Maritas, en el extremo sur de la subcuenca mostró un alto contenido de OD (5.3mg/l) a pesar de situarse cerca de la confluencia entre los ríos Turbio y Lerma. Este hecho puede atribuirse a la existencia de una zona de recarga a escasos 3km al W del lugar, en los cerros que se alzan al poniente de Atarjea de Crucitas y La Calle. (Figura 4.5)

Temperatura

En el área de estudio son frecuentes las manifestaciones de termalismo en aprovechamientos de agua subterránea, particularmente en pozos. Las temperaturas registradas oscilaron entre los 17°C y 51°C. De 168 muestras, en 34 mostraron temperaturas mayores a 30°C, 11 muestras arriba de 35°C y en 5 muestras la temperatura fue superior a 40°C. Los aprovechamientos con mayores lecturas se verificaron en las localidades de Cerritos de Agua Caliente ubicado a unos 10 Km al oriente de Cuerámaro y en el Ejido Paso de Piedra que se localiza en el extremo sur del área, 5 Km al norte del punto de confluencia entre los ríos Turbio y Lerma.

En el primer caso se registró una temperatura de 51.5°C en un pozo somero de agua potable (NE 25 m; PT 180 m) que se encuentra a escasos 50 m de un pequeño

domo riolítico cuaternario. En este sitio existió hasta principios de la década de los ochentas un manantial termal que dio nombre al lugar, pero este se extinguió al descender los niveles estáticos en la zona. En el segundo caso se obtuvo una lectura de 51.2°C; se trata de un pozo de riego ubicado en una zona cercana a materiales volcánicos recientes.

La Figura 4.6 muestra la configuración de temperatura de los aprovechamientos muestreados, a la que se le han sobrepuesto las estructuras señaladas en el plano geológico estructural (Figura 2.3). Es muy cercana la relación que muestra la ocurrencia de los focos termales con la presencia de zonas de fallamiento normal, como ocurre hacia la zona poniente (Graben de Jalpa), en la comunidad de Silva al suroeste de San Francisco del Rincón y los fallamientos de la zona entre Cuerámara y el Río Lerma, asociados con los aparatos y materiales volcánicos que afloran en el área.

La M011, San José de la Calera (38.5°C), se localiza al pie de un conjunto volcánico miocénico, que forma parte de una cadena de lomeríos alineada noreste-suroeste, que va desde el poblado El Nacimiento hasta San Cristóbal, en la zona oriental de la subcuenca. La cadena está asociada con una falla de tipo normal.

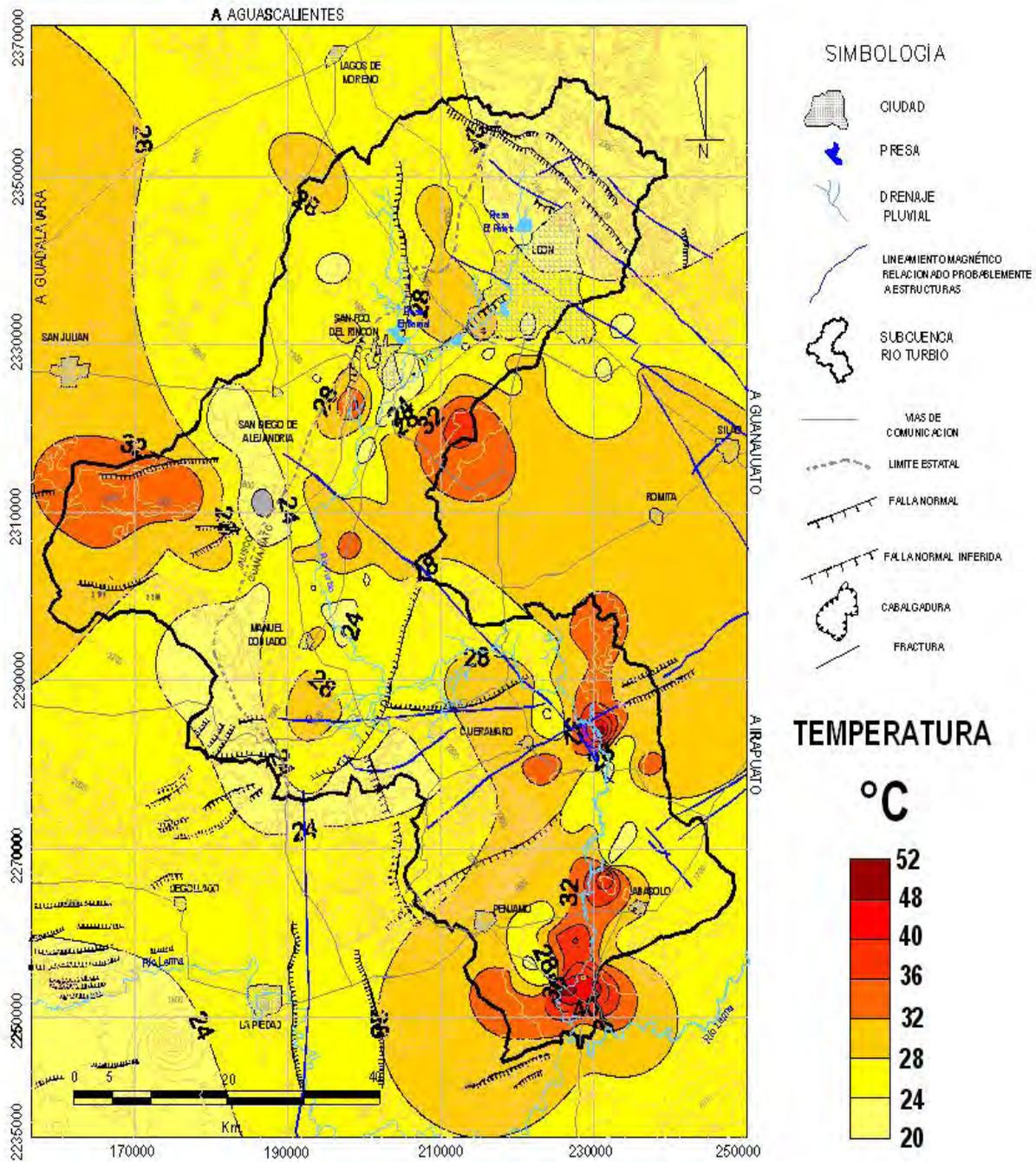


Figura 4.6 Configuración de temperatura del agua subterránea.

Iones Mayores

Los iones mayores son aquellos con mayor presencia en la generalidad de las aguas subterráneas y que permiten caracterizarlas y clasificarlas por familias. Los iones negativos (o aniones) más abundantes son cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos, aunque también se puede incluir a los nitratos y nitritos. Los iones positivos o cationes más comunes en las aguas subterráneas son Ca, Mg, Na y K.

Calcio y magnesio

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

El calcio junto con Mg, Be, Sr, Ba y R forman el grupo de los metales alcalinotérreos. La distribución del calcio es muy amplia al igual que el Mg; se encuentran en casi todas las áreas terrestres del mundo, distribuidos tanto en rocas ígneas como sedimentarias.

El calcio es el catión más abundante en muchas aguas naturales, es soluble y precipita con facilidad como carbonato de calcio, al variar el pH o la presión de CO_2 . Junto con el Mg contribuye a la dureza del agua.

En la Tabla 4.2 se listan algunos de los aprovechamientos con mayor contenido de calcio.

Tabla 4.2 Aprovechamientos muestreados con el mayor contenido calcio.

MUESTRA No.	COORD. X	COORD. Y	CALCIO ppm	APROVECHAMIENTO	LOCALIDAD
005	201089	2317929	226.0	Pozo (riego) /234	Rancho Alejandro Mquez, Gto.
148	201090	2317927	231.1	Pozo (Agricola) 234	San Berbaro, Purísima
146	216074	2328914	284.9	Pozo (Agricola) Geo 933	Puerta de San Germán, León
074	196956	2295184	286.3	Pozo (Agua Potable) / 547	La Gloria, Manuel Doblado.
024	213287	2329670	425.0	Pozo (riego) / G-671	Malagana, Mpio. de León
144	207921	2327319	643.1	Noria La Escondida 788	San Francisco Del Rincón

La mayoría de muestras analizadas no presentan elevado contenido de calcio, aunque de la configuración de valores resalta una zona que se extiende desde León hasta unos 8km al sur de San Francisco del Rincón, por lo que las anomalías apuntan a fuentes antropogénicas (figura 4.7). Otros focos con valores significativos resultaron en el pozo de la comunidad de San José de Otates y La Gloria, Municipio de Manuel Doblado. El pozo de San Juan de Otates ya había sido comentado por presentar características peculiares, pues su agua sugiere una mezcla de agua reciente con agua de mayor tiempo de residencia y que puede estar lixiviando parte de las rocas químicas (calizas) lacustres que afloran al norte del poblado, aunque ya en la Subcuenca del Río Guanajuato. El pozo la Gloria puede estar recibiendo influencia de estos afloramientos, además de la posibilidad de recibir descargas de Manuel Doblado y del Río Turbio.

En la subcuenca la presencia de Mg se mantiene, en general, en valores moderados que van de 0 a 80 ppm, que pueden ser atribuidos a la geología del área con abundantes rocas de composición basáltica e intermedia. El comportamiento o distribución de los mayores valores de magnesio es similar al que presenta Ca y, en alguna medida, también al que presenta K (Figura 4.8), ya que muestra concentraciones notorias en dos de los mismos pozos hacia el área de san Francisco del Rincón, Manuel Doblado y Abasolo. La Tabla 4.3 presenta los aprovechamientos con mayores concentraciones de Mg.

Tabla 4.3 Aprovechamientos muestreados con el mayor contenido de magnesio

MUESTRA No.	COORD. X	COORD. Y	MAGNESIO ppm	APROVECHAMIENTO	LOCALIDAD
074	196956	2295184	48	Pozo (Agua Potable) / 547	La Gloria, Manuel Doblado
060	202477	2321451	50	Pozo (agua potable)	San Bernardo
130	231930	2269072	53	Pozo (Agua potable) 1275	Estación Abasolo
067	208553	2300395	55	Pozo (agua potable) / 681	San José de Otates
005	201089	2317929	59	Pozo (riego) /234	Rancho Alejandro Mquez.
148	201090	2317927	63	Pozo (Agrícola) 234	San Bernardo, Purísima
146	216074	2328914	73	Pozo (Agrícola) Geo 933	Puerta de San Germán, León
024	213287	2329670	81	Pozo (riego) / G-671	Malagana, León
144	207921	2327319	106	Noria La Escondida 788	San Francisco del Rincón

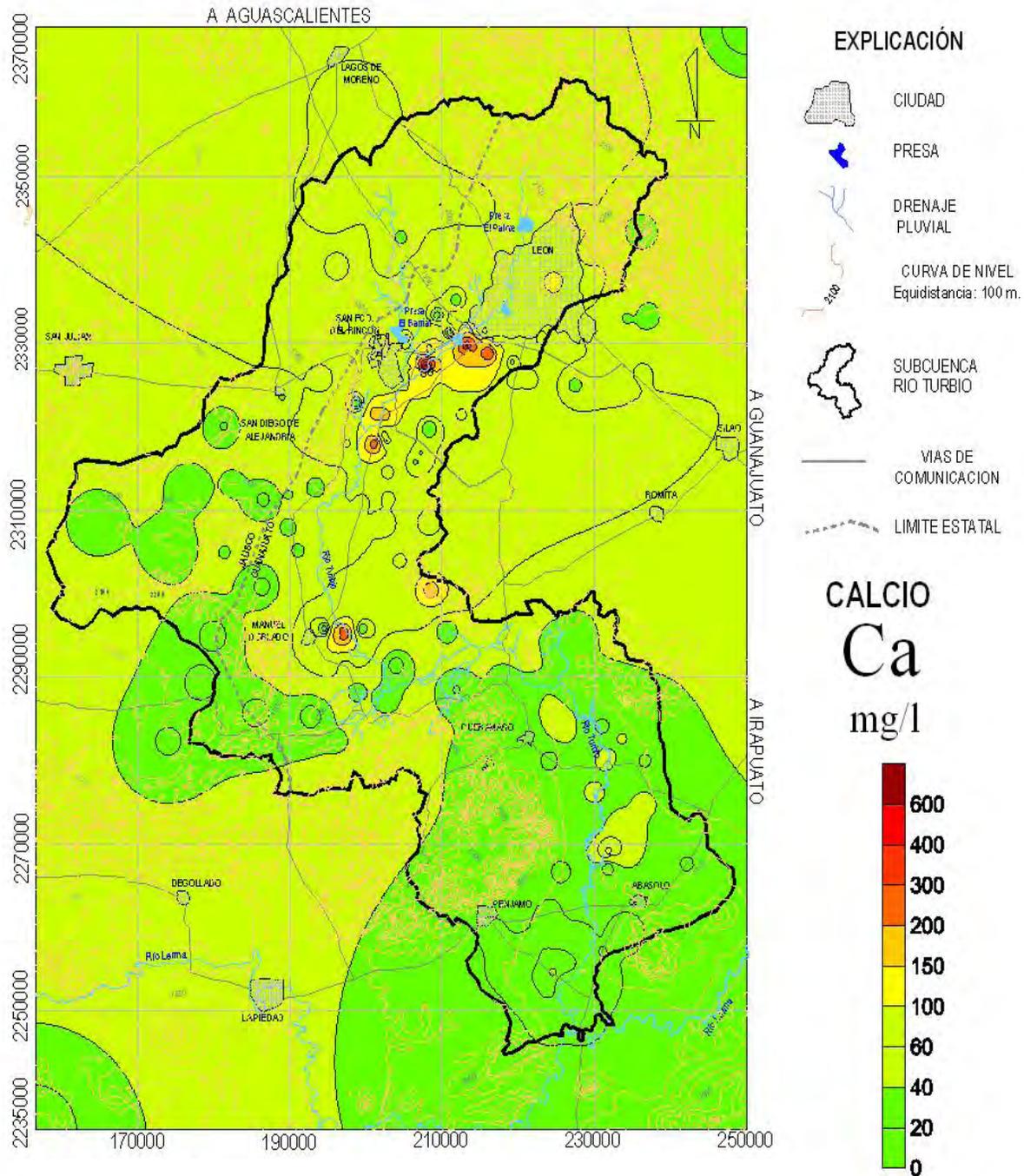


Figura 4.7 Concentración de calcio en el agua subterránea.

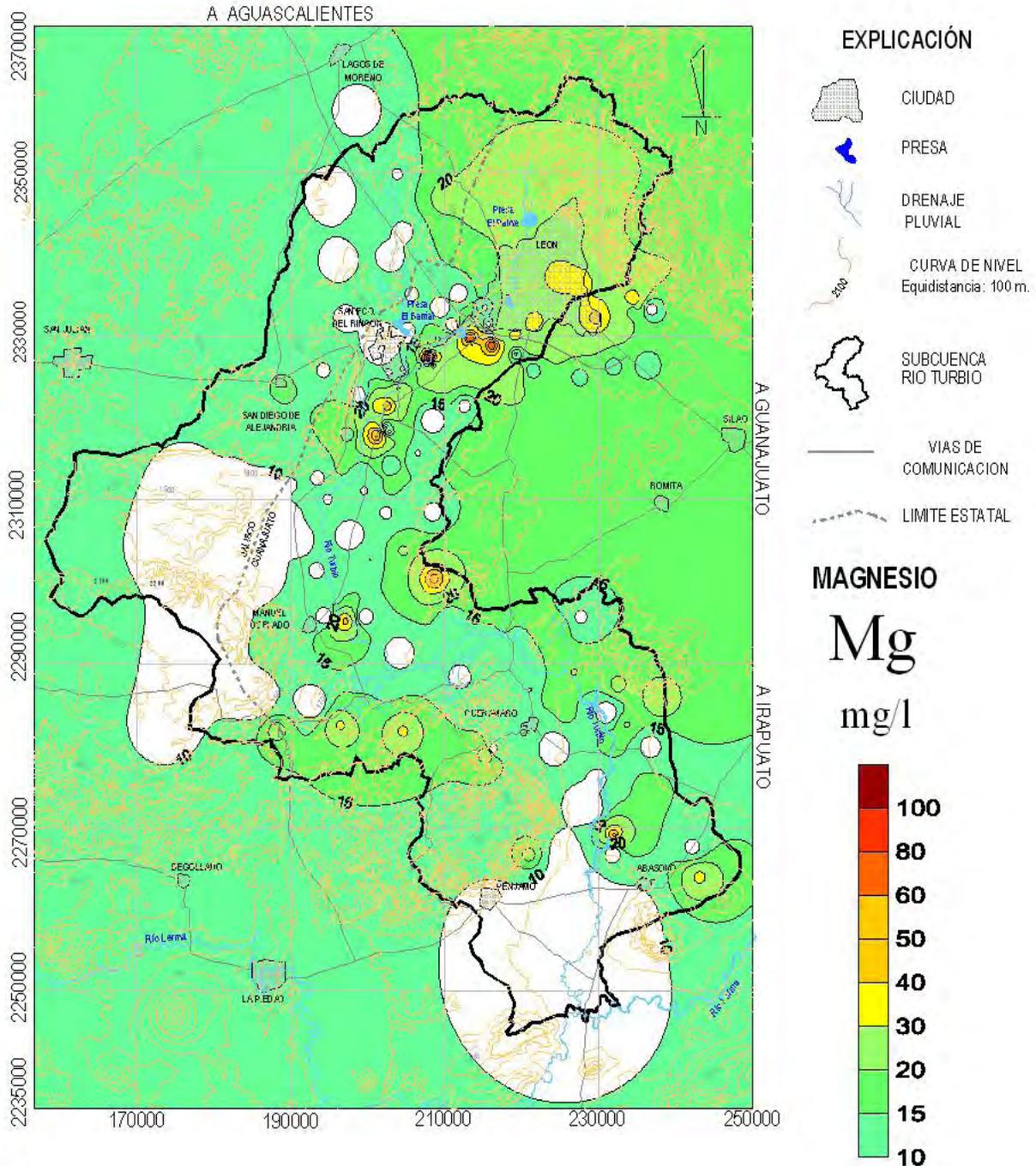


Figura 4.8 Concentración de magnesio en el agua subterránea.

Sodio

El sodio es el más abundante de los metales alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs y Fr); junto con el potasio constituyen los elementos del grupo más abundantes en las rocas ígneas

Las principales fuentes de sodio en la naturaleza son agua de mar, disolución de evaporitas, descomposición de feldespatos, feldespatoideos y otros silicatos. Cantidades importantes de sodio pueden provenir del lavado de sedimentos y cambios de base con arcillas de origen marino. Otra fuente de sodio son las descargas urbanas e industriales.

Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo; son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas. La norma oficial mexicana de la SSA para agua de consumo humano señala un límite máximo permisible de 200 ppm.

La Figura 4.9 presenta una configuración de la distribución de valores de sodio en las aguas subterráneas. El contenido promedio no superan las 200 ppm, aunque algunas muestras alcanzaron casi las 700 ppm. Las mayores concentraciones se ubican hacia la parte sur de San Francisco del Rincón, con focos notorios al oriente de Manuel Doblado, al este de Cuerámara y norte de Abasolo. Los valores promedio de sodio, entre 2 y 180 ppm o mg/l tienen relación directa con el intemperismo de feldespatos sódicos muy abundantes en las rocas predominantemente riolíticas del área.

Es probable que algo de este sodio sea aportado en forma local por la lixiviación de los escasos depósitos de rocas químicas que afloran en la subcuenca. Del total de muestras, doce de ellas resultaron con valores de sodio por encima de las 200 ppm. Los casos extremos son M123, tomada del Río Turbio, M059 y M097 tomadas en las comunidades de San Bernardo y en Cerrito de Agua Caliente, respectivamente (Tabla 4.4). Curiosamente todas estas anomalías se ubican a lo largo del curso del río Turbio, por lo que es muy probable que representen zonas de sedimentos muy permeables y que permiten una fácil difusión de los contaminantes.

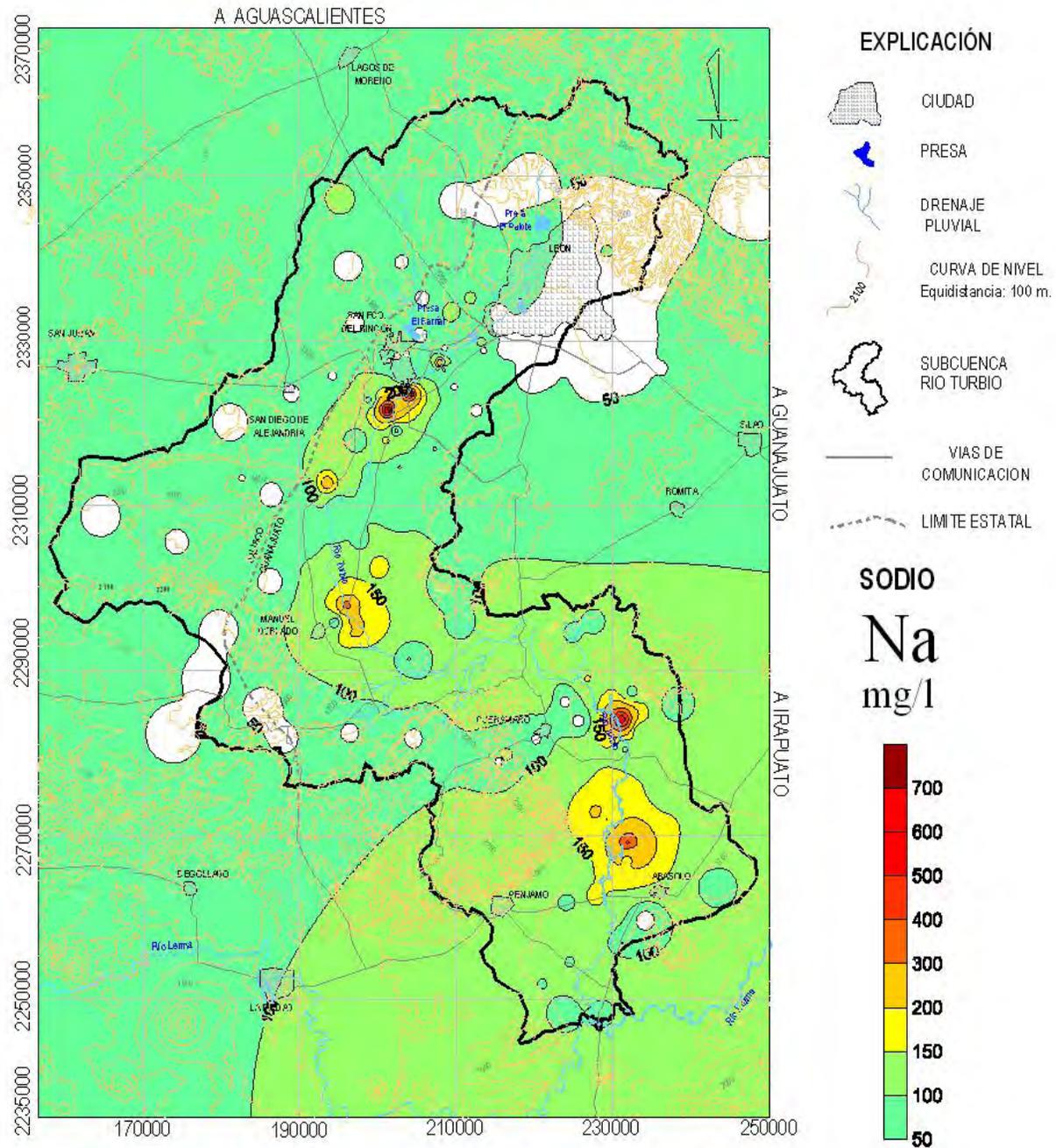


Figura 4.9 Concentración sodio en el agua subterránea.

Tabla 4.4 Aprovechamientos muestreados con el mayor contenido de sodio

MUESTRA No.	COORD. X	COORD. Y	SODIO Ppm	APROVECHAMIENTO	LOCALIDAD
036	227906	2272776	220	POZO (riego)	Bordito Blanco, Mpio. Cuerámara
060	202477	2321451	231	POZO (agua potable)	San Bernardo
017	193520	2312762	250	POZO (agua potable)	El Pedernal
144	207921	2327319	268	NORIA LA ESCONDIDA	San Francisco del Rincón
152	232249	2268303	292	POZO (Agua potable)	Huizatarito, Abasolo
074	196956	2295184	305	POZO (Agua Potable)	La Gloria
008	196009	2297941	338	NORIA (riego)	Granja La Villa Rica
130	231930	2269072	415	POZO (Agua potable)	Estación Abasolo
097	231101	2284030	553	POZO (Agua potable)	Cerrito de Agua Caliente
059	201290	2321619	636	NORIA (uso doméstico)	San Bernardo
123	203940	2323729	678	RIO TURBIO	Entre el Maquey y San Fco. Del Rincón

Los dos primeros casos son claramente atribuibles a contaminación proveniente de las descargas urbanas e industriales,. El último caso, como ya se dijo, corresponde a un pozo termal somero donde antaño brotaba un manantial.

Las zonas con anomalías de sodio al oriente de Manuel Doblado y norte de Abasolo, pueden tener influencia del río Turbio, aunque no se descarta la influencia de soluciones salinas provenientes de zonas más profundas, como en el caso de Cerrito de Agua Caliente.

Potasio

Es el segundo elemento más abundante del grupo de los metales alcalinos. La mayoría de las aguas naturales contiene más sodio que potasio, aunque ambos son aproximadamente igual de abundantes en las rocas ígneas. En las rocas sedimentarias es más abundante el potasio, pues se combina fácilmente con otros productos del intemperismo como son los minerales arcillosos, en los que es absorbido para a formar parte de su estructura.

Las principales fuentes de potasio son las rocas evaporitas, los feldespatos potásicos y otros silicatos así como las arcillas y algunas micas. También pueden aportar potasio las descargas industriales y el uso de fertilizantes.

La Figura 4.10 muestra la configuración de valores de potasio obtenidos del análisis de muestras. En la Tabla 4.5 se enlistan los aprovechamientos que resultaron con más altos contenidos de potasio. De la figura se observa que las mayores concentraciones se dan al sur y sureste, en las cercanías de San Francisco del Rincón, con otras zonas notorias al este de Manuel Doblado y alrededores de Abasolo. Otro sitio anómalo se observa hacia la parte norte de la subcuenca (M057; El Carrión).

Tabla 4.5 Aprovechamientos muestreados con el mayor contenido potasio.

MUESTRA No.	COORD. X	COORD. Y	POTASIO ppm	APROVECHAMIENTO	LOCALIDAD
152	232249	2268303	32	Pozo (Agua potable) s/c	Huitzatarito, Abasolo
004	200203	2302748	33	Pozo (agua potable) / 137	Ejido Los Salados
143	206673	2326497	34	Noria 455	San Roque de Montes.
130	231930	2269072	37	Pozo (Agua potable) 1275	Estación Abasolo
094	243052	2263953	37	Pozo (Agua potable)	Tinaja de Negrete
144	207921	2327319	40	Noria La Escondida 788	San Francisco del Rincón
148	201090	2317927	40	Pozo (Agrícola) 234	San Bernardo, Purísima
057	204597	2342736	42	Pozo (riego)	El Carrión
123	203940	2323729	45	Río Turbio	Entre El Maguey y Sn. Fco. Del R.
059	201290	2321619	90	Noria (uso doméstico) / G-45	San Bernardo

En la primera zona mencionada las concentraciones anómalas de potasio (y otros varios elementos) sugieren contaminación por el uso de agroquímicos y descargas urbanas e industriales. En otros casos el origen puede involucrar la mezcla de remanentes hidrotermales con agua de reciente infiltración, sin descartar la influencia de actividades humanas.

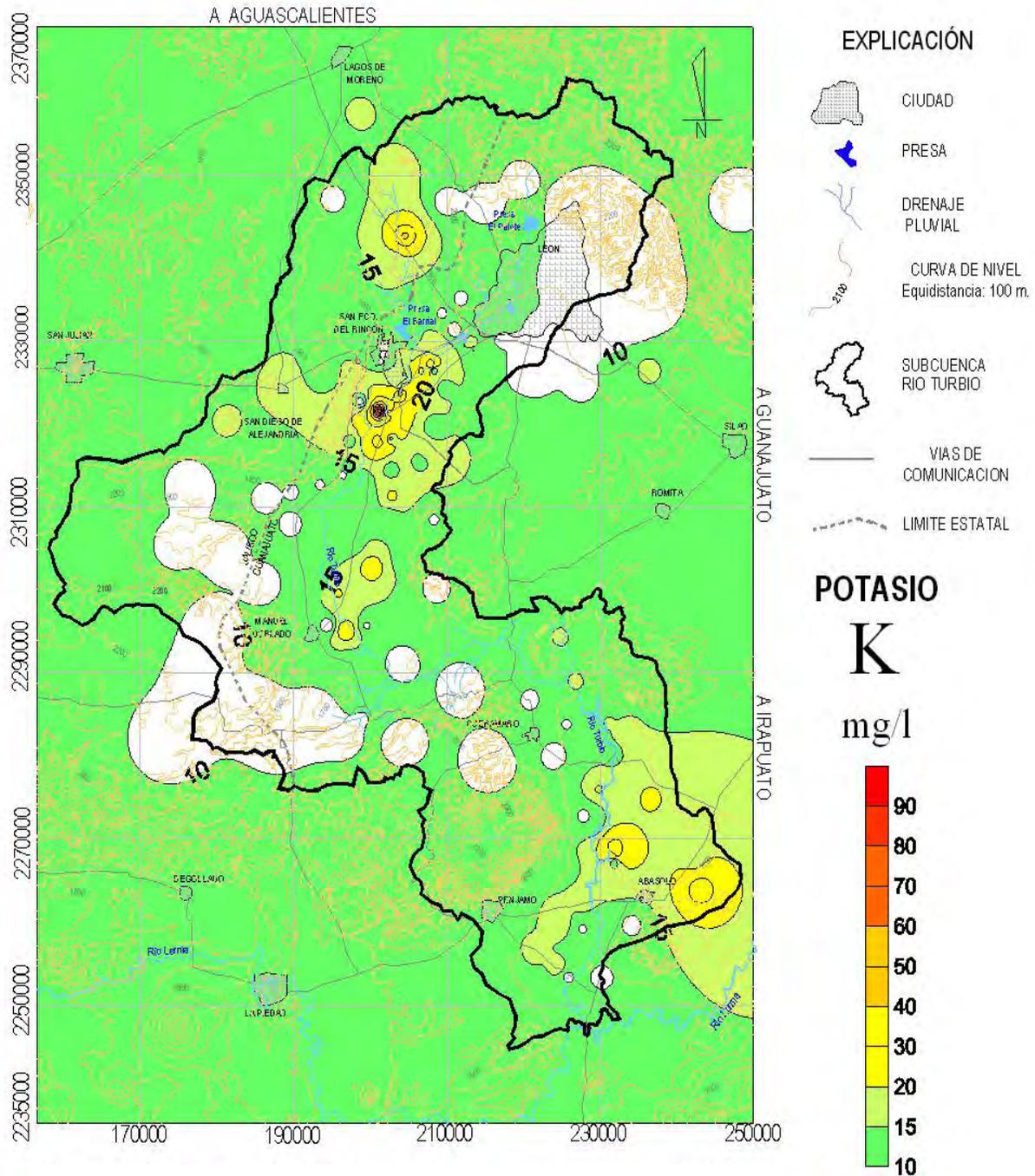


Figura 4.10 Concentración de potasio en el agua subterránea.

Cloruros

Las fuentes naturales de cloruros en el agua subterránea son principalmente la disolución de minerales evaporíticos, como la halita (NaCl), la intrusión salina en zonas costeras y la precipitación (el agua de lluvia es ligeramente clorurada, con contenidos de hasta 10 ppm). Otras fuentes menos frecuentes son las salmueras intercontinentales y remanentes hidrotermales. Las fuentes no naturales incluyen a las descargas urbanas e industriales.

En zonas donde no existen fuentes naturales de cloruros, las altas concentraciones suelen indicar algún grado de contaminación antropogénica por la presencia de aguas residuales.

En la Subcuenca del Río Turbio, la geología no muestra la presencia de depósitos ni rocas evaporíticas cuya extensión y volumen sea relevante. Las mayores concentraciones de cloruros en el agua subterránea se restringen a escasos focos cercanos a algunos centros poblacionales, como León, San Francisco del Rincón y Pénjamo. La Figura 4.11 muestra zonas al suroeste y noreste de San Francisco del Rincón donde se presentan valores de entre 200 y 900 mg/l.

Otras concentraciones altas de cloruros se ubican en las cercanías del Río Turbio y de las ciudades San Francisco del Rincón y León. Dada su distribución y ausencia evaporitas, los altos valores de cloruros son atribuibles a descargas urbanas e industriales al Río Turbio. En el resto del área varios aprovechamientos resultaron con contenidos de cloruros por encima de las 10–15 ppm, que se atribuyen al agua pluvial. Estas muestras se ubican cerca del Río Turbio, con escasas excepciones.

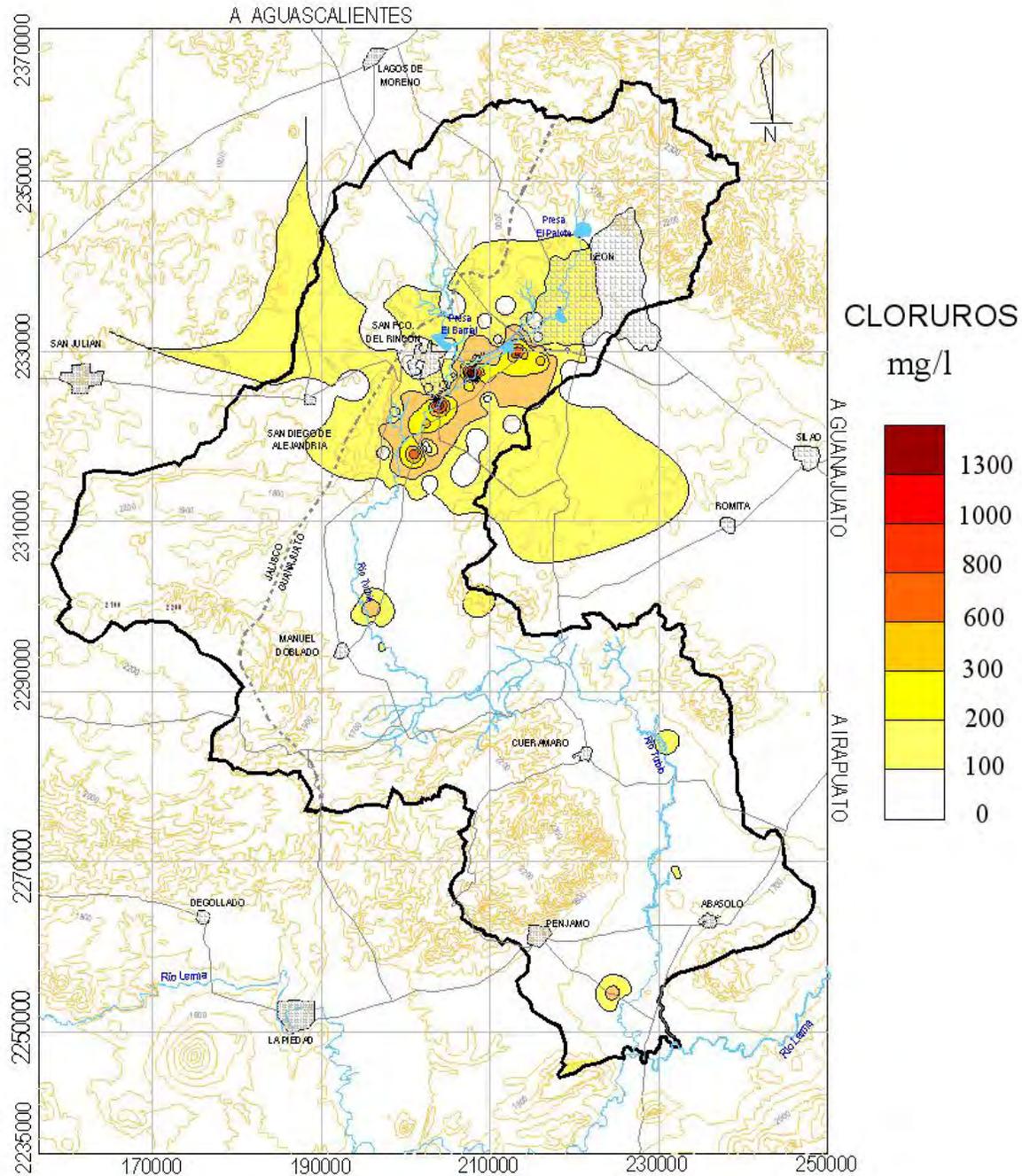


Figura 4.11 Concentración de cloruros en el agua subterránea.

Sulfatos

Los sulfatos se encuentran en aguas naturales en un amplio intervalo de concentraciones. Agua de laboreo de minas y de descargas industriales contienen grandes cantidades de sulfatos provenientes de la oxidación de la piritita y del uso del ácido sulfúrico. De manera natural la principal fuente de sulfatos es disolución de sedimentos evaporíticos, particularmente el yeso y la anhidrita. Intrusión salina marina e hidrotermalismo también son fuentes de sulfatos. La intensa actividad agrícola puede aportar también sulfatos por el uso de fertilizantes.

En la subcuenca del Río Turbio no se han reconocido fuentes naturales de sulfatos con un impacto regional, sólo se han identificado en algunos sitios manifestaciones termales que aportan pequeñas cantidades de estas sales. La presencia de sulfatos en el agua subterránea del área no es muy marcada, sin embargo, del muestreo realizado en toda la subcuenca, resultaron algunos aprovechamientos con concentraciones de importancia. Los valores obtenidos van desde trazas hasta un máximo de 347ppm (Tabla 4.6). Las mayores concentraciones de sulfatos se presentan en aprovechamientos muy cercanos al cauce del Río Turbio. La Figura 4.12 muestra la distribución de sulfatos en el área de estudio.

Tabla 4.6 Aprovechamientos muestreados con el mayor contenido de sulfatos.

Muestra No.	Coord. X	Coord. Y	Sulfatos ppm	Tipo de Aprovech.	Localización	Municipio
004	200203	2302748	101.74	Potable	Ejido Los Salados	Manuel Doblado, Gto.
008	196009	2297941	128.81	Riego	Granja. La Villa Rica	Manuel Doblado, Gto.
075	196594	2295149	130.033	Riego y Doméstico	La Gloria	Manuel Doblado, Gto.
144	207921	2327319	135.39	Riego	La Escondida	San Fco. del Rincón, Gt.o.
097	231101	2284030	156.83	Potable	Cerrito Agua Caliente	Cuerámara, Gto.
152	232249	2268303	186.57	Potable	Huizatarito	Abasolo, Gto.
059	201290	2321619	252.376	Doméstico	San Bernardo	Purísima del Rincón, Gto.
130	231930	2269072	293.480	Potable	Estación	Abasolo, Gto.
074	196956	2295184	347.572	Potable	La Gloria	Manuel Doblado, Gto.

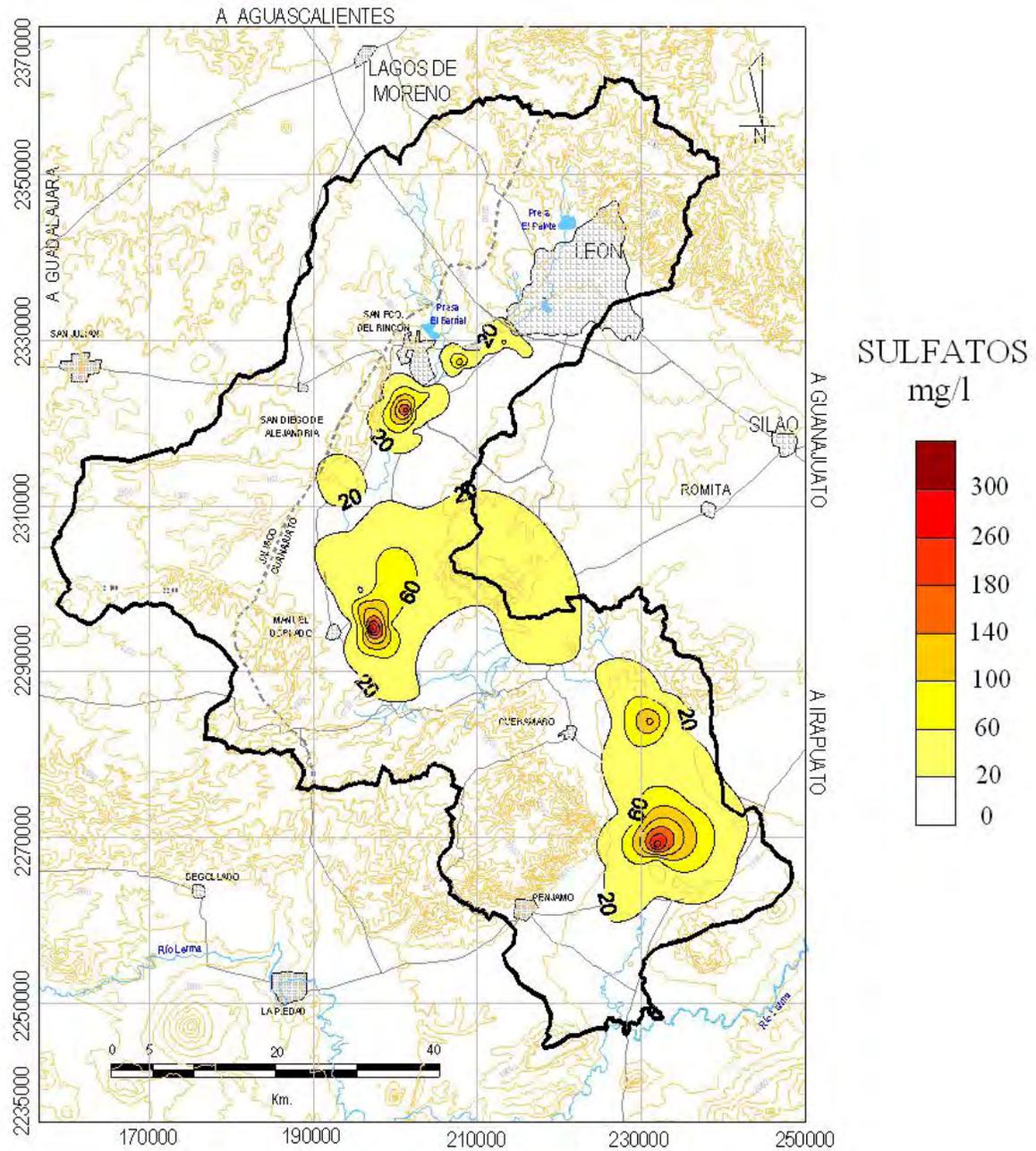


Figura 4.12 Concentración de sulfatos en el agua subterránea.

De la configuración de sulfatos sobresalen tres zonas con valores significativos. La primera se extiende a lo largo de las márgenes del Río Turbio, entre San Francisco del Rincón y León, lo mismo que hacia el sur y al sureste de la primer localidad. Esta zona presenta concentraciones moderadas de hasta 180 pmm. La segunda zona se extiende hacia el oriente de Manuel Doblado y presenta valores de hasta 347 ppm. La tercera se localiza hacia el norte de Abasolo, a lo largo del curso del mismo Río Turbio.

En todos los casos existe posibilidad de que, en parte, el origen de los sulfatos provenga del empleo de agroquímicos, particularmente fertilizantes. Otra posibilidad la constituyen las descargas urbanas e industriales como puede ocurrir en la zona sureste de la ciudad de León. Otra componente importante está representada por el pozo de la muestra M097 (Cerrito de Agua Caliente) que pone de evidencia fuentes locales de origen hidrotermal.

Nitratos

Los nitratos son contaminantes comunes del agua subterránea producto de la oxidación del nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico contenido en fertilizantes y materia orgánica es transformado en NH_4 por microorganismos. En el suelo, cuando existen condiciones de oxidación, el amonio es convertido en nitratos, este es un proceso al que se le llama nitrificación.

Las principales fuentes de nitratos incluyen a las aguas residuales, desechos de granjas, existencia de fosas sépticas, basureros y el extensivo empleo de fertilizantes en la agricultura. Los nitratos tienen una alta solubilidad en agua y no son adsorbidos en el suelo, por lo que pasan fácilmente al agua.

La Figura 4.13 muestra una configuración de isolíneas con la distribución de nitratos en la subcuenca del río Turbio. La Tabla 4.7 presenta los aprovechamientos muestreados con mayor contenido de nitratos. Contrariamente a lo esperado, la presencia de nitratos en las aguas subterráneas de la subcuenca es muy baja. Solamente en dos aprovechamientos (M144 y M067) las concentraciones excedieron la norma para agua de consumo humano. Como se aprecia en la tabla, una noria de la comunidad de La Escondida (clave 788 de la red de monitoreo de calidad de agua,

CEAG) al oriente de San Francisco del Rincón fue el aprovechamiento que resultó con mayor contenido de nitratos. En la misma zona se localizan otros aprovechamientos con valores elevados, aunque se encuentran por debajo del límite permisible. Por su ubicación, entre las ciudades de León y San Francisco del Rincón, con el cauce del Río Turbio al centro, puede pensarse en las descargas urbanas e industriales como la principal fuente del contaminante, sin dejar de considerar la influencia de los fertilizantes.

Tabla 4.7. Aprovechamientos muestreados con el mayor contenido de nitratos.

Muestra No.	Coord. X	Coord. Y	Nitratos ppm.	Tipo de Aprovech..	Localización	Municipio
075	196594	2295149	19.817	Riego	La Gloria	Manuel Doblado, Gto.
002	202903	2311430	21.13	Potable	Peñuelas	San Fco. del Rincón, Gto.
005	201089	2317929	23.73	Riego	Rcho. Alejandro Mquez	San Fco. del Rincón, Gto.
010	189895	2307907	26.81	Potable	San Andrés de Jalpa	Purísima del Rincón, Gto.
009	206504	2315753	32.84	Riego	Presa Las Tortugas	San Fco. del Rincón, Gto.
059	201290	2321619	34.325	Domestico	San Bernardo	Purísima del Rincón, Gto.
067	208553	2300395	61.813	Potable	San José de Otates	Manuel Doblado, Gto.
144	207921	2327319	199.00	Uso doméstico	La Escondida	San Fco. del Rincón, Gto.

En la zona descrita existe importante actividad industrial que en algunos casos representa importantes fuentes de contaminación.

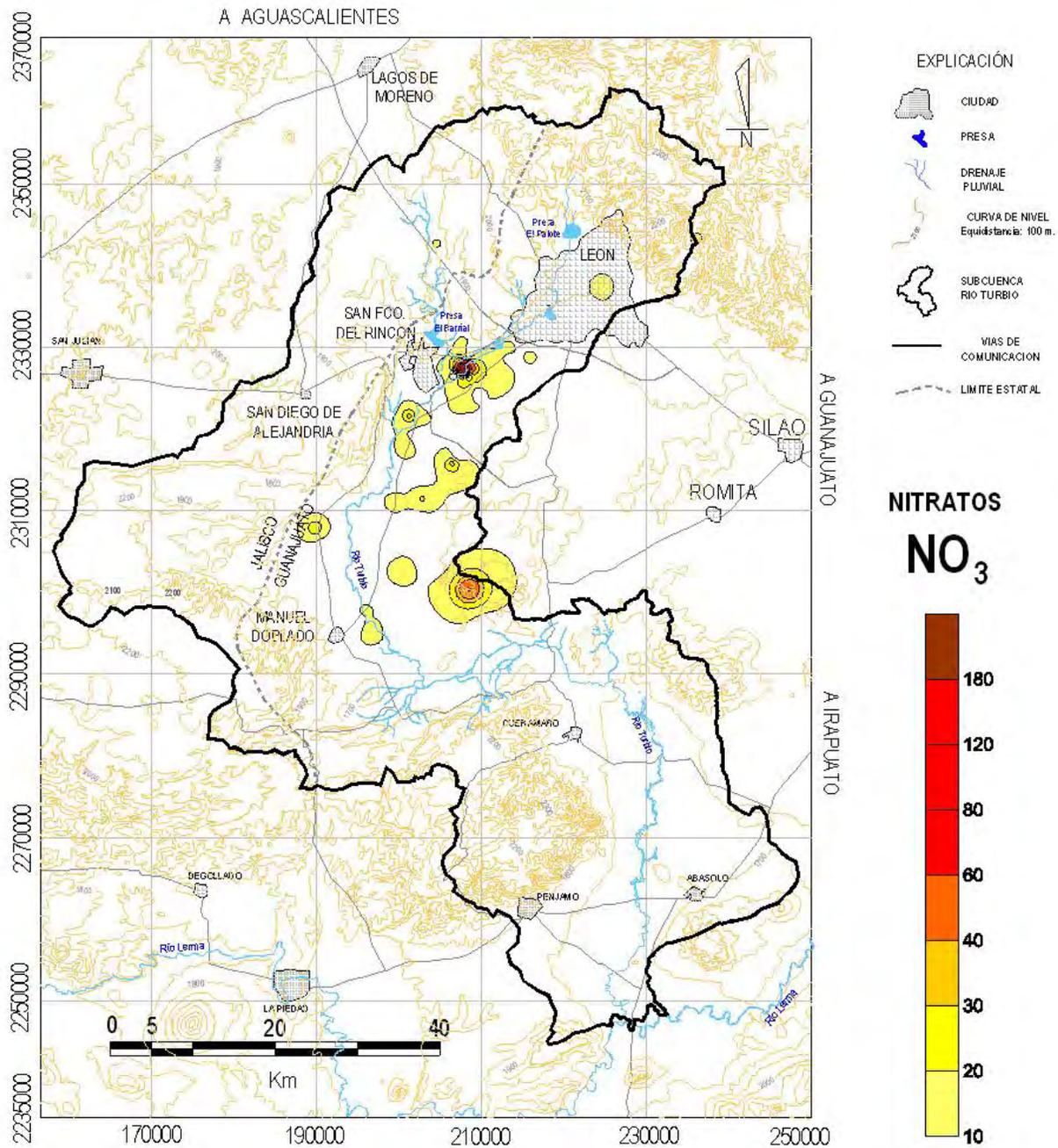


Figura 4.13 Concentración de nitratos en el agua subterránea.

Carbonatos y Bicarbonatos

Por lo común, la principal fuente de carbonatos del agua subterránea es la disolución de calizas, dolomías y depósitos evaporíticos. En la Subcuenca del Río Turbio no hay una presencia importante de carbonatos en las agua subterráneas, con excepción de algunos aprovechamientos aislados que presentan valores más bien bajos. Sólo 11 de las 168 muestras reportaron contenidos de carbonatos que van desde 4.8 a 33.6 mg/l, muy por debajo de los límites máximos permisibles recomendados para uso agrícola y consumo humano. Casi todas las muestras resultantes con algún contenido de carbonatos se localizan en las cercanías del cauce del Río Turbio y ninguna de ellas parece estar asociada a los escasos afloramientos de caliza del área, con excepción probablemente de la M135 tomada en la Presa de Silva, a unos 5km al sur de San Francisco del Rincón y que recibe los escurrimientos de las lomas cercanas a San José de la Calera, donde existen afloramientos de caliza.

Los bicarbonatos son de las sales más abundantes en las aguas subterráneas, se generan en gran parte a partir de la disolución del CO₂ atmosférico. Son sales muy solubles por lo que difícilmente precipitan; comúnmente pueden encontrarse en concentraciones de hasta 300 ppm y en algunos casos 800 ppm o más. La disolución de rocas carbonatadas como calizas y dolomías es también fuente importante de bicarbonatos (y carbonatos principalmente), aunque en general el ácido carbónico del agua meteórica ataca en alguna medida a la mayoría de las rocas, como a las rocas volcánicas que predominan en la Subcuenca del Río Turbio.

En la Figura 4.14 puede observarse que las mayores concentraciones se ubican en pequeños focos a lo largo del cauce del Río Turbio; al sur de San Francisco del Rincón; muestras M123 (1,115 ppm), M144 (720 ppm), M059 (907 ppm) y M060 (625ppm); al noreste de Manuel Doblado, M008 de la granja La Villa Rica. También al oriente de Cuerámara en el poblado de Cerrito de Agua Caliente (M097 con 1,019 ppm) y en las cercanías de Pénjamo y Abasolo (Huizatarito), M152 con 707 ppm.

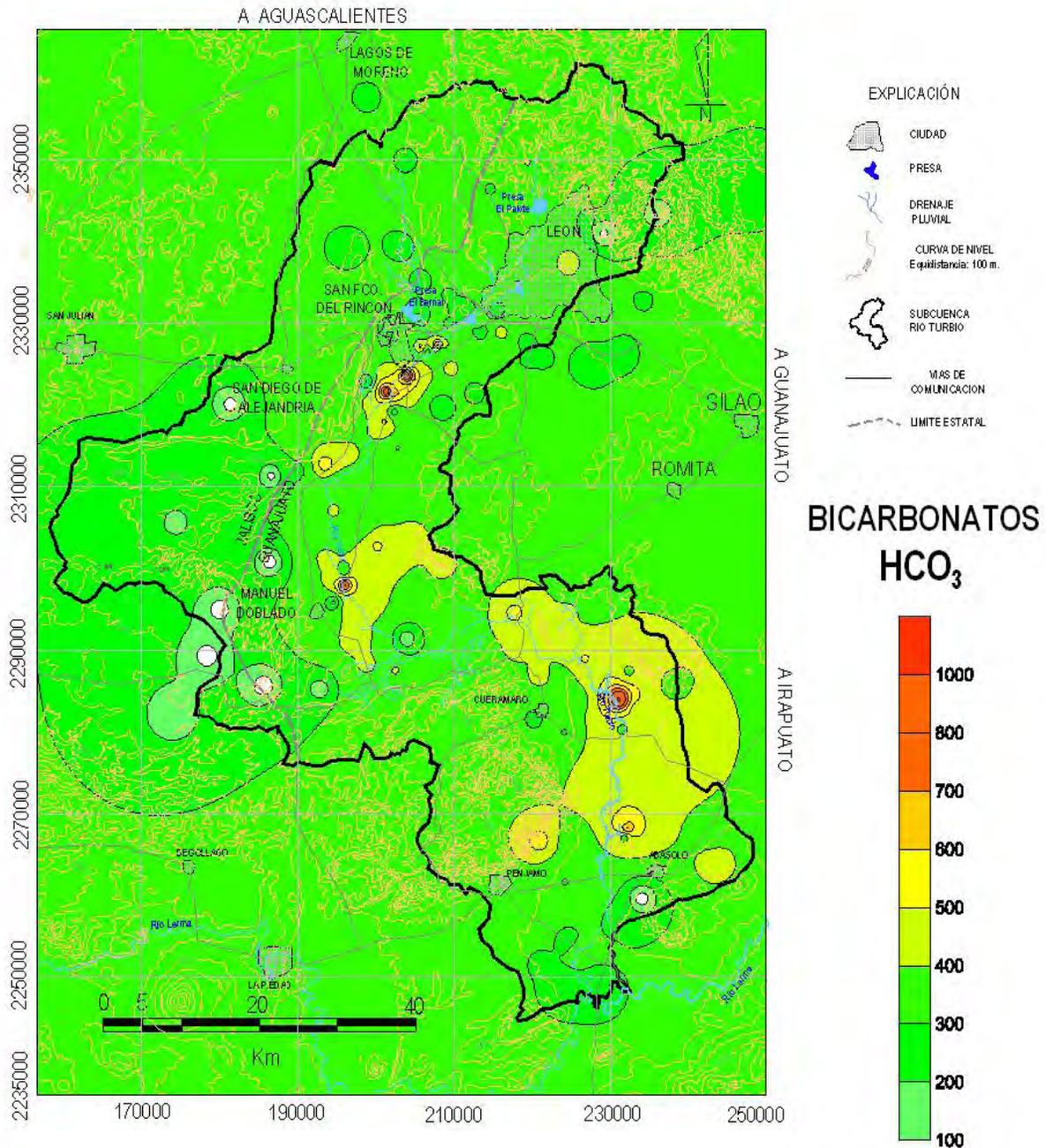


Figura 4.14 Concentración de bicarbonatos en el agua subterránea.

Todos los pozos descritos son someros, ubicados en las cercanías del Río Turbio, por lo que es muy probable que se encuentren influenciados por éste, ya que recibe las descargas industriales y urbanas de una importante zona poblacional que incluye a las ciudades de León y San Francisco del Rincón y varios poblados menores.

Caso particular es M097, Cerrito de Agua Caliente, que proviene de un pozo somero para abastecimiento poblacional en la comunidad. Como ya se anotó, el agua de este aprovechamiento es termal y presenta valores anómalos de casi todos los parámetros analizados.

Las aguas subterráneas en la subcuenca del Río Turbio involucran mezclas de agua meteórica de reciente infiltración con aguas más profundas y de mayor tiempo de residencia proveniente de zonas más alejadas. Estas últimas dan evidencia de la existencia de flujos regionales que afloran localmente. A estos fenómenos se suma la afectación que ocasionan las actividades humanas en el área, la intensa agricultura y las descargas urbanas e industriales.

Otros Metales y Cationes.

Además de los iones mayores, en la subcuenca del río Turbio se analizaron 26 metales y cationes más. De estos se encontró una presencia significativa en seis casos: As, Se, Ba, P, Ni, Ti y Bi. De forma menos importante y muy local se detectó también la presencia de Cr, Mn, Mo y Al. Un número menor de muestras (de 10 a 25 muestras) fueron analizadas también por Hg, Li, B y Si; revelando su presencia en el área.

4.2.1. Familias y calidad del agua

El establecimiento del comportamiento y calidad del agua subterránea se basa en su comparación con indicadores comunes que vayan de acuerdo con los requerimientos de uso de dicha agua, sin embargo, cuando se trata de analizar un acuífero es necesario tener en cuenta la evolución de la calidad de agua y en caso necesario tomar medidas para frenar e incluso invertir alguna tendencia negativa que afecte las condiciones naturales del acuífero.

En la Figura 4.15 se muestra un diagrama de Piper con las muestras del agua subterránea y superficial del área de estudio, donde se observan las concentraciones de los iones mayores así como un panorama global de las principales familias de agua. Cabe mencionar que sólo se graficaron 159 de los 168 aprovechamientos muestreados, esto debido a que nueve de ellos arrojaron un balance iónico superior a $\pm 7.5\%$, éstos últimos se presentan en la Figura 4.16.

La mayoría del agua de los aprovechamientos muestreados tiene comportamiento sódico-bicarbonatado, mientras que en menor proporción se encuentran tendencias a cálcica-bicarbonatada y magnésica-bicarbonatada. Los cuatro elementos antes mencionados sobresalen en la mayoría de las muestras, por lo que son los más comunes del área; en proporción menor se encuentra el ion cloruro, relacionado sólo con diez muestras, de las cuales cinco son superficiales (Figura 4.15).

El comportamiento generalizado que refleja la hidrogeoquímica de la subcuenca en estudio es parecido al de la Subcuenca del Río Guanajuato, donde el COREMI (2004) establece que la mayoría del agua de los pozos tiene comportamiento del tipo sódico-bicarbonatado, además el Ca, Mg, Na y HCO_3 son los componentes principales y más abundantes para la clasificación de aguas subterráneas, mientras que en una menor proporción se encuentran los sulfatos.

Así, es factible proponer que las zonas acuíferas de ambas subcuencas funcionan bajo sistemas de flujo subterráneo semejantes, como los expresados en la Figura 3.18. La recarga natural para ambas subcuencas se da a través de unidades hidrogeológicas con permeabilidades altas y medias, donde sedimentos cuaternarios de composición

Con el programa Aquachem 4.0 se elaboraron diagramas de Stiff (Figura 4.17) y a cada aprovechamiento muestreado se le determinó el tipo de agua que lo caracteriza. Se identificaron 18 tipos de agua diferentes en toda la zona de estudio, incluyendo muestras de agua subterránea y superficial (Figura 4.18), la gran variedad de clasificaciones de agua que hay en la zona permite sugerir una intensa relación entre la geología de la zona y el agua que fluye a través de la misma, donde procesos y reacciones naturales, además de la contaminación antropogénica, hace que aumenten o disminuyan las concentraciones de iones principales.

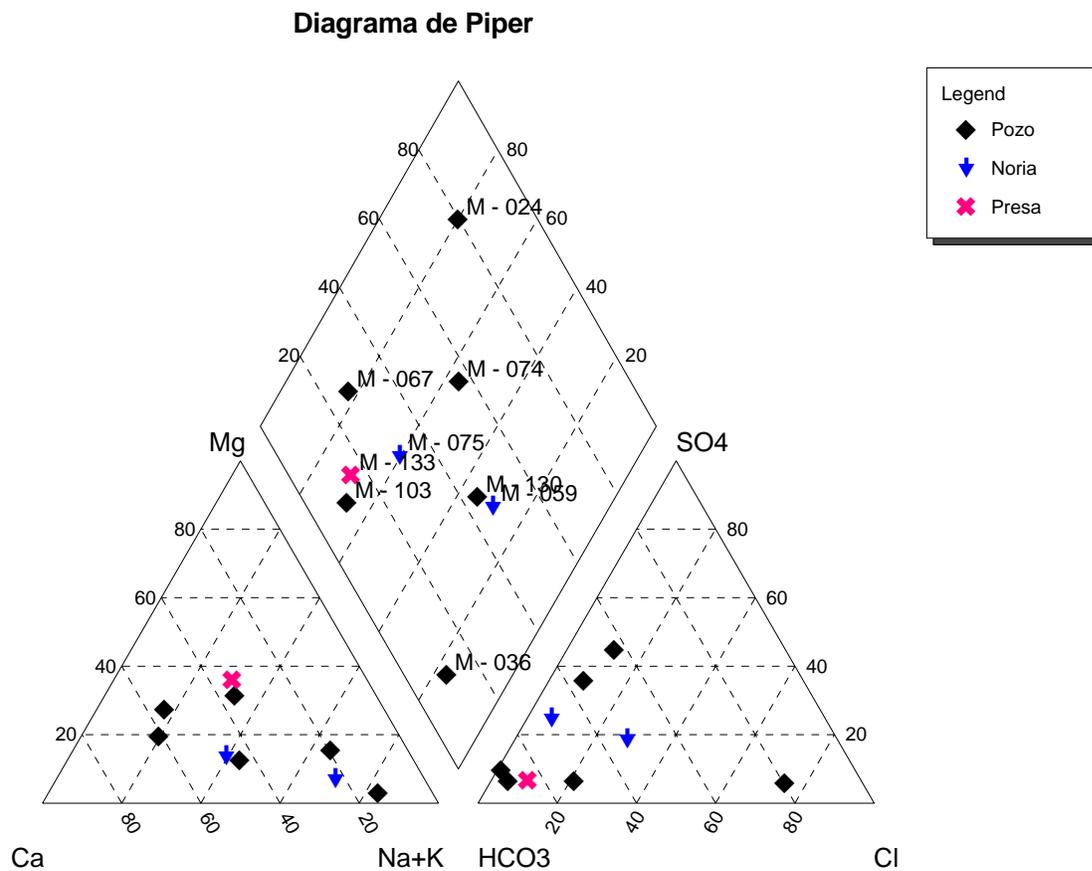


Figura 4.16 Comportamiento hidrogeoquímico de muestras con balance iónico mayor a ± 7.5 %.

DIAGRAMAS DE STIFF

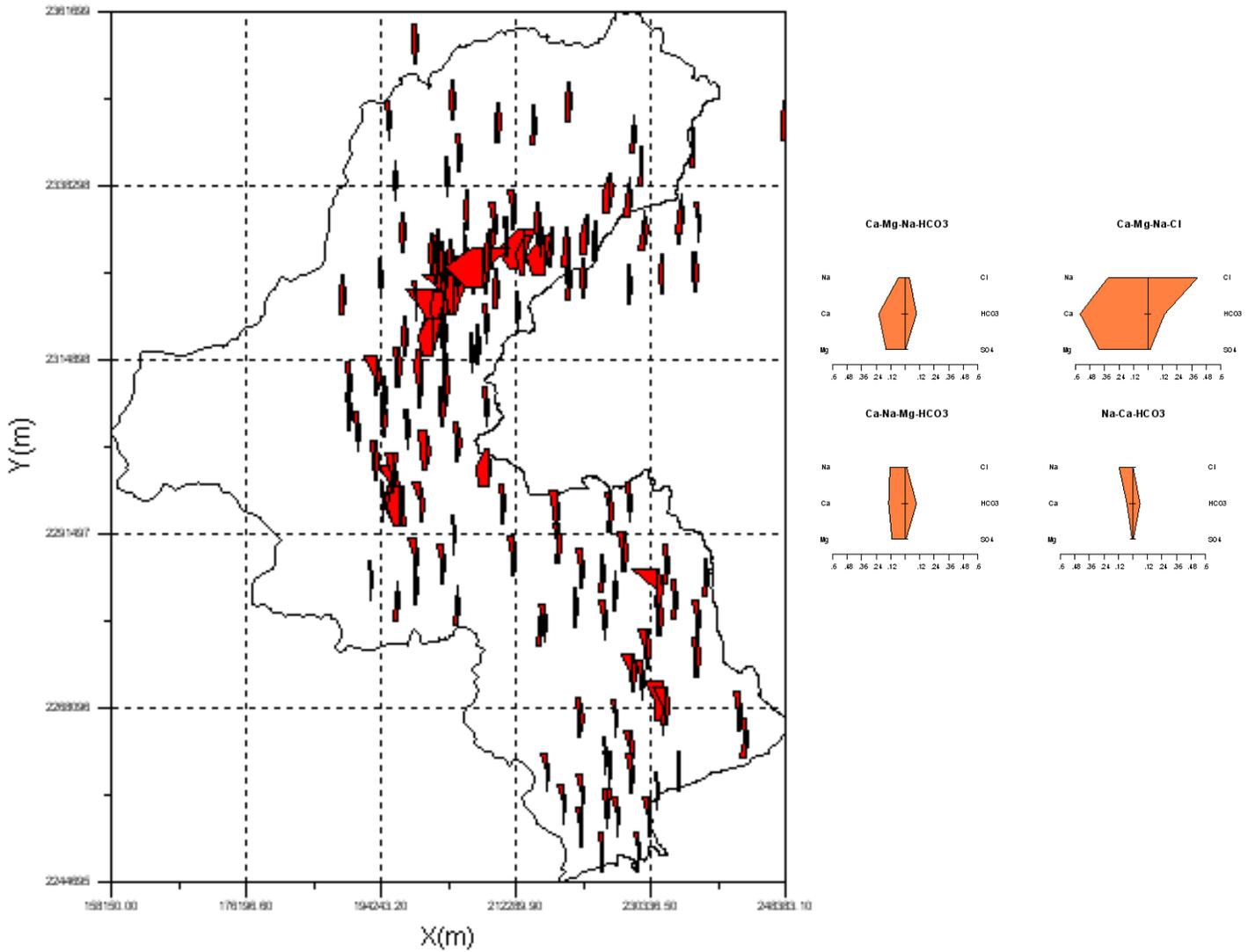


Figura 4.17 Representación gráfica de los Diagramas de Stiff en el área de estudio

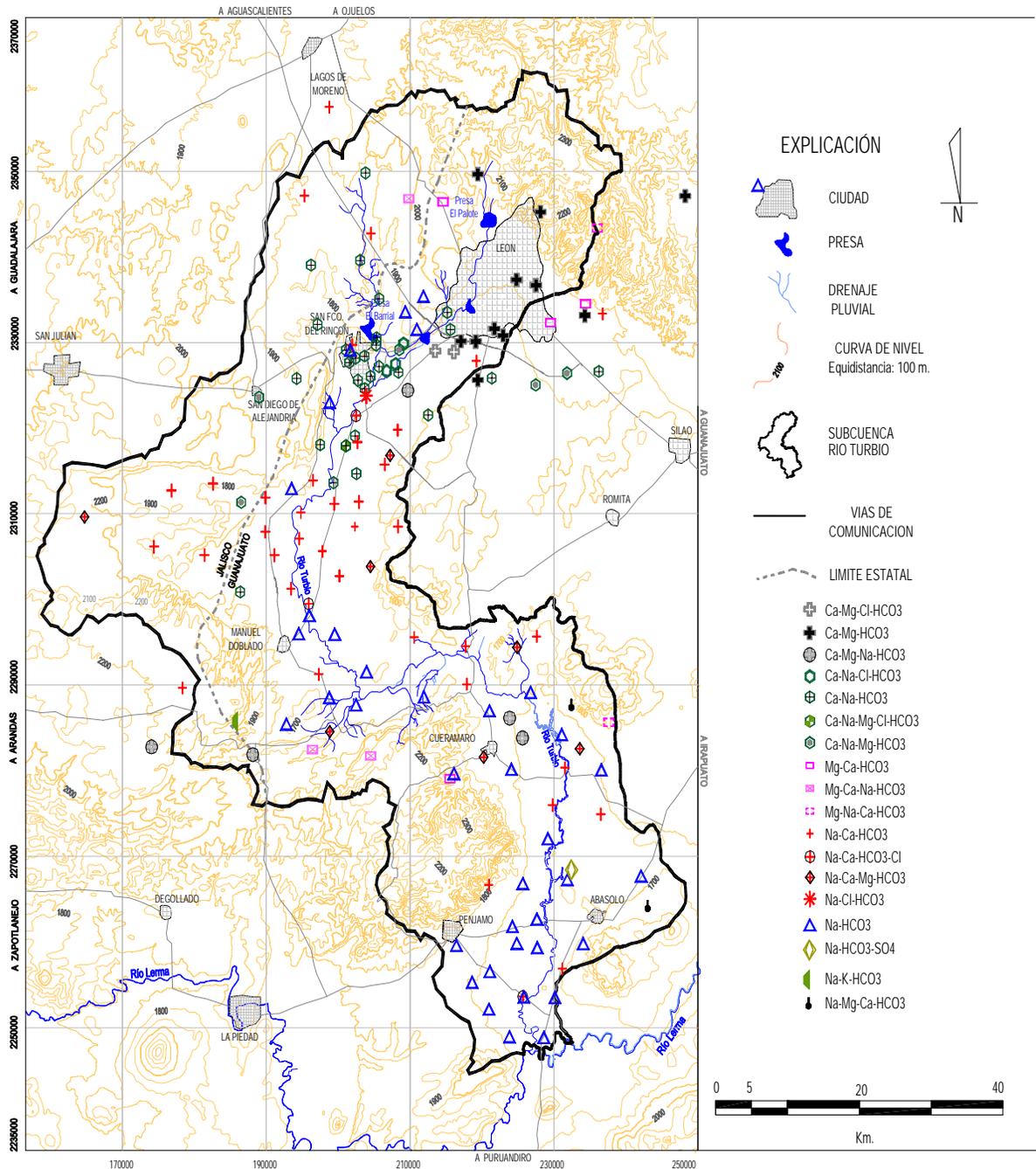


Figura 4.18 Aprovechamientos muestreados y tipo de agua correspondiente.

Dada la diversidad de tipos de agua y para fines prácticos de interpretación, se optó por integrarlos y agruparlos en familias y subfamilias (Figura 4.19).

A continuación se hace una breve descripción de las principales familias de agua subterránea que predominan en la zona de estudio.

Cálcica-Magnésica-Bicarbonatada ($Ca-Mg-HCO_3$), se ubica al norte de la subcuenca, desde el pie de la Sierra de Guanajuato, al norte de León, extendiéndose al sur y suroeste de la misma ciudad con orientación preferente noreste-suroeste. Se compone de dos subfamilias, $Ca-Mg-Cl-HCO_3$ y $Ca-Mg-Na-HCO_3$, donde a la primera se integra el ion Cloruro debido a la afectación que ejercen las zonas urbanas, en específico al suroeste de León, donde cuerpos de agua como el represo San Germán provocan que se infiltren agentes contaminantes al subsuelo y el movimiento del flujo subterráneo, en dirección sureste atraído por el cono de abatimiento de la zona La Muralla (Figura 3.17), se encargue de esparcirlos y transportarlos a otras zonas del acuífero.

Cálcica-Sódica-Bicarbonatada ($Ca-Na-HCO_3$), esta familia se distribuye principalmente al norte, sur y este de la Ciudad de San Francisco del Rincón, además en una franja que se extiende desde San Diego de Alejandría en dirección noreste hasta el norte de la Presa el Barrial. Son tres las subfamilias que la integran, $Ca-Na-Cl-HCO_3$, $Ca-Na-Mg-Cl-HCO_3$ y $Ca-Na-Mg-HCO_3$, donde los iones Cloruro y Magnesio se integran a la tendencia principal; al igual que con la familia anterior, la ubicación geográfica de la subfamilia que incluye al ion Cloruro coincide con las márgenes del Río Turbio al oriente y sur de San Francisco del Rincón (Figura 4.19).

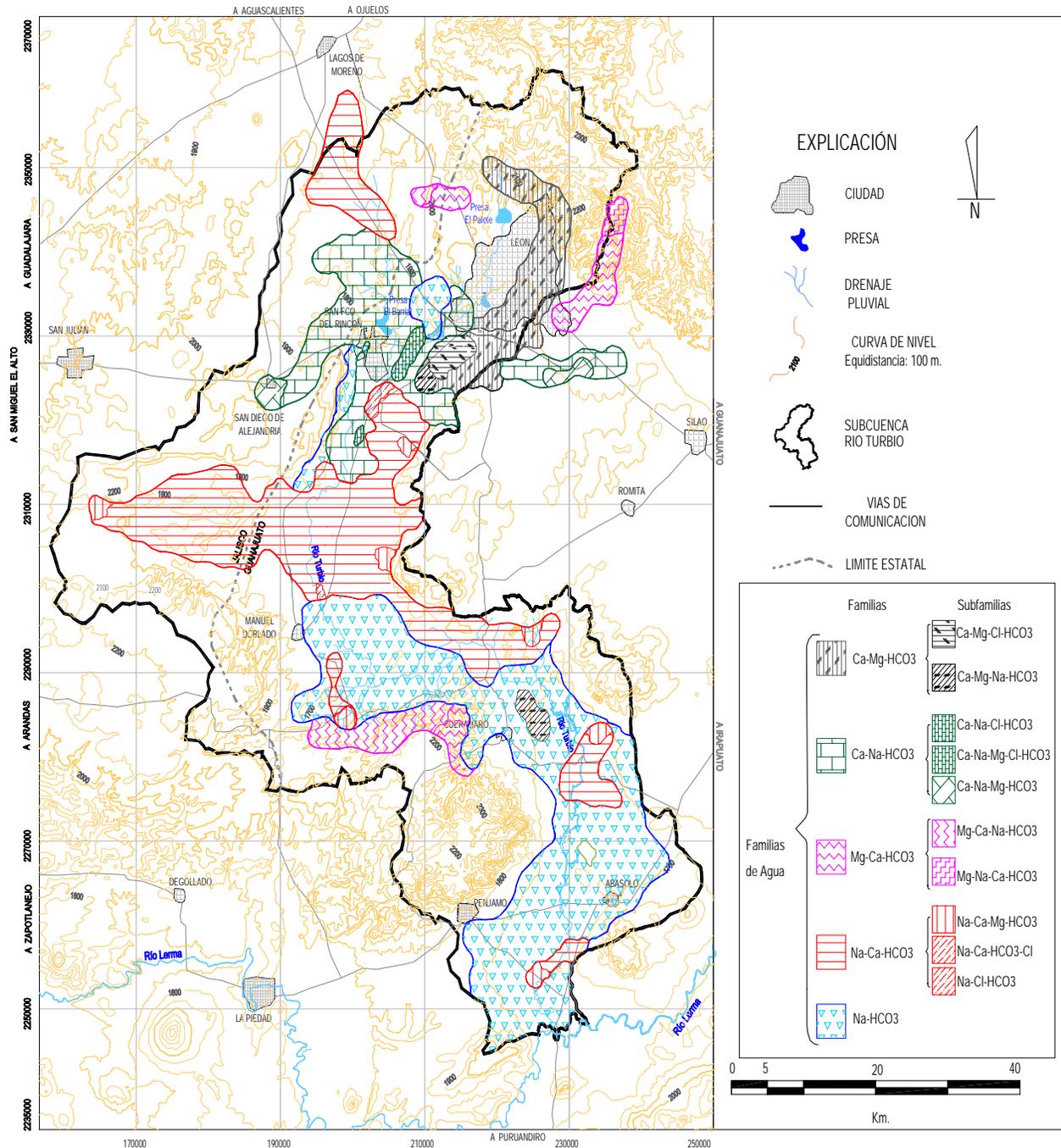


Figura 4.19 Distribución de las principales familias de agua.

Usualmente, el origen de esta familia ($(Ca-Na-HCO_3)$), se atribuye a la presencia de rocas carbonatadas, sin embargo, para la zona de estudio y como se muestra en el Plano Geológico, tales rocas son poco comunes en el área, por lo que el origen de los carbonatos puede estar relacionado a rocas volcánicas donde ocurre disolución de plagioclasas cálcicas en concentraciones bajas, pero relativamente elevadas respecto a sodio y el magnesio. Cabe mencionar que cuando los componentes principales de una familia son el Ca y HCO_3 , ésta será típica de agua que fluye a través de sedimentos aluviales, tal es el caso de areniscas y conglomerados terciarios que afloran en la parte norte y noroeste de San Francisco del Rincón, y que forman parte de la Unidad Hidrogeológica II (Figura 3.1) que a su vez constituye una de las principales zonas de recarga natural que aporta agua al acuífero (Figura 3.16).

Magnésica Cálcica Bicarbonatada ($Mg-Ca-HCO_3$), tiene menor distribución que el resto de las familias y se concentra principalmente al norte de la subcuenca, al noreste de León, donde forma una franja con orientación NE-SW, al poniente de la Presa El Palote y de Cuerámaro, en ésta última zona formando una franja con dirección E-W, coincidiendo con la zona de ladera de montaña. A la familia la integran dos subfamilias ($Mg-Ca-Na-HCO_3$, $Mg-Na-Ca-HCO_3$), las cuales sólo tienen pequeñas variaciones entre el calcio y el sodio en relación a los componentes principales, a diferencia de las familias anteriores, el ion Cloruro no está presente por ser de reciente infiltración.

Sódica Cálcica Bicarbonatada ($Na-Ca-HCO_3$), se concentra en la zona centro occidental del área, está compuesta por tres subfamilias ($Na-Ca-Mg-HCO_3$, $Na-Ca-HCO_3-Cl$ y $Na-Cl-HCO_3$), que al igual que en los casos anteriores se ubican en los alrededores de la familia principal, cubriendo zonas pequeñas. La distribución de esta familia coincide con una de las principales zonas de recarga de la subcuenca, la cual es abastecida por medio de sistemas de flujo intermedios y regionales (Figura 3.18), mismos que se transportan a través de riolitas y tobas riolíticas del Terciario, además de andesitas basálticas, también terciarias. La predominancia del Sodio en esta familia puede ser atribuido a la disolución de feldespatos sódicos, particularmente albita y oligoclasa, minerales abundantes en rocas riolíticas, que tienen amplia distribución en la

zona (figura 2.1), además de que tienen una gran presencia en el subsuelo, constituyendo en su mayoría la parte fracturada del acuífero regional, con grosores que alcanzan algunas centenas de metros (figuras 3.2 a 3.4).

El ion Cloruro forma parte de los componentes principales de dos subfamilias, si bien es cierto que éste no necesariamente involucra contaminación antropogénica, para la zona de estudio la distribución del mismo está limitada a las márgenes del Río Turbio, lo que hace permite suponer un origen no natural.

Sódico Bicarbonatada (Na-HCO_3), la familia tiene amplia distribución en la subcuenca, desde Manuel Doblado hasta la confluencia de los Ríos Turbio y Lerma. El origen de ésta agua se relaciona con un sistema de recarga de ladera, tomando su composición al pasar como agua infiltrada a través de rocas volcánicas; es probable que este tipo de agua se relacione a un medio de circulación profunda ó intermedia relacionado a altas temperaturas del agua subterránea el cual circulando a través de unidades riolíticas incrementa la concentración de sodio.

4.2.2. Características isotópicas de la zona de estudio.

Isótopos Ambientales

En hidrología el término “isótopos ambientales” es generalmente usado para describir isótopos que ocurren de manera natural en el ciclo hidrológico. La mayoría de las masas de vapor atmosférico que llevan el agua a los continentes se originan en el océano; debido a los diferentes cambios físicos que afectan a los elementos que forman a la molécula de agua, estas masas de vapor estarán empobrecidas en los isótopos pesados (O-18 y D), comparadas con el agua oceánica. Esto se debe principalmente a que el proceso de evaporación en los océanos se lleva a cabo en condiciones fuera del equilibrio e involucra efectos cinéticos y además el proceso de condensación que origina las precipitaciones (castillo R. 1985).

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

El fraccionamiento isotópico durante la condensación en las nubes es un proceso dependiente fundamentalmente de la temperatura a la cual ocurre, (Figura 4.20).

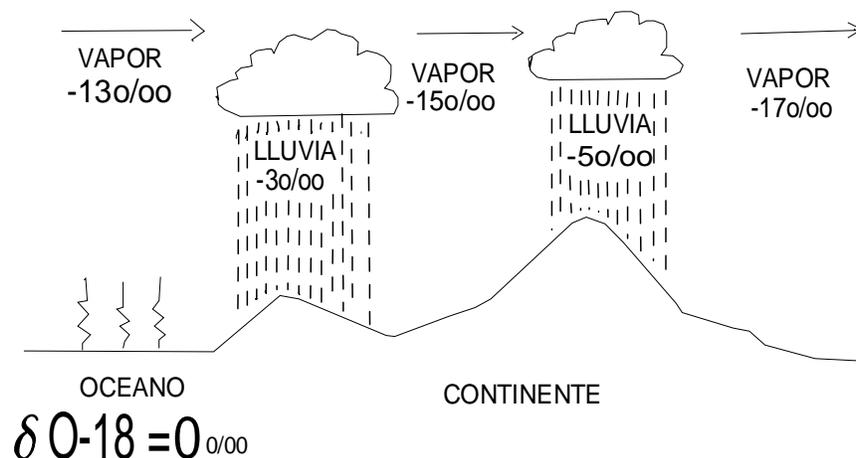


Figura 4.20. Efecto continental, Tomada de Jäger, E. and J.C. Hunziker, 1979

Características isotópicas del agua subterránea y superficial.

Agua Subterránea

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

Agua superficial

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

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

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

Isótopos radioactivos

El tritio es el isótopo radioactivo del hidrógeno, su formación puede ser natural (en la atmósfera) o artificial (ensayos termonucleares o industriales). Su distribución en la precipitación está condicionada por la latitud, proximidad al mar y distancia a fuentes artificiales o zonas de ensayos termonucleares. A inicios de la década de los cincuentas, como consecuencia de una intensa actividad termonuclear, apareció este isótopo de manera artificial, el cual se dispersó en toda la tierra debido a la acción del viento y la lluvia.

Factores anteriores, junto con la desintegración radioactiva, permiten utilizar los contenidos de tritio como indicadores de aguas recientes en los acuíferos y a la vez determinar posibles zonas de recarga natural.

La concentración de tritio se expresa en Unidades de Tritio (U.T.) donde $1 \text{ UT} = 1$ átomo de tritio en 10^{18} átomos de hidrógeno. El valor negativo indica que el resultado analítico es inferior al valor del estándar de referencia para agua sin tritio, lo cual implica que la muestra no contiene tritio ambiental.

4.2.2.1 Análisis de resultados isotópicos.

Ubicar en una grafica parejas ordenadas de ^{18}O vs deuterio sobre una línea meteórica es de gran apoyo para determinar la evolución isotópica del agua, ya que el agua de lluvia generalmente tiene características isotópicas distintas al agua subterránea y superficial

De manera general, los valores que se ubiquen sobre la línea meteórica serán representativos de agua meteórica reciente, cuando estos se encuentren fuera de la línea significa que el agua original fue alterada por diversos efectos, los cuales se observan en la Figura **4.21**.

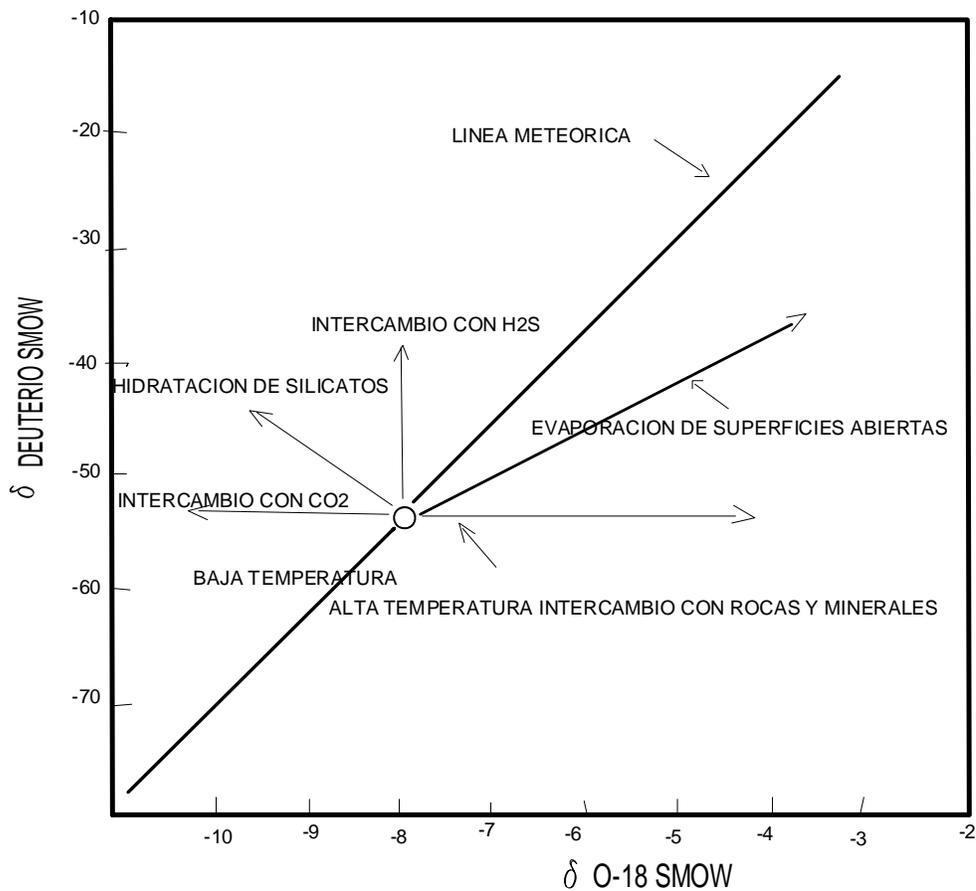


Figura 4.21 Efectos que alteran la composición isotópica del agua.

Para el desarrollo del estudio se utilizó la línea meteórica regional desarrollada para la porción central de México definida por la ecuación

$$\delta D^* = 8 \delta 18O^* + 11 \text{ (Cortés et al., 1997)}$$

la cual es válida para la zona de estudio según lo muestra la Figura 4.22, donde el agua de once estaciones de lluvia recolectadas para este estudio y para el estudio Potencial Geohidrológico del Graben de León (COREMI, 2004) se ubican sobre la línea meteórica.

En la zona de estudio la mayoría de los datos graficados ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) caen distintivamente por debajo de la línea meteórica (Figura 4.23), lo cual indica que ha ocurrido un fraccionamiento secundario o que la mayoría del agua es antigua y fue recargada en un régimen climático distinto que el caracterizado por la línea meteórica definida para la misma zona.

La ubicación de la mayoría de los aprovechamientos muestreados cae bajo la línea meteórica, lo cual pone en evidencia la presencia de agua profunda, así como de agua proveniente de retornos de riego, lo anterior debido a un empobrecimiento de isótopos aunado a efectos de alteración producido por la evaporación.

Es de resaltar el comportamiento isotópico de dos muestras (M140, M166) que se localizan al poniente de la subcuenca en las comunidades San Diego de Alejandría y La Vaquera en el Estado de Jalisco (Figura 4.2), como se puede observar su ubicación con respecto a la línea meteórica regional (Figura 4.22) permite suponer se trata de agua meteórica con características similares a la reciente. Sin embargo por su nulo contenido de tritio se deduce que para ambos casos el agua precipitó antes de 1953 y no experimentó importantes procesos de evaporación antes de su infiltración, que tampoco ha sufrido intercambio isotópico con aguas de características isotópicas distintas, ni con minerales oxigenados de rocas (silicatos o carbonatos), esto último por efecto de temperaturas altas (mayores a 120 °C)

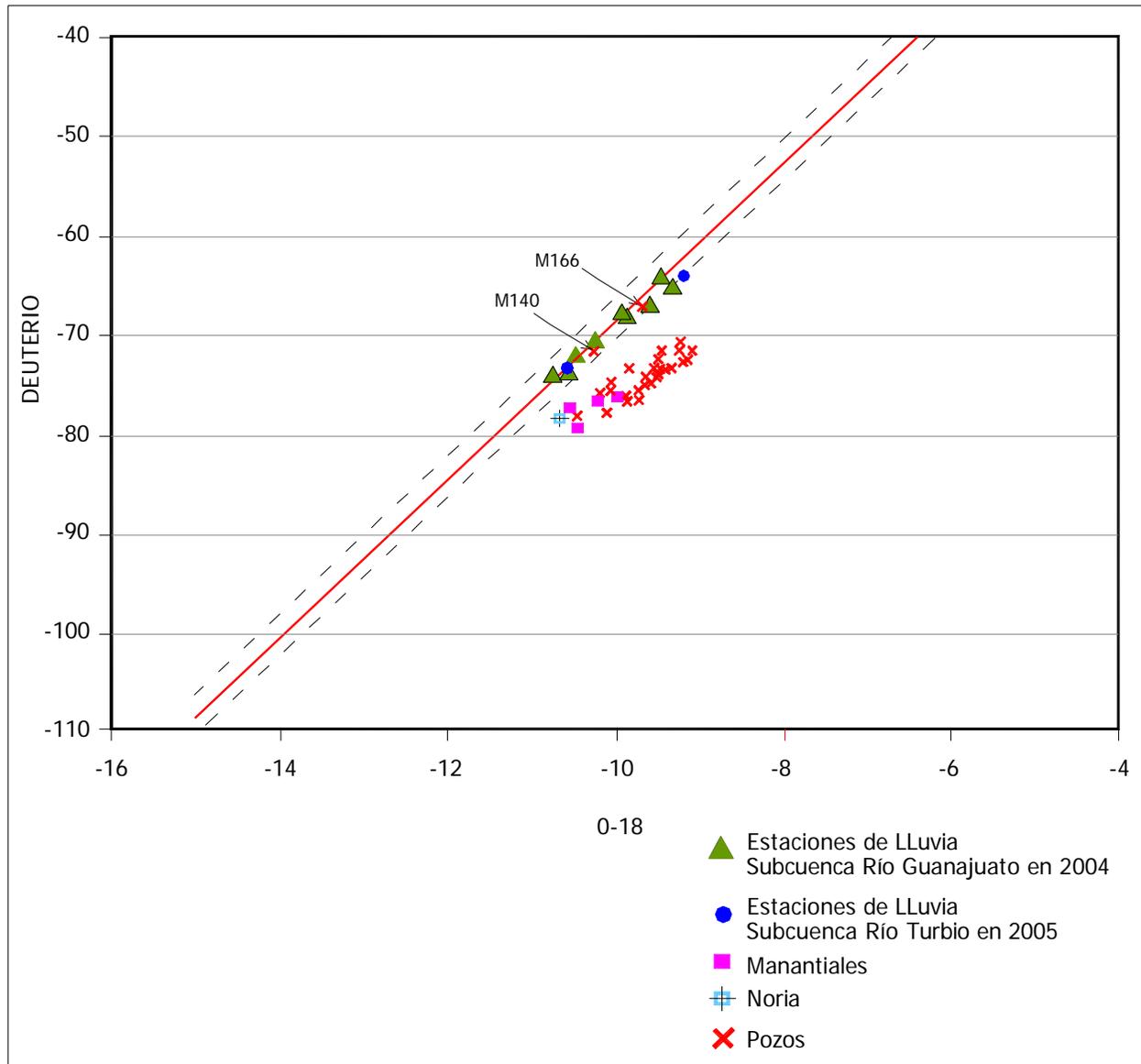


Figura 4.22 Ubicación de las muestras analizadas por oxígeno-18 y deuterio sobre la línea meteórica regional

Tritio.

Los contenidos de tritio en la zona (Figura 4.23) indican de manera general la presencia de tres tipos de agua, a) con nulo contenido en tritio y por ende precipitada antes de 1953, b) con moderado contenido en tritio atribuible a agua con una determinada fracción procedente de precipitaciones antes de la década de los cincuentas, c) con mayor contenido en tritio relacionado con precipitaciones modernas como el agua de lluvia en el año 2004. Los anteriores tipos de agua tienen por origen los regimenes de flujo propuestos en el capítulo de Geohidrología (Figura 3.18).

Se tomó muestra a cuatro manantiales, de los cuales dos presentaron concentraciones nulas de tritio (M076 y M104), lo anterior reafirma la hipótesis sobre la presencia de flujos regionales en la subcuenca. El agua que emerge a través de estos manantiales precipitó antes de 1953 y posiblemente utilice como medio de ascenso fallas y grandes discontinuidades regionales, los aprovechamientos se localizan al poniente de Cuerámaro y norte de León (Figura 4.20), ambas zonas con fuerte presencia estructural ya sea inferidas por medios magnéticos o delimitadas y cartografiadas en campo (figuras 2.1 y 2.3). A diferencia de lo anterior, los manantiales con clave de muestra M088 y M151 evidencian agua prácticamente reciente (2.6 y 3.38 U.T.), infiltrada al sur de Abasolo a través de riolitas y tobas riolíticas del Terciario, de igual forma al norte de la Subcuenca del Río Guanajuato en la comunidad La Lagunita, a través de riolitas terciarias.

En la zona existe evidencia concreta de que flujos regionales son conducidos a niveles superficiales por fallas de carácter regional, tal es el caso del pozo con clave L-251, muestra M097, localizado en la comunidad Cerrito de Agua Caliente, oriente de Cuerámaro, donde el nivel estático es de 25 m, la temperatura del agua es de 51.5 oC y no presenta contenido de tritio, por lo que la edad del agua al menos es de 52 años. A pesar que el aprovechamiento se localiza a 1 km del Río Turbio, éste no se ve influenciado por agua reciente debido a que posiblemente su única fuente de abastecimiento sea un flujo termal de carácter regional.

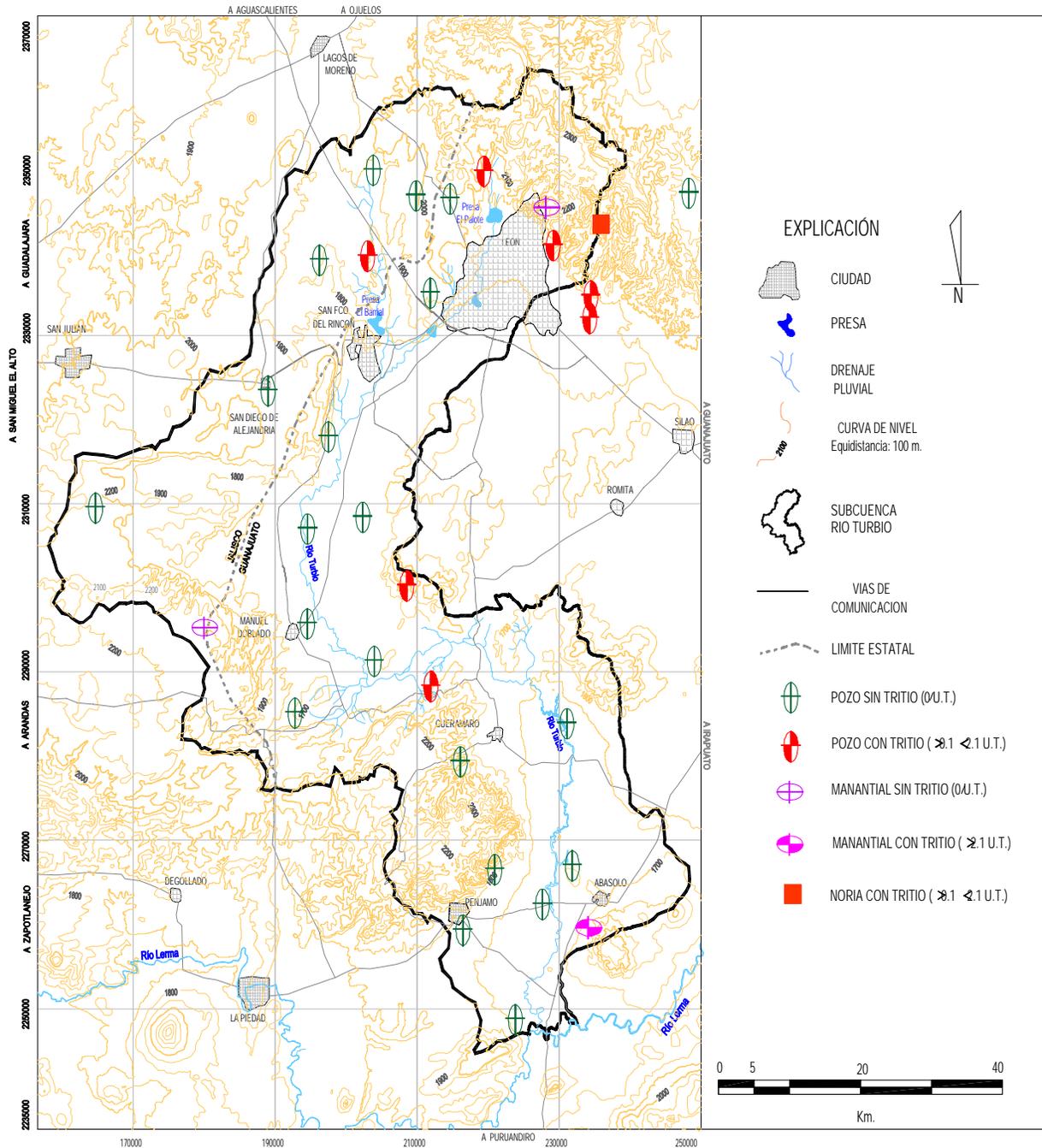


Figura 4.23 Ubicación de las muestras analizadas por tritio y contenido del mismo.

23 de 35 muestras analizadas por tritio carecen del mismo, éstas se distribuyen en toda la zona de estudio y tienen influencia sobre todas las profundidades piezométricas. Si bien es cierto que gran parte del agua utilizada en la subcuenca ya sea para uso industrial o urbano es pre-moderna, difícilmente fue aportada en su totalidad a través de fallas que conducen un flujo regional, por consiguiente en gran parte del acuífero sobre todo donde no existen condiciones termales (16 aprovechamientos sin tritio carecen de condiciones termales) los niveles del acuífero no han sido renovados por agua de precipitaciones recientes al menos desde los últimos cincuenta años. Los siete aprovechamientos sin tritio que presentan termalismo posiblemente reciban una recarga permanente de agua ascendente a través de las ya referidas fallas regionales.

Al ser pre-moderna (anterior a 1953) gran parte del agua que se extrae en la zona de estudio, la implicación es que la recarga moderna en su mayoría queda limitada a los niveles superiores del acuífero, es decir, en las profundidades mayores de donde se extrae la mayor parte del agua, la influencia de la recarga es poca y el aporte de flujos regionales profundos es mayor. Lo anterior se puede relacionar con el flujo de agua tipo pistón, donde a profundidad a través de grandes discontinuidades regionales se tienen entradas de agua laterales y verticales, mismas que por diferencia de presión hace que el agua antigua (sin tritio) tienda a emerger.

5. MODELO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA

El modelo de simulación hidrodinámica es un modelo matemático que se utiliza para simular la relación estímulo-respuesta de un sistema acuífero, como por ejemplo cuando se necesita predecir el comportamiento de los niveles de un acuífero ante estímulos tales como el bombeo en pozos, de tal manera que se puedan analizar y evaluar las distintas posibles políticas de explotación del agua subterránea, con el fin de seleccionar aquella que produzca el mayor beneficio económico, social y ambiental.

Un modelo matemático se puede utilizar también en el modo de gestión, es decir, como una herramienta de apoyo para la planeación y la gestión de los recursos hídricos, y en este caso el modelo provee de elementos cuantitativos para la toma de decisiones relativas al manejo del acuífero, que pudieran ser tomadas para los cortos, medianos y largos plazos.

La modelación del flujo del agua subterránea es una herramienta indispensable en la administración de los acuíferos, pero para llevarla a cabo es necesario contar con datos de campo, debido a que, no se puede administrar lo que no se ha medido. La información que requiere un modelo para su construcción la podemos dividir en dos grupos: a) un primer grupo que incluye toda la información estática, es decir, la que no cambia con el tiempo (por ejemplo, la información geológica, geofísica, estructural, etc.) b) un segundo grupo que tenga la información dinámica, que consiste en toda aquella información que varía con el tiempo (por ejemplo, piezometría, hidrométrica, fronteras, recargas, descargas, etc.); siendo ambas informaciones de gran importancia. La modelación del flujo del agua subterránea no es tarea fácil. Pero se complica aun más cuando partimos de información de campo imprecisa e incompleta. Es por esto que en esta tesis se hace énfasis en la importancia de la calidad y cantidad de la información hidrogeológica.

El estado de Guanajuato, tiene como uno de sus principales objetivos, el optimizar la disponibilidad y gestión del agua para su manejo y diferentes usos. Como apoyo para el cumplimiento de dicho objetivo; en el presente trabajo de tesis, tomando como base la información geológica e hidrológica de estudios previos, así como la integrada y generada dentro del mismo, se llevó a cabo el desarrollo de un modelo matemático de la Subcuenca del Río Turbio, que permitiera conocer la evolución del flujo subterráneo y que al ser calibrado y cumplir con los parámetros de error, quedara en condiciones de ser utilizado como herramienta de planeación para el aprovechamiento del recurso agua.

Para llevar a cabo la modelación hidrodinámica de la Subcuenca del Río Turbio se utilizó el programa Visual MODFLOW versión 4.0, se utilizó este paquete ya que es un modelador matemático de flujo de agua subterránea en 3D versátil y utilizado frecuentemente por los hidrogeólogos, además es compatible a sistemas de información geográfica y sistemas de apoyo de tomas de decisiones.

Con el fin de alimentar el modelo, la información se integró para ser convertida a versiones compatibles con Visual Modflow (*.bas, *.bcf, *.wel, etc.), la cual incluye geología del área, definición del área acuífera, condiciones de frontera, caracterización geométrica de la subcuenca, condiciones piezométricas, condiciones de recarga y descarga y parámetros hidráulicos, entre otros.

5.1. Antecedentes en la zona.

En la zona de estudio se han desarrollado varios modelos de simulación hidrodinámica, entre los consultados sobresalen tres, mismos que corresponden a cada uno de los acuíferos de la subcuenca. Fueron elaborados en 1998 lo cual brinda la ventaja de comparar sus predicciones a corto plazo con los datos arrojados por este trabajo.

En 1998 la empresa Geofísica de Exploraciones Guysa elaboró su *Modelo Matemático del Acuífero del Valle de León*, para éste utilizó el programa Modflow. Al acuífero se le consideró tipo libre y se tomaron en cuenta cuatro capas cuyos espesores varían de 35 a 450 m.

Las condiciones iniciales fueron establecidas de acuerdo a la configuración de la carga hidráulica de finales de 1969, considerándose válida para inicios de la década de los setentas, se simuló una recarga lateral constante proveniente de la meseta de Los Altos de Jalisco y de la Sierra de Guanajuato.

Se determinó una conductividad hidráulica de 0.2 a 5 m/d para las primeras dos capas y de 0.2 a 0.35 para las capas inferiores, asimismo, el coeficiente de almacenamiento utilizado para las capas uno y dos fue de 0.075, mientras para las capas tres y cuatro fue de 0.0001.

Se plantearon dos posibles escenarios para el manejo del agua, uno continuando con las políticas de extracción prevalecientes y otro donde se traten de equilibrar o contrarrestar los ritmos de abatimiento, disminuyendo las extracciones de agua subterránea para uso agrícola.

Entre las conclusiones principales se desprende que al continuar con el ritmo de extracciones similares a 1998, en 20 años (para 2018) se tendrán abatimientos de hasta 30m en la parte central del valle y de hasta 16m para la zona de la muralla.

La Figura 3.12 muestra la evolución del nivel estático para el periodo 1999-2004, en solo cinco años se originaron evoluciones negativas de 14 a 18 m al sur de León, lo cual da una velocidad de abatimiento promedio anual de 3.2 m, superior a 1.5 m proyectado en el modelo.

De la misma forma, en 1998 Geopsa llevó a cabo el *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle del Río Turbio, Gto.* Para realizar el modelo matemático también se utilizó el programa Visual Modflow.

Se planteó un modelo acuífero de tres capas con espesor promedio de 400 m. Las condiciones iniciales fueron tomadas del año 1979, ya que es la información piezométrica más antigua, además de que, al parecer, en esa época el flujo subterráneo conservaba su tendencia original.

Los valores de conductividad hidráulica utilizados varían de 0.5 a 10 m/día, distribuidos de acuerdo al material geológico existente en cada una de las celdas. El coeficiente de almacenamiento asignado a todas las capas del modelo fue 0.016.

En base al modelo matemático se planteó la predicción del comportamiento del sistema acuífero a cinco, diez, quince y veinte años, teniendo la particularidad de que no se incrementó el bombeo. La proyección del modelo a cinco años arrojó un ritmo de abatimiento de 2.8 m por año para la parte central del valle, mientras que para la zona norte éste fue de 1 m.

Las figuras 3.12 y 3.13, del capítulo 3, corresponden a configuraciones piezométricas que muestran un abatimiento no constante, inclusive se observan varias zonas de recuperación.

El modelo pronostica a diez años la acentuación de un cono de abatimiento en la parte central del valle, con ritmo de abatimiento de 2.6m anuales y 3m para la parte norte y sur del valle. Los resultados a 15 y 20 años sugieren la formación de un gran cono de abatimiento con profundidad de nivel estático de 90 m, lo cual implicaría que a partir del 2004 y para el 2013 el nivel descendería 40 m, ya que actualmente tiene una profundidad aproximada de 50 m.

Para el acuífero Pénjamo-Abasolo, en 1998 Lesser y Asociados desarrolló el *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero de Pénjamo-Abasolo, Gto.* Uno de los objetivos del estudio fue generar un modelo matemático mediante el uso del programa ModFlow, el cual permitiera simular el comportamiento del acuífero en los próximos años y bajo distintos esquemas de manejo de agua.

Para el modelo se consideraron cinco capas con espesores variables que van entre 15 y 100 m para las capas I y II, las cuales constituyen un denominado acuífero superior, mientras que las capas III, IV y V formarían un acuífero profundo. Se utilizaron valores de conductividad hidráulica que van desde 0.015 a 5 m/día.

Se llevaron a cabo simulaciones para dos y cinco años. De manera general el modelo arrojó que las evoluciones de los niveles estáticos serían negativas y fluctuarán

entre uno y tres metros por año. Según las configuraciones piezométricas, para 1998 uno de los principales conos de abatimiento se ubica al norte de Abasolo con una elevación de nivel estático de 1,610 m, a partir de las gráficas arrojadas por el modelo se determinó que para el 2000 el cono evolucionaría su nivel a 1,600 m, mientras que para el año 2003 se ubicaría en 1580 m.

Contrario a lo esperado, en las gráficas de profundidad de nivel estático generadas en el presente trabajo para 1999, 2002 y 2004 (figuras 3.7 a 3.10), evidencian conos de recuperación en la zona norte de Abasolo. De la misma forma la evolución de niveles estáticos para los períodos 1999-2004 (Figura 3.12) y 2003-2004 (Figura 3.13), muestran como los niveles han evolucionado positivamente, por lo que las predicciones del modelo no se cumplen para la zona norte de Abasolo.

5.2. Objetivos

El objetivo general del modelo de simulación hidrodinámica es apoyar a la definición de un plan de sustentabilidad que considere al ambiente como un usuario más de agua en la subcuenca. Como objetivos particulares se plantearon elaborar escenarios de manejo del acuífero, además de hacer recomendaciones para la administración del agua subterránea, operando los escenarios de no incremento de extracción.

Desarrollar una modelación de flujo subterráneo que simule el comportamiento del agua subterránea en la Subcuenca del Río Turbio es indispensable para evaluar los impactos ocasionados por la explotación intensiva del recurso agua.

5.3. Metodología

El proceso de modelación se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Anderson y Woessner (1992), la cual se sintetiza en los siguientes pasos.

- Análisis de la información
- Generación de un modelo conceptual
- Selección del código a utilizar en la simulación
- Diseño del modelo

- Calibración del modelo
- Presentación de resultados

En lo que respecta a los dos primeros puntos, análisis de información y modelo conceptual, ya se presentaron previamente. Por lo tanto, a continuación sólo se describen los puntos restantes, desde la selección del código hasta las predicciones y generación de escenarios.

Selección del código a utilizar

En la simulación numérica del acuífero de la Subcuenca del Río Turbio, se seleccionó el código numérico Visual Modflow versión 4.0, distribuido por Waterloo Inc. Dicho código se basa en el programa Modflow el cual fue desarrollado por McDonald y Harbaugh pertenecientes al U.S. Geological Survey (1988), siendo una herramienta computacional muy útil y fácil de operar, por sus características visuales y de manejo de datos.

Diseño del modelo

Para que el programa Visual Modflow modele el comportamiento de flujo subterráneo, se tomó en cuenta el modelo conceptual elaborado, particularmente los medios físicos por donde se desplaza el agua subterránea.

Para la determinación de los parámetros geométricos del acuífero se llevaron a cabo las siguientes trabajos de gabinete que incluyeron el procesado y la interpretación de datos geológicos, topográficos e hidrogeológicos.

➤ Importación de una base topográfica

Para la creación del modelo de simulación se realizaron archivos en autocad con los principales rasgos topográficos que permitieran contar con una base de referencia (plano base) para poder determinar la forma y las características de nuestro modelo, para ello se incluyeron las sierras de los alrededores del acuífero, los principales ríos y vías de comunicación, así como los principales poblados (Figura 5.1).

La topografía de la zona fue convertida a un archivo con extensión .dxf para después importarla al modelo mediante una base de datos en .txt (Figura 5.2) generada con el programa dxf2txt.exe

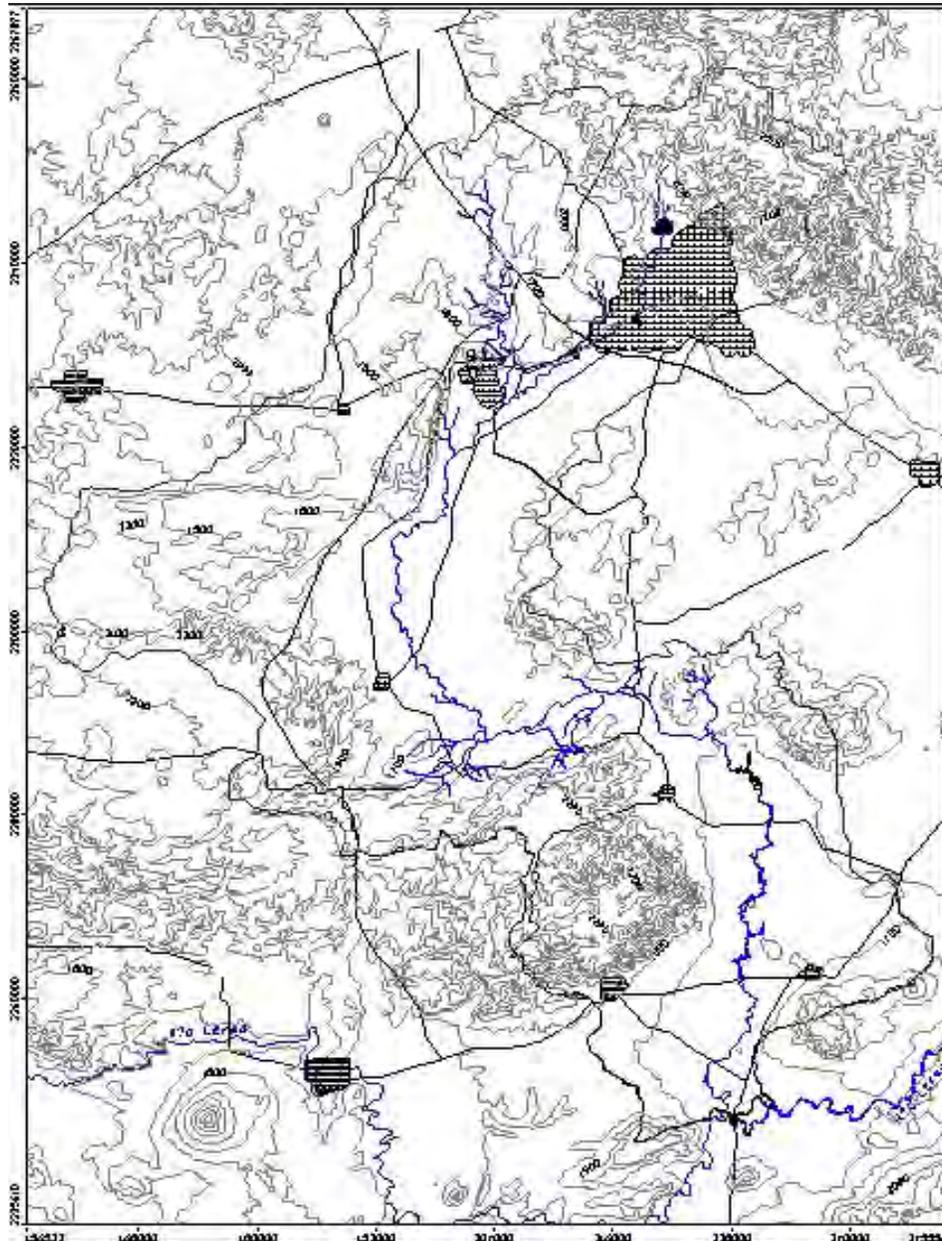


Figura 5.1 Plano base.

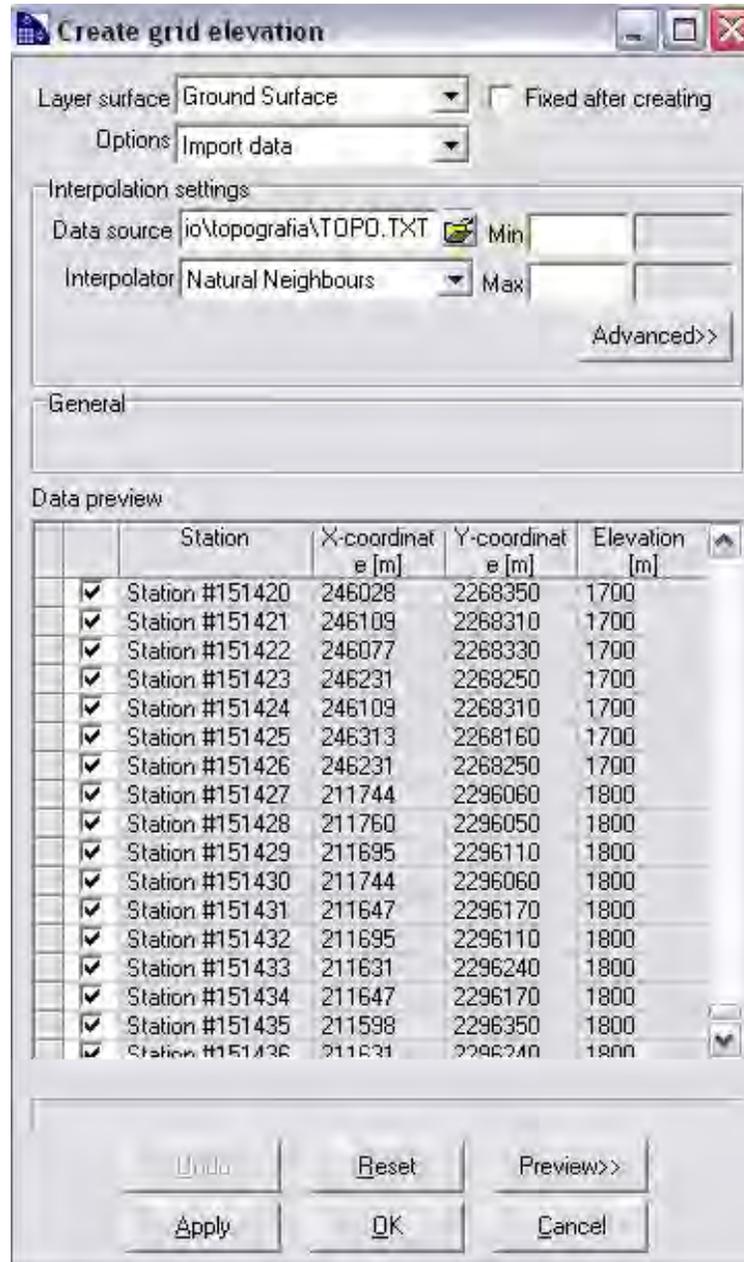


Figura 5.2 Base de datos generada a partir de la topografía.

➤ *Discretización del area de trabajo.*

A partir de la información de la base topográfica realizada inicialmente, se definieron dentro del modelo el número de columnas, filas y capas del sistema, especificando cota mínima (Zmin) y cota máxima (Zmax). El plano base fue dividido en bloques y se le sobrepuso una malla de diferencias finitas (Figura 5.3).

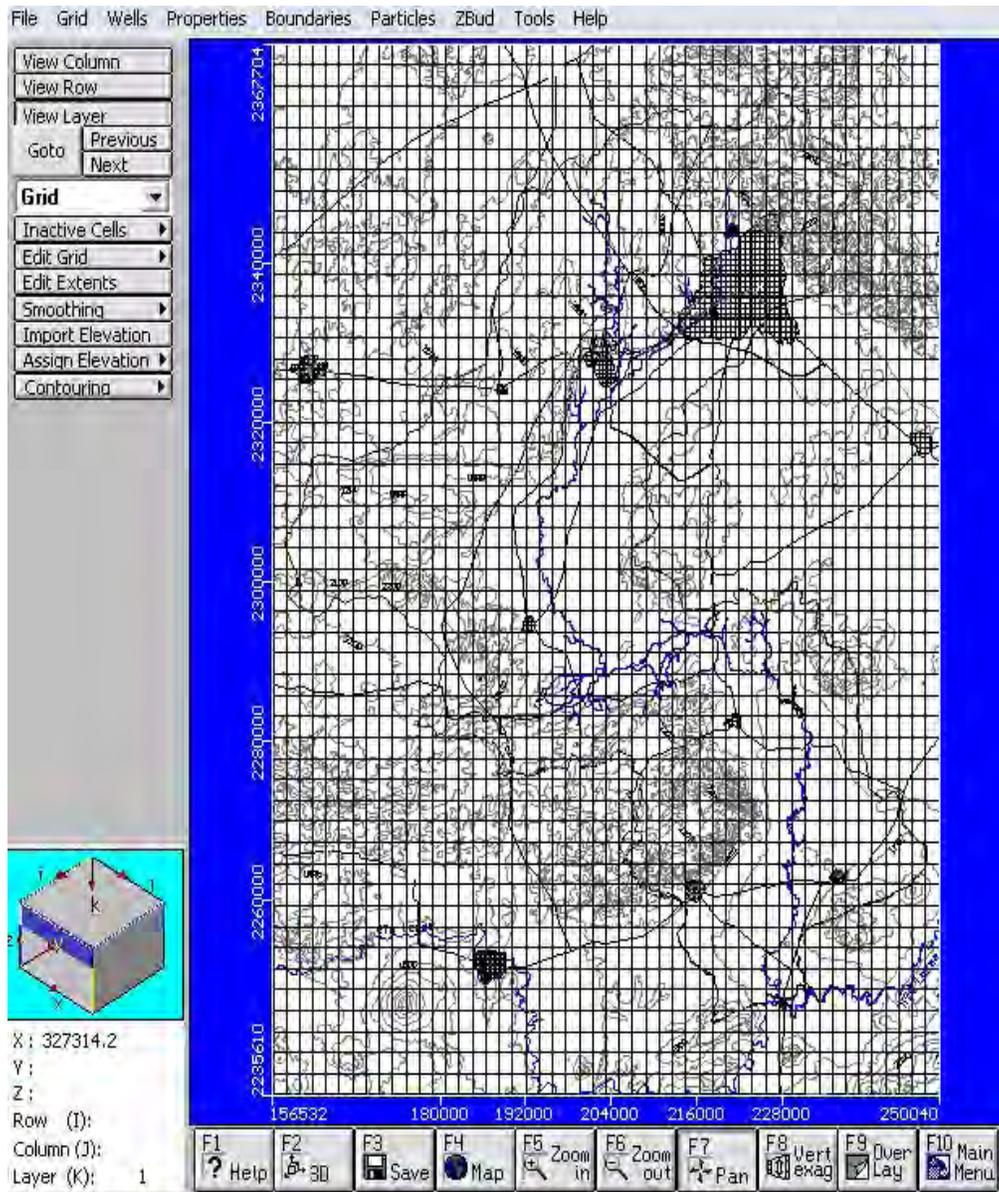


Figura 5.3 Plano base con malla.

La malla se alineó paralela a las coordenadas UTM con una extensión de 132.424 km en dirección norte-sur y 93.726 km en sentido este-oeste. El área de cada una de las celdas que componen la malla es de 4.93 Km², por lo que suman 50 celdas en cada una de las capas utilizadas, para un total de 2500 celdas en todo el dominio (Figura 5.2)

➤ *Geometría del acuífero*

De conformidad al modelo conceptual formulado, el flujo del agua subterránea ocurre principalmente en dos medios, uno granular de composición variable que rellena fosas tectónicas, y otro fracturado volcánico en rocas de composición riolítica, basáltica y andesítica. Asimismo, de acuerdo a la Figura 3.1, varias unidades hidrogeológicas con permeabilidad escasa afloran principalmente al norte y sur de la subcuenca y tienen distribución restringida en el subsuelo.

Por lo anterior y debido a la poca circulación de agua, sobre la malla generada inicialmente, en varias zonas se definieron celdas inactivas (Figura 5.4): a) al norte de la subcuenca en la Sierra de Guanajuato donde aflora la secuencia volcánico sedimentario del Jurásico Superior, el Conglomerado Guanajuato del Terciario, entre otras unidades prácticamente impermeables, b) en la Sierra de Pénjamo y al noreste de Cuerámamo donde afloran rocas terciarias de composición andesítica y basáltica, las cuales tienen a formar grandes bloques compactos por lo que disminuye su permeabilidad, c) zonas fuera de la subcuenca donde no tiene efectos la modelación.

En el diseño del modelo, el sistema acuífero se dividió verticalmente en tres capas con espesores variables (Figura 5.5): 1) una capa superior ó capa número uno cuyo espesor varía entre 30 y 40 m, abarca el acuífero freático o superior en un medio poroso y se simuló como un acuífero libre, 2) capa granular de composición variable con espesor medio de 350 m, 3) capa fracturada de origen volcánico con un espesor medio de 400 m.

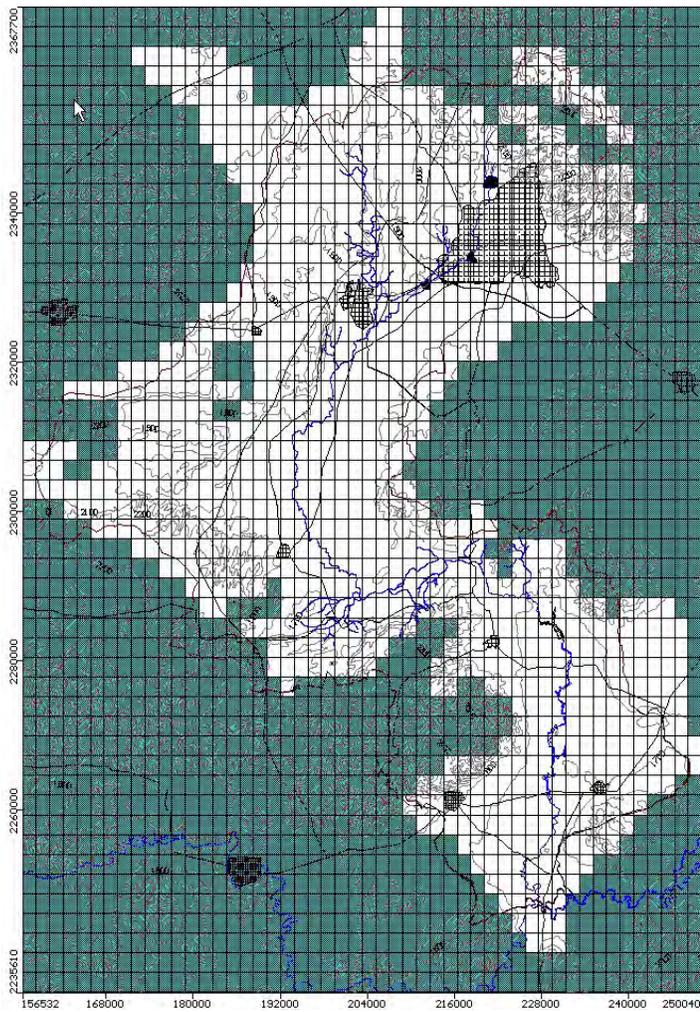


Figura 5.4 Celdas Inactivas (color verde).

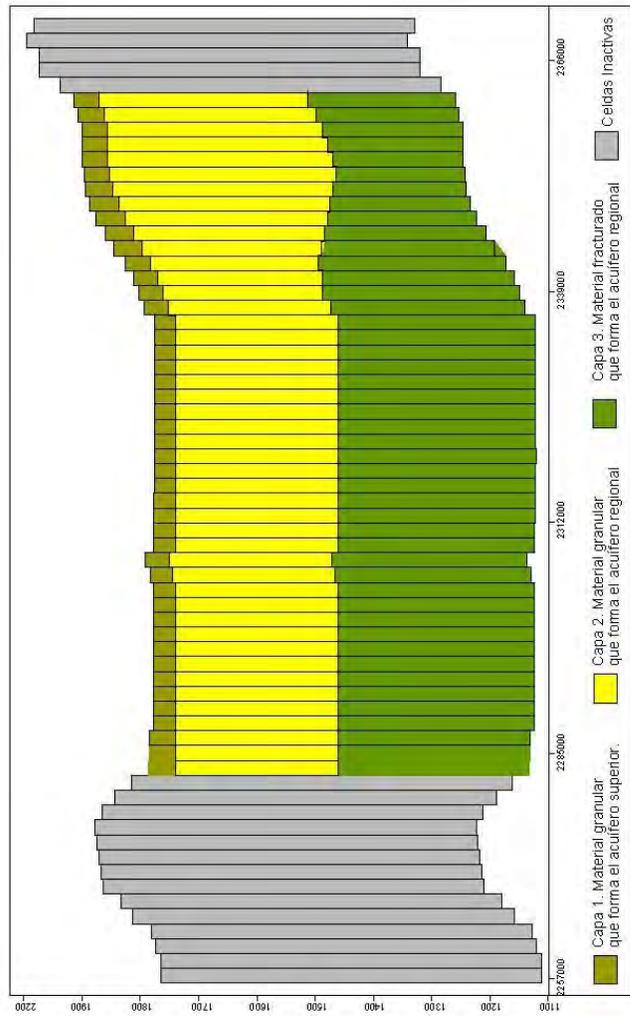


Figura 5.5 Sección norte-sur, muestra la distribución y espesores aproximados de las capas modeladas.

El comportamiento a profundidad de las capas quedó establecido tomando como base los resultados de la exploración geofísica, la profundidad total y cortes litológicos de pozos, así como la interpretación geológica-geofísica.

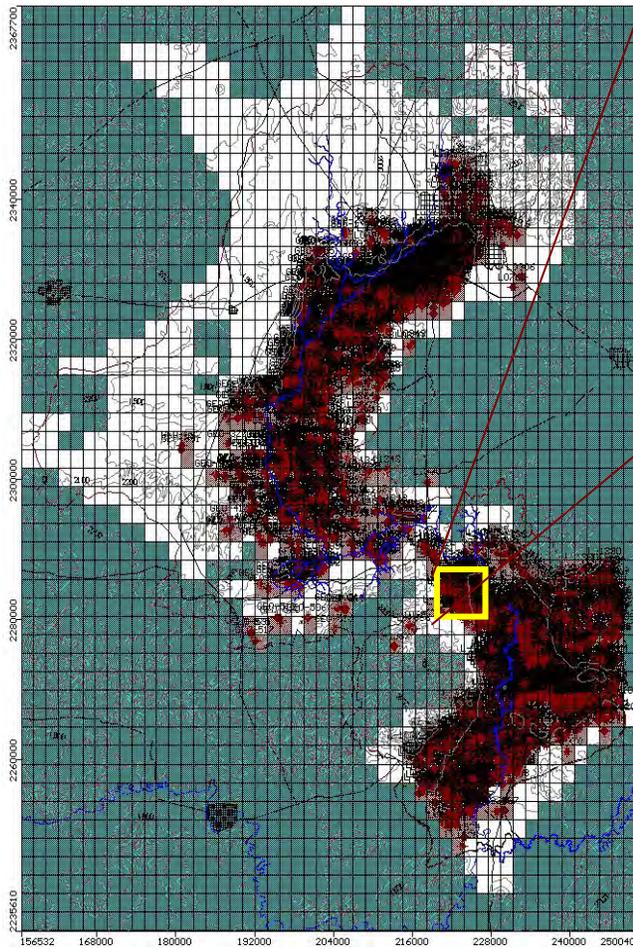
Cabe mencionar que las capas dos y tres se simularon bajo condiciones de acuífero libre a semiconfinado. Por debajo de éstas se encuentra el basamento hidrogeológico y se tomó como frontera vertical.

➤ *Parámetros hidrogeológicos*

Las variables de recarga y descarga del modelo corresponden a una serie de componentes hidrológicos tales como los pozos de extracción, recarga natural e inducida, evapotranspiración, los cuales se incorporan al proceso de simulación añadiendo o extrayendo un cierto volumen de agua. Cabe mencionar que en este trabajo de tesis se demuestra o confirma la presencia de agua externa a la subcuenca que utiliza como medio de ascenso fallas y fracturas regionales, sin embargo el volumen de ésta no fue cuantificado, por lo que no se tomó en cuenta en el proceso de simulación hidrodinámica.

Para el caso de la Subcuenca del Río Turbio, la ubicación y características de los pozos fueron proporcionadas por CEAG (figuras 5.6, 5.7 y 5.8). El programa Visual Modflow simula a los pozos como una fuente de extracción en la ecuación del movimiento del agua subterránea. La simulación numérica de los pozos ocupa de un archivo de entrada con los gastos por periodo de cada uno de los pozos, este se consideró con base en el registro de extracción total anual, para luego obtener un promedio por aprovechamiento para cada uno de los periodos simulados.

De acuerdo a la publicación en el Diario Oficial de la Federación (DOF) con fecha 31 de enero de 2003, la extracción total anual para los tres acuíferos es de 729 Hm^3 . La estimada para la subcuenca fue de 436 Hm^3 la cual fue distribuida en los 2,945 pozos ubicados en la subcuenca, con extracción diaria promedio de $400.57 \text{ m}^3/\text{día}/\text{pozo}$. Debido a la falta de datos de extracción por pozos, no fue posible asignarle una extracción independiente a cada aprovechamiento.



● Pozo

Figura 5.6 Ubicación de la totalidad de los pozos

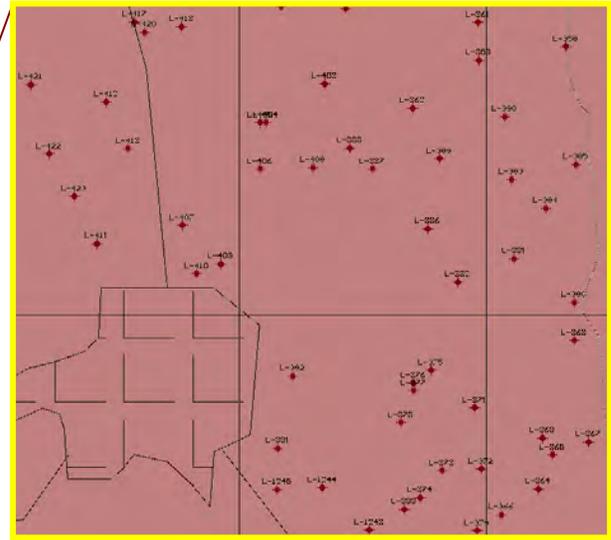


Figura 5.7 Ubicación de pozos en los alrededores de Cuernavaca.

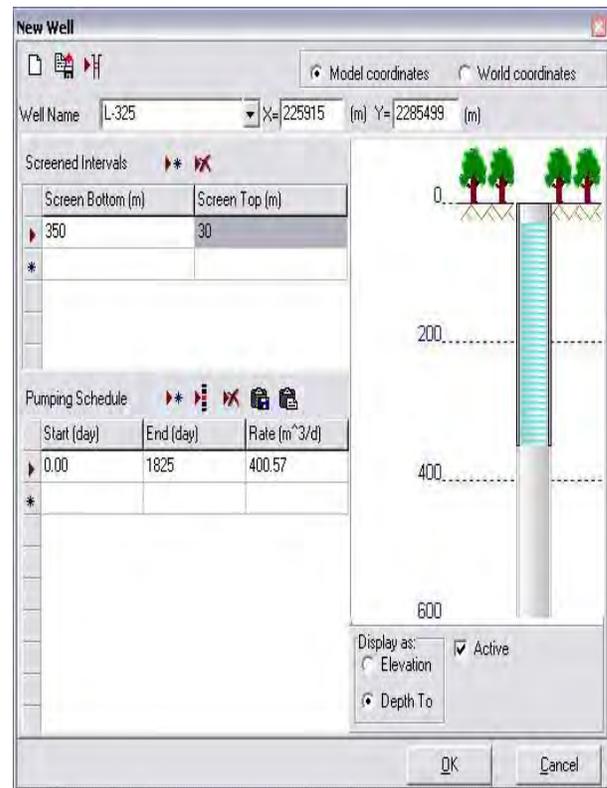


Figura 5.8 Perfil típico de un pozo ubicado en el modelo.

Los tipos y zonas de recarga se establecieron en el apartado de Geohidrología y fueron distribuidas en las celdas del modelo para las tres capas. Según la publicación del DOF antes mencionada, en los tres acuíferos que se encuentran en la zona de estudio prevalece una recarga neta anual de 491 Hm³. Para la subcuenca fue estimada en 279 Hm³.

La recarga fue distribuida en las celdas activas del modelo en zonas previamente definidas: zonas de ladera, márgenes de ríos y zonas donde hay infiltración por precipitación y retorno de riego. La distribución fue uniforme para las tres capas, con excepción de las capas dos y tres donde la recarga por infiltración en márgenes de río desaparece (figuras 5.9 y 5.10).

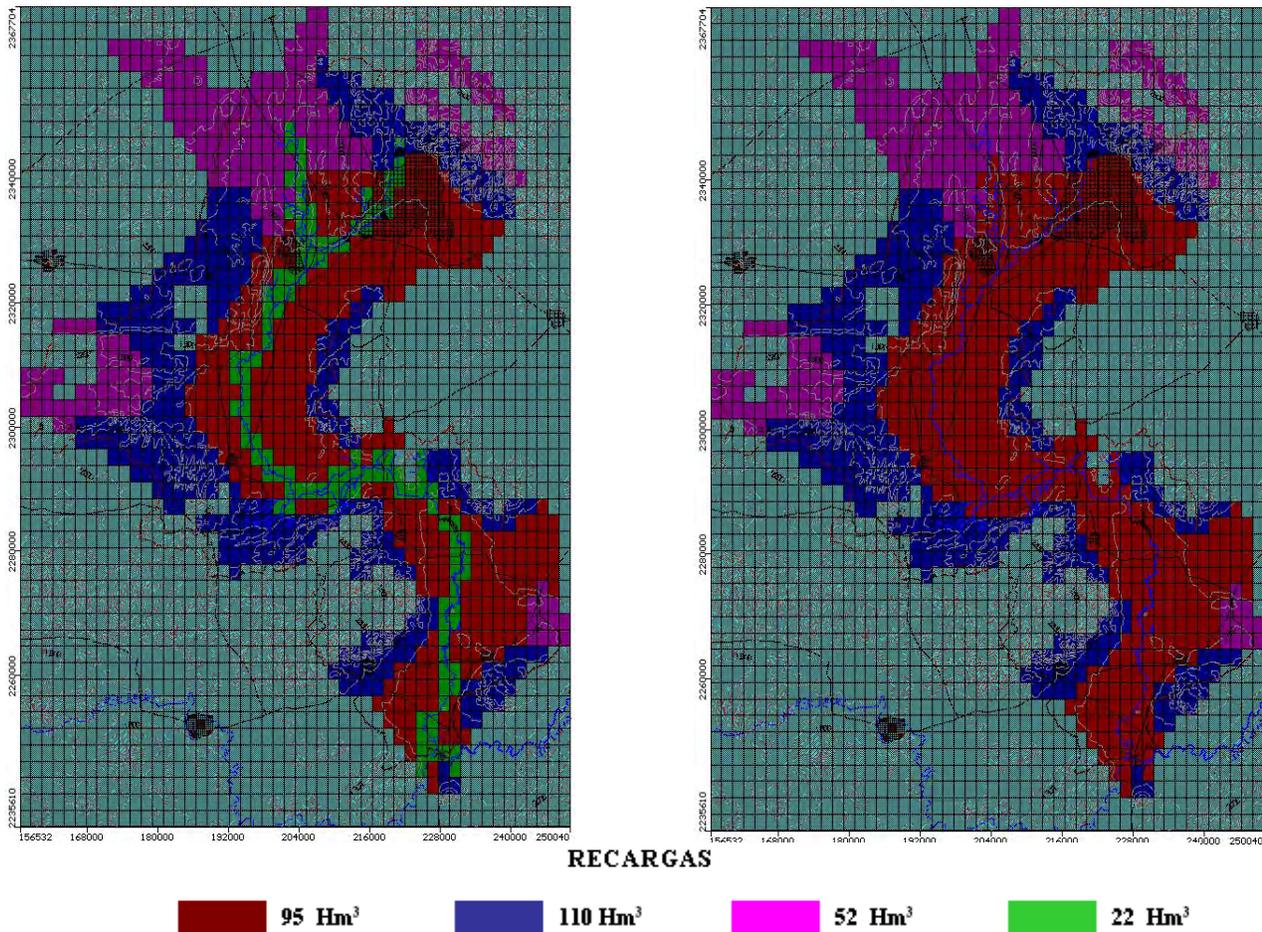


Figura 5.9 Distribución de las recarga para la capa uno.

Figura 5.10 Distribución de la recarga para la segunda y tercera capas.

Los parámetros hidráulicos utilizados para alimentar el modelo se definieron previamente en base a la información bibliográfica y al desarrollo, interpretación y reinterpretación de pruebas de bombeo realizadas por COREMI. El llenado en las celdas se hizo tomando en cuenta la distribución de conductividades hidráulicas mostrada en la Figura 3.22. Dado que hay una gran variedad de valores (0.1 a 2.1 m/día) se optó por establecer rangos, de tal forma que a zonas con conductividades entre 0.1 y 0.5 se les asignó el valor de 0.25 m/día, para zonas entre 0.6 y 1 se les asignó 0.75, para valores entre 1.1 y 1.5 se asignó 1.25, y para zonas entre 1.6 y 2.1 se asignó 1.75.

Debido a que la distribución de conductividades hidráulicas no cubre toda la zona activa del modelo, se asignó un valor medio para rocas fracturadas de 0.4m/día, asimismo para zonas granulares fuera de la configuración se utilizó el valor de conductividad promedio para todo el acuífero; 0.68 m/día. Los valores de conductividad para la zona Penjamo-Abasolo fueron tomados de Lesser (1998). Para la zona norte de Abasolo se utilizó un valor de 1.25 m/día, mientras que para el Valle de Pénjamo se asignó conductividad de 0.75m/día.

La distribución de valores de conductividad en las celdas del modelo se muestra en las figuras 5.11 y 5.12, donde la primera corresponde a las capas uno y dos, las cuales forman el medio representativo de los parámetros arrojados por las pruebas de bombeo. La segunda corresponde a la capa tres donde predomina el medio fracturado de tal forma que la distribución de conductividades es más uniforme.

Además de la conductividad hidráulica, se cargaron al modelo diversos parámetros como; coeficiente específico, rendimiento específico, porosidad efectiva y porosidad total (Tabla 5.1). El coeficiente de almacenamiento utilizado para las capas uno y dos fue de 0.01 el cual está en el rango de acuíferos libres con material granular cuyo contenido de arcillas es moderado, respecto a la capa tres se utilizó un valor de 0.003.

Storage						
Zone	Ss [1/m]	Sy []	Eff. Por. []	Tot. Por. []	Active	Distribution Array
2	1E-5	0.2	0.2	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tabla 5.1 Parámetros cargados al modelo de simulación hidrodinámica.

Conductivity					
Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Active	Distribution Array
2	0.25	0.25	0.125	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	0.75	0.75	0.375	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	1.25	1.25	0.625	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	1.25	1.25	0.625	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	1.75	1.75	0.875	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	0.4	0.4	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	0.68	0.68	0.34	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

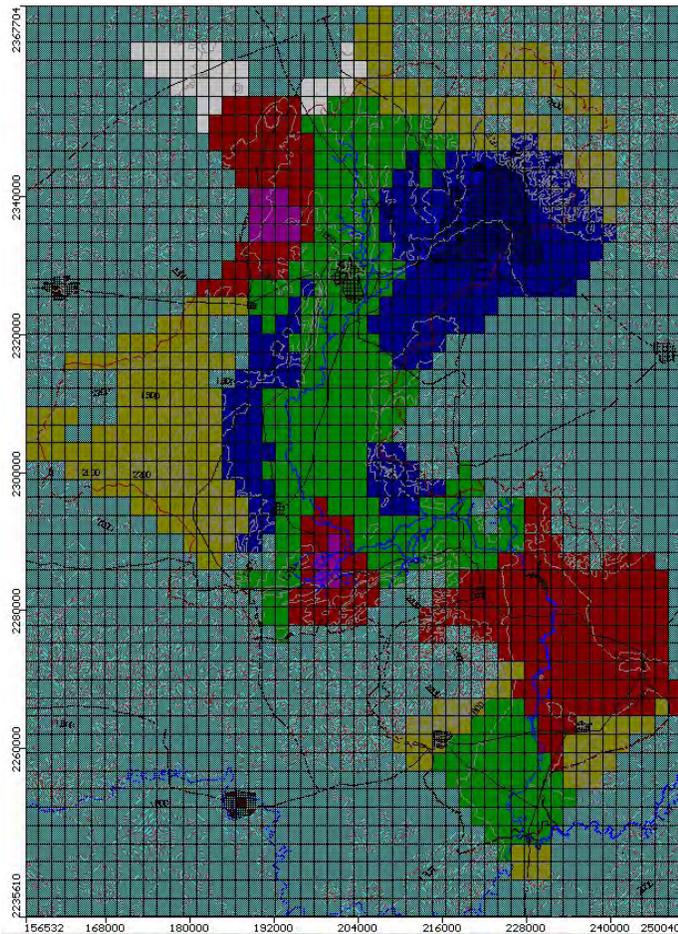


Figura 5.11 Distribución de conductividad para las capas uno y dos.

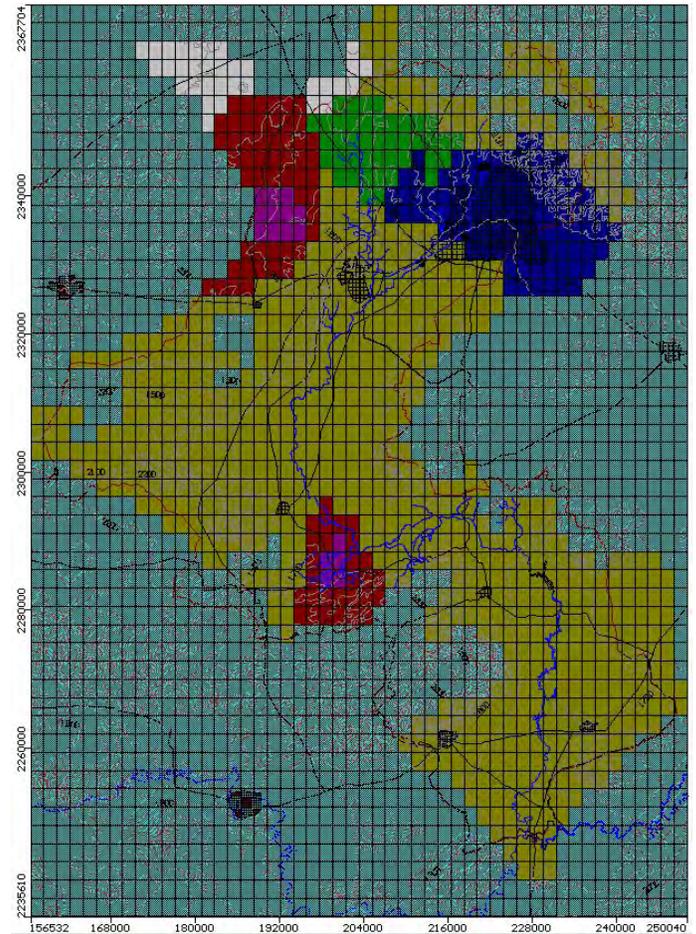


Figura 5.12 Distribución de conductividad para la capa tres.

5.4. Calibración del modelo.

Para lograr que el modelo funcione bajo un esquema similar al real, se realizaron ajustes en los parámetros de conductividad y almacenamiento específico (calibración), de manera tal que su efecto reproduzca las condiciones reales.

El proceso de calibración se dividió en dos partes, una utilizando un régimen estacionario (Figura 5.13) que represente el funcionamiento del acuífero sin explotación (1979), y la segunda en estado transitorio (Figura 5.14) a fin de reproducir el comportamiento actual del acuífero (2004), de tal manera que se cumpla con el flujo de agua subterránea obtenido del modelo conceptual.

Los resultados de la etapa de calibración del modelo fueron comparados con las configuraciones obtenidas en la medición de niveles estáticos, para 1979 con la piezometría histórica consultada en trabajos previos y para 2004 con las gráficas arrojadas por este trabajo. Para ambos casos es representativa.

Las curvas equipotenciales evidencian un flujo natural prácticamente paralelo al Río Turbio. Las condiciones iniciales, donde se observa que el sistema se encontraba en equilibrio, fueron tomadas de la configuración de 1979 ya que es la información piezométrica más antigua (Guysa, 1998, Geopsa, 1998).

La configuración para 2004 es similar a la real, se observan localmente conos de abatimiento que el modelo de simulación define con buena exactitud.

Las principales zonas de recarga mostradas en la Figura 3.15 coinciden en localización y forma con las arrojadas por la piezometría simulada, de igual manera los conos de abatimiento del Valle de León y la zona Pénjamo-Abasolo. Coinciden también en forma semejante la zona de equilibrio ubicada en los alrededores de Cuerámara.

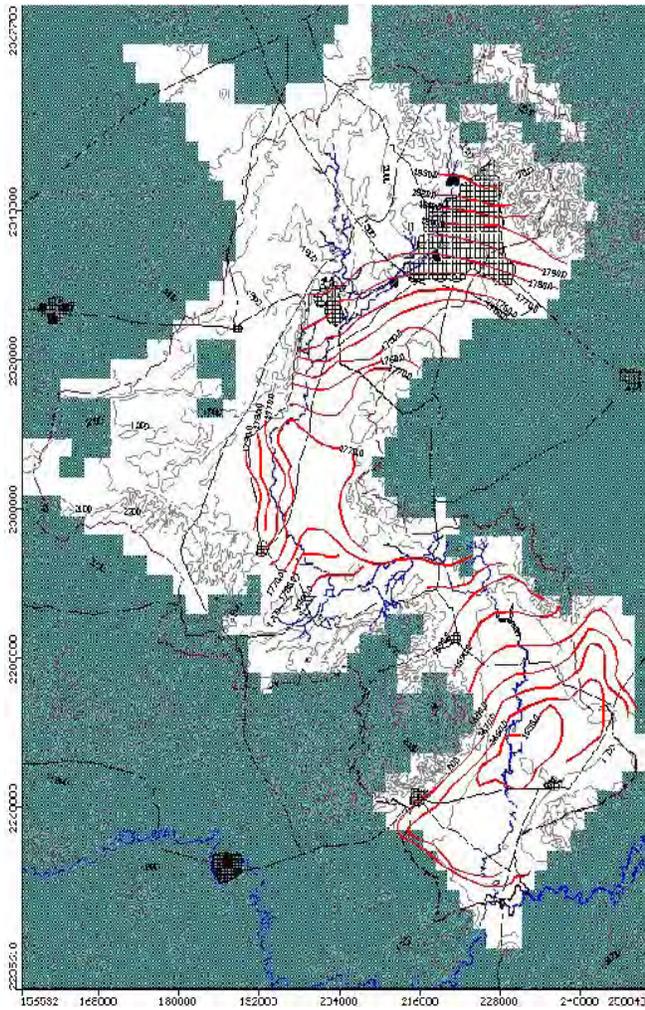


Figura 5.13 Simulación de la configuración del nivel estático a cada 10 m. para condiciones iniciales (1979).

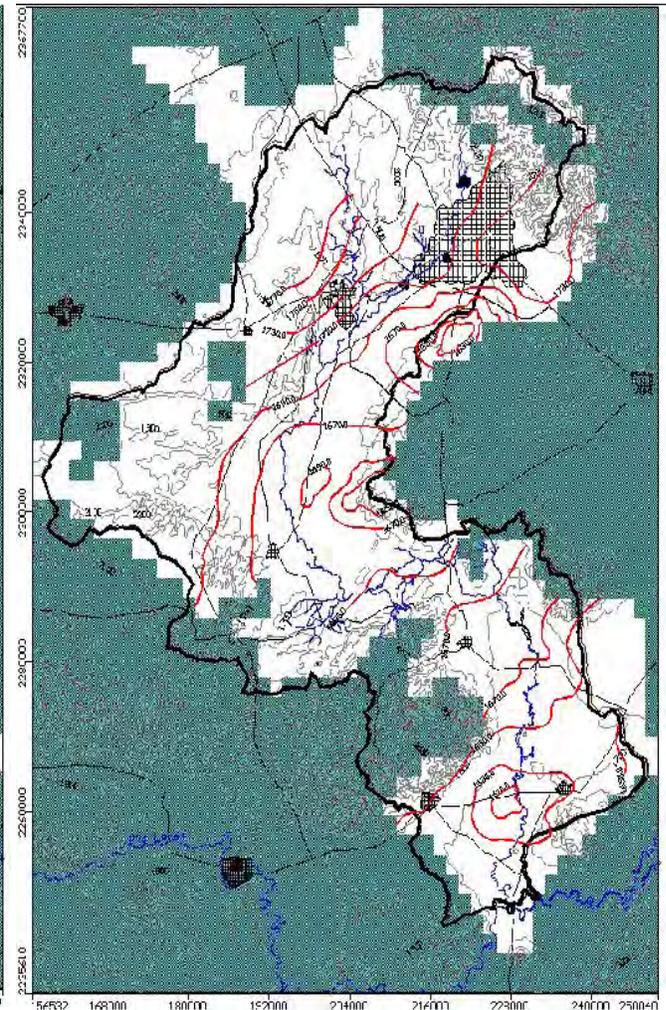


Figura 5.14. Simulación de la configuración del nivel estático a cada 20 m. para condiciones actuales (2004).

Básicamente la etapa de calibración consiste en ajustar los valores de las cargas hidráulicas calculadas por el modelo, con aquellas generadas a través de la observación y medición de niveles estáticos en campo durante diferentes campañas de piezometría. Con el fin de que la configuración modelada de niveles actuales (2004) y las observadas en campo (Figura 3.11) fuesen similares, se efectuaron varias corridas mediante el método prueba y error, modificando parámetros hidráulicos hasta lograr una coincidencia aceptable (Figura 5.15).

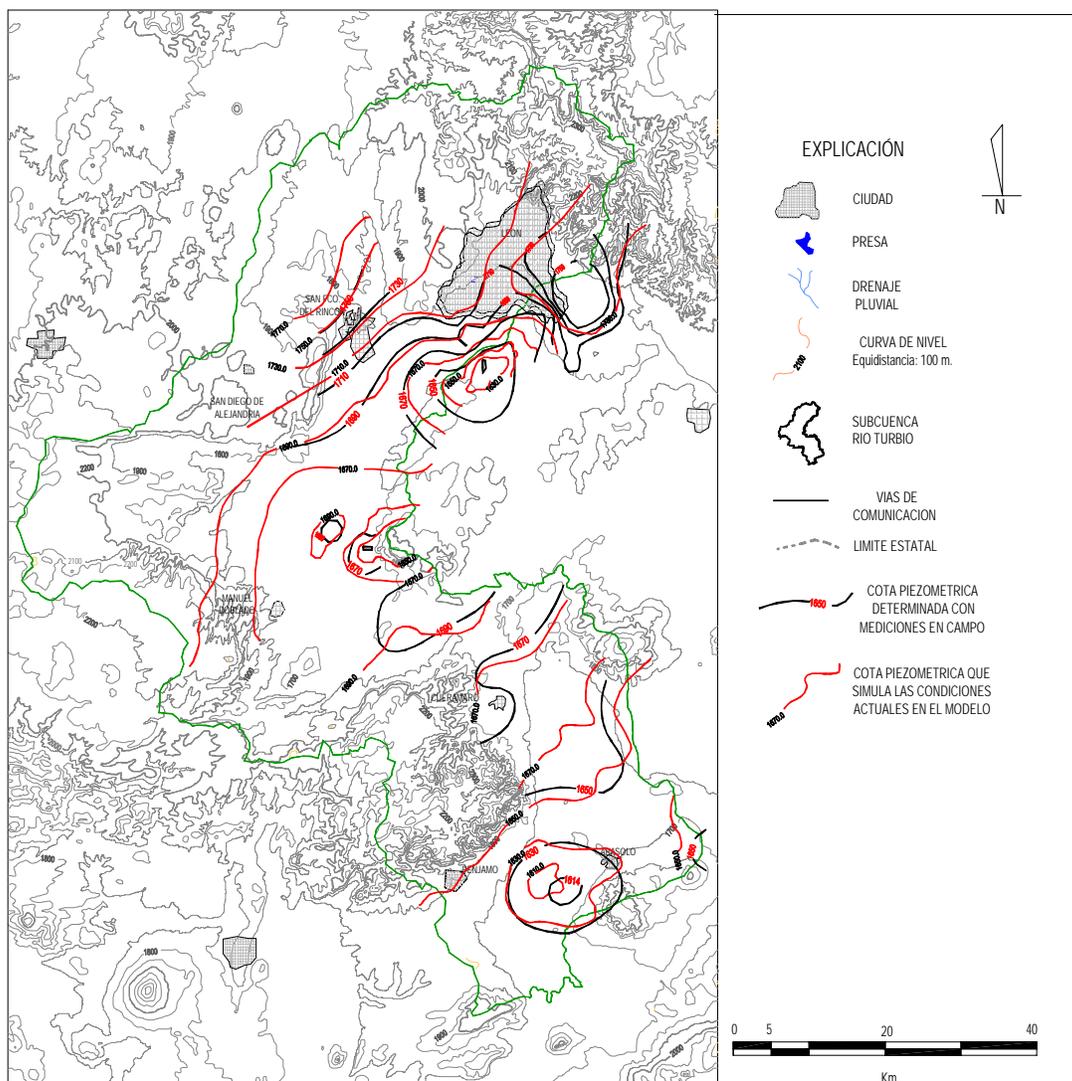


Figura 5.15. Comparación entre el nivel estático obtenido de campo y el simulado para las condiciones actuales.

La comparación de cargas hidráulicas calibradas (observadas Vs. Calculadas) se realizó mediante el método estadístico conocido como “raíz del error cuadrático medio (RMS ó δ)”, el cual se obtiene de manera automática mediante el programa Visual Modflow.

Para la calibración se consideraron puntos de observación a partir de las configuraciones de elevaciones del nivel estático de diferentes años y trabajos previos, lo cual no hace posible la elaboración de hidrógrafos de pozos específicos, debido a que cada trabajo utiliza diferentes claves. En general la concordancia entre las cargas hidráulicas calculadas y observadas se considera aceptable, de acuerdo a los resultados de la gráfica que se reporta en la figura 5.16, en donde el RMS corresponde a una fracción pequeña de la perdida total de carga en el sistema, valor que se define como la diferencia entre la carga hidráulica mayor y menor observadas en el sistema.

De la etapa de calibración se desprende que los resultados obtenidos son aceptables ya que reproducen el comportamiento del sistema, por lo cual el modelo se convierte en una herramienta útil para predecir el comportamiento del acuífero a futuro y por consiguiente proponer alternativas para su manejo.

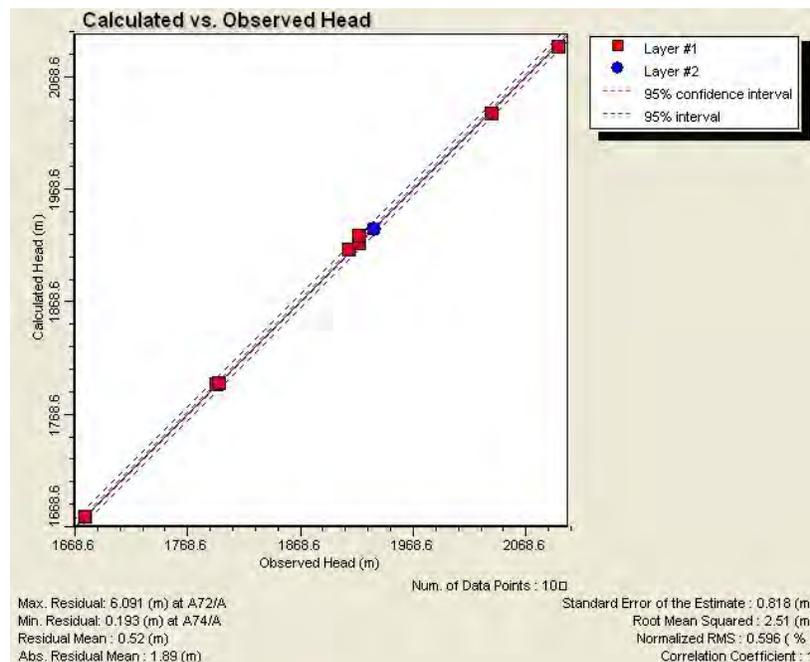


Figura 5.16 Cargas hidráulicas calculadas vs. observadas

5.5. Resultados del modelo.

Como parte de los resultados arrojadas por el modelo matemático se muestra la predicción del comportamiento de los niveles estáticos a tres y cinco años, con la particularidad de que no se considera el incremento de bombeo.

El no aumentar el bombeo hasta cierto punto es un comportamiento lógico, lo anterior debido a que en algunas zonas es constante el riego con aguas residuales permitiendo que pozos aledaños no se utilicen, además, el abatimiento de niveles provoca que algunos aprovechamientos disminuyan su caudal o inclusive se suspenda el mismo.

La disminución en la extracción es compensada con un aumento de la misma al perforar nuevos pozos (reposición) cada vez más profundos y con mayores gastos de extracción.

A continuación se presentan los resultados de la modelación en una discusión del comportamiento de la evolución niveles estáticos del agua subterránea, cabe recordar que las configuraciones elaboradas representan sólo condiciones del acuífero regional. Al generar las gráficas de salida fueron apagadas las capas o (*layers*) que contienen celdas inactivas y la malla para brindar una mejor calidad en las imágenes.

La evolución de niveles piezométricos a tres años mantiene patrones similares a los observados para el periodo 2003-2004 (Figura 3.13). De manera general, para el año 2007 La mayor parte del área de estudio se verá afectada por evoluciones de orden negativo.

La zona más afectada a tres años será el Valle de León y sus alrededores con abatimientos anuales promedio de 2.6m. En 2004 evoluciones positivas que se concentraban en la parte central de León con dirección preferente este-oeste, observada en la Figura 3.13, continuarán su tendencia positiva al sureste de la ciudad, sin embargo, el cambio de almacenamiento sólo será de un metro, a diferencia del periodo 2003-2004 que fue de hasta cuatro metros.

Evoluciones positivas se concentrarán al suroeste de León con valores de hasta dos metros, similares a los que prevalecían en 2004, por lo que la zona permanecerá en equilibrio al menos en los próximos tres años, siempre y cuando no cambien los regímenes actuales de extracción y recarga. A diferencia de lo anterior, en la parte norte la ciudad continuará el descenso de niveles alcanzando 115m.

En 2002, al suroeste de San Francisco del Rincón se observaba un cono de abatimiento con profundidad de hasta 70m (Figura 3.8), para 2004 los niveles se recuperaron alrededor de cinco metros (Figura 3.10), esta misma recuperación es evidenciada por evoluciones positivas en la zona para el período 2003-2004 (Figura 3.13). Para 2007 el modelo pronostica un descenso de niveles de entre cuatro y cinco metros, lo cual significaría regresar a las condiciones piezométricas de 2002. La recuperación de niveles en la zona pudo estar influenciada por las lluvias extraordinarias de 2002 y 2003 y, al no continuar éstas, los niveles tienden a abatirse nuevamente.

Contrastando con lo anterior, al suroeste de la misma ciudad se evidencia la formación de un domo de recuperación el cual ascendería los niveles estáticos hasta tres metros (Figura 5.17), sin embargo, este hecho es poco probable ya que el comportamiento piezométrico histórico y actual no ofrece indicios claros de tal recuperación. A menos que se intensifique en la zona el riego con aguas residuales y se reduzca la operación de pozos.

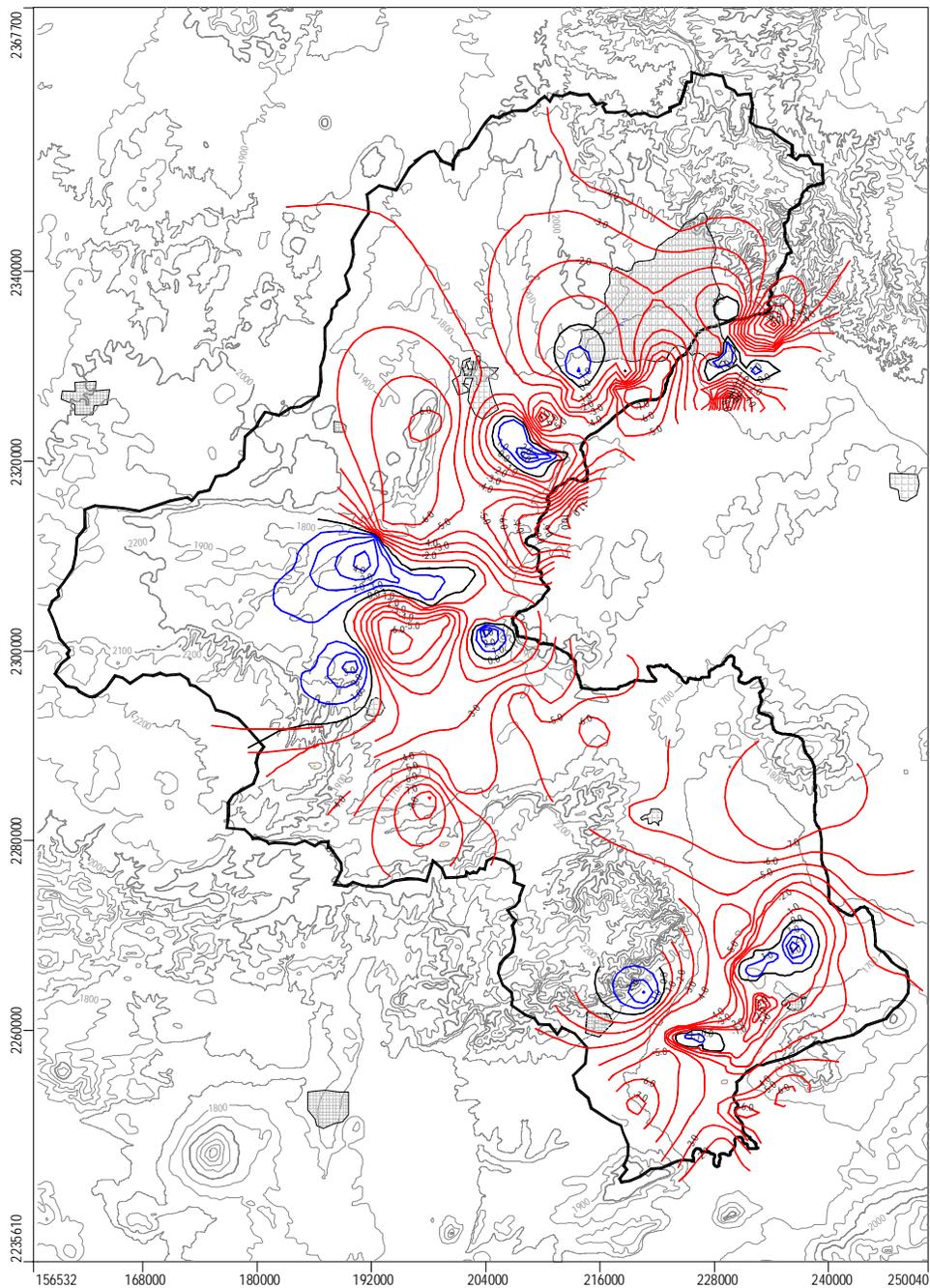


Figura 5.17 Simulación de comportamiento de niveles estáticos a tres años (2007). En rojo evoluciones negativas y en azul positivas. Equidistancia entre curvas de un metro.

Evoluciones de niveles estáticos para los periodos 1999-2004 (Figura 3.12) y 2003-2004 (Figura 3.13) evidenciaban la formación de un cono de abatimiento en la parte central de la subcuenca. De no controlar el déficit existente entre la recarga y las extracciones, para 2007 el cono se acentuará y descenderán los niveles hasta seis metros, lo que promedia un abatimiento de dos metros por año en la zona.

El modelo de simulación muestra que no todo es negativo para la zona centro de la subcuenca, particularmente en la parte centro occidental se observa una zona con recuperación de niveles de hasta tres metros, dicha recuperación ya se evidenciaba en 2002 debido a que la configuración de niveles estáticos mostraba un domo de recuperación con niveles de 45m (Figura 3.8), asimismo, para 2004 esos mismos niveles evolucionaron de manera positiva hasta 40m (Figura 3.10). Los niveles estáticos de la zona para el 2007 podrían fluctuar entre 38 y 39m, lo anterior se puede justificar debido a que en esa región se manifiesta una de las principales fuentes de recarga al acuífero (Figura 3.15).

La zona noreste de Cuerámara ha sido otra de las más afectada por el descenso de niveles, tan solo en cinco años (1999-2004) se detectaron evoluciones negativas de hasta seis metros (Figura 3.12). El modelado hidrodinámico pronostica que en los próximos tres años (2007) los niveles del área descenderán nuevamente seis metros (Figura 5.17), lo cual significa un aumento en la velocidad de abatimiento, de 1.2m/año para el primer período a 2m/año para el segundo.

La zona oriental de Cuerámara tiene características peculiares, a pesar de que sus niveles han evolucionado negativamente (entre tres y cuatro metros) en los últimos cinco años (Figura 3.12), la configuración actual de elevación de niveles estáticos evidencia una zona de equilibrio (Figura 3.11). Con lo anterior se deduce que el domo de recuperación que existía en la zona en 2002 se extinguirá para dar paso a un cono de abatimiento que descenderá los niveles piezométricos hasta siete metros en los próximos tres años.

La zona sur de la subcuenca, particularmente al norte de Abasolo, ha manifestado domos de recuperación y evoluciones positivas al menos desde 1999 (figuras 3.8, 3.10,

3.12 y 3.13). Para el año 2007 continuará la presencia de dicho domo sólo que en menores dimensiones y con cambios de almacenamientos favorables de entre uno y tres metros.

Llama la atención el comportamiento de niveles estáticos en el valle que se forma entre Pénjamo y Abasolo, según los resultados del modelo, en tres años se formará un pequeño domo de recuperación con cambios de almacenamiento de hasta un metro. Es posible que esta zona y la mencionada en el párrafo anterior mantengan sus condiciones piezométricas favorables gracias a un aporte adicional de agua de componentes profundas y externa a la subcuenca que utilice estructuras regionales como medio de ascenso. Lo anterior evidenciado por el termalismo de la zona, además de que gran parte del agua extraída en esa región es premoderna (Figura 4.23)

La evolución piezométrica a cinco años muestra que gran parte de la zona de estudio se verá afectada por el descenso de niveles estáticos (Figura 5.18). La zona mas afectada para el 2009 será el Valle de León y sus alrededores con abatimientos entre 12 y 15m, lo cual significa un abatimiento promedio anual de 2.7m.

La parte norte de la Ciudad de León continuará con el abatimiento de sus niveles, de 110m que tenía en 2002, 115m para 2004, a 119m para el 2007, hasta llegar a 127m en el 2009. Es decir, en 7 años (2002-2009) el nivel estático se abatirá 17m, con un promedio anual de 2.4m similar al determinado para el Valle de León y sus alrededores.

Como ya se había expresado, evoluciones positivas que manifiestan actualmente en la zona central y sureste de León (Figura 3.13) se verán reducidas en área y volumen para el 2007 (Figura 5.17) y continuará esa misma tendencia negativa hacia el 2009, donde tan solo quedará un pequeño domo de recuperación en el extremo sureste de la ciudad.

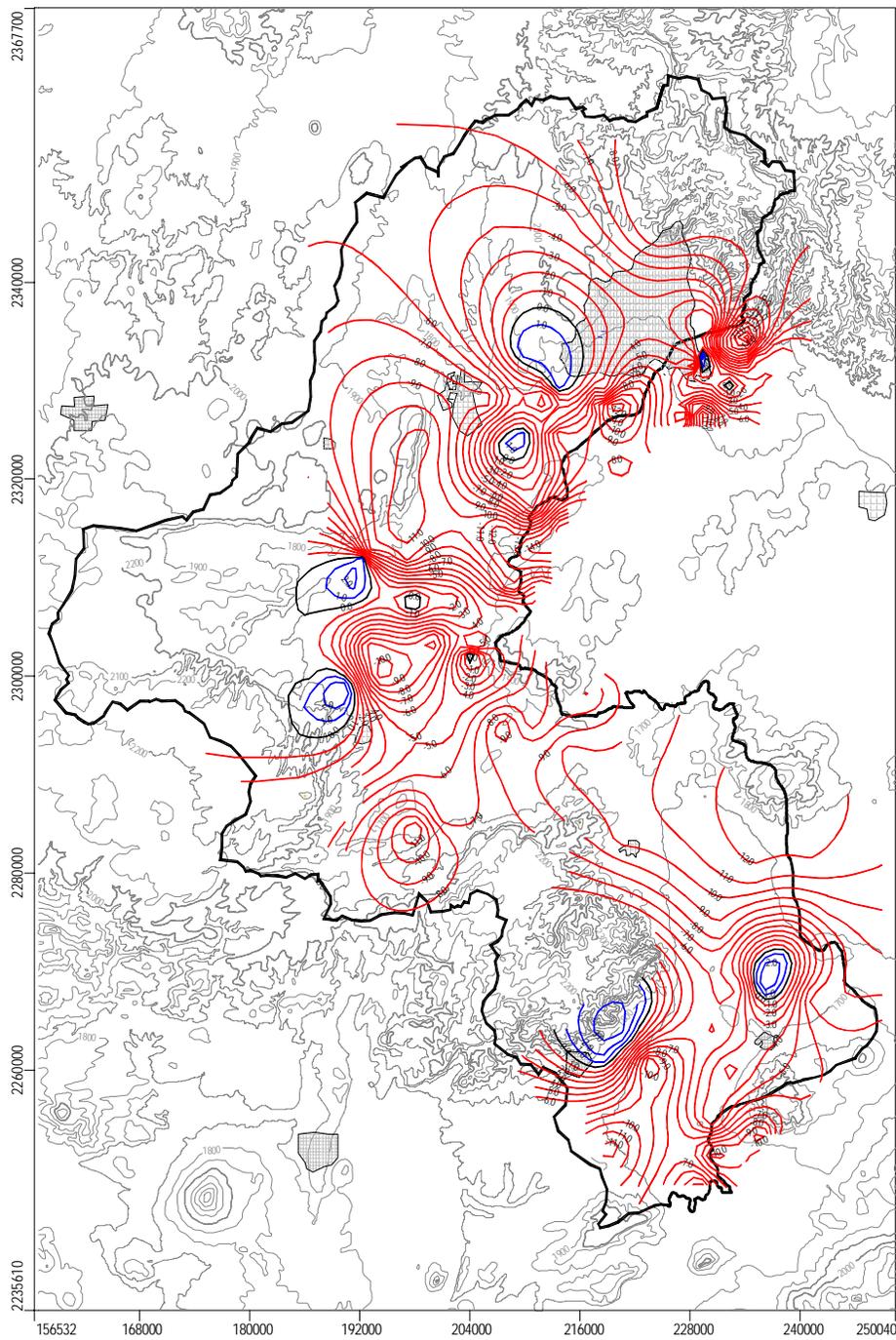


Figura 5.18 Simulación del comportamiento de niveles estáticos a cinco años (2009). En rojo evoluciones negativas y en azul positivas, equidistancia de un metro.

Contrastando con lo anterior, al extremo suroeste de la ciudad se observa un domo de recuperación que ha prevalecido al menos desde 2002 y posiblemente siga conservando sus condiciones hasta el año 2009.

La zona de San Francisco del Rincón se verá afectada por el descenso de niveles de hasta diez metros, lo cual se traduce a abatimientos con velocidades promedio de 2m/año, prácticamente del mismo orden a las mencionadas en el Valle de León y zonas aledañas. El domo de recuperación que evidenció el modelo al sureste de la ciudad, seguirá teniendo presencia para el 2009, sólo que se verá reducido en extensión y su cambio de almacenamiento será de un metro, a diferencia del 2007 que sería de tres metros.

Nuevamente el modelo evidencia como la parte central de la subcuenca se verá afectada por evoluciones piezométricas negativas. Una zona con evoluciones positivas que se observó en los periodos 2002 y 2004 y se simula para 2007, reducirá su tamaño; para 2009 quedarán sólo dos domos aislados. Al oriente de esa zona se evidenció la formación de un cono de abatimiento en 2007, éste mismo continúa con el descenso de niveles hasta alcanzar 10m, de tal manera que la profundidad del nivel estático alcanzará 60m con una velocidad promedio de abatimiento anual de 2m/año.

En las zonas noroeste y oriente de Cuerámara los niveles estáticos seguirán descendiendo, alcanzando la primera nueve metros, mientras que la segunda 12, lo anterior implica velocidad promedio de abatimiento de 2.1m/año. Dado su historial piezométrico, la zona ha sido una de las más afectadas desde 1999 y si de no modificarse las condiciones de infiltración - extracción, es probable que a futuro se genere un cono de abatimiento con dimensiones regionales.

La zona norte de Abasolo aparentemente mantendrá condiciones similares a las de 2007 (Figura 5.17), las evoluciones negativas serán del mismo orden y la única diferencia radicaré en que el domo observado desde 1999 reducirá su extensión y se concentrará en un solo punto.

Es posible que la recarga adicional a la considerada en el modelo a través de fallas regionales, descrita y evidenciada anteriormente se vea superada por nuevas

extracciones, lo que propiciará que para el 2009 domos observados en 2007 desaparezcan o sean limitados considerablemente. Por lo mismo se recomienda que en la siguiente actualización hidrogeológica que se haga para la subcuenca, se considere el efecto de recarga a través de fallas regionales en el modelo matemático.

5.5.1. Zonificación acuífera para manejo de agua subterránea

En base a los resultados del modelo se proponen diferentes políticas de manejo del agua subterránea, para ello se dividió el área de estudio en tres zonas acuíferas (Figura 5.19).

Zona 1. Áreas menos afectadas por el descenso de niveles estáticos, se concentran principalmente en la parte norte, centro y sur de la subcuenca. En su mayor parte relacionada a zonas de recarga de ladera por lo que el agua tiende a ser de buena calidad ya que no es afectada por actividades antrópicas, siempre y cuando no exista cercanía con zonas industriales ni con las márgenes del Río Turbio.

Se puede considerar la mejor zona acuífera disponible dentro del área de estudio, sin embargo, su alto potencial está directamente relacionado a precipitaciones pluviales, al retorno de riego agrícola, así como al aporte de agua por las ya mencionadas fallas regionales.

En esta zona no es recomendable incrementar la extracción de agua por bombeo ya que, debido a su condición de recarga de ladera de montaña, en la mayoría de los casos genera en su zona acuífera niveles estáticos profundos y bajos rendimientos específicos.

A fin de detener el abatimiento de niveles en esta zona, se recomienda intensificar el uso de aguas residuales para riego agrícola, de tal manera que se aminore el uso de pozos agrícolas en la zona.

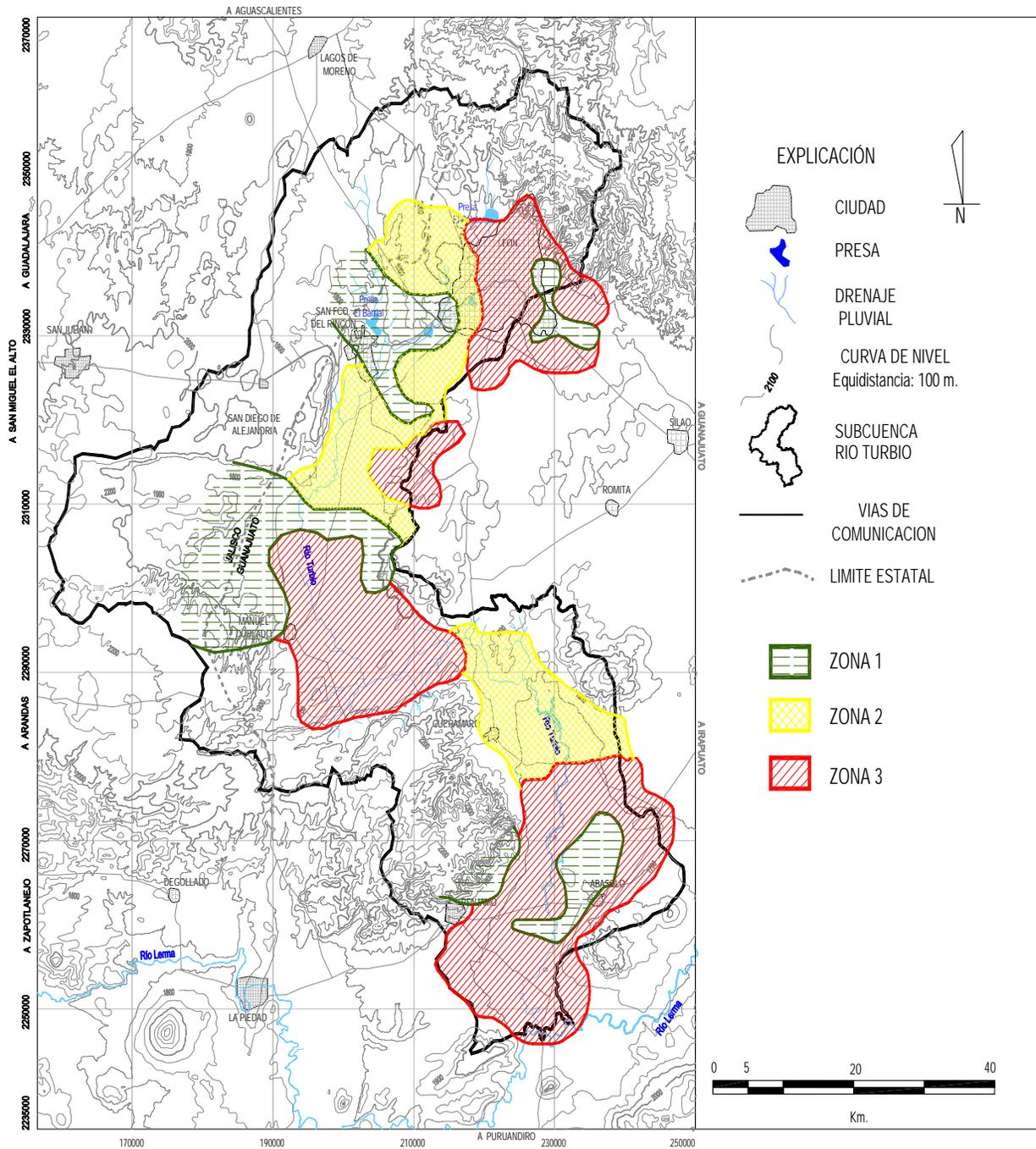


Figura 5.19 Zonificación acuífera

Zona 2. La piezometría actual manifiesta de buenas a regulares condiciones acuíferas, sin embargo, a tres y cinco años la evolución de niveles será de orden negativo con velocidades promedio de 2m/año, lo que generará nuevos conos de abatimiento en zonas donde actualmente existe aparente equilibrio e inclusive donde existen pequeños domos de recuperación.

Es necesario enfatizar que el futuro del acuífero depende en gran parte de entradas laterales y flujos regionales externos a la subcuenca, así como del retorno de riego y no necesariamente de la recarga meteórica. Por lo que en esta zona no es recomendable incrementar la extracción de agua por bombeo ya que es altamente sensible a la explotación de agua subterránea, considerándose que se deben enfocar la mayor parte de los esfuerzos preventivos a la sobreexplotación acuífera.

La mayor parte del agua extraída en la zona proviene de sedimentos cuya granulometría varía de gruesa a media que constituyen paquetes sedimentarios de permeabilidad alta, intercalada con lentes arcillosos de espesores variables. Dependiendo de lo anterior, pueden ser capaces de formar estratos acuíferos potentes, capaces de proporcionar grandes caudales.

Zona 3. Es la zona más crítica del acuífero. El abatimiento de niveles ha sido una constante desde hace varios años, su delimitación está directamente relacionada a grandes conos de abatimiento. Lo más recomendable es evitar que se ubiquen nuevas fuentes de extracción, a menos que sean perforadas hasta la capa fracturada.

En las regiones delimitadas para esta zona es conveniente que las autoridades responsables de la administración del recurso agua actualicen la normatividad referente a extracción y utilización de aguas subterráneas, con el fin de fijar nuevos volúmenes de extracción y reducir la velocidad de abatimiento hasta alcanzar una zona de equilibrio. Una segunda opción es que de manera conjunta, autoridades y usuarios, establezcan de manera voluntaria la modificación de los actuales regímenes de extracción.

A partir de la distribución estructural del subsuelo mostrada a través de secciones geológico-hidrogeológicas (figuras 3.2 a 3.4, así como de la zonificación acuífera elaborada en este apartado, se proponen distintas áreas para sustitución de

captaciones a diferentes profundidades y con el objeto de que estas sean emplazadas preferentemente en la capa fracturada (Figura 5.20). Es importante mencionar que en zonas donde no se hace recomendación es debido a la falta elementos que muestren el comportamiento del subsuelo de una forma particular.

Perforaciones mayores a 100m de profundidad. Las zonas propuestas se localizan al norte de San Francisco del Rincón, noroeste de Manuel Doblado y al poniente de Cuerámara, las dos primeras se ubican sobre una zona de recarga y directamente sobre rocas fracturadas, en este caso basaltos cuaternarios, además de riolitas y tobas riolíticas terciarias. En la tercer localidad existe un relleno sedimentario de poco espesor (aproximado a 50m) y debajo de éste riolitas y tobas riolíticas terciarias, por lo que sin necesidad de cubrir grandes profundidades nuevos aprovechamientos quedarían ubicados sobre material fracturado.

Perforaciones mayores a 250 m. Al sur de San Francisco del Rincón, al noreste de San Diego de Alejandría, oriente de Cuerámara, noreste de Pénjamo, así como en los alrededores de Abasolo, en estas zonas las condiciones piezométricas no muestran la presencia actual de conos de abatimiento, sin embargo, la modelación hidrodinámica permite predecir la formación de estos a corto plazo, por lo que futuras perforaciones deberán emplazarse al menos a 250m con el fin de no afectar niveles estáticos actuales.

Perforaciones mayores a 450 m. Se recomienda llevarlas a cabo en la ciudad de León y sus alrededores, lo anterior porque es una zonas donde los niveles estáticos han formado un cono de abatimiento de grandes dimensiones y profundidad (140 m). El relleno granular en la zona es de por lo menos 450 m por lo que se sugiere superar esa profundidad cuando haya necesidad de llevar a cabo sustituciones de pozos en esa región.

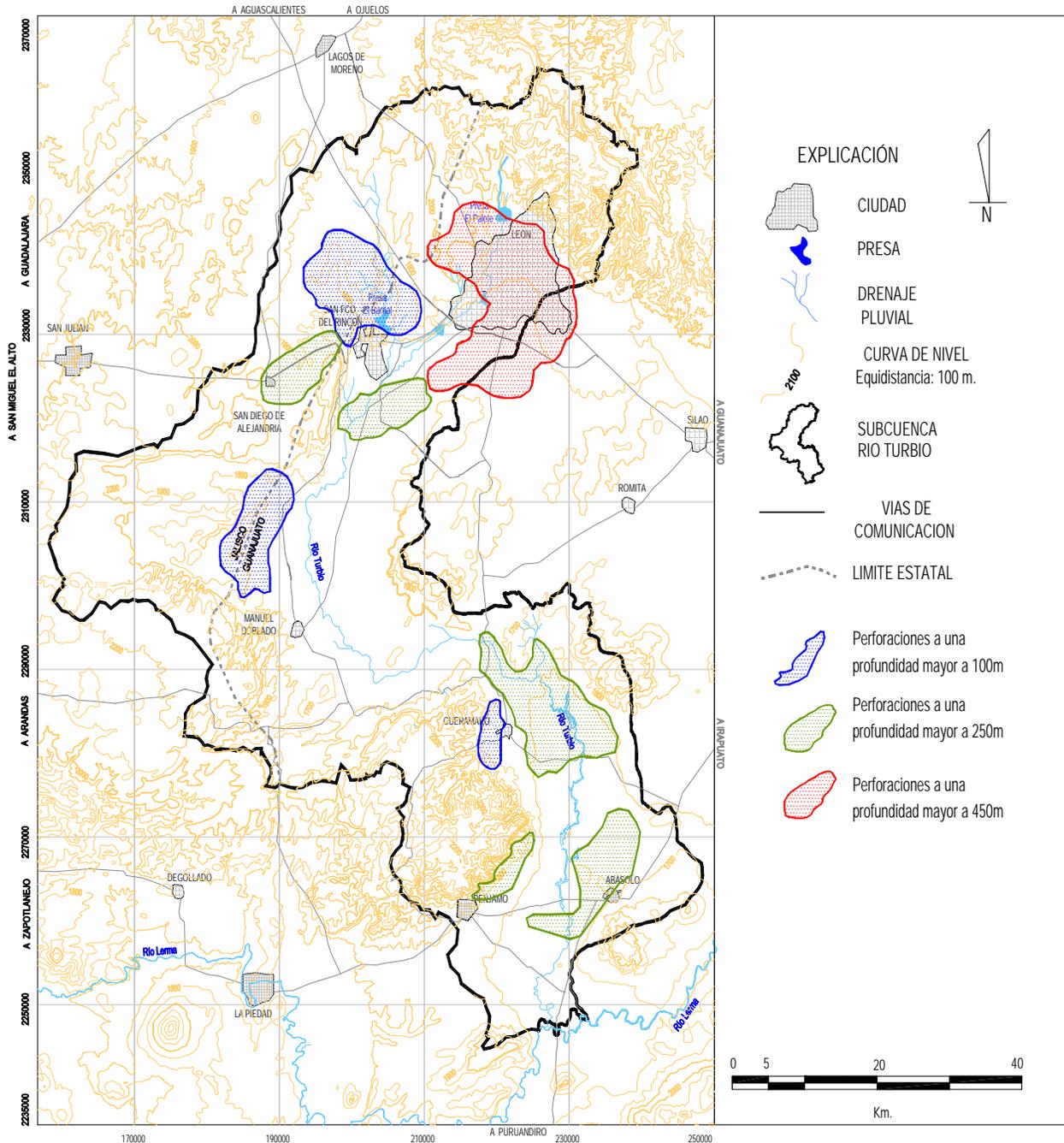


Figura 5.20 Zonas y profundidades recomendadas para sustitución de pozos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Tras el desarrollo del trabajo de tesis se desprenden las siguientes conclusiones:

- En base a varios estudios hidrológicos realizados a partir de la década de los cincuentas, se tienen censados actualmente 2,945 aprovechamientos distribuidos en la Subcuenca del Río Turbio, las densidades varían dependiendo de la zona; al sur se promedian 4.72 pozo/km², en la parte central 2.64 pozo/km², mientras que al norte se presentan densidades de hasta 7.88 pozo/km².
- Los niveles estáticos se presentan con dos tendencias: una donde fluctúan entre 5 y 30 m de profundidad, y otra con profundidades mayores a 45 m. Localmente existen niveles piezométricos entre 30 y 45 m, que no logran establecer una tendencia clara.
- La parte central de la subcuenca mantiene condiciones piezométricas favorables, se observan dos domos de recuperación al norte de Cuerámara y Manuel Doblado, lo cual propicia que esta zona no sea considerada como sobreexplotada.
- Las condiciones piezométricas que imperan en la zona de León son variables, mientras que al norte existe un cono con un abatimiento continuo, al oriente se ha manifestado un domo estable al menos desde 2002. La parte sur y sur-poniente tiene evoluciones negativas de tres metros por año.
- Es probable que la batería de pozos ubicada en La Muralla ocasione que el flujo subterráneo de la parte norte del Valle de León modificara su dirección original y ahora viaje al poniente atraído por el cono de abatimiento localizado en esa zona.
- La evolución de niveles estáticos para el periodo 1999-2004 muestra dos patrones en el comportamiento de niveles, uno positivo en la parte norte y poniente de la Subcuenca relacionado directamente a zonas de recarga, continúa en dirección norte-sur sobre las márgenes y parte del Valle del Río Turbio. Caso similar al norte de Abasolo, donde existen dos zonas cuyos niveles estáticos se han visto favorecidos en el transcurso de los últimos años. El segundo patrón es orden negativo y ha alcanzado

valores de 20 m en cinco años para en el Valle de León, entre 8 y 10 m. para la zona de La Muralla y de 4 a 9 m para los alrededores de Cuerámara y Pénjamo.

- Configuraciones piezométricas evidencian que la zona comprendida desde Manuel Doblado hasta el sur de Cuerámara permanece en equilibrio, inclusive se observa la presencia de domos de recuperación.

- La recarga ocurre a través de varias formas: a) producto de agua meteórica infiltrada a consecuencia del escurrimiento zonas serranas, b) volúmenes menores que se infiltran de presas y pequeños vasos de almacenamiento, así como por escurrimiento en ríos y arroyos en época de lluvias, c) inducida, a través de las red hidroagrícola donde sus canales no estén revestidos y por retorno de riego, d) a partir del agua de lluvia que se infiltra en zonas topográficamente altas, siempre y cuando las rocas tengan una permeabilidad adecuada, este tipo de recarga tiende a viajar en sentido horizontal, e) agua precipitada fuera de la subcuenca, que circula a través de discontinuidades regionales.

- Se observan al menos tres principales zonas de recarga natural, una localizada al norte y noroeste de la subcuenca, ocurre a través de areniscas y conglomerados terciarios, la segunda se ubica al poniente del área entre los poblados Manuel Doblado y San Diego de Alejandría, a través de andesitas y basaltos terciarios. La tercera zona se localiza en las inmediaciones Pénjamo, donde afloran tobas riolíticas terciarias que el agua utiliza como medio para infiltrarse y alimentar esa zona del acuífero.

- Las direcciones de flujo subterráneo se han invertido en la mayor parte de los valles, excepto al norte y oriente de Cuerámara, así como al noroeste de San Francisco del Rincón.

- La disposición espacial de los depósitos aluviales, así como la alteración, fracturamiento y fallamiento de las unidades consolidadas controlan el movimiento del agua subterránea.

- La estimación de parámetros hidráulicos se basó en el análisis de la información bibliográfica y la proporcionada por COREMI, a partir de siete pruebas de bombeo

desarrolladas y 17 reinterpretadas. Valores de transmisividad entre 160 y 230 m²/día se observan en la mayor parte de los márgenes del Río Turbio y en los alrededores de San Francisco del Rincón. Para la zona de La Muralla imperan transmisividades entre 90 y 120 m²/día. Zonas con bajas transmisividades (10 a 30 m²/día) se ubican al oriente de Manuel Doblado, poniente de La Muralla y sur de San Diego de Alejandría. La transmisividad media para el acuífero (parte centro y norte) oscila entre 90 y 150 m²/día, con valores máximos de 5,125 y 3,728 y mínimos de 0.003 y 0.01 m²/día.

- Las conductividades hidráulicas máximas (2.1, 1.6 y 1.3 m/día) se observan en los alrededores de San Francisco del Rincón, sureste de Manuel Doblado y en la parte central del área sobre las márgenes del Río Turbio, respectivamente. Valores mínimos (0.1 y 0.3 m/día) se localizan en la zona centro occidental de la subcuenca y al poniente de Manuel Doblado. La conductividad media para el sistema acuífero es de 0.68 m/día.

- Se definieron 6 unidades que cubren toda el área de estudio, mismas que tienen continuidad hacia la Subcuenca del Río Guanajuato: dos unidades de carácter granular con permeabilidades alta y baja, además de cuatro unidades fracturadas con permeabilidades que varían desde alta (incluye basaltos cuaternarios y riolitas fracturadas, principalmente), media (andesitas y basaltos de la Sierra de Pénjamo), baja y muy baja (rocas graníticas, unidades mesozoicas, y conglomerados Guanajuato y Duarte-Cenicera), ésta última funciona como basamento hidrogeológico del acuífero.

- EL modelo conceptual del acuífero tiene comportamientos y patrones que concuerdan con el modelo de la Subcuenca del Río Guanajuato. Se trata de un sistema acuífero donde el agua circula por dos medios, uno granular con características heterogéneas y otro fracturado constituido por rocas volcánicas. Ambos medios comunicados hidráulicamente con subcuencas vecinas a través de fallas y fracturas profundas.

- Se propone la existencia de un sistema acuífero de tipo libre a semiconfinado localmente. En los primeros 30 metros, en algunas zonas, se verifica la presencia de un acuífero superior que fue agotado hace años pero que ya da muestras de recuperación, mismo que sustenta aprovechamientos de escaso gasto, para uso doméstico o

abrevadero. Por debajo de este se encuentra un acuífero regional de amplia extensión y con una composición variable, cuyo espesor puede llegar hasta 800 o 1,000 m.

- En las sierras y lomeríos que forman parte de la subcuenca predominan los afloramientos de rocas riolíticas del Paleógeno, relacionadas con el vulcanismo de la Sierra Madre Occidental, que cuando presentan fracturamiento importante, constituyen la parte basal del acuífero regional, con espesor probable de aproximadamente 350 m. Existen también volúmenes menores de rocas andesíticas y basálticas con edades que van del Paleógeno al Cuaternario, con grados variables de permeabilidad. El basamento hidrológico está constituido por un complejo plutónico-volcánico-metasedimentario mesozoico y por una unidad de conglomerado rojo tipo molasa del Paleoceno-Eoceno (conglomerados Guanajuato y Duarte-Cenicera).

- Las fronteras horizontales del sistema acuífero están constituidas hacia la parte al norte por las unidades hidrogeológicas V y VI formadas por las rocas intrusivas y mesozoicas de la Sierra de Guanajuato; al suroeste la frontera está representada por el alto estructural de la Sierra de Pénjamo. Al noroeste, sureste, oriente y poniente de la subcuenca, el acuífero no está restringido de manera horizontal, por lo que se presume una comunicación hidráulica con las subcuencas vecinas. Las fronteras verticales están definidas por lentes arcillosos así como por el basamento hidrogeológico.

- En las principales zonas de recarga natural los valores de conductividad eléctrica son bajos, lo cual indica que el agua se encuentra en constante movimiento. Valores altos de conductividad (2,100 a 2,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se localizan al oriente de Cuerámara, noroeste de Pénjamo, oriente de Manuel Doblado, suroeste de León y sur de San Francisco del Rincón.

- En la subcuenca se tiene una recarga total anual de 279.6 Hm^3 , la cual es superada por extracciones de 436.6 Hm^3 , generando déficit de 157 Hm^3 .

- En el área de estudio precipitan anualmente alrededor de 3,111 Hm^3 , el escurrimiento a través de los principales cauces es de 127 Hm^3 , mientras que la

evapotranspiración total anual fue determinada en 2,754 Hm³, por lo tanto, la infiltración anual se calcula del orden de los 229 Hm³.

- En el acuífero superior la conductividad eléctrica permite reconocer e identificar la recarga vertical producida por el retorno de riego agrícola, la cual implica arrastre de lixiviados que ingresan al acuífero como Na, Cl, Mg y SO₄, mismos que incrementan el valor de la CE, además de la dureza del agua.

- Las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos varían desde 100 a 1,150 mg/lit. Valores mínimos se localizan al norte, oriente y poniente de la subcuenca y se relacionan a la influencia del agua meteórica en esas zonas. Valores máximos se encuentran al suroeste de León, sur de San Francisco del Rincón, oriente de Cuerámara y norte de Abasolo.

- La distribución de temperaturas del agua subterránea presentan un amplio rango (de 17 a 51 °C) con temperatura promedio de 28.2 °C. Este rango puede atribuirse a amplios y variados regímenes de flujo subterráneo. Temperaturas máximas del agua subterránea se encontraron al sur de la subcuenca, al poniente de Abasolo y oriente de Cuerámara, con valores de 51.2 y 51.5 °C, respectivamente, relacionadas a fuentes de mayor profundidad y lejana procedencia.

- Los valores de pH oscilan en un rango de 6.19 a 8.47, el valor máximo corresponde al pozo de agua potable de la comunidad Rancho Nuevo, entre las ciudades de León y San Francisco del Rincón, en una zona que presentó altos contenidos de STD y anomalías en varios elementos. El valor mínimo de pH corresponde al pozo de agua potable de la comunidad Las Lagunas, al sureste de Manuel Doblado. Valores ligeramente ácidos se registraron en pozos y manantiales cercanos a zonas de recarga.

- El oxígeno disuelto tiene amplia gama de valores en la zona de estudio (0.28 a 6.80 mg/lit). Valores bajos de están relacionados y orientados conforme al cauce del Río Turbio, mientras que valores altos coinciden con las principales zonas de recarga.

- El comportamiento generalizado que refleja la hidrogeoquímica, a través de un diagrama de Piper, establece que la mayoría del agua de los pozos tiene comportamiento del tipo sódico-bicarbonatado, el Ca, Mg, Na y HCO_3 son los componentes principales y más abundantes para la clasificación de aguas subterráneas, en una menor proporción se encuentran los sulfatos.
- Existe una evidente similitud en cuanto a la composición química del agua en las subcuencas del Río Turbio y del Río Guanajuato. Por lo anterior y al no existir una barrera natural entre ambas, se concluye que están comunicadas hidráulicamente, al menos las zonas norte y sur.
- Por medio de diagramas de Stiff se determinó una gran diversidad de tipos de agua (18), por lo que se optó por agruparlas en familias y subfamilias. Entre ellas se encuentra la familia Cálcica-Magnésica-Bicarbonatada (Ca-Mg-HCO_3), la cual se compone de dos subfamilias, Ca-Mg-Cl-HCO_3 y Ca-Mg-Na-HCO_3 ; la familia Cálcica – Sódica-Bicarbonatada (Ca-Na-HCO_3), con tres subfamilias (Ca-Na-Cl-HCO_3 , Ca-Na-Mg-Cl-HCO_3 y Ca-Na-Mg-HCO_3); la familia Magnésica Cálcica Bicarbonatada (Mg-Ca-HCO_3), con dos subfamilias (Mg-Ca-Na-HCO_3 , Mg-Na-Ca-HCO_3); la familia Sódica Cálcica Bicarbonatada (Na-Ca-HCO_3), con tres subfamilias (Na-Ca-Mg-HCO_3 , $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ y Na-Cl-HCO_3); y la familia Sódico Bicarbonatada (Na-HCO_3). Las más comunes de estas clases de agua se relacionan directamente con la alteración por intemperismo del entorno geológico, constituido mayormente por rocas riolíticas, con menores volúmenes de rocas andesíticas y basálticas. Sin embargo, se verifica también la influencia de actividades antrópicas y remanentes de actividad hidrotermal.
- La hidrogeoquímica de la zona permite concluir que el acuífero alcanza mayor vulnerabilidad a los contaminantes que transporta el Río Turbio durante la época de secas. De la misma forma, la mayor parte de las márgenes del río, desde León hasta su confluencia con el Río Lerma, han sido afectadas de una manera u otra por esos mismos elementos.
- Se reconoce una zona que alberga varios aprovechamientos con altos valores en el contenido de STD, así como de varios parámetros y elementos; entre ellos, metales

pesados como arsénico y cromo. Esta zona se extiende entre las ciudades de San Francisco del Rincón y León, hacia las cercanías del cauce del Río Turbio y hasta unos 10 Km al sur de la primera localidad. Dentro de la Subcuenca, es la zona que acusa mayores y más importantes indicios de afectación por descargas urbanas e industriales.

- De manera general las muestras tomadas en ocho manantiales, muestran buena calidad de agua y similar comportamiento físico-químico. Una muestra (M151) tomada en la parte norte de la Subcuenca del Río Guanajuato fuera del área de estudio, representa un comportamiento similar al resto de los manantiales, por lo que se sugiere la presencia de agua con un mismo origen y donde actúan procesos naturales similares.

- Se analizó el agua de seis norias, la mayoría ubicadas cerca del Río Turbio. El contenido de cloruros en todos los casos supera 15mg/lit, lo cual indica que el agua ha sido afectada por agentes antropogénicos. Además de cloruros, el agua excede en algunos elementos el límite permisible por la NOM-127-SSA1-1994, en la mayoría de los casos debido a niveles estáticos someros lo cual incrementa la vulnerabilidad a agentes contaminantes que transporta el río.

- EL Río Turbio fue muestreado en dos ocasiones, al finalizar la época de estiaje en los alrededores de San Francisco del Rincón y en época de lluvias en la comunidad El Salitre, antes de su confluencia con el Río Lerma. Los contenidos de iones mayores para ambas muestras indican una tendencia similar pero con concentraciones distintas, lo cual sugiere que el río transporta los mismos elementos en ambas épocas, sólo que en la época de lluvias el agua integrada al río a través de sus afluentes permite la dilución de algunos de los contaminantes y otros elementos, además de que a lo largo de su curso algunos de estos pueden ser adsorbidos por los suelos.

- La mayoría de los datos graficados para los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y δD caen distintivamente por debajo de la línea meteórica local, lo cual indica que ha ocurrido un fraccionamiento secundario o que la mayoría del agua es antigua y fue recargada en un régimen climático distinto que el caracterizado por la línea meteórica definida para la misma zona.

- Valores de Oxígeno y Deuterio de la mayoría de las muestras se agrupan en un intervalo estrecho, por lo que se infiere cierta consistencia de los valores isotópicos, lo cual permite tipificar el agua de la zona de estudio para el año 2004 por sus promedios isotópicos $-9.81 \delta^{18}\text{O}/_{00}$, $-74.2 \delta\text{D}/_{00}$.
- A través de la expresión $\delta^{18}\text{O} = -2.13h - 3.3$ (donde h es un factor de altura en Km) se determinó un rango de elevación para zonas de recarga entre 2,300 y 3,400m, debido a que la altura máxima no corresponde a la zona de estudio, es factible suponer entradas de agua horizontales de agua de subcuencas vecinas cuyas características isotópicas tienen similitud. Por las elevaciones se considera que esta agua viaja del poniente, es decir de los Altos de Jalisco o, incluso, de zonas más alejadas.
- Resultados isotópicos sugieren que cuerpos de agua superficial no tienen aportaciones considerables a la recarga del acuífero.
- Los contenidos de tritio en la zona indican la presencia de tres tipos de agua, a) con nulo contenido en tritio y por ende precipitada antes de la década de los pasados años '50s, b) con moderado contenido en tritio atribuible a agua con una determinada fracción procedente de precipitaciones antes de la década de los cincuentas, c) con mayor contenido en tritio relacionado con precipitaciones modernas como el agua de lluvia del 2003.
- Dos manantiales (M076 y M104) resultaron con nulo contenido de tritio, lo cual evidencia flujos regionales en la subcuenca.
- De las muestras tomadas de los cuatro manantiales, dos presentaron concentraciones nulas de tritio (M076 y M104), lo cual reafirma la hipótesis sobre la presencia de flujos regionales en la subcuenca. El agua que emerge a través de estos manantiales precipitó antes de 1953 y posiblemente utilice como medio de ascenso grandes discontinuidades regionales.
- Una evidencia concreta de que flujos regionales son conducidos a niveles superficiales por fallas de carácter regional es el caso del pozo localizado en la

comunidad Cerrito de Agua Caliente, al oriente de Cuerámara, donde el nivel estático es de 25 m, la temperatura del agua es de 51.5 °C y sin contenido de tritio.

- De las 35 muestras analizadas por tritio, el 65% carece del mismo, éstas aparecen distribuidas en toda la subcuenca y tienen influencia en todas las profundidades piezométricas. Se deduce que gran parte del agua utilizada en la zona es premoderna, que difícilmente fue aportada en su totalidad a través de estructuras que conducen un flujo regional, por lo que hay zonas en el acuífero cuyos niveles no han sido renovados por agua meteórica reciente al menos desde los últimos cincuenta años.

- El comportamiento isotópico de la zona, particularmente los valores de tritio hacen suponer que en la zona a profundidad, a través de grandes discontinuidades regionales, se tienen entradas de aguas laterales y verticales, mismas que por diferencia de presión hacen que el agua antigua premoderna tienda a emerger.

- Proyecciones del modelo matemático de simulación hidrodinámica a tres años (2007), muestran patrones similares a los observados para el periodo 2003-2004. La zona más afectada será el Valle de León y sus alrededores, con abatimiento anual promedio de 2.6 m, en la parte norte de León continuará el descenso de niveles, alcanzando 115 m. Donde las condiciones piezométricas son favorables en la parte central de la subcuenca, descenderán los niveles hasta seis metros con velocidad promedio de 2m/año. La zona noreste de Cuerámara aumentará su velocidad de abatimiento, de 1.2m/año en el periodo 1999-2004 a 2 m/año. Respecto a la zona sur, continuará la presencia del domo de recuperación observado al norte de Abasolo, sólo que reducirá sus dimensiones y su cambio de almacenamiento será reducido entre uno y tres metros.

- Condiciones piezométricas simuladas a cinco años (para 2009) muestran que la mayor parte de la zona de estudio se verá afectada por el descenso de niveles estáticos. La zona mas afectada será el Valle de León y sus alrededores con abatimientos entre 12 y 15 m con velocidades promedio de 2.7 m/año. El cono de abatimiento ubicado al norte de León alcanzará 127 m. La zona de San Francisco del

Rincón se verá afectada por un descenso de niveles de hasta 10 m con velocidades promedio de 2 m/año. En la parte central de la subcuenca también predominará el abatimiento, descenderán los niveles hasta 60 m a razón de 2 m/año, lo mismo para el noroeste y oriente de Cuerámara; se abatirán 12 m los niveles estáticos a 2.1m/año. Pequeños domos de recuperación prevalecerán en la parte norte, centro y sur.

6.2. Recomendaciones

- Fijar nuevos volúmenes de extracción en zonas de mayor abatimiento a fin de que éste reduzca su velocidad hasta alcanzar un estado de equilibrio.
- Generar, actualizar y aplicar políticas de cambios y rotación de cultivos por aquellos que requieran menor cantidad de agua. Continuar incentivando a los productores que accedan al cambio para evitar que sigan utilizando cultivos de bajo rendimiento y alto consumo de agua.
- Fomentar la modernización de sistemas de riego, que eviten el desperdicio y las pérdidas por evaporación, lo cual redundará en reducción de costos por consumo de electricidad.
- Continuar con las políticas de utilización de aguas residuales. En su caso, sustituir la extracción de agua subterránea por volúmenes de aguas residuales que actualmente no se encuentren concesionados, particularmente en zonas con velocidades de abatimiento críticas.
- Revisar la ubicación en campo de los pozos que componen las redes de monitoreo piezométrico con el fin de relocalizar algunos de los pozos piloto, particularmente algunos de los que actualmente son usados para agua potable; debido a que frecuentemente operan de manera continua y se dificulta su medición, además de que la lectura puede no ser representativa de la zona por el poco tiempo de reposo que estos mantienen.

-
- Emplazar a los nuevos pozos que se construyan preferentemente al medio fracturado.
 - Verificar que los usuarios tengan la instalación de poliducto en los pozos, a fin de que se faciliten las mediciones de niveles piezométricos y el desarrollo de pruebas de bombeo.
 - Actualizar el censo de aprovechamientos hidráulicos.
 - Que la autoridad correspondiente vigile que exista en cada pozo el respectivo medidor de gasto y que se verifique su adecuado funcionamiento en todos los casos.
 - Elaborar estudios que determinen la factibilidad de perforar nuevos pozos en zonas de falla y donde se tenga la presencia de estructuras regionales que aporten agua al sistema acuífero.
 - Realizar un monitoreo detallado de las descargas industriales y calidad de agua en los aprovechamientos, particularmente en la zona comprendida entre las ciudades de León y San Francisco del Rincón, así como hacia la zona sur de esta última.
 - Establecer políticas más estrictas para control y saneamiento de descargas de aguas residuales, lo anterior con el fin de disminuir en cantidad y concentración los elementos contaminantes que transporta el Río Turbio y por ende efectos negativos al agua subterránea.
 - Elaborar análisis físico-químicos en años próximos y de preferencia en los mismos aprovechamientos, con el fin de determinar la evolución de los principales elementos que exceden las normas oficiales a nivel de subcuenca.
 - En base al modelo de simulación hidrodinámica y la zonificación relacionada a las condiciones acuíferas de la subcuenca. Se recomienda, entre otras, reducir los niveles de extracción para la zona tres, no incrementar los volúmenes de extracción de agua subterránea para la zona dos e intensificar el riego agrícola con aguas residuales en la uno.
-

7. BIBLIOGRAFÍA

- American Public Health Association (APHA), 1995. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 19th ed., New York, 769 pp.
- Anderson M.P., Woessner W.W., 1992, Applied Groundwater Modeling, Simulation, of Flow and Advective Transport. Academic press, Inc. 231 p.
- ARIEL Construcciones, 1969. Estudio Geohidrológico Formal en la zona del Valle de León y Río Turbio, SARH Reporte Técnico.
- Bostford C. W., 1909. Geology of Guanajuato district, México. Engineering and Mining Journal, v. 87. Briggs, Ian C., 1974. Machine contouring using minimum curvature (spline). Geophysics Vol. 39 No. 1 p. 34-42.
- Carrasco N., G., Milán M., Verma S., 1989. Geología del Volcán Zamorano, Edo. de Querétaro. U.N.A.M., Instituto de Geología, Revista 8, p. 194-201.
- Castillo R., 1985. El Análisis Isotópico y sus Aplicaciones. Instituto de Física, UNAM. Reporte Interno.
- CEASG, 1999. Plan Estatal Hidráulico del Estado de Guanajuato 2000-2025. Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de Guanajuato. Guanajuato, México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), BGS, UACH, SAPAL, 1996. Effects of wastewater reuse on urban groundwater resources of Leon, México. BGS Technical Report WD/95/64.
- Comisión Nacional del Agua, 1999. Guía de Muestreo de Aguas Subterráneas y el Manual de Equipamiento de Pozos de Monitoreo. México, D.F.
- COREMI, 1997. Cartas Geológico-Mineras escala 1:250,000, hojas F14-7 (Guanajuato) y F14-10 (Querétaro). Pachuca, Hgo.
- COREMI, 1997. Informe de la carta Geológico-Minera y Geoquímica Guanajuato F14-7, 1:250,000.

-
- COREMI, 1999. Informe de la carta Geológico-Minera y Geoquímica Querétaro F14-10, 1:250,000.
 - COREMI, 2004. Potencial Geohidrológico del Graben de León. Informe técnico.
 - Cortés, A., Durazo, J. And Farvolden, R.N., 1997. Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico: annotated bibliography and interpretation. Journal of Hydrology 198: 346-376.
 - Cortés A., 1985. Aplicación de la espectrometría de Masas y Técnicas Isotópicas para la determinación de Oxígeno-18 y Deuterio en problemas Hidrológicos. Tesis Profesional. Fac. De Ciencias, UNAM
 - Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science vol. 133.
 - Chauvé P., Fourcade E., y Carrillo M., M., 1985. Les rapports structuraux entre les domaines cordillérain et mésogéen dans la partie centrale du Mexique: Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences. Paris, ser. 2, v. 301.
 - Dávila A., V. M., y Martínez R., J., 1987. Una edad cretácica para las rocas basales de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM. Simposio sobre la geología de la región de la sierra de Guanajuato, Gto. México.
 - Diario Oficial de la Federación, Enero de 2003. Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización. México, D.F.
 - Domenico, P.A. 1972. Concepts and Models in Groundwater Hydrology. McGraw-Hill, New York.
 - Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1988. Physical and Chemical Hydrogeology. New York; Wiley. 502 pp.
 - Durazo, J., 2001. Tendencias del Oxígeno18 en la precipitación del centro de México. Ingeniería Hidráulica en México, XVI (2): 93-102.
-

-
- Echegoyen S., J., Romero M., S., Velásquez S., S., 1970. Geología y yacimientos Minerales de la parte central del distrito minero de Pozos Guanajuato. Informe Técnico, Residencia Guanajuato. COREMI, México.
 - Edmonds, W.M. and Gaye, C. B. 1988. Solute profile techniques for recharge estimation in semi-arid and arid terrain. In : I. Simmers (Editors), Editors, Estimation of Natural Groundwater Recharge, Proc. NATO Advanced Research Workshop. Reidel Dordrecht, pp. 139-157.
 - Edwards, J. D., 1956. Estudios acerca de algunos conglomerados rojos del Terciario Inferior del centro de México. Congreso Geológico Internacional 20. México, D.F., Memoria.
 - Freeze, R.A.; Cherry, J., 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
 - García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen. México, D.F.
 - García D., Bueno J. E., y Aguirre M., A. L., 1990. Análisis Geomorfológico y Estructural de la región de la Luz, Sta. Rosa, Sierra de Guanajuato. Tesis Profesional Facultad de Minas , Metalurgia y Geología. Universidad de Guanajuato. Guanajuato, Gto., Mex.
 - Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., Burgeap Ingenieros Consultores, 1999. Desarrollo de un modelo integral para el análisis coordinado de las aguas subterráneas y superficiales en las Subcuencas de los Ríos Turbio y Guanajuato. Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato. Informe técnico.
 - Geofísica de Exploraciones Guysa S.A. de C.V., 1998. Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de León, Gto.
 - Geopsa, 1998. Seguimiento al estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle del Río Turbio, Gto. Informe Técnico elaborado para CEAG.

-
- Guerrero V. (1999). Hacia una Gestión Integral, Descentralizada y Participativa del Agua: Experiencia y Propuestas del Estado de Guanajuato. Seminario sobre Enfoques Innovadores para el Manejo del Agua. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F.
 - Guiza, R., Rendón, F., Baltierra, J., 1949. Estudio Geológico del Distrito Minero de Guanajuato, Gto. (zona de veta Madre): México, Instituto Nacional para la investigación de Recursos Minerales, Boletín 22, 75p.
 - GUYSA, S.A de CV, 1998. Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero Valle de León, Gto. Informe técnico elaborado para CEAG. Inédito.
 - GUYSA, S.A de CV, 1999. Desarrollo de un modelo Integral para el análisis de las aguas subterráneas y superficiales en las subcuencas de los ríos Turbio y Guanajuato, contrato No CEAGS-OD-EP-99-07, BURGEAP Diciembre de 1999.
 - Ham Chi, J.M 1999,2000, 2001, 2002 2003. “Estudio de Planeación del Aprovechamiento Sustentable de Acuíferos del Estado. de Guanajuato”, Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, Mexico.
 - Hernández A.O., Martínez J.B., Llanusa H. y Dilla F. ISPJAE. 2001."Modelos de Acuíferos". Texto de la Maestría de Ingeniería Hidráulica. CIH. Facultad de Ingeniería Civil.
 - Ingeniería Geológica Computarizada S.A., 1995. Resultados de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos realizados dentro del Valle del Río Turbio. Informe Técnico elaborado para CEAG. Inédito.
 - Instituto de Geofísica, UNAM, 1999. Estudio isotópico para la caracterización del agua subterránea en la zona de La Muralla, Gto. Informe técnico, elaborado para CEAG, inédito.
 - Instituto de Geofísica, UNAM, 2001. Definición de red para la caracterización de calidad físico-química del agua subterránea para el Acuífero Pénjamo – Abasolo. Informe técnico, inédito.
-

-
- JÄGER, E. y J.C. HUNZIKER, eds. (1979) *Lectures in Isotope Geology*. New York: Springer-Verlag.
 - Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 1998. Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero Penjamo-Abasolo, Gto.
 - López Vera L., 2003. La calidad del agua en grandes cuencas sedimentarias. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España.
 - Martínez R., J., 1992. Mapa Geológico de la Sierra de Guanajuato. Esc. 1:100,000. Serie Cartas geológicas y mineras del Instituto de Geología, UNAM. México, D.F.
 - Monod, O., Lapierre, H., Ortíz H., L. E., Chiodi, M., 1988. Alloctonie de l'arc de Guanajuato (Mexique): Société Géologique de France, Réunion des Sciences de la Terre, 12, Lille, Francia. p. 100.
 - Monod, O., Lapierre, H., Chiodi, M., Martínez, J., Calvet, P., Ortíz, E., Zimmerman, J. L., 1990, Reconstitution d'un arc insulaire intra-oceanique au Mexique central: la séquence volcano plutonique de Guanajuato (Crétacé Inférieur): C.R. Acad. Sci. Paris t. 310 Série II.
 - Monreal *et al.*, 2001 Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero Costa de Hermosillo, Municipio de Hermosillo, Sonora. Informe técnico.0
 - Montoya S., J., Barrera J.,A., Mejía O., I., 2004. El Proyecto de Consejo técnico de Aguas y los programas de manejo de acuíferos. Aquaforum Julio-Sep. año 8 No. 37. Agua Subterránea pp. 21-24
 - Morelli, C., (ed.), 1974, The International Gravity Standardization Net 1971, International Assn. Geod. Spec. Publ. 4.
 - Moreno *et al.*, (1979). Análisis de flúor y silicio de las aguas subterráneas del Terciario Detrítico. Hidrogeología y Recursos Hídricos. T-IV p. 702, Madrid, España.
 - Mújica, M. R., y Jacobo A., J., 1983. Estudio Petrogenético de las Rocas ígneas y Metamórficas del Altiplano Mexicano: Instituto Mexicano del Petróleo. Reporte interno, inédito.
-

-
- Nettleton, L. L., 1939, Determination of Density for Reduction of Gravimetric Observations: Geophysics, 4, pp176-183
 - Nieto S., A. F., Escobar G., J., Dobarganes B., y Aguirre M., 1992. Interpretación Estructural de los rasgos geomorfológicos principales de la Sierra de Guanajuato. UNAM. Instituto de Geología. México.
 - NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
 - NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
 - Ortiz-Hernández L. E., 1988; L'arc intra-océanique crétacé de Guanajuato (Mexique central): caracteres pétrographiques et affinité magmatique du complexe filonien et des laves associées-implications métallogéniques et géodynamiques: Orléans, Université d'Orléans, memoria del D.E..A., 50p.
 - Ortiz H., E., Lapierre, H. and Monod, O., 1990 El Arco Intraoceánico Alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato-Características Petrográficas, Geoquímicas, estructurales e Isotópicas del Complejo Filoniano y de las lavas basálticas asociadas; Implicaciones Geodinámicas. UNAM., Instituto de Geología, Revista vol. 9, num. 2.
 - Ortiz H., L.E., Yta, M., Talavera M., O., Lapierre, H., Monod, O., y Tardy, M., 1991. Origine Intraocéanique des formations volcano-plutoniques d'arc du Jurassique Supérieur-Cretacé Inférieur du Mexique centro-meridional: Comptes R Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Paris. Ser. 2. 312, p. 399-406.
 - Ortiz H., L. E., Chodi, M., Lapierre, H., Monod, O., 1993. Arco Intraoceánico Alóctono de Guanajuato, Características petrográficas, geoquímicas estructurales e isotópicas del Complejo Filoniano y de las lavas basálticas asociadas. COREMI, Centro Minero Nacional. Pachuca, Hgo.

-
- Pérez V., J. A., Aranda G., J. J., McDowell, F., y Solorio M., J. G., 1996., Geology of the Palo Huérfano volcano, Guanajuato, México. Volumen 13, No. 2 Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.
 - Quintero L., 1922. Geología de la Región de Comanja, estados de Guanajuato y Jalisco. U.N.A.M, Instituto de Geología. México.
 - Ramos *et al.*, (2004) Evidencias de mezcla secuencial binaria en el acuífero de La Muralla, Guanajuato, México.
 - Ramos, L., J. A., 2002. Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato. Tesis de Doctorado. Postgrado en Ciencia de la Tierra. Instituto de Geología, UNAM. México.
 - Ramos, L, J. A, Rodríguez C. R., 2002. Aquifer vulnerability mapping in the Turbio river valley, Mexico: A validation study. Geofísica Internacional (2003), Vol. 42, Num. 1, pp 141-156.
 - Randall J. A., 1982. Contacto entre el Terciario y el Mesozoico, Distrito de Guanajuato, Gto. Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional 6, México, D.F. Resúmenes.
 - Salas M., M. A., 2004. Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea de las principales fuentes de abastecimiento de la Ciudad de León, Gto. Tesis Profesional, Ing. Geólogo. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
 - SAPAL-IGEOF, 2001, Estudio Isotópico e Hidrogeoquímico de La Zona León-Río Turbio, Guanajuato. Reporte Técnico, Instituto de Geofísica-UNAM, 78 pp.
 - Servicio Meteorológico Nacional, dirección electrónica <http://smn.cna.gob.mx>
 - SPP-INEGI-DGG, Síntesis Geográfica de Guanajuato. Secretaria de Programación y Presupuesto, México D.F. 198 p. Y anexo Cartográfico Escala 1:500,000.
 - Telford, W.W., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. Keys, D.A., 1976, Applied Geophysics. Cambridge University Press.
-

-
- Toth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J. Geophys. Res. 68: 4795-4812.
 - Toth, J., 1966. Groundwater geology, movement, chemistry and resources near Olds, Alberta. Research Council of Alberta Bulletin 17, Edmonton.
 - Tóth J., 1970. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. Journal of Hydrology. 10:164-176.
 - Toth, J., 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero. Vol. 111-4, 9-26.
 - Wandke, A., and Martinez, J., 1928. The Guanajuato mining district, Guanajuato, Mexico: Economic Geology, v. 23, p. 1-44.
 - Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2002. Aquifer Test 3.5, User's Manual, Advanced Pumping Test & Slug Test Analysis Software. Waterloo, Ontario, Canada.

ANEXO
PRUEBAS DE BOMBEO

Propietario: SAPAF
Localización: San Francisco del Rincón
Nivel Estático: 57.6 m
Fecha: 19 de mayo 2004
X= 203673
Y= 2328407

PRUEBA DE BOMBEO 1
Etapa: Abatimiento
Pozo: Paraíso
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m.
Altura del Brocal: 0.46 m.
Gasto Aproximado: 24.3 l/seg.

	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	57.60	0.00
2	0.083	59.15	1.55
3	0.166	59.24	1.63
4	0.333	59.29	1.69
5	0.5	59.49	1.88
6	0.75	59.66	2.06
7	1	59.92	2.32
8	1.5	60.12	2.52
9	2	60.32	2.72
10	3	60.34	2.74
11	5	60.40	2.80
12	7.5	60.40	2.80
13	10	60.46	2.86
14	15	60.33	2.73
15	20	60.33	2.73
16	30	60.21	2.61
17	45	60.19	2.59
18	60	60.19	2.59
19	75	60.20	2.60
20	90	60.21	2.61
21	105	60.26	2.66
22	120	60.28	2.68
23	140	60.30	2.70
24	160	60.40	2.80
25	170	60.42	2.82
26	180	60.43	2.83
27	210	60.39	2.79
28	240	60.40	2.80
29	270	60.42	2.82
30	285	60.42	2.82

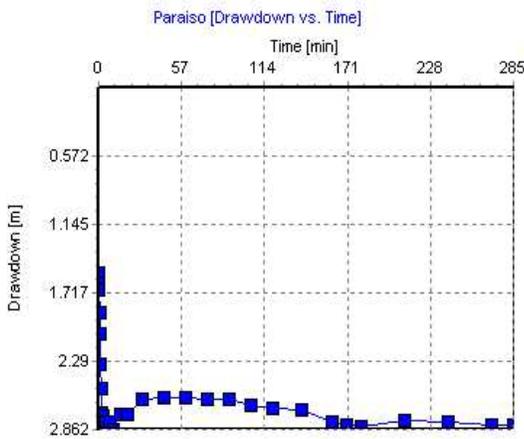
Propietario: SAPAF
Localización: San Francisco del Rincón
Nivel Dinámico: 60.56 m
Fecha: 19 de mayo 2004
X= 203673
Y= 2328407

PRUEBA DE BOMBEO 1
Etapa: Recuperación
Pozo: Paraíso
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m.
Altura del Brocal: 0.46 m.
Gasto Aproximado: 24.3 l/seg.

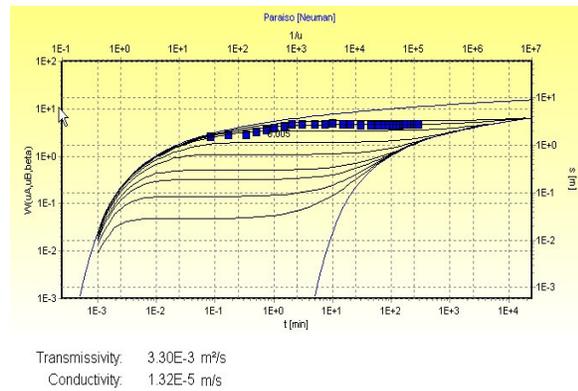
	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	60.56	0
2	0.083	59.8815	-0.6785
3	0.166	59.6915	-0.8685
4	0.333	59.5415	-1.0185
5	0.5	59.2865	-1.2735
6	0.75	59.0765	-1.4835
7	1	59.0315	-1.5285
8	1.5	58.8015	-1.7585
9	2	58.6015	-1.9585
10	3	58.4315	-2.1285
11	5	58.3165	-2.2435
12	7.5	58.2615	-2.2985
13	10	58.2445	-2.3155
14	15	58.2195	-2.3405
15	20	58.1745	-2.3855
16	30	58.1115	-2.4485
17	45	58.0415	-2.5185
18	50	58.0265	-2.5335
19	55	58.0165	-2.5435
20	60	57.9965	-2.5635

1. PARAÍSO

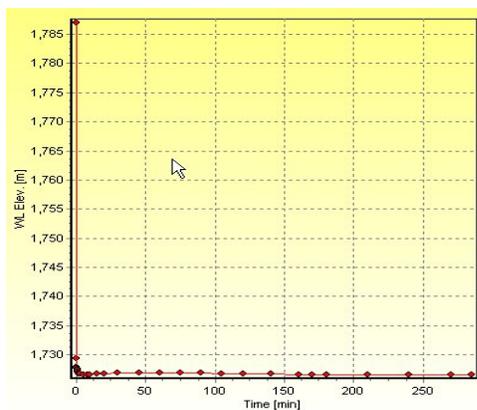
Abatimiento del Nivel Estático



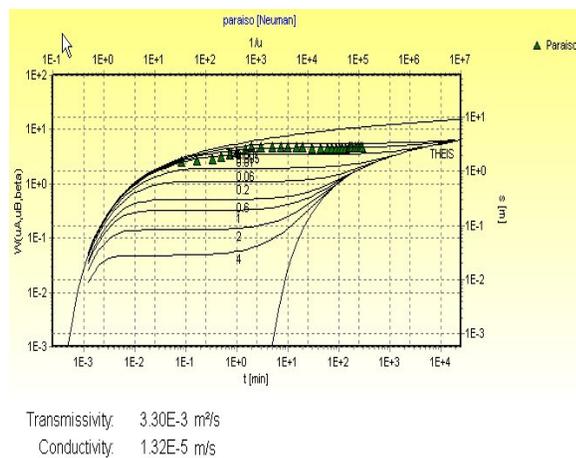
Gráfica de Análisis (Método Neuman-Abatimiento)



Recuperación del Nivel Estático



Gráfica de Análisis (Método Neuman-Recuperación)



Propietario: Santa Lucia
Localización: Manuel Doblado
Nivel Estático: 59.93 m
Fecha: 21 de mayo 2004
X= 191003
Y= 2295883

PRUEBA DE BOMBEO 2
Etapa: Abatimiento
Pozo: 841
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m.
Altura del Brocal: 0.46 m.
Gasto Aproximado: 4.1l/seg.

	Tiempo (min) <small>min:seg</small>	Prof. Nivel de agua (m) <small>Superficie (m:seg)</small>	Abatimiento (m) <small>Superficie (m:seg)</small>
1	0	59.93	0.00
2	0.083	60.39	0.46
3	0.166	60.45	0.52
4	0.333	60.52	0.59
5	0.5	60.69	0.76
6	0.75	60.83	0.90
7	1	60.90	0.97
8	1.5	61.09	1.16
9	2	61.19	1.26
10	3	61.25	1.31
11	5	61.29	1.36
12	7.5	61.42	1.48
13	10	61.51	1.58
14	15	61.70	1.77
15	20	61.91	1.98
16	30	62.18	2.25
17	45	62.55	2.62
18	60	62.79	2.86
19	75	62.96	3.03
20	90	63.05	3.12
21	105	63.08	3.15
22	120	63.18	3.24
23	140	63.26	3.33

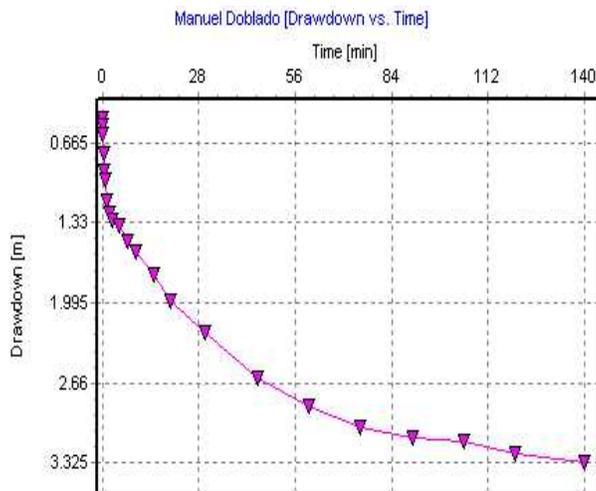
Propietario: Granja Santa Lucia
Localización: Manuel Doblado
Nivel Estático: 63.27 m
Fecha: 21 de mayo 2004
X= 191003
Y= 2295883

PRUEBA DE BOMBEO 2
Etapa: Recuperación
Pozo: 841
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m.
Altura del Brocal: 0.46 m.
Gasto Aproximado: 4.1l/seg.

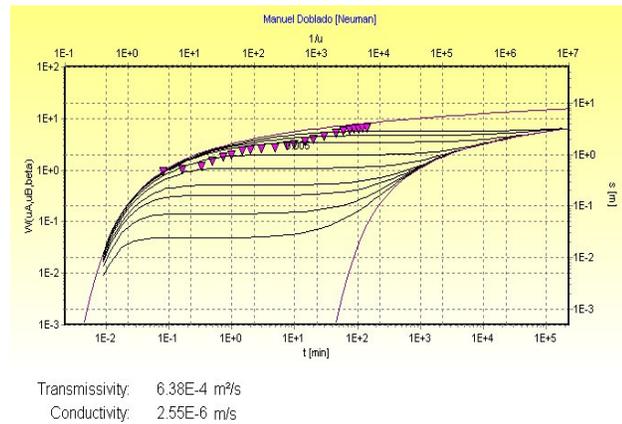
	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	63.27	3.34
2	0.0833	63.21	3.28
3	0.166	63.18	3.25
4	0.333	63.155	3.225
5	0.5	63.105	3.175
6	0.75	63.04	3.11
7	1	62.96	3.03
8	1.5	62.67	2.74
9	2	62.31	2.38
10	3	62.11	2.18
11	5	62.015	2.085
12	7.5	61.915	1.985
13	10	61.785	1.855
14	15	61.585	1.655
15	20	61.44	1.51
16	30	61.195	1.265
17	45	60.995	1.065
18	60	60.795	0.865
19	75	60.695	0.765
20	90	60.625	0.695
21	105	60.57	0.64
22	120	60.5	0.57
23	140	60.42	0.49

2. GRANJA SANTA LUCÍA (Manuel Doblado)

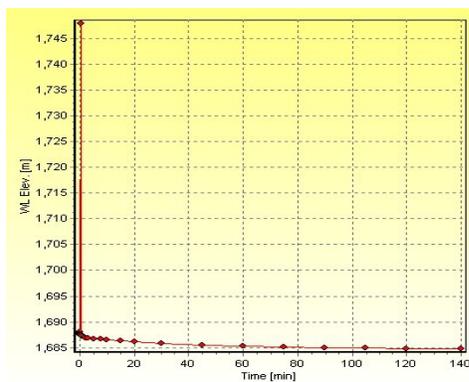
Abatimiento del Nivel Estático



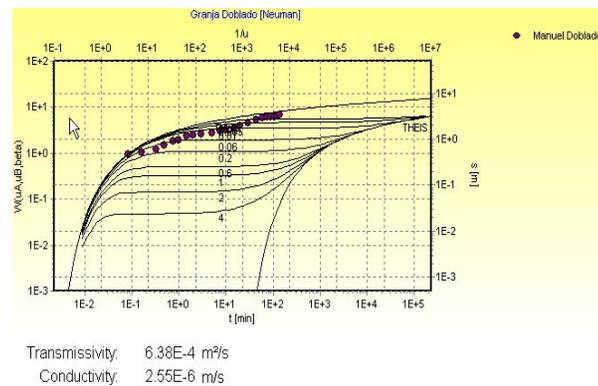
Gráfica de Análisis (Método Neuman-Abatimiento)



Recuperación del Nivel Estático



Gráfica de Análisis (Método Neuman-Recuperación)



Propietario: Agua potable de la comunidad
Localización: Guadalupe de Jalpa
Nivel Estático: 58.10 m
Fecha: 24 de mayo 2004
X= 189276
Y= 2310585

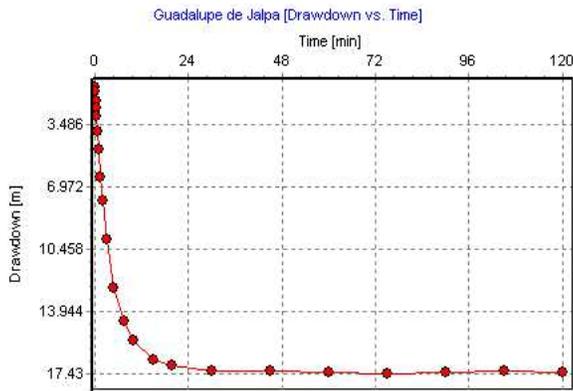
PRUEBA DE BOMBEO 3
Etapa: Abatimiento
Pozo: Geo 363
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m.
Altura del Brocal: 0.46 m.
Gasto Aproximado: 4.1l/seg.

	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	58.10	0.00
2	0.083	59.50	1.40
3	0.166	59.71	1.60
4	0.25	60.27	2.16
5	0.333	60.67	2.56
6	0.5	61.14	3.03
7	0.75	62.01	3.91
8	1	62.97	4.87
9	1.5	64.50	6.40
10	2	65.83	7.73
11	3	67.98	9.87
12	5	70.69	12.59
13	7.5	72.60	14.49
14	10	73.68	15.57
15	15	74.75	16.65
16	20	75.05	16.95
17	30	75.33	17.23
18	45	75.38	17.28
19	60	75.47	17.37
20	75	75.53	17.43
21	90	75.42	17.32
22	105	75.33	17.23
23	120	75.43	17.33

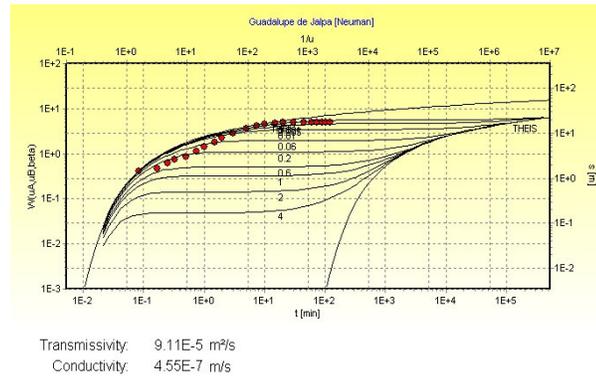
Propietario: Agua potable de la comunidad Localización: Guadalupe de Jalpa Nivel Estático: 75.43 m Fecha: 24 de mayo 2004 X= 189276 Y= 2310585		PRUEBA DE BOMBEO 3 Etapa: Recuperación Pozo: Geo 363 Tipo de Acuífero: Regional Espesor de Acuífero: 250 m. Altura del Brocal: 0.46 m. Gasto Aproximado: 4.1l/seg.	
	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	75.43	17.33
2	0.166	72.38	14.28
3	0.333	70.95	12.85
4	0.5	69.38	11.28
5	0.75	67.88	9.78
6	1	65.62	7.52
7	1.5	64.07	5.97
8	2	61.35	3.25
9	3	59.61	1.51
10	4	58.04	-0.06
11	5	57.31	-0.79
12	7.5	56.83	-1.27
13	10	56.7	-1.4
14	15	56.605	-1.495
15	20	56.57	-1.53
16	30	56.57	-1.53

3. GUADALUPE DE JALPA

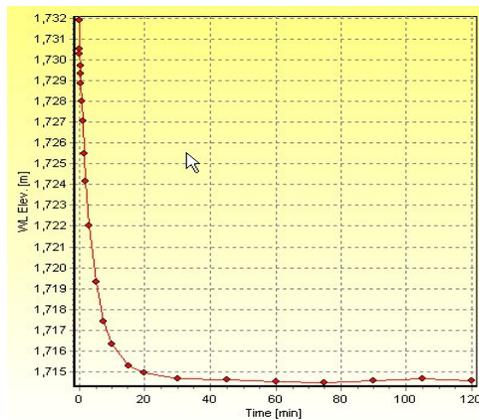
Abatimiento del Nivel Estático



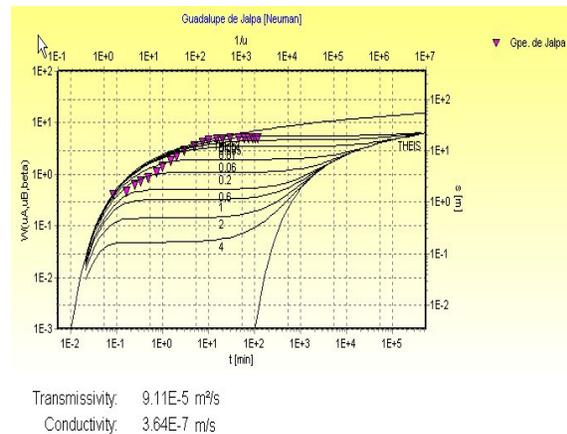
Gráfica de Análisis (Método Neuman-Abatimiento)



Recuperación del Nivel Estático



Gráfica de Análisis (Método Neuman-Recuperación)



Propietario: Agua potable de la comunidad
Localización: San Pablo
Nivel Estático: 32.37 m
Fecha: 25 de mayo 2004
X= 205745
Y= 2297060

PRUEBA DE BOMBEO 4
Etapa: Abatimiento
Pozo: R-24
Tipo de Acuífero: Superior
Espesor de Acuífero:
Altura del Brocal: 0.40 m.
Gasto Aproximado: 11l/seg.

Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	32.37
2	0.333	37.12
3	1	39.69
4	1.5	41.47
5	2	42.49
6	3	43.79
7	5	44.54
8	7.5	44.57
9	10	44.64
10	15	44.72
11	20	44.78
12	30	44.83
13	45	44.88
14	60	44.91
15	75	44.93
16	90	44.96
17	105	44.98
18	120	44.99

Propietario: Agua potable de la comunidad
Localización: San Pablo
Nivel Estático: 44.98 m
Fecha: 25 de mayo 2004
X= 205745
Y= 2297060

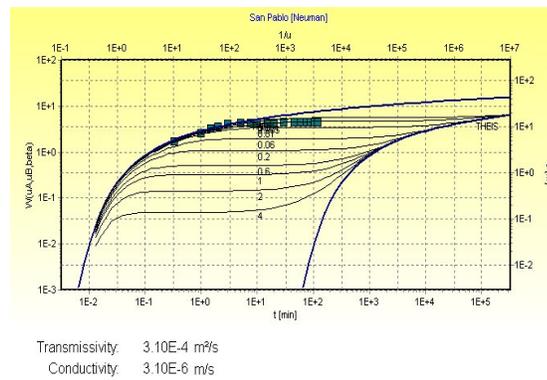
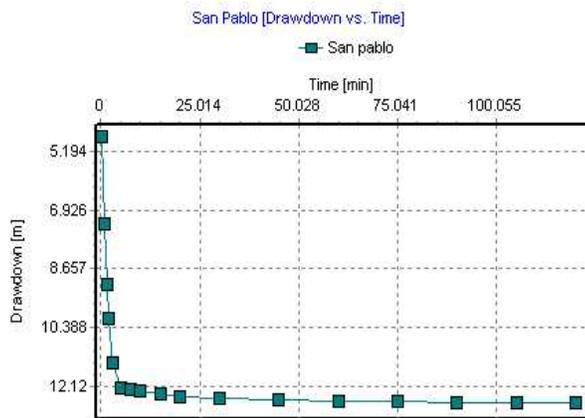
PRUEBA DE BOMBEO 4
Etapa: Recuperación
Pozo: R-24
Tipo de Acuífero: Superior
Espesor de Acuífero:
Altura del Brocal: 0.40 m.
Gasto Aproximado: 11l/seg.

	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	44.98	12.61
2	0.166	43.555	11.185
3	0.333	42.975	10.605
4	0.333	44.015	11.645
5	0.5	41.155	8.785
6	1	40.795	8.425
7	1.5	39.355	6.985
8	2	39.015	6.645
9	3	35.925	3.555
10	5	32.625	0.255
11	7.5	32.525	0.155
12	10	32.495	0.125
13	15	32.47	0.1
14	20	32.455	0.085
15	30	32.435	0.065
16	45	32.41	0.04
17	60	32.4	0.03

4. SAN PABLO

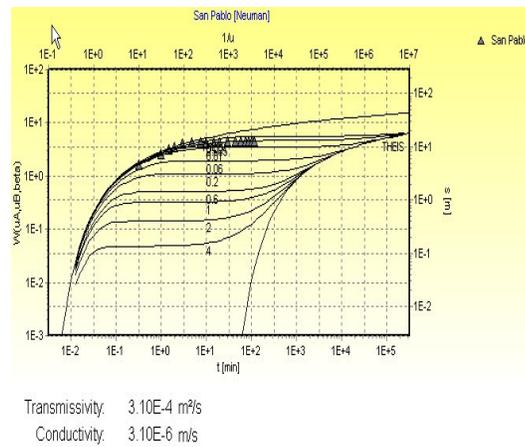
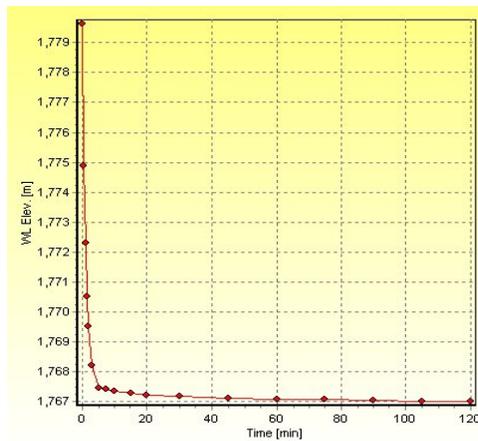
Abatimiento del Nivel Estático

Gráfica de Análisis (Método Neuman-Abatimiento)



Recuperación del Nivel Estático

Gráfica de Análisis (Método Neuman-Recuperación)



Propietario: Pascual Negrete Guerra
Localización: Soledad de Negrete
Nivel Estático: 29.94 m
Fecha: 26 de mayo 2004
X= 231310
Y= 2273916

PRUEBA DE BOMBEO 5

Etapa: Abatimiento
Pozo: L1 158
Tipo de Acuífero: Superior
Espesor de Acuífero:
Altura del Brocal:
Gasto Aproximado: 15 l/seg.

	Tiempo (min).	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	29.94	0.00
2	0.166	30.83	0.89
3	0.333	31.01	1.07
4	0.5	31.21	1.27
5	0.75	31.34	1.40
6	1	31.46	1.52
7	1.5	31.63	1.69
8	2	31.77	1.83
9	3	31.91	1.97
10	5	32.09	2.15
11	7.5	32.18	2.24
12	10	32.24	2.30
13	15	32.38	2.44
14	20	32.43	2.49
15	30	32.55	2.61
16	45	32.65	2.71
17	60	32.77	2.83
18	75	32.81	2.86
19	90	32.85	2.90
20	105	32.89	2.94
21	120	32.92	2.98
22	140	32.96	3.01
23	160	33.00	3.05
24	170	33.02	3.08
25	180	33.04	3.10
26	210	33.07	3.13
27	240	33.11	3.17
28	270	33.14	3.20
29	300	33.19	3.25
30	330	33.20	3.26
31	360	33.21	3.27

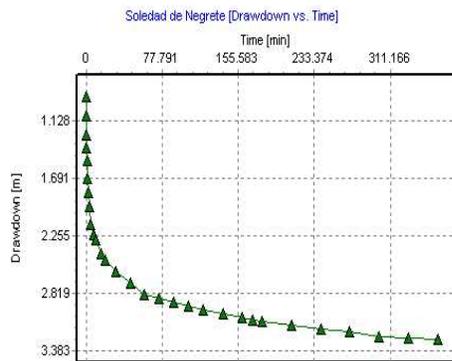
Propietario: Pascual Negrete Guerra
Localización: Soledad de Negrete
Nivel Estático 33.208 m
Fecha: 26 de mayo 2004
X= 231310
Y= 2273916

PRUEBA DE BOMBEO 5
Etapa: Recuperación
Pozo: L1 158
Tipo de Acuífero: Superior
Espesor de Acuífero:
Altura del Brocal:
Gasto Aproximado: 15 l/seg.

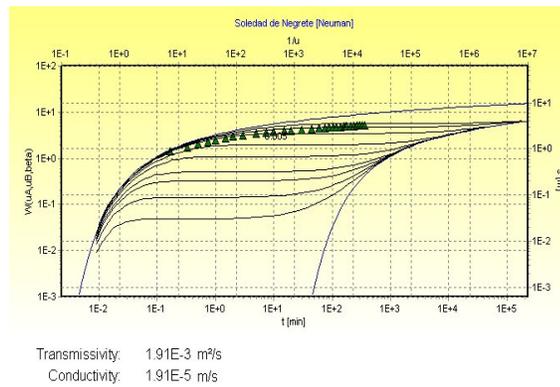
	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	33.208	3.268
2	0.0833	31.758	1.818
3	0.166	31.728	1.788
4	0.333	31.658	1.718
5	0.5	31.598	1.658
6	0.75	31.551	1.611
7	1	31.484	1.544
8	1.5	31.404	1.464
9	2	31.309	1.369
10	3	31.189	1.249
11	5	31.062	1.122
12	7.5	30.947	1.007
13	10	30.882	0.942
14	15	30.777	0.837
15	20	30.727	0.787
16	30	30.612	0.672
17	45	30.552	0.612
18	60	30.492	0.552
19	75	30.431	0.491
20	90	30.411	0.471
21	105	30.344	0.404
22	120	30.314	0.374
23	140	30.284	0.344
24	160	30.284	0.344
25	170	30.209	0.269
26	180	30.199	0.259

5. SOLEDAD DE NEGRETE

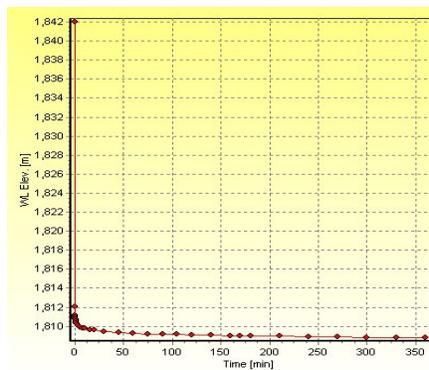
Abatimiento del Nivel Estático



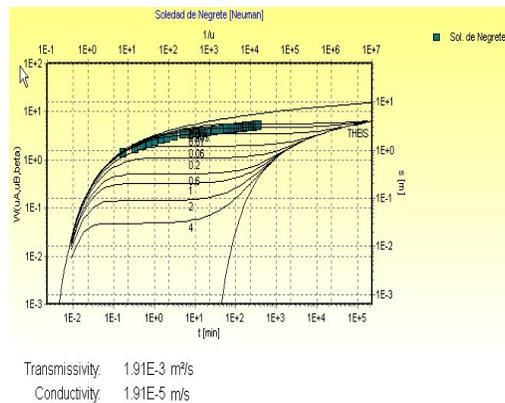
Gráfica de Análisis (Método Neuman-Abatimiento)



Recuperación del Nivel Estático



Gráfica de Análisis (Método Neuman-Recuperación)



Propietario:
Localización: Al Norte de León
Nivel Estático: 85.6 m
Fecha: 28 de mayo 2004
X= 226362
Y= 2343157

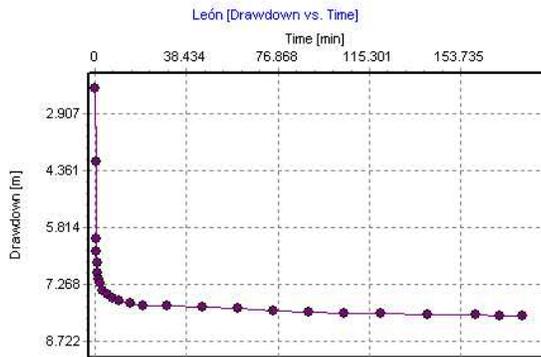
PRUEBA DE BOMBEO 6
Etapa: Abatimiento
Pozo:
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m
Altura del Brocal:
Gasto Aproximado: 24.3 l/seg.

	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	85.6	0
2	0.083	87.87	2.27
3	0.1656	89.74	4.14
4	0.333	91.69	6.09
5	0.5	92.03	6.43
6	0.75	92.33	6.73
7	1	92.57	6.97
8	1.5	92.73	7.13
9	2	92.83	7.23
10	3	93.02	7.42
11	5	93.14	7.54
12	7.5	93.22	7.62
13	10	93.3	7.7
14	15	93.36	7.76
15	20	93.4	7.8
16	30	93.43	7.83
17	45	93.46	7.86
18	60	93.49	7.89
19	75	93.54	7.94
20	90	93.58	7.98
21	105	93.6	8
22	120	93.62	8.02
23	140	93.64	8.04
24	160	93.65	8.05
25	170	93.66	8.06
26	180	93.66	8.06

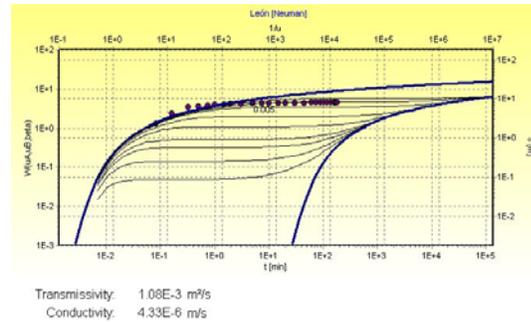
Propietario: Localización: Al Norte de León Nivel Estático: 93.66 m Fecha: 28 de mayo 2004 X= 226362 Y= 2343157		PRUEBA DE BOMBEO 6 Etapa: Recuperación Pozo: Tipo de Acuífero: Regional Espesor de Acuífero: 250 m Altura del Brocal: Gasto Aproximado: 24.3 l/seg.	
	Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	93.66	8.06
2	0.083	91.79	6.19
3	0.166	90.67	5.07
4	0.333	89.64	4.04
5	0.5	88.77	3.17
6	0.75	88.14	2.54
7	1	87.83	2.23
8	1.5	87.6	2
9	2	87.39	1.79
10	3	87.25	1.65
11	5	86.75	1.15
12	7.5	86.22	0.62
13	10	86.08	0.48
14	15	86	0.4
15	20	85.94	0.34
16	30	85.86	0.26
17	45	85.7	0.1
18	60	85.68	0.08
19	75	85.67	0.07
20	90	85.66	0.06
21	105	85.67	0.07
22	120	85.66	0.06
23	140	85.64	0.04
24	160	85.63	0.03
25	170	85.63	0.03
26	180	85.62	0.02

6. LEÓN

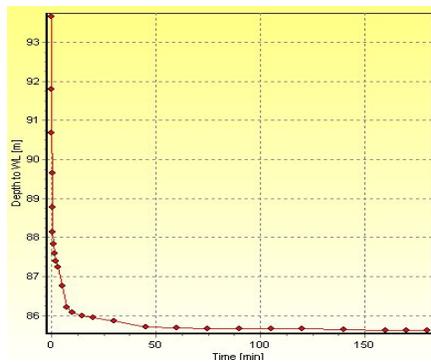
Abatimiento del Nivel Estático



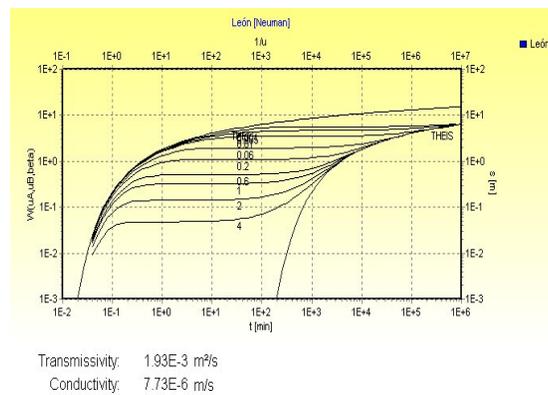
Gráfica de Análisis (Método Neuman-Abatimiento)



Recuperación del Nivel Estático



Gráfica de Análisis (Método Neuman-Recuperación)



Propietario:
Localización: Al Sureste de Penjamo
Nivel Estático: 106.35 m
Fecha: 29 de mayo 2004
X= 219009
Y= 2259333

PRUEBA DE BOMBEO 7
Etapa: Abatimiento
Pozo:
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m
Altura del Brocal:
Gasto Aproximado: 15 l/seg.

Tiempo (min)	Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	76.41
2	0.083	77.59
3	0.166	78.62
4	0.333	79.44
5	0.5	80.18
6	0.75	80.57
7	1	80.94
8	1.5	80.3
9	2 	80.69
10	3	81.07
11	5	81.37
12	7.5	81.66
13	10	81.8
14	15	81.92
15	20	82.02
16	30	82.09
17	45	82.11
18	60	82.11
19	75	82.14
20	90	82.16
21	105	82.19
22	120	82.18
23	140	82.18
24	160	82.18

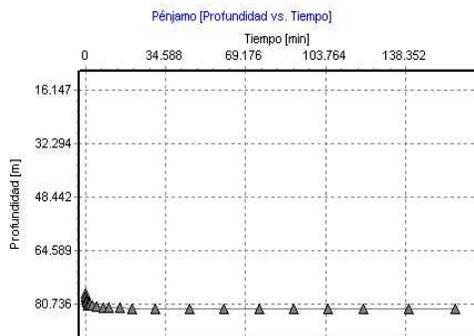
Propietario:
Localización: Al Sureste de Penjamo
Nivel Estático: 112.12 m
Fecha: 29 de mayo 2004
X= 219009
Y= 2259333

PRUEBA DE BOMBEO 7
Etapa: Recuperación
Pozo:
Tipo de Acuífero: Regional
Espesor de Acuífero: 250 m
Altura del Brocal:
Gasto Aproximado: 15 l/seg.

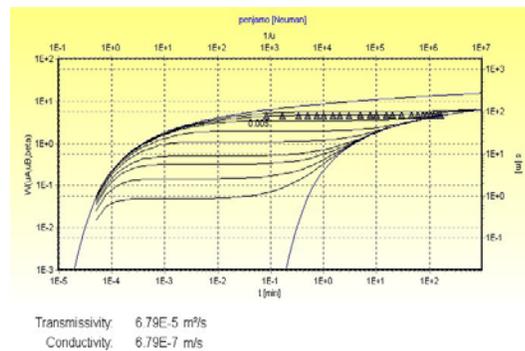
Tiempo (min)		Prof. Nivel de agua (m)	Abatimiento (m)
1	0	112.12	82.18
2	0.083	111.22	81.28
3	0.166	110.39	80.45
4	0.333	109.15	79.21
5	0.75	108.8	78.86
6	1	108.5	78.56
7	1.5	108.27	78.33
8	2	108.04	78.1
9	3	107.83	77.89
10	5	107.64	77.7
11	7.5	107.52	77.58
12	10	107.38	77.44
13	15	107.23	77.29
14	20	107.13	77.19
15	30	106.98	77.04
16	45	106.84	76.9
17	60	106.75	76.81
18	75	106.68	76.74
19	90	106.57	76.63
20	105	106.5	76.56
21	120	106.43	76.49
22	140	106.4	76.46
23	160	106.38	76.44
24	170	106.38	76.44
25	180	106.37	76.43

7. PÉNJAMO

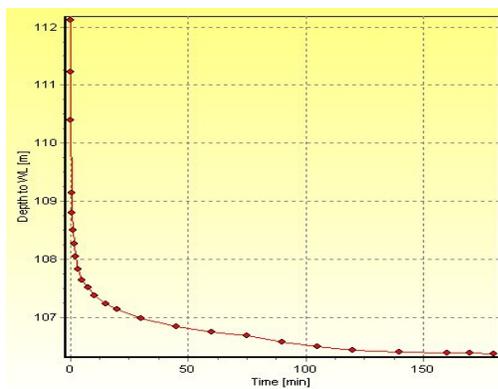
Abatimiento del Nivel Estático



Gráfica de Análisis (Método Neuman-Abatimiento)



Recuperación del Nivel Estático



Gráfica de Análisis (Método Neuman-Recuperación)

