



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO GEOLOGICO Y GEOFISICO  
EN EL VALLE DE QUERETARO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTAN

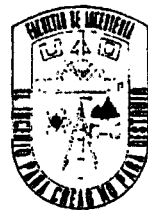
EDUARDO CABRERA ARRIAGA  
HERIBERTO GALVÁN PÉREZ

DIRIGIDA POR

DR. JORGE ARTURO ARZATE FLORES

Santiago de Querétaro, Qro., Junio de 2002

No Adq. 46662  
No. Título \_\_\_\_\_  
Clas. TS  
557.245  
C117e



**ACUERDO 188/ 00**  
**21 de Septiembre del 2000.**

**C. Eduardo Cabrera Arriaga**  
**C. Heriberto Galván Pérez**  
**Pasantes de Ingeniería Civil.**  
**Presente.**

Hago de su conocimiento que el H. Consejo Académico, en sesión ordinaria del 21 de septiembre del presente año recibió su petición para llevar a cabo su titulación por la opción de **Tesis Colectiva**, me permito informarles que este cuerpo colegiado aprobó la opción de titulación y envió su Protocolo al área de Ingeniería Civil para sea evaluado, por lo que será la próxima sesión de consejo cuando se emita un dictamen sobre el trabajo de tesis que proponen.

Sin más por el momento, quedo de Ustedes.

Atentamente  
**"EL INGENIO PARA CREAR, NO PARA DESTRUIR"**

  
**Ing. Jorge Martínez Carrillo,**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**

C.c.p.-  
Archivo  
\*JMC/GRSG/sar



**ACUERDO 258/ 01**  
**Enero 17 del 2001.**

**C. EDUARDO CABRERA ARRIAGA Y**  
**HERIBERTO GALVÁN PÉREZ**  
**Presente.**

*En relación a su atenta solicitud relativa a la opción de titulación por Tesis Colectiva con el Título "ESTUDIO GEOFÍSICO-GEOLÓGICO DEL VALLE DE QUERÉTARO", me permito informarle que en sesión ordinaria del H. Consejo Académico del 17 de Enero del año en curso, fue aceptado el tema y el Dr. Jorge Arturo Arzate Flores, tuvo a bien ser el Director de la misma.*

*El contenido aceptado por el H. Consejo Académico es el siguiente:*

## **ÍNDICE**

### **1. - INTRODUCCIÓN**

- 1.1.- Antecedentes
- 1.2.- Objetivos.
- 1.3.- Localización del área.

### **2. - MARCO GEOLÓGICO**

- 2.1.- Introducción.
- 2.2.- Geología regional.
- 2.3 Geología local.

### **3. - MARCO GEOHIDROLÓGICO**

- 3.1.- Introducción
- 3.2.- Esquemas hidrológicos existentes.
  - a). Modelo GUYSA.
  - b). Modelo A.M.
  - c). Modelo UAQ.



#### **4. - GEOFÍSICA**

- 4.1.- *Introducción.*
- 4.2.- *Descripción de los métodos geofísicos utilizados.*
- 4.3.- *Parámetros de calibración*
  - a). *Densidad de rocas.*
  - b). *Pozos de litología*
- 4.4.- *Datos de campo de los estudios geofísicos realizados.*
  - a) *Gravimetría.*
  - b) *Magnetometría*
    - a) *Magneto-telúricos.*
- 4.5.- *Interpretación.*
- 4.6.- *Integración de resultados.*

#### **5. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6. - APÉNDICE**

#### **7. - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1.- *Estatigrafía y propiedades hidrodinámica del subsuelo del Valle de la Zona Urbana de Querétaro.*  
Ángel Trejo Moedanmo, 1989, UAQ.
- 2.- *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación del acuífero de Querétaro, Geofísica de Exploraciones Guysa, 1996 (para la CNA).*
- 3.- *Sinopsis Geohidrológica del Estado de Querétaro, SARH, 1998.*
- 4.- *Introducción a la Prospección Geofísica. Milton B. Dobrin, Edit. Omega, 1985.*



5.- *Elaboración de cartas de fallas de los municipios de Querétaro y Celaya, Moisés Arroyo Contreras y colaboradores, DEPFI-UAQ, 1999.*

6.- *Notas Módulo I del Diplomado en Ingeniería Estructural, Curso Introdutorio de Exploración Geofísica, Centro de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería, 2000.*

*También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Facultad, en el sentido de que antes de su Examen Profesional deberá cumplir con los requisitos de nuestra Legislación y deberá reimprimir el presente oficio en todos los ejemplares de su Tesis.*

*Sin otro particular, quedo de usted.*

**Atentamente**

**"EL INGENIO PARA CREAR NO PARA DESTRUIR"**

**Ing. Jorge Martínez Carrillo**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**

C.c.p.- Archivo  
\*JMC/GRSG/sar



**ACUERDO 263 / 02**  
Enero 23 del 2002.

**C. Eduardo Cabrera Arriaga y  
Heriberto Galván Pérez,  
Pasantés de Ingeniería Civil  
Presente.**

Le comunico que el H. Consejo Académico, en la sesión ordinaria del 23 de Enero del año en curso, revisó el oficio en que informa la terminación de su tesis colectiva **"Estudio geológico y geofísico en el valle de Querétaro"** con base en los artículos 51 y 52 del Reglamento de titulación vigente, se nombró como sinodales a los siguientes Catedráticos; Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras, M. en I. Domingo Gerardo Valencia Vallejo, Ing. Gerardo René Serrano Gutiérrez, M. en I. José Alfredo Zepeda Garrido y en su calidad de Director de Tesis el Dr. Jorge Arzate Flores.

Cabe mencionar que para continuar con los trámites de titulación, es necesario obtener el voto aprobatorio del trabajo, por parte de los sinodales mencionados.

Sin más por el momento, quedo de Usted.

Atentamente,  
**"EL INGENIO PARA CREAR, NO PARA DESTRUIR"**

  
**Ing. Jorge Martínez Carrillo,  
Director de la Facultad de Ingeniería**

C.c.p. - Archivo  
\*JMC/GRSG/sar



C.U., 23 de enero del 2002.

**Ing. Jorge Martínez Carrillo,**  
**Director de la Facultad de**  
**Ingeniería de la UAQ**  
**PRESENTE:**

Por este conducto me permito comunicar a Usted, que una vez revisada la tesis colectiva titulada "**Estudio geofísico y geológico en el valle de Querétaro**" de los Pasantes Ingeniería Civil, Eduardo Cabrera Arriaga y Heriberto Galván Pérez, de acuerdo al artículo 20 inciso g) del Reglamento de Titulación vigente.

Emito mi voto aprobatorio.

Atentamente,  
**"EL INGENIO PARA CREAR, NO PARA DESTRUIR"**

  
**Dr. Jorge A. Arzate Flores,**  
**Director de Tesis**

c.c Archivo  
\*sar





CU., 23 de Enero del 2002

**H. CONSEJO ACADÉMICO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
P R E S E N T E :**

*Me permito comunicar a este Órgano Colegiado que, una vez revisada la tesis colectiva titulada "Estudio geofísico y geológico en el valle de Querétaro", de los Pasantes de Ingeniería Civil, Eduardo Cabrera Arriaga y Heriberto Galván Pérez, emito mi Voto Aprobatorio.*

Atentamente,  
"EL INGENIO PARA CREAR, NO PARA DESTRUIR"

*(Firma)*  
**M. en I. José Alfredo Zepeda Garrido,  
Sinodal**

c.c Archivo  
\*sar



CU., 23 de Enero del 2002

**H. CONSEJO ACADÉMICO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
PRESENTE:**

*Me permito comunicar a este Órgano Colegiado que, una vez revisada la tesis colectiva titulada "Estudio geofísico y geológico en el valle de Querétaro", de los Pasantes de Ingeniería Civil, Eduardo Cabrera Arriaga y Heriberto Galván Pérez, emito mi Voto Aprobatorio.*

Atentamente,

"EL INGENIO PARA CREAR, NO PARA DESTRUIR"

**Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras,  
Sinodal**

c.c Archivo  
\*sar



CU., 23 de Enero del 2002

**H. CONSEJO ACADÉMICO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
P R E S E N T E :**

*Me permito comunicar a este Órgano Colegiado que, una vez revisada la tesis colectiva titulada "Estudio geofísico y geológico en el valle de Querétaro", de los Pasantes de Ingeniería Civil, Eduardo Cabrera Arriaga y Heriberto Galván Pérez, emito mi Voto Aprobatorio.*

Atentamente,  
"EL INGENIO PARA CREAR, NO PARA DESTRUIR"

**Ing. Domingo Gerardo Valencia Vallejo,  
Sinodal**

c.c Archivo  
\*sar



CU., 23 de Enero del 2002

**H. CONSEJO ACADÉMICO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
P R E S E N T E :**

Me permito comunicar a este Órgano Colegiado que, una vez revisada la tesis colectiva titulada "**Estudio geofísico y geológico en el valle de Querétaro**", de los Pasantes de Ingeniería Civil, Eduardo Cabrera Arriaga y Heriberto Galván Pérez, emito mi Voto Aprobatorio.

Atentamente,

"EL INGENIO PARA CREAR, NO PARA DESTRUIR"

  
**Ing. Gerardo René Serrano Gutiérrez,**  
**Sinodal**

c.c Archivo  
\*sar

## INDICE

### AGRADECIMIENTOS

### RESUMEN

### CAPITULO 1.- INTRODUCCION

1.1.- Antecedentes.....	3
1.2.- Objetivos.....	6
1.3.- Localización del área de estudio.....	7

### CAPITULO 2.- MARCO GEOLOGICO

2.1.- Introducción.....	9
2.2.- Geología regional.....	11
2.3.- Geología local.....	15

### CAPITULO 3.- MARCO GEOHIDROLOGICO

3.1.- Introducción.....	29
3.2.- Esquemas hidrológicos recientes.....	32
a) Modelo GUYSA.....	32
b) Modelo A.M.....	35

### CAPITULO 4.- GEOFISICA

4.1.- Introducción.....	43
4.2.- Descripción de los métodos geofísicos utilizados.....	44
a) Gravimetría.....	44
b) .Sondeos someros (AMT) y profundos (MT).....	48
4.3.- Gravimetría.....	51
a) Procedimiento de campo.....	51
b) Interpretación de resultados.....	52
4.4.- Sondeos someros (AMT) y profundos (MT).....	54
a) Procedimiento de campo.....	54
b) Interpretación de resultados.....	56

## **CAPITULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1.- Conclusiones.....	77
5.2.- Recomendaciones.....	78

## **APENDICES**

A.1.- Mapa geológico GUYSA.....	80
A.2.- Resumen de estudios previos en el valle de Querétaro.....	81
A.3.- Datos de campo de gravimetría.....	85

## **REFERENCIAS**

Referencias.....	101
------------------	-----

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>105</b>
------------------------------	------------

## AGRADECIMIENTOS

### **De Eduardo:**

A Dios, por darme la oportunidad de vivir, estar sano y saber que con la fé se pueden lograr muchas cosas.

A mi Familia y sobretodo a mis Padres Catalina y Octavio por su incomparable apoyo en todo momento y por inculcarme los valores que siempre llevo, trato y trataré de portar con gran orgullo.

Al Dr. Jorge Arzate y Heriberto Galván por haber logrado juntos un trabajo de calidad... valió la pena el esfuerzo.

A los Doctores Vsevolod Yutsis, Juventino Martínez y Luis Miguel Mitre por formar parte de este equipo y sobretodo por todos sus conocimientos transmitidos.

A Ustedes sinodales: M.I. José Alfredo Zepeda, Dr. Moisés Arroyo, M.I.G. Domingo Valencia e Ing. Rene Serrano por haber revisado y dado el visto bueno al presente trabajo.

A todos y cada uno de los maestros de la Facultad de Ingeniería por la excelente formación en el campo de la Ingeniería Civil durante toda la carrera.

A mi novia Erika Ramírez por su gran empuje y por ser mi fuerza y mi inspiración día con día.

A todos mis compañeros y amigos de la carrera y de la propia Facultad: Adrian, Raquel Oscar, Luz, Heriberto, Leonardo, Saúl, José Luis, Ricardo, Enrique, Gloria, Sandra, Chayo, Lupita y Alma (Biblioteca) y a los ingenieros: Jorge Martínez, Jaime González de Cosío, Jesús Hernández (q.e.p.d.), Rene Serrano, Ruben Ramírez, Rodolfo Magnus y Eduardo Alvarez, muchas gracias por su grata compañía y amistad incondicional.

A toda la gente de la UNICIT, hoy Centro de Geociencias, gracias Sol, Malu, Paty, Lupita, Elena, Aarón, Bart, Dimitri, Gil, Jesús Pacheco, Martin, Andrea y Claudia por brindarnos su amistad y apoyo.

Gracias a todos.

## **De Heriberto:**

**A Dios:** Por haberme permitido vivir, acompañándome cada instante de mi vida, minuto a minuto sin dejarme solo, dándome la fuerza y el coraje suficientes para levantarme de momentos difíciles, por escucharme en mis oraciones y por haberme concedido llegar a este día que representa el orgullo y sacrificio de muchas personas.

**A la Virgen María:** por cuidarme siempre todos los días, por haber creído en mi y por haberme concedido el deseo de ser un profesionalista.

**A mis padres:** Celia Pérez Aguiñaga y Antonio Galván García, por ser los ángeles que me mandó Dios para cuidarme aquí en la Tierra, porque siempre me apoyaron, me educaron, me inculcaron valores, a amar a Dios, a salir adelante, a dar siempre mi mejor esfuerzo, a aceptar el dolor, a saber sufrir sin quejarse, y sobre todo a respetar a los demás. Por haberme dado todo su cariño y comprensión, por haber hecho posible este sueño, esta oportunidad que muy pocos tienen en la vida y por cuidarme a cada instante durante el doloroso camino de mi enfermedad, la depresión. Como lo dijo Isaac Newton “ Si pude contemplar mas allá de lo que ven mis ojos, fue porque me subí en los hombros de gigantes”; esos gigantes son mis padres.

**A mi hermano Guillermo:** Por sacrificar la oportunidad de estudiar, para que mis demás hermanos y yo saliéramos adelante, apoyándonos económicamente. Gracias Guille.

**A mis hermanas:** Blanca Nely y Celia, por haber soportado mis momentos de tensión en el transcurso de mi carrera.

**A mis Maestros:** Por haberme formado profesionalmente en el maravilloso campo de la Ingeniería Civil.



**A los Doctores:** Jorge Arzate Flores, por su valiosa orientación y apoyo en este trabajo. Cuando las cosas parecían confusas, supo dirigir acertadamente nuestra tesis y nos dio la orientación adecuada para concluir nuestro tema. Al Doctor Moisés Arroyo Contreras por sus consejos y apoyo en este trabajo, al Doctor Juventino Martínez Reyes y Doctor Luis Miguel Mitre de la Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra, por su apoyo y disposición de su material (la carta geológica), al Doctor Vsevolod Yutsis y su alumno Dimitri de la Universidad de Moscú por su talentoso trabajo en la elaboración de los perfiles geofísicos y trabajos de campo. Y al M. en I. Alfredo Zepeda Garrido, por su cooperación en la revisión de la tesis.

**A mis amigas de la Preparatoria:** María Gabriela Barrón Cano y Yadira Martínez Plancarte por su amistad incondicional.

**A mis amigos de la Facultad de Ingeniería:** Lalo, Luz, Raquel, Leonardo, Oscar Frias, Oscar Cabrera, Cristina, Toño, Ing. René, Ing. Jorge Martínez, Ing. Gabriel Ventura, Ing. Jesús Hernández Espino (q.e.p.d.), Ing. Felipe Ortiz, Ing. Rubén, M.I.G. Domingo Valencia, Ing. Joaquín Ugalde (q.e.p.d.), por su agradable compañía durante los cinco años de la carrera y fuera de ella. A Lupita y Alma quienes siempre nos brindaron ayuda incondicional tanto en amistad como didácticamente.

**A mis amigos de la Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra:** Sol, Claudia, Lupita, Malú, Juanita, Elena, Martín, Mariano, Gil, Jesús, Bartolo, Ricardo, Dora y Andrea.

Gracias a todos por su apoyo y por su comprensión.

## RESUMEN

El valle de Querétaro se encuentra en su totalidad dentro de la Provincia denominada Eje Neovolcánico, producto del efecto de subducción de las placas de Cocos y Rivera sobre la placa Norteamericana, que provoca a su vez zonas de distensión, origen entre otras de la fosa Querétaro. En el valle ocurrieron a lo largo del tiempo por lo menos dos eventos volcánicos y tres grandes eventos tectónicos afectando a las unidades de roca ya existente y dejando evidencias regionales en la superficie de fallas y fracturas que están cubiertas en amplias zonas por depósitos lacustres y pluviales. Estos depósitos junto con productos vulcanoclasticos y volcánicos del Terciario Superior constituyen los principales acuíferos de la región, cuyo basamento rocoso es irregular lo cual complica determinar su potencial a largo plazo.

Debido a esto y a factores como la escasa precipitación, la poca infiltración, la sobre explotación del manto acuífero, un crecimiento acelerado de la población y la industria y un ineficiente sistema de riego en el campo se ha generado una problemática cada vez mayor de escasez de agua, así como problemas de hundimiento y agrietamientos del suelo por la sobreexplotación del mismo. Con el objeto de comprender mejor el comportamiento del graben de Querétaro y así poder proporcionar elementos para futuros modelos hidrogeológicos se llevó a cabo un estudio geofísico que comprende cinco perfiles gravimétricos y tres audiomagnetotéluricos que cruzan de norte a sur y de este a oeste el valle.

De los resultados obtenidos, que consisten en mapas de anomalía de Bouguer y aire libre así como secciones de resistividad, se deduce la existencia de una zona de baja densidad al sur del valle posiblemente asociada a depósitos acuíferos, así como las principales zonas de recarga del acuífero, es decir: al este por La Cañada, al sur por La Negreta y al norte por Jurica. Además se interpretan varias estructuras de importancia tales como el Bloque Menchaca, El Bloque La Cañada, el Bloque del Río Querétaro y la existencia de una Minifosa en la zona de El Pueblito. De igual forma se deduce que el acuífero superficial alcanza profundidades de hasta 500 metros y se confirma la existencia de un sistema de fallamiento Este-Oeste, más antiguo que el Norte-Sur, formando una serie de bloques que

aparentemente no afectan de manera importante el comportamiento del sistema acuífero superficial.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

El valle de Querétaro se ubica en la intersección de dos sistemas de fallas regionales, con varias centenas de kilómetros de largo cada uno. Uno con orientación norte-noreste (NNW) conocido como Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (Demant, 1974); el otro tiene una orientación este-noreste (ENE) y se le conoce como Sistema de Fallas Chapala-Tula (Johnson y Harrison, 1990). Ambos sistemas se intersectan en una amplia franja que abarca por lo menos desde Huimilpan hasta Santa Rosa Jáuregui, Qro. y desde Apaseo El Alto, Guanajuato hasta Amazcala, Qro. (Aguirre-Díaz, 1998).

Esta situación es responsable de que la estructura geológica del valle de Querétaro este formada por una serie de discontinuidades estructurales en el subsuelo que son producto de la combinación de fenómenos tectónicos y geológicos que aún no se han acabado de comprender en su totalidad.

Las características geográficas, la escasa precipitación pluvial, la poca infiltración que se tiene y sobretodo la sobre-explotación de los mantos acuíferos ocasionada principalmente por el uso ineficiente en sistemas de riego agrícola, y no menos importante por el crecimiento de la población y la industria, ha generado en los últimos años un acelerado abatimiento del nivel freático. Esto ha ocasionado la compactación de los estratos de diferentes tipos de materiales y suelos que no se hunden de manera uniforme debido a que el basamento tiene forma irregular, generando subsidencia del suelo y eventualmente agrietamientos en la superficie que ponen en riesgo la estabilidad y seguridad de las construcciones, ductos y vías de comunicación.

Existen también en el valle, zonas de riesgo geológico asociadas a la presencia de las fallas regionales en dirección NS. En particular al Este de la ciudad en donde los riesgos de deslizamiento son latentes. Tanto los aspectos de riesgo de talud, como los relacionados con los agrietamientos del suelo en diversas partes de la ciudad y la zona conurbada, están

relacionados con la distribución de fallas geológicas, pequeñas y grandes que le dan forma al valle de Querétaro y sus alrededores y cuya estabilidad depende en gran medida de los hundimientos inducidos en las principales zonas de extracción

A pesar de que algunas de estas estructuras geológicas son claramente identificadas, como la falla Querétaro Este, paralela al boulevard Bernardo Quintana, la mayor parte de estas estructuras están ocultas en el subsuelo por una cubierta sedimentaria cuya parte más superficial consiste de una capa de suelo arcilloso que tiene además la propiedad de variar su volumen cuando cambia su humedad, sobretodo en los 2 o 3 primeros metros desde la superficie, añadiendo con ello otro factor de incertidumbre a la Ingeniería Civil. Por esta razón se hace necesario un estudio cuidadoso del subsuelo no solo en aquellas áreas en donde se planean desarrollos urbanos, industriales o comerciales, sino en el resto de valle, con el objeto de comprender de una manera general la configuración del subsuelo.

La prospección geofísica es una herramienta de gran utilidad para este propósito, que permite detectar ramificaciones y escalonamientos de estructuras geológicas que no afloran en la superficie. A partir de levantamientos geofísicos es posible detectar y localizar en el subsuelo dichas estructuras geológicas, determinar espesor de sedimentos y profundidad del basamento no compresible (superficial) así como del basamento geológico (profundo).

Existe una gran variedad de técnicas geofísicas para estudiar el subsuelo. Entre ellas se encuentra la gravimetría, la magnetometría, y el método de resistividad de corriente directa (o DC), conocidos genéricamente como métodos potenciales debido a que los campos físicos que estos miden se pueden representar por ecuaciones de potencial (gravimétrico, magnético o eléctrico respectivamente). Otros métodos utilizados también para la exploración del subsuelo, aunque tal vez más costosos son la refracción sísmica y los métodos electromagnéticos, de los cuales existe una gran diversidad.

En el presente trabajo de tesis se presentan los resultados obtenidos de un levantamiento gravimétrico en todo el valle, así como de tres perfiles de sondeos electromagnéticos llamados magnetoteluricos (o MT). Para que los datos geofísicos tengan un sentido más

amplio es necesario su correlación con observaciones geológicas e hidrológicas de la zona, por lo cual se ha incluido en este documento una síntesis de los trabajos conocidos en estos temas. Los capítulos comprendidos en la tesis son: Marco geológico del valle de Querétaro (Capítulo 2), Marco geohidrológico regional (Capítulo 3) Prospección Geofísica (Capítulo 4), Conclusiones y Recomendaciones (Capítulo 5). En el capítulo referente al Marco geológico se hace una compilación de la geología del valle, tanto a nivel regional como local, se presentan los mapas geológicos anteriores elaborados por diversas instituciones así como el mapa geológico actual de la zona de estudio, presentando además dos cortes geológicos del subsuelo. En el capítulo referente al Marco geohidrológico se mencionan los antecedentes generales y se hace una comparación de los esquemas hidrológicos más recientes. En el capítulo de Prospección Geofísica se mencionan las características generales de los métodos geofísicos utilizados en campo dentro del valle, los parámetros de calibración necesarios para la interpretación, además de lo realizado en campo y sus respectivas interpretaciones para llegar a una integración útil de los mismos. Cabe mencionar que al final de cada capítulo se muestran las figuras mencionadas en cada uno. Por último, se presentan las Conclusiones y Recomendaciones de este trabajo y su relevancia en términos de los recursos hidrológicos del valle.

### **1.1.- Antecedentes**

La empresa de Geofísica de Exploraciones GUYSA en su reporte entregado a la CNA en 1996 presenta una tabla en donde hace un resumen de los estudios geológicos, hidrológicos y geofísicos realizados en Querétaro, de la cual podemos destacar lo siguiente:

En 1981 se realiza un estudio llamado “Información parcial del estudio geohidrológico del valle de Querétaro” a cargo de Construcciones Alas S.A. de C.V. en el cual define unidades geoeléctricas, elaborando perfiles norte-sur y este-oeste del acuífero, cuyos resultados sirvieron para enriquecer el acervo de estudios posteriores.

Más adelante, en 1986 se realizan dos estudios importantes al respecto, el primero “Estudio hidrogeológico y geoquímico de la zona industrial Benito Juárez de la ciudad de Querétaro”

de esta misma empresa, en el cual identifican la fuente de contaminación del agua subterránea por grasas y aceites, en forma adicional se identifica la concentración de plomo, cadmio y níquel. El estudio finalmente sirvió para desplegar campañas dirigidas al saneamiento del agua tanto superficial como subterránea. El segundo llamado “Síntesis geográfica nomenclator y anexo cartográfico del Estado de Querétaro” del INEGI, muestra una visión general de las características físicas de la región que sirven como base para estudios posteriores más específicos.

En 1987 un estudio denominado “Sinopsis geohidrológica del Estado de Querétaro” editado en ese entonces por la SARH, menciona que de continuar con el ritmo de extracción actual de los acuíferos, en donde hay una concentración de bombeo y un abatimiento de 3 metros por año, específicamente en la ciudad, el aprovechamiento del agua subterránea dejará de ser económicamente rentable para los sectores de bajos recursos. Además, menciona la alternativa de aprovechar los excedentes hidráulicos de las subcuencas Moctezuma y Sta. Maria localizadas al nororiente del Estado.

En 1991 un “Estudio geohidrológico integral del valle de Querétaro” concluyó que era necesario vedar el área para más perforaciones y recomienda buscar fuentes externas para el abastecimiento futuro de la ciudad. En 1993 se realiza un “Estudio para la determinación de áreas factibles en las que pueda llevarse cabo el proceso de infiltración natural” zonificando el terreno de la ciudad y conociendo la capacidad de escurrimiento y zonas de inundación.

Entre 1992 y 1996 se da seguimiento del comportamiento del acuífero mediante monitoreo anual de la posición de los niveles del agua, volúmenes de extracción, actualización del censo de captaciones, actualización de la red de pozos piloto, nivelación topográfica, pruebas de bombeo y calibraciones del modelo para cada año al estudio integral del valle de Querétaro. Estos han sido de gran utilidad ya que a partir de ellos se lleva a cabo la reglamentación del acuífero y de manera autónoma la Comisión Estatal de Aguas puede elegir sus nuevas fuentes de abastecimiento interna.

En 1996 Geofísica de Exploraciones GUYSA en su trabajo llamado “Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación en los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro” en su parte referente al acuífero de Querétaro, identifica dos medios geológicos por donde circula el agua subterránea: un medio poroso y un medio fracturado. Menciona que el valle de Querétaro está formado por una potente acumulación de sedimentos vulcanolacustres con derrames intercalados de lavas ácidas y básicas que forman un paquete acuífero de más de 600 metros de espesor y que el acuífero es de tipo libre y en algunas localidades con tendencia a semiconfinado, existiendo, de acuerdo con los sistemas de flujo los sistemas local e intermedio pudiéndose presentar indistintamente tanto en el medio poroso como en el fracturado. Además, este estudio menciona que los mecanismos de recarga al sistema están dados por la recarga vertical de la lluvia, los retornos por riego de la limitada zona agrícola y las entradas laterales. Siendo la entrada de mayor cuantía por la parte oriental procedente del valle de San Juan del Río y Pedro Escobedo a través del lineamiento estructural de La Cañada, a la que se le agrega la infiltración en el cauce del escurrimiento del río Querétaro. Mientras que la descarga de agua subterránea del valle de Querétaro se lleva a cabo por el bombeo de 216 pozos, por escurrimiento superficial del río Querétaro y por flujo subterráneo hacia el Estado de Guanajuato así como por evapotranspiración en las áreas verdes que aún quedan.

Alvarez Manilla (1999) de la División su trabajo de tesis “Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro” hace una clasificación geohidrológica del valle ubicando cuatro zonas de acuerdo a su permeabilidad, basándose en cortes geológicos de pozos someros localizados en la zona, asimismo concluye que las deformaciones de la superficie de la tierra son debidas a la extracción de agua lo cual provoca hundimientos, generación de grietas de tensión y crecimiento de fallas.

Arroyo-Contreras y colegas (1999) de la División de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería de la UAQ y de la UNICIT-UNAM, con el fin de dar una respuesta a la problemática causada por las fallas y los agrietamientos del suelo en los asentamientos humanos más importantes realizaron mediante un proyecto SIHGO (DUV-



1/96) el trabajo denominado “Elaboración de cartas de fallas de los municipios de Querétaro, Qro. y Celaya, Gto. y su impacto en los principales asentamientos humanos”.

A diferencia de los estudios anteriores, en éste trabajo se estudió la estructura del basamento profundo en el sur del valle así como la configuración del basamento superficial y su relación con zonas de agrietamiento. Se observa una fuerte correlación entre los agrietamientos y deslizamientos del suelo con irregularidades en el basamento somero y se identifican zonas de riesgo por agrietamiento y deslizamiento del suelo para el valle de Querétaro.

El presente trabajo de tesis complementa los estudios geofísicos realizados en este último con el objeto de ampliar la información disponible y mejorar nuestro conocimiento del valle de Querétaro y así contribuir a un manejo adecuado de los recursos del mismo.

## **1.2.- Objetivos**

Entre los objetivos que se persiguen en el presente estudio se encuentran los siguientes:

- a) Obtener información sobre las unidades geológicas que conforman el basamento profundo del valle de Querétaro.
- b) Complementar y proporcionar información geofísica del valle de Querétaro para la evaluación eventual de los recursos hidrológicos del acuífero del valle.
- c) Ubicar en el valle de Querétaro la distribución de las ramificaciones y escalonamientos de las fallas geológicas y agrietamientos del subsuelo, tanto conocidas como nuevas.
- d) Identificar zonas de recarga en el valle de Querétaro a partir de los estudios geofísicos.

### 1.3.- Localización del área de estudio.

El Estado de Querétaro se encuentra ubicado en la región central del territorio nacional, entre los límites geográficos: 21°40' al norte y 20°01' al sur de latitud Norte y 99°03' al este y 100°36' al oeste de longitud Oeste. Limita al norte y noreste con San Luis Potosí, al este con Hidalgo, al sur con Michoacán, al sureste con el Estado de México y al oeste con Guanajuato. La superficie del Estado es de 11,769 km<sup>2</sup> que representa el 0.6% de la superficie total del territorio nacional, la ciudad capital se ubica al sureste del territorio estatal conurbada con el Pueblito y La Cañada, cabeceras municipales de Corregidora y El Marqués respectivamente. Por su ubicación geográfica en la entidad existen tres tipos de clima: cálido, semicálido y templado, con temperaturas variables de 12 a 26 grados centígrados y con una precipitación media anual entre 450 y 750 mm.

Específicamente el área de estudio se encuentra en las coordenadas geográficas entre los paralelos 20° 30'00" y 20° 42'20" de latitud Norte y los meridianos 100° 20'00" y 100° 32'05" de longitud Oeste, abarcando lo que se conoce como valle de Querétaro (**Fig. 1.1**). El valle se encuentra en su totalidad dentro de la Provincia denominada Eje Neovolcánico, cuyo origen se relaciona con el fenómeno de subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la Placa Norteamericana, proceso que ha provocado a su vez zonas de distensión, origen entre otras, de la Fosa Querétaro y cuyas fallas principales presentan una dirección de norte-noreste a sur-sureste y que es característica de las fallas y fosas dentro del Eje Neovolcánico y su área de influencia (Arroyo y colegas, 1998).

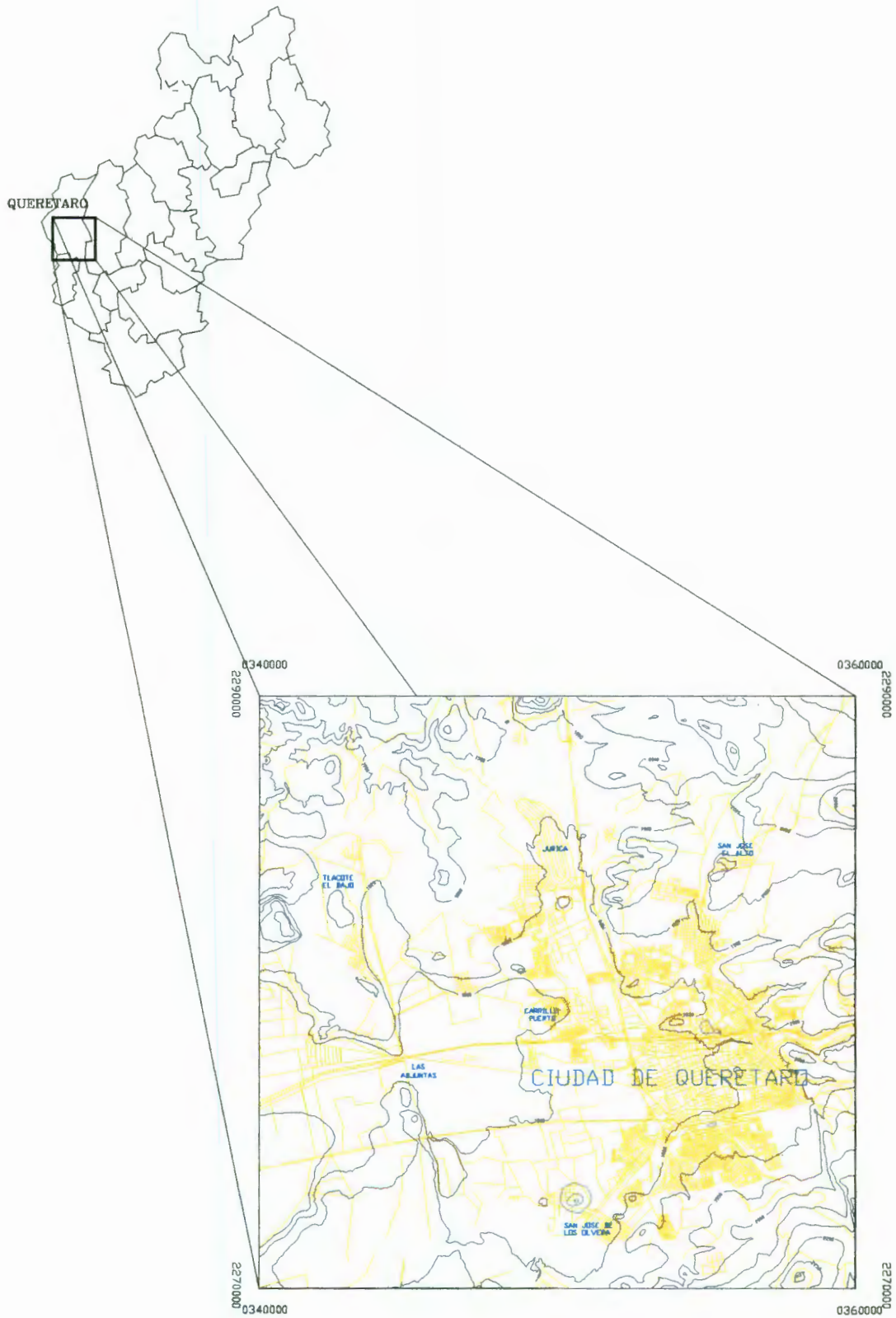


Figura 1.1.- Localización del área de estudio.

## CAPITULO 2

### MARCO GEOLOGICO

#### 2.1 Introducción

El área de estudio se localiza en la intersección de las provincias geológicas (**Fig. 2.1**) Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana y abarca la carta Querétaro 1:50,000 de INEGI cubriendo un área aproximada de 918 km<sup>2</sup>.

La serie de eventos tectónicos que dieron forma al relieve actual continúan siendo un tema de estudio, las fallas ya existentes formadas a partir de esfuerzos distensivos, siguen afectando al valle de Querétaro. En lugares como en la ciudad de Querétaro se viene presentando desde hace unos 10 años o más la aparición de agrietamientos ocasionados por la extracción de grandes volúmenes de agua subterránea, pero que tienen que ver directamente con el hundimiento regional del valle de Querétaro, el cual no es uniforme debido a la estructura irregular del basamento. La constante extracción del fluido ha modificado las condiciones de equilibrio hidrostático del subsuelo, variando las propiedades mecánicas de los distintos tipos de materiales que se encuentran rellenando el valle. Debido tanto a la problemática generada por los hundimientos diferenciales del suelo, que producen agrietamientos y daños en las construcciones civiles, como al problema potencial de suministro de agua a largo plazo es necesario conocer no solo la secuencia estratigráfica del subsuelo sino también a la función que las estructuras geológicas desempeñan tanto para la recarga del acuífero como en la generación de agrietamientos.

Los estudios geológicos previos que existían para esta región se han enfocado principalmente a la descripción de las estructuras volcánicas que circundan el valle, a los sistemas hidrotermales vecinos y otros más son trabajos de carácter regional. Entre los estudios de carácter regional, se encuentra la Sinopsis Geohidrológica del Estado de Querétaro realizada por la antigua Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1987, en la cual se muestra de manera regional las diferentes formaciones geológicas en el estado de Querétaro, así como las fallas que lo atraviesan y la estratigrafía de cada una de

las provincias geológicas.

Recientemente, en 1996, la empresa Geofísica de exploraciones GUYSA realizó un estudio en el que muestra varios perfiles realizados en base a pozos someros para describir de manera relativa las formaciones geológicas del subsuelo, además de que elaboró una carta geológica con más detalle que la de la SARH, la cual se muestra en el Apéndice A.1.

Por otro lado, Aguirre-Díaz (2000) realizó un estudio en el que muestra una compilación de las principales estructuras y fallas regionales en los alrededores del valle de Querétaro (**Figura 2.2**). De este trabajo destaca la presencia de dos sistemas de fallamiento bien definidos; uno en dirección aproximadamente N-S y otro perpendicular a éste.

Arroyo y colegas (1998) realizaron un estudio sobre el problema de los agrietamientos en el valle de Querétaro. El estudio se amplió en el año 2000, para incluir entre otros la elaboración de una carta geológica y la revisión de las estructuras que conforman el valle, lo cual fue reportado por Martínez-Reyes y colegas (2001). La **figura 2.3** muestra la carta geológica obtenida por ellos, la cual se considera la más actualizada hasta el momento.

El modelo tectónico más sencillo del valle de Querétaro es el de un graben, que comprende una planicie de forma poco alargada en dirección Norte-Sur, un relleno de sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos vulcanoclásticos y lacustres flanqueado por altos estructurales al este y oeste que se alinean casi de forma paralela. Este valle es el resultado del hundimiento de un sistema de fallamientos normales producidos por esfuerzos distensivos dirigidos hacia el poniente y oriente respectivamente con fallas ordenadas casi simétricamente y notoriamente equidistantes, con orientación noroeste-sureste extendiéndose más hacia la parte occidental. Hacia el norte, el piso del graben se eleva paulatinamente hasta perder su estructura en el poblado de Santa Rosa Jáuregui, aunque las fallas originales aún persisten. Las márgenes del graben se presentan asimétricas, observándose más escarpadas hacia la parte oriente coincidiendo con la traza de una de las fallas principales. Hacia la parte poniente el escarpe de esta margen es menos conspicuo, con excepción de algunos lugares. Estas fallas se presentan en la **figura 2.2** con sus respectivos nombres.

## 2.2.- Geología regional

La siguiente explicación, relativa a la descripción de unidades geológicas, estratigrafía y configuración estructural de la zona de estudio, fue compilada principalmente de los trabajos de Martínez-Reyes (2001), Reyes-Zaragoza (2001), Aguirre-Díaz y Arroyo y colegas (1998).

La morfología del paisaje en la zona de estudio está representada por diversos tipos de estructuras volcánicas, tales como: volcanes compuestos, flujos piroclásticos y derrames lávicos de basalto con formas de mesetas y planicies, sobre las cuales se han acumulado materiales fragmentados que constituyen el relleno volcánico-clástico.

Las rocas más antiguas que afloran en esta provincia son del Cretácico Superior y se representan por la alternancia de calizas y lutitas de la Formación Soyatal. Otros estudios mencionan que se trata de la formación Caraco (SARH, 1987). Esta ha quedado expuesta a la superficie debido a la erosión de las rocas que las cubrían y afloran al suroeste de Santa Rosa Jáuregui en el poblado de Juriquilla. Esta unidad constituye el basamento del valle. Las rocas ígneas extrusivas constituyen la mayor parte de los afloramientos en la región, son de composición ácida, intermedia y básica, pertenecen al Terciario Superior y cubren irregularmente a las rocas sedimentarias del Mesozoico. También existen depósitos lacustres del Terciario Superior, constituidos por lutitas, conglomerados y rocas volcánicas que descansan discordantemente sobre las rocas volcánicas más antiguas.

Las unidades rocosas más jóvenes son los basaltos y conglomerados del Cuaternario. De esta misma edad datan los depósitos de suelos aluviales y residuales diseminados en la provincia (SARH, 1987). Más detalladamente en la geología local describiremos las unidades de roca que se encuentran aflorando en la zona de interés. Las escalas de tiempo geológico que se mencionan en los párrafos siguientes se muestran en la **figura 2.4**.

## **Mesozoico (245 - 66 Ma)**

El marco geológico de la entidad está conformado por rocas de composición y edad muy variadas, que fueron producto de una serie de eventos geológicos iniciada a finales de la era Paleozoica, hace 240 millones de años (SARH, 1987). La unidad más antigua en el estado de Querétaro corresponde a la Formación Chilar de Edad Pérmica, más específicamente en la Era Paleozoica, localizada en ésta ranchería al noreste de Tolimán. Se trata de una secuencia de sedimentos clásticos, metasedimentarios de bajo grado, formada por filitas, argilitas, pizarras, horizontes volcano-sedimentarios, arcosas, grauvacas y pedernal. Esta formación tiene un espesor menor de 500 m (GUYSA, 1996).

El Mesozoico está representado por rocas continentales y marinas así como por conglomerados y areniscas rojas de origen continental que datan del Triásico Superior (200 m.a.). Estas formaciones están constituidas por limolitas y lutitas filíticas rojas con intercalaciones de capas y lentes bentoníticos. Sobreyaciendo localmente a la secuencia anterior en ésta área, rocas de origen marino de la misma edad se encuentran aflorando al norte del poblado de Buenavista (SARH, 1987).

El Jurásico Superior-Cretácico Inferior está constituido por grauvacas con intercalaciones de lutitas, seguidas por margas, lutitas filíticas, calizas arcillosas y en parte calizas piritíferas y areniscas. Conglomerados constituidos en gran parte por guijas carcíferas bien redondeadas y rocas de origen marino del Jurásico Superior (150 m.a.) se encuentran cubriendo parcialmente a las rocas Triásicas en el área descrita. Su espesor varía de 200 a 800 metros (SARH, 1987).

El Cretácico Inferior-Medio se compone básicamente de calizas marinas del Cretácico Medio (100 m.a.), tanto arrecifales en El Doctor y Arroyo Seco, como de cuenca en Santa Rosa Jáuregui (SARH, 1987) en donde abundan más las calizas arcillosas, las margas y las lutitas. Estas calizas subyacen en forma concordante a las calizas de la formación Soyatal-Mezcala del Cretácico Superior (CRM, 1992), que en conjunto consisten de estratos calcáreos arcillosos de color crema, separados por intercalaciones delgadas de lutitas color ocre cuyo espesor aproximado es de 500m. La cima es discordante con la secuencia

volcánica y el grupo el Morro del Terciario (CRM, 1992).

Existen diferentes afloramientos en el área de Guanajuato de rocas sedimentarias marinas intercaladas con basaltos, similares a secuencias del Terreno Guerrero e infieren similitudes entre el Terreno Guerrero y las secuencias vulcano-sedimentaria de San Miguel de Allende. En Celaya esta secuencia Mesozoica está compuesta por arenisca, lutita, pedernal y en ocasiones radiolaritas intercaladas con rocas volcánicas basálticas almohadillas, se identificaron además, lavas, diques y capas de material piroclástico. Lo cubre un conglomerado policmítico discordante. Agrupa las unidades la Esperanza, y la Luz (Echhegoyén-Sánchez, 1970).

## **CENOZOICO (66 – 1 Ma)**

### **Eoceno (58 – 37 Ma)**

El Eoceno está representado por conglomerados calcáreos de edad terciaria (50 m.a.), que se aprecian al oriente de la población de Cadereyta (SARH, 1987), además rocas graníticas contemporáneas de los conglomerados calcáreos se encuentran aflorando en la porción sur y noreste de la entidad. Ignimbritas y tobas del Oligoceno-Mioceno, interdigitadas con sedimentos lacustres, y que se encuentran en la porción centro y sur del estado; andesitas y piroclásticos asociados del Plioceno (10 m.a.) (CRM, 1992).

Conglomerado Policmítico que aflora en las regiones de Celaya y San Miguel de Allende (Nieto-Samaniego, 1999) correlacionado con el conglomerado Rojo de Guanajuato (Edwards, 1955). Este conglomerado está constituido por gran cantidad de fragmentos de granito, caliza y pedernal, en algunas partes alterna con arenisca color rojo intercaladas con lavas andesíticas (Reyes-Zaragoza, 2001). Parcialmente sobre estas rocas se encuentran las originadas en los períodos Terciario y Cuaternario.

### **Oligoceno (37 – 24 Ma)**

En Querétaro está representado por el conglomerado El Morro, que sobreyace en



discordancia erosional a la secuencia de rocas marinas mesozoicas y se interdigita lateralmente con la secuencia volcánica terciaria (CRM, 1992). Está presente además un vulcanismo riolítico ignimbrítico, caracterizado por el emplazamiento de las lavas riolíticas e ignimbríticas en la parte norte del área (Reyes-Zaragoza, 2001). Este vulcanismo ha sido considerado como la extensión occidental de la secuencia volcánica oligocénica perteneciente a la Mesa Central (Nieto-Samaniego, 1999b). También se presenta un vulcanismo andesítico representado por la Andesita el Cedro (Meave, 1959), que se observa en el Distrito Minero de Guanajuato.

### **Mioceno (24 – 5 Ma)**

Se presenta en un vulcanismo máfico que comprende principalmente a los basaltos y andesitas y en menor cantidad dacitas. Es definido por Pasquaré y colegas (1991) como la “secuencia basáltica del Mioceno Tardío”. Se encuentra ampliamente distribuido en la parte norte del área de estudio y está ampliamente representado por volcanes miocénicos como La Joya, Palo Huérfano, San Pedro y El Zamorano así como por amplias mesetas distribuidas en la región de Querétaro y por vulcanismo máfico en la parte sur asociado al sistema de fallas Tula-Chapala. Este vulcanismo ha sido propuesto por Ferrari y colegas (1994 a) como el evento que marca el inicio de la actividad en el Eje Neovolcánico Mexicano (Reyes-Zaragoza y colegas, 2001). Se presenta también un vulcanismo ácido que corresponde a la fase riolítica e ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental y su distribución se restringe a la parte norte del área de estudio, representan la extensión directa de la Sierra Madre Occidental (Nieto-Samaniego, 1996).

### **Plioceno (5 – 1.5 Ma)**

Reyes-Zaragoza (2001), agrupó las siguientes unidades: secuencia Palo Huérfano (11 Ma), Andesita Allende (12.1 Ma), Cerro Palo Huérfano (12.1 Ma), Secuencia Cerro Colorado (Pérez-Venzor, 1997), Andesita Arroyo Hondo, Ignimbrita Zamorano, Dacita Domo Central y Andesita Mesa Redonda (Carrasco-Nuñez, 1989), Andesita la Ordeña, Andesitas y Basaltos Tarimoro, Basaltos Querétaro, Basaltos Villa Morelos, Basaltos Río Lerma, Conos de composición andesítica (Pasquaré, 1991) y Andesita el Salto (López- Hernández,

1996).

El vulcanismo máfico se concentró en el Plioceno tardío y el Holoceno, se encuentra alineado y formado principalmente por conos y domos que incluyen las siguientes unidades: Domos de andesita Vegil, Conos de lava andesítica, Conos de ceniza Villa Escalante, Conos de lava y pequeños volcanes de escudo, Vulcanismo monogenético, Conos de escoria, Domos de escoria El Comal, Andesitas Hormigas, Andesita Santa Rosa, Andesita Palomas, Andesita Amealco, Brecha pumícita, Toba Amealco y Andesita Las Lomas. Se incluyen también las lavas y brechas del Plioceno intermedias no diferenciadas reportadas por Aguirre-Díaz (1996) debido a que es contemporánea con la Andesita la Loma (Reyes-Zaragoza, 2001).

### **Cuaternario (1.5 al reciente).**

Los depósitos recientes ocupan la porción centro-sur de la entidad y son producto de la erosión fluvial principalmente. Están constituidos de materiales aluviales, gravas, arenas, limos y arcillas que forman la parte superior del relleno y la superficie de los amplios valles que ocupan la porción central del estado (SARH, 1987). También abundan los suelos residuales, conglomerados fluviales y caliche en proceso de formación, rellenando bajos topográficos de valles intermontanos. Estos depósitos cubren a los derrames basálticos cuaternarios y a la secuencia ígnea extrusiva y continental terciaria. Otros productos cuaternarios son las ignimbritas expuestas cerca del poblado de Amealco y basaltos diseminados en toda la entidad (CRM, 1992).

## **2.3.- Geología local**

### **Introducción**

Lo que se ha denominado "valle de Querétaro" se dibuja de manera clara en las cartas topográficas de la región de la ciudad de Querétaro como una unidad morfológica, tanto en una dirección N-S como en una dirección E-W. En particular, esto se puede apreciar muy bien sobre las diferentes ediciones publicadas por el INEGI de la carta Querétaro a escala 1:

50 000 (F14-C65). Para su estudio geológico hemos ubicado a este valle dentro del área limitada por las siguientes coordenadas geográficas: los paralelos 20° 30'00" y 20° 42'20" de latitud Norte y los meridianos 100° 20'00" y 100° 32'05" de longitud Oeste.

Sobre la carta geológica de la República Mexicana (5a edición, escala 1: 2'000,000, 1992) la región de estudio se ubica en la convergencia de las estribaciones más occidentales de la Sierra Madre Oriental (Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas) del Jurásico-Cretácico, la terminación más meridional de la Sierra Madre Occidental (Faja Ignimbrítica Mexicana) del Paleógeno y las manifestaciones más septentrionales del Eje Neovolcánico (Faja Volcánica Trans-Mexicana) del Neógeno-Cuaternario. De alguna manera la región del valle de Querétaro es conocida geológicamente a través de algunos estudios publicados precedentemente, algunos se han enfocado a las grandes estructuras volcánicas que lo circundan (Carrasco-Núñez y colegas, 1989; Pérez-Venzor y colegas, 1996; Valdez-Moreno y colegas, 1998; Aguirre-Díaz, 2000) otros a los sistemas hidrotermales vecinos (por ejemplo López-Hernández, 1996) y otros más lo han incluido en trabajos de carácter más regional (Pasquaré y colegas, 1991; Ferrari y colegas, 1994). Adicionalmente, en los últimos años, se han realizado otros trabajos que tratan sobre diversos aspectos del entorno estructural de la ciudad de Querétaro (Aguirre-Díaz, 2000; Arroyo y colegas, 1999; Reyes-Zaragoza, 2001).

Mencionaremos a continuación en forma resumida como fue la evolución geológica del valle de Querétaro, resaltando las formaciones más importantes y los principales eventos tectónicos que dieron origen al relieve actual.

A principios del Cretácico Superior se depositaron sedimentos carbonatados en un ambiente de cuenca. Este tipo de rocas consisten en estratos calcáreos arcillosos color crema, separados por intercalaciones delgadas de lutitas y lutitas calcáreas de colores claros amarillentos, en ocasiones con niveles de areniscas calcáreas y areniscas arcillosas intercaladas. Esta unidad aflora principalmente en el poblado de Juriquilla, específicamente hacia el suroriente, surponiente y poniente de esa localidad. Su expresión morfológica se traduce en lomeríos bajos y suaves de color amarillento, desprovistos de vegetación (Martínez-Reyes y colegas, 2001). Este tipo de rocas son generadas cuando se retiran los

mares y surgen estructuras como sinclinales, anticlinales y cabalgaduras, entonces puede suceder este afloramiento correspondiente a la parte alta de una cabalgadura ó al deslizamiento de los bloques al ser sometidos a esfuerzos de tensión.

Su litología se puede observar en los cortes de los antiguos bancos de material cavados en estas facies, que se encuentran en la entrada oriental del fraccionamiento Juriquilla y al borde de la terracería Mompaní-Santa Rosa Jauregui, al Norte del cerro El Nabo. En estos lugares afloran unos cuantos metros. Esta unidad encajona al Intrusivo Juriquilla y está cubierta por derrames basálticos y productos aluvionares posteriores; su espesor es desconocido. Por su similitud litológica estas facies pueden correlacionarse con facies de la Formación Soyatal definida en la parte más oriental del estado de Querétaro por Wilson en 1955 (Martínez, 2001). Esta es la formación más antigua en el valle y se piensa que forma el basamento, aunque pudiera no encontrarse bajo la cubierta de material volcanoclástico, ya que los pozos disponibles no cuentan con la profundidad necesaria para saberlo.

Del Paleoceno al Eoceno se presenta un largo periodo de calma, caracterizado por la ausencia de depósitos. En este periodo solamente se erosionaron los afloramientos de las rocas cretácicas expuestas a la superficie. Asociadas a estas rocas erosionadas se tiene la presencia de rocas intrusivas a principios del Oligoceno, surgiendo entre las fisuras y los planos de debilidad; en el valle se representa por el Intrusivo Juriquilla (Cpij). Se trata de un cuerpo cuarzo-monzonítico que se encuentra aflorando en la localidad del mismo nombre y que afecta solamente la secuencia de las rocas calizas cretácicas y no a las rocas volcánicas y volcanoclásticas de origen continental que forman la cubierta de la fosa por lo que se considera como parte del basamento (Martínez y colegas, 2001).

Posterior a la erosión de estas rocas y a la intrusión del cuerpo cuarzo-monzonítico, se presentó un evento volcánico andesítico que cubrió grandes extensiones y relleno el valle, puede considerarse como la base de la cubierta de la cual existen afloramientos en toda el área de estudio. Estos derrames se encuentran en contacto con las calizas cretácicas (Martínez-Reyes y colegas, 2001).

Algunos autores coinciden en que durante el Oligoceno-Mioceno se lleva a cabo el

emplazamiento del Eje Neovolcánico Mexicano, sin embargo Demant (1974), considera que el vulcanismo presentado en estos periodos corresponde a la prolongación meridional del Sistema Volcánico Sierra Madre Occidental limitando la actividad volcánica del Eje Neovolcánico Mexicano al Plioceno (GUYSA, 1996). Aparece por un lado una serie de lavas y brechas de composición andesítica (Cpas) aflorando principalmente en la región de “El Salitre” (lavas y brechas volcánicas El Salitre) y que se extienden ampliamente, como lo muestran la presencia de pequeños afloramientos en varios puntos del área estudiada. Por otro lado, aparecen lavas de composición dacítica (Cpdm), llamadas dacitas Mompaní, debido a la presencia de cuarzo (Martínez-Reyes y colegas, 2001).

Una vez formado el graben posterior a los eventos tectónicos, comienza el relleno del mismo en un ambiente volcánico y lacustre con corrientes piroclásticas de ignimbritas y tobas, representadas en el área de estudio por afloramientos de sedimentos lacustres, andesitas El Salto, ignimbritas, lavas andesíticas Colón y las tobas pumícitas Ezequiel Montes (Martínez-Reyes y colegas, 2001). Sobre la base de la cubierta andesítica y dacítica mencionada anteriormente, se encuentran los sedimentos lacustres (Cnsl), constituidos principalmente por sedimentos arenosos, arcilloso-arenosos, con niveles de piroclásticos retrabajados, depósitos vulcanosedimentarios con una serie de material epiclástico-piroclástico variando ampliamente su granulometría desde boleos hasta limos y arcillas. Existen afloramientos principalmente en la parte suroccidental y algunos pequeños afloramientos más en la parte sur del área de interés. Estos sedimentos normalmente están cubiertos por intercalaciones de lavas andesíticas (Cnas) y/o basálticas (Cnbq). En el primer caso se trata de una formación que aflora en la parte suroccidental del área y que se ha denominado Andesita el Salto. El segundo caso se trata de derrames delgados de basaltos, de los cuales podemos distinguir dos capas de ellos: los primeros forman las mesas de la parte central y meridional del área, que han sido datados en 8.1 Ma (Pasquaré y colegas, 1991), y los segundos encontrados en la parte septentrional fechados en 6.1 Ma (Martínez-Reyes y colegas, 2001). Estas unidades sobreyacen discordantemente a varias unidades litológicas, entre las cuales están los sedimentos lacustres.

Hacia la parte oriental, en la zona de La Cañada, aparece una unidad formada por corrientes piroclásticas con fragmentos de cuarzo. Se encuentra sobreyaciendo en forma discordante a

las unidades basálticas y a los sedimentos vulcanolacustres. Esta unidad es una toba soldada de composición riolítica. Su espesor es de una decena de metros, probablemente corresponden a facies distantes de una unidad piroclástica conocida como Ignimbrita Colón. Se encuentra sobre ella un paquete de andesitas lajeadas de un espesor aproximado de treinta metros, de morfología suave. Ambas facies se clasifican en la carta geológica como las ignimbritas y lavas andesíticas Colón (Cnic) (Martínez-Reyes y colegas, 2001).

En esa misma porción encima de los Basaltos Querétaro, aparece una secuencia piroclástica de composición riolítica, constituida por tobas de caída libre en donde se intercalan niveles de pómez y tobas retrabajadas. Se distinguen claramente de entre otros grupos de roca debido a las direcciones de flujo que presentan y los escarpes casi verticales, así como por la superficie casi plana formando planchas con fracturas en la superficie. Estas facies son las representaciones más occidentales de la toba pumícita Ezequiel Montes (Martínez-Reyes y colegas, 2001).

Los últimos eventos volcánicos presentados en la zona de estudio fueron los productos andesíticos del volcán El Cimatarío (Cnac) de 5.6 Ma y los productos basálticos del volcán del Cerro Grande de Santa Cruz (Cnic) los cuales se consideran contemporáneos. Los primeros se encuentran aflorando en la parte suroriental del área, mientras que los segundos afloran sobre la parte nororiental y más allá de la misma (Martínez-Reyes y colegas, 2001). Todas las unidades antes mencionadas se muestran en la carta geológica de la zona de estudio (**Fig. 2.3**).

### **Geología estructural**

La ciudad de Querétaro se ubica en un graben, limitado por fallas normales NNW-SSE al occidente y oriente respectivamente. Algunas de las fallas NNW-SSE del graben son más jóvenes que el sistema ENE-WSW, puesto que es posible observar en la carta geológica cómo las primeras desplazaron a las fallas del segundo.

Las fallas con dirección NNW-SSE pertenecen al sistema de fallamiento regional Taxco-San Miguel de Allende, que a su vez forma parte de la provincia extensional de Cuencas y

Sierras. La tendencia regional de estos grandes lineamientos se asocia genericamente a los esfuerzos de tensión a los que fue sometida la placa tectónica de Norteamérica por el efecto de subducción de las placas de Cocos y Rivera, dando origen al Eje Neovolcánico Mexicano.

Una de las características notables de esta zona es la estrecha asociación en algunos sectores entre los lineamientos de estructuras y grupo de volcanes y calderas (**Figs. 2.2 y 2.5**). Además se ha documentado que en el Eje Neovolcánico Mexicano, el vulcanismo migró de norte a sur del Mioceno Tardío al presente. Se considera además al sistema de fallamiento regional Taxco-San Miguel de Allende, como un límite cortical. Jhonson y Harrison (1990) estudiaron este sistema nombrándolo sistema de fracturas Taxco-Querétaro, asignándole una edad de actividad anterior al Plioceno, basándose en rasgos neotectónicos y en el corte de rocas pliocénicas. El segmento conocido como la falla de San Miguel de Allende fue reconocido por Bocco (1984) como un rasgo geomorfológico muy importante, tiene 100 km de largo y forma escarpes donde el desplazamiento puede llegar hasta 450 m (Nieto-Samaniego, 1999).

El otro sistema de fallamiento ENE-WSW, pertenece al sistema de fallas Chapala-Tula, interpretado como una dislocación de carácter lateral izquierdo que fue el último evento tectónico ocurrido en la zona de estudio y que limitó al graben de Querétaro en dirección norte sur (Aguirre-Díaz, 2000). La **figura 2.2** muestra el arreglo de las fallas existentes en los alrededores de la ciudad de Querétaro (Aguirre-Díaz, 2000) en donde destaca la ausencia de fallamiento superficial en dirección EW en la parte centro y sur del valle de Querétaro. Esto mismo se puede observar en la carta de fuentes de emisión de la zona (**Fig. 2.5**). Los rasgos estructurales más evidentes que presenta la zona se deben principalmente a los eventos tectónicos que ocurrieron antes y durante los derrames volcánicos.

El sistema de fallamiento ENE-WSW, consta de un segmento nombrado sistema de fallas Ciutzeo (Johnson y Harrison, 1990), compuesto por fallas de dirección N-NE y ocupa la mayor parte del este de la cuenca del río Lerma. Se considera que este sistema ha deformado la parte central del ENM (Suter y colegas, 1995). Constituido por fallas normales que forman escarpes de más de 50 m de altura entre los que se encuentran la

sísmicamente activa falla de Acambay. Lo que define que este sistema sea activo es la sismicidad histórica de varias fallas y los desplazamientos de depósitos lacustres cuaternarios y de rocas volcánicas plioceno-cuaternarias (Pasquaré y colegas, 1991; Suter y colegas, 1992). La dirección que tienen los escarpes de las fallas mostradas en la **figura 2.4** indica principalmente estructuras tipo graben y horts.

### **Sistema local de fallas**

Los sistemas de fallamiento que convergen en la carta Querétaro a escala 1:50,000 son; el sistema Taxco-Querétaro o Taxco-San Miguel de Allende (T-Q) de dirección NNW-SSE y el Sistema Chapala-Tula (CH-T) de dirección ENE-WSW. El sistema T-Q cuenta con cuatro fallas principales con expresión superficial. Estas han sido nombradas (Arroyo y colegas, 1999; Reyes-Martínez y colegas, 2001) como: falla Querétaro Este, falla Central, falla Tlacote y falla Obrajuelo (**Fig. 2.3**), esta última fuera del área de estudio pero que es mostrada en la **figura 2.5**. Cada una de estas fallas es dividida por Reyes-Zaragoza (2001), como se menciona a continuación:

La falla Querétaro Este es dividida en los segmentos de falla siguientes: segmento Peñuelas, segmento El Cimatario, segmento Bernardo Quintana y segmento La Solana. Cada uno de los segmentos de falla afecta distintas unidades tales como: las andesitas Cimatario cortadas por la falla Cimatario; las andesitas el Salitre y San José el Alto cortadas por la falla La Solana; los basaltos Querétaro y algunos sedimentos lacustres cortados por los segmentos Peñuelas y Bernardo Quintana. Estos dos últimos son divididos por la falla Menchaca cuya orientación es aproximadamente EW. Existe una pequeña falla llamada falla el Obraje, en donde puede observarse que ésta marca un límite entre las andesitas el Salitre y las andesitas San José El Alto.

La falla Querétaro Centro se divide en el segmento norte, segmento sur, el segmento La Solana y el segmento El Picacho. Este último se encuentra sepultado hacia el norte, es decir, en la parte central del valle. El segmento norte expone en su borde rocas de composición andesítica, llamadas andesitas El Salitre; el segmento sur muestra en su borde a los basaltos Querétaro, marca un pequeño límite entre los basaltos Querétaro y los



sedimentos lacustres.

La falla Tlacote ha sido dividida en dos segmentos probablemente por la falla La Cañada. Sin embargo no hay evidencia superficial de esto. Cada uno de estos segmentos muestra una diferencia en sus escarpes que va en la parte norte desde los 50 m hasta 110 m en la parte sur.

El sistema Chapala-Tula en la zona se caracteriza por la presencia de fallas normales con un componente de desplazamiento lateral izquierdo (Suter y colegas, 1992) de dirección preferencial ENE-WSW. Muestra fallas menores medidas en campo con desplazamientos mínimos y se ha inferido la presencia de las fallas principales por los desniveles observados de más de 50 metros (Reyes-Zaragoza, 2001). Una característica principal de las fallas en dirección NE, es el lineamiento de domos de composición riolítica y dacítica en el NW del valle como se muestra la **figura 2.5**. Las fallas ocultas, se han inferido a partir de cambios observados en la altimetría, así como de la segmentación local del sistema Taxco-Querétaro, lo cual se viene a verificar a partir de los perfiles geofísicos presentados en el Capítulo 4.

### **Carta geológica**

Existen claras diferencias en las cartas elaboradas por GUYSA (1996) y por la Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra como parte del presente trabajo. Por ejemplo, puede observarse en la parte de la colonia Satélite, en la carta de GUYSA, pequeños afloramientos de suelo residual sobre un derrame importante de basaltos siendo que en esta zona lo que aflora son los suelos residuales principalmente y solo se distinguen pequeños afloramientos de basaltos.

En la mayor parte de la carta elaborada por GUYSA sobresalen los basaltos. En la carta geológica reciente elaborada por Martínez-Reyes y colegas (2001). Sobre estos basaltos se pueden encontrar hasta tres unidades distintas como es el caso de las andesitas San José El Alto, las andesitas El Salitre y las andesitas El Cimatarío. Sin embargo las cartas coinciden en la distribución de los aluviones y el afloramiento de las rocas cretácicas al norte del

valle. Es posible observar también una serie de fallas que en la carta de GUYSA no aparecen pero que se encuentran y es posible observar de manera directa en campo (**Fig. 2.3**).

La carta de la UNICIT fue preparada a partir de compilación de la información disponible de observaciones en campo y de datos geofísicos que fueron incorporados a la carta. En esta se presenta la columna litoestratigráfica interpretada y ordenada cronológicamente y dos perfiles geológicos regionales que más adelante se describen con mayor detalle, en términos de los resultados geofísicos.

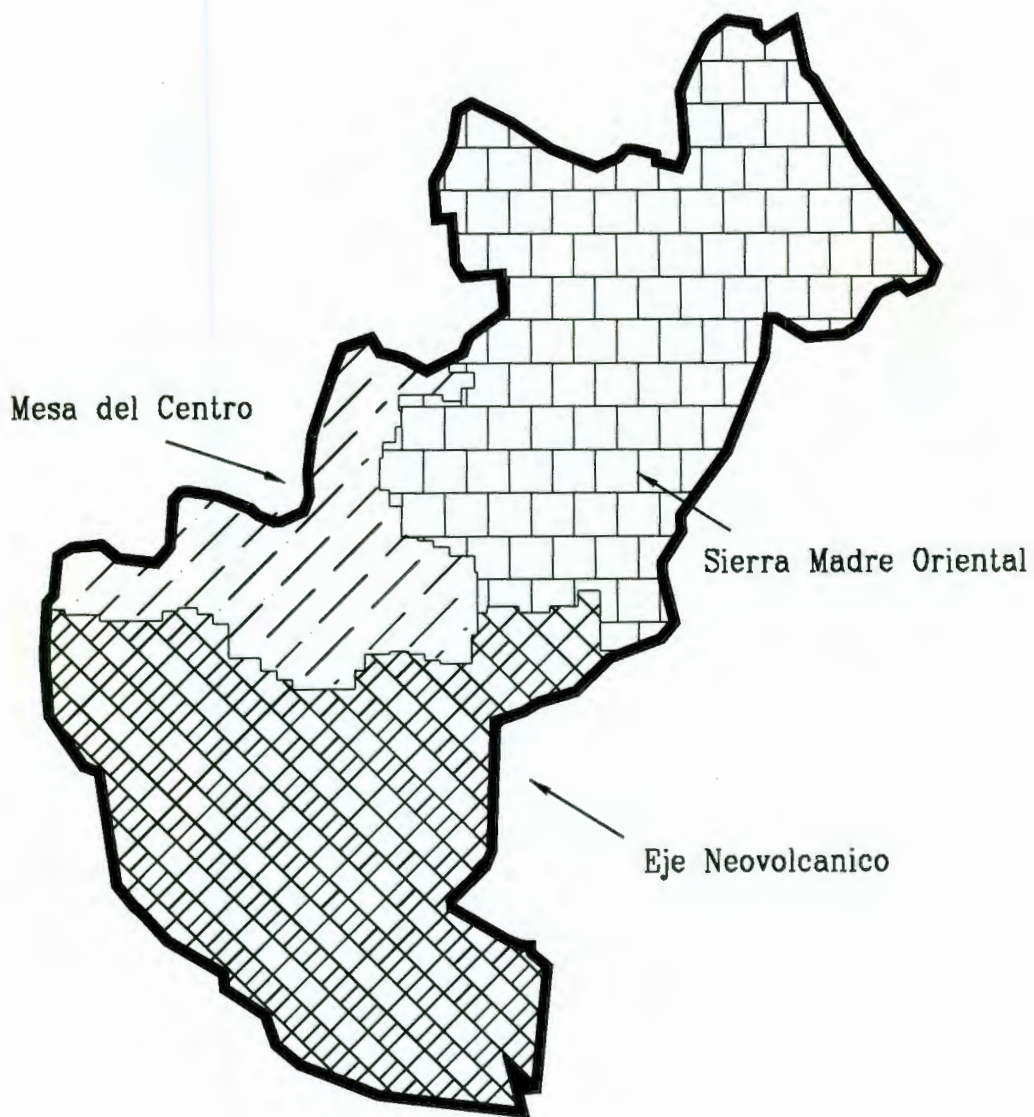


Figura 2.1.- Provincias fisiográficas del Estado de Querétaro.

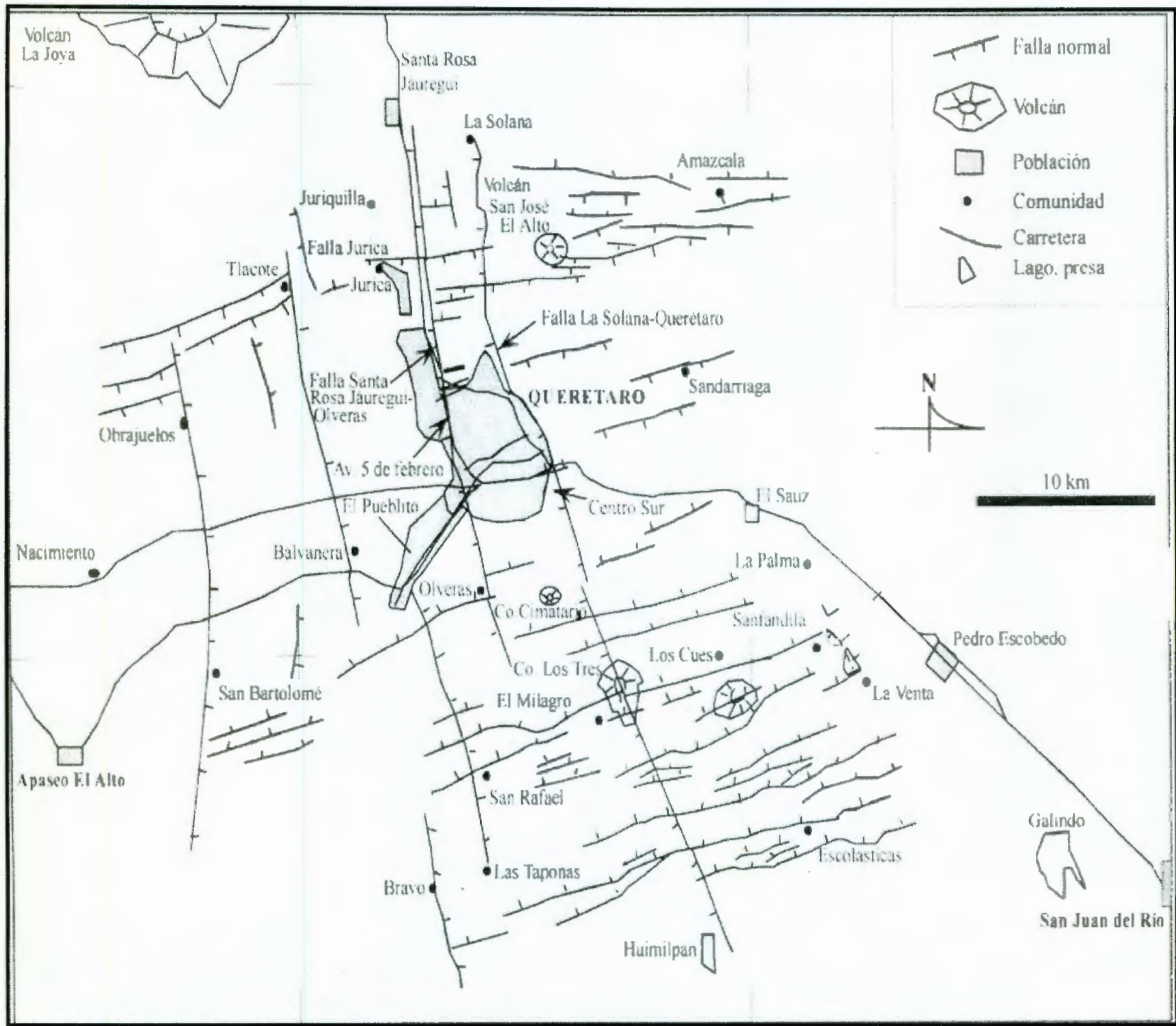


Figura 2. 2.- Mapa estructural que muestra la ubicación del graben de Querétaro y los sistemas de fallas que se intersecan en esta zona formando un arreglo ortogonal de horts, grabens y semigrabens (Gerardo Aguirre, 2000).

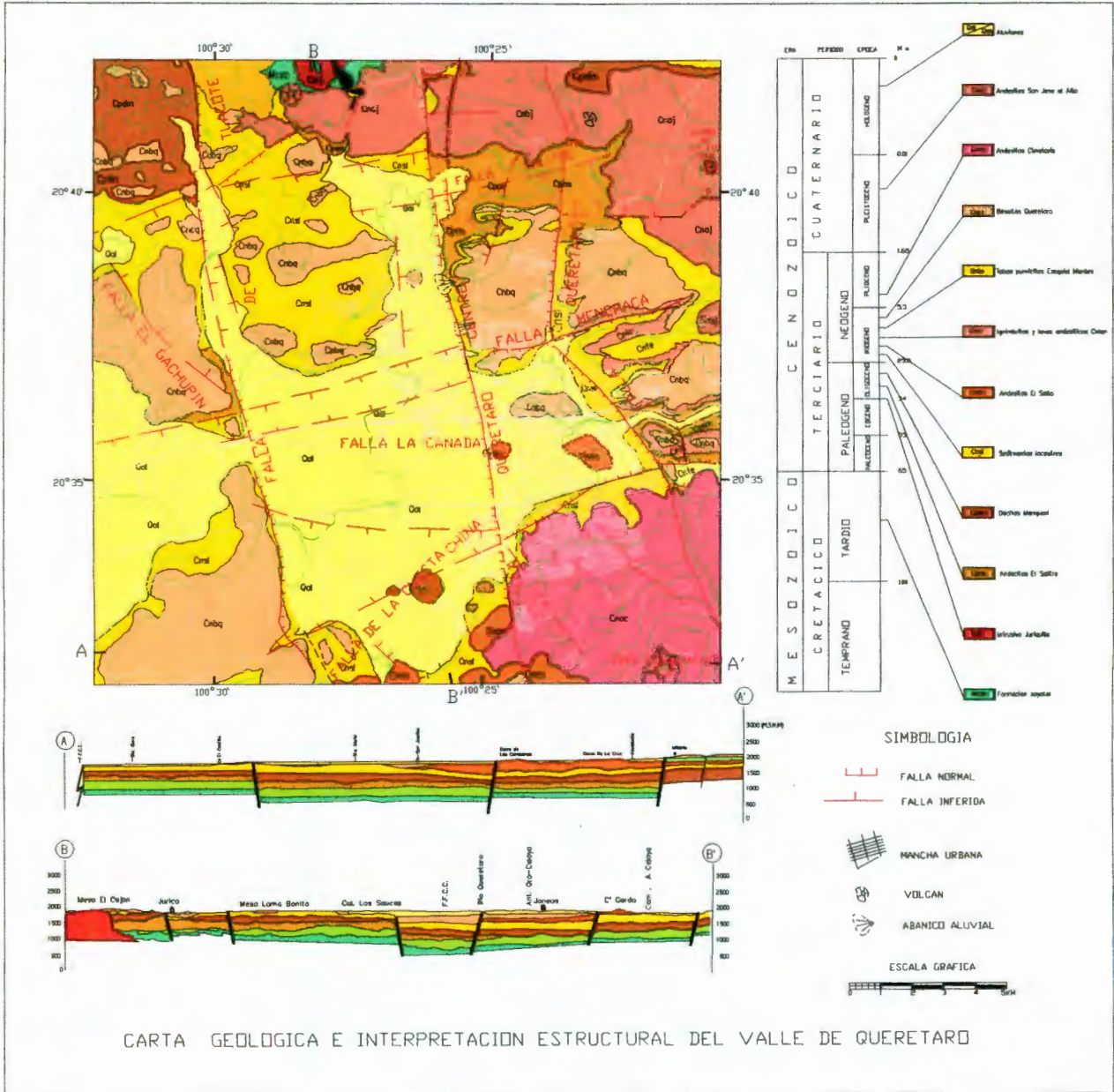


Figura 2.3.- Carta geológica e interpretación estructural del valle de Querétaro (Martínez y colegas, 2001).

Unidades de tiempo de la escala de tiempo geológico				Desarrollo de plantas y animales	
Eón	Era	Periodo	Época		
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno 0.01	Desarrollo de los seres humanos Edad de los mamíferos Extinción de los dinosaurios	
			Pleistoceno 1.6		
		Terciario	Plioceno 5.3		
			Mioceno 23.7		
			Oligoceno 36.6		
			Eoceno 57.8		
			Paleoceno 66.4		
	Mesozoico	Cretácico 144		"Edad de los reptiles"	Primeras plantas con flores Primeras aves Dinosaurios dominantes
		Jurácico 208			
		Triásico 245			
	Paleozoico	Pérmico 286		"Edad de los anfibios"	Extinción de los trilobites muchos otros animales marinos, primeros reptiles, grandes pantanos carboníferos, anfibios abundantes
		Carbonífero	Pensilvaniense 320		
			Misisipiense 360		
		Devónico 408		"Edad de los peces"	Primeros insectos fósiles, peces dominantes, primeras plantas terrestres
Silúrico 438					
Ordovísico 505		"Edad de los invertebrados"	Primeros peces, trilobites dominantes, primeros organismos con concha		
Cámbrico 570					
Proterozoico	2500	Denominado colectivamente precámbrico, abarca alrededor del 87 % de la escala de tiempo geológico		Primeros organismos pluricelulares	
Arcaico	3800			Primeros organismos unicelulares, edad de las rocas antiguas, origen de la tierra	
Hádico	4600				

Figura 2.4.- Unidades de tiempo de la escala de tiempo geológico.

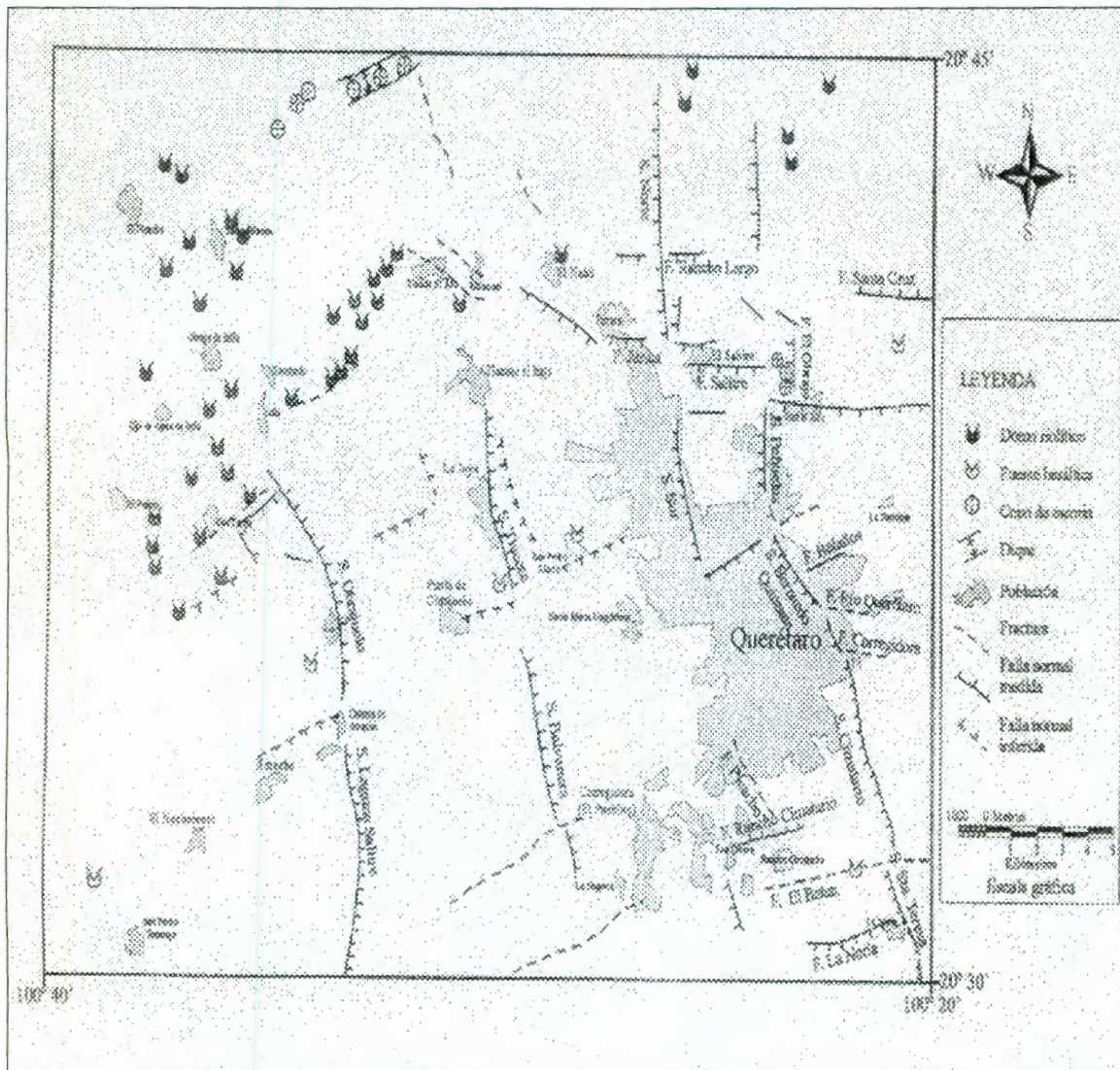


Figura 2.5.- Ubicación de las fuentes de emisión (Reyes-Zaragoza, 2001).

## CAPITULO 3

### MARCO GEOHIDROLOGICO

#### 3.1.- Introducción

El Estado de Querétaro comparte con otros estados dos cuencas hidrológicas regionales: la del río Pánuco que abarca un 79% del territorio del estado y que genera un escurrimiento medio anual de 830 millones de metros cúbicos y la cuenca del río Lerma-Chapala con el 21% restante y con un escurrimiento medio anual de 128 millones de metros cúbicos. Sin embargo, a consecuencia de las difíciles condiciones topográficas y climatológicas, este volumen de escurrimiento se ve limitado, de tal forma que dentro de la cuenca del río Lerma porción Querétaro, únicamente se tiene capacidad instalada para almacenar 65 millones de metros cúbicos anuales mediante aprovechamientos superficiales, es decir, se aprovecha solamente el 50.8% de los escurrimientos. Mientras que, en la cuenca del río Pánuco se aprovechan del orden de 248 millones de metros cúbicos anuales, que significan solo un 29.9% de los escurrimientos aprovechados (**Fig. 3.1**) (González-Hernández, 2001).

En muchas ocasiones los cuerpos de agua que se almacenan sirven de recarga artificial a los mantos acuíferos sobre los que se encuentran, por lo que resulta doblemente benéfica la captación de escurrimientos con bordos y represas. A pesar de que, en principio los escurrimientos con los que cuenta el Estado son potencialmente importantes no solo para almacenamientos sino para la propia recarga, el subsuelo ha sido hasta ahora la principal fuente de abastecimiento de agua en Querétaro, debido a que los mayores volúmenes de estos están concentrados en la porción montañosa nororiental de la entidad (SARH, 1987).

De la red hidrográfica del Estado destacan los ríos Querétaro, San Juan, Moctezuma, Jalpan, Santa María y Extoraz (**Fig. 3.2**). Según reportes de la SARH (1987) el Estado recibe anualmente un volumen de lluvia de 7674 millones de metros cúbicos en promedio, de los cuales 972 escurren superficialmente, 528 se infiltran alimentando a los acuíferos y 6174 retornan a la atmósfera por evapotranspiración, además 17 son aportados anualmente



en forma de escurrimiento por los estados de México, Guanajuato y San Luis Potosí, aunque escapan del Estado 763 millones de metros cúbicos al año, la mayor parte por escurrimientos del río Moctezuma y Santa María (**Fig. 3.3**).

De acuerdo a un análisis de la SARH (1987) existen 7 acuíferos principales en el Estado, que son Querétaro, Buenavista, Chichimequillas, Huimilpan, San Juan del Río, Tequisquiapan y Amealco. La extracción de agua del acuífero regional del valle de Querétaro, se inicia aproximadamente en el año de 1960 como una alternativa más para el abastecimiento de agua mediante la construcción de pozos de 100 o más metros de profundidad y norias, con fines agrícolas y domésticos principalmente (González-Hernández, 2001). Siendo el aprovechamiento a nivel estatal para 1999 como se muestra en la **Figura 3.4**.

Precisamente esta zona de la entidad, la más poblada, el valle de Querétaro, carece de condiciones topográficas y fisiográficas para la construcción de nuevos almacenamientos que puedan captar los escurrimientos superficiales que genera la cuenca del río Querétaro, dando lugar entonces a la intensificación en la perforación de pozos a partir de la década de los setenta, con niveles de agua cada vez más profundos, debido a la sobre-explotación del acuífero (González-Hernández, 2001). En la actualidad la profundidad de pozos va de 150 a 450 metros con niveles estáticos que varían entre 1600 y 1700 m.s.n.m. y abatimientos de 3.5 metros por año y aun mayores en algunas localidades como en la zona Industrial Benito Juárez y Santa María Magdalena (GUYSA, 1996).

Por otra parte, la empresa de Exploraciones GUYSA en un estudio realizado para la CNA en 1996 presenta una tabla (**Apéndice A.2**), en donde hace un resumen de los estudios hidrológicos realizados en Querétaro, de lo cual podemos destacar lo siguiente:

En 1986 en un estudio llamado “Síntesis Geográfica Nomenclator y anexo Cartográfico del Estado de Querétaro” del INEGI, se da una visión general de las características físicas de la región que sirve como base para estudios posteriores más específicos. En 1987 el estudio denominado “Sinopsis Geohidrológica del Estado de Querétaro” editado por la SARH,

menciona que de continuar con la extracción de los acuíferos al mismo ritmo, en donde hay una concentración de bombeo y un abatimiento de 3 metros por año, específicamente en la ciudad, el aprovechamiento del agua subterránea dejará de ser económicamente rentable para los sectores de bajos recursos. Además menciona la alternativa de aprovechar los excedentes hidráulicos de las subcuencas Moctezuma y Santa María localizadas al nororiente del Estado.

En 1991 en el “Estudio Geohidrológico Integral del Valle de Querétaro” realizado por Geofísica de Exploraciones GUYSA, se concluyó que era necesario vedar el área a más perforaciones y recomienda buscar fuentes externas para el abastecimiento futuro a la Ciudad. En 1993 se realiza un “Estudio para la determinación de áreas factibles en las que pueda llevarse cabo el proceso de infiltración natural” a cargo de Geofísica de Exploraciones GUYSA, en el cual se zonifica el terreno de la Ciudad y se evalúa la capacidad de escurrimiento y las zonas de inundación.

Entre 1995 y el año 2000 se han realizado tres estudios más al respecto en el valle: un estudio de Geofísica de Exploraciones GUYSA, una tesis de maestría del Departamento de Mecánica de Suelos de la UAQ (Alvarez Manilla, 1999) y un estudio integral de la UAQ en colaboración con la Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra (Campus UNAM, Juriquilla). El presente trabajo de tesis forma parte de este último. En la próxima sección se menciona un panorama general y las aportaciones más importantes de los dos primeros, mientras que en próximo capítulo se presentan los principales resultados del último.

De lo anterior se puede afirmar que existe gran preocupación por comprender el sistema acuífero del valle de Querétaro. Sin embargo, a pesar de la importante cantidad de trabajos realizados aún no se conoce adecuadamente la estratigrafía y principales rasgos estructurales del valle más allá de las profundidades alcanzadas por los pozos. Esta situación limita significativamente los modelos propuestos tanto como las predicciones que se hacen a partir de ellos. La incertidumbre en la disponibilidad del recurso a largo plazo ha motivado a proponer costosas alternativas para asegurar el abastecimiento. Tal es el caso de la propuesta para entubar el río Extoraz, ubicado a más de 80 km del valle.

Una alternativa más apropiada antes de tomar una decisión de tal magnitud es realizar más obras de captación en los alrededores del valle que servirán tanto para aprovechamiento como para recarga del acuífero. Tal es el caso por ejemplo del bordo que se encuentra al SE de la Central Camionera, el cual está ubicado sobre la traza de la falla Querétaro Centro y que se ha observado que funciona como depósito de recarga. Adicionalmente, se requiere de llevar a cabo perforaciones exploratorias profundas en el valle que permitan calibrar los sondeos geofísicos profundos, discutidos en el capítulo siguiente para establecer el espesor del acuífero y posibles fuentes alternativas a profundidad.

### **3.2.- Esquemas hidrológicos recientes.**

#### **a) Modelo GUYSA**

Del trabajo realizado por Geofísica de Exploraciones GUYSA (Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación en los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro) en su parte referente al acuífero de Querétaro, puede destacarse lo siguiente:

Se identifican dos tipos de medios geológicos para el acuífero del valle de Querétaro por donde circula el agua subterránea, relacionados con los sistemas de flujo establecidos por Toth en 1995 que se refieren al sentido de continuidad hidrogeológica: un medio poroso y un medio fracturado (**Fig. 3.5**). Estos se encuentran intercalados a diferentes profundidades.

El valle de Querétaro está formado por una potente acumulación de sedimentos vulcanolacustres con derrames intercalados de lavas ácidas y básicas que forman un paquete acuífero de más de 600 metros de espesor. El acuífero es de tipo libre y en algunas localidades con tendencia a semiconfinado, existiendo, de acuerdo con los sistemas de flujo los sistemas local e intermedio pudiéndose presentar indistintamente tanto en el medio poroso como en el fracturado. Del medio poroso señala que su litología está formada por depósitos aluviales Terciarios, tobas arenosas y sedimentos vulcanolacustres del Cuaternario que se encuentran rellenando la fosa tectónica de Querétaro, cuya profundidad

y extensión no específica. Por el lado norte se localizan desde las inmediaciones de Jurica hasta el frente volcánico de la Sierra que divide al valle de Querétaro con el de Huimilpan en la porción sur. Por el lado oriental esta unidad se localiza entre los estrechamientos estructurales de La Cañada, La Cuesta China, Menchaca y por el poniente, limita con una línea imaginaria paralela a la división estatal con Guanajuato.

Una particularidad de estos depósitos es la de formar cuerpos lenticulares en los que es difícil determinar su extensión ya que pierden continuidad lateral. Los espesores también son variables dependiendo de la localidad de que se trate pudiéndose encontrar alternado a profundidad, pero con diferentes granulometrías, intercalados e interdigitados con varias secuencias de derrames volcánicos. El espesor varía según la localidad que se trate, pero la mayoría de los pozos de la zona centro y oriente del valle están perforados en estos depósitos por lo que se infiere que es en esta área donde se presenta la mayor profundidad del graben sin excluir otras no menos profundas como Jurica y la parte suroeste de Villa Corregidora.

Del medio fracturado señala que su litología la forman andesitas, andesitas alteradas, ignimbritas y riolitas del Terciario, basaltos, brechas volcánicas, tobas líticas y vítreas del Cuaternario. En el subsuelo, este medio geológico se encuentra intercalado e interdigitado con depósitos lacustres. El espesor dentro del relleno de la fosa de Querétaro es de 300 a 350 metros estimado por sondeos geoelectrónicos y electromagnéticos y desde la superficie de las Sierras es mayor a 350 metros.

Se encuentran en la porción norte por lo menos 9 afloramientos de las unidades de andesitas, ignimbritas, riolitas y caliza formando manchones distribuidos aisladamente (El Salitre, Mompaní, Juriquilla y San José El Alto entre otras localidades). Las áreas de afloramiento son en general las partes más altas topográficamente. En la porción sur del área se localizan únicamente dos afloramientos al noreste de la localidad de Los Olveras.

Según este estudio los mecanismos de recarga al sistema están dados por la recarga vertical de la lluvia, los retornos por riego de la zona agrícola y las entradas laterales. Asimismo se

afirma que la entrada de mayor cuantía proviene de la parte oriental procedente del valle de San Juan del Río y Pedro Escobedo a través del lineamiento estructural de La Cañada, a la que se le agrega la infiltración en el cauce del escurrimiento del río Querétaro. Por otro lado, se argumenta que la descarga de agua subterránea del valle de Querétaro se lleva a cabo por el bombeo de 216 pozos, por el escurrimiento superficial del río Querétaro y por flujo subterráneo hacia el Estado de Guanajuato así como por la evapotranspiración en las áreas verdes que aún quedan.

La profundidad del nivel estático en la zona plana del valle es de 100 a 110 metros. Localmente las máximas profundidades se encuentran en El Romeral, San Pedro Mártir, El Estadio y la zona Industrial Benito Juárez, con un promedio de 130 metros en las primeras tres y hasta 160 en la última. Mientras que las mínimas profundidades del nivel estático se localizan en la zona de la Cañada entre 50 y 70 metros y en las proximidades de El Salitre y San Pedro El Alto de 30 a 50 metros.

El modelo de simulación del acuífero realizado por esta empresa consistió en proponer 5 capas de diferente espesor intercaladas desde la superficie, comenzando con un medio granular: la 1, la 3 y la 5 y medio poroso la 2 y la 4, además de la capa 6 que corresponde al basamento del acuífero, considerada como inactiva en el modelo. Los criterios para delimitar el área del modelo fueron: las tendencias que guardan la dirección del flujo subterráneo y los elementos estructurales como la fosa de Querétaro y las fallas geológicas, la elevación topográfica y la densidad de captación de agua subterránea y geología del subsuelo.

Se utilizó el software llamado Visual Modflow v. 2.1 (GUYSA, 1996) para generar el modelo hidrológico. La información requerida para éste propósito incluye la conductividad hidráulica horizontal y vertical, los coeficientes de almacenamiento (de mayor incertidumbre), los volúmenes de recarga natural por precipitación y por retornos por riego, además de una geometría tridimensional, las condiciones de flujo iniciales en las fronteras y las cargas hidráulicas. Sin embargo la mayor parte de estos parámetros son inferidos.

La calibración del modelo se hizo mediante información existente de niveles estáticos, conductividades hidráulicas obtenidas de pruebas de bombeo y piezometría de pozos, además de considerar las entradas y salidas de flujo antes mencionadas. Partiendo del modelo calibrado y del conocimiento de la problemática de abastecimiento de agua se definieron tres diferentes políticas. La primera se estableció tomando como base el mismo monto de extracción en el periodo 90-95 llevándolo hasta el año 2000, incrementando el número de perforaciones a 3 de tal forma que cubra el déficit actual en el sector potable. La segunda predicción corresponde a una disminución del 30% en bombeo del sector agrícola y se proyecta al año 2005. La tercera predicción se definió para el año 2005 eliminando la extracción en el sector agrícola desde 1996. Los resultados de las predicciones no modifican el esquema de flujo subterráneo conocido, más bien aceleran o disminuyen la tendencia en los abatimientos. De acuerdo con GUYSA la tercera predicción fue más válida que las otras que resultaron aceptables, ya que contó con información más real.

#### **b) Modelo A. M.**

Del trabajo de tesis desarrollado por Alvarez Manilla en 1999 (Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro) cuyo objetivo fue la simulación del abatimiento de la superficie piezométrica para evaluar el hundimiento en un medio compresible donde la extracción es mayor a la recarga y demarcar las zonas críticas, se destaca la definición de cuatro zonas geohidrológicas en el valle de Querétaro (**Fig. 3.6**). Esta clasificación se llevó a cabo en base a los cortes litológicos de pozos de agua perforados, que han permitido distinguir espesores de roca con un mismo comportamiento hidráulico, así como a afloramientos superficiales. Estas son.

Zona Geohidrológica I.- De permeabilidad buena a alta y constituye una zona de recarga. Comprende las unidades geológicas de: basalto Cimatario (TQbc) y tobas Cuesta China (Tstcc). Aparece al norte, en Cerrito Colorado, El Tambor, San Pablo, vertientes N y NW del volcán El Cimatario, Los Olvera y La Negreta.

Zona Geohidrológica II.- Muy poco permeable, aparece en los pilares de Menchaca, Bolaños, Pathé, Las Adjuntas, La Colmena y la parte alta de Huertas La Joya. Comprende las unidades geológicas de basaltos Menchaca (Tmbm); tobas Mompaní (Titm); basalto y andesita San Pedrito (Tibsp) y los cuerpos intrusivos de Juriquilla (Tij). El basalto Menchaca presenta fracturas por intemperismo pero conforme se adentra a la masa de la roca se torna masiva y sana, de ahí su impermeabilidad.

Zona Geohidrológica III.- De permeabilidad media a baja. Fue demarcada en las microfosas Cuesta China, Pathé, Bolaños, Menchaca, El Salitre, Tángano, Jurica, Tlacote, Tejeda y cauce del río Querétaro. Comprende materiales fluviales (Qfl) y miembros de las tobas Cuesta China (Tstch) y Mompaní (Titm), varios pisos están formados por basalto de la Unidad Menchaca (Tmbm) o San Pedrito (Tibsp).

Zona Geohidrológica IV.- Poco permeable o impermeable, abarca toda la parte plana y pendientes suaves del valle, esta integrada por arcillas montmorilonitas y lacustres. Es donde primeramente aparecen las grietas de tensión para posteriormente generar el crecimiento de fallas.

Alvarez Manilla señala además que el agua de precipitación pluvial solamente moja unos cuantos centímetros de las arcillas que conforman la zona geohidrológica IV, la mayor parte escurre, se evapora rápidamente o ambos, sin poderse infiltrar prácticamente nada. Y menciona que como la extracción es mayor que la recarga, se genera el proceso de hundimiento, agrietamiento y crecimiento de fallas en esta misma zona.

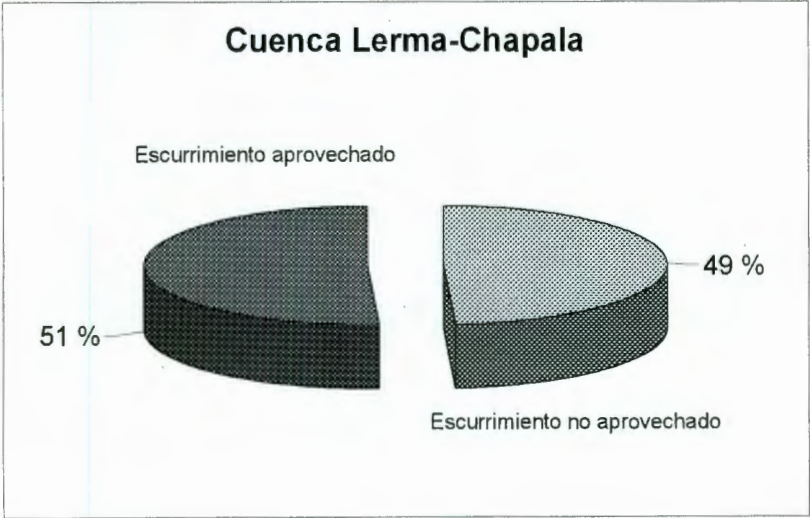


Figura 3.1.- Escorrentamientos generados en el Estado de Querétaro (González Hernández, 2001).



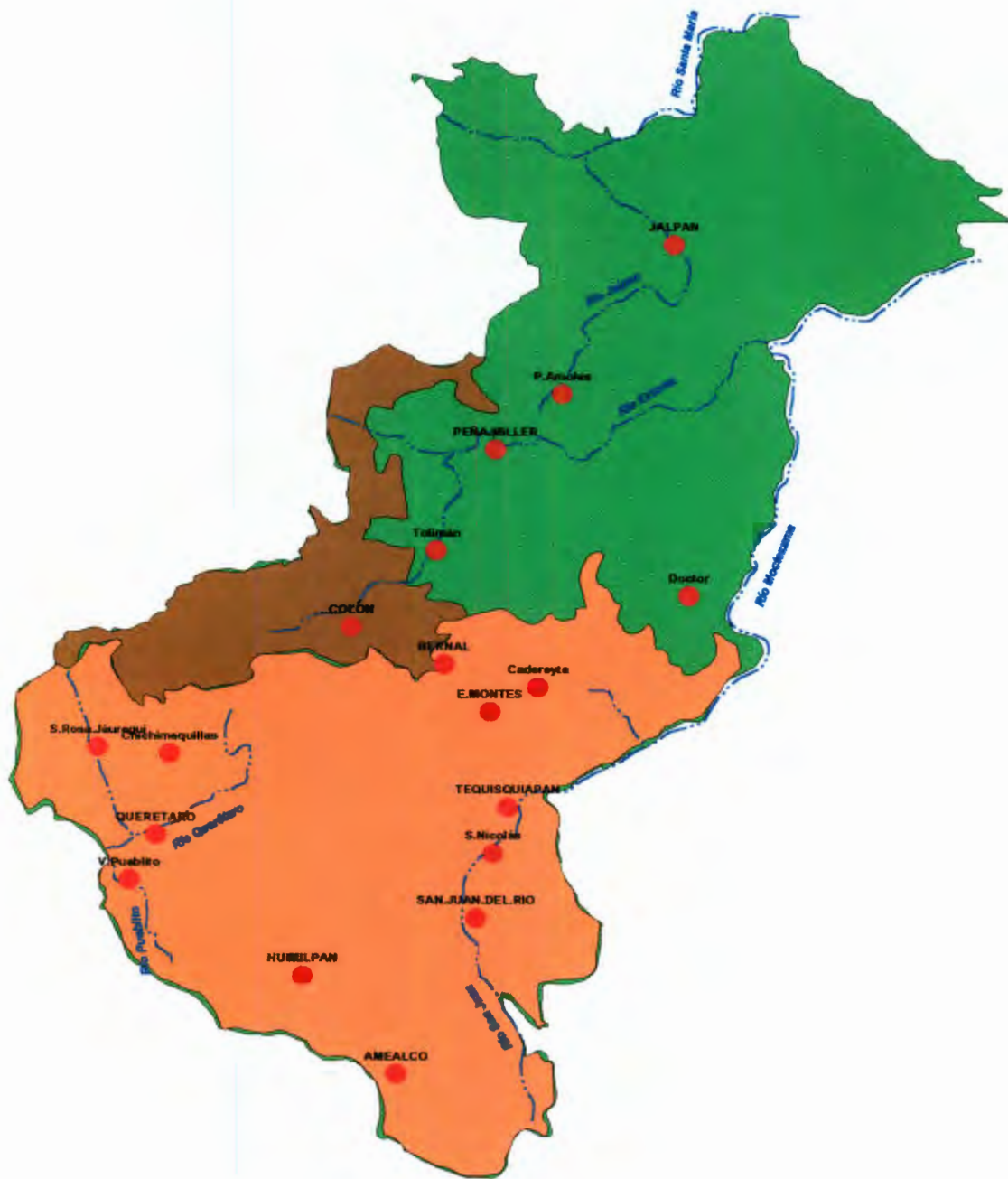


Figura 3.2.- Provincias fisiográficas del Estado de Querétaro y red de drenaje superficial principal (INEGI, 1986).

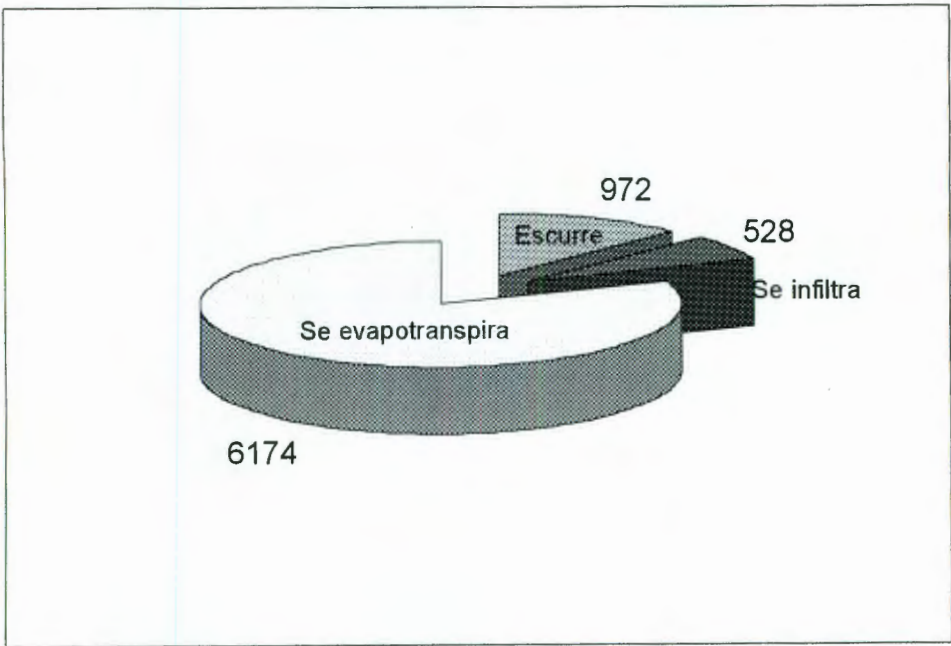


Figura 3.3.- Volumen de lluvia anual en el Estado de Querétaro, en millones de metros cúbicos (González Hernández, 2001).

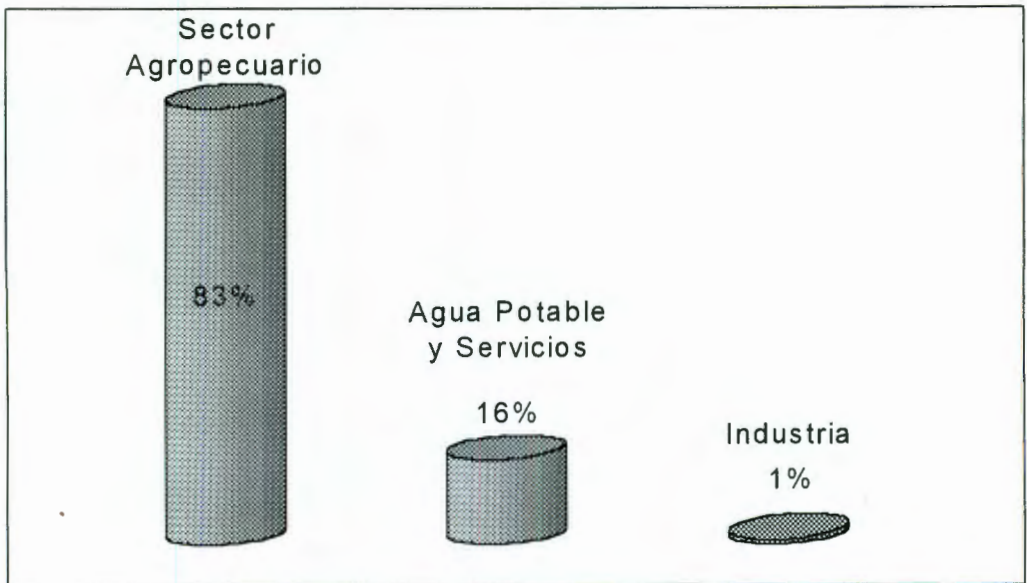
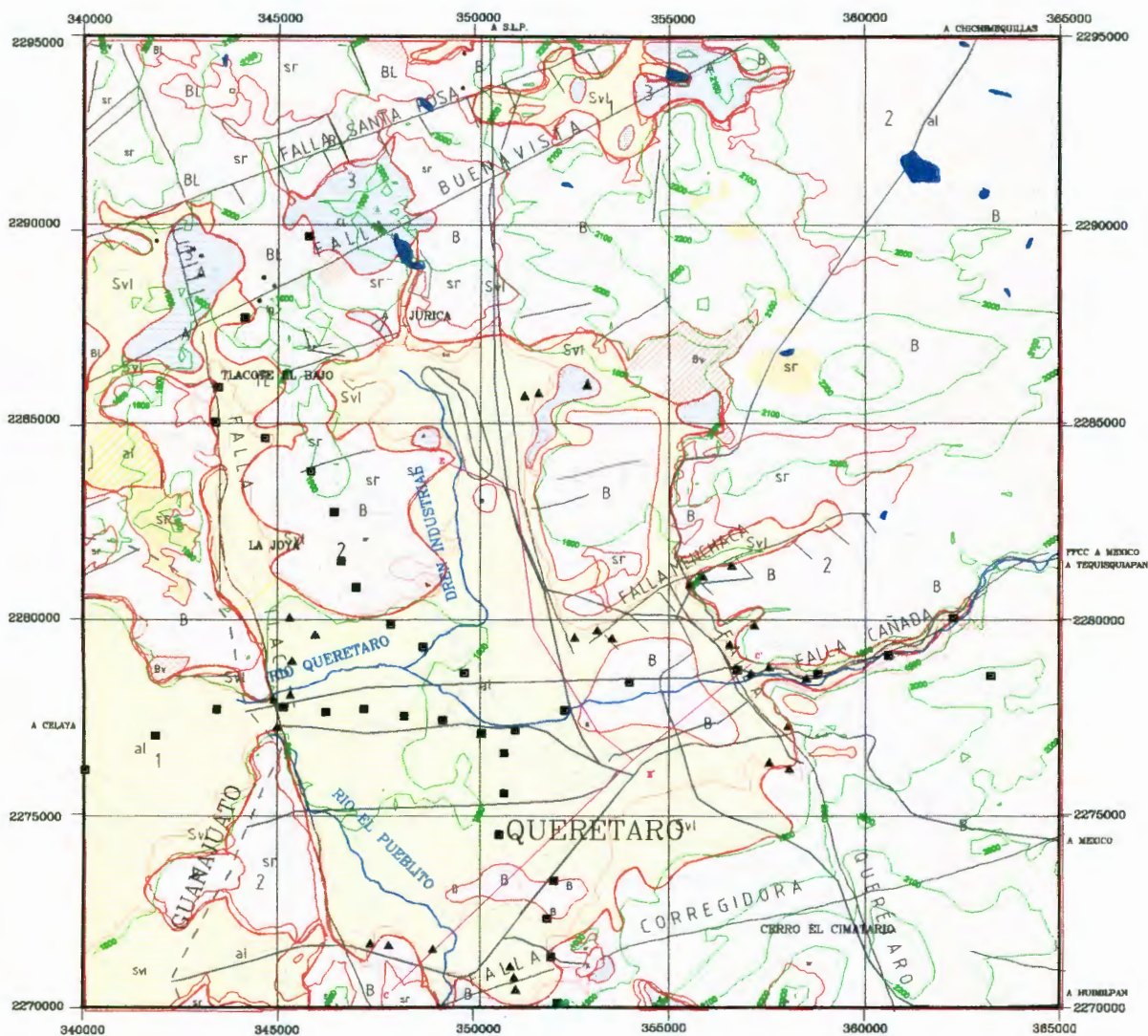


Figura 3.4.- Volumen anual de aprovechamiento, en porcentaje  
(González Hernández, 2001).



**1**

**MEDIO POROSO**  
 LITOLOGÍA: DEPÓSITOS ALUVIALES, TORAS ARENOSAS Y SEDIMENTOS VULCANOLACUSTRES.  
 DISTRIBUCIÓN Y ESPESOR: SE ENCUENTRA RELENANDO LA FOSA TECTÓNICA DE QUERÉTARO, EN LA ZONA CENTRO SE HAN ENCONTRADO ESPESORES DE 350 METROS.  
 FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO: ACUÍFERO DE LIBRE A SEMICONFINADO SE PRESENTA COMO ZONA DE RECARGA.

**2**

**MEDIO FRACTURADO.**  
 LITOLOGÍA: BASALTO Y BRECHAS VOLCÁNICAS.  
 DISTRIBUCIÓN Y ESPESOR: SE ENCUENTRA INTERCALADA E INTERDIGITADA CON EL MEDIO POROSO, LAS ÁREAS DE AFLORAMIENTO SON LAS PARTES MÁS ALTAS TOPOGRÁFICAMENTE. SU ESPESOR PROMEDIO ESTIMADO DENTRO DE LA FOSA DE QUERÉTARO ES DE 300 A 350 METROS.  
 FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO: ACUÍFERO LIBRE, ZONA DE RECARGA DESDE LA SUPERFICIE HACIA EL ACUÍFERO PRINCIPAL.

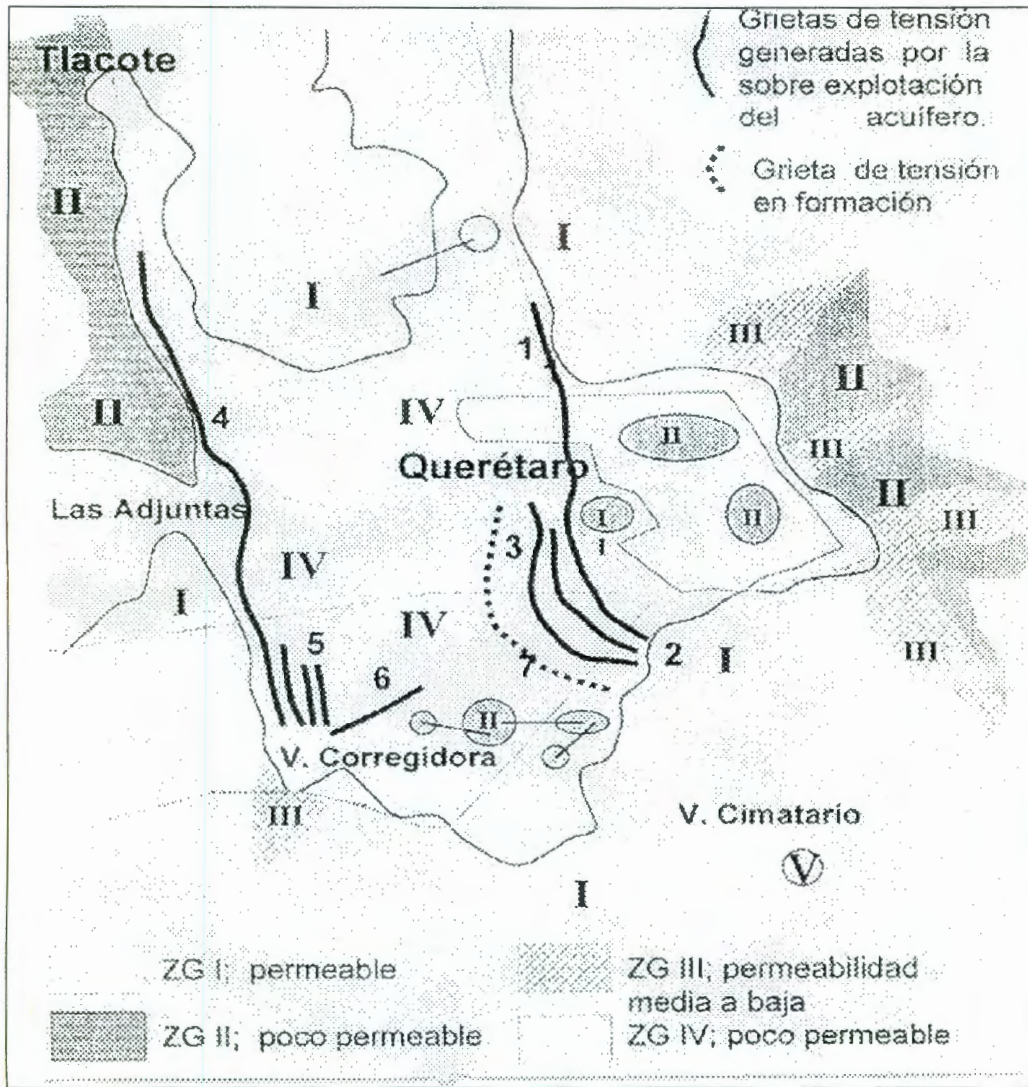
**3**

**UNIDAD IMPERMEABLE.**  
 LITOLOGÍA: ANDESITA, ANDESITA ALTERADA, IGNEÍMBRITA, RIOLITA, CALIZA, TOBA LÍTICA Y TOBA VITREA.  
 FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO: IMPERMEABLE TANTO EN SUPERFICIE COMO EN LOS POCOS POZOS QUE LA HAN ATRAVESADO.

**SIGNOS CONVENCIONALES**

POBLACIÓN	
VÍA DE FERROCARRIL	
CARRETERA PAVIMENTADA	
TERRACENA	
BORDO	
LÍMITE ESTATAL	
CURVA DE NIVEL TOPOGRÁFICA	
RÍOS Y ARROYOS	
SECCIÓN HIDROGEOLOGICA	

Figura 3.5.- Plano hidrogeológico superficial del valle de Querétaro (GUYSA, 1996).



Fallas activas: 1.- 5 de Febrero, 2.- Jardines, 3.- San Diego-La Carambada, 4.- Tlacote-Las Adjuntas-La Negraeta, 5.- Sistema de grietas San Pedro Mártir-La Carambada, 6.- Piramide y 7.- Grieta en desarrollo.

Figura 3.6.-Plano de zonificación geohidrológica y localización de fallas activas de la zona metropolitana y valle de Querétaro (Alvarez Manilla, 1999).

## CAPITULO 4

### GEOFISICA

#### 4.1.- Introducción.

La geofísica es una de las varias ciencias de la Tierra que tiene incidencia en una gran variedad de problemas relacionados con el desarrollo urbano. En general el objetivo de los levantamientos geofísicos es detectar y localizar estructuras o cuerpos geológicos del subsuelo y, de ser posible, medir sus dimensiones y características físicas.

A diferencia de la geología, la geofísica se vale de las propiedades físicas de las diversas unidades geológicas y sus rasgos estructurales para estudiar la constitución del subsuelo. Para ello se utilizan instrumentos que dependen del tipo de propiedad que miden. Estos aparatos son muy sensibles a pequeños cambios en las características del subsuelo y se operan desde la superficie, aunque existen variantes diseñadas para utilizarse desde un avión o helicóptero o bien dentro de pozos perforados.

La prospección geofísica permite elaborar perfiles o planos de debilidad de suelo y zonificación de áreas de fracturamiento del subsuelo a diferentes profundidades. La información que se genera puede resultar de mucha utilidad a los ingenieros civiles y arquitectos a tomar decisiones adecuadas para reducir riesgos en sus proyectos de construcción. Normalmente la combinación de dos o más técnicas geofísicas disponibles proporciona mayor confiabilidad a la interpretación de los datos de campo.

Una de las limitaciones de los estudios de la geología superficial en el mapeo de los sistemas de fallas, es la incertidumbre en la interpretación a profundidad de las observaciones directas. Para reducir la ambigüedad de los levantamientos geológicos es necesario contar con el apoyo de los métodos geofísicos, los cuales se basan en mediciones de los contrastes en las propiedades físicas del subsuelo que se miden indirectamente desde la superficie con instrumentos electrónicos de alta precisión. Uno de los aspectos

fundamentales para que un estudio geofísico resulte verdaderamente útil para un propósito específico, es que además de que los datos colectados deben de ser de buena calidad (óptimo coeficiente señal/ruido), es necesario seleccionar cuidadosamente los métodos más adecuados y optimizar la ubicación de los puntos de medición.

La geofísica que se ha llevado a cabo en el valle anteriormente se concreta básicamente a la realización de sondeos eléctricos verticales (SEV) de corriente directa, cuya penetración, debido a la capa de arcilla conductora que se encuentra en la superficie, es escasa y frecuentemente se sobre interpreta para proporcionar mayores profundidades que las que realmente se pueden alcanzar bajo estas condiciones. Existen también datos de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (GUYSA, 1996) sin embargo, a pesar de que la penetración es un poco mayor, la información que proporcionan es muy limitada en el centro del valle.

Dadas las condiciones específicas de la región en la que se encuentra ubicado el valle de Querétaro, en donde se tiene un basamento altamente irregular flanqueado por fallamientos geológicos que forman una fosa rellena por una secuencia de material vulcanosedimentario y cubierta por un suelo arcilloso de espesor irregular y además muy conductivo, se requiere de la utilización de la siguiente metodología geofísica cuya descripción y propósitos se describen a continuación:

#### **4.2.- Descripción de los métodos geofísicos utilizados.**

##### **a) Gravimetría.**

La ley de Newton de la gravitación universal se basa en lo siguiente: La atracción gravitacional mutua entre dos partículas que tienen masas  $m_1$  y  $m_2$  y que están separadas por una distancia  $r$  tiene el valor de:

$$F(r) = G(m_1 m_2) / r^2$$

Y actúa en la dirección de  $r$ .

La fuerza por unidad de masa en una partícula de un punto  $P$  a una distancia  $r$  desde  $m_1$  se define como el campo gravitacional de la partícula  $m_1$ . Esto se escribe así:

$$F(r) = -G(m_1)/r^3 * r$$

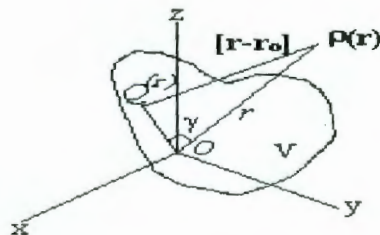
Como tal el campo es conservativo y por lo tanto derivable de una función potencial escalar  $U(r)$  como sigue:

$$F(r) = \nabla U(r)$$

Donde  $U(r) = -Gm_1/r$  que es el potencial gravitacional de la masa  $m_1$ . Ya que los potenciales en espacio libre son aditivos, el potencial gravitacional dentro de distribuciones continuas de materia pueden ser calculadas de puntos externos por medio de integración. Esto si la masa está distribuida continuamente con densidad  $\rho(r_0)$  y volumen  $V$ , el potencial gravimétrico que esta en el exterior del punto  $P$  es (ver esquema siguiente).

$$\begin{aligned} U_P(r) &= - \int_V G dm / |r - r_0| \\ &= - G \int_V \rho(r_0) d^3 r_0 / |r - r_0| \end{aligned}$$

Donde  $|r - r_0| = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma}$



Si el volumen integrado es cargado fuera del entero de la tierra, obtenemos un potencial gravitacional en el espacio libre, para el cual el campo gravitacional puede ser encontrado por diferenciación. Si  $P$  esta en la superficie de la tierra, el campo gravitacional es denotado por el simbolo  $g$ . En la actualidad,  $g$  es usado con signo positivo, esto es en realidad la intensidad de campo negativo, i.e,  $g = |-F(r)| = |\nabla U_P|$ . Esto es llamado invariablemente



como campo gravitacional, aceleración gravitacional o caída libre de la aceleración, aunque de hecho esta es una fuerza por unidad de masa que es usualmente medida, no una aceleración. La unidad de  $g$  es el gal ( $= 1 \text{ cm/s}^2$ ), y la dirección es por definición siempre vertical. El peso de una masa  $m$  en reposo en el campo gravitacional es un vector fuerza con magnitud  $mg$  y con dirección verticalmente hacia abajo.

El valor de  $g$  depende de (a) la distribución del volumen de la masa de la tierra expresado por la función densidad  $\rho(r_0)$ , y (b) la actual forma de la tierra.

Si asumimos que  $\rho$  es independiente de una de las coordenadas y si el cuerpo es infinitamente elongado en esta dirección hacia fuera cambiando en cualquier parte este cruce de sección, entonces:

$$U(x,z) = -G \int_S \rho(x_0, z_0) dx_0 dz_0 \int_{-\infty}^{\infty} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{-1/2} dy_0$$

$$= 2G \int_S \rho(x_0, z_0) \log_e R dx_0 dz_0 + a \text{ constante}$$

Donde  $R = (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2$

La unidad de la intensidad de campo gravitacional es (en unidades cgs) dinas/gramo o su equivalente dimensional  $\text{cm/s}^2$ . En la práctica a esta unidad se le da el nombre de gal. En el sistema SI (mks) es el Newton/kilogramo (N/kg) o  $\text{m/s}^2 = 10^2$  gales. La unidad práctica en el SI para anomalías gravimétricas es  $1 \mu\text{m/s}^2 = 0.1$  mgales. El campo gravimétrico de la Tierra es aproximadamente: 978.03 gales en el Ecuador y 983.22 gales en los polos.

Las irregularidades en la distribución de densidad interna en la Tierra y en su superficie topográfica dirigen las variaciones en la magnitud de  $g$  y en la dirección de la vertical de un lugar a otro. El objetivo del método gravimétrico es medir esas variaciones y utilizar esos datos para deducir algo acerca de la configuración de las rocas en el subsuelo que tienen una densidad mayor o menor que la densidad normal. Esto generalmente requiere mediciones con una sensibilidad de por lo menos  $10^{-3}$  gales (1 mgal). El instrumento que

mide éstas variaciones se llama gravímetro y existen varios tipos en el mercado, sin embargo no todos tienen la suficiente precisión para aplicarse en éste tipo de estudios. El gravímetro utilizado en el presente trabajo tiene una precisión de 0.01 mGal, es decir  $0.01 \times 10^{-9} \text{ cm/s}^2$ . A este nivel las variaciones debidas a estructuras geológicas locales se pueden evidenciar sin dificultad, sin embargo, las variaciones debidas a otros factores en el transcurso de las mediciones, tales como la variación diurna por deriva del instrumento, posición lunar o relieve topográfico, pueden ser del mismo orden que las diferencias que se buscan. Por ésta razón primero se deben remover los efectos en g debidos a las causas mencionadas a fin de poder observar el efecto gravimétrico de las anomalías de densidad en el subsuelo que nos interesa poder observar. La porción de la gravedad observada que queda después de contabilizar el efecto grueso de la Tierra y la topografía local se llama Anomalía de Aire Libre, mientras que si se realiza la corrección adicional debida al exceso /deficiencia de masa alrededor de cada una de las estaciones se tiene lo que comúnmente se conoce como Anomalía de Bouguer.

Las mediciones de la intensidad del campo gravitacional pueden ser hechas con mucho mayor sensibilidad que las mediciones de las deflexiones verticales, así las mediciones de intensidad son los datos usuales de las investigaciones gravimétricas. En general, una porción de g viene siendo una parte predecible la cual se puede calcular por medio de una formula matemática más una parte anómala ( $\Delta g$ ), la cual es debida a irregularidades en la variación interna de la densidad o a las irregularidades topográficas en la superficie. La componente anómala  $\Delta g$  es un campo gravimétrico débil que puede tener una variación ancha en dirección e intensidad. Sin embargo,  $|\delta g| / g$  siempre es muy pequeña. Así g (la variación observada en la intensidad de la gravedad) es actualmente una medición de la componente vertical del campo gravimétrico anómalo; por ejemplo, es la componente vertical de la anomalía gravimétrica la cual altera la intensidad de g, mientras que la componente horizontal altera la dirección de la vertical.

Las mediciones de campo gravimétrico se emplean para dos propósitos fundamentales. El primero es definir la configuración del basamento rocoso a partir de una red de mediciones

a lo largo y ancho del valle y el segundo auxiliar en la localización de fallas y fracturas con fines estructurales para evaluar su papel como barreras hidrológicas o zonas de recarga.

#### **b) Sondeos someros (AMT) y profundos (MT).**

Los sondeos someros o AMT (Audio-Magnetotelúricos) y profundos o MT (Magnetotelúricos) se basan en la medición de los campos eléctrico y magnético que existen de manera natural en el subsuelo a diferentes profundidades, es por ésta razón que se les clasifica como métodos electromagnéticos de “fuente natural”. La medición práctica del campo eléctrico se hace a partir de dos dipolos eléctricos orientados NS y EO ( $E_{NS}$  y  $E_{EW}$ ) de 50 o más metros de longitud, mientras que la medición del campo magnético se hace con dos sensores magnéticos orientados paralelamente a los dipolos eléctricos, para los cuales se utilizan tazas porosas de muy baja resistencia de contacto, además un tercer sensor magnético se coloca de manera vertical enterrado en el suelo. En la **figura 4.1** se muestra la distribución esquemática de las componentes que constituyen una estación magnetotelúrica o audiomagnetotelúrica, ya que la diferencia esta en el tamaño de los sensores magnéticos y en el rango de frecuencias que miden.

La relación entre las componentes eléctrica NS y magnética EW proporciona una medida de la conductividad eléctrica del subsuelo a través de la impedancia del medio. Las componentes eléctrica EW y magnética NS proporcionan otra medida de la conductividad del medio en la dirección perpendicular a la anterior. Cuando ambas medidas son iguales entonces el medio es homogéneo. En caso contrario es necesario interpretar los datos para extraer la información que guardan. A partir de la conductividad eléctrica del medio es posible determinar la estructura del subsuelo y, con la calibración apropiada, definir la estructura litológica en el área de interés.

Adicionalmente a la información de conductividad que se obtiene de las componentes ortogonales de los campos eléctrico y magnético naturales, se obtiene también la diferencia de fase entre estos. Los datos de fase ofrecen otro parámetro para estimar la estructura eléctrica del subsuelo, que debe ser compatible (a menos que haya habido errores de

medición) con la estructura que se obtiene a partir de la conductividad. En algunas ocasiones los datos de conductividad (o resistividad) pueden estar afectados por “ruido geológico” (conocido como static shift). En estas circunstancias los datos de fase, los cuales no se afectan por esta causa, pueden proporcionar la estructura correcta del subsuelo de manera independiente.

El principio básico del método magnetoteléurico es utilizar los campos eléctrico y magnético terrestres naturales, para inferir la resistividad eléctrica del subsuelo (Cagniard, 1953) asumiendo que las ondas electromagnéticas inciden normalmente sobre un subsuelo estratificado. La relación de impedancia que existe entre los campos eléctrico y magnético depende de la conductividad eléctrica del interior de la Tierra y se tiene que a menor frecuencia mayor es la profundidad que alcanzan. La medición de las ondas eléctricas y magnéticas a diferentes frecuencias permite encontrar la distribución de conductividades respecto a la profundidad desde un punto en la superficie terrestre.

La impedancia eléctrica se define como  $Z = E/H$ , en donde E y H son componentes horizontales del campo eléctrico y magnético respectivamente. Entonces, debido a que en un sondeo MT (o AMT) se miden dos componentes de E y dos de H se tienen en principio cuatro impedancias que en forma matricial se representan como:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

en donde las impedancias principales son  $Z_{xy} = E_x/H_y$  y  $Z_{yx} = E_y/H_x$ . Cuando el medio es unidimensional, como se comportaría una cuenca sedimentaria profunda (y ancha) sin complicaciones estructurales, entonces estos dos elementos de la matriz de impedancia son iguales.

Si el medio está dominado por estructuras regionales con direcciones preferenciales y alargadas como es el caso de los sistemas de fallas que cruzan el valle de Querétaro, cada componente eléctrica depende de ambas componentes horizontales magnéticas, convirtiéndose en una relación matricial de la forma:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

Esta ecuación representa un sistema de ecuaciones lineales en donde las componentes  $Z_{ij}$  son las variables (complejas) para las cuales se tiene que resolver. Las resistividades aparentes del subsuelo  $\rho_{ij}$  y la diferencia de fase ( $\phi_{ij}$ ) entre los campos se obtienen a partir de las siguientes expresiones (Vozoff, 1989):

$$\rho_{ij}(\omega) = (1 / \omega\mu) |Z_{ij}(\omega)|^2$$

$$\phi_{ij}(\omega) = \text{atan} [\text{Im}Z_{ij}(\omega) / \text{Re}Z_{ij}(\omega)]$$

en donde  $\omega = 2\pi f$ ,  $\mu$  es la permeabilidad magnética del espacio e  $i, j = x$  o  $y$ .

Una práctica común para el despliegue de los datos, previo a un análisis más cuidadoso, es calcular las resistividades y fases promedio ( $\rho_{det}$ ,  $\phi_{det}$ ) para visualizar de manera rápida y directa las posibles estructuras existentes en el subsuelo, a partir de la expresión:

$$Z_{det} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}$$

que se conoce como el determinante de la impedancia.

Los sondeos Audio-Magnetotelélicos o MT se utilizan para el estudio de las capas que rellenan el valle, para determinar su extensión lateral y la profundidad del basamento no compresible.

### 4.3.- Gravimetría.

#### a) Procedimiento de campo

Antes de llevar a cabo las mediciones de gravimetría se realizaron mediciones de nivelación topográfica en cada uno de los puntos en donde se ubicaron estaciones gravimétricas (**Fig. 4.2**). El levantamiento topográfico fue realizado utilizando una estación total SOKKIA (modelo SET5F), por lo cual se estima un error acumulado menor a un centímetro de estación a estación tanto para la altura como para la posición. En general una brigada de gravimetría estuvo compuesta por 4 personas, dos de ellas realizando la nivelación de cada una de las estaciones, otra tomando las lecturas en el gravímetro y otra más de apoyo con un vehículo para agilizar el levantamiento (ver **Fig. 4.3**). Normalmente, la brigada de nivelación comenzó con la anticipación suficiente para que las lecturas de gravimetría no se vieran afectadas por un eventual retraso de las nivelaciones. La separación entre estaciones gravimétricas varió entre los 25 y 250 metros, en el valle de Querétaro dependiendo la zona. Las separaciones menores fueron utilizadas cerca de la parte urbana, mientras que las separaciones mayores en la periferia del valle. Como se mencionó anteriormente, las mediciones de gravedad se realizaron utilizando un gravímetro Scintrex CG-3/3M, cuya resolución nominal es de 0.01 mGales por día. Las lecturas de gravedad son automáticamente corregidas por efecto de las variaciones temporales (marea, deriva instrumental, deriva por cambio en la temperatura). Posterior a la adquisición, los datos fueron transferidos en el laboratorio a una PC y realizadas las correcciones necesarias.

Posteriormente para el análisis de los datos obtenidos en campo se elaboró una carta de anomalía de aire libre, la cual se muestra en la **Figura 4.4**. Esta carta muestra lo que se obtiene de los datos gravimétricos sin que se compense por los efectos de terreno y de Bouguer, éste último relacionado con excesos de masa de carácter regional. Debido a que no tiene corrección del terreno, este tipo de anomalía refleja los rasgos topográficos del subsuelo, es decir, los valores anómalos observados se pueden interpretar de manera aproximada a la continuación de los rasgos topográficos superficiales en el subsuelo. Por

otro lado, se calculó también la carta de la anomalía de Bouguer la cual incluye el efecto de la masa que se encuentra entre cada una de las estaciones gravimétricas y el nivel del mar. Al igual que para la carta de anomalía de aire libre, se preparó la carta de anomalía de Bouguer interpolando los valores medidos en campo a lo largo de seis perfiles que se conectan unos con otros, la cual se muestra en la **Figura 4.5**. A diferencia de la anomalía de aire libre que refleja mayormente los rasgos superficiales del subsuelo, la anomalía de Bouguer refleja posibles estructuras que se localizan a profundidad. Así pues, las dos cartas son complementarias y por lo tanto muestran diferentes características que serán discutidas con detalle más adelante.

Adicionalmente a las cartas gravimétricas mencionadas se llevó a cabo el modelado de cinco perfiles gravimétricos a lo largo y ancho de la zona de estudio (ver **Fig. 4.2**). La interpretación de cada uno de los perfiles se llevó a cabo a partir de un modelado bidimensional utilizando el método de Talwani (Talwani y colegas, 1959), asumiendo densidades de 2.0 y 2.7 gr/cm<sup>3</sup> para los sedimentos lacustres y el basamento volcánico respectivamente. Los resultados de éste ejercicio se muestran en las **Figuras 4.6 y 4.7**, en donde se puede observar el relieve del basamento estimado a lo largo de tres perfiles E-W y dos N-S respectivamente. La descripción de los resultados así como una explicación de los mismos se presenta a continuación.

## **b) Interpretación de resultados**

La información que nos proporciona la carta gravimétrica de anomalía de aire libre es una especie de imagen de los rasgos topográficos subterráneos debajo de una cubierta de material de densidad relativa menor al basamento que lo contiene. La **Figura 4.8** muestra la anomalía de aire libre, en donde se ha señalado la zona que está relacionada con una capa de baja densidad relativa. Esta zona es de particular interés desde el punto de vista del sistema acuífero del valle debido a que:

- 1.- Esta zona de baja densidad se asocia a rocas sedimentarias de alta porosidad o de origen volcánico altamente fracturadas, las cuales se asocian directamente a depósitos acuíferos.

2.- Indica de manera directa las principales zonas de recarga del acuífero del valle: al este por el cañón de La Cañada, al norte por la falla 5 de Febrero hacia Jurica, y al sur por La Negreta.

3.- No existe una conexión aparente entre el acuífero de los Apaseos y el del valle de Querétaro.

4.- Proporciona límites laterales a lo que posiblemente constituye la zona principal del sistema acuífero del valle.

Mientras que la carta gravimétrica de anomalía de Bouguer refleja rasgos estructurales y distribución de unidades litológicas a mayor profundidad. La **Figura 4.9** muestra la interpretación cualitativa de algunos de los principales rasgos estructurales que se han interpretado a partir de ésta carta, además, se han agregado también las estructuras interpretadas a partir de la geología superficial (líneas continuas). En la figura se señalan las siguientes estructuras de importancia:

1.- Bloque Menchaca, limitado al norte por la falla de El Salitre, la cual parece separar un bloque litológico con diferentes características a lo que se encuentra al oeste de la Falla 5 de Febrero, que además se cree, juega un importante papel desde el punto de vista de la recarga del sistema acuífero en su porción norte.

2.- Bloque La Cañada, flanqueado al norte por la falla Menchaca y al sur por la falla Cuesta China. Es en la parte caída de éste bloque que se ubica la totalidad del centro histórico de la ciudad de Querétaro. Debido a la escasez de datos en la zona de la mancha urbana no es posible determinar con mayor detalle otros rasgos estructurales, excepto por la anomalía asociada con el curso del Río Querétaro.

3.- Bloque del Río Querétaro, llamado así porque éste se encuentra dentro del área definida por fallas, deducidas a partir de la anomalía de Bouguer y apoyada por los resultados de los sondeos MT profundos. Ambos métodos (el gravimétrico y el magnetoteléurico) sugieren



que se trata de un bloque levantado. La comparación preliminar con datos disponibles de transmisividad hidráulica sugieren que se trata de una zona de alta permeabilidad relativa.

4.- Minifosa del Pueblito, llamada así debido al mínimo gravimétrico observado lo cual sugiere una zona de baja densidad relativa que se podría asociar a un bloque caído. Los sondeos MT disponibles en el área apoyan la existencia de una fosa local.

#### **4.4.- Sondeos someros (AMT) y profundos (MT).**

##### **a) Procedimiento de campo**

Para la realización de los sondeos tanto MT como AMT se utilizaron dos instrumentos multi-propósitos Phoenix V-5 y vehículos pertenecientes a la UNICIT del Campus UNAM-Juriquilla. Cada brigada se compone de por lo menos tres integrantes y la duración de un sondeo MT es de por lo menos 24 horas, mientras que los sondeos AMT se llevan en promedio de entre 4 y 5 horas cada uno (ver **Fig. 4.10**). Parte del procesamiento se realiza in situ, sin embargo la mayor parte del tiempo requerido para el procesamiento e interpretación de los datos se invierte en trabajo realizado en la oficina.

Se realizaron sondeos AMT y MT en los intervalos de frecuencia de 300 a 0.001 Hz y de 10,000 a 1 Hz respectivamente, a lo largo y ancho del valle. Para su interpretación se seleccionaron y agruparon los sondeos que se alinean a lo largo de un perfil Este-Oeste en el norte, otro en el sur y un perfil Norte-Sur localizado aproximadamente al centro del valle (**Fig. 4.11**). Las estaciones AMT se localizaron cercanas a las zonas urbanas en el sur del valle, en la región de El Salitre, al este de Jurica, en la zona de Prolongación Zaragoza y Cuesta China principalmente. Estos sondeos fueron utilizados mayormente como herramienta de verificación cuando existían dudas acerca de posibles estructuras sugeridas por la gravimetría.

Con los datos obtenidos se realizaron tres secciones de resistividad, siendo las **Figuras 4.12** y **4.13** los modelos de resistividad a lo largo de perfiles Oeste-Este de la parte norte y sur

respectivamente, mientras que la **Figura 4.14** muestra el modelo de resistividad a lo largo de un perfil Norte-Sur. Estas imágenes fueron obtenidas a partir de la inversión del determinante del tensor de impedancia utilizando un esquema de inversión de mínimos cuadrados de parámetros no lineales (Marquardt, 1963) y muestran la distribución de resistividad con respecto a la profundidad en el subsuelo. Las zonas azules corresponden a las zonas resistivas mientras que los tonos naranja y rojos corresponden a regiones en donde existen buenos conductores.

Las secciones orientadas Este-Oeste fueron planeadas para observar cambios litológicos y estructurales que pudieran ser inducidos por el sistema de fallas que limitan al valle en sus extremos oriente y poniente y cuya orientación es aproximadamente Norte-Sur. En cambio la sección Norte-Sur se planeó para observar variaciones de profundidad del valle en esta dirección. Sin embargo, de los resultados de gravimetría y del análisis geológico-estructural se observa que existen importantes estructuras Este-Oeste que sugieren la utilidad de explorar éstas con más detalle puesto que aparentan tener una importancia fundamental en el funcionamiento del sistema acuífero del valle.

Las imágenes de resistividad que se presentan además de mostrar la estratigrafía del subsuelo sugieren la presencia de fallas geológicas a lo largo y ancho del valle. Los diferentes colores de éstas imágenes muestran la respuesta eléctrica del subsuelo, que se pueden relacionar directamente con el tipo de rocas y las condiciones en las que se encuentran (p.e. sanas o fracturadas) éstas.

A pesar de la ambigüedad que algunas veces existe en la interpretación de éste tipo de secciones, cuando se combinan con otros resultados, por ejemplo con la gravimetría y/o registros geofísicos de pozos, es posible constreñir los modelos adecuadamente y, en consecuencia, proporcionar información fundamentada que permita modelos hidrológicos más confiables. Para éste propósito se seleccionó un pozo con registro eléctrico cercano a cada uno de las secciones de resistividad. El registro eléctrico del pozo, para el cual existía también la descripción litológica se compara directamente con el modelo que se obtiene de la inversión de la curva de campo del sondeo que será utilizado como calibración. Un

requisito deseable es que el pozo cuyo registro eléctrico sea utilizado esté lo suficientemente cercano al sondeo a calibrar. Esta condición ha sido una limitante debido a que para la mayor parte de los sondeos realizados no existe un pozo cercano con registro eléctrico.

La **Figura 4.15** muestra un ejemplo de lo que es la calibración del sondeo QRO-210 a partir del registro eléctrico del pozo CEA-563. En ésta figura se puede observar la variación en resistividad de la curva de campo y el modelo eléctrico, que ha sido calibrado en la parte superficial a partir de la respuesta eléctrica a la litología observada en el corte del pozo. A partir de los valores observados, correspondientes a diferencias en tipo de rocas o a cambios en la consistencia de las rocas, es posible extrapolar a las capas más profundas alcanzadas por el sondeo MT. La **Figura 4.18** muestra la sección geológico-estructural correspondiente al perfil eléctrico N-S que pasa por el centro del valle de Querétaro. En ésta sección se muestra en color azul al acuífero superficial del valle, el cual alcanza profundidades de hasta 500 metros. En general, éste acuífero se observa como una unidad relativamente continua a lo largo del valle y parece no estar afectado de manera importante por las fallas geológicas que cortan las capas más profundas del subsuelo. Posteriormente en éste capítulo se discutirá con más detalle la interpretación de las secciones geoeléctricas.

## **b) Interpretación de resultados**

Los modelos conceptuales obtenidos a partir de la inversión de las secciones de resistividad correspondientes a los perfiles EW-1, EW-2 y NS, se muestran en las **figuras 4.16, 4.17 y 4.18** respectivamente. La ubicación de los perfiles así como de los sondeos considerados se muestra en la **figura 4.11**. En éstos perfiles, la escala vertical es aproximadamente igual a la horizontal. A partir de su análisis y calibración se pueden hacer las siguientes observaciones.

1.- La sección EW2 (**Fig. 4.16**), orientada Oeste-Este, se encuentra localizada en el extremo norte del valle e incluye los sondeos 201, 202, 204, 205, 206 y 207. En esta zona, a pesar de la aparente complejidad superficial se puede apreciar una estructura del subsuelo

relativamente simple, excepto en las inmediaciones del sondeo 205 en donde se observa una unidad relativamente conductiva que coincide con la ubicación del pequeño valle de Tlacote. Esto parece sugerir que en estas zonas el paquete sedimentario, o bien el volumen de material fracturado es mayor. Adicionalmente, se observa un desnivel del basamento geológico entre las porciones al Oeste y Este de la estación 205, presentando mayor profundidad al Oeste del mismo.

2.- La sección EW1 (**Fig. 4.17**) orientada Oeste-Este y que incluye del sondeo 001 al 011, del 001 al 006 dentro del valle, muestra un escalón importante entre los sondeos 003 y 004 que se asocia a la presencia de la Fosa del Pueblito. Entre los rasgos más importantes de ésta sección está el levantamiento del basamento observado en las inmediaciones de la falla de Tlacote. Tanto hacia el Este como hacia el Oeste de ésta zona se interpretan mayores espesores de paquetes conductivos que se asocian a rellenos sedimentarios y/o vulcano-sedimentarios. Este desnivel en la roca resistiva aparentemente se extiende a profundidades mayores de un kilómetro en su parte más profunda. Hacia el Oeste, esta depresión subterránea parece ser menos pronunciada. Más hacia el Oeste se puede observar la Falla de Tlacote como un desnivel del basamento. Aquí, la estación 008, la cual fue localizada muy cercana al escarpe de la falla, presenta problemas de distorsión característicos de presencia de una estructura importante. Otro bloque caído, ahora hacia el Oeste se puede observar entre las estaciones 007 y 011. En particular, alrededor de la estación 009 se puede observar que el basamento es más conductivo, lo cual se puede explicar en términos del termalismo que está presente en esta zona en particular y que ha sido objeto de estudio anteriormente.

3.- La sección NS1 (**Fig. 4.18**) está orientada aproximadamente Norte-Sur y consta de 7 estaciones. Desde el punto de vista geohidrológico, este perfil es de gran importancia puesto que proporciona información de los espesores de los estratos cerca del centro del valle. Esta sección de resistividad fue calibrada con un registro eléctrico disponible, el cual además cuenta con registro litológico y de velocidad de penetración. A partir de ésta calibración se llevó a cabo la interpretación geológica de la sección, la cual se encuentra en la **Figura 4.18**. De ésta figura se puede deducir lo siguiente:

- a) Existe un sistema de fallamiento Este-Oeste sugerido inicialmente por el estudio gravimétrico, el cual es aparentemente más antiguo que el Norte-Sur según las relaciones de campo observadas. Este fallamiento no afecta significativamente la continuidad lateral del sistema acuífero, sin embargo sí influye en su espesor a lo largo del valle.
- b) Existe un bloque levantado alrededor de la estación MT número 111 que coincide con la localización sugerida por la anomalía de Bouguer de un alto estructural. Este bloque parece estar flanqueado al norte por la prolongación hacia el oeste de la falla Menchaca y al sur por la prolongación de la falla Cuesta China.
- c) Se observa un mayor espesor de sedimentos en la parte sur del valle en los alrededores de El Pueblito. Esta zona resulta propicia para la existencia de un sistema acuífero de cierta independencia hidráulica del acuífero del valle. Se estima que además presenta buena recarga subterránea a través de paleocanales detectados con sondeos AMT y confirmados con la carta de anomalía de aire libre (letra C en la Fig. 4.8).
- d) El acuífero actualmente en explotación, constituido principalmente por una secuencia de depósitos sedimentarios alternados con derrames basálticos frecuentemente fracturados, se extiende a profundidades de hasta 500 metros en la parte más profunda del valle.
- e) El techo de la unidad que se encuentra debajo del acuífero del valle, constituida por una secuencia de sedimentos volcanoclásticos del Terciario, se encuentra a una profundidad entre los 400 a 600 metros, en tanto que el espesor promedio estimado en la parte central de valle puede llegar a ser hasta de 800 metros. El hecho de que ésta unidad tenga un espesor considerable sugiere la posibilidad de que pueda ser considerado como parte de la reserva hidrológica del municipio de Querétaro. Sin embargo, para pasar de reservas comprobables a reservas comprobadas sería necesario realizar perforaciones exploratorias a por lo menos un kilómetro de profundidad en localizaciones específicas para estimar porosidades.

## CONFIGURACIÓN DE UN SONDEO AJ/MT

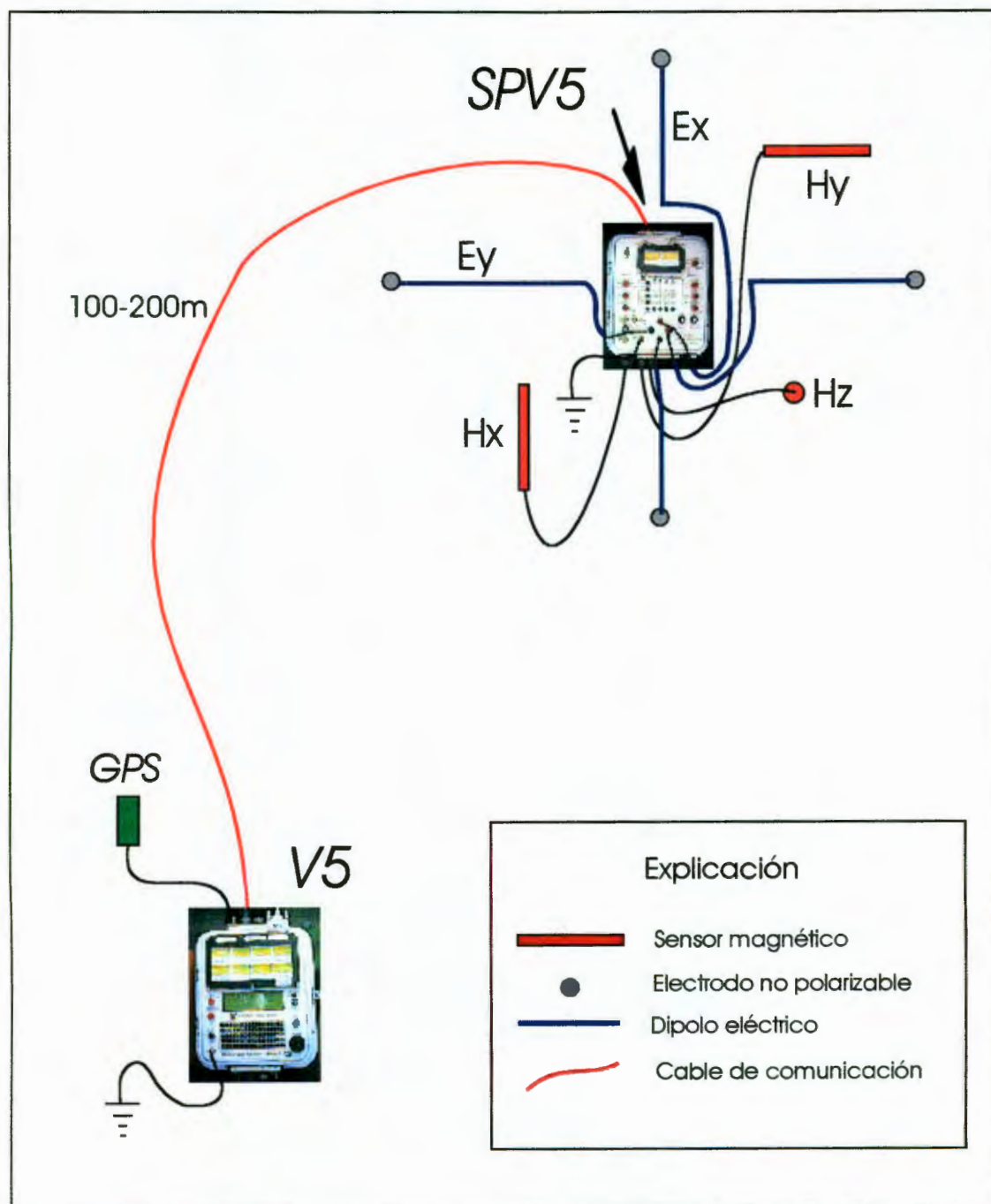


Figura 4.1.- Esquema de las componentes que constituyen una estación magnetotelúrica o audiomagnetotelúrica.

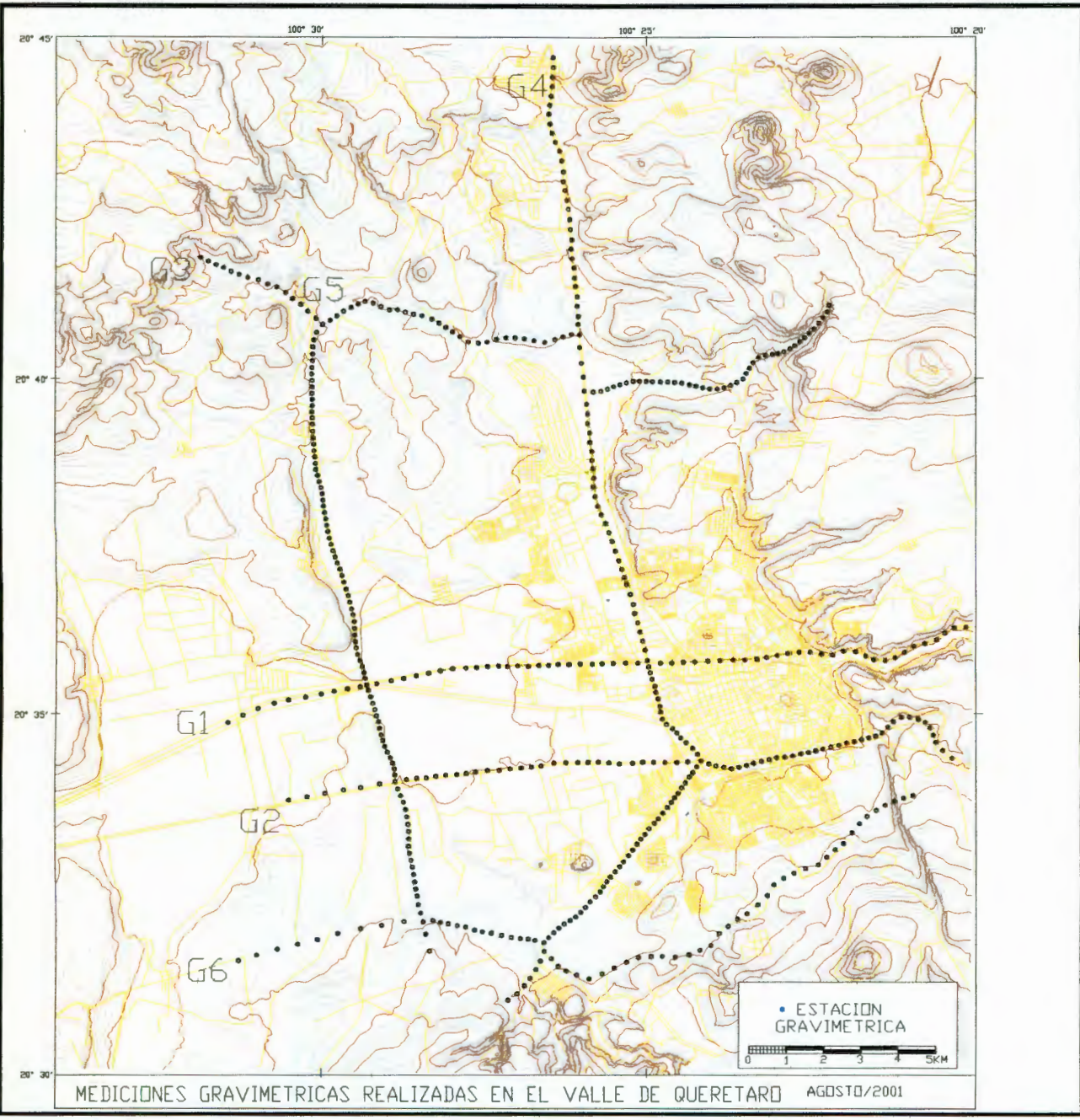


Figura 4.2.- Mapa de localización de las mediciones gravimétricas.



Figura 4.3.- Aspectos de trabajo de campo de las mediciones gravimétricas.



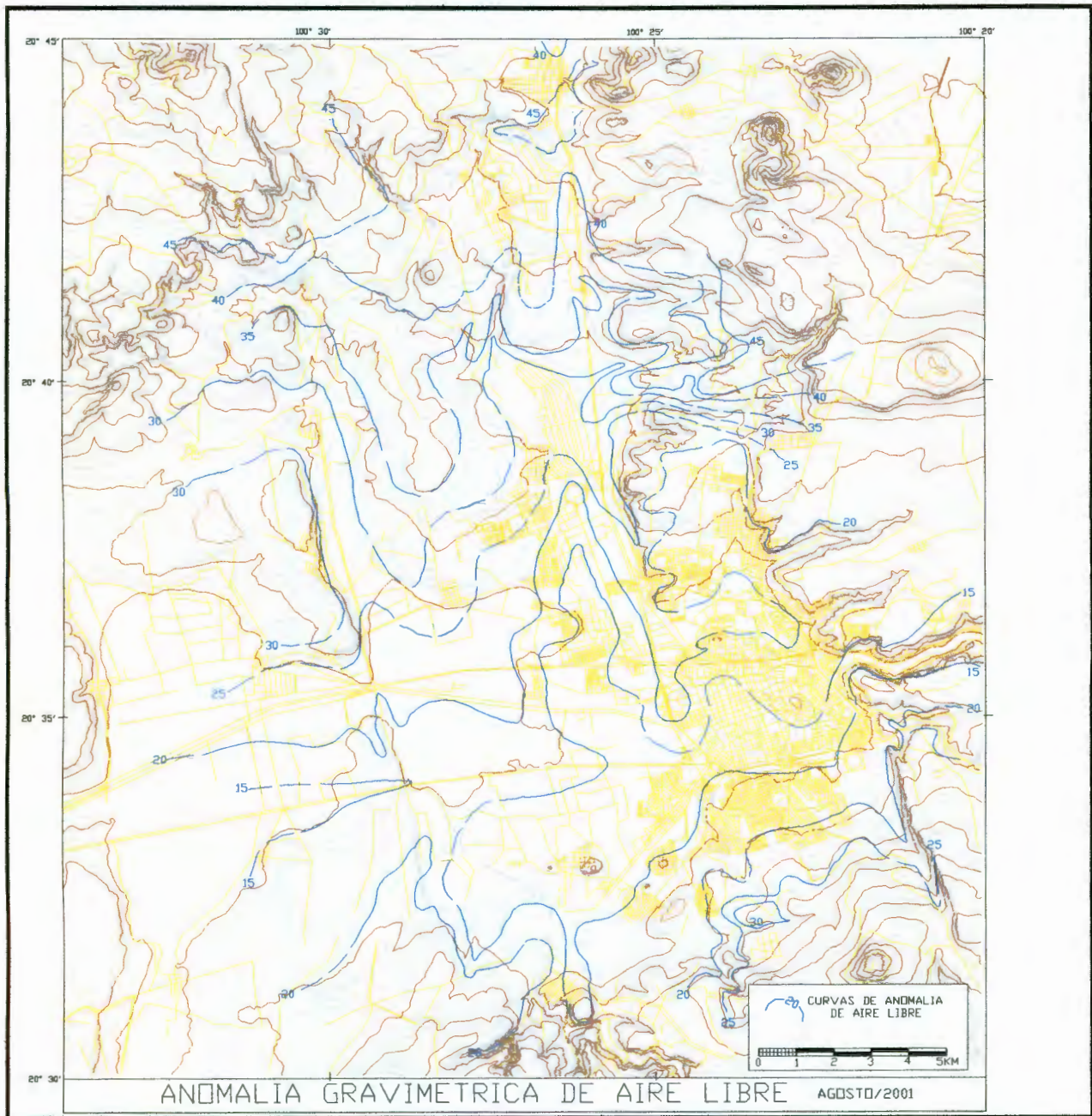


Figura 4.4.- Mapa de anomalía gravimétrica de Aire Libre del valle de Querétaro, el cual refleja rasgos topográficos subterráneos.

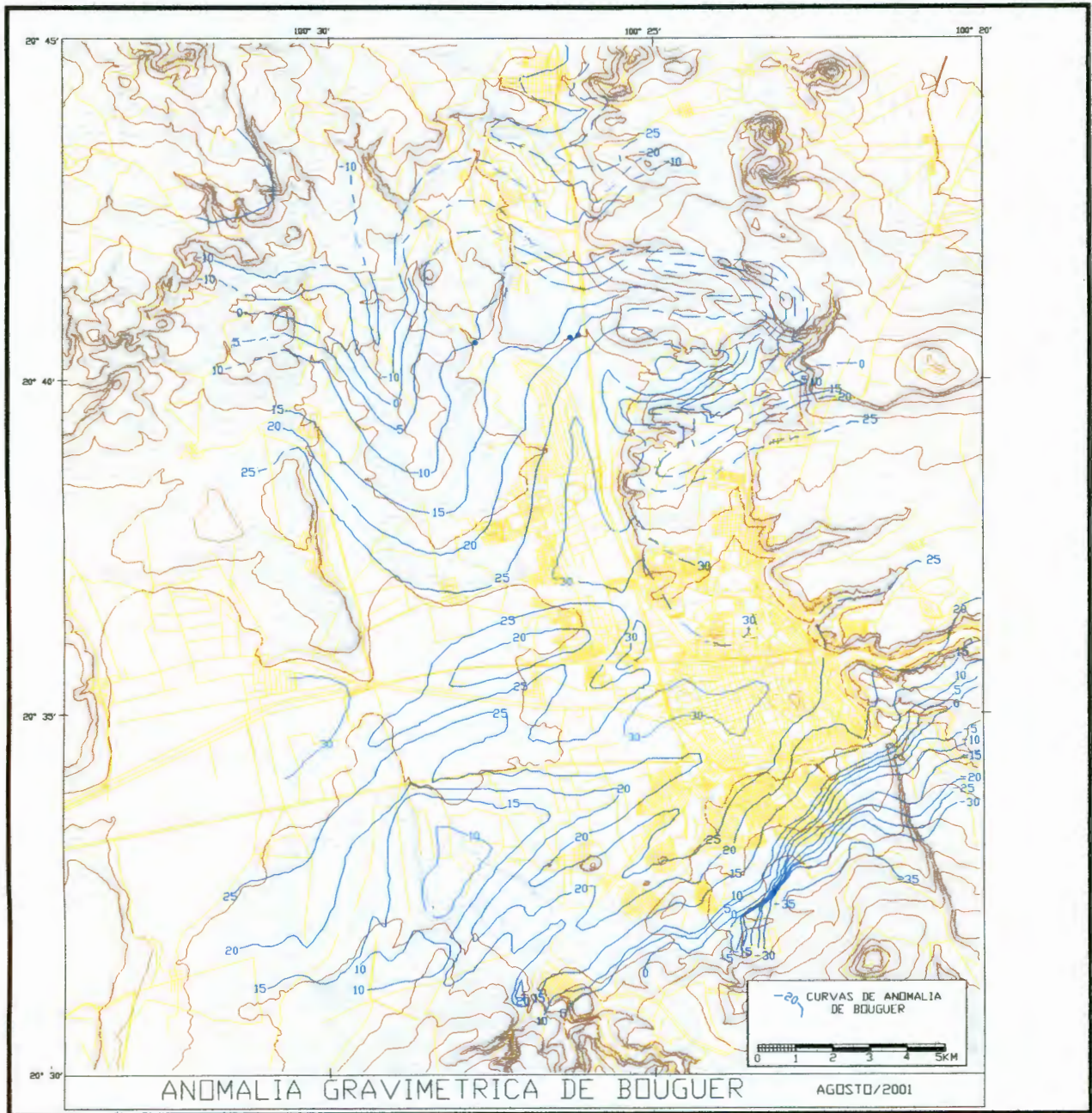
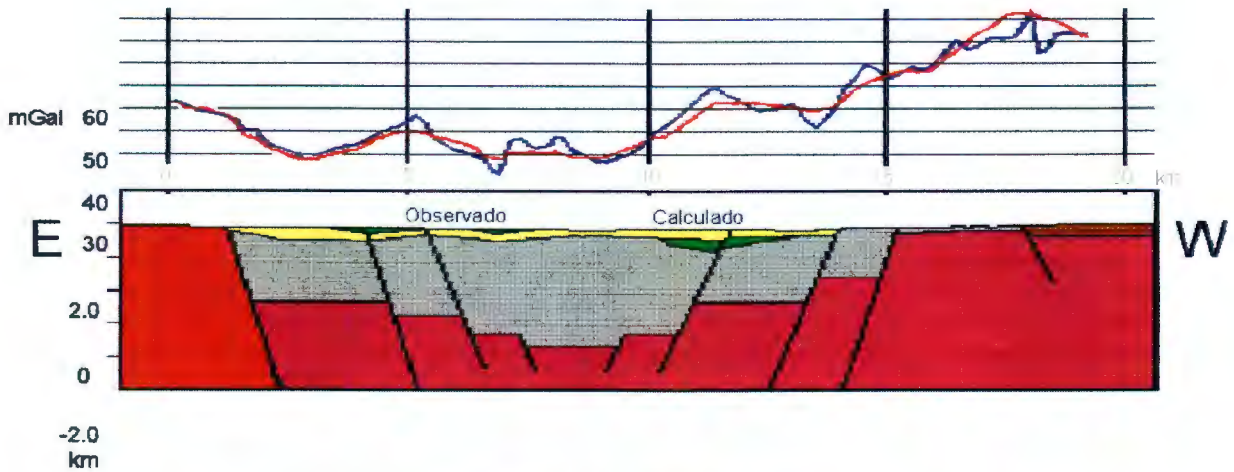
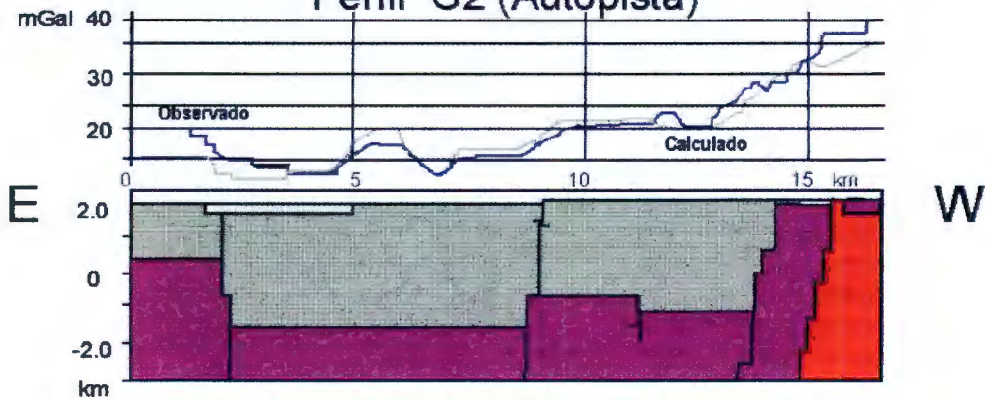


Figura 4.5.- Mapa de anomalía gravimétrica de Bouguer del valle de Querétaro, el cual refleja la presencia de estructura a profundidad.

### Perfil G3 (Mompaní-San Pedrito P.)



### Perfil G2 (Autopista)



### Perfil G6 (Sn. Jual del LLanito-Central)

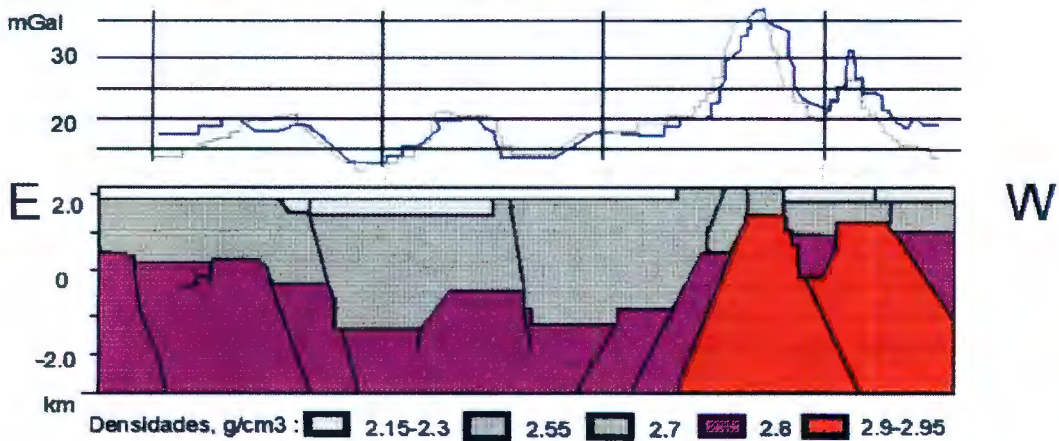
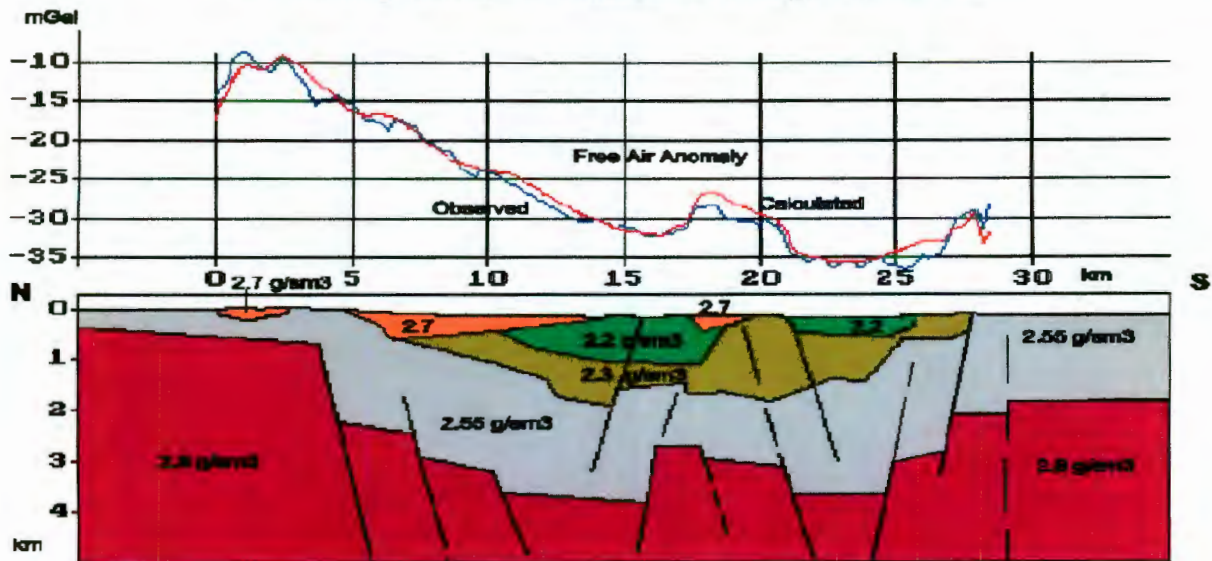


Figura 4.6.- Modelos Gravimetricos bidimensionales del subsuelo del valle de Querétaro a lo largo de tres perfiles Este-Oeste.

### Perfil G4 (Sta. Rosa-La Negreta)

#### 2-D Gravity Model of Querétaro Valley, Profile G4



### Perfil G5 (Mompaní-Corregidora)

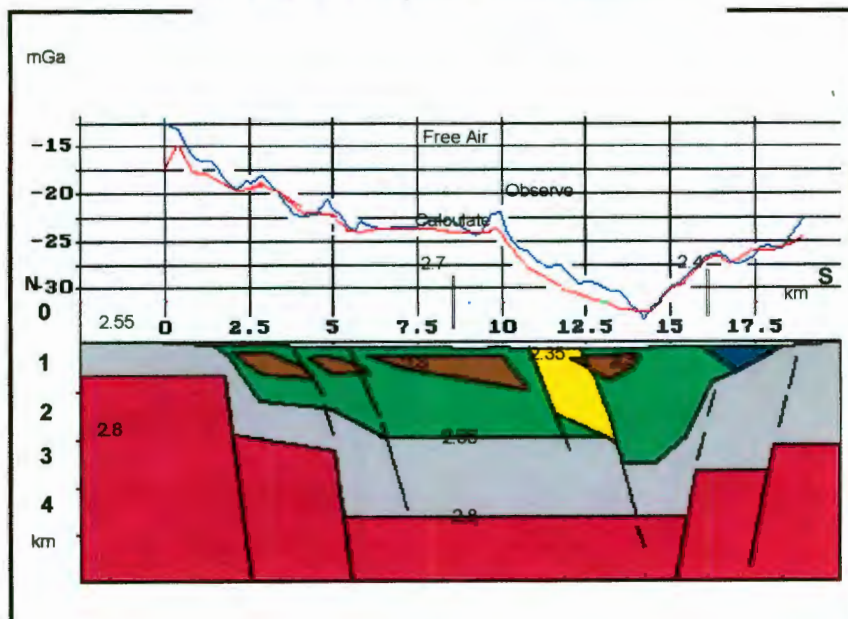


Figura 4.7.- Modelo Gravimétrico bidimensional del subsuelo del valle de Querétaro a lo largo de dos perfiles Norte-Sur.

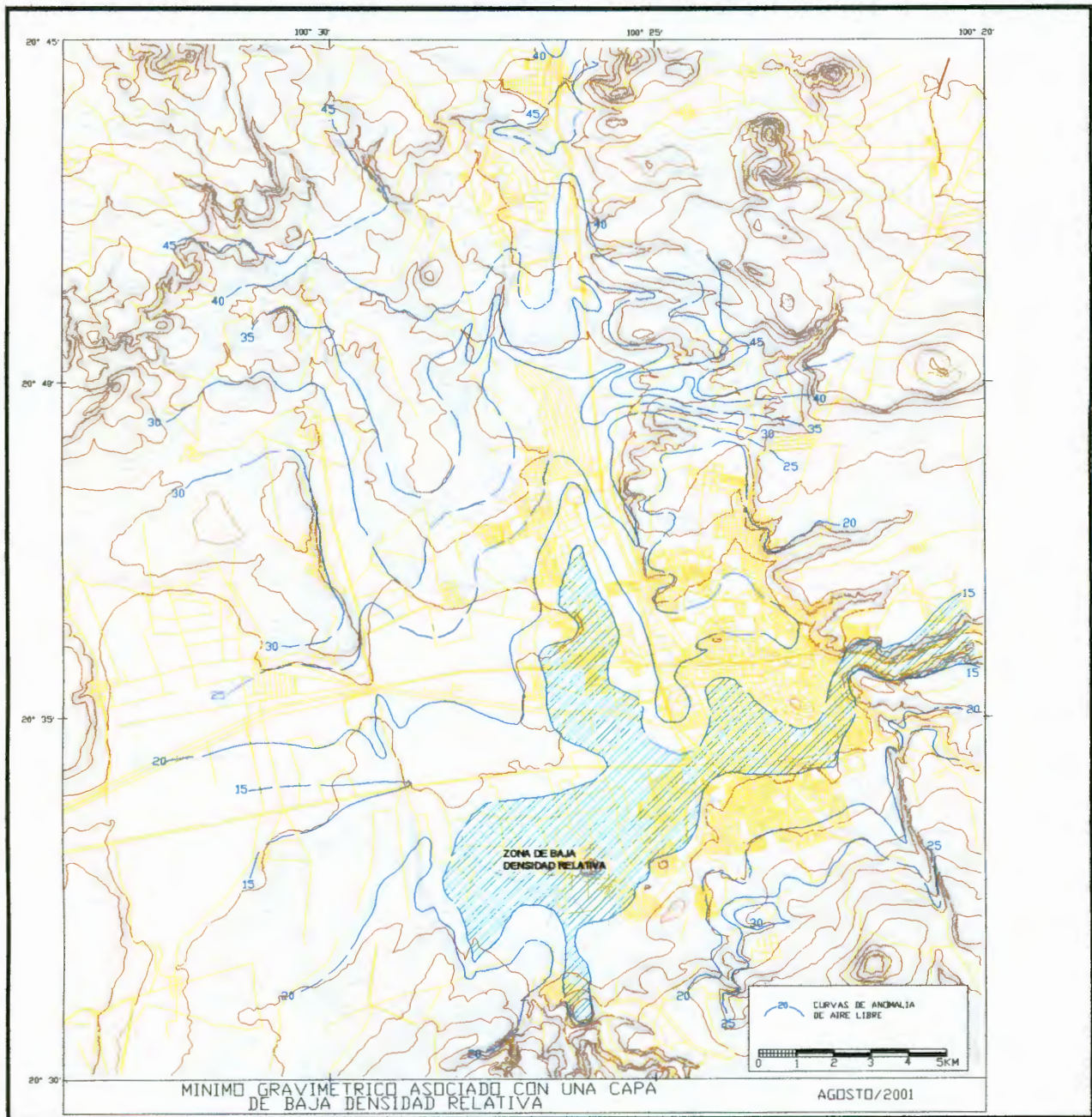


Figura 4.8.- Mínimo gravimétrico asociado con una capa de baja densidad relativa. Esta zona es de particular interés desde el punto de vista hidrológico debido a que se asocia a rocas sedimentarias de alta porosidad o de origen volcánico altamente fracturadas que constituyen buenos acuíferos.

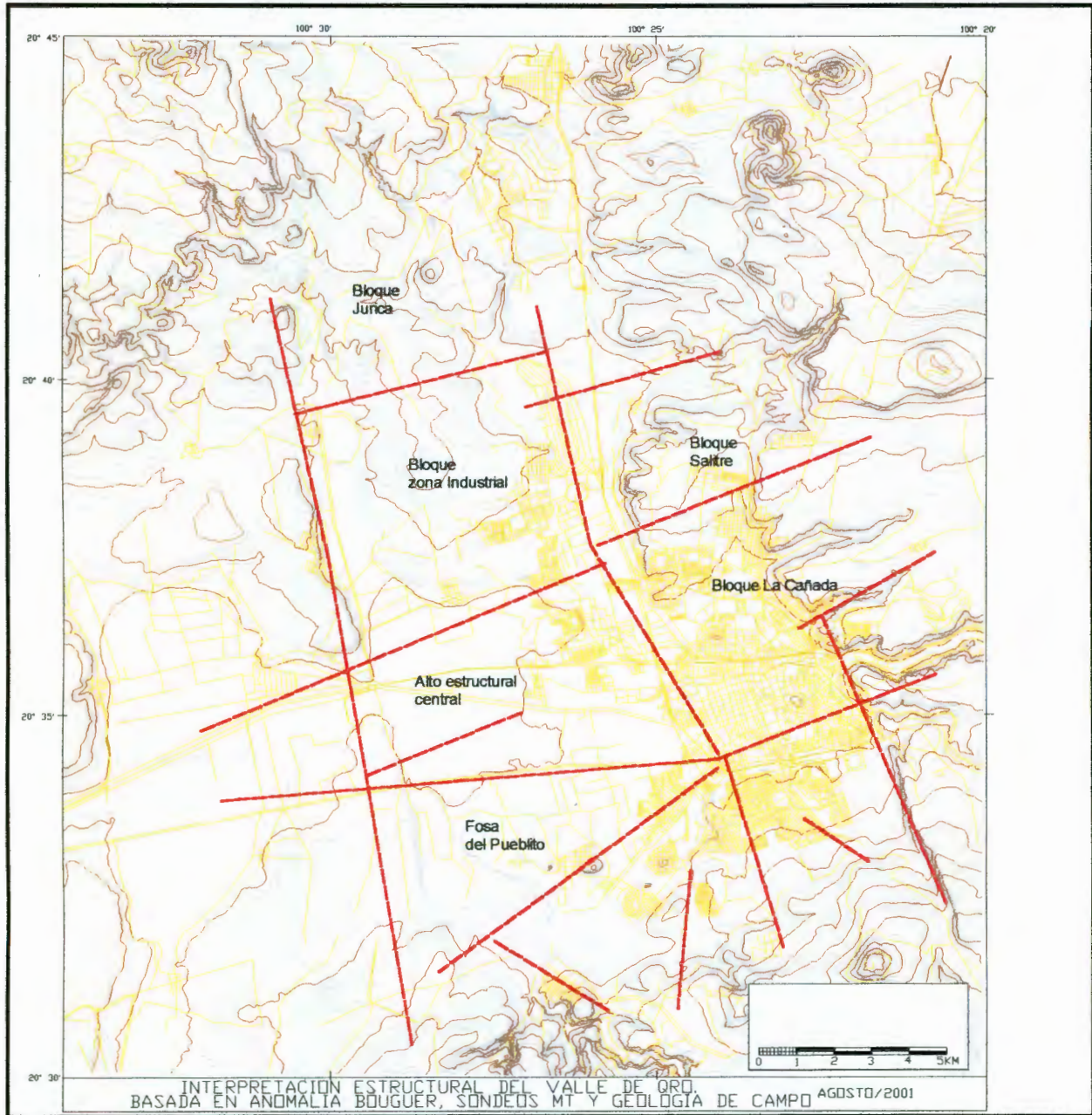


Figura 4.9.- Interpretación estructural del valle de Querétaro basada tanto en la anomalía de Bouguer como en los sondeos MT y la geología de campo.

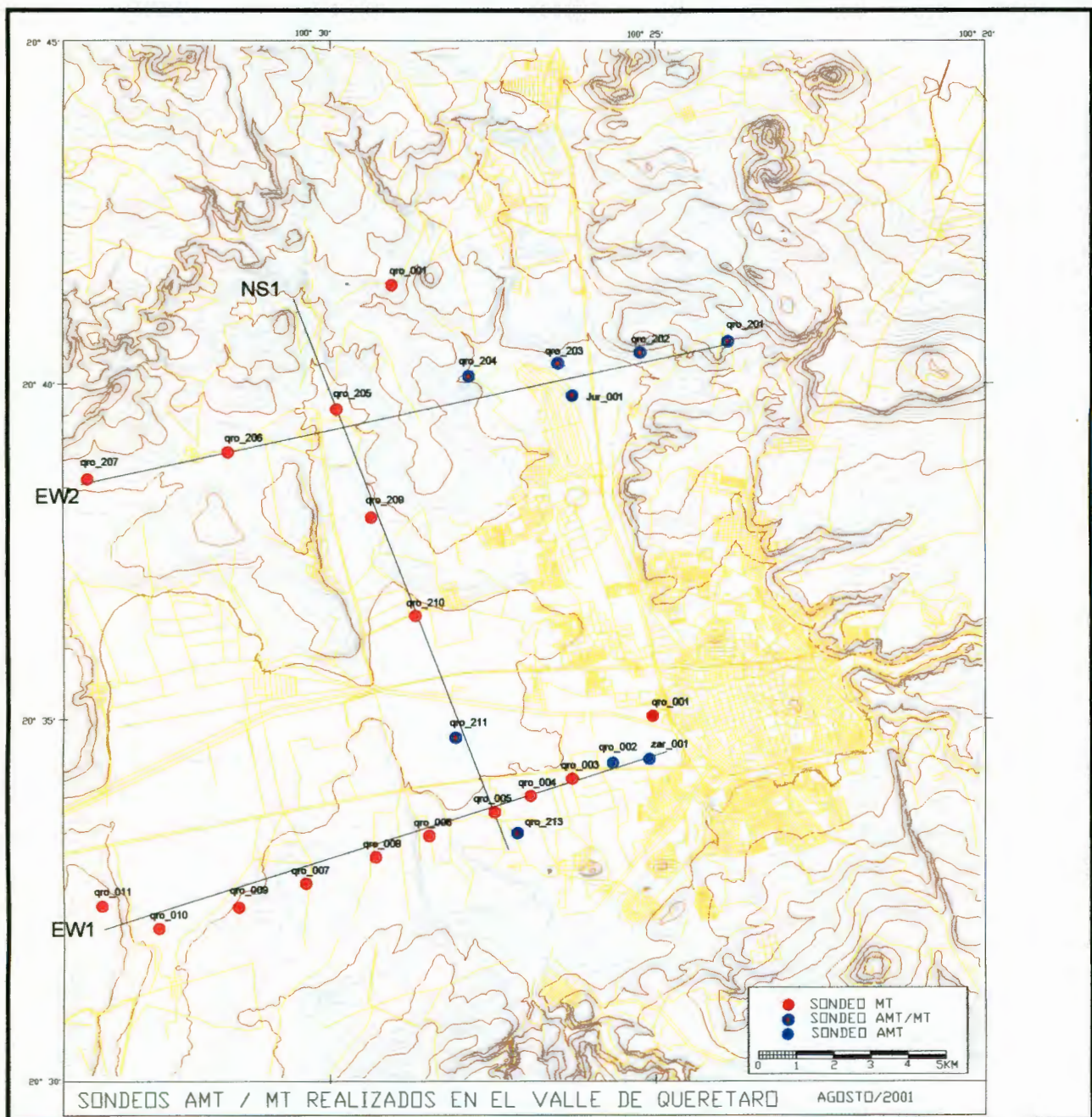


Figura 4.10.- Localización de los perfiles magnetotelúricos en el valle de Querétaro.

## Aspectos de la instalación de una estación MT



Figura 4.11.- Aspectos del trabajo de campo AMT y MT.



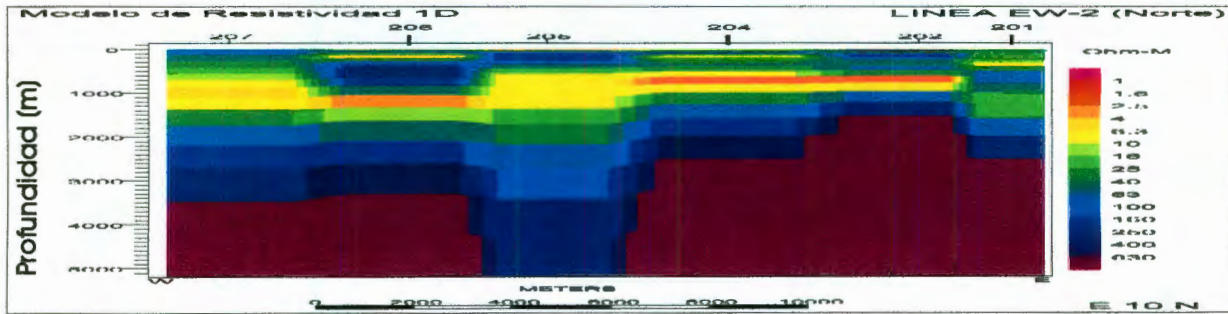


Figura 4.12.- Perfil topográfico (arriba) a lo largo del perfil EW-2 y modelo de resistividad del subsuelo al Norte del valle de Querétaro.

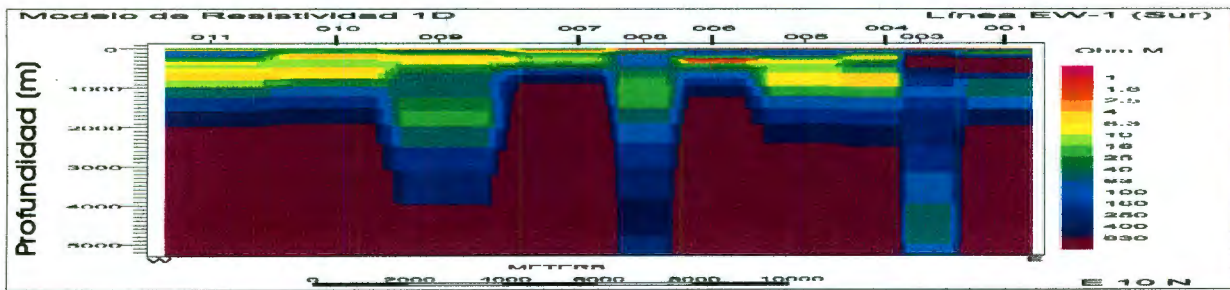
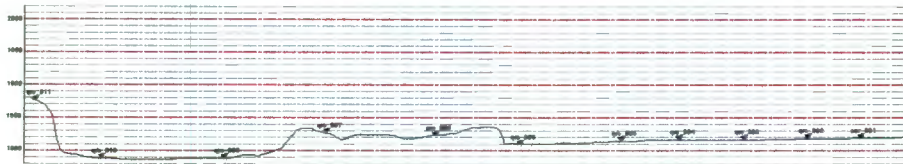


Figura 4.13.- Perfil topográfico (arriba) a lo largo del perfil EW-1 y modelo de resistividad del subsuelo al Sur del valle de Querétaro.

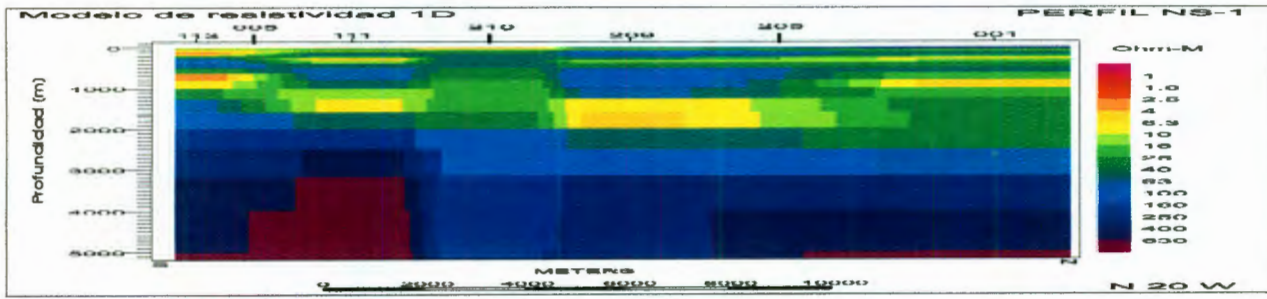


Figura 4.14.- Perfil topográfico (arriba) a lo largo del perfil NS-1 y modelo de resistividad del subsuelo del valle de Querétaro.

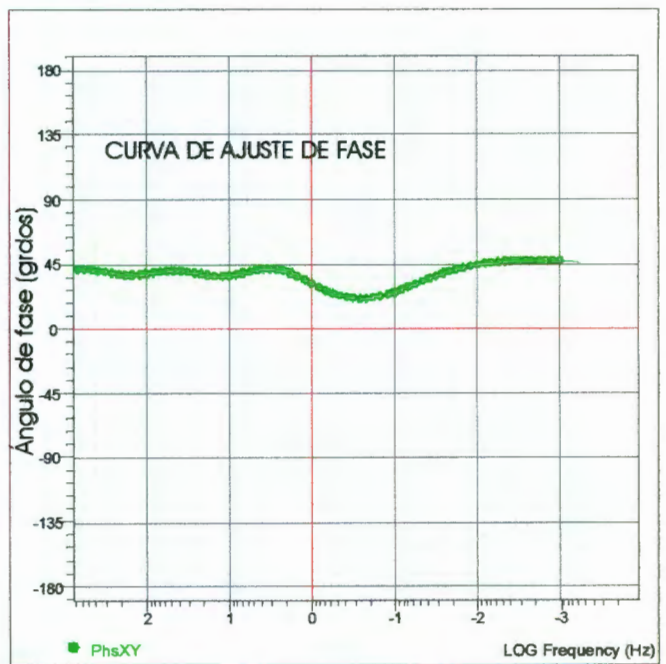
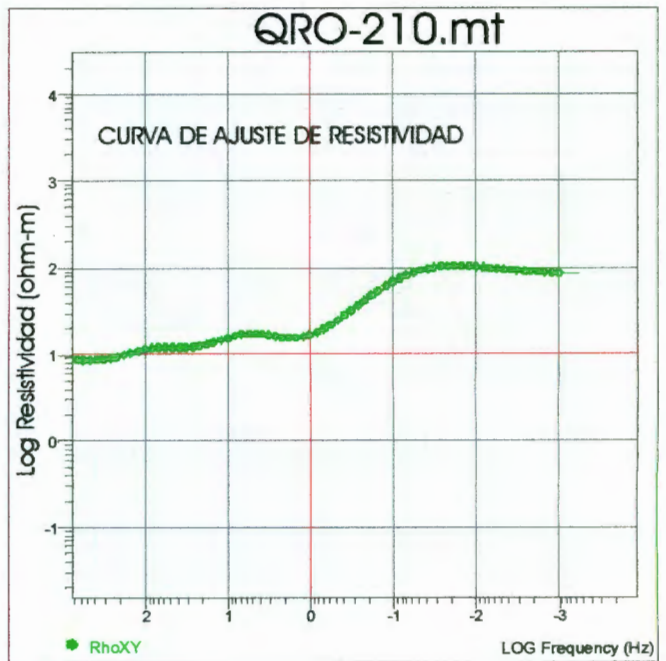
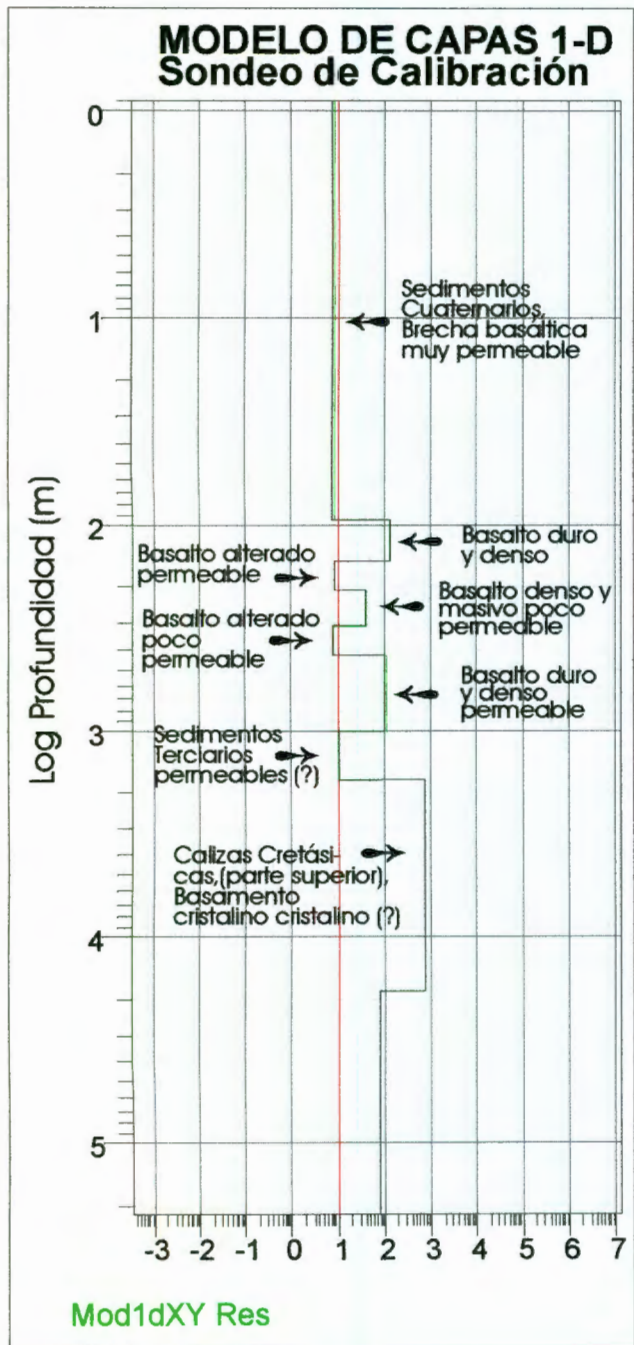


Figura 4.15.- Modelo de calibración del sondeo Qro-210 con el pozo CNA-563.

Modelo conceptual  
Perfil EW-2  
Valle de Querétaro

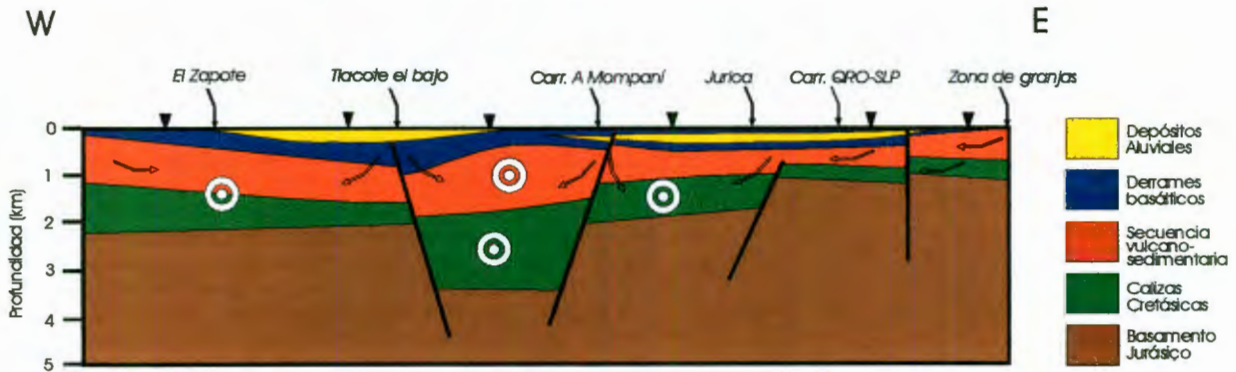


Figura 4.16.- Modelo conceptual interpretado a lo largo del perfil EW-2 a lo largo de la línea Magnetotelúrica Este-Oeste, localizada al norte del valle e interpretado a partir de la calibración del pozo CNA-204. Las flechas y los círculos concéntricos representan probable dirección de flujo subterráneo. El círculo concéntrico indica que una componente del flujo principal es hacia fuera del plano de la hoja.

Modelo conceptual  
 Perfil EW-1  
 Valle de Querétaro

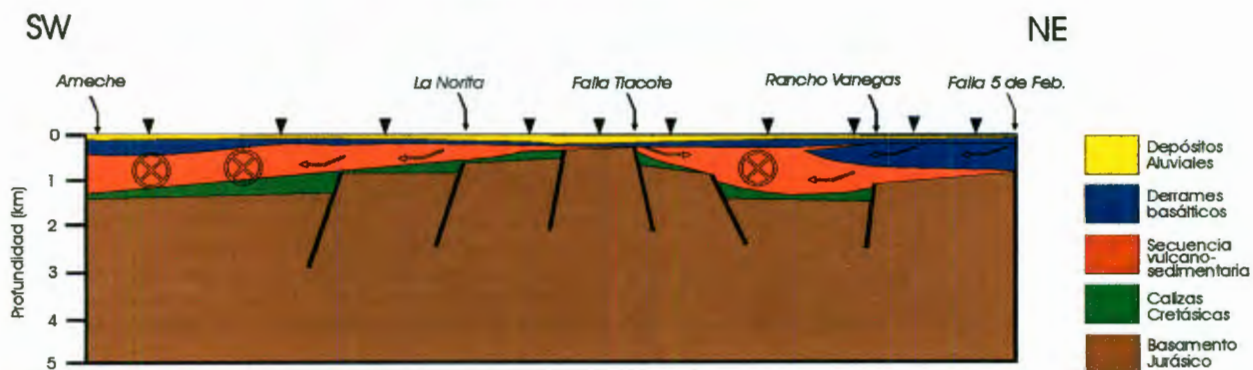


Figura 4.17.- Modelo conceptual interpretado del perfil EW-1 a lo largo de la línea Magnetotelúrica Este-Oeste, localizado al sur del valle. Las flechas y los círculos cruzados representan probable dirección de flujo subterráneo. El círculo cruzado indica que una componente del flujo principal es hacia dentro del plano de la hoja.

Modelo conceptual  
 Perfil NS-1  
 Valle de Querétaro

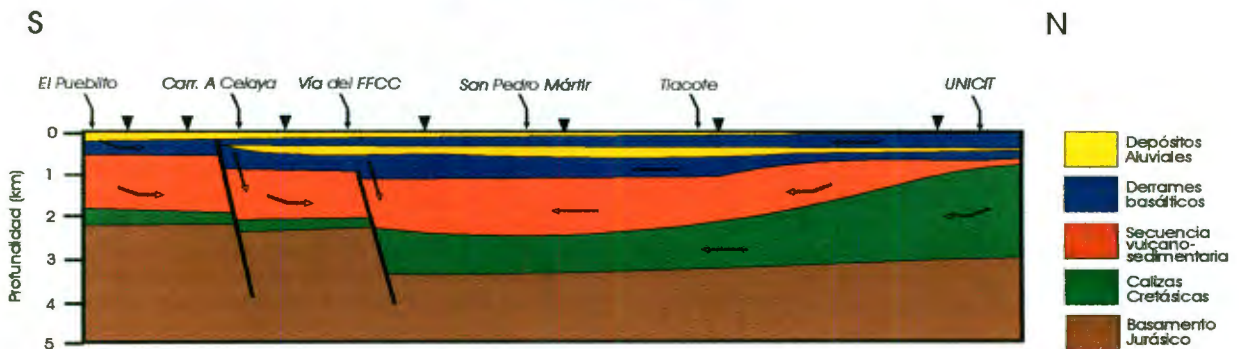


Figura 4.18.- Modelo conceptual interpretado a lo largo del perfil magnetotelurico norte-sur, en donde las flechas indican la más probable dirección de flujo subterráneo.

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1.- Conclusiones.

1.- Es necesario buscar nuevas fuentes externas de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Querétaro y zona conurbada, debido a la sobre explotación del acuífero del valle.

2.- De acuerdo a la carta gravimétrica de anomalía de aire libre se localiza una zona al sur del valle de baja densidad asociada a rocas sedimentarias de alta porosidad que indican depósitos acuíferos. Proporciona además límites laterales que constituye la principal zona del sistema acuífero del valle e indica de manera directa las principales zonas de recarga del acuífero: al este por La Cañada, al norte por la falla 5 de Febrero hacia Jurica y al sur por La Negreta.

3.- De acuerdo a la carta gravimétrica de anomalía de Bouguer se señalan estructuras de importancia como: el Bloque Menchaca, que parece separar un bloque litológico con diferentes características a lo que se encuentra al oeste de la falla 5 de Febrero teniendo un papel importante desde el punto de vista de la recarga del sistema acuífero en su porción norte; Bloque La Cañada; Bloque del Río Querétaro, se trata de un bloque levantado y de acuerdo a datos de transmisividad hidráulica es posible que se trate de una zona de alta permeabilidad relativa y; Minifosa del Pueblito, se trata de un bloque caído que sugiere una zona de baja densidad relativa y quizá la existencia de una fosa local.

4.- De acuerdo a la sección geológico-estructural obtenida correspondiente al perfil eléctrico Norte-Sur que pasa por el centro del valle se muestra al acuífero superficial que alcanza profundidades de hasta 500 metros, observándose como una unidad relativamente continua a lo largo del valle y parece no estar afectado de manera importante por las fallas geológicas que cortan las capas más profundas del subsuelo.



5.- De acuerdo a esta misma sección se puede concluir que existe un sistema de fallamiento Este-Oeste, aparentemente más antiguo que el Norte-Sur. Este fallamiento no afecta significativamente la continuidad lateral del sistema acuífero, sin embargo si influye en su espesor a lo largo del valle.

6.- Se confirma la existencia de una fosa tectónica en la parte sur del valle denominada Fosa del Pueblito, presentando buena recarga tanto subterránea como superficial.

7.- El espesor promedio de sedimentos vulcanoclásticos debajo del acuífero estimado en la parte central del valle puede llegar a ser hasta de 800 metros, que puede considerarse como parte de la reserva hidrológica de la ciudad.

## **5.2.- Recomendaciones.**

1.- Aprovechar los excedentes hidráulicos de las subcuencas Moctezuma y Santa María localizadas al nororiente del Estado mediante más y mayores obras de captación como presas, bordos y represas.

2.- Realizar obras como represas o pozos de absorción con la finalidad de recargar al sistema acuífero del valle de Querétaro en zonas de mayor infiltración, aprovechando escurrimientos generados de la precipitación pluvial.

3.- Promover una mayor cultura del agua eficientando todos los sistemas de riego, disminuyendo perdidas por fugas, etc. Así como también realizar un mayor y mejor tratamiento de las aguas residuales que se generan en la ciudad a través de la construcción de nuevas plantas de tratamiento.

4.- Con el propósito de reducir el acelerado hundimiento del valle, sobre todo en ciertos sectores y atenuar los efectos producidos por la aparición de agrietamientos como una consecuencia de la explotación del recurso, se sugiere reducir la extracción de agua en los

pozos ubicados en la zona más afectada, es decir, la zona ubicada entre las fallas Querétaro centro y Tlacote y entre las fallas Cuesta China y Menchaca.

5.- Se recomienda explorar con más detalle de norte a sur debido a que se observaron importantes estructuras Este-Oeste que aparentan tener una importancia fundamental en el funcionamiento del sistema acuífero. Así como llevar a cabo mediciones más detalladas de gravimetría en la parte central del valle para conocer con más detalle los rasgos estructurales en esta zona.

6.- Se sugiere la posibilidad de realizar perforaciones exploratorias a por lo menos un kilómetro de profundidad en localizaciones específicas como la parte central del valle, ya que se cree existe un espesor considerable de sedimentos volcanoclásticos que podrían considerarse como parte de la reserva hidrológica de la ciudad.

# APENDICES

## A.1.- Mapa geológico GUYSA.



**Símbolos topográficos**

CORRECTOR PARABOLARIO

IRRODADA

RIO

LÍNEA COSTAL

CURVA DE NIVEL TOPOGRÁFICA

BOY Y ABREVIO

**Símbolos geológicos**

CONTACTO OROCLINO

FALLA NORMAL, INCLINADO O LADO HORROR

FALLA INVERSA O SINFALTA

LINAMIENTOS

FRACCIÓNES

LOCACIÓN DE MINERÍA DE ROCA

LOCACIÓN DE LÍMINAS PÉTRIFICADAS

RECORDER GEOLÓGICA

**Símbolos geofísicos**

BOMBEO REALIZADO POR BOYNA TIRME

BOMBEO REALIZADO POR ALAS TIRME

BOMBEO REALIZADO POR BOYNA TIRME

BOYNA TIRME REALIZADO POR BOYNA TIRME

POZOS, BOMBEO REALIZADO POR BOYNA TIRME

POZOS, BOMBEO REALIZADO POR BOYNA TIRME

LÍNEA ELECTROGEOGRÁFICA

**ESCALA GRÁFICA**

0 1 2 3 4 5

Kilómetros

**COLUMNA GEOLÓGICA**

**ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS**

Sr SUELO RESIDUAL TIERRA DE CULTIVO CON FRAGMENTOS DE ROCA DE TAMAÑO VARIADO SOBRE CUALQUIER TIPO DE ROCA

al DEPÓSITOS ALUVIALES CONSTITUIDOS POR BOLEDES, GRAVAS Y ARENAS EN MATRIZ LIMOSA O ARCILLOSA SIN COMPACTACIÓN. LA PARTE SUPERIOR SON SUELOS ARCILLOSOS NEGROS CON ABUNDANTES OJETAS POR DESICACIÓN

Bv MIERDA VOLCÁNICA DE COMPOSICIÓN BASÁLICA CONSTITUIDA EN ALGUNOS CASOS ESTRATOS VOLCÁNICOS, TOMBAS, TIZONTE Y FRAGMENTOS ANGULOSOS CON ACORDO HETEROGÉNEO DE BASALTO VESICULAR Y MASIVO, EN OTROS, PRESENTA UNA ORGANIZACIÓN LIMONÍTICA Y EROSIÓN DIFERENCIAL CON ABUNDANTES ZONAS CAVERNOSAS

B+ BASALTO DENOMINADO EL TAMBOR, POSIBLEMENTE FESALMA, GRES NEGRO CON TEXTURAS AFANÍTICA, HOLICRISTALINA MICROITÁLICA, CLORITA, PIRROCLASTA, INTERGRANULAR, DIFER, Y PESADO, CON POROSIDAD VERTICALES Y HORIZONTALES FORMANDO BUENOS CASOS CÓNICOS, FORMA MESETAS CON PEQUEÑOS CANTILES, SE ENCUENTRA SOBRE LAS UNIDADES Aa, Svi Y PRINCIPALMENTE EN ALGUNOS CASOS ESTÁ EN CONTACTO CON BASALTO LAJEADO

T+ TOMBAS LIMO ARENOSAS CAJE CLARO O OSCURO, ALGO AMARILLO, CON CALICHE EN ALGUNOS CASOS, EN ESTRATOS GROSOS CUANDO EL ESPESOR SOBREPASA LOS 10 M, DEPÓSITOS PRÁCTICAMENTE HORIZONTALES

LA SEGMENTOS VOLCÁNICOS LACUSTRES DE TEXTURA PORCLÁSTICA-EPICLASTICA ES UN DEPÓSITO VOLCANOSSEDIMENTARIO COMPLEJO CONSTITUIDO POR LIMOS, ARELLAS, ARENAS DE GRANES ORIENTADAS, CON TRANSPORTE RESACADO, PUMITAS, BLANCAS A GRIS CLARO, CON ESTRATIFICACIÓN CASI HORIZONTAL, DE ESTRATOS LAMINARES A ORIENTADOS, CON ESTRATIFICACIÓN CRUZADA E INTERDIFERENCIAS DE GRAVAS Y GRAVILLAS POCO CONSOLIDADAS, PRESENTA INCLUSIÓN DE BOLEDES CON INTERCALACIONES DE LAGUNAS BASÁLTICAS Y ANDÉSTICAS, ALCANZA UN ESPESOR MAYOR A LOS 450 M EN LA ZONA CENTRAL DEL VALLE DE QUERÉTARO

BL BASALTO LAJEADO NEGRO, CON TEXTURAS AFANÍTICA, PIROCLÁSTICA PORCLÁSTICA, MICROITÁLICA, LAMINA A BASALTO DE BURNINGO, BASALTO ANDÉSTICO, CON ESTRUCTURA LAJEADA HORIZONTAL, VERTICAL Y EN TODAS DIRECCIONES, SEGÚN EL APLAZAMIENTO, CON FRACTURAMIENTO ORIGINAL VERTICAL PRINCIPALMENTE, DENSO, MUY DURO Y PESADO, MASIVO Y POCO VESICULAR

LA IGNEITAS, POSIBLEMENTE CONTEMPORÁNEAS AL BASALTO LAJEADO, TAMBIÉN SE CLASIFICAN COMO TOMBAS ROLÍTICAS DE TEXTURA PORCLÁSTICA CON ALTERNACIÓN SUPERFICIA

A ANDÉSTICA, MASIVO NEGRO DE CO. GRANES BIAS RESACA A ROJIZA, AFANÍTICA, PIROCLÁSTICA DE MATRIZ AFANÍTICA, EN ALGUNOS CASOS SE QUERVEN CUANDO SECUNDARIO O ACCESORIO Y CUANDO INTRODUCIDO POSTERIORMENTE EN PLANES DE FRACTURA, PRINCIPALMENTE SE CLASIFICAN ANDÉSTICAS, TRANSGRESIONES Y SACTAS, EN ALGUNOS LUGARES PUEDE CONSTITUIR UN MANTAMIENTO EN TIPOS LIGEROS, SE ENCUENTRA FUERTEMENTE ALTURADA POR PROCESOS HIBOTÉRICOS, REEMPLAZAMIENTO Y DIMINUCIÓN ANDÉSTICA

LA CALZAS Y LITITAS, POSIBLEMENTE CORRESPONDIENTES A LAS FORMACIONES SOTITAL O CARACOL, ELEVADAS POR ALGÚN PROCESO INTENSIVO

ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS

DACITA O HORNBLENDA GRIS CLARO, HOLICRISTALINA PORCLÁSTICA CONSTITUYE LA MANIFESTACIÓN DE UN TRONCO INTRUSIVO DE BAJO GRADO

TOMBAS LÍTIAS DE ASPECTO BROWNHOOD, FORMA CÍRCULOS SATÉLITE DE POCOS CENTÍMETROS HASTA ALGUNAS DECENAS DE METROS, ASOCIADO CON FILICES DE CUARZO CRISTALINO Y LEUCOSIS

WITRÓFICO DE COMPOSICIÓN ANDÉSTICA CON BANDAS DE PIEDRA PÓMEZ GRIS CLARO, MUY LOCAL

## A.2.- Resumen de estudios previos en el valle de Querétaro.

NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO	TIPO DE ESTUDIO Y ACTIVIDADES REALIZADAS	OBJETIVOS	RESULTADOS Y PARÁMETROS OBTENIDOS	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS
1.- INFORMACIÓN PARCIAL (PERFILES GEOFÍSICOS NORTE-SUR) DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE QUERÉTARO REALIZADO POR ESTUDIOS Y CONSTRUCCIONES ALAS S.A.	1981	Estudio GEOHIDROLÓGICO de gran visión.	Definir el marco físico del acuífero del valle de Querétaro utilizando exploración geoelectrica.	Se definieron unidades geoelectricas y se elaboraron perfiles norte-sur y este-oeste del acuífero.	Se cubrieron las expectativas del estudio y sus resultados sirvieron para enriquecer el acervo de los estudios posteriores.
2.- ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y GEOQUÍMICO DE LA ZONA INDUSTRIAL BENITO JUÁREZ DE LA CIUDAD DE QUERÉTARO. REALIZADO POR GEOFÍSICA DE EXPLORACIONES. GUYSA, S.A. DE C.V.	1986	Identificación de la fuente de contaminación del agua subterránea por grasas y aceites en la zona industrial Benito Juárez., Con actividades de verificación geohidrológica de detalle en la zona industrial y sus alrededores, inspección, búsqueda e identificación en cada fábrica de sus sistemas de desechos censo de pozos de uso industrial, recopilación de información, piezometría, muestreo de agua subterránea, pruebas de bombeo y exploración geofísica.	Identificar la fuente contaminante, el mecanismo de introducción de las grasas y aceites al acuífero determinó la extensión de la pluma contaminante. En forma adicional se identifica la concentración de plomo cadmio y níquel.	El estudio superó los alcances esperados y fue la plataforma para que la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro reiniciaran los estudios geohidrológicos y sus actualizaciones periódicos tanto del valle como de los principales acuíferos de estado.	El estudio representa el primer acercamiento en el conocimiento de la calidad del agua existente en el acuífero y sirvió de base para continuar el monitoreo de la evolución de dichos elementos. Por otra parte las autoridades del recurso han desplegado algunas campañas dirigidas al saneamiento del agua tanto superficial como subterránea.
3.- SÍNTESIS GEOGRÁFICA, NOMENCLATOR Y ANEXO CARTOGRAFICO DEL ESTADO DE QUERÉTARO, INEGI.	1986	Gran visión de la geografía física de la entidad. Integración de la información estadística e hidrológica.	Ofrecer una visión integrada de las posibilidades y aprovechamiento de los recursos naturales, de acuerdo a su regionalización.	Presentación de resultados en dos partes, la primera cubre los aspectos de división municipal, principales localidades, vías de comunicación, clima, geología e hidrología. La segunda parte contiene los capítulos de suelos, vegetación, posibilidades de uso de la tierra y un análisis de las áreas con posibilidades de	De acuerdo con la información observada se concluye que el documento ofrece una visión general de las características físicas de la región tanto en forma escrita como gráfica, que sirve de plataforma para todo tipo de estudios más particulares relacionados con las ciencias de la tierra.

NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO	TIPO DE ESTUDIO Y ACTIVIDADES REALIZADAS	OBJETIVOS	RESULTADOS Y PARÁMETROS OBTENIDOS	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS
				incorporarse a la frontera agrícola.	
4.- SINOPSIS GEOHIDROLÓGICA DEL ESTADO DE QUERÉTARO. EDITADO POR EL SARH	1987	Divulgación de la información Geográfica, hidrogeológica básica a nivel Estatal, con recopilación de toda la información geohidrológica existente.	Integrar y difundir los resultados de las exploraciones y estudios realizados en el acuífero de Querétaro, con actividades de recopilación de información.	En esta sinopsis se presenta el marco físico del estado, haciendo referencia a la evolución de la hidrología superficial, consignando datos cualitativos y cuantitativos de lluvias, escurrimientos y balance de aguas superficiales. Posteriormente se trata el tema central de la sinopsis acerca de los acuíferos existentes, su renovación, su recarga, descarga, niveles de saturación, calidad, uso y balance de aguas subterráneas. Finalmente se conjuga la información de aguas superficiales y subterráneas para formar el marco general y proyectar a futuro.	Se plantea el hecho de que el balance hidrológico del estado de Querétaro es positivo, es decir la disponibilidad a nivel estatal era mayor que la demanda, pero el balance en las zonas donde se concentraba el bombeo resultó negativo, ya que la sobreexplotación para este tiempo generó un abatimiento de niveles de agua de 3 metros por año. También este documento refiere que de continuar con el minado de los acuíferos al mismo ritmo el aprovechamiento del agua subterránea dejará de ser económicamente rentable para los sectores de bajos recursos.
5.- ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO INTEGRAL DEL VALLE DE QUERÉTARO Y SUS ALREDEDORES PARA EL MANEJO AUTOMATIZADO DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS SUBTERRÁNEOS. REALIZADO POR GEOFÍSICA DE GUYSA, S.A.	1991	Estudio geohidrológico integral definitivo con actividades de campo y gabinete: recopilación de información, fotogeología, integración de la información de modelo de simulación matemático, verificación geológica, censo general de captaciones, hidrometría, piezometría, pruebas de bombeo, sondeos eléctricos verticales, nivelación topográfica de brocales, y	Conocer la situación hidrodinámica que guardaba el valle de Querétaro en cuanto a sus relaciones de recarga y descarga de agua subterránea. Estimar los volúmenes de reserva susceptibles de ser explotados sin incrementar drásticamente el deterioro del balance volumétrico. Mediante el modelo matemático calcular la	Conocimiento del marco conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero de Querétaro, cantidad de captaciones de agua subterránea, por situación de obra, por uso, volúmenes de extracción, niveles de saturación del acuífero, propiedades hidráulicas tales como transmisividades, conductividades hidráulicas, relación recarga descarga, volúmenes drenados, coeficiente de almacenamiento, y detección de contaminantes como plomo, cromo, grasas	-Se calculó una recarga de 67 Mm <sup>3</sup> contra una descarga de 95 Mm <sup>3</sup> . -El coeficiente de almacenamiento deducido fue de 0.07. -El ritmo de abatimiento anual de 1.36 metros. -Redistribución de la extracción mediante cancelación de algunos pozos. -Se recomendó vedar el área para perforaciones adicionales. Evaluar fuentes externas para abastecimiento futuro a la ciudad de Querétaro. Monitoreo anual de niveles de agua subterránea e hidrometría subterránea, muestreo

NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO	TIPO DE ESTUDIO Y ACTIVIDADES REALIZADAS	OBJETIVOS	RESULTADOS Y PARÁMETROS OBTENIDOS	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS
		muestreo de agua subterránea.	posición de los niveles de agua subterránea para diferentes tiempos con distintas políticas de extracción. Determinar la evolución en la concentración de plomo, grasas, aceites y cromo.	y aceites.	anual de aguas subterráneas.
6.- SEGUIMIENTOS DEL COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO MEDIANTE MONITOREO ANUAL DE LA POSICIÓN DE LOS NIVELES DEL AGUA, VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN, ACTUALIZACIÓN DEL CENSO DE CAPTACIONES, ACTUALIZACIÓN DE LA RED DE POZOS PILOTO, NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA, PRUEBAS DE BOMBEO Y CALIBRACIONES DEL MODELO PARA CADA AÑO AL ESTUDIO INTEGRAL DEL VALLE DE QUERÉTARO.	1992-1993 1994 1995 1996	Seguimiento del comportamiento del acuífero y actualización de resultados, con actividades de actualización del censo de pozos, piezometría, hidrometría, muestreo, pruebas de bombeo, nivelación topográfica de brocales, actualización del balance y calibración del modelo.	Mantener actualizado el conocimiento del acuífero del valle de Querétaro.	Para cada año, información del ritmo de incremento anual de captaciones, de distribuciones por uso y volúmenes de agua extraída, aumento en la velocidad de abatimiento, volúmenes de recarga y descarga y calidad del agua.	Estos seguimientos han sido de gran utilidad porque a partir de ellos se está llevando a cabo la reglamentación del acuífero y de manera autónoma la Comisión Estatal de Aguas puede elegir sus nuevas fuentes de abastecimiento internas.
7.- ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DE ÁREAS FACTIBLES PARA QUE SE LLEVE A CABO EL PROCESO DE INFILTRACIÓN NATURAL O INDUCIDA, ENFOCADO AL MEJORAMIENTO DEL ACUÍFERO Y DEL MEDIO AMBIENTE EN EL VALLE DE QUERÉTARO. REALIZADO POR GEOFÍSICA DE EXPLORACIONES GUYSA, S.A. DE C.V.	1993	Estudio preliminar para determinar las zonas favorables para que se lleve a cabo el proceso de infiltración. En él se realizaron recorridos de campo en los que se cartografiaron y midieron fracturas y se hicieron apreciaciones a detalle sobre la porosidad del terreno.	Reordenamiento urbano, es decir hacer crecer la mancha urbana hacia zonas de rocas impermeables. Conocer el impacto que ejerce el crecimiento desordenado de la mancha urbana.	Se zonificó el terreno de la ciudad de Querétaro por rangos de capacidad de infiltración. Se conoce la capacidad de escurrimiento y zonas de inundación.	La Secretaría de Obras del Gobierno del Estado de Querétaro tomó como base este trabajo para proyectar el crecimiento de la ciudad.
8.- DICTAMEN SOBRE LA APARENTE PRESENCIA DE HIDROCARBUROS EN	1994	Dictamen geoquímico para determinar la presencia de	Determinar la presencia de hidrocarburos y su relación con	Esta compañía no fue autorizada para procesar los resultados de los	Los resultados se entregaron al gobierno del estado y éste los manejó de manera

NOMBRE DEL ESTUDIO	AÑO	TIPO DE ESTUDIO Y ACTIVIDADES REALIZADAS	OBJETIVOS	RESULTADOS Y PARÁMETROS OBTENIDOS	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS
EL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO, EN LA PORCIÓN QUE CUBRE LA ZONA INDUSTRIAL BENITO JUÁREZ. ELABORADO POR GEOFÍSICA DE EXPLORACIONES GUYSA, S.A. DE C.V.		hidrocarburos en pozos de la zona industrial. Se muestrearon pozos profundos en puntos críticos.	los límites máximos permisibles.	análisis químicos debido al carácter confidencial y manejo político.	confidencial.
9.- RESUMEN DE LA ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ESTADO DE QUERÉTARO A DICIEMBRE DE 1994. ELABORADO POR GEOFÍSICA DE EXPLORACIONES GUYSA, S.A. DE C.V.	1995	Resumen de actividades geohidrológicas, con actividades de actualización del censo general de captaciones, hidrometría subterránea, piezometría y pruebas de bombeo.	Mantener actualizada la información geohidrológica del acuífero de Querétaro mediante una nueva estimación en la relación recarga-descarga.	Se conoce el ritmo de abatimientos en el acuífero, el número de captaciones activas y volúmenes explotados. Además se realizó un nuevo balance de aguas subterráneas en el que se corroboró el coeficiente de almacenamiento y la recarga vertical.	Se cumplió el objetivo de mantener actualizada la información geohidrológica del acuífero ya que es posible conocer hasta este año el número de captaciones activas, el volumen de extracción por usos y la posición al nivel del agua etc.

### A.3.- Datos de campo de gravimetría.

#### Perfil G2.- Carretera México-Querétaro (2 km antes de caseta de cobro Celaya cuota a Cuesta China)

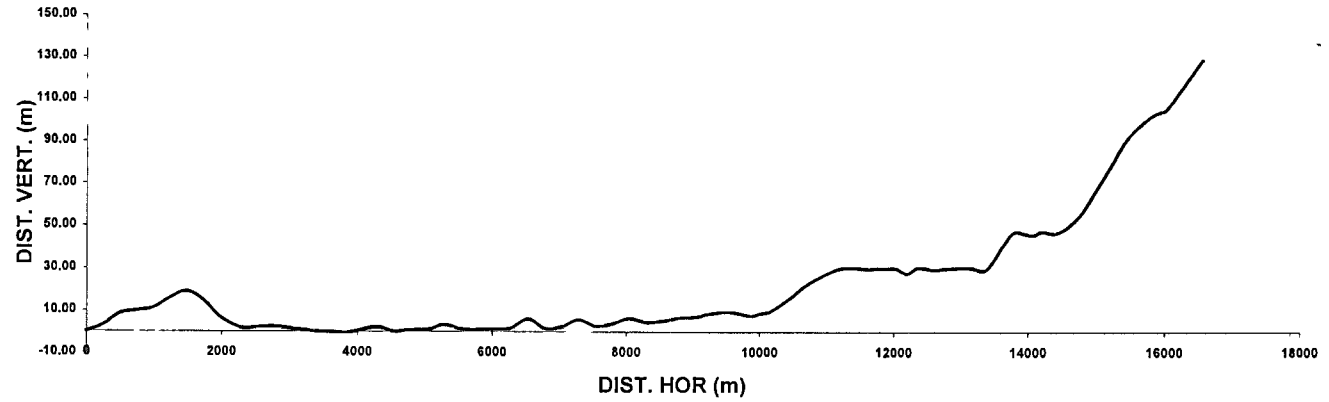
Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G-fld-red	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dh	dg Bouguer	0.0418*2.67*dh	dg Bouguer
1	620,21,30	0	0.00	1958.34	15.34	0.00	15.34	0.00	15.34	0.00	15.34
2	622	248.72	2.94	1957.33	14.33	0.91	15.24	0.28	14.05	0.33	14.00
3	623	496.96	8.46	1955.05	12.05	2.61	14.66	0.81	11.23	0.94	11.10
4	624	745.70	9.84	1954.80	11.80	3.04	14.84	0.95	10.85	1.10	10.70
5	625	994.59	11.22	1954.45	11.44	3.46	14.91	1.08	10.37	1.25	10.19
6	626	1243.49	15.88	1952.94	9.94	4.90	14.84	1.53	8.41	1.77	8.16
7	627	1492.78	18.88	1951.91	8.91	5.83	14.74	1.82	7.09	2.11	6.80
8	631	1741.78	14.48	1952.06	9.06	4.47	13.53	1.39	7.67	1.62	7.44
9	632	1990.31	6.48	1953.60	10.59	2.00	12.59	0.62	9.97	0.72	9.87
10	633	2288.07	1.66	1954.71	11.71	0.51	12.22	0.16	11.55	0.19	11.52
11	634	2537.09	2.06	1954.22	11.21	0.64	11.85	0.20	11.02	0.23	10.99
12	635	2786.24	2.27	1954.05	11.05	0.70	11.75	0.22	10.83	0.25	10.79
13	636	3035.54	1.32	1954.03	11.03	0.41	11.44	0.13	10.90	0.15	10.88
14	637	3290.53	0.34	1954.44	11.44	0.11	11.55	0.03	11.41	0.04	11.40
15	638	3538.16	-0.17	1954.54	11.54	-0.05	11.48	-0.02	11.55	-0.02	11.55
16	639	3787.21	-0.45	1954.65	11.65	-0.14	11.51	-0.04	11.69	-0.05	11.70
17	640	3956.36	0.08	1954.57	11.56	0.02	11.59	0.01	11.56	0.01	11.56
18	641	4285.47	2.19	1953.87	10.87	0.68	11.55	0.21	10.66	0.24	10.63
19	642	4534.86	0.12	1954.60	11.60	0.04	11.64	0.01	11.59	0.01	11.59
20	643	4784.46	0.82	1955.12	12.12	0.25	12.37	0.08	12.04	0.09	12.03
21	644	5034.04	0.93	1956.06	13.06	0.29	13.35	0.09	12.97	0.10	12.96
22	645	5284.26	3.31	1956.11	13.10	1.02	14.13	0.32	12.79	0.37	12.74
23	646	5533.82	1.30	1956.03	13.03	0.40	13.42	0.12	12.90	0.14	12.88
24	647	5733.66	1.04	1956.44	13.44	0.32	13.76	0.10	13.34	0.12	13.32
25	648	6032.92	1.25	1955.25	12.25	0.38	12.63	0.12	12.13	0.14	12.11
26	649	6282.35	1.73	1954.72	11.72	0.53	12.25	0.17	11.55	0.19	11.53
27	650	6540.34	6.08	1953.70	10.70	1.87	12.57	0.58	10.12	0.68	10.02
28	651	6790.66	1.60	1954.40	11.40	0.49	11.89	0.15	11.25	0.18	11.22
29	652	7041.05	2.37	1954.52	11.52	0.73	12.25	0.23	11.29	0.26	11.26
30	653	7291.43	5.68	1953.85	10.84	1.75	12.60	0.55	10.30	0.63	10.21
31	654	7543.51	2.72	1954.80	11.80	0.84	12.63	0.26	11.53	0.30	11.49
32	655	7793.58	3.69	1954.65	11.65	1.14	12.78	0.35	11.29	0.41	11.23
33	656	8043.15	6.35	1953.94	10.94	1.96	12.89	0.61	10.33	0.71	10.23
34	657	8292.75	4.46	1954.40	11.40	1.37	12.77	0.43	10.97	0.50	10.90
35	658	8542.91	5.02	1954.48	11.47	1.55	13.03	0.48	10.99	0.56	10.91
36	659	8793.33	6.65	1954.10	11.10	2.05	13.15	0.64	10.46	0.74	10.36
37	660	9042.47	7.03	1954.36	11.36	2.17	13.53	0.68	10.68	0.78	10.58
38	661	9242.39	8.67	1955.06	12.06	2.67	14.73	0.83	11.22	0.97	11.09
39	662	9541.52	9.54	1955.45	12.44	2.94	15.39	0.92	11.53	1.06	11.38
40	663	9863.59	7.66	1956.40	13.40	2.36	15.76	0.74	12.66	0.85	12.54
41	664	10011.44	8.68	1956.38	13.38	2.68	16.05	0.83	12.54	0.97	12.41
42	665	10172.44	9.95	1956.17	13.17	3.07	16.23	0.96	12.21	1.11	12.06
43	666	10467.24	16.15	1954.89	11.89	4.98	16.87	1.55	10.34	1.80	10.09
44	667	10726.65	22.70	1953.09	10.09	7.01	17.10	2.18	7.91	2.53	7.56
45	668	11074.25	28.75	1951.31	8.31	8.87	17.18	2.76	5.55	3.21	5.10



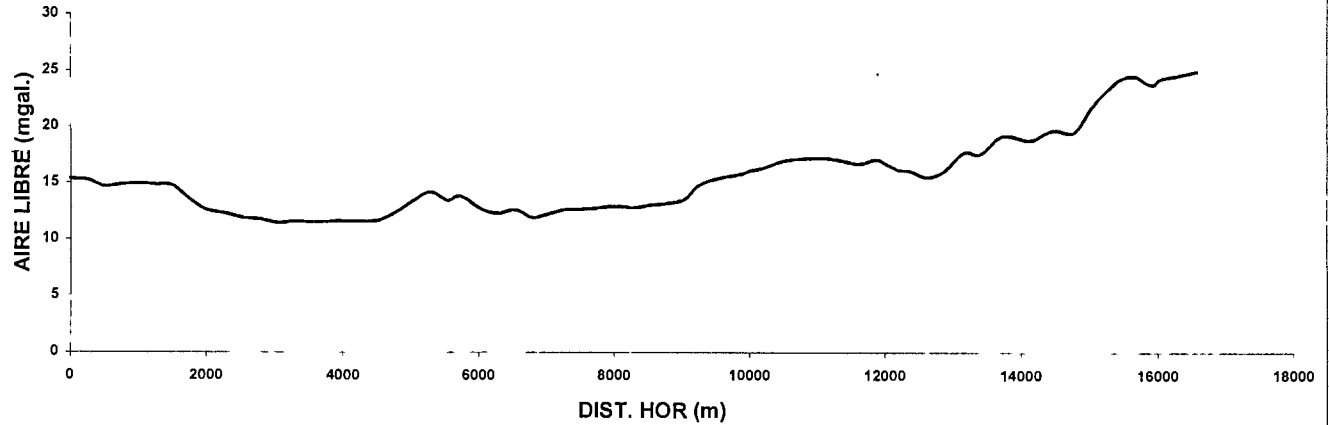
**Perfil G2.- Carretera México-Querétaro**  
(2 km antes de caseta de cobro Celaya cuota a Cuesta China)

Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G-fld-red	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dh	dg Bouguer	0.0418*2.67*dh	dg Bouguer
46	669	11329.25	30.46	1950.58	7.57	9.40	16.98	2.93	4.65	3.40	4.18
47	670	11608.97	29.89	1950.45	7.45	9.22	16.67	2.87	4.58	3.34	4.11
48	671	11865.43	30.26	1950.70	7.69	9.34	17.03	2.91	4.79	3.38	4.32
49	672	12038.67	30.14	1950.25	7.24	9.30	16.55	2.90	4.35	3.36	3.88
50	673	12200.65	27.76	1950.56	7.56	8.57	16.12	2.67	4.89	3.10	4.46
51	674	12365.22	30.48	1949.62	6.62	9.41	16.03	2.93	3.69	3.40	3.22
52	675	12605.71	29.60	1949.35	6.34	9.13	15.48	2.85	3.50	3.30	3.04
53	676	12861.97	30.26	1949.67	6.67	9.34	16.01	2.91	3.76	3.38	3.29
54	677	13148.30	30.52	1951.23	8.22	9.42	17.64	2.93	5.29	3.41	4.82
55	678	13391.06	29.72	1951.38	8.38	9.17	17.55	2.86	5.52	3.32	5.06
56	679	13641.71	41.18	1949.21	6.20	12.71	18.91	3.96	2.25	4.60	1.61
57	680	13801.10	47.11	1947.65	4.65	14.54	19.19	4.53	0.12	5.26	-0.61
58	681	14055.79	45.70	1947.69	4.69	14.10	18.79	4.39	0.29	5.10	-0.42
59	682	14204.96	47.44	1947.28	4.28	14.64	18.92	4.56	-0.28	5.29	-1.01
60	683	14458.08	47.13	1948.12	5.11	14.55	19.66	4.53	0.58	5.26	-0.15
61	684	14764.89	55.10	1945.48	2.47	17.00	19.48	5.30	-2.82	6.15	-3.67
62	685	15014.46	67.59	1943.78	0.78	20.86	21.64	6.50	-5.72	7.54	-6.76
63	686	15222.46	78.20	1941.92	-1.08	24.13	23.05	7.52	-8.60	8.73	-9.81
64	687	15438.06	89.93	1939.46	-3.54	27.75	24.21	8.65	-12.19	10.04	-13.58
65	688	15650.82	97.44	1937.45	-5.56	30.07	24.51	9.37	-14.92	10.87	-16.43
66	689	15817.27	101.75	1935.54	-7.46	31.40	23.94	9.78	-17.24	11.36	-18.82
67	690	15938.18	103.71	1934.75	-8.25	32.00	23.75	9.97	-18.22	11.57	-19.82
68	691	16032.68	104.91	1934.86	-8.14	32.37	24.23	10.09	-18.23	11.71	-19.85
69	692	16284.61	115.55	1931.91	-11.09	35.66	24.57	11.11	-22.20	12.90	-23.99
70	693	16568.07	128.41	1928.31	-14.69	39.63	24.93	12.34	-27.04	14.33	-29.03

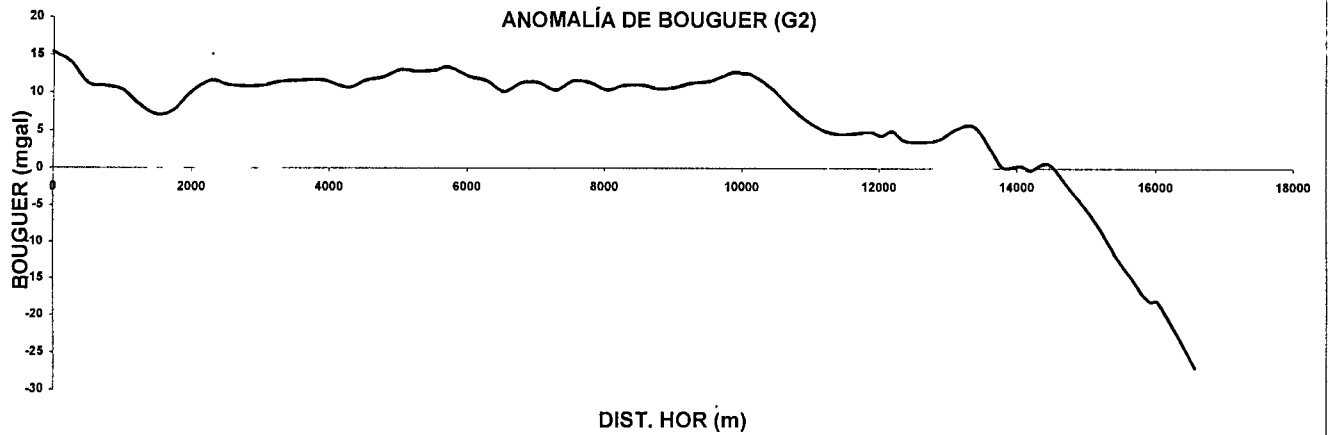
PERFIL TOPOGRÁFICO (T2)



ANOMALÍA DE AIRE LIBRE (G2)



ANOMALÍA DE BOUGUER (G2)



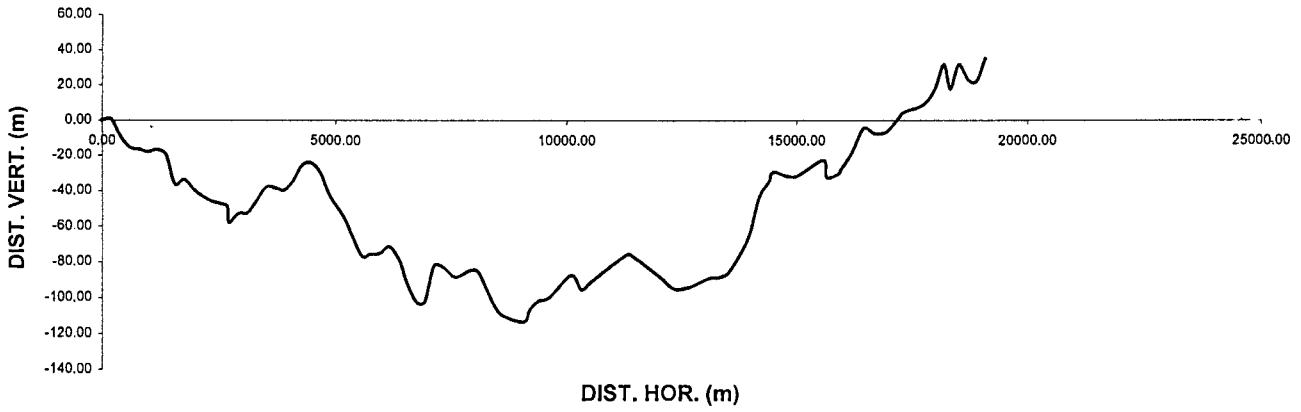
**Perfil G3.- Terraceria camino a Jurica, a Salitre y a San José El Alto**  
(El Puertecito a San José El Alto)

Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G_c_red	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dh	dg Bouguer	0.0418*2.67*dh	dgBouguer
1	699	0.00	0.00	2042.57	-12.44	0.00	-12.44	0.00	-12.44	0.00	-12.44
2	700	198.71	0.51	2042.56	-12.44	0.16	-12.29	0.05	-12.49	0.06	-12.50
3	701	394.45	-9.09	2044.53	-10.47	-2.81	-13.28	-0.87	-9.60	-1.01	-9.46
4	702	590.36	-15.45	2045.46	-9.54	-4.77	-14.31	-1.49	-8.05	-1.72	-7.82
5	703	788.56	-16.60	2045.35	-9.65	-5.12	-14.77	-1.60	-8.05	-1.85	-7.80
6	704	981.63	-18.00	2045.48	-9.52	-5.55	-15.07	-1.73	-7.79	-2.01	-7.51
7	705	1177.31	-16.86	2044.80	-10.20	-5.20	-15.41	-1.62	-8.58	-1.88	-8.32
8	706	1372.01	-19.67	2045.11	-9.90	-6.07	-15.97	-1.89	-8.00	-2.20	-7.70
9	707	1550.69	-36.17	2048.10	-6.91	-11.16	-18.07	-3.48	-3.43	-4.04	-2.87
10	708	1756.87	-33.80	2046.73	-8.28	-10.43	-18.71	-3.25	-5.03	-3.77	-4.50
11	709	1953.53	-39.33	2046.56	-8.44	-12.14	-20.58	-3.78	-4.66	-4.39	-4.05
12	710	2153.44	-43.30	2046.31	-8.69	-13.36	-22.06	-4.16	-4.53	-4.83	-3.86
13	711	2349.71	-46.11	2046.35	-8.66	-14.23	-22.88	-4.43	-4.22	-5.15	-3.51
14	712	2548.31	-47.44	2046.32	-8.68	-14.64	-23.32	-4.56	-4.12	-5.29	-3.39
15	713	2670.86	-49.18	2046.49	-8.51	-15.18	-23.69	-4.73	-3.78	-5.49	-3.02
16	714	2701.93	-57.78	2048.41	-6.59	-17.83	-24.42	-5.55	-1.04	-6.45	-0.14
17	715	2903.38	-52.81	2047.28	-7.72	-16.30	-24.02	-5.08	-2.65	-5.89	-1.83
18	716	3103.97	-52.36	2047.10	-7.91	-16.16	-24.06	-5.03	-2.87	-5.84	-2.06
19	717	3300.87	-45.50	2045.85	-9.15	-14.04	-23.19	-4.37	-4.78	-5.08	-4.07
20	718	3498.60	-38.17	2044.41	-10.59	-11.78	-22.37	-3.67	-6.93	-4.26	-6.33
21	719	3696.99	-38.51	2044.71	-10.29	-11.88	-22.17	-3.70	-6.59	-4.30	-5.99
22	720	3891.95	-39.69	2045.23	-9.77	-12.25	-22.02	-3.82	-5.95	-4.43	-5.34
23	721	4082.70	-34.65	2044.19	-10.81	-10.69	-21.51	-3.33	-7.48	-3.87	-6.95
24	722	4277.34	-25.83	2042.57	-12.43	-7.97	-20.40	-2.48	-9.95	-2.88	-9.55
25	723	4474.75	-24.42	2043.55	-11.45	-7.54	-18.99	-2.35	-9.10	-2.73	-8.72
26	724	4678.06	-30.48	2046.36	-8.65	-9.41	-18.05	-2.93	-5.71	-3.40	-5.24
27	725	4879.38	-42.96	2050.58	-4.42	-13.26	-17.68	-4.13	-0.29	-4.79	0.37
28	726	5170.21	-54.64	2056.33	1.32	-16.86	-15.54	-5.25	6.58	-6.10	7.42
29	727	5369.06	-66.12	2057.99	2.99	-20.40	-17.41	-6.36	9.35	-7.38	10.37
30	728	5568.11	-76.82	2058.01	3.01	-23.71	-20.70	-7.39	10.40	-8.57	11.58
31	729	5749.61	-75.59	2056.26	1.25	-23.33	-22.07	-7.27	8.52	-8.44	9.69
32	730	5952.64	-75.28	2055.58	0.58	-23.23	-22.65	-7.24	7.82	-8.40	8.98
33	731	6151.79	-71.33	2054.00	-1.00	-22.01	-23.01	-6.86	5.86	-7.96	6.96
34	732	6349.88	-77.94	2054.55	-0.45	-24.05	-24.50	-7.49	7.04	-8.70	8.25
35	733	6411.47	-82.32	2057.37	2.37	-25.40	-23.03	-7.91	10.28	-9.19	11.56
36	734	6546.92	-92.68	2059.54	4.53	-28.60	-24.07	-8.91	13.45	-10.34	14.88
37	735	6744.77	-102.63	2058.66	3.66	-31.67	-28.01	-9.87	13.53	-11.45	15.11
38	736	6916.66	-102.05	2059.00	4.00	-31.49	-27.50	-9.81	13.81	-11.39	15.38
39	737	7110.51	-82.45	2059.04	4.04	-25.44	-21.40	-7.93	11.97	-9.20	13.24
40	738	7307.71	-83.01	2060.39	5.39	-25.62	-20.23	-7.98	13.37	-9.26	14.65
41	739	7528.75	-88.03	2060.18	5.18	-27.17	-21.99	-8.46	13.64	-9.82	15.00
42	740	7684.64	-87.62	2059.40	4.40	-27.04	-22.64	-8.42	12.82	-9.78	14.18
43	741	7868.73	-85.12	2059.29	4.28	-26.27	-21.98	-8.18	12.47	-9.50	13.78
44	742	8064.08	-85.31	2061.30	6.30	-26.33	-20.03	-8.20	14.50	-9.52	15.82
45	743	8258.19	-95.40	2063.58	8.58	-29.44	-20.86	-9.17	17.75	-10.65	19.23
46	744	8501.27	-107.52	2064.49	9.49	-33.18	-23.69	-10.34	19.83	-12.00	21.49
47	745	8722.28	-111.28	2064.79	9.79	-34.34	-24.55	-10.70	20.49	-12.42	22.21

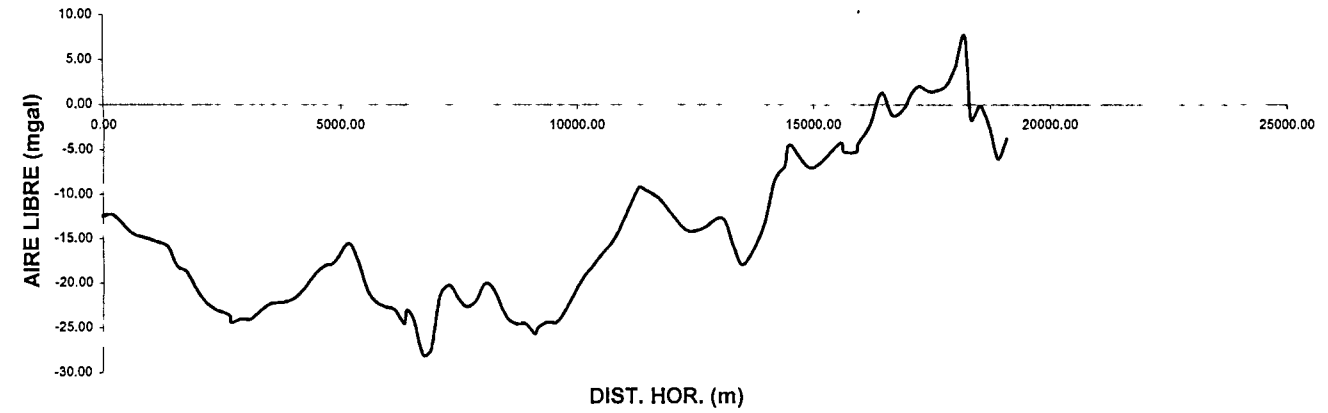
**Perfil G3.- Terraceria camino a Jurica, a Salitre y a San José El Alto**  
(El Puertecito a San José El Alto)

48	746	8917.08	-112.96	2065.29	10.29	-34.86	-24.57	-10.86	21.15	-12.61	22.90
49	747	9110.44	-112.86	2064.19	9.19	-34.83	-25.64	-10.85	20.04	-12.60	21.78
50	748	9185.41	-107.18	2063.09	8.08	-33.08	-24.99	-10.30	18.39	-11.96	20.05
51	749	9377.15	-101.94	2062.10	7.09	-31.46	-24.36	-9.80	16.90	-11.38	18.47
52	694	9631.80	-99.56	2061.57	6.57	-30.72	-24.15	-9.57	16.14	-11.11	17.68
53	695	10097.98	-87.52	2062.26	7.25	-27.01	-19.75	-8.41	15.67	-9.77	17.02
54	696	10312.69	-95.26	2066.11	11.11	-29.40	-18.29	-9.16	20.27	-10.63	21.74
55	697	10530.95	-91.22	2066.38	11.38	-28.15	-16.77	-8.77	20.15	-10.18	21.56
56	698	10846.15	-84.60	2066.55	11.54	-26.11	-14.56	-8.13	19.68	-9.44	20.99
57	752	11304.85	-75.78	2069.10	14.10	-23.39	-9.29	-7.29	21.39	-8.46	22.56
58	753	11415.51	-76.74	2069.23	14.23	-23.68	-9.45	-7.38	21.61	-8.56	22.79
59	754	11717.71	-82.51	2070.04	15.04	-25.46	-10.42	-7.93	22.97	-9.21	24.25
60	755	12015.01	-88.35	2070.01	15.00	-27.26	-12.26	-8.49	23.50	-9.86	24.87
61	756	12314.97	-94.70	2070.18	15.18	-29.22	-14.05	-9.10	24.28	-10.57	25.74
62	757	12642.36	-94.26	2070.16	15.16	-29.09	-13.93	-9.06	24.22	-10.52	25.68
63	758	13077.89	-89.07	2069.78	14.77	-27.49	-12.71	-8.56	23.34	-9.94	24.72
64	759	13324.08	-88.40	2066.30	11.29	-27.28	-15.99	-8.50	19.79	-9.87	21.16
65	760	13537.37	-85.38	2063.46	8.46	-26.35	-17.89	-8.21	16.66	-9.53	17.98
66	761	13943.37	-66.51	2061.66	6.66	-20.52	-13.87	-6.39	13.05	-7.42	14.08
67	762	14189.80	-43.77	2060.05	5.04	-13.51	-8.46	-4.21	9.25	-4.88	9.93
68	763	14397.27	-35.08	2058.92	3.92	-10.83	-6.91	-3.37	7.29	-3.92	7.83
69	764	14507.89	-29.58	2059.61	4.61	-9.13	-4.52	-2.84	7.45	-3.30	7.91
70	765	14966.48	-32.16	2057.86	2.86	-9.92	-7.06	-3.09	5.95	-3.59	6.45
71	766	15576.41	-22.82	2057.74	2.74	-7.04	-4.31	-2.19	4.93	-2.55	5.28
72	767	15652.47	-32.29	2059.70	4.70	-9.96	-5.27	-3.10	7.80	-3.60	8.30
73	768	15917.74	-30.45	2059.14	4.14	-9.40	-5.26	-2.93	7.06	-3.40	7.53
74	769	15954.84	-28.51	2059.43	4.43	-8.80	-4.37	-2.74	7.17	-3.18	7.61
75	770	16204.72	-18.61	2058.41	3.41	-5.74	-2.33	-1.79	5.20	-2.08	5.49
76	771	16446.08	-4.81	2057.74	2.74	-1.48	1.26	-0.46	3.20	-0.54	3.28
77	772	16678.80	-7.52	2056.13	1.13	-2.32	-1.20	-0.72	1.85	-0.84	1.96
78	773	16918.99	-7.11	2056.70	1.70	-2.19	-0.50	-0.68	2.38	-0.79	2.49
79	774	17056.99	-4.12	2057.24	2.24	-1.27	0.96	-0.40	2.63	-0.46	2.69
80	775	17196.11	0.37	2056.75	1.75	0.11	1.86	0.04	1.71	0.04	1.70
81	776	17292.90	3.95	2055.68	0.68	1.22	1.90	0.38	0.30	0.44	0.24
82	777	17441.89	5.45	2054.75	-0.25	1.68	1.43	0.52	-0.77	0.61	-0.86
83	778	17626.52	6.88	2054.38	-0.62	2.12	1.50	0.66	-1.28	0.77	-1.39
84	779	17819.53	10.00	2054.00	-1.00	3.09	2.09	0.96	-1.96	1.12	-2.12
85	780	18004.16	17.68	2053.68	-1.32	5.46	4.14	1.70	-3.02	1.97	-3.29
86	781	18197.16	31.29	2052.91	-2.09	9.66	7.56	3.01	-5.10	3.49	-5.59
87	782	18331.07	17.68	2047.99	-7.01	5.46	-1.55	1.70	-8.71	1.97	-8.98
88	783	18518.94	31.29	2045.19	-9.81	9.66	-0.16	3.01	-12.82	3.49	-13.31
89	784	18726.11	22.47	2045.53	-9.47	6.93	-2.54	2.16	-11.63	2.51	-11.98
90	785	18906.20	22.2	2042.14	-12.86	6.85	-6.01	2.13	-15.00	2.48	-15.34
91	786	19086.29	34.6	2040.46	-14.55	10.68	-3.87	3.33	-17.87	3.86	-18.41

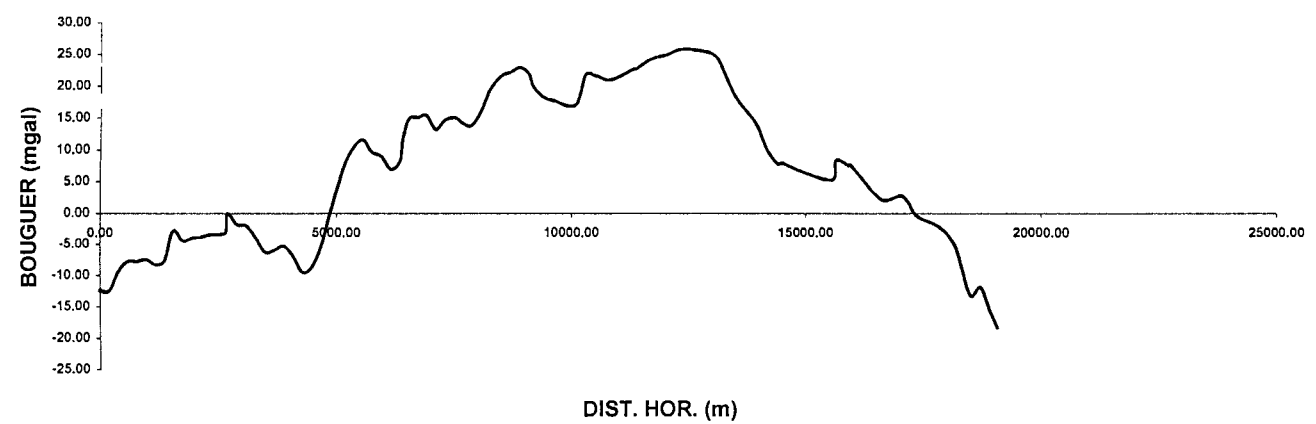
PERFIL TOPOGRÁFICO (T3)



ANOMALÍA DE AIRE LIBRE (G3)



ANOMALÍA DE BOUGUER (G3)



**Perfil G4.- Carretera Querétaro-S.L.P. y libre a Celaya**  
(Sta. Rosa Jauregui a La Negra)

Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G_c_red	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dh	dg Bouguer	0.0418*2.67*dh	dgBouguer
1	,2,66,67,13	0.00	0.00	2034.64	-14.57	0.00	-14.57	0.00	-14.57	0.00	-14.57
2	3	204.70	2.25	2034.73	-14.27	0.69	-13.58	0.22	-14.49	0.25	-14.52
3	4	457.19	9.03	2034.11	-14.89	2.79	-12.10	0.87	-15.76	1.01	-15.90
4	5	686.40	18.25	2033.77	-15.23	5.63	-9.60	1.75	-16.98	2.04	-17.27
5	6	903.54	22.72	2033.00	-15.88	7.01	-8.87	2.18	-18.06	2.54	-18.42
6	7	1105.73	22.69	2033.17	-15.83	7.00	-8.83	2.18	-18.01	2.53	-18.36
7	8	1392.43	13.76	2034.82	-14.18	4.25	-9.93	1.32	-15.50	1.54	-15.72
8	9	1695.17	5.82	2036.48	-12.52	1.80	-10.72	0.56	-13.08	0.65	-13.17
9	10	1946.91	7.10	2035.61	-13.33	2.19	-11.14	0.68	-14.01	0.79	-14.12
10	11	2170.53	14.69	2033.65	-15.35	4.53	-10.82	1.41	-16.76	1.64	-16.99
11	12	2433.76	22.24	2032.99	-16.01	6.86	-9.15	2.14	-18.15	2.48	-18.49
12	13	2786.26	24.86	2030.61	-18.39	7.67	-10.72	2.39	-20.78	2.77	-21.16
13	14	3093.49	19.16	2031.09	-17.92	5.91	-12.00	1.84	-19.76	2.14	-20.05
14	15	3360.81	10.08	2032.58	-16.42	3.11	-13.31	0.97	-17.39	1.12	-17.54
15	16	3657.73	0.80	2033.34	-15.67	0.25	-15.42	0.08	-15.74	0.09	-15.75
16	17	3933.73	-3.43	2035.25	-13.75	-1.06	-14.81	-0.33	-13.42	-0.38	-13.37
17	18	4197.13	-7.36	2036.42	-12.58	-2.27	-14.86	-0.71	-11.88	-0.82	-11.76
18	19	4485.82	-14.55	2039.26	-9.78	-4.49	-14.27	-1.40	-8.38	-1.62	-8.15
19	20	4729.34	-23.67	2041.19	-7.81	-7.31	-15.12	-2.28	-5.53	-2.64	-5.17
20	21	4985.92	-32.62	2043.54	-5.44	-10.07	-15.51	-3.14	-2.30	-3.64	-1.80
21	22	5260.13	-41.05	2045.17	-3.83	-12.67	-16.50	-3.95	0.12	-4.58	0.75
22	23	5516.07	-47.00	2046.05	-2.95	-14.51	-17.46	-4.52	1.57	-5.25	2.30
23	24	5790.09	-50.77	2047.24	-1.76	-15.67	-17.43	-4.88	3.12	-5.67	3.91
24	25	6059.35	-59.01	2049.30	0.29	-18.21	-17.92	-5.67	5.97	-6.59	6.88
25	26	6351.25	-69.61	2051.91	2.91	-21.48	-18.57	-6.69	9.60	-7.77	10.68
26	27	6616.61	-75.32	2055.04	6.03	-23.24	-17.21	-7.24	13.28	-8.41	14.44
27	28	6885.39	-85.29	2057.68	8.68	-26.32	-17.64	-8.20	16.88	-9.52	18.20
28	29	7301.87	-92.95	2059.55	10.54	-28.69	-18.14	-8.94	19.48	-10.37	20.92
29	30	7678.77	-104.25	2061.54	12.53	-32.17	-19.64	-10.02	22.56	-11.64	24.17
30	31	7982.47	-111.26	2062.87	13.87	-34.34	-20.47	-10.70	24.57	-12.42	26.29
31	32	8290.17	-117.55	2064.03	15.02	-36.28	-21.25	-11.30	26.33	-13.12	28.14
32	33	8610.78	-124.10	2066.03	17.02	-38.30	-21.27	-11.93	28.96	-13.85	30.88
33	34	8897.06	-129.78	2065.83	16.83	-40.05	-23.22	-12.48	29.31	-14.48	31.31
34	35	9202.12	-132.89	2066.02	17.01	-41.01	-24.00	-12.78	29.79	-14.83	31.85
35	36	9479.22	-134.84	2066.84	17.03	-41.61	-24.58	-12.96	30.00	-15.05	32.08
36	37	9771.89	-136.64	2067.52	18.52	-42.17	-23.65	-13.14	31.66	-15.25	33.77
37	38	10107.50	-138.39	2067.66	18.66	-42.71	-24.05	-13.31	31.96	-15.45	34.10
38	39	10455.94	-138.73	2067.13	18.13	-42.81	-24.68	-13.34	31.47	-15.48	33.61
39	40	10776.00	-136.73	2065.63	16.63	-42.20	-25.57	-13.15	29.78	-15.26	31.89
40	41	10989.80	-137.17	2065.55	16.54	-42.33	-25.79	-13.19	29.73	-15.31	31.85
41	42	11193.80	-140.30	2066.17	17.17	-43.30	-26.13	-13.49	30.66	-15.66	32.83
42	43	11401.80	-142.79	2066.44	17.44	-44.07	-26.63	-13.73	31.17	-15.94	33.38
43	44	11597.50	-145.31	2066.68	17.68	-44.84	-27.16	-13.97	31.65	-16.22	33.90
44	45	11802.24	-147.12	2066.70	17.70	-45.40	-27.70	-14.14	31.84	-16.42	34.12
45	46	12006.84	-147.86	2066.75	17.75	-45.63	-27.89	-14.22	31.96	-16.50	34.25
46	47	12209.97	-148.19	2066.47	17.47	-45.73	-28.27	-14.25	31.71	-16.54	34.00
47	48	12416.14	-149.05	2066.40	17.40	-46.00	-28.60	-14.33	31.73	-16.64	34.04
48	49	12618.03	-150.96	2066.50	17.50	-46.59	-29.09	-14.51	32.01	-16.85	34.35

**Perfil G4.- Carretera Querétaro-S.L.P. y libre a Celaya  
(Sta. Rosa Jauregui a La Negreta)**

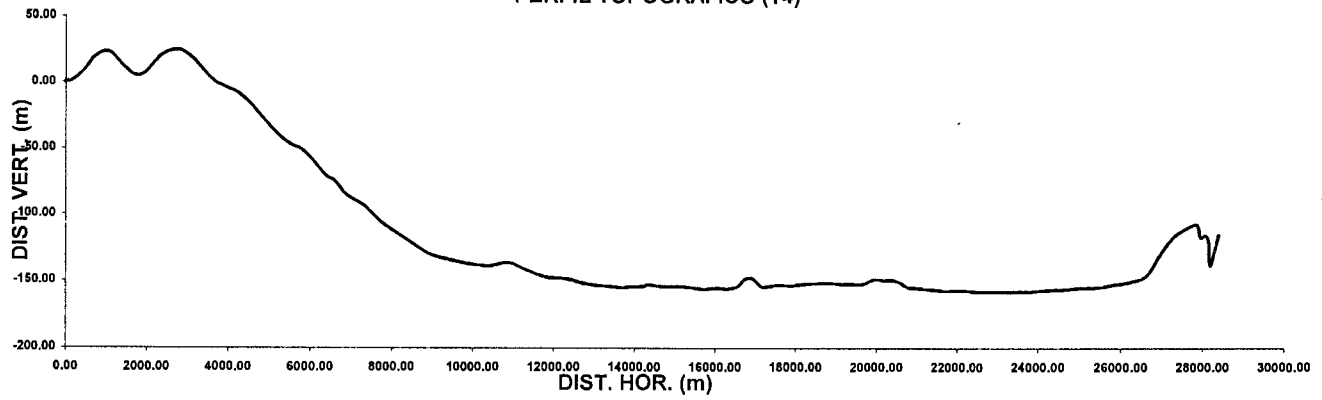
Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G_c_red	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dh	dg Bouguer	0.0418*2.67*dh	dgBouguer
49	50	12819.16	-152.59	2066.44	17.44	-47.09	-29.65	-14.67	32.11	-17.03	34.47
50	51	13022.17	-153.56	2066.49	17.49	-47.39	-29.90	-14.76	32.25	-17.14	34.62
51	52	13222.11	-153.91	2066.27	17.26	-47.50	-30.23	-14.80	32.06	-17.18	34.44
52	53	13422.85	-154.35	2066.31	17.30	-47.63	-30.33	-14.84	32.14	-17.23	34.53
53	54	13698.58	-155.19	2066.57	17.57	-47.89	-30.32	-14.92	32.49	-17.32	34.89
54	55	13985.02	-154.52	2066.53	17.52	-47.68	-30.16	-14.86	32.38	-17.25	34.77
55	56	14251.91	-154.16	2066.49	17.41	-47.57	-30.17	-14.82	32.23	-17.20	34.61
56	57,58	14308.38	-152.94	2065.80	16.80	-47.20	-30.39	-14.70	31.51	-17.07	33.87
57	59	14636.20	-154.28	2065.58	16.57	-47.61	-31.04	-14.83	31.41	-17.22	33.79
58	60	14933.50	-154.22	2065.77	16.76	-47.59	-30.83	-14.83	31.59	-17.21	33.98
59	61	15252.39	-154.70	2065.47	16.47	-47.74	-31.27	-14.87	31.34	-17.27	33.74
60	62	15538.23	-155.61	2065.40	16.40	-48.02	-31.63	-14.96	31.36	-17.37	33.76
61	63	15771.95	-156.22	2064.96	15.96	-48.21	-32.26	-15.02	30.97	-17.44	33.39
62	64	16068.53	-155.46	2064.78	15.78	-47.98	-32.20	-14.95	30.73	-17.35	33.13
63	65,68	16317.44	-156.06	2064.86	15.86	-48.16	-32.30	-15.00	30.87	-17.42	33.28
64	69	16559.24	-154.34	2065.09	16.08	-47.63	-31.54	-14.84	30.92	-17.23	33.31
65	70	16764.90	-148.48	2063.00	14.00	-45.82	-31.82	-14.27	28.27	-16.57	30.57
66	71	16948.45	-148.33	2063.38	14.38	-45.77	-31.39	-14.26	28.64	-16.55	30.93
67	72	17147.72	-154.20	2065.24	16.24	-47.59	-31.35	-14.82	31.06	-17.21	33.45
68	73	17346.27	-154.24	2065.70	16.70	-47.60	-30.90	-14.83	31.53	-17.21	33.91
69	74	17542.65	-153.22	2067.18	18.18	-47.28	-29.11	-14.73	32.91	-17.10	35.28
70	75	17732.96	-153.42	2067.73	18.73	-47.35	-28.62	-14.75	33.47	-17.12	35.85
71	76	17927.60	-153.60	2067.94	18.94	-47.40	-28.46	-14.77	33.71	-17.14	36.08
72	77	18138.13	-152.66	2067.90	18.88	-47.11	-28.24	-14.68	33.55	-17.04	35.91
73	78	18335.53	-152.23	2067.72	18.72	-46.98	-28.26	-14.64	33.36	-16.99	35.71
74	79	18537.68	-151.99	2066.53	17.52	-46.90	-29.38	-14.61	32.14	-16.96	34.49
75	80	18741.28	-151.78	2065.94	16.94	-46.84	-29.90	-14.59	31.53	-16.94	33.88
76	81	18939.29	-152.01	2065.83	16.83	-46.91	-30.08	-14.61	31.44	-16.96	33.79
77	82	19144.08	-152.46	2065.95	16.95	-47.05	-30.10	-14.66	31.61	-17.02	33.97
78	83	19316.58	-152.24	2065.59	16.59	-46.98	-30.39	-14.64	31.23	-16.99	33.58
79	84	19520.00	-152.66	2065.68	16.68	-47.11	-30.43	-14.68	31.35	-17.04	33.71
80	85	19709.89	-152.04	2065.52	16.51	-46.92	-30.40	-14.62	31.13	-16.97	33.48
81	86	19972.28	-148.90	2063.97	14.97	-45.95	-30.98	-14.31	29.28	-16.62	31.59
82	87	20177.78	-149.74	2065.09	16.08	-46.21	-30.12	-14.40	30.48	-16.71	32.80
83	88	20385.57	-149.49	2064.63	15.63	-46.13	-30.51	-14.37	30.00	-16.68	32.31
84	89	20582.38	-151.25	2064.92	15.92	-46.68	-30.76	-14.54	30.46	-16.88	32.80
85	90	20758.18	-154.31	2064.94	15.94	-47.62	-31.68	-14.84	30.78	-17.22	33.16
86	91	20954.33	-155.26	2063.16	14.16	-47.91	-33.76	-14.93	29.08	-17.33	31.48
87	92	21152.67	-156.04	2062.70	13.70	-48.15	-34.45	-15.00	28.70	-17.41	31.11
88	93	21344.19	-156.54	2062.64	13.64	-48.31	-34.67	-15.05	28.69	-17.47	31.11
89	94	21540.27	-157.08	2062.32	13.31	-48.47	-35.16	-15.10	28.42	-17.53	30.85
90	95	21747.79	-157.83	2062.15	13.15	-48.71	-35.56	-15.17	28.32	-17.61	30.76
91	96	21939.35	-157.22	2062.16	13.16	-48.52	-35.36	-15.11	28.27	-17.55	30.70
92	97	22130.10	-157.41	2062.45	13.45	-48.58	-35.13	-15.13	28.58	-17.57	31.02
93	98	22343.95	-157.76	2062.43	13.43	-48.69	-35.26	-15.17	28.60	-17.61	31.04
94	99	22540.01	-158.20	2061.79	12.79	-48.82	-36.03	-15.21	28.00	-17.66	30.45
95	100	22784.35	-158.29	2061.53	12.52	-48.85	-36.32	-15.22	27.74	-17.67	30.19
96	101	22975.90	-158.29	2062.06	13.05	-48.85	-35.79	-15.22	28.27	-17.67	30.72

**Perfil G4.- Carretera Querétaro-S.L.P. y libre a Celaya**  
(Sta. Rosa Jauregui a La Negreta)

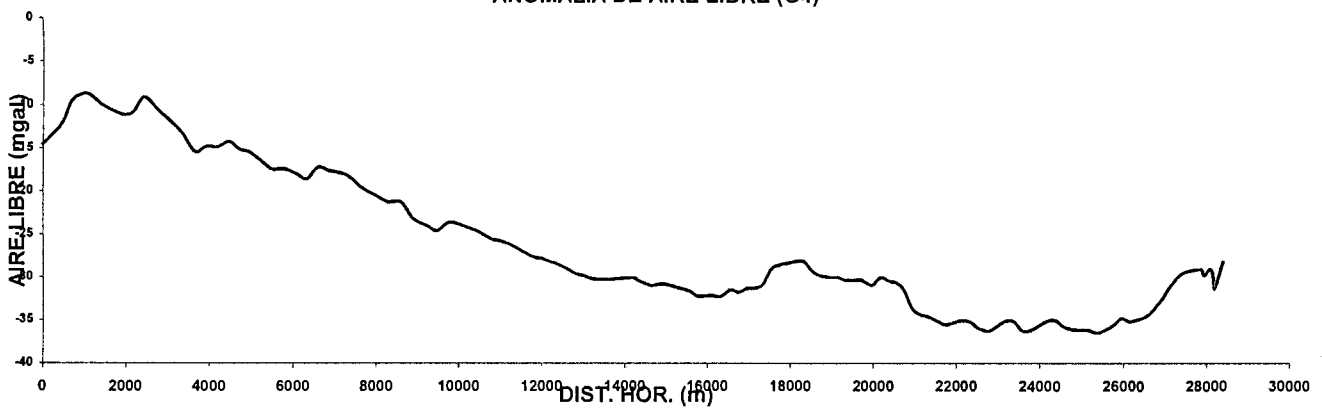
Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G_c_red	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dh	dg Bouguer	0.0418*2.67*dh	dgBouguer
97	102	23177.27	-158.19	2062.62	13.61	-48.82	-35.20	-15.21	28.82	-17.66	31.27
98	103	23379.49	-158.15	2062.62	13.62	-48.81	-35.18	-15.20	28.82	-17.65	31.27
99	104	23573.90	-158.10	2061.54	12.53	-48.79	-36.25	-15.20	27.73	-17.64	30.18
100	105	23769.19	-157.90	2061.48	12.48	-48.73	-36.25	-15.18	27.66	-17.62	30.10
101	106	23966.55	-157.75	2061.94	12.94	-48.68	-35.74	-15.17	28.11	-17.61	30.55
102	107	24191.59	-157.32	2062.39	13.39	-48.55	-35.16	-15.12	28.51	-17.56	30.95
103	108	24386.92	-156.84	2062.28	13.28	-48.40	-35.12	-15.08	28.36	-17.50	30.78
104	109	24579.15	-156.54	2061.48	12.48	-48.31	-35.83	-15.05	27.52	-17.47	29.95
105	110	24812.88	-156.06	2061.03	12.02	-48.16	-36.14	-15.00	27.03	-17.42	29.44
106	111	24997.17	-155.64	2060.86	11.85	-48.03	-36.18	-14.96	26.82	-17.37	29.23
107	112	25190.33	-155.44	2060.72	11.72	-47.97	-36.25	-14.94	26.66	-17.35	29.06
108	113	25388.21	-155.25	2060.35	11.35	-47.91	-36.56	-14.93	26.28	-17.33	28.68
109	114	25587.20	-154.54	2060.51	11.51	-47.69	-36.18	-14.86	26.37	-17.25	28.76
110	115	25795.40	-153.31	2060.74	11.74	-47.31	-35.57	-14.74	26.48	-17.11	28.85
111	116	25966.50	-152.51	2061.21	12.21	-47.07	-34.86	-14.66	26.87	-17.02	29.23
112	117	26151.46	-151.47	2060.52	11.52	-46.74	-35.22	-14.56	26.08	-16.90	28.42
113	118	26310.51	-150.22	2060.27	11.26	-46.36	-35.09	-14.44	25.71	-16.77	28.03
114	119	26530.86	-148.36	2060.08	11.07	-45.78	-34.71	-14.26	25.34	-16.56	27.63
115	120	26708.26	-143.64	2059.33	10.33	-44.33	-34.00	-13.81	24.14	-16.03	26.36
116	121	26912.44	-132.98	2057.29	8.28	-41.04	-32.75	-12.78	21.07	-14.84	23.13
117	122	27163.95	-121.46	2055.53	6.52	-37.48	-30.96	-11.68	18.20	-13.56	20.08
118	123	27355.56	-115.35	2054.75	5.75	-35.60	-29.85	-11.09	16.83	-12.87	18.62
119	124	27550.50	-111.45	2054.00	5.00	-34.39	-29.40	-10.71	15.71	-12.44	17.43
120	125	27752.07	-108.27	2053.23	4.23	-33.41	-29.19	-10.41	14.63	-12.08	16.31
121	126	27882.78	-108.07	2053.17	4.17	-33.35	-29.18	-10.39	14.56	-12.06	16.23
122	127	27954.18	-116.92	2055.23	6.23	-36.08	-29.85	-11.24	17.47	-13.05	19.28
123	128	28086.20	-115.54	2055.55	6.54	-35.66	-29.11	-11.11	17.65	-12.90	19.44
124	129	28152.44	-120.61	2056.51	7.50	-37.22	-29.72	-11.60	19.10	-13.46	20.97
125	130	28197.77	-138.11	2060.29	11.28	-42.62	-31.34	-13.28	24.56	-15.41	26.70
126	131	28392.54	-115.84	2056.47	7.47	-35.75	-28.28	-11.14	18.60	-12.93	20.39



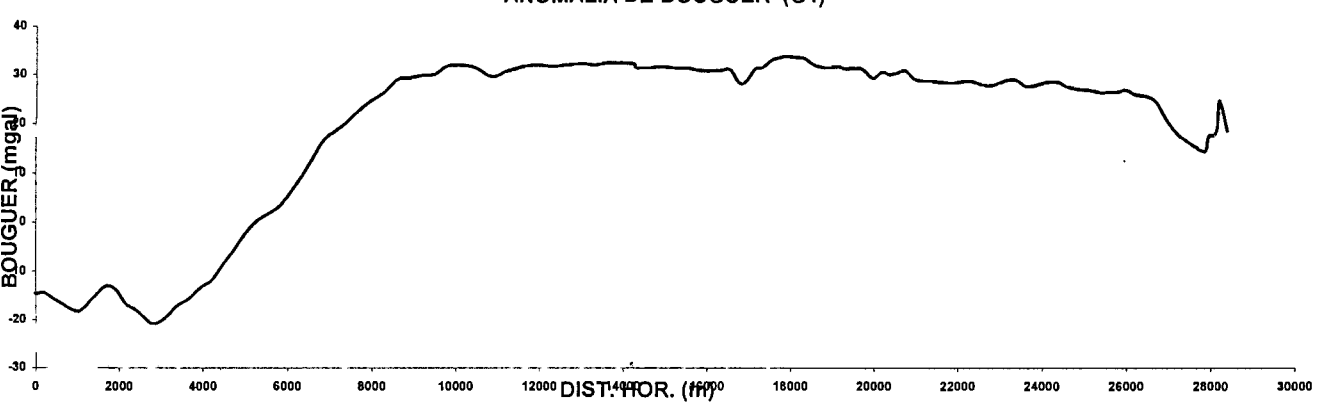
PERFIL TOPOGRÁFICO (T4)



ANOMALÍA DE AIRE LIBRE (G4)



ANOMALÍA DE BOUGUER (G4)

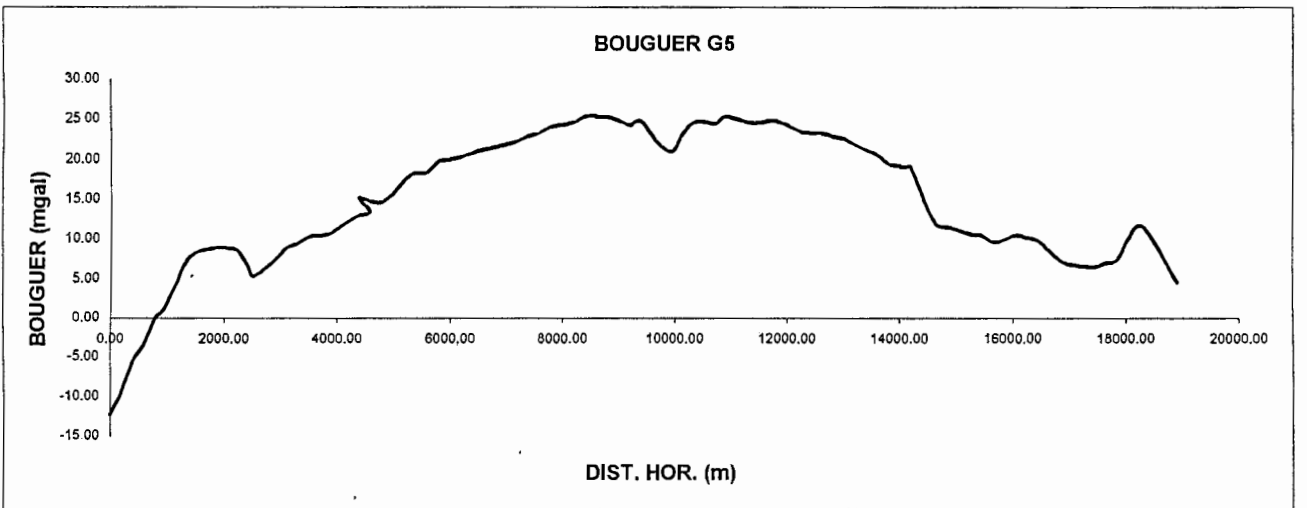
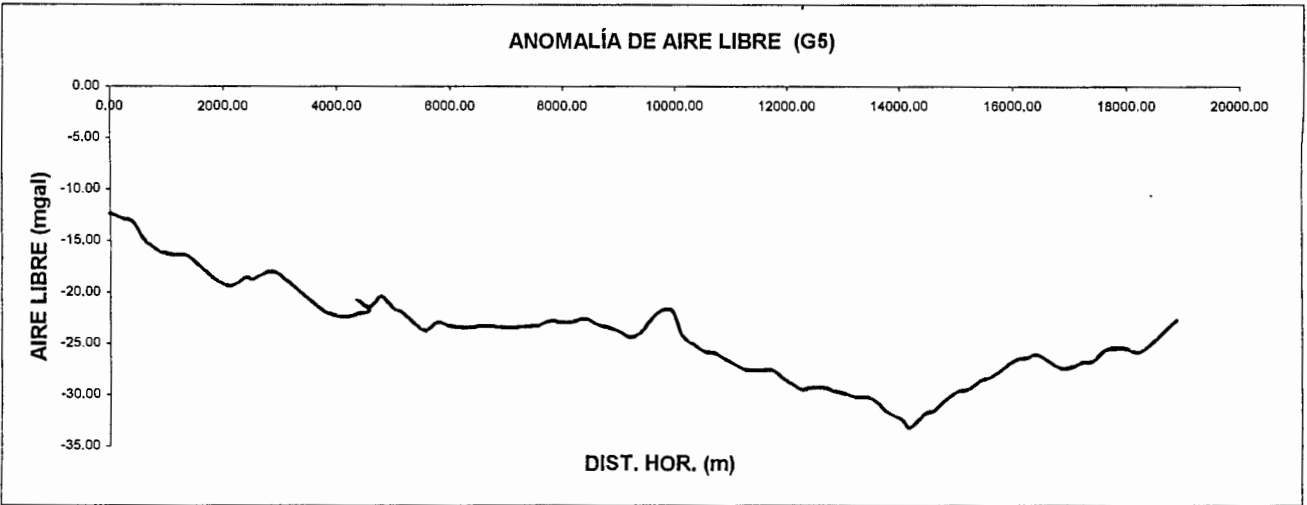
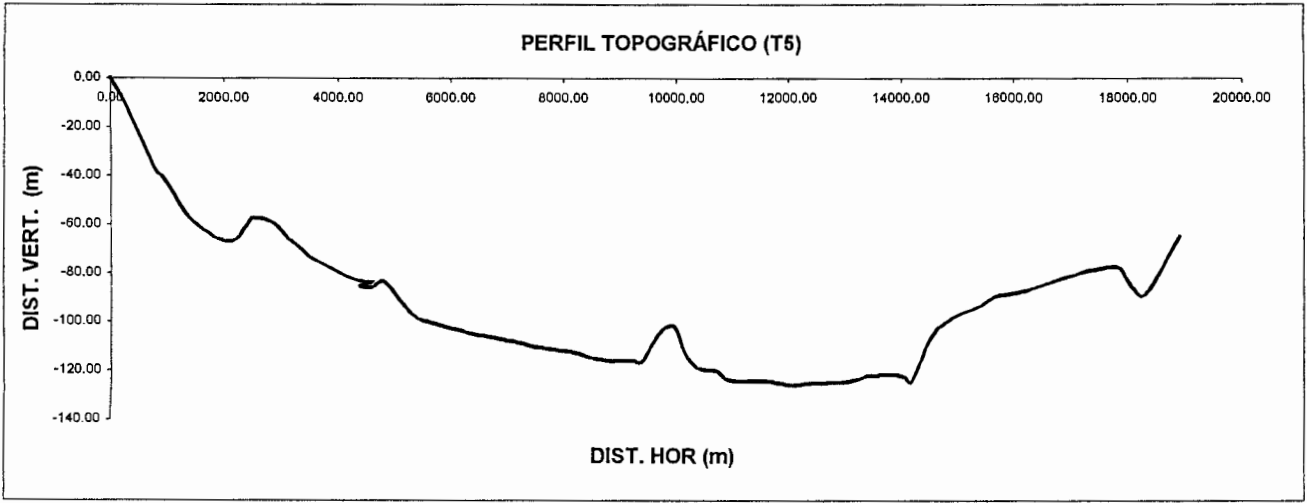


**Perfil G5.- Carretera a Tlacote y caminos de terracería**  
(Mompani-Tlacote el Bajo-Los Angeles, Corregidora)

Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G_c_red	0.3086*dH	dg Faya	-0.0418x2.3dH	dg Bouguer	-0.0418*2.67*dH	dg Bouguer
1	1	0.00	0.00	2042.60	-12.40	0.00	-12.40	0.00	-12.40	0.00	-12.40
2	2	196.07	-7.71	2044.54	-10.46	-2.38	-12.84	-0.74	-9.72	-0.86	-9.60
3	3	407.21	-18.00	2047.36	-7.65	-5.55	-13.20	-1.73	-5.91	-2.01	-5.64
4	4	594.41	-27.33	2048.55	-6.45	-8.43	-14.88	-2.63	-3.82	-3.05	-3.40
5	5	793.31	-37.60	2050.84	-4.17	-11.60	-15.77	-3.61	-0.55	-4.20	0.03
6	6	932.29	-40.86	2051.43	-3.57	-12.61	-16.18	-3.93	0.35	-4.56	0.99
7	7	1129.31	-48.25	2053.49	-1.51	-14.89	-16.40	-4.64	3.12	-5.38	3.87
8	8	1340.20	-56.16	2055.92	0.92	-17.33	-16.42	-5.40	6.31	-6.27	7.18
9	9	1540.43	-60.85	2056.52	1.52	-18.78	-17.26	-5.85	7.37	-6.79	8.31
10	11	1729.50	-63.76	2056.50	1.50	-19.68	-18.18	-6.13	7.63	-7.12	8.62
11	12	1909.94	-66.19	2056.47	1.47	-20.43	-18.96	-6.36	7.83	-7.39	8.86
12	13	2073.70	-67.20	2056.35	1.34	-20.74	-19.39	-6.46	7.81	-7.50	8.84
13	14	2238.47	-66.09	2056.18	1.18	-20.39	-19.22	-6.35	7.53	-7.38	8.55
14	15	2422.60	-60.22	2054.98	-0.02	-18.58	-18.60	-5.79	5.77	-6.72	6.70
15	16	2539.40	-57.30	2053.91	-1.09	-17.68	-18.77	-5.51	4.42	-6.39	5.30
16	17	2884.54	-59.73	2055.43	0.43	-18.43	-18.00	-5.74	6.17	-6.67	7.10
17	18	3133.00	-66.13	2056.47	1.47	-20.41	-18.94	-6.36	7.83	-7.38	8.85
18	19	3326.26	-69.65	2056.68	1.68	-21.49	-19.82	-6.70	8.37	-7.77	9.45
19	20	3569.86	-74.58	2057.02	2.01	-23.01	-21.00	-7.17	9.18	-8.32	10.34
20	21	3844.16	-77.63	2056.82	1.81	-23.96	-22.14	-7.46	9.28	-8.66	10.48
21	22,23,45	4156.76	-81.58	2057.77	2.76	-25.18	-22.41	-7.84	10.61	-9.10	11.87
22	24	4382.03	-83.33	2058.57	3.56	-25.72	-22.15	-8.01	11.58	-9.30	12.86
23	25	4589.19	-83.96	2059.02	4.02	-25.91	-21.89	-8.07	12.09	-9.37	13.39
24	26	4397.81	-85.63	2060.50	5.50	-26.43	-20.93	-8.23	13.73	-9.56	15.05
25	27	4603.79	-86.14	2060.09	5.08	-26.58	-21.50	-8.28	13.37	-9.61	14.70
26	28	4793.53	-83.41	2060.27	5.27	-25.74	-20.47	-8.02	13.29	-9.31	14.58
27	29	4996.13	-88.35	2060.72	5.72	-27.27	-21.55	-8.49	14.21	-9.86	15.58
28	30	5197.19	-94.25	2061.89	6.89	-29.09	-22.20	-9.06	15.95	-10.52	17.40
29	31	5399.42	-98.77	2062.27	7.27	-30.48	-23.21	-9.50	16.77	-11.02	18.29
30	32	5592.62	-100.23	2062.09	7.08	-30.93	-23.85	-9.64	16.72	-11.19	18.27
31	33	5794.07	-101.47	2063.32	8.32	-31.31	-22.99	-9.76	18.08	-11.33	19.65
32	34	5996.87	-102.88	2063.39	8.39	-31.75	-23.36	-9.89	18.28	-11.48	19.87
33	35	6199.15	-104.03	2063.60	8.59	-32.10	-23.51	-10.00	18.60	-11.61	20.21
34	36	6398.13	-105.16	2063.94	8.94	-32.45	-23.51	-10.11	19.05	-11.74	20.68
35	37	6596.22	-105.96	2064.32	9.31	-32.70	-23.39	-10.19	19.50	-11.83	21.14
36	38	6794.00	-106.83	2064.51	9.50	-32.97	-23.46	-10.27	19.78	-11.92	21.43
37	39	6997.59	-107.78	2064.73	9.73	-33.26	-23.53	-10.36	20.09	-12.03	21.76
38	40	7202.25	-108.79	2065.05	10.04	-33.57	-23.53	-10.46	20.50	-12.14	22.19
39	41	7401.08	-110.09	2065.54	10.54	-33.98	-23.43	-10.58	21.12	-12.29	22.83
40	42	7603.02	-110.85	2065.87	10.86	-34.21	-23.34	-10.66	21.52	-12.37	23.24
41	43	7809.92	-111.53	2066.54	11.53	-34.42	-22.88	-10.72	22.26	-12.45	23.98
42	44,46	8010.21	-112.22	2066.66	11.66	-34.63	-22.97	-10.79	22.45	-12.52	24.18
43	47	8217.51	-113.02	2066.94	11.94	-34.88	-22.94	-10.87	22.80	-12.61	24.55
44	48	8410.84	-114.18	2067.56	12.55	-35.24	-22.68	-10.98	23.53	-12.74	25.30
45	49	8626.44	-115.40	2067.42	12.42	-35.61	-23.19	-11.09	23.51	-12.88	25.30
46	50	8819.46	-115.95	2067.27	12.27	-35.78	-23.51	-11.15	23.42	-12.94	25.21
47	51	9030.63	-115.90	2066.81	11.80	-35.77	-23.96	-11.14	22.95	-12.93	24.74
48	52	9208.29	-115.84	2066.27	11.27	-35.75	-24.48	-11.14	22.41	-12.93	24.20

**Perfil G5.- Carretera a Tlacote y caminos de terraceria  
(Mompani-Tlacote el Bajo-Los Angeles, Corregidora)**

Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G-campo	G_c_red	0.3086*dH	dg Faya	-0.0418x2.3dH	dg Bouguer	-0.0418*2.67*dH	dg Bouguer
49	53	9403.57	-116.03	2066.75	11.75	-35.81	-24.06	-11.16	22.90	-12.95	24.70
50	54	9692.13	-105.32	2065.31	10.31	-32.50	-22.19	-10.13	20.44	-11.75	22.06
51	55	9967.61	-101.89	2064.57	9.56	-31.44	-21.88	-9.80	19.36	-11.37	20.94
52	56	10154.53	-112.88	2065.52	10.51	-34.84	-24.32	-10.85	21.37	-12.60	23.11
53	57	10363.20	-118.58	2066.37	11.37	-36.59	-25.22	-11.40	22.77	-13.23	24.60
54	58	10556.00	-119.83	2066.16	11.16	-36.98	-25.83	-11.52	22.68	-13.37	24.53
55	59	10740.33	-120.18	2066.04	11.04	-37.09	-26.05	-11.55	22.59	-13.41	24.45
56	60	10908.83	-123.58	2066.51	11.51	-38.14	-26.63	-11.88	23.39	-13.79	25.30
57	61	11215.03	-124.15	2065.81	10.81	-38.31	-27.50	-11.94	22.75	-13.86	24.67
58	62	11391.85	-124.08	2065.60	10.59	-38.29	-27.69	-11.93	22.52	-13.85	24.44
59	63	11563.99	-124.22	2065.68	10.68	-38.33	-27.65	-11.94	22.62	-13.86	24.54
60	64	11747.12	-124.72	2065.86	10.86	-38.49	-27.63	-11.99	22.85	-13.92	24.78
61	65,66,101	11975.71	-125.71	2065.24	10.24	-38.79	-28.55	-12.09	22.33	-14.03	24.27
62	67	12107.16	-125.68	2064.78	9.77	-38.79	-29.01	-12.08	21.86	-14.03	23.80
63	68	12273.37	-125.61	2064.27	9.27	-38.76	-29.49	-12.08	21.35	-14.02	23.29
64	69	12470.27	-125.10	2064.30	9.29	-38.60	-29.31	-12.03	21.32	-13.96	23.26
65	70	12653.95	-124.88	2064.23	9.23	-38.54	-29.31	-12.01	21.23	-13.94	23.16
66	71	12832.36	-124.68	2063.87	8.87	-38.48	-29.61	-11.99	20.86	-13.91	22.78
67	72	13012.23	-124.74	2063.60	8.60	-38.49	-29.89	-11.99	20.59	-13.92	22.52
68	73,74	13243.06	-123.73	2062.89	7.89	-38.18	-30.29	-11.90	19.79	-13.81	21.70
69	75	13460.39	-121.79	2062.35	7.34	-37.58	-30.24	-11.71	19.05	-13.59	20.94
70	76	13630.59	-121.92	2061.81	6.80	-37.62	-30.82	-11.72	18.53	-13.61	20.41
71	77	13798.43	-121.65	2060.85	5.85	-37.54	-31.69	-11.70	17.55	-13.58	19.43
72	78	14050.77	-122.28	2060.33	5.33	-37.73	-32.40	-11.76	17.09	-13.65	18.98
73	79	14204.56	-124.10	2060.07	5.07	-38.30	-33.23	-11.93	17.00	-13.85	18.92
74	80	14465.60	-110.01	2057.04	2.03	-33.95	-31.91	-10.58	12.61	-12.28	14.31
75	81	14636.64	-103.41	2055.35	0.35	-31.91	-31.56	-9.94	10.29	-11.54	11.89
76	82	14791.18	-100.45	2055.26	0.26	-31.00	-30.74	-9.66	9.92	-11.21	11.47
77	83	15038.84	-97.11	2055.22	0.22	-29.97	-29.75	-9.34	9.55	-10.84	11.05
78	84	15250.77	-95.37	2054.92	-0.08	-29.43	-29.51	-9.17	9.09	-10.64	10.56
79	85	15446.00	-93.09	2055.04	0.04	-28.73	-28.69	-8.95	8.99	-10.39	10.43
80	86	15644.45	-90.09	2054.53	-0.48	-27.80	-28.28	-8.66	8.19	-10.05	9.58
81	87	15850.05	-88.89	2054.92	-0.08	-27.43	-27.51	-8.55	8.47	-9.92	9.84
82	88	16057.35	-88.28	2055.56	0.56	-27.24	-26.68	-8.49	9.05	-9.85	10.41
83	89	16249.68	-87.16	2055.40	0.40	-26.90	-26.50	-8.38	8.78	-9.73	10.13
84	90	16443.92	-85.55	2055.22	0.22	-26.40	-26.18	-8.22	8.44	-9.55	9.76
85	91	16644.11	-83.91	2054.13	-0.87	-25.89	-26.76	-8.07	7.20	-9.36	8.49
86	92	16855.78	-82.41	2052.99	-2.01	-25.43	-27.45	-7.92	5.91	-9.20	7.18
87	93	17047.22	-81.05	2052.68	-2.32	-25.01	-27.33	-7.79	5.47	-9.05	6.73
88	94	17242.38	-79.57	2052.62	-2.39	-24.55	-26.94	-7.65	5.26	-8.88	6.49
89	95	17447.78	-78.76	2052.61	-2.39	-24.30	-26.69	-7.57	5.18	-8.79	6.40
90	96	17644.15	-77.73	2053.30	-1.71	-23.99	-25.69	-7.47	5.77	-8.67	6.97
91	97	17857.21	-78.18	2053.66	-1.34	-24.12	-25.46	-7.52	6.18	-8.72	7.38
92	98	18034.03	-84.68	2055.53	0.53	-26.13	-25.60	-8.14	8.67	-9.45	9.98
93	99	18303.87	-88.61	2056.58	1.57	-27.34	-25.77	-8.52	10.09	-9.89	11.46
94	100	18904.02	-64.99	2052.25	-2.75	-20.05	-22.80	-6.25	3.50	-7.25	4.50



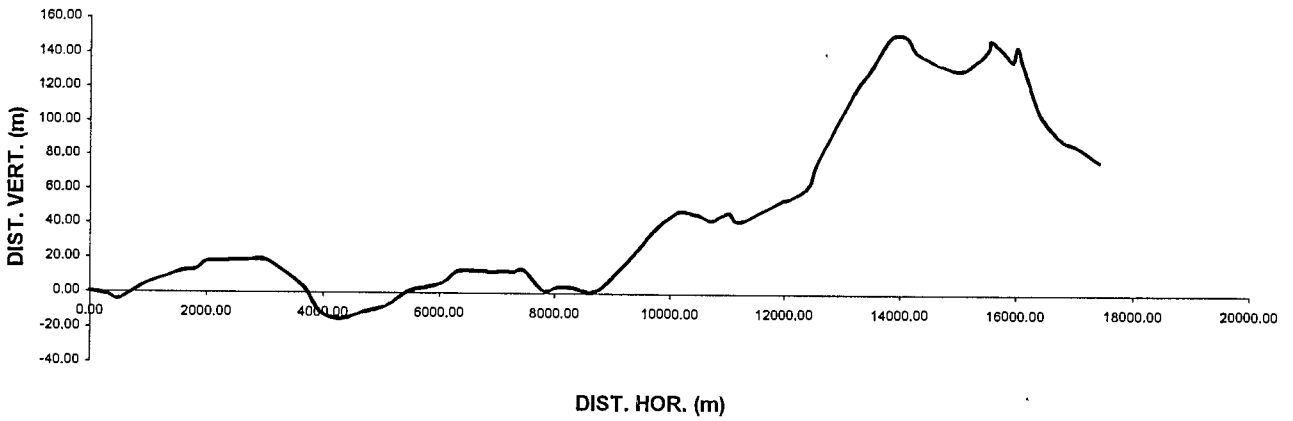
**Perfil G6.- Carretera libre a Celaya-Libramiento Surponiente.**  
(Frontera con el Edo. de Guanajuato a Centro Comercial Carrefour)

Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G_campo	G_c_red	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dH	dg Bouguer	0.0418*2.67*dH	dg Bouguer
0	788	0.00	0.00	2062.84	17.83	0.00	17.83	0.00	17.83	0.00	17.83
1	789	282.30	-1.59	2063.12	18.11	-0.49	17.62	-0.15	18.27	-0.18	18.29
2	790	518.32	-3.96	2063.63	18.63	-1.22	17.40	-0.38	19.01	-0.44	19.07
3	791	855.64	2.49	2062.49	17.49	0.77	18.26	0.24	17.25	0.28	17.21
4	792	1197.01	7.66	2061.47	16.47	2.36	18.83	0.74	15.73	0.85	15.62
5	793	1658.70	12.22	2061.17	16.17	3.77	19.94	1.17	14.99	1.36	14.80
6	794	1834.14	13.27	2061.14	16.14	4.10	20.23	1.28	14.86	1.48	14.65
7	795	2009.58	17.54	2060.00	15.00	5.41	20.41	1.69	13.31	1.96	13.04
8	796	2288.71	17.94	2059.75	14.75	5.54	20.29	1.72	13.03	2.00	12.75
9	797	2661.81	18.47	2059.15	14.15	5.70	19.85	1.78	12.37	2.06	12.09
10	798	2987.34	18.87	2059.48	14.48	5.82	20.30	1.81	12.67	2.11	12.37
11	799	3257.49	13.64	2058.76	13.76	4.21	17.97	1.31	12.45	1.52	12.24
12	800	3673.93	2.77	2064.63	19.63	0.85	20.48	0.27	19.36	0.31	19.32
13	801	3944.08	-11.19	2064.18	19.18	-3.45	15.73	-1.08	20.26	-1.25	20.43
14	802	4322.58	-15.00	2063.88	18.88	-4.63	14.25	-1.44	20.32	-1.67	20.55
15	803	4698.71	-11.38	2063.17	18.17	-3.51	14.66	-1.09	19.26	-1.27	19.44
16	804	5093.81	-7.66	2061.61	16.60	-2.36	14.24	-0.74	17.34	-0.85	17.46
17	805	5487.24	1.15	2059.87	14.87	0.35	15.23	0.11	14.76	0.13	14.74
18	806	5773.12	3.09	2061.04	16.04	0.95	16.99	0.30	15.74	0.34	15.70
19	807	6077.99	5.85	2061.14	16.14	1.81	17.94	0.56	15.57	0.65	15.48
20	808	6358.36	12.28	2061.12	16.12	3.79	19.91	1.18	14.94	1.37	14.75
21	809	6918.57	11.98	2061.79	16.78	3.70	20.48	1.15	15.63	1.34	15.45
22	810	7185.89	12.46	2061.76	16.75	3.85	20.60	1.20	15.56	1.39	15.36
23	811	7299.23	12.10	2061.53	16.52	3.73	20.26	1.16	15.36	1.35	15.17
24	812	7468.76	13.21	2061.66	16.66	4.08	20.74	1.27	15.39	1.47	15.19
25	813	7813.66	1.40	2058.61	13.61	0.43	14.04	0.13	13.48	0.16	13.45
26	814	8088.30	3.70	2058.90	13.90	1.14	15.04	0.36	13.54	0.41	13.48
27	815	8367.86	2.50	2059.08	14.07	0.77	14.85	0.24	13.83	0.28	13.80
28	816	8732.36	1.30	2059.14	14.14	0.40	14.54	0.12	14.01	0.15	13.99
29	817	9187.11	15.33	2056.23	11.23	4.73	15.96	1.47	9.75	1.71	9.51
30	818	9440.11	24.43	2054.35	9.35	7.54	16.89	2.35	7.00	2.73	6.62
31	819	9816.45	38.78	2051.31	6.30	11.97	18.27	3.73	2.58	4.33	1.98
32	820	10160.65	47.00	2049.74	4.74	14.50	19.24	4.52	0.22	5.25	-0.51
33	821	10313.54	46.69	2049.81	4.80	14.41	19.21	4.49	0.32	5.21	-0.41
34	822	10549.79	44.40	2049.97	4.97	13.70	18.67	4.27	0.70	4.96	0.01
35	823	10741.91	42.23	2050.04	5.03	13.03	18.07	4.06	0.97	4.71	0.32
36	824	11022.53	46.54	2049.75	4.75	14.36	19.11	4.47	0.27	5.19	-0.45
37	825	11145.07	41.80	2049.59	4.59	12.90	17.49	4.02	0.57	4.67	-0.08
38	826	11285.71	41.85	2049.58	4.58	12.91	17.49	4.02	0.56	4.67	-0.09
39	827	11565.37	46.81	2049.56	4.55	14.45	19.00	4.50	0.05	5.22	-0.67
40	828	11914.77	52.62	2048.95	3.95	16.24	20.19	5.06	-1.11	5.87	-1.92
41	829	12172.66	56.26	2047.67	2.67	17.36	20.03	5.41	-2.74	6.28	-3.61
42	830	12430.49	62.86	2047.05	2.05	19.40	21.45	6.04	-3.99	7.02	-4.97
43	831	12577.13	76.58	2045.11	0.11	23.63	23.74	7.36	-7.25	8.55	-8.44
44	832	13227.69	117.95	2042.63	-2.38	36.40	34.02	11.34	-13.71	13.16	-15.54
45	835, 854	13501.60	131.57	2042.44	-2.56	40.60	38.04	12.65	-15.21	14.68	-17.25
46	836	13845.11	149.70	2033.66	-11.34	46.20	34.86	14.39	-25.73	16.71	-28.05
47	837	14120.06	150.02	2030.75	-14.25	46.30	32.05	14.42	-28.67	16.74	-30.99

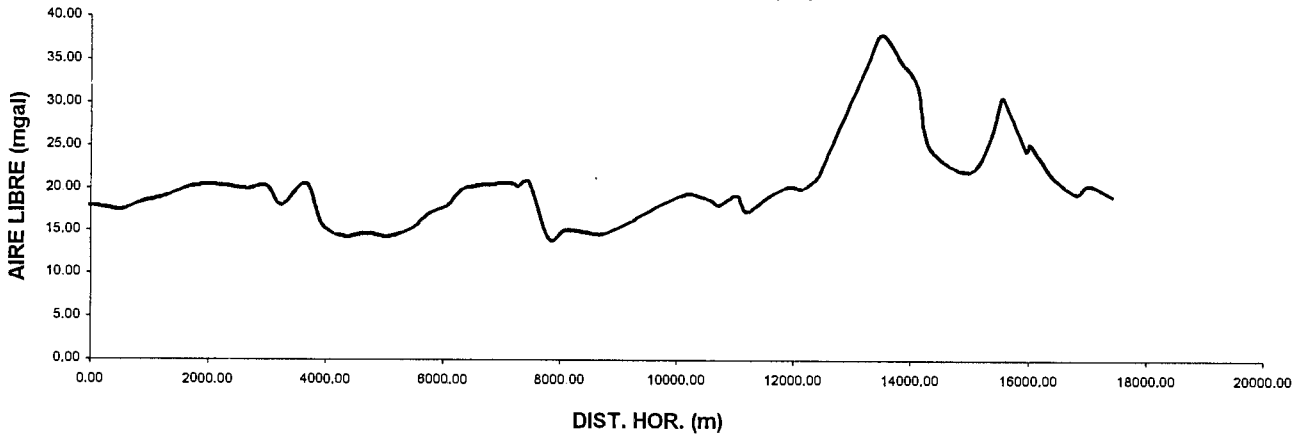
**Perfil G6.- Carretera libre a Celaya-Libramiento Surponiente.**  
(Frontera con el Edo. de Guanajuato a Centro Comercial Carrefour)

Punto	Estación	Distancia	Desnivel	G_campo	G_c_rēd	0.3086*dH	dg Faya	0.0418*2.3*dH	dg Bouguer	0.0418*2.67*dH	dg Bouguer
48	838	14318.80	140.20	2026.61	-18.39	43.27	24.88	13.48	-31.87	15.65	-34.04
49	839	14989.77	130.47	2026.73	-18.27	40.26	21.99	12.54	-30.81	14.56	-32.83
50	840	15329.08	136.25	2028.44	-16.56	42.05	25.49	13.10	-29.66	15.21	-31.77
51	841	15529.14	142.95	2031.51	-13.50	44.11	30.62	13.74	-27.24	15.95	-29.45
52	842	15568.59	147.96	2030.03	-14.97	45.66	30.68	14.22	-29.20	16.51	-31.49
53	843	15845.11	139.61	2028.20	-16.80	43.08	26.28	13.42	-30.22	15.58	-32.38
54	844	15955.60	136.20	2027.47	-17.54	42.03	24.50	13.09	-30.63	15.20	-32.74
55	845	16015.48	144.46	2025.69	-19.31	44.58	25.27	13.89	-33.20	16.12	-35.43
56	846	16103.21	135.77	2027.61	-17.40	41.90	24.50	13.05	-30.45	15.15	-32.55
57	847	16140.48	131.20	2028.59	-16.41	40.49	24.08	12.61	-29.02	14.64	-31.05
58	848, 849	16211.98	123.94	2030.13	-14.87	38.25	23.38	11.92	-26.79	13.83	-28.71
59	850	16423.80	103.92	2034.24	-10.76	32.07	21.31	9.99	-20.75	11.60	-22.36
60	851	16796.20	89.39	2036.88	-8.13	27.59	19.46	8.59	-16.72	9.98	-18.10
61	852	17026.32	86.07	2038.89	-6.11	26.56	20.45	8.27	-14.39	9.61	-15.72
62	853	17419.43	76.86	2040.40	-4.60	23.72	19.12	7.39	-11.99	8.58	-13.18

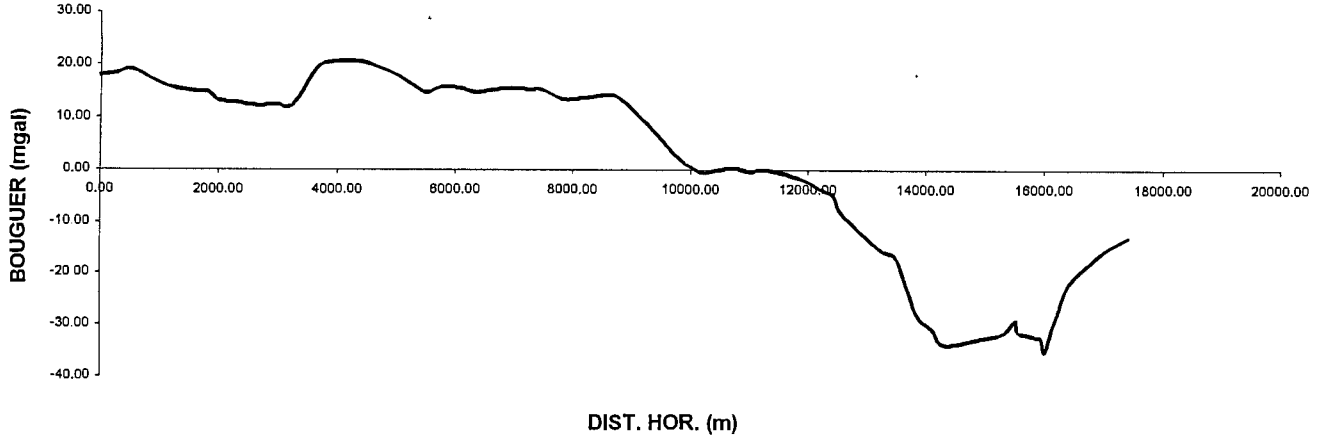
PERFIL TOPOGRÁFICO (T6)



ANOMALÍA DE AIRE LIBRE (G6)



ANOMALÍA DE BOUGUER (G6)



## REFERENCIAS

- ALVAREZ MANILLA, A. ALFONSO (1999): Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro, UAQ (Tesis de maestría).
- AGUIRRE-DIAZ, G. (1996), Volcanic Stratigraphy of the Amealco Caldera and vicinity, central Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias geológicas*, UNAM, Mexico, D.F., vol. 11, No. 1.
- AGUIRRE-DIAZ, G. (2000): El Graben de Querétaro, Mexico. *Observaciones de fallamiento activo GEOS*, Vol. 20, No. 1, p 2-7.
- ARROYO CONTRERAS, M. Y COLEGAS (1999): Elaboración de cartas de fallas de los municipios de Querétaro, Qro. y Celaya, Gto., y su impacto en los principales asentamientos humanos.
- BOCCO, G. (1984): Cartografía Geomorfológica del Bajío y porciones adyacentes, 1:2500, *Boletín*, Instituto de Geografía, UNAM, México, No. 14, p. 9-41.
- CARRASCO-NUÑEZ, G., (1989): Geología del volcán Zamorano, Estado de Querétaro. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, *Revista*, vol. 8, num. 2, p. 194-201.
- CENTENO-GARCIA , E., (1993): Guerrero terrane of Mexico: its role in the Southern Cordeillera from new geochemical data. *Geology*, vol. 21, p. 419-422.
- CONSEJO DE RECURSOS MINERALES (CRM) (1992): Monografía Geológico-Minera del Estado de Querétaro.



- DEMANT, A. (1978): Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Revista, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, vol. 2, p. 172-187.
- ECHEGOYEN-SANCHÉZ, J. (1970): Geología y yacimientos minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato, Consejo de Recursos Minerales No Renovables (México), Boletín, vol. 75.
- EDWARDS J.D. (1955): Studies of some Early Tertiary red conglomerates of Central México. U.S. Geological survey Professional Paper 264-H, p. 183.
- FERRARI, L. Y COLEGAS (1994): Volcanic and tectonic evolution of Central Mexico, and its relations with regional tectonics. J. Volc. Geotherm. Res., v.47, p. 129-148.
- FERRARI, L. Y COLEGAS (1994 a): A widespread mafic volcanic unit at the base of the Mexican Volcanic Belt between Guadalajara and Querétaro. Geofísica Internacional, vol. 33, num. 1, p. 107-124.
- GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, MARIA (2001): Revista Magazine "El agua: un problema a corto plazo".
- GUYSA GEOFISICA DE EXPLORACIONES (1996): Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación en los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro. Tomo III. Acuífero de Querétaro.
- INEGI (1986): Síntesis geográfica, nomenclator y anexo cartográfico del estado de Querétaro.
- JOHNSON, C.A. Y HARRISON, C.G.A. (1990): Neotectonics in Central Mexico. Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 64, p. 187-210.

LOPEZ-HERNÁNDEZ (1996): Modelo Geológico de un Sistema Hidrotermal no Volcánico: San Bartolomé de los Baños, Guanajuato, México. Geotermia, Rev. Mex. De Geoenergía. Vol. 12, num. 1, p. 19-32.

MARTÍNEZ-REYES, J. Y COLEGAS (2001): Proyecto interdisciplinario para el manejo integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro, tercer reporte, p. 14-20.

MEAVE, E. (1959): Estudio Geológico Económico del Mineral del Santo Niño, Distrito Minero de Guanajuato. C.R.N.N.R. México.

NIETO-SAMANIEGO A. F., (1996): Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México, D.F., vol. 13, p. 117-122.

NIETO-SAMANIEGO A.F., (1999): Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental Volcanic Province, México. Geological Society of America Bulletin, vol. 111, p. 117-122.

NIETO-SAMANIEGO A.F., (1999 b): Carta Geológica-Minera San Miguel de Allende, escala 1: 50,000. Consejo de Recursos Minerales.

PASQUARÉ G., Y COLEGAS (1991): Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán. Geological Society of America Map and Chart series MCH072, P. 22.

PEREZ-VENZOR J.A. Y COLEGAS (1997): Bosquejo de la evolución geológica del volcán Palo Huérfano, Guanajuato. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México, D.F., vol. 13, p. 174-183.

- REYES-ZARAGOZA, MARIA A. (2001): Estudio geológico-estructural de los sistemas de fallas de Querétaro, Qro., UNAM.
- S.A.R.H. (1987): Sinopsis geohidrológica del Estado de Querétaro.
- SUTER, M., (1987): Structural traverse across the Sierra madre Oriental fold-thrust belt in east-central Mexico. Geological Society of America Bulletin, vol. 98, num. 3, p. 249-264.
- SUTER, M. Y COLEGAS (1992): Active faults and state of the stress in the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt Mexico, 1. The Venta de Bravo fault, Journal of Geophysical Research, vol. 97, p. 11983-11993.
- SUTER, M. Y COLEGAS (1995): The Acambay graben: Active intra-arc extension in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico, Tectonics, vol. 14, p. 1245-1262.
- VALDEZ-MORENO, G. Y COLEGAS (1998): El volcán La Joya, estados de Querétaro y Guanajuato. Un estartovolcán miocénico del Cinturón Volcánico Mexicano. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México, D.F., vol. 15, p. 181-197.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO 1

1.1	Localización del área de estudio.....	8
-----	---------------------------------------	---

### CAPITULO 2

2.1	Provincias fisiograficas del Estado de Querétaro.....	24
2.2	Mapa estructural que muestra la ubicación del graben de Querétaro y los sistemas de fallas (Aguirre-Díaz, 2000).....	25
2.3	Carta geológica e interpretación estructural del valle de Querétaro (Martínez-Reyes, 2000).....	26
2.4	Unidades de tiempo de la escala de tiempo geológico.....	27
2.5	Ubicación de las fuentes de emisión (Reyes-Zaragoza, 2001).....	28

### CAPITULO 3

3.1	Escurremientos generados en el Estado de Querétaro (CEA, 1998).....	37
3.2	Volumen de lluvia anual en el Estado de Querétaro (CEA, 1998).....	38
3.3	Volumen anual de aprovechamientos (CNA, 1999).....	39
3.4	Provincias fisiográficas del Estado de Querétaro y red de drenaje superficial principal (INEGI).....	40
3.5	Plano hidrogeológico superficial del valle de Querétaro (GUYSA, 1996)..	41
3.6	Plano de zonificación geohidrológica y localización de fallas activas de la zona metropolitana y valle de Querétaro (Alvarez Manilla, 1999).....	42

## CAPITULO 4

4.1	Esquema de las componentes que constituyen una estación magnetotelúrica o audio-magnetotelúrica.....	59
4.2	Mapa de localización de las mediciones gravimétricas.....	60
4.3	Aspectos del trabajo de campo de las mediciones gravimétricas.....	61
4.4	Mapa de anomalía gravimétrica de Aire Libre del valle de Querétaro, el cual refleja rasgos topográficos subterráneos.....	62
4.5	Mapa de anomalía gravimétrica de Bouguer del valle de Querétaro, el cual refleja la presencia de estructura a profundidad.....	63
4.6	Modelos gravimétricos bidimensionales del subsuelo del valle de Querétaro a lo largo de tres perfiles Este-Oeste.....	64
4.7	Modelo gravimétrico bidimensional del subsuelo del valle de Querétaro a lo largo de dos perfiles Norte-Sur.....	65
4.8	Mínimo gravimétrico asociado con una capa de baja densidad relativa. Esta zona es de particular interés desde el punto de vista hidrológico debido a que se asocia a rocas sedimentarias de alta porosidad o de origen volcánico altamente fracturadas que constituyen buenos acuíferos.....	66
4.9	Interpretación estructural del valle de Querétaro basada tanto en la anomalía de Bouguer como en los sondeos MT y la geología de campo....	67
4.10	Localización de los perfiles magnetotelúricos en el valle de Querétaro.....	68
4.11	Aspectos del trabajo de campo AMT y MT.....	69
4.12	Perfil topográfico (arriba) a lo largo del perfil EW-2 y modelo de resistividad del subsuelo al Norte del valle de Querétaro.....	70
4.13	Perfil topográfico (arriba) a lo largo del perfil EW-1 y modelo de resistividad del subsuelo al Sur del valle de Querétaro.....	71

4.14	Perfil topográfico (arriba) a lo largo del perfil NS-1 y modelo de resistividad del subsuelo del valle de Querétaro.....	72
4.15	Modelo de calibración del sondeo Qro-210 con el pozo CNA-563.....	73
4.16	Modelo conceptual interpretado a lo largo del perfil EW-2 a lo largo de la línea Magnetotelúrico Este-Oeste, localizada al norte del valle e interpretado a partir de la calibración del pozo CNA-204.....	74
4.17	Modelo conceptual interpretado a lo largo del perfil EW-1 a lo largo de la línea Magnetotelúrico Este-Oeste, localizada al sur del valle .....	75
4.18	Modelo conceptual interpretado a lo largo del perfil Magnetotelúrico norte-sur.....	76