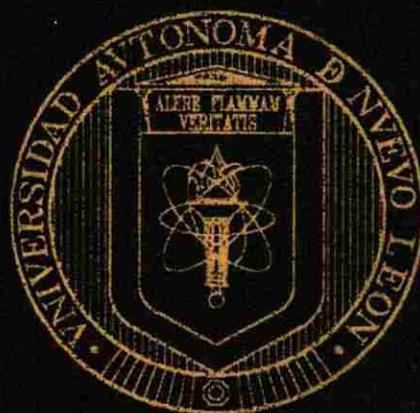


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



El Acuífero de Calera, Zacatecas, Situación Actual y  
Perspectivas para un Desarrollo Sustentable

TESIS

Requisito para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Geológicas

Presenta:

Ernesto Patricio Nuñez Peña

El Análisis de Costes, Zafatecas, Situación Actual y  
Materiales para el Desarrollo Sostenible

ENUNNE

TM

25818

.E3

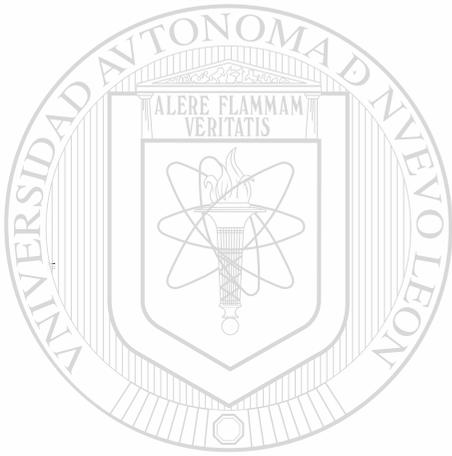
FCT

2003

.N8



1020148517



# UANL

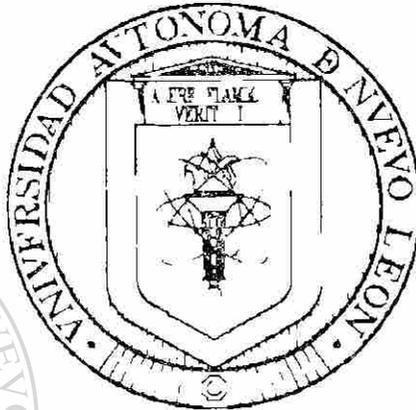
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**El Acuífero de Galera, Zaca ecas, Situación Actual y  
Perspectivas para un Desa rol o Sustentable**

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
TESIS  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**Requisito para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Geológicas**

Presenta.

Ernesto Patricio Nuñez Peña

974/170

T11

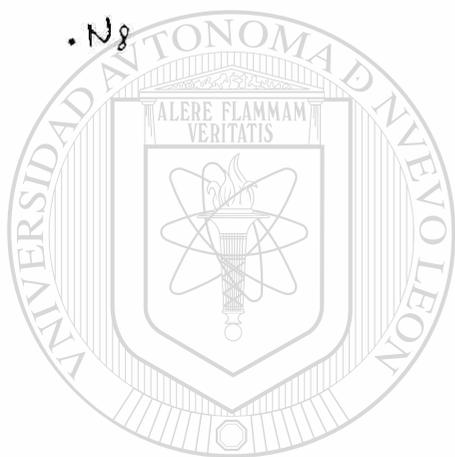
Z5814

E3

T9

2003

.N8



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO  
TESIS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS

**EL ACUÍFERO DE CALERA, ZACATECAS, SITUACIÓN ACTUAL Y  
PERSPECTIVAS PARA UN DESARROLLO SUSTENTABLE**

ELABORADA POR

**ERNESTO PATRICIO NÚÑEZ PEÑA**

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Vo.Bo. ASESOR DE TESIS

  
DR. DIRK MASUCH OESTERREICH

LINARES, NUEVO LEÓN

JULIO DE 2003



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS

**EL ACUÍFERO DE CALERA, ZACATECAS, SITUACIÓN ACTUAL Y  
PERSPECTIVAS PARA UN DESARROLLO SUSTENTABLE**

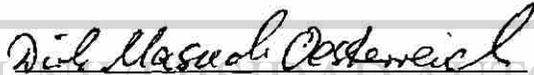
ELABORADA POR

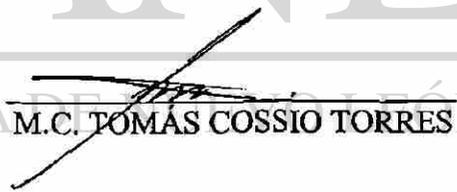
**ERNESTO PATRICIO NÚÑEZ PEÑA**

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

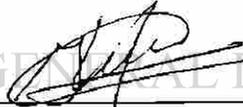
**MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Vo.Bo. COMITÉ DICTAMINADOR DE LA TESIS

  
DR. DIRK MASUCH OESTERREICH

  
M.C. TOMAS COSSIO TORRES

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

  
DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

Vo.Bo. SUBDIRECTOR DE POSGRADO

  
DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

LINARES, NUEVO LEÓN

JULIO DE 2003

## AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis fue posible gracias a la Universidad Autónoma de Zacatecas, a través del Programa de Mejoramiento del Profesorado.

A la gerencia Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua, por la información facilitada, sin la cual no hubiera sido posible la realización del presente estudio, especialmente a los ingenieros Rafael Guardado, Luis Germán Pérez y Rodolfo Gutiérrez.

El Proyecto Francisco I. Madero de La Compañía Fresnillo, por conducto de los ingenieros F. Ballesteros y Leopoldo González me proporcionaron acceso a la información geológica del proyecto Francisco I. Madero.

A mi director de tesis el Dr. Dirk Masuch Oesterreich por la dedicación e invaluable apoyo en la estructuración del contenido e inestimables sugerencias a todo lo largo del desarrollo de la tesis. Además de haberme compartido su experiencia, confianza y facilidades en el laboratorio de GIS.

Al M. en C. Tomás Cossio Torres quien al mismo tiempo de sus valiosas sugerencias que enriquecieron el estudio, siempre escuchó con atención mis cuestionamientos tanto en gabinete como en campo, participándome sus conocimientos con la gran calidad humana que lo caracteriza.

Al Dr. Javier Castro Larragoitia, por la dedicación de su valioso tiempo a la revisión comentarios y propuestas que contribuyeron al mejoramiento del presente estudio.

Los doctores Cosme Pola y Fernando Velasco, aportaron inapreciables sugerencias durante la fase del anteproyecto de tesis, las cuales me habrían de servir más adelante en la redacción del texto.

El Dr. Juan Alonso Ramírez contribuyó con importantes comentarios para la presentación del anteproyecto de tesis, y como subdirector de posgrado de la facultad, me atendió con gran gentileza en las diferentes etapas de mi paso por esa dependencia.

En el área de cómputo Juan José Medina me apoyó con gran dedicación y paciencia.

El M. en C. Felipe Escalona Alcazar enriqueció con valiosas sugerencias el contenido final de la tesis.

A mis profesores y personal administrativo de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León, quienes contribuyeron de alguna forma, durante el programa de maestría.

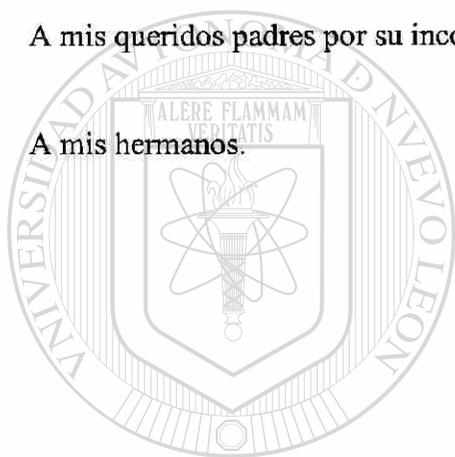
## DEDICATORIA

A mi esposa..... Susana, quien a más de veinte años de gratificarme con lo bello de su persona, ha creído en mi, brindándome fortaleza y aliento en todas las decisiones trascendentales de mi existencia.

A mis hijas Alejandra y Andrea, que con su comprensión y cariño dan mayor alegría a mi vida.

A mis queridos padres por su incondicional apoyo de siempre.

A mis hermanos.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## CONTENIDO

	Página
RESUMEN	
1 GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Trabajos Previos	2
1.4 Metodología de Trabajo	3
1.5 Descripción del Área de Estudio	4
1.5.1 Localización y Extensión	4
1.5.2 Fisiografía	4
2 GEOLOGÍA REGIONAL	7
2.1 Marco Geológico	7
2.2 Evolución Geológica	8
3 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	13
3.1 Estratigrafía	13
3.1.1 Formación Zacatecas	13
3.1.1.1 Definición	13
3.1.1.2 Distribución	13
3.1.1.3 Litología y Espesor	13
3.1.1.4 Relaciones Estratigráficas	16
3.1.1.5 Edad y Correlación	16
3.1.2 Secuencia Volcanosedimentaria	16
3.1.2.1 Definición	16
3.1.2.2 Distribución	17
3.1.2.3 Litología y Espesor	17
3.1.2.4 Relaciones Estratigráficas	18
3.1.1.5 Edad y Correlación	19
3.1.3 Grupo Proaño	19
3.1.3.1 Definición	19
3.1.2.2 Distribución	19
3.1.2.3 Litología y Espesor	19

	Página
3.1.2.4 Relaciones Estratigráficas	20
3.1.1.5 Edad y Correlación	20
<b>3.1.4 Caliza Fortuna</b>	<b>20</b>
3.1.4.1 Definición	20
3.1.4.2 Distribución	20
3.1.4.3 Litología y Espesor	21
3.1.4.4 Relaciones Estratigráficas	21
3.1.4.5 Edad y Correlación	21
<b>3.1.5 Formación Caracol</b>	<b>21</b>
3.1.5.1 Definición	21
3.1.5.2 Distribución	21
3.1.5.3 Litología y Espesor	21
3.1.5.4 Relaciones Estratigráficas	22
3.1.5.5 Edad y Correlación	22
<b>3.1.6 Conglomerado Rojo de Zacatecas</b>	<b>22</b>
3.1.6.1 Definición	22
3.1.6.2 Distribución	22
3.1.6.3 Litología y Espesor	22
3.1.6.4 Relaciones Estratigráficas	23
3.1.6.5 Edad y Correlación	23
<b>3.1.7 Conglomerado Polimíctico Indiferenciado</b>	<b>23</b>
3.1.7.1 Definición	23
3.1.7.2 Distribución	24
3.1.7.3 Litología y Espesor	24
3.1.7.4 Relaciones Estratigráficas	24
3.1.7.5 Edad y Correlación	24
<b>3.1.8 Aluvión</b>	<b>24</b>
3.1.8.1 Definición	24
3.1.8.2 Distribución	24
3.1.8.3 Litología y Espesor	25
3.1.8.4 Relaciones Estratigráficas	25

	Página
3.1.8.5 Edad y Correlación	25
3.1.9 Rocas Volcánicas	25
3.1.9.1 Definición	25
3.1.2.2 Distribución	26
3.1.2.3 Litología y Espesor	26
3.1.2.4 Relaciones Estratigráficas	27
3.1.1.5 Edad y Correlación	27
3.1.10 Rocas Subvolcánicas	28
3.1.10.1 Domos de Composición Riolítica	28
3.1.10.1.1 Definición	28
3.1.10.1.2 Distribución	28
3.1.10.1.3 Litología y Espesor	28
3.1.10.1.4 Relaciones Estratigráficas	28
3.1.10.1.5 Edad y Correlación	28
3.1.10.1 Pórfido Monzonítico	29
3.1.10.1.1 Definición	29
3.1.10.1.2 Distribución	29
3.1.10.1.3 Litología y Espesor	29
3.1.10.1.4 Relaciones Estratigráficas	29
3.1.10.1.5 Edad y Correlación	30
3.2 Geología Estructural	31
3.2.1 Macroestructuras	31
3.2.2 Mesoestructuras	32
3.2.2.1 Estructuras Frágiles	32
3.2.2.1.1 Fracturas Conjugadas	33
3.2.2.1.2 Fallas Normales	34
3.2.2.1.2 Fallas Inversas	36
3.2.2.1.2 Fallas de Rumbo	36
3.2.2.2 Estructuras Dúctiles	36
3.2.2.2.1 Ejes de Pliegues	36
3.2.3 Reconstrucción de Paleoesfuerzos	36

	Página
4 HIDROLOGÍA	40
4.1 Clima	40
4.2 Corrientes Superficiales	43
4.2.1 Descripción de la Red de Drenaje y Tipo de Cuenca	43
4.2.2 Cálculo de la Red de Drenaje Digital	43
4.2.3 Comparación de Resultados del Cálculo Digital, con la red de drenaje editada por el INEGI	47
4.3 Delineación de la Cuenca Hidrológica de Calera	47
5 HIDROGEOLOGÍA	51
5.1 Investigaciones Hidrogeológicas Antecedentes	51
5.2 Características del Acuífero	52
5.3 Espesores del Acuífero y su Comportamiento Dentro de la Cuenca	53
5.4 Unidades Hidrogeológicas	56
5.5 Morfología de la Base del Acuífero	58
5.6 Influencia del Fracturamiento en el Sistema Acuífero	61
5.7 Propiedades Hidráulicas	61
5.7.1 Transmisividad	61
5.7.2 Conductividad Hidráulica	62
5.7.3 Coeficiente de Almacenamiento	62
6 HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA HIDRÁULICO	64
6.1 Dimensiones del Acuífero	64
6.2 Elevación del Nivel Estático	64
6.3 Profundidad del Nivel Estático	65
6.4 Evolución del Nivel Estático	65
6.2 Fluctuaciones del Nivel del Agua Subterránea	65
6.3 Recarga y Descarga	66
7 CALIDAD DEL AGUA	68
7.1 Contaminación del Agua Subterránea	69
8 DESARROLLO SUSTENTABLE	72
8.1 Orígenes y Concepto	72
8.2 Recursos del Desarrollo Sustentable	72

	Página
8.3 Factores que Intervienen en el Desarrollo Sustentable de un Sistema Acuífero	73
8.4 Problemática del Acuífero Calera	73
8.5 Relación entre Agrietamiento y Estructuras Geológicas	74
9 CONCLUSIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	78

### LISTA DE TABLAS

TABLA I	Fracturamiento Cuenca Hidrológica de Calera
TABLA II	Estructuras en la Cuenca Hidrológica de Calera y su asociación a eventos tectónicos regionales o locales.
TABLA III	Información meteorológica de las estaciones Calera y Fresnillo.
TABLA IV	Características de arroyos principales, de acuerdo al cálculo digital ( <i>streamorder</i> ).
TABLA V	Espesores estimados de la zona saturada, a partir de secciones geológicas
TABLA VI	Rangos y valores de permeabilidad de diferentes tipos de rocas.
TABLA VII	Parámetros hidráulicos obtenidos con base en pruebas de bombeo.
TABLA VIII	Características hidroquímicas del Acuífero de Calera

### LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1 Mapa de localización de la Cuenca Hidrogeológica de Calera.
- Fig. 2 Mapa de México que ilustra los terrenos tectonoestratigráficos aflorantes en el área de estudio.
- Fig. 3 Modelo para ilustrar la evolución tectónica del área de estudio, en el que se considera a la Fm. Zacatecas ligada al terreno Sierra Madre.
- Fig. 4 Evolución de los arcos magmáticos en México, Cretácico al presente.
- Fig. 5 Columna estratigráfica.
- Fig. 6 Filitas del miembro pimienta inferior de la fm. Zacatecas, en el cerro La Virgen, municipio de Zacatecas.

Fig. 7 Metacuarcitas del miembro Pimienta Superior de la Fm. Zacatecas, aflorando en el Arroyo La Pimienta.

Fig. 8 Lavas basáltico-andesíticas de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, afloramiento sobre el boulevard López Mateos, Zacatecas en la salida Zacatecas-Fresnillo.

Fig. 9 Horizontes de gravas soportadas en matriz arcillosa del Conglomerado Rojo de Zacatecas, en las faldas del Cerro de la Bufa, municipio de Zacatecas.

Fig. 10 Afloramiento de un derrame riolítico, en el cerro La Virgen al surponiente de la Ciudad de Zacatecas.

Fig. 11 Vista panorámica de domo riolítico en el Cerro la Bufa, municipio de Zacatecas.

Fig. 12 Fracturas conjugadas en basaltos andesíticos de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, en el municipio de Veta Grande, Zacatecas.

Fig. 13 Falla normal en el flanco oriente del Graben de Calera, en el Sitio El Orito, al suroccidente de la ciudad de Zacatecas.

Fig. 14 Estereogramas en sitios seleccionados, para la reconstrucción de paleoesfuerzos.

Fig. 15 Pliegues en pizarras negras de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, en el margen poniente de la población Morelos.

Fig. 16 Provincia tectónica de Cuencas y Sierras.

Fig. 17 Graficas de valores promedio de precipitación, temperatura y evaporación en el periodo 1958-2000, estación climatológica de Calera.

Fig. 18 Graficas de valores promedio de precipitación, temperatura y evaporación en el periodo 1958-2000, estación climatológica de Fresnillo.

Fig. 19 (a) Red de drenaje, INEGI y (b) red de drenaje cálculo digital.

Fig. 20 Modificado del diagrama de las etapas para derivar las características de superficie, a partir de un dem.

Fig. 21 Grid "hidrodem" de la Cuenca Calera.

Fig. 22 Imagen que muestra el *grid hillshade* que resalta con iluminación y sombras el relieve del terreno.

Fig. 23 Delineación de la Cuenca Hidrológica de Calera.

Fig. 24 Secciones geológicas.

Fig. 25 Plantillas para cálculos hidrogeológicos.

Fig. 26 Azimuts de la base del acuífero.

Fig. 27 Buzamientos de la base del acuífero.

Fig. 28 Valores de permeabilidad del Acuífero de Calera.

Fig. 29 Porcentajes de iones mayores en muestras de agua del Acuífero de Calera.

Fig. 30 Grietas producidas por sobreexplotación del Acuífero de Calera, en el poblado Francisco I. Madero, Mpio de Fresnillo.

## ANEXOS

Anexo 1 Carta Geológica.

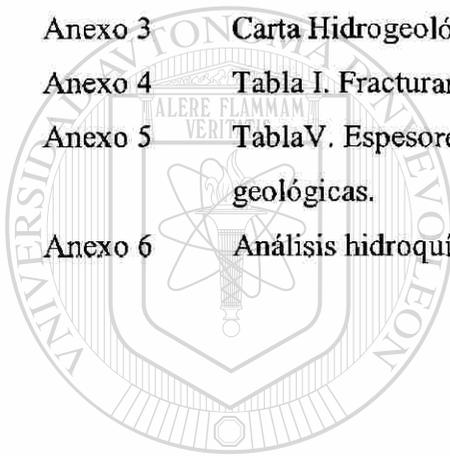
Anexo 2 Carta Estructural.

Anexo 3 Carta Hidrogeológica.

Anexo 4 Tabla I. Fracturamiento en la Cuenca Hidrológica de Calera.

Anexo 5 Tabla V. Espesores estimados de la zona saturada, a partir de secciones geológicas.

Anexo 6 Análisis hidroquímicos de aprovechamientos.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## RESUMEN

La Cuenca Hidrológica de Calera, se localiza en parte central del estado de Zacatecas, tiene una superficie de 1610 km<sup>2</sup> e incluye los amplios valles de los Municipios de Calera, Enrique Estrada y Fresnillo.

La estratigrafía está formada en la porción meridional, por rocas volcanosedimentarias de la Formación Zacatecas del Triásico Superior, que subyacen a la informalmente denominada Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada (terreno Guerrero) de posible edad Jurásico Superior- Cretácico Inferior, la cual está cubierta por el Conglomerado Rojo de Zacatecas, del Paleoceno, por rocas volcánicas del Terciario correspondientes al Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental y por un grupo de aluviones semiconsolidados del Cuaternario. La columna estratigrafía de la parte septentrional de la base a la cima está formada por el Grupo Proaño del Cretácico Inferior, Caliza Fortuna del Cretácico Inferior, Formación Caracol de edad Cretácico Superior, Grupo Volcánico Superior del Terciario Medio-Superior, sobreyacidos por una unidad informalmente denominada Conglomerado Polimíctico Indiferenciado de edad Plioceno y por aluviones del Cuaternario.

El sistema acuífero de la Cuenca Hidrológica de Calera está compuesto por tres unidades hidrogeológicas: (1) unidad de confinamiento lateral, representada por la Formación Zacatecas y el Conglomerado Rojo de Zacatecas, (2) unidad de confinamiento del basamento, compuesta por la Secuencia Volcanosedimentaria (Js-Ki ?) y el Grupo Volcánico Superior, (3) unidad del grupo de aluviones, formada por sedimentos semiconsolidados y por el Conglomerado Polimíctico Indiferenciado del Plioceno.

Se reconocieron varias fallas normales dentro de la cuenca, de las cuales resaltan dos de ellas, al formar en la porción centro-sur de la misma, un graben que se acuña en dirección hacia el sur, otra característica adicional de dicha estructura, es su coincidencia con las orientaciones de fracturamiento de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras. Conjuntamente se presentan algunas fallas inversas que afectan a bloques de las sierras de Zacatecas y de Fresnillo.

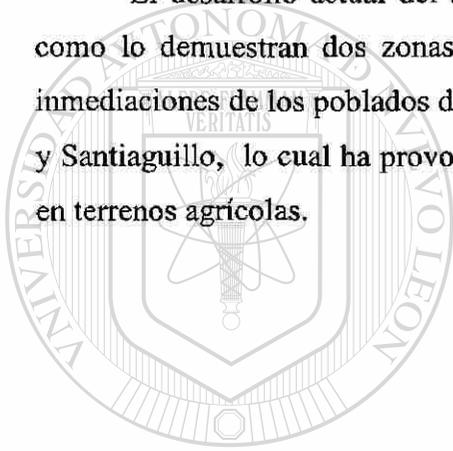
El agua subterránea en el acuífero Calera se presenta bajo condiciones no confinantes. Los espesores del acuífero varían desde 38 metros en la porción norte hasta

570 m en la parte central. El nivel piezométrico regional muestra un patrón de flujo de sur a norte y los niveles de profundidad del nivel estático son menores a 10 metros en la parte norte (área de descarga) y de 100 m hacia el centro de la cuenca.

La recarga del sistema acuífero se lleva a cabo mediante la infiltración de agua de lluvia principalmente a través de la sierra de Zacatecas y la de Fresnillo. La descarga es por medio del bombeo de pozos y por evapotranspiración, resultando un déficit anual de 13.20 millones de metros cúbicos, con abatimiento promedio de un metro por año.

El agua subterránea es predominantemente de tipo mixto bicarbonatada y sódico carbonatada, con características químicas de buena calidad, apta para cualquier uso.

El desarrollo actual del acuífero no se realiza bajo condiciones de sustentabilidad como lo demuestran dos zonas identificadas con problemas de sobreexplotación en las inmediaciones de los poblados de Felix U. Gómez, Enrique Estrada, Ramón López Velarde y Santiaguillo, lo cual ha provocado ya problemas de agrietamientos e inicios de colapsos en terrenos agrícolas.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## ABSTRACT

The Calera hydrologic basin is located in the central part of Zacatecas State, it has 1610 km<sup>2</sup> of extension and encompasses the wider valleys of Calera, Enrique Estrada and Fresnillo counties.

The stratigraphy in the meridional part of the basin includes the Triassic volcanosedimentary rocks of the Zacatecas Formation, overlain by a Late Jurassic to Early Cretaceous Undifferentiated Volcanosedimentary Sequence (Guerrero terrain). This last unit is covered by the Conglomerado Rojo de Zacatecas of Palaeocene age, the Upper Volcanic Group from the Sierra Madre Occidental and a Quaternary unconsolidated package of gravels. The stratigraphic units of the septentrional part, from bottom to the top are: Lower Cretaceous Proaño Group and Caliza Fortuna, upper Cretaceous Caracol Formation, Upper Volcanic Group of middle to upper Tertiary, a Pliocene undifferentiated polymictic conglomerate, and Quaternary alluvium package.

The Calera hydrologic basin aquifer system includes three hydrological units: (1) lateral confining unit, represented by the Zacatecas Formation and the Conglomerado Rojo de Zacatecas, (2) basement confining unit, which includes the Late Jurassic to Early Cretaceous Undifferentiated Volcanosedimentary Sequence, and the Upper Volcanic Group, (3) alluvium group unit of unconsolidated gravel materials.

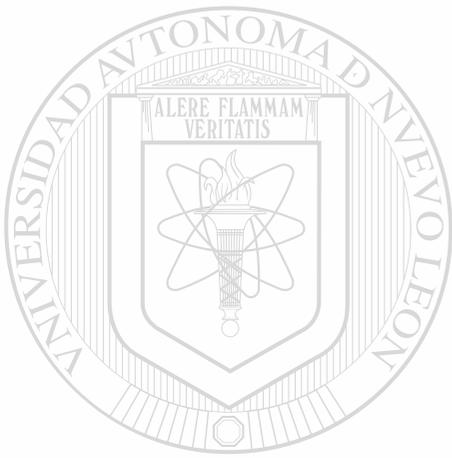
There are several faults into the basin, two of the most important of them are normal faults and crop out in the central-south part, giving place to a graben structure which narrows to the south, and follows the NW trending of the Basin and Range tectonic province. There are also several thrust faults which occurred at the Zacatecas and Fresnillo ranges.

Groundwater of the Calera aquifer is under unconfined conditions. Aquifer thickness varies from 38 meters in the north to 570 meters in the central part. In the north portion of the basin the water table is 10 meters deep, while in the central part it is 100 meters deep.

Groundwater recharge is provided by infiltration of precipitation through the rocks of the Zacatecas and Fresnillo ranges. Groundwater discharge is by pumping and evapotranspiration, resulting in a deficit in storage of 13.20 million of cubic meters.

Groundwater is mainly of mixed-bicarbonate and sodic-carbonate type, and has good quality for all uses.

Groundwater exploitation of the Calera aquifer system does not comply with a sustainable development as may be seen in the vicinities of the Félix U. Gómez, Enrique Estrada, Ramón López V. and Santiaguillo villages, where there has been some fracturing and sinking of agricultural lands.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# **1 GENERALIDADES**

## **1.1 Introducción**

Desde el siglo XIX (1836), la Cuenca Hidrológica de Calera, ha sido motivo en diversas épocas, de estudios de investigación y de reportes técnicos enfocados al conocimiento de diversas áreas de la ciencia, como son la paleontología, estratigrafía, tectónica, minería e hidrogeología. Dichas investigaciones han sido incentivadas en gran medida por las actividades económicas desarrolladas en la región, tal es el caso de la minería, sector que hace ya más de 450 años dio origen a la edificación de importantes ciudades, entre las que se cuentan Zacatecas, Fresnillo, Guadalupe y Veta Grande; además de que fue el motor impulsor de la práctica de otras actividades como la agricultura, ganadería, comercio e industria. Ante lo cual las necesidades de servicios públicos, como el del agua para usos diversos, se multiplicaron día con día, siendo en los últimos veinte años cuando los requerimientos se incrementaron notablemente, situación que propició la explotación intensa del Acuífero de Calera, al constituir la principal fuente de abastecimiento hídrico de la cuenca.

Como resultado de las diversas prácticas emprendidas a lo largo de éstas décadas, el sistema acuífero de Calera enfrenta problemas de abatimiento del nivel estático, de calidad del agua en algunas áreas, fracturamientos y colapsos en terrenos agrícolas, y relación de desequilibrio entre recargas y descargas. Situaciones que reclaman de las autoridades de gobierno, usuarios, e investigadores, la estructuración de planes en el corto, mediano y largo plazo, dirigidos al desarrollo sustentable del acuífero, de no hacerlo, los daños a la región pueden ser de consecuencias irreparables.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general del presente estudio, consiste en el análisis y determinación de las condiciones generales que presenta el sistema acuífero comprendido en la Cuenca Hidrológica de Calera, utilizando la información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica disponible en dependencias públicas y privadas (C.N.A., COREMI, etc.). En razón del objetivo planteado se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- a) Delineación de la Cuenca hidrológica de Calera.

- b) Determinar si las estructuras geológicas principales y/o las asociadas (fracturas) ejercen algún tipo de influencia en el comportamiento hidrodinámico del flujo subterráneo.
- c) Integrar un banco de datos actualizado, que apoye la toma de decisiones para un manejo equilibrado y sustentable del acuífero de Calera.

### 1.3 Trabajos previos

Los primeros reportes del área se remontan a Burkart, 1836 (citado en de Cserna, 1976), quien interpretó las rocas verdes que afloran en los alrededores de la ciudad de Zacatecas; Burckard C., 1906 (citado en de Cserna, 1976), describió la estratigrafía de la misma zona; ese mismo año Rosenbusch estudió la secuencia de rocas verdes. En el periodo de 1908 a 1976 tres investigadores más realizaron estudios faunísticos en la Formación Zacatecas, Gutiérrez-Amador, 1908 (citado en González-Arroyo, 1997), Maldonado Koerdell, 1948 (citado en González-Arroyo, 1997), y Schhmidt (1976); mientras que otros tres investigadores centran su atención a las denominadas rocas verdes Mapes, 1949 (citado en Ponce, 1985), Ranson (1975) y de Cserna (1976). Posteriormente Ponce (1985) realizó un estudio relacionado a una posible caldera en las inmediaciones de la Ciudad de Zacatecas; Silva-Romo (1993) estudió la estratigrafía y tectónica del área; Centeno-García y Silva-Romo (1997) proponen dos modelos de evolución tectónica del centro de México.

Dentro de los estudios vinculados directamente al acuífero del área; se tiene que durante el periodo de 1968 a 1981, la extinta Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos realizó dos estudios geohidrológicos que describen la geología de la región, enfatizando sobre algunas de las características del acuífero de la cuenca. En 1986 la entonces denominada Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología colaboró con un estudio geohidrológico para la Ciudad de Zacatecas, sobre la calidad del agua potable que se consume en las ciudades de Guadalupe y Zacatecas. En 1991 la Comisión Nacional del Agua (C.N.A.) llevo a cabo dos estudios del área, uno geológico-geofísico del municipio de Víctor Rosales, que aporta datos de la resistividad de los acuíferos, y otro relativo al modelo matemático de simulación del acuífero de calera, dicho modelo que es actualizado por la misma institución en 1997. De 1996 a 1998 C.N.A. realizó tres trabajos con enfoque

hacia la hidroquímica y la contaminación de las aguas subterráneas de los acuíferos que abastecen de agua potable a las ciudades de Zacatecas, Guadalupe y áreas circunvecinas.

Entre los trabajos realizados por otros organismos no dependientes de instancias oficiales, se tiene un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico elaborado por investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Iturbe R., *et al*, 1996) y dos trabajos de simulación del acuífero Calera, uno por Magallanes-Quintanar R. (1992), quien proyecta las condiciones de abatimiento del acuífero en las siguientes años y otro por la empresa Ariel Consultores, 1996, en donde se interpreta la disponibilidad de agua de acuerdo al modelo de sensibilidad.

#### 1.4 Metodología de trabajo

Para el alcance de los objetivos planteados se empleó la siguiente metodología:

- Recopilación, revisión y análisis de información bibliográfica y estudios específicos del área motivo de estudio.
- Cartografía en la que se realizaron las siguientes acciones:
  - a) Reconocimiento geológico en campo y ubicación de los sitios, mediante equipo GPS.
  - b) Descripción de afloramientos con identificación megascópica de tipos de roca, ubicación estratigráfica, recolección de datos de estructuras frágiles y dúctiles.
- Determinación del paleotensor de esfuerzos, utilizando el programa de cómputo diseñado por Angelier (1990).
- Integración de información en un Sistema de Información Geográfica (SIG), empleando el paquete de cómputo ArcInfo y ArcView.
- Elaboración de las cartas Geológica, Estructural e Hidrogeológica tomando como base los modelos de elevación de INEGI, a escala 1:250,000, la cartografía geológico-minera elaborada por COREMI (hojas Zacatecas F13-6 y Fresnillo F13-3, escala 1:250,000) y la información hidrogeológica proporcionada por la gerencia Zacatecas de la C.N.A.
- Análisis e interpretación de la información.

## 1.5 Descripción del área de estudio

### 1.5.1 Localización

La Cuenca Hidrológica de Calera (Fig.1) se encuentra delimitada entre las coordenadas UTM, norte 2'520,000 a 2'590,000 y este 710,000 a 750,000; y forma parte de la región hidrológica RH37 El Salado. Dicha cuenca ocupa una superficie de aproximadamente 1,610 km<sup>2</sup>, comprende el total de los municipios de Calera y General Enrique Estrada; y en parte a los de Fresnillo, Morelos, Pánuco y Zacatecas. Las vías principales de comunicación las constituyen la Carretera Federal N° 45 Aguascalientes-Torreón, que atraviesa la cuenca de sureste a noroeste y la Carretera Federal N° 54 Morelos- Saltillo, que corre de sur a nor-noreste. Se cuenta además con algunas otras carreteras estatales pavimentadas y terracerías que comunican a un gran número de poblaciones y rancherías localizadas en el área de estudio. Se tiene comunicación ferroviaria de sur a norte mediante la línea Ciudad de México-Ciudad Juárez. Existe también comunicación aérea a través del aeropuerto internacional General Leobardo C. Ruiz, asentado en el Municipio de Calera, a 18 kilómetros al noreste de la capital del estado.

### 1.5.2 Fisiografía

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de dos provincias fisiográficas, que son: la Mesa Central y la Sierra Madre Occidental. La primera cubre la mayor parte del área de estudio, aproximadamente 1000 km<sup>2</sup> y comprende a la Subprovincia de Llanos y Sierras Potosinos-Zacatecanos, formada por grandes llanuras aluviales, llanos salinos y lomeríos. Las rocas de la subprovincia son rocas ígneas volcánicas, sedimentarias calcáreas, silisiclásticas y metamórficas; siendo el Cerro El Algodón localizado 14 kilómetros hacia el noreste de la Ciudad de Fresnillo, es la elevación más prominente del área con 2,255 m.s.n.m. La Provincia de la Sierra Madre Occidental en el área de estudio está formada por la subprovincia de Sierras y Valles Zacatecanos, constituida por sierras bajas y lomeríos con bajadas aluviales. La litología que caracteriza a esta provincia abarca rocas volcánicas piroclásticas, rocas subvolcánicas, lavas basáltico-andesíticas y metasedimentarias terrígenas. Las principales elevaciones son el Cerro Altamira con 2,810 m.s.n.m, ubicado al suroeste de la Ciudad de Fresnillo y los cerros Grande con 2,650 m.s.n.m., la Sierpe con

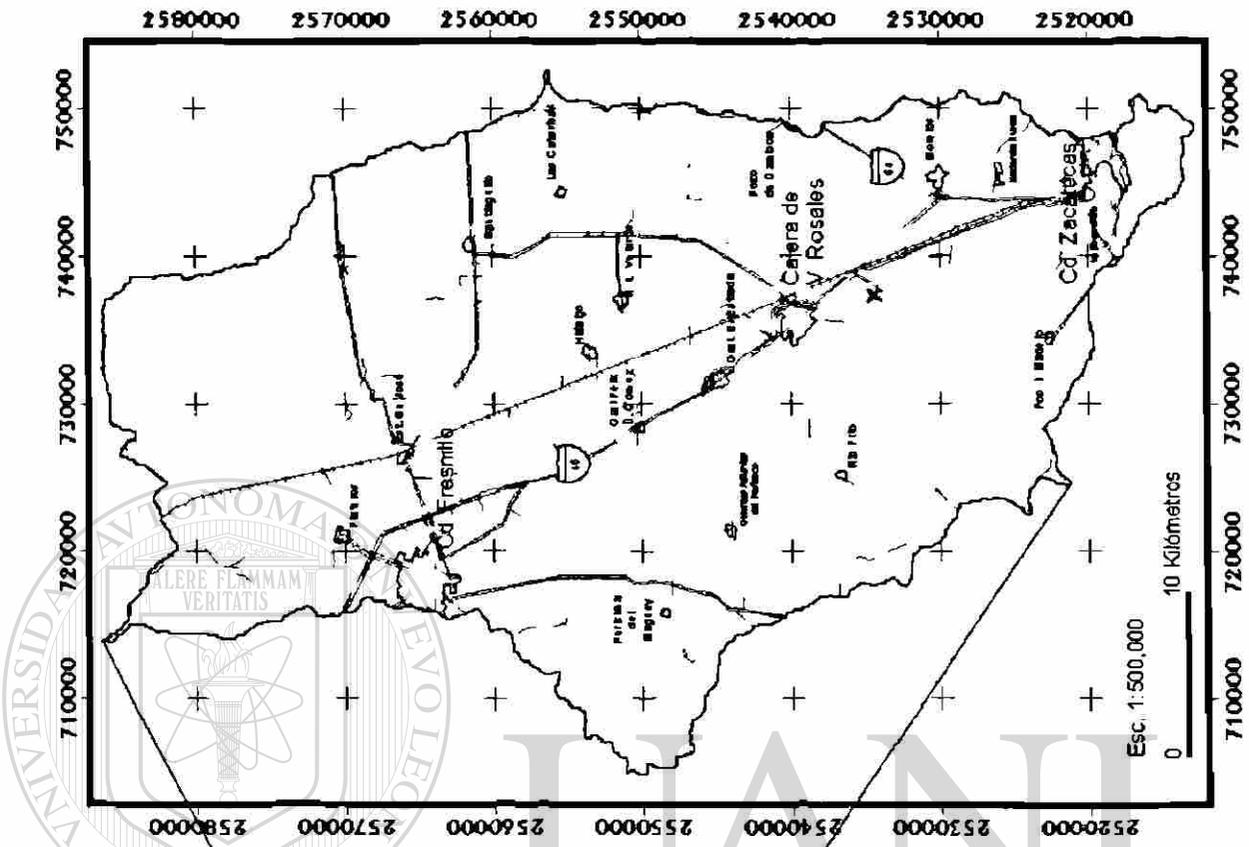
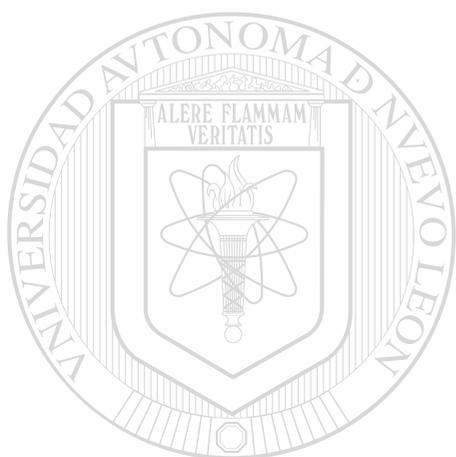


Fig. 1 Mapa de Localización de la Cuenca Hidrológica de Calera

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2,620 m.s.n.m. y San Gil con 2500 m, todos ellos localizados al noroeste de la Ciudad de Zacatecas. La altura promedio en el valle de la cuenca es de 2116 m sobre el nivel del mar.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **2 GEOLOGÍA REGIONAL**

### **2.1 Marco Geológico**

La geología del centro de México, se caracteriza por la presencia de tres terrenos tectonoestratigráficos, según el modelo propuesto por Coney y Campa, 1983 (Fig. 2): a) terreno Sierra Madre; b) terreno Guerrero y c) terreno Sierra Madre Occidental. Su basamento muy probablemente lo constituyan rocas relacionadas a una corteza continental de edad Grenviliana (Sedlock *et al.*, 1993).

#### **Terreno Sierra Madre**

El terreno Sierra madre lo componen esencialmente carbonatos y terrígenos marinos de aguas someras cuya edad va del Jurásico Tardío al Cretácico. Destacan por sus implicaciones con la evolución tectónica de la región, la Formación La Ballena, de edad Cárnico, compuesta por un paquete de lutitas negras, areniscas cuarzosas y conglomerados; presenta dos etapas de deformación una pre Laramídica y otra Laramídica, (Centeno-García *et al.*, 1997); y la Formación Zacatecas, constituida por sedimentos silisiclásticos y lavas basálticas almohadilladas, datados por Burckard y Scalia (1906) como del Cárnico.

#### **Terreno Guerrero**

Las rocas que conforman este terreno las componen una secuencia de rocas de probable edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior (de Csema, 1976; Yta, 1992), constituidas por lavas almohadilladas basáltico-andesíticas y algunas calizas pelágicas; agrupadas en las formaciones Chilitos, La Borda y El Saucito.

#### **Terreno Sierra Madre Occidental**

La litología que distingue a este terreno la constituye un grueso paquete de rocas volcánicas subdividido en el Complejo Volcánico Inferior y el Complejo Volcánico Superior (MacDowell, 1979). El primero de edad comprendida entre aproximadamente 90 y 45 M.a., que contiene rocas de composición andesítica en proporciones similares de rocas félsicas intrusivas. El paquete superior se ha datado entre 45 y 23 M.a. y se compone esencialmente flujos piroclásticos y domos ambos de composición riolítica y pequeñas proporciones de rocas andesíticas.

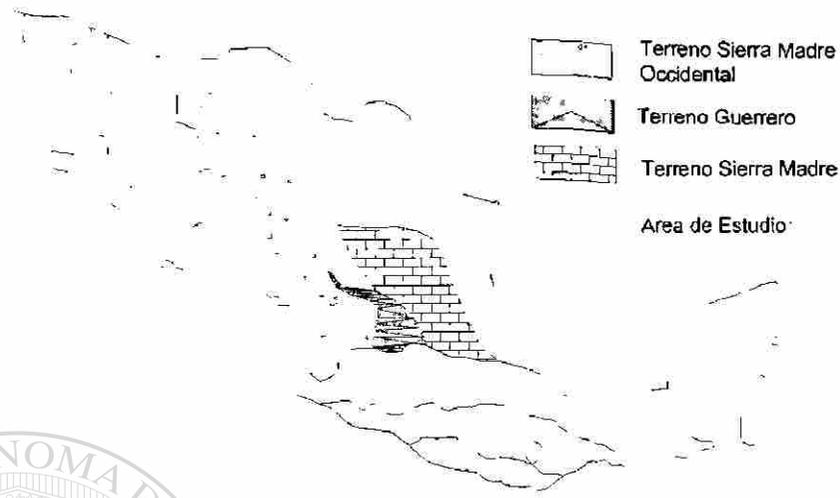


Fig. 2 Mapa de México que ilustra los terrenos tectonoestratigráficos aflorantes en área de estudio, Modificado de Coney y Campa (1987).

## 2.2 Evolución Geológica

La evolución geológica del área de estudio, está íntimamente ligada a una serie de eventos tectónicos complejos, generados en las márgenes occidental y oriental de México, cuya edad va del Triásico hasta el reciente (Dickinson and Coney, 1980; Damon *et al.*, 1981; Pindell and Dewey, 1982; Cuevas, 1983; Coney, 1978, 1983; Tardy *et al.*, 1991; Lapiere *et al.*, 1992; Sedlock *et al.*, 1993.; Ortega, 1994; Centeno-García y Silva-Romo, 1997; Goldhammer, 1999 y Dickinson *et al.* 2001.

Al no ser uno de los objetivos de esta tesis el replantear algún nuevo modelo sobre el tema, pero sí el propósito de ilustrar de la mejor forma posible el presente subcapítulo, se han tomado como base los documentos publicados por Damon *et al.* (1981) y Centeno-García y Silva-Romo (1997). En el último de estos se presentan dos modelos, en los cuales se plantea, que la evolución del centro de México, se llevó a cabo bajo dos posibles escenarios: En el primero de ellos se relaciona la Formación Zacatecas al terreno Sierra Madre (modelo 1) y en el segundo, al terreno Guerrero (modelo 2). Para el caso del área de estudio se hace referencia al primero de dichos modelos por considerar que aporta elementos suficientes para los objetivos de la presente tesis.

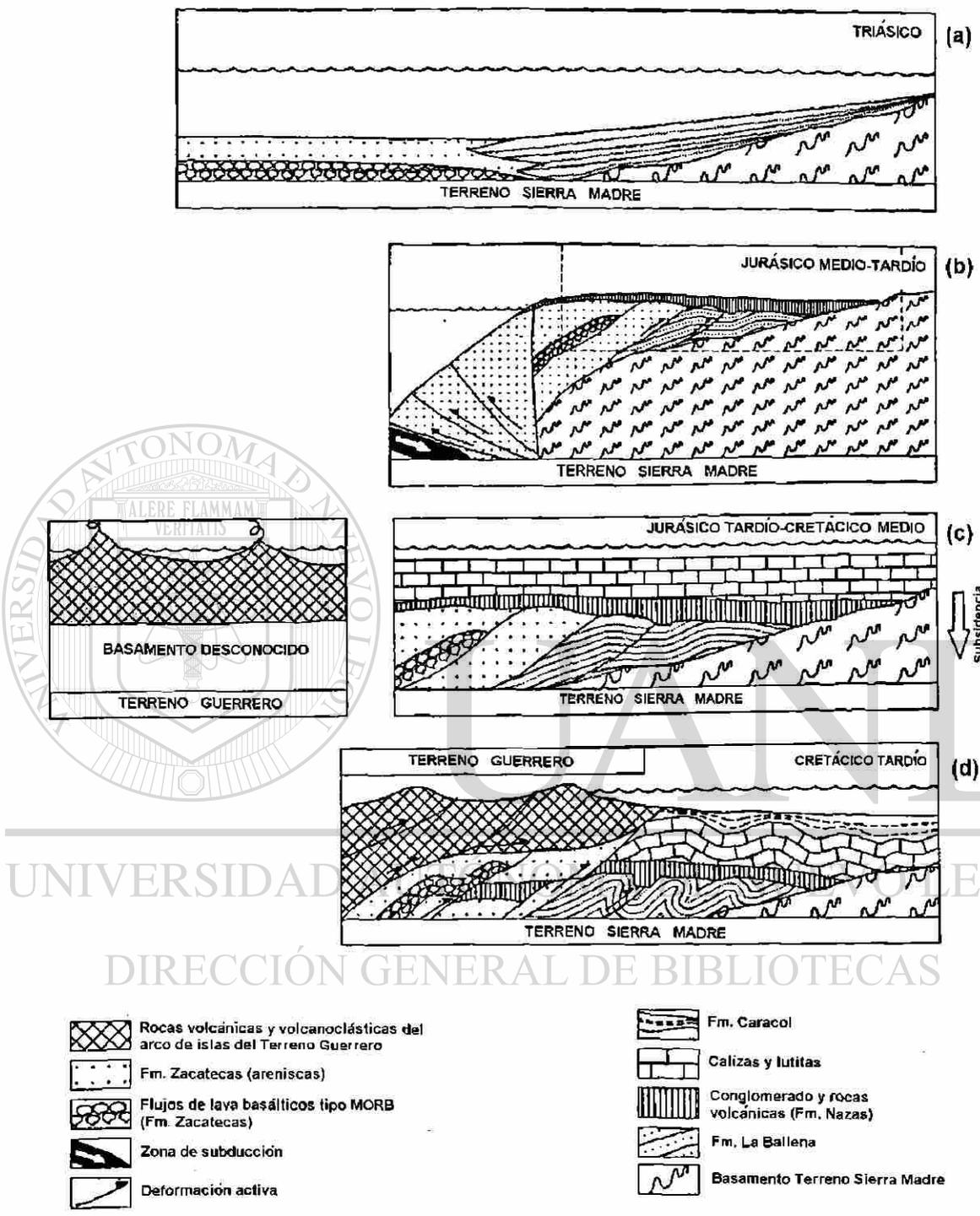


Fig. 3. Modelo para ilustrar la evolución tectónica del área de estudio, en el que se considera a la Fm. Zacatecas ligada al terreno Sierra Madre. Tomado de Centeno-García y Silva-Romo (1997).

## **TRIÁSICO TARDÍO**

Mientras en la margen oriental de Pangea inicia una etapa extensional, que dio lugar a la fragmentación de ese supercontinente, en el occidente de México se sucede la culminación de un margen continental pasivo (Goldhammer, 1999), en el cual se llevó a cabo tanto la depositación de la Formación La Ballena, en un ambiente de abanico submarino, como la correspondiente depositación del paquete volcasedimentario de la Formación Zacatecas, sobre posible suelo oceánico (Fig. 3a).

## **JURÁSICO MEDIO-JURÁSICO TARDÍO**

Inicia una etapa convergente en la que la placa Farallón subdució a la placa de Norte América (Fig. 3 b), con el consecuente desarrollo de un arco magmático, con orientación SW-NE, periodo en el cual la Formación Zacatecas llegó a constituir porciones de suelo oceánico, cubiertos por un paquete de sedimentos del abanico submarino, acrecionado hacia la margen continental, (Centeno-García y Silva-Romo, 1997).

## **JURÁSICO TARDÍO-CRETÁCICO MEDIO**

Hacia la parte final del Jurásico (145 M.a.), en el área de la trinchera continua el acrecionamiento del paquete volcanosedimentario, lo cual contrasta significativamente con lo que sucedía en la porción oriental donde se produjo la apertura del Golfo de México, iniciándose una fase de margen pasivo con la entrada de mares epicontinentales, que dieron lugar a las evaporitas de la Formación Minas Viejas. Durante el Cretácico Temprano acontece un enfriamiento cortical aparejado con la desaceleración en el ritmo de subsidencia en el oriente, lo que permite el depósito de una gruesa secuencia de sedimentos calcáreos de plataforma, en tanto que en el área de trinchera prevalece la fase de acortamiento cortical. Contemporáneamente más hacia el occidente ocurre el depósito del paquete volcánico-siliciclástico del terreno Guerrero. (Fig. 3 c).

## **CRETÁCICO TARDÍO**

A principios de este periodo, hace aproximadamente 90 M.a. dio inicio la migración del arco magmático de tipo Andino de occidente a oriente (Fig. 4a), mismo que dio origen a la formación del Complejo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (McDowell,

1979). Ya durante el Santoniano ocurrió la deformación Laramídica y la acreción del terreno Guerrero con el terreno Sierra Madre (Fig. 3d), la evidencia de este evento son los sedimentos de origen volcánico contenidos en la Formación Caracol, producto en gran medida de la erosión del terreno Guerrero.

### **PALEOCENO-EOCENO**

En el Paleoceno (60 M.a) el arco magmático (Fig. 4b y 4c) formaba una franja desde Sonora hasta Jalisco, con una extensión máxima al interior del continente de 700 km desde la trinchera (Damon *et al.*, 1981). Mientras tanto en el área de estudio y hasta mitad del Eoceno (Fig. 4c), ocurrió el depósito de un conglomerado de origen continental informalmente denominado Conglomerado Rojo de Zacatecas, producto de la erosión de columna estratigráfica comprendida en esa zona. Durante el Eoceno (aproximadamente 40 M.a.) la placa Farallón alcanzó su máxima posición horizontal y el arco se ubicó a la mayor distancia desde la trinchera, 1000 km, (Damon *et al.*, 1981), afectando en mayor grado la corteza superior y produciendo en consecuencia acortamiento de las cuencas postarco y del margen pasivo del Golfo de México, además de deformar intensamente la secuencia sedimentaria mesozoica.

### **OLIGOCENO- MIOCENO TEMPRANO (~37-20 Ma)**

Este periodo registra dos acontecimientos importantes, por un lado la regresión del arco (Fig. 4d) hacia la costa (aproximadamente 37 M.a.), seguida por extensión y extrusión de lavas basálticas alcalinas en el noreste de México y por otra parte el desarrollo de una gran etapa de actividad volcánica explosiva de composición riolítico-dacítico, que componen el Complejo volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental.

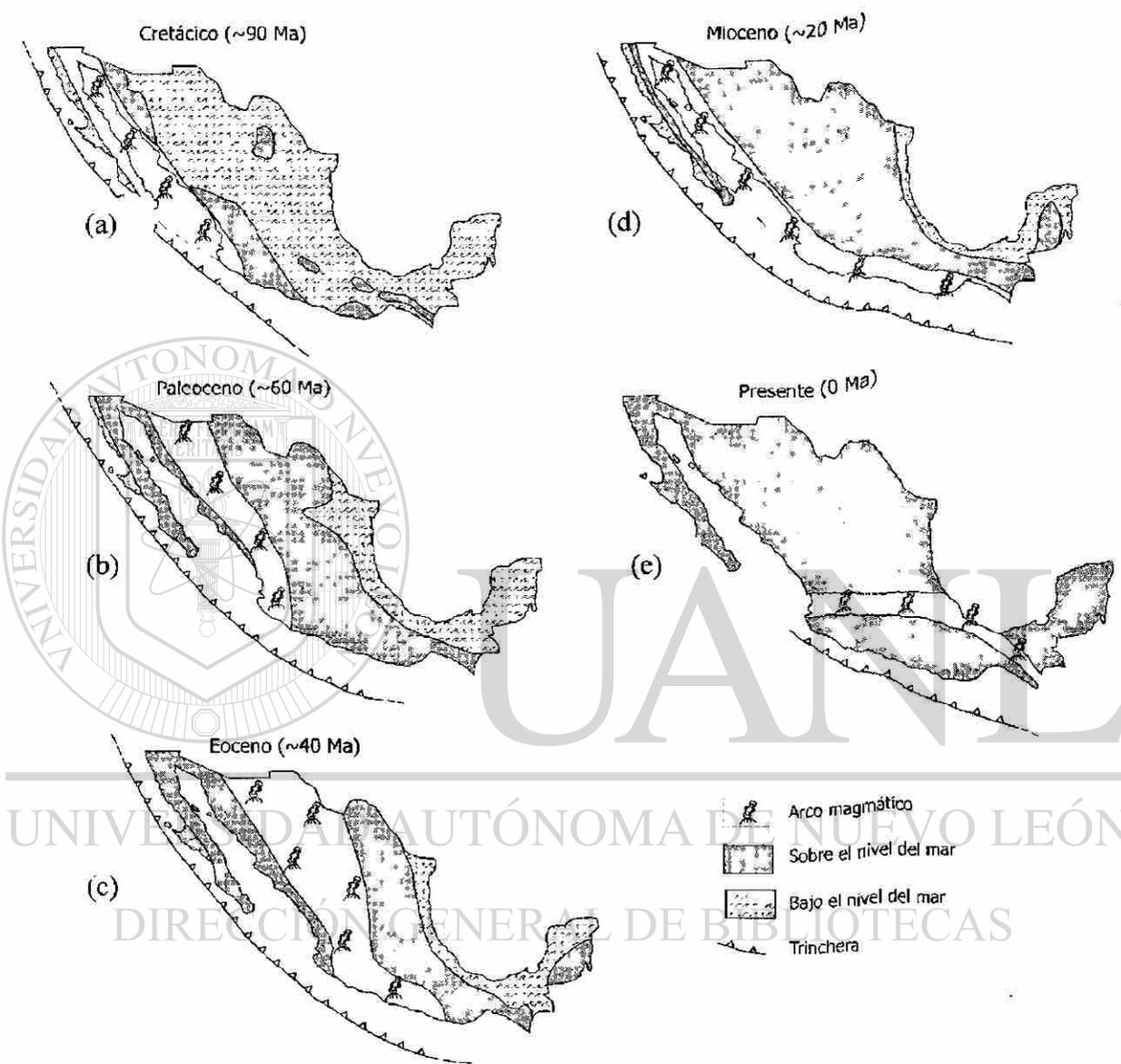


Fig. 4. Evolución de los arcos magmáticos en México, Cretácico al presente (Modificado de Damon, *et al.*, 1981).

### **3 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

#### **3.1 Estratigrafía**

La estratigrafía del área está formada por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, la cual se resume en la columna estratigráfica (Fig. 5), misma que ha sido subdividida en dos grupos de unidades litológicas, de acuerdo a la porción de la cuenca donde se presentan. Dicha subdivisión comprende las porciones sur y norte, siendo la Comunidad de Calera el punto de referencia a partir del cual se define hacia una u otra.

#### **MESOZOICO**

##### **3.1.1 Formación Zacatecas**

###### **3.1.1.1 Definición**

La localidad tipo de esta unidad litoestratigráfica se ubica en el límite noroeste de la Ciudad de Zacatecas, en los arroyos La Pimienta, El Bote y El Álamo. La litología está formada por un paquete de metasedimentos y volcanoclásticos cartografiados por Burckhardt en 1906, quien reporta algunas especies de amonoideos correspondientes al Cárnico. Posteriormente Carrillo-Bravo, 1971 formaliza el nombre de esta unidad como Formación Zacatecas; Ranson (1982) realizó estudios detallados de su estratigrafía, reconociendo dos miembros, uno de filitas y otro de metacuarcitas. Finalmente Yta, 1992 definió a estas rocas como una serie basal metamórfica compuesta por rocas silicopelíticas y volcanodendríticas.

###### **3.1.1.2 Distribución**

Los afloramientos de la Formación Zacatecas se localizan exclusivamente en la porción suroriente del área de estudio y cubren aproximadamente 22 kilómetros cuadrados de superficie (Anexo 1). Observándose sus mejores exposiciones al noroccidente, occidente y nororiente de la Ciudad de Zacatecas.

###### **3.1.1.3 Litología y Espesor**

Esta unidad litoestratigráfica consiste de dos miembros fuertemente foliados (Ranson, 1982), el de la base denominado Pimienta Inferior (Fig. 6), está formado por

LITOLÓGIA ÁREA NORTE DE LA CUENCA HIDROLÓGICA DE CALERA	LITOLÓGIA ÁREA SUR DE LA CUENCA HIDROLÓGICA DE CALERA	ERA	PERIODO	ÉPOCA	M.a		
ALUVIÓN			CUATERNARIO	HOLOCENO			
				PLEISTOCENO	0.01		
CONGLOMERADO POLIMÍCTICO INDIFERENCIADO		CENOZÓICO	TERCIARIO	EOGENO	1.6		
GRUPO VOLCÁNICO SUPERIOR					PALEOGENO	5.3	
				PALEOGENO		23.7	
					PALEOGENO	36.8	
				PALEOGENO		57.8	
					Fm. CARACOL		SUPERIOR
				CALIZA FORTUNA			
					GRUPO PROAÑO		INFERIOR
				119			
SECUENCIA VOLCANOSSEDIMENTARIA INDIFERENCIADA				MESOZÓICO	CRETÁCICO	NEOCOMIANO APTIANO ALBIANO	144
		JURÁSICO	SUPERIOR				163
JURÁSICO	MEDIO		187				
	Fm. ZACATECAS		TRIÁSICO	INFERIOR	208		
SUPERIOR					225		
				CÁRINICO	230		

Fig. 5. Columna Estratigráfica de la Cuenca Hidrológica de Calera

metaareniscas y filitas con metamorfismo en facies esquistos verdes, su color es gris claro en roca fresca y pardo amarillento ya intemperizado; metacalizas color gris oscuro de estratificación delgada con intercalaciones de lavas almohadilladas color gris verdoso. Hacia la parte central del mismo se presentan nódulos de cuarzo lechoso y lentes de metaconglomerados y metacuarcitas. El segundo miembro o Pimienta Superior, lo componen metacuarcitas de grano fino, color gris claro que intemperizan a pardo amarillento (Fig. 7). El espesor total de esta formación se estima en aproximadamente 100 m, basándose en la topografía de sus afloramientos y relaciones estratigráficas con las rocas adyacentes.

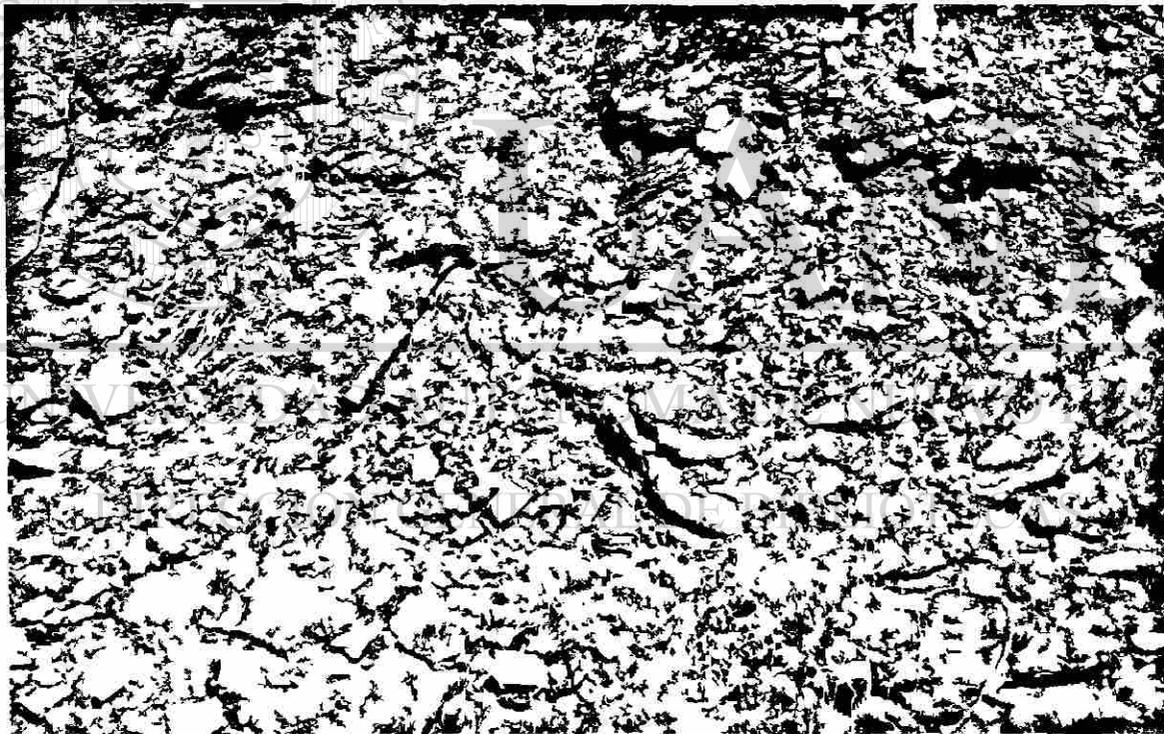


Fig. 6. Filitas del miembro Pimienta Inferior de la Fm. Zacatecas, en el Cerro La Virgen, Municipio de Zacatecas.



Fig. 7. Metacuarcinitas del miembro Pimienta Superior de la Fm. Zacatecas, aflorando en el Arroyo La Pimienta.

#### **3.1.1.4 Relaciones Estratigráficas**

El contacto inferior se desconoce ya que la Formación Zacatecas es la unidad más antigua identificada en la región. Su contacto superior es por fallamiento inverso de ángulo bajo con la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada.

#### **3.1.1.5 Edad y Correlación**

Por su contenido faunístico (Burckhardt, 1906) le asigno edad de Cárnico Inferior. Se correlaciona con los esquistos de la Formación Caopas y las rocas volcanoclásticas de la Formación Rodeo, las cuales afloran en el noreste del estado de Zacatecas.

### **3.1.2 Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada**

#### **3.1.2.1 Definición**

Numerosos investigadores han estudiado esta controvertida unidad, la primera referencia que existe sobre estas rocas se remonta a los trabajos de Burkart (1836), realizados en la Sierra de Zacatecas quien las definió como rocas verdes; Ordóñez (1900)

las clasificó como andesitas con cambios a diabasa y gabro; Rosenbusch (1906) las refiere como lavas espiliticas. De Cserna (1976) las reporta con el nombre de Formación Chilitos a un conjunto de rocas de aproximadamente 200 metros de espesor, formado por lavas almohadilladas de color gris oscuro con tintes que varían de verdes a rojizos y brechas de color que varía de verdosas a rojizo-grisáceas. La localidad tipo de ésta unidad está en el Arroyo de Chilitos, situado tres kilómetros al sureste de la Ciudad de Fresnillo. Posteriormente Yta (1992) basada en el estudio de radiolarios determina una edad de Aptiano. Parga (1992) las describe como una secuencia volcanosedimentaria compuesta por basaltos y andesitas con intercalaciones de rocas volcanoclásticas y rocas sedimentarias marinas.

### **3.1.2.2 Distribución**

Las rocas que conforman ésta unidad afloran en cuatro áreas de la Cuenca Hidrológica de Calera, la primera de ellas, en orden de superficie (Anexo 1), cubre aproximadamente 70 kilómetros cuadrados en el extremo sureste de la cuenca; el segundo afloramiento constituye un bloque de aproximadamente 42 kilómetros cuadrados de superficie, situado entre el bajío del arroyo El Molino y las poblaciones de Francisco I. Madero y Noria de los Gringos. La tercera zona se ubica al sur de la Ciudad de Fresnillo, con un área aproximada de 12 kilómetros cuadrados. El último de estos cuatro afloramientos la compone un pequeño afloramiento de un kilómetro cuadrado de extensión, localizado al norte del poblado de Santiaguillo, en la parte nororiente de la cuenca.

## **DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**

### **3.1.2.3 Litología y Espesor**

Las rocas que componen a la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, son una secuencia de lavas almohadilladas espilitizadas color verde a gris verdoso de composición basáltica y andesítica, siendo las de composición basáltica las predominantes (Yta, 1992). La estructura más visible y frecuente de estas rocas, la delinea su carácter de almohadillas; en general tienen estructura compacta dependiendo de su grado de intemperismo y en ocasiones se reconocen vesículas y/o amígdalas rellenas de minerales arcillosos o cuarzo; su textura varía de afanítica a porfidica y fanérica. Dicha secuencia contiene intercalaciones de rocas sedimentarias marinas tales como lutitas de estratificación

delgada, de color gris en roca fresca y pardo amarillento ya intemperizadas; ocurren en forma menos frecuente calizas de estratificación media, de color gris verdoso. En algunos casos es posible detectar la presencia metamorfismo de bajo grado. Las alteraciones más comunes para todo el paquete son propilitización, sericitización, serpentinización, oxidación y en algunos casos silicificación ( Pérez, 1975; Ranson, 1982 y Ponce, 1985). El espesor de esta unidad se estima en 200 metros (de Cserna, 1976).



Fig. 8. Lavas basáltico-andesíticas de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, afloramiento sobre el boulevard López Mateos, Zacatecas en la salida Zacatecas-Fresnillo.

#### 3.1.2.4 Relaciones Estratigráficas

El contacto inferior resultó del fallamiento inverso con la Formación Zacatecas en las vecindades de la Ciudad de Zacatecas. El contacto superior varía dependiendo de la ubicación en la cuenca; mientras que en los alrededores de la Ciudad de Zacatecas infrayace en forma discordante al Conglomerado Rojo de Zacatecas, en las inmediaciones del poblado Francisco I. Madero subyace discordantemente a rocas volcánicas félsicas del Eoceno. En el área de Fresnillo se presenta anteyaciendo por discordancia erosional a un conglomerado polimictico indiferenciado de edad Neógeno.

### 3.1.1.5 Edad y Correlación

La edad de esta formación es Jurásico Superior-Cretácico Inferior (?), según los estudios paleontológicos realizados por Cantú (1976); de Cserna (1971, 1976); Cuevas (1983, 1986); Yta (1992) y geológicos COREMI (1997).

### 3.1.3 Grupo Proaño

#### 3.1.3.1 Definición

Hungler (1967) refiere con el nombre de Formación Proaño a tres unidades formadas por areniscas, lutitas carbonosas y nuevamente areniscas, mismas que fueron identificadas por Stone y McCarthy (1942) en el interior de la Mina Proaño. De Cserna (1976) elevó a estas rocas al rango de Grupo Proaño, subdividiéndolas en dos formaciones, la inferior denominada Formación Valdecañas formada por grauvacas y lutitas; y la superior designada como Formación Proaño conformada por lutitas carbonosas, lutitas calcáreas y grauvacas.

#### 3.1.3.2 Distribución

Las rocas que componen este grupo se encuentran en la porción noroccidental del área de estudio (Anexo 1), formando tres afloramientos orientados en dirección norte sur en las inmediaciones de las poblaciones Fresnillo y Plateros. El más grande de ellos ocurre en la margen poniente del poblado de Plateros, ocupa una superficie aproximada de 30 kilómetros cuadrados; el segundo afloramiento de menor tamaño está situado al sur de Fresnillo y constituye un bloque de forma semi triangular de aproximadamente 18 kilómetros cuadrados; el último se halla localizado al norte de la comunidad de Plateros y constituye un afloramiento menor que cubre una superficie de aproximadamente 1.5 kilómetros cuadrados.

#### 3.1.3.3 Litología y Espesor

El Grupo Proaño está formado por dos unidades litoestratigráficas que se describen a continuación.

**Formación Valdecañas.** Esta compuesta por una secuencia alternante de estratos delgados de grauvacas de grano fino y color gris-verdoso con lutitas color gris oscuro a negro. Su

espesor de acuerdo a los afloramientos que se presentan en el interior de la Mina Proaño se estima en 700 m (de Cserna, 1976).

**Formación Plateros.** Constituye un paquete subdividido en dos fracciones, la inferior alcanza aproximadamente 150 metros de espesor y se compone de lutitas de estratificación masiva cuya litología varía de carbonosa a calcárea. Las sobreyace una segunda unidad próxima a los 200 metros de espesor, que contiene grauvacas de color gris claro en roca fresca y café rojizo intemperizada.

#### **3.1.3.4 Relaciones Estratigráficas**

El Grupo Proaño descansa en contacto por falla inversa sobre la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada y subyace discordantemente a la Caliza Fortuna.

#### **3.1.2.5 Edad y Correlación**

Considerando los estudios paleontológicos reportados por H. Ochoterena (1971) en de Cserna (1976) se le ubica en el Valanginiano Tardío-Hauteriviano Temprano.

#### **3.1.4 Caliza Fortuna**

##### **3.1.4.1 Definición**

Burckhardt (1930) reportó la existencia de algunos afloramientos de calizas en el área que une a las poblaciones de Fresnillo y Plateros; posteriormente en de Cserna (1976), se aportaron datos paleontológicos determinados por Alencáster de Félix, 1972 y E. Rivera-Palacio (1971), que ubican a esta unidad en el Cretácico Inferior. Su localidad tipo se localiza al poniente de la Ciudad de Fresnillo sobre la Loma de la Fortuna y está conformada por capas delgadas de caliza de color gris.

##### **3.1.4.2 Distribución**

El afloramiento de mayor tamaño ocurre en los lomeríos del Cerro Proaño, Cerro Gordo, Cerro del Xoconostle y Loma de la Fortuna hacia los alrededores de las poblaciones de Fresnillo y Plateros (Anexo 1). Un segundo afloramiento, de aproximadamente un kilómetro cuadrado, se localiza nueve kilómetros al sureste del poblado Santiaguillo.

### 3.1.4.3 Litología y Espesor

Las rocas que componen ésta unidad litoestratigráfica son calizas micríticas color gris claro a beige con estratificación que varía de delgada a media, se distinguen los horizontes base por la presencia de bandas y nódulos de pedernal negro, así como de capas de areniscas calcáreas de grano fino de color amarillento. Hacia la parte superior las calizas cambian a estratificación gruesa y las areniscas adquieren tintes rojizos.

### 3.1.4.4 Relaciones Estratigráficas

Sobreyace concordantemente al Grupo Proaño y subyace por discordancia angular a un conglomerado polimíctico del Paleoceno-Eoceno.

### 3.1.4.5 Edad y Correlación

Alencáster de Félix (1972) y E. Rivera-Palacio (1971), identificaron microfauna de edad Albiano. Se le correlaciona con la Formación Cuesta del Cura, que aflora en el noreste de México.

## 3.1.5 Formación Caracol

### 3.1.5.1 Definición

Imlay (1937) describe con el nombre de Formación Caracol a una serie de tobas devitrificadas, lutitas, areniscas y calizas. Ubicó la localidad tipo en el Arroyo El Caracol, en la porción media de la Sierra de Parras.

### 3.1.5.2 Distribución

La distribución de estas rocas en el área de trabajo se restringe a un afloramiento de aproximadamente dos kilómetros cuadrados en la parte norte de la cuenca, 28 kilómetros al noreste de la Ciudad de Fresnillo (Anexo 1).

### 3.1.5.3 Litología y Espesor

La Formación Caracol esta compuesta de dos unidades, la inferior consiste de una serie alternante de calizas arcillosas de color gris y lutitas de tonalidades que varían de gris a gris verdoso, en estratos delgados a medios. La porción superior la componen tobas de

color gris oscuro en capas delgadas y medianas. De acuerdo a rasgos topográficos su espesor se estima en 100 metros.

#### **3.1.5.4 Relaciones Estratigráficas**

Debido a lo restringido de sus afloramientos en el área no se observa su contacto inferior, aunque se sabe que estratigráficamente descansa sobre la Formación Indidura. La relación de su contacto superior es discordante con aluvión del Cuaternario.

#### **3.1.5.5 Edad y Correlación**

Su edad es del Coniaciano-Santoniano y se correlaciona con las formaciones Parras y San Felipe del noreste de México.

### **CENOZOICO**

#### **3.1.6 Conglomerado Rojo de Zacatecas**

##### **3.1.6.1 Definición**

Las primeras referencias se remontan a Burkart (1836) quien describió un paquete de sedimentos clásticos redondeados, embebidos en una matriz arcillosa. Bostford (1909) lo relacionó con el Conglomerado Rojo de Guanajuato. Posteriormente Stone (1956) propuso el nombre de aglomerado de Zacatecas y finalmente Edwards (1955) lo designó con el nombre actual.

##### **3.1.6.2 Distribución**

Aflora en los alrededores de la Ciudad de Zacatecas, formando una pequeña ceja localizada al sureste de la Cuenca Hidrológica de Calera (Anexo 1) y cubriendo una superficie aproximada de un kilómetro cuadrado.

##### **3.1.6.3 Litología y Espesor**

Esta unidad informal es de color rojo violáceo, con estratificación que varía de gruesa a masiva, formadas esencialmente por materiales del tamaño de gravas, arenas y escasos bloques. Los clastos son fragmentos de basalto, andesita, pizarra, filita, esquisto, granito y cuarzo lechoso; soportados por una matriz arcillo-calcárea. La redondez de los

fragmentos, varía de anguloso a redondeado. Los diámetros de las gravas alcanzan de cuatro a 20 milímetros y el de los bloques varía de cuatro a 20 centímetros, las arenas son predominantemente gruesas. Los espesores reportados por algunos investigadores van de 223.5 a 418 metros, Edwards (1955).



Fig. 9. Horizontes de gravas soportadas en matriz arcilloza del Conglomerado Rojo de Zacatecas, en las faldas del Cerro de la Bufa, Municipio de Zacatecas.

#### **3.1.6.4 Relaciones Estratigráficas**

Cubre discordantemente a las rocas de la Secuencia Volcano-Sedimentaria Indiferenciada y subyace en discordancia erosional al Grupo Volcánico Superior.

#### **3.1.6.5 Edad y Correlación**

La edad del Conglomerado Rojo de Zacatecas se ha estimado del Paleoceno Superior, al Eoceno Inferior, considerando para ello posición estratigráfica y edad isotópica del Grupo Volcánico Superior de la columna estratigráfica (46.8 M.a en Ponce, 1985).

#### **3.1.7 Conglomerado Polimítico Indiferenciado**

##### **3.1.7.1 Definición**

Es un conglomerado polimítico inmaduro, que da origen a terrazas aluviales de extensiones amplias en valles cercanos a la Ciudad de Fresnillo.

### **3.1.7.2 Distribución**

Esta unidad forma una franja amplia que circunda a la Ciudad de Fresnillo, cubriendo una superficie de aproximadamente 120 kilómetros cuadrados (Anexo 1). Existen además dos afloramientos al noreste de Santiaguillo, que en conjunto alcanzan poco más de seis kilómetros de superficie.

### **3.1.7.3 Litología y Espesor**

Esta unidad está conformada por conglomerados inmaduros, mal clasificados, compuestos de clastos de rocas volcánicas félsicas, calizas, basaltos y pedernal, del tamaño de arcillas, limos, arenas, bloques y peñascos, soportados por una matriz arcillo-arenosa-calcárea. Es frecuente la presencia de lentes arenosos de espesores que van desde unos cuantos centímetros a poco más de medio metro. El espesor de conglomerado varía de 10 a cerca de 100 metros.

### **3.1.7.4 Relaciones Estratigráficas**

En el área de Fresnillo cubre discordantemente a las rocas del Grupo Proaño y en la zona de Santiaguillo al Grupo Volcánico Superior.

### **3.1.7.5 Edad y Correlación**

Basándose en sus relaciones estratigráficas se le considera de edad Mioceno Superior-Plioceno.

## **3.1.8 Aluvión**

### **3.1.8.1 Definición**

Sedimentos resultantes de la erosión de rocas preexistentes, depositados en grandes áreas de la Cuenca Hidrológica de Calera.

### **3.1.8.2 Distribución**

Su distribución es muy amplia a lo largo de la cuenca cubriendo valles, zonas de piamonte y porciones marginales de las corrientes fluviales (Anexo 1).

### **3.1.8.3 Litología y Espesor**

Son sedimentos terrígenos en etapa de consolidación, del tamaño de arcillas, limos, arenas y cantos rodados de dimensiones diversas, con categorías de redondez varía de angulosa a bien redondeada. La composición de dichos materiales corresponde a las litologías que componen la columna estratigrafía de la región. La matriz es arcillo arenosa, ligeramente calcárea. El grado de madurez entre partículas tanto horizontal como vertical es pobre; siendo común la presencia de unidades que van desde arenosas, arenos arcillosas, arcillo arenosas, hasta arcillosas. En algunas áreas del subsuelo, personal de la Comisión Nacional del Agua, reportó la presencia de cuerpos de rocas volcánicas de composición riolítica. Aunque es difícil de reconocer la estratificación se define con esta base como estratificación masiva. El espesor de los sedimentos varía dependiendo de su posición geográfica dentro de la cuenca, siendo de aproximadamente de 200 metros en la porción norte, entre las poblaciones de Fresnillo y Santiaguillo; superior a los 500 metros hacia la porción central, en las inmediaciones de las poblaciones Enrique Estrada y Calera de Víctor Rosales; y de 400 metros en región sur entre las poblaciones de Francisco I. Madero y Zacatecas.

### **3.1.8.4 Relaciones Estratigráficas**

En la región de Fresnillo y Santiaguillo, cubre discordantemente a la unidad de Conglomerado Polimítico Indiferenciado y a las rocas volcánicas del Neogeno. En la región comprendida entre Purísima del Maguey, Calera de Víctor Rosales, Pozo de Gamboa, Zacatecas y Francisco I. Madero, descansa sobre las rocas volcánicas del Neogeno y de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada.

### **3.1.8.5 Edad y Correlación**

La edad de estos sedimentos corresponde al Cuaternario.

## **3.1.9 Rocas Volcánicas**

### **3.1.9.1 Definición**

Tomando en cuenta que en la literatura especializada, las lavas riolíticas están asociadas a magmas de una aparente mayor viscosidad, comparadas con las lavas máficas

(Best, 2001), es de esperarse que los cuerpos formados por este tipo de rocas tengan desplazamientos restringidos desde su fuente de emisión, tal como sucede con los domos y pequeños cuerpos de lava de espesor grueso. Bajo estas consideraciones y basándose en las características litológicas (texturas), de geoforma y de extensión que presentan la mayoría de los afloramientos de rocas volcánicas félsicas dentro de la Cuenca, se les ha interpretado como rocas volcanoclásticas de composición riolítica.

### **3.1.9.2 Distribución**

La distribución de estas rocas es la más amplia en la Cuenca (Anexo 1), por lo que para facilitar su descripción se les agrupo en dos fajas orientadas en sentido norte-sur. La primera que constituye la zona occidente, iniciando de sur a norte y contiene un bloque irregular de aproximadamente 62 kilómetros cuadrados, localizado al occidente-noroccidente del poblado Francisco I. Madero, un segundo afloramiento de tres kilómetros cuadrados localizado al suroccidente de la comunidad El Peñasco, un tercer afloramiento de forma irregular de aproximadamente 120 kilómetros cuadrados, ubicado al occidente-noroccidente y noroeste del poblado Purísima del Maguey, por último un cuarto afloramiento de cerca de 2.5 kilómetros cuadrados de extensión, distante tres kilómetros al sureste de la ciudad de Fresnillo. La franja oriental, contiene un afloramiento de cuatro kilómetros cuadrados al sur de la capital del estado, un segundo afloramiento de un kilómetro cuadrado en terrenos de la población El Espejo, un tercer bloque de aproximadamente diez kilómetros cuadrados al este del poblado Santiaguillo y finalmente hacia la porción norte del área de trabajo se presentan varios pequeños afloramientos, que en conjunto cubren una superficie de 18 kilómetros cuadrados.

### **3.1.9.3 Litología y Espesor**

Las rocas que componen estas unidades corresponden a derrames riolíticos y rocas volcanoclásticas de composición riolítica ricas en cristales y fragmentos líticos, presentan soldamiento que va desde pobre, moderado a intenso, tienen textura variable que puede ser porfídica, fragmental o eutaxítica, su color varía de rosa pálido a rosa intenso y en ocasiones violáceo. Los fenocristales son cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa, hornblenda, biotita, minerales arcillosos y óxidos de fierro. En algunas áreas como en el

Cerro La Virgen existen depósitos donde se presentan secuencias de volcanoclásticos y lavas riolíticas (Escalona, F., 2001, 2002). Su espesor es variable desde poco menos de 50 m en los afloramientos más aislados en las áreas El Peñasco y norte-noreste de la cuenca, hasta más de 300 m en las exposiciones de Purísima del Maguey.



Fig. 10. Afloramiento de un derrame riolítico, en el Cerro La Virgen al surponiente de la Ciudad de Zacatecas.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.1.9.4 Relaciones Estratigráficas

Cubren en forma discordante a la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada y al Conglomerado Rojo de Zacatecas en los alrededores de la Ciudad de Zacatecas e infrayacen discordantemente al Conglomerado Polimíctico Indiferenciado del Plioceno en las vecindades del sur de Fresnillo.

### 3.1.9.5 Edad y Correlación

En Ponce (1985) se reportan algunas dataciones en rocas piroclásticas de la denominada caldera de Zacatecas (?), las cuales dieron edades de Eoceno medio (46.8 m.a) a Eoceno

tardío (36.8 m.a), lo que permite correlacionarlas con el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (McDowell, 1979).

### **3.1.10 Rocas Sub-volcánicas**

#### **3.1.10.1 Domos de Composición Riolítica**

##### **3.1.10.1.1 Definición**

Son pequeños domos de composición riolítica.

##### **3.1.10.1.2 Distribución**

Se restringen a pequeñas extrusiones localizadas en las inmediaciones de la Ciudad de Zacatecas, en el Cerro de la Bufa (Anexo 1), al sur en el Cerro El Padre y hacia el norte en los Cerros La Sierpe, Magistral, Calavera y Calicanto.

##### **3.1.10.1.3 Litología y Espesor**

Las rocas que componen a estos domos son riolitas de color rojo pálido, de textura porfirítica y estructura bandeada con líneas verticales de flujo. Los minerales fenocristales son cuarzo, feldespato, biotita, así como minerales arcillosos y óxidos producto de la alteración de los feldespatos y ferromagnesianos. El espesor aflorante de estas rocas se estima de 20 a 40 m .

##### **3.1.10.1.4 Relaciones Estratigráficas**

Constituyen cuerpos que cortan a la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada y al Conglomerado Rojo de Zacatecas.

##### **3.1.10.1.5 Edad y Correlación**

De acuerdo a sus relaciones estratigráficas se le atribuye tentativamente edad Neógeno y se correlaciona con las rocas del Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental.



Fig. 11. Vista panorámica de domo riolítico en el Cerro La Bufa, Municipio de Zacatecas.

### **3.1.10.2 Pórfido Monzonítico**

#### **3.1.10.2.1 Definición**

Es un cuerpo hipabisal que aflora en el arroyo El Molino y mina El Amanecer (González A., *et al.*, 1997).

#### **3.1.10.2.2 Distribución**

Se restringe a un pequeño afloramiento intrusivo al occidente de la población Francisco I. Madero (Anexo 1).

#### **3.1.10.2.3 Litología y Espesor**

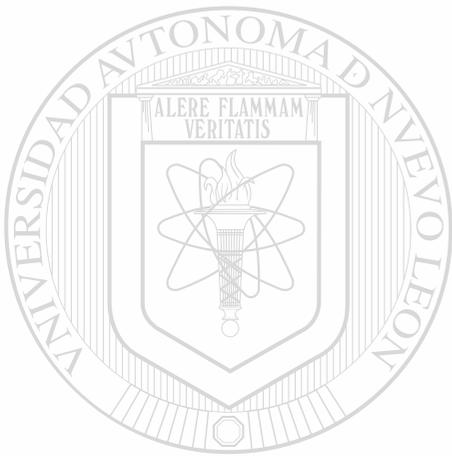
La composición corresponde a una monzonita (González, A., *et al.*, 1997), color gris de textura porfídica y estructura compacta; los fenocristales son; cuarzo, feldespatos alcalinos, plagioclasa, biotita y minerales arcillosos.

#### **3.1.10.2.4 Relaciones Estratigráficas**

Intrusiva a la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada.

### 3.1.10.2.5 Edad y Correlación

Considerando sus relaciones estratigráficas se le atribuye edad Neogéno (González A., *et al.*, 1997), y se correlaciona con el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 3.2 Geología Estructural

Las estructuras que se encuentran en el área de estudio son macroestructuras y mesoestructuras. Las primeras son los rasgos reconocibles a escala regional y las segundas identificables a escala de afloramiento.

### 3.2.1 Macroestructuras

La macroestructura principal de la Cuenca Hidrológica de Calera, es un graben que ocupa la porción centro-sur de la misma, denominado Graben de Calera (Anexo 2). El flanco occidental de esta estructura es una falla con buzamiento hacia el oriente, dirección NW 20° SE, con variación a N-S en el tramo comprendido entre las poblaciones Noria de Los Gringos y Francisco I. Madero, y longitud aproximada de 30 kilómetros. La falla del flanco oriental se extiende a lo largo de 35 kilómetros, con rumbo NE 17° SW y buzamiento hacia el occidente. La edad de este graben de acuerdo a estudios regionales se estima es del Mioceno Medio a Tardío (Aranda J., 2000). Otra estructura que pudiera, tener importancia, en la parte suroriente de la cuenca, es una posible caldera, (Ponce, 1985), la cual su existencia aún es motivo de controversia. Existen algunos otros fallamientos normales e inversos que se describen atendiendo a su ubicación dentro de la cuenca:

#### Zona Sur

En orden de longitud de las estructuras hay dos trazas de fallamiento, de componente predominantemente inverso en los alrededores Ciudad de Zacatecas, al occidente y noreste de la misma (Anexo 2). La falla de la porción occidental, se divide en dos segmentos, uno en echelón en su extremo norte, con longitud aproximada cada diente de seis km y rumbo NE 15° SE. El segundo segmento, tiene forma de media luna, longitud de seis kilómetros y rumbo NW 55° SE. El movimiento generado por estas estructuras pone en contacto a rocas de la Formación Zacatecas, sobre rocas de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada.

#### Zona Norte

A escala regional, González, A., *et al.*, (1997), infirió la existencia de una gran falla inversa (Anexo 2) que pone en contacto el Terreno Guerrero (Secuencia

Volcanosedimentaria Indiferenciada) con el Terreno Sierra Madre (Grupo Proaño y Caliza Fortuna). Dicha estructura ocupa parte del extremo noroccidental de la Cuenca Hidrológica de Calera. Hacia el sur de Fresnillo, la traza es en forma sigmoidal y presenta arreglo en echelón debido al movimiento perpendicular oblicuo, provocado por una falla normal con fuerte componente de rumbo.

Se encuentran además tres fallas normales, la primera desplaza a la falla inversa antes descrita, tiene una longitud de 18 kilómetros, su rumbo es NW 55° SE, buzamiento hacia el noreste y tiene lugar en rocas que constituyen la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, Grupo Proaño, Grupo Volcánico Superior y Conglomerado Polimíctico Indiferenciado. La segunda es una estructura ubicada entre las poblaciones de Plateros y Santiaguillo, tiene una longitud de 37 kilómetros, el rumbo general es NW 65° SE y buzamiento hacia el noreste y afecta a las rocas del Grupo Proaño, Caliza Fortuna, Grupo Volcánico Superior y al Conglomerado Polimíctico Indiferenciado. La tercera de estas fallas se localiza al noroccidente de la comunidad Plateros, tiene 11 kilómetros de largo, se orienta al NE 45° SW, buza al sureste y desplaza a las formaciones del Grupo Proaño, Caliza Fortuna y Conglomerado Polimíctico Indiferenciado.

### **3.2.2 Mesoestructuras**

Con la finalidad de conocer el comportamiento y reconstrucción de los paleoesfuerzos que afectaron a las rocas dentro del área de trabajo, se visitaron 57 sitios (Tabla I, anexo 3), donde se identificaron estructuras relacionadas a deformaciones frágiles y dúctiles.

#### **3.2.2.1 Estructuras Frágiles.**

##### **Fracturas**

Debido a la variedad de rocas aflorantes en el área de trabajo, se presentan fracturas tanto de origen tectónico como de fracturas producidas por el enfriamiento de rocas ígneas. Las de origen tectónico, como sabemos, están asociadas a un campo de esfuerzo local y/o regional y corresponden a fracturas de extensión y fracturas de cizalla; mientras que para las segundas, el fracturamiento obedece a factores relacionados con pérdida de temperatura.

### 3.2.2.1.1 Fracturas Conjugadas

Se identificaron fracturas conjugadas en rocas volcánicas de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, definiéndose que la orientación en los dos sistemas que las forman tienen azimuts de  $185^\circ$  y  $335^\circ$  respectivamente, y echados de  $80^\circ$  para el primero y  $60^\circ$  para el segundo (Fig. 14 i).



Fig. 12. Fracturas conjugadas en basaltos andesíticos de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, en el Municipio de Veta Grande, Zacatecas.

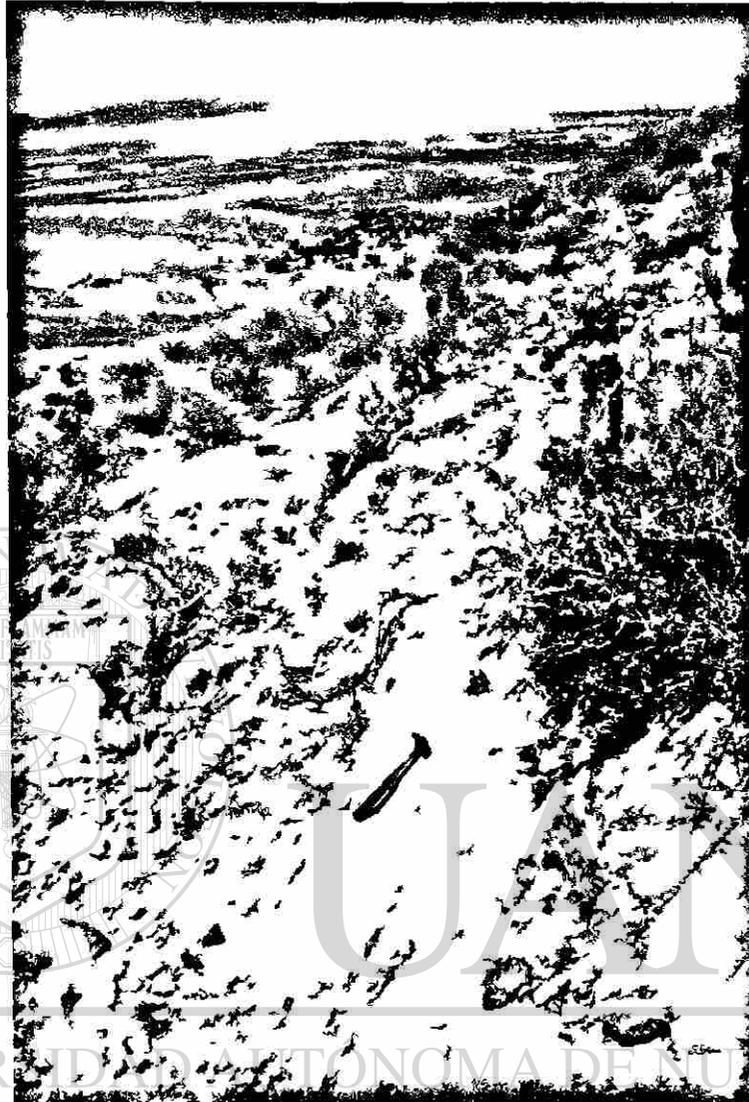


Fig. 13. Falla normal en el flanco oriente del graben de Calera, en el sitio El orito, al suroccidente de la Ciudad de Zacatecas.

#### **3.2.2.1.2 Fallas Normales**

Se identificaron tres orientaciones preferentes de fallamiento normal, tanto en las rocas del Grupo volcánico Superior, como en el Conglomerado Rojo de Zacatecas, la primera de ellas varía de  $80$  a  $112^\circ$ , la segunda fluctúa de  $121$  a  $151^\circ$  y la tercera tiene variaciones de  $250$  a  $286^\circ$  (Fig. 14 a, g, y k). En la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, se reconoció un solo sistema que sigue orientación de  $320^\circ$  (Fig. 14 c y e).

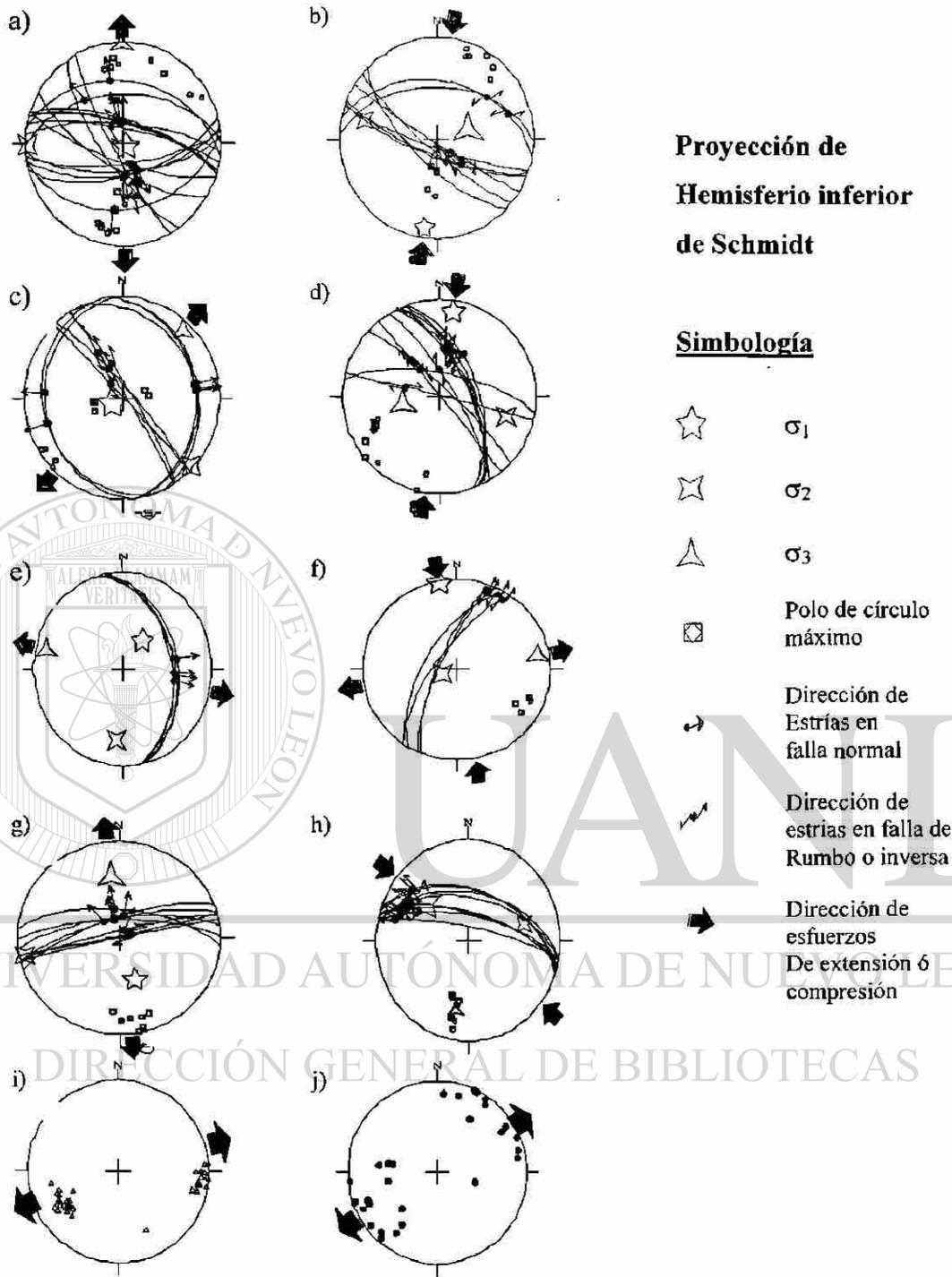


Fig. 14. Estereogramas en sitios seleccionados, para la reconstrucción de paleoesfuerzos: Conglomerado Rojo, Sitio La Bufa, a) Fallas normales, b) Fallas Inversas y de Rumbo. Unidad Volcanosedimentaria Indiferenciada, Sitio Mina El Bote, c) Fallas Normales, d) Fallas Inversas; Sitio Presidencia Municipal, e) Fallas Normales; Sitio Boulevard Díaz Ordaz f) Fallas de Rumbo; Sitio Veta Grande, i) Fracturas de Extensión; Sitio El Molino, j) Ejes de Pliegues. Complejo Volcánico Superior, Sitio Rebombero CNA, g) Fallas Normales, h) Fallas de Rumbo; Sitio El Orito, k) Fallas Normales

### **3.2.2.1.3 Fallas Inversas**

Este tipo de fracturas de cizalla de componente predominantemente inversa, fueron documentadas en la Unidad Volcanosedimentaria Indiferenciada y en el Conglomerado Rojo de Zacatecas, en la primera tienen orientaciones que varían de 280 a 339° y en la segunda fluctúan de 109 a 134° (Fig. 14 b, y d).

### **3.2.2.1.4 Fallas de Rumbo**

Las fallas de rumbo dextrales y sinistralas identificadas (Fig. 14 b, f y h), se presentan en el Conglomerado Rojo de Zacatecas, con orientación de 275°; en la secuencia Volcanosedimentaria, con azimuts que fluctúan de 68 a 80°, de 202 a 215° y de 352 a 355°; y en las rocas del Complejo Volcánico Superior, donde la orientación promedio es de 283°.

### **3.2.2.2 Estructuras Dúctiles.**

#### **3.2.2.2.1 Ejes de Pliegues**

En la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada se presentan una serie de pliegues recumbentes, en rocas calcáreo-arcillosas metamorfizadas, localizados tanto en el flanco oriente del Graben de Calera, sobre la margen poniente de la población de Morelos, como en su flanco poniente, en el Arroyo El Molino (Fig. 14 j). La orientación de los ejes de pliegues en la primera de las localidades referidas, tiene azimuts que fluctúan de 150° a 170°, con vergencia al sur, mientras que en la segunda, los ejes tienen azimuts que varían entre 16° y 100° con vergencia al norte y de 35° a 75° con vergencia al sur.

### **3.2.3 Reconstrucción de Paleoesfuerzos**

Con base en la teoría de Anderson (1942), donde se consideran las posiciones de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ; y mediante la utilización del programa de cómputo, diseñado por Angelier (1990); se realizó el análisis del tensor de paleoesfuerzos, a partir de los datos recabados en campo sobre la orientación (azimut) y determinación del sentido de deslizamiento de una serie de fallas, el cual se obtuvo de la medición del “pitch” (ángulo agudo formado entre la intersección de la dirección de las estrías y la horizontal) de sus estrías sobre el plano de falla.



Fig.15. Pliegues en pizarras negras de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, en el margen poniente de la población Morelos.

Para la determinación del tensor de paleoesfuerzos se seleccionaron un total de ocho sitios, atendiendo a los siguientes criterios: a) mesoestructuras que involucraron áreas asociadas a las fallas principales que conforman el Graben de Calera, así como aquellas ubicadas en áreas alejadas de las fallas principales que forman el graben, pero que pudiesen revelar información de la posible influencia de la macroestructura principal sobre las rocas que conforman el acuífero; b) reconocimiento de tipos de estructuras en las diferentes unidades litoestratigráficas aflorantes, con la finalidad de identificar el mayor número de eventos tectónicos a los que el área ha sido expuesta; c) contar con un número mayor a cuatro mediciones, ya que de acuerdo a especificaciones del programa se requieren al menos cuatro datos por análisis (Angelier, 1990).

Los resultados obtenidos del análisis de reconstrucción del tensor de paleoesfuerzos en el área de estudio (Tabla II), indican, en el caso de las fallas normales que se presentan en las rocas de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, del Conglomerado Rojo de Zacatecas y en las del Grupo Volcánico Superior, un comportamiento que coincide de manera general con los patrones regionales de extensión, correspondientes a la porción

meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras (Fig. 16), con edades que varían del Mioceno Medio a Tardío (Aranda, J., 2000). Mientras que para el caso de estructuras como fallas inversas y pliegues, desarrolladas en rocas de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada y en las fallas inversas del Conglomerado Rojo de Zacatecas, el evento asociado probablemente tenga relación con la deformación Laramídica, producida a finales del Cretácico y principios del Terciario (Padilla y Sánchez, 1986; Sedlock *et al.*, 1993 y 1994; Goldhammer, 1999).

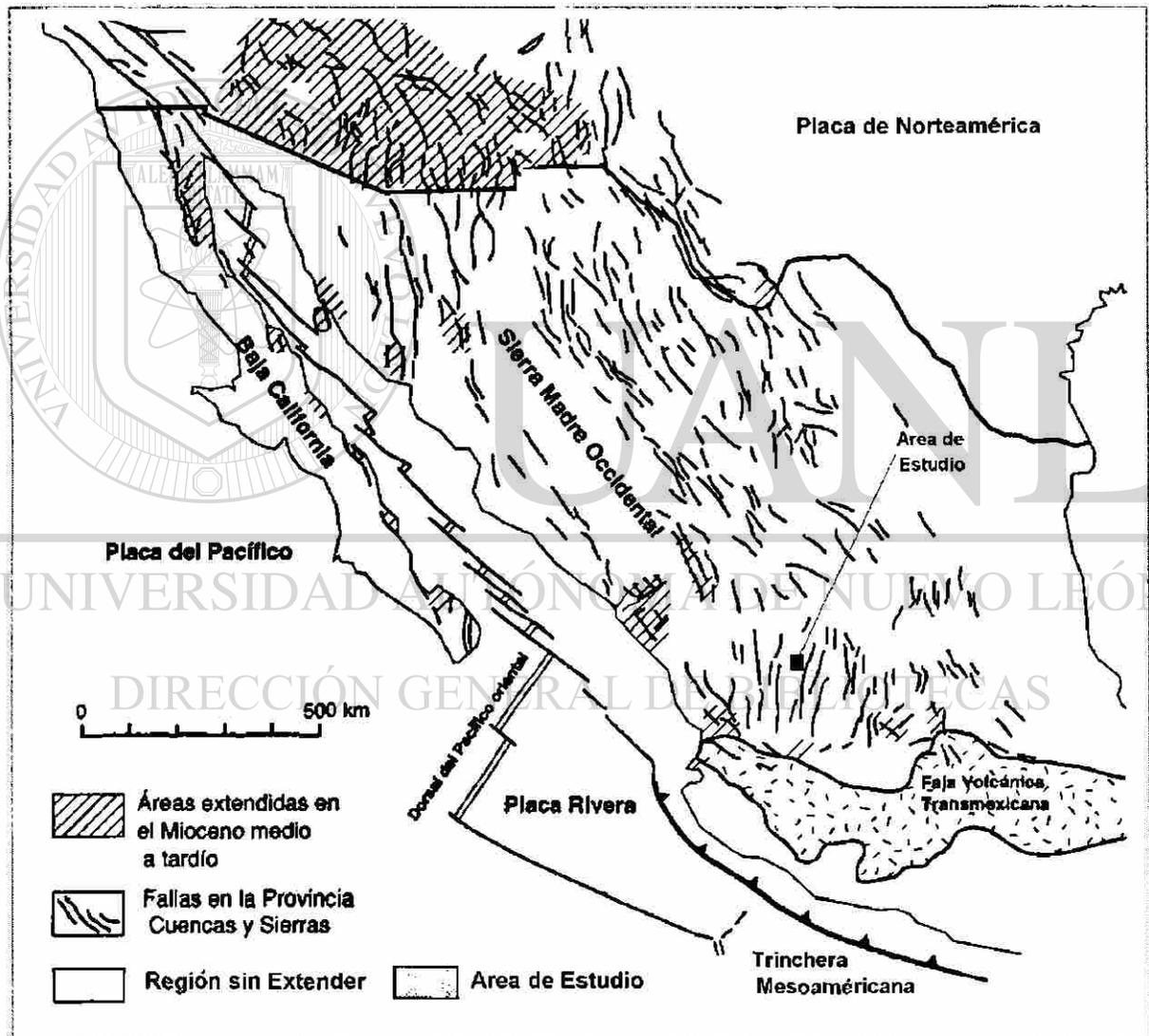


Fig.16. Provincia tectónica de Cuencas y Sierras, Modificado de Aranda J. (2000)

Tabla II. Estructuras en la Cuenca Hidrológica de Calera y su asociación a eventos tectónicos regionales o locales.

Sitio	Mesoestructura	Confiabilidad de datos	Compresión	Extensión	Evento Tectónico Asociado
Paseo La Bufa	Fallas inversas y de rumbo	* A	N NE- SSW	WNW-ESE	Deformación Laramídica (?)
Mina El Bote	Fallas normales	* A	-	NE-SW	Cuencas y Sierras
Mina El Bote	Fallas inversas	* A	NE-SW	-	Deformación Laramídica (?)
Presidencia Municipal de Zacatecas	Fallas normales	* A	-	WNW-ESE	Cuencas y Sierras
Boulevard Díaz Ordaz	Fallas de rumbo	* A	N-S	W-NW	Cuencas y Sierras
Presa El Molino	Ejes de Pliegues	* A	NW-SE	NE-SW	Deformación Laramídica (?)
Tanque de rebombeo CNA	Fallas de rumbo	* A	NW-SE	NE-SW	Cuencas y Sierras
Tanque de rebombeo CNA	Fallas normales	* B	-	N-S	Evento Caldera (?)
Paseo La Bufa	Fallas normales	* B	-	N-S	Evento Caldera (?)
El Orito	Fallas normales	* B	-	NNE- SW	Evento Caldera (?)

\*A Datos confiables, \* B Datos poco confiables

## 4 HIDROLOGÍA

### 4.1 Clima

De acuerdo a la clasificación de Koppen, el clima en el área de estudio se encuentra contenido en el grupo de los climas secos, siendo de tipo semiseco  $bs_1kw$  (lluvias de verano, con precipitación invernal entre 5 y 10.2 %). La precipitación media anual, calculada con base en los reportes de las dos estaciones meteorológicas existentes dentro de la cuenca, una en la Ciudad de Calera de Víctor Rosales y otra en la Ciudad de Fresnillo, alcanza en promedio 411 mm anuales en dos periodos de lluvias (Tabla III). El principal ocurre durante el verano y otoño, en los meses de junio a octubre, siendo el mes de julio el de mayor precipitación, 89.2 mm; un segundo periodo, de menor intensidad, se presenta durante el invierno con 13.1 mm en promedio.

Tabla III. Información meteorológica de las estaciones Calera y Fresnillo

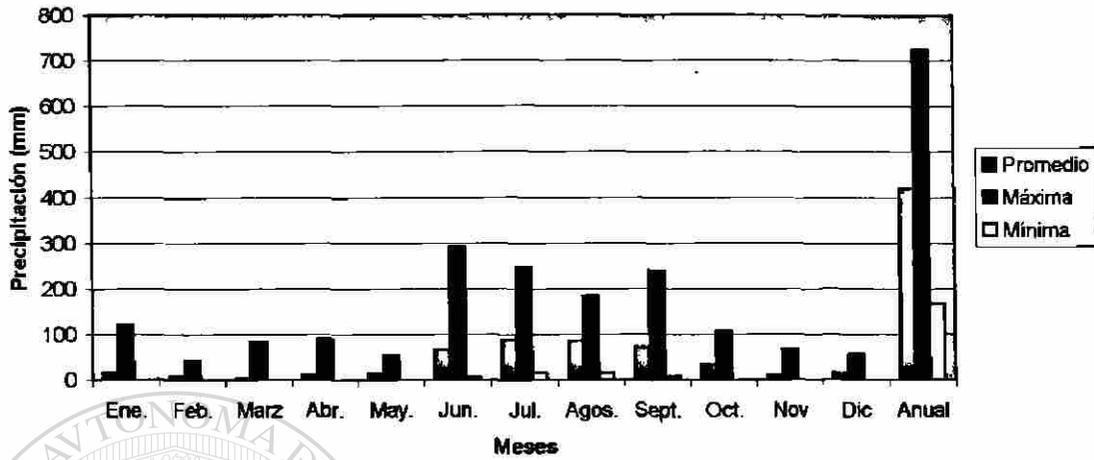
#### ESTACIÓN CALERA (PERIODO 1958-2000)

PRECIPITACIÓN PLUVIAL (mm)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Promedio	15.8	7.0	3.8	9.8	14.0	66.4	89.2	86.5	70.6	33.0	9.8	13.8	420.2
Máxima	121.4	42.1	83.5	89.5	56.1	291.6	247.3	185.0	239.5	107.4	66.3	55.1	724.5
Mínima	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	15.0	15.0	7.0	0.0	0.0	0.0	166.0
TEMPERATURA °C													
Promedio	10.3	11.6	14.5	16.7	19.5	19.8	18.6	18.2	17.6	15.5	13.2	11.4	15.6
Máxima	13.0	14.0	19.4	19.6	38.9	22.4	20.2	19.6	22.4	17.4	15.8	15.5	38.9
Mínima	6.5	8.4	10.6	14.0	15.3	17.2	17.0	13.1	15.6	13.3	10.5	9.5	6.5
EVAPORACIÓN (mm)													
Promedio	132.1	160.6	239.0	268.4	263.7	241.2	200.4	181.5	151.5	144.5	130.2	115.1	2228.3

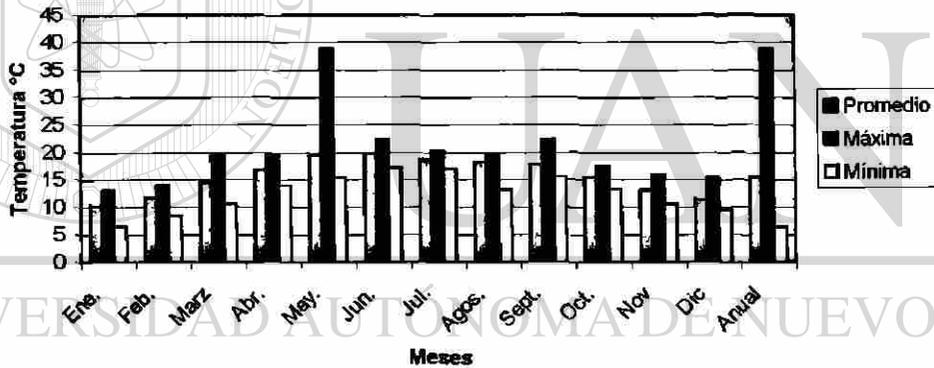
#### ESTACIÓN FRESNILLO (PERIODO 1958-2000)

PRECIPITACIÓN PLUVIAL (mm)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Promedio	12.4	5.4	4.5	9.3	15.3	63.3	78.4	90.7	65.1	35.8	14.7	12.6	402.1
Máxima	133.7	41.0	85.2	59.0	97.8	195.4	311.3	174.7	166.0	182.0	92.0	52.9	690.5
Mínima	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	29.7	0.0	0.0	0.0	0.0	109.8
TEMPERATURA °C													
Promedio	24.9	25.9	28.9	31.1	32.6	32.5	29.6	29.3	28.3	27.6	26.2	24.9	28.5
Máxima	34.0	30.0	39.0	35.0	38.0	38.5	39.5	34.0	36.0	33.0	31.0	29.0	39.5
Mínima	16.5	22.0	25.0	27.5	27.0	26.0	26.0	23.0	20.6	23.5	20.0	21.0	16.5
EVAPORACIÓN (mm)													
Promedio	132.4	160.6	237.9	272.2	284.7	240.5	211.2	189.1	161.7	153.2	139.1	125.2	2307.8

Precipitación Pluvial Promedio (mm), Estación Meteorológica de Calera  
1958-2000



Temperatura Promedio °C, Estación Climatológica de Calera  
(1958-2000)



Evaporación Promedio (mm), Estación Climatológica de Calera  
(1958-2000)

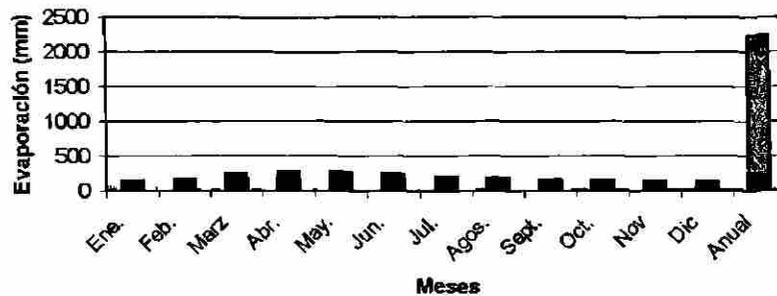
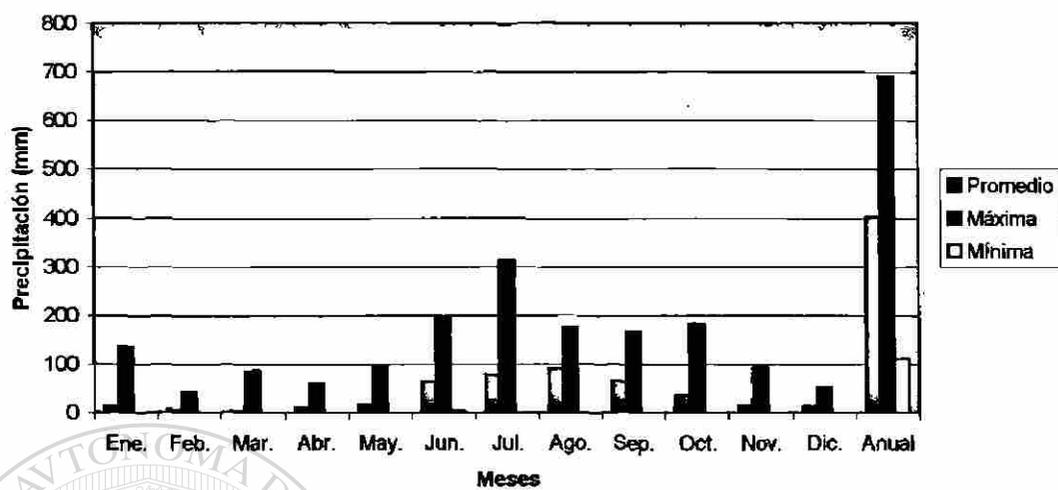
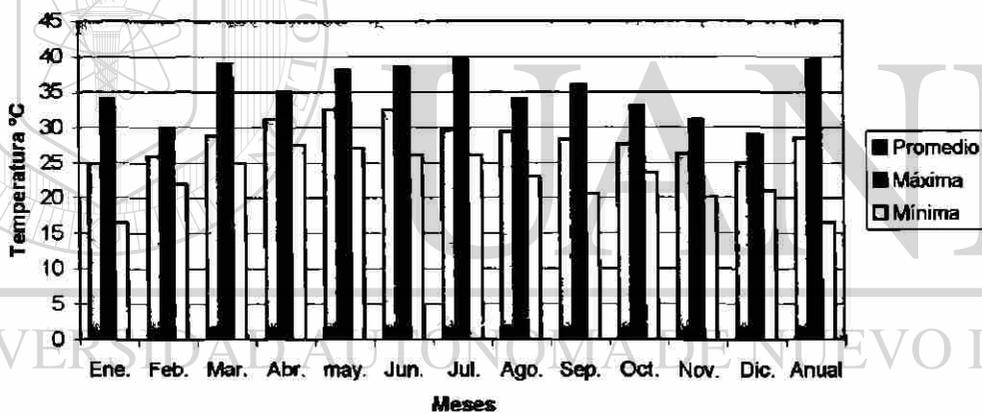


Fig. 17. Graficas de valores promedio de precipitación, temperatura y evaporación en el periodo 1958-2000, estación climatológica de Calera.

Precipitación Pluvial Promedio (mm), Estación Climatológica de Fresnillo



Temperatura promedio °C, Estación Climatológica de Fresnillo



Evaporación promedio (mm), Estación Climatológica de Fresnillo

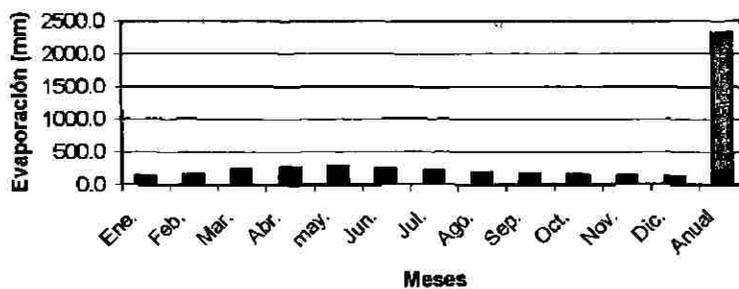


Fig. 18. Graficas de valores promedio de precipitación, temperatura y evaporación en el periodo 1958-2000, estación climatológica de Fresnillo.

La temperatura media anual es de 16.2 °C, siendo los meses de mayo y junio cuando se presentan los valores más elevados, 31.8 °C y el mes de enero que registran las temperaturas más bajas -3 °C. La evaporación potencial es de 2,228 mm al año, siendo en abril la mayor (268 mm) y en diciembre la menor (115 mm).

## **4.2 Corrientes Superficiales**

### **4.2.1 Descripción de la Red de Drenaje y Tipo de Cuenca**

El sistema de drenaje es interno debido a que la Cuenca Hidrológica de Calera es endorreica, caracterizada exclusivamente por el flujo de corrientes intermitentes, en donde el agua se evapora rápidamente a consecuencia de las condiciones de aridez imperantes en la misma. Las corrientes constituyen una red hidráulica de tipo dendrítico y paralelo asimétrico, de poca densidad, desarrollada en pendientes moderadas a suaves, con la excepción de algunos afluentes, que nacen en terrenos abruptos de las serranías de Zacatecas y de Fresnillo. De los datos contenidos en la tabla IV, se observa que en el flanco oriente de la cuenca, se presentan seis corrientes principales que descienden del costado occidental de la Sierra de Zacatecas (Fig. 19 a), con longitudes que van de 5 a 13 kilómetros y orientaciones preferentes NW 50° SE y NW 75° SE. Las corrientes alojadas en el flanco occidental de la cuenca (Fig. 19 b), ascienden a 14, tienen longitud variable de cuatro a 27 kilómetros y el rumbo promedio fluctúa de NE 60° SW a NE 75° SW. Se observa por otra parte que no obstante las diferentes clases de litologías por donde transitan los arroyos, estos mantienen prácticamente inalterable su configuración natural de drenaje dendrítico y paralelo. Los principales arroyos son: La Joya, Las Pilas, Tinajas, Muleros, Carrizalillo, Calera, Corralitos, Arroyo de Enmedio, El bordo, la Boquilla, La patrona, El tepetate, Estanzuela Prieto y el Arroyo Plateros, los cuales desembocan en un cuerpo de agua de tipo sabkha, conocido como la laguna de Santa Ana, localizada aproximadamente a 7 kilómetros al noroeste de la Ciudad de Fresnillo.

### **4.2.2 Cálculo de la Red de Drenaje Digital**

El cálculo de la red de drenaje de la cuenca se realizó a partir de los modelos de elevación (DEM) de las hojas Zacatecas F13-6 y Fresnillo F13-3, escala 1:250,000, editados por el INEGI, de los cuales es posible la extracción de la información hidrológica, mediante la utilización del software ArcInfo (Fig. 19 b) y construir así una red de drenaje

Tabla IV. Características de arroyos principales, de acuerdo al cálculo digital (*Streamorder*)

Flanco Oriente de la Cuenca Calera			
Arroyo	Longitud (Km)	Orientación	Observaciones
La Joya**	38	N-S	Arroyo principal
Las Pilas***†	8	NW 75° SE	Confluye hacia el arroyo La joya
Tinajas***†	13	NW 50° SE	Confluye hacia el arroyo La joya
Muleros***†	15	NW 55° SE	Confluye hacia el arroyo La joya
Flanco Occidente de la Cuenca Calera			
Carrizalillo***	11	N-S	Confluye hacia el arroyo Calera
Calera***	9	NE 80° SW	Confluye hacia el arroyo La joya
Corralitos***	11	NE 40° SW	Confluye hacia el arroyo de Enmedio
de Enmedio***	11	NE 40° SW	
El Bordo***	9	NE 85° SW	Confluye hacia el arroyo de Enmedio
La Patrona***	27	NE 75° SW	
El Tepetate***	7	NE 60° SW	
Estanzuela***	20	NE 60° SW	
Prieto**□	12	NE 60° SW	
Plateros□	6	NE 80° SW	

- \*\* Relacionado a pendientes de moderadas a suaves
- \* Relacionado a pendientes de abruptas a moderadas
- † Relacionado a rocas de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada
- Relacionado a rocas del Grupo Volcánico Superior
- Relacionado a rocas del Conglomerado Polimictico Indiferenciado

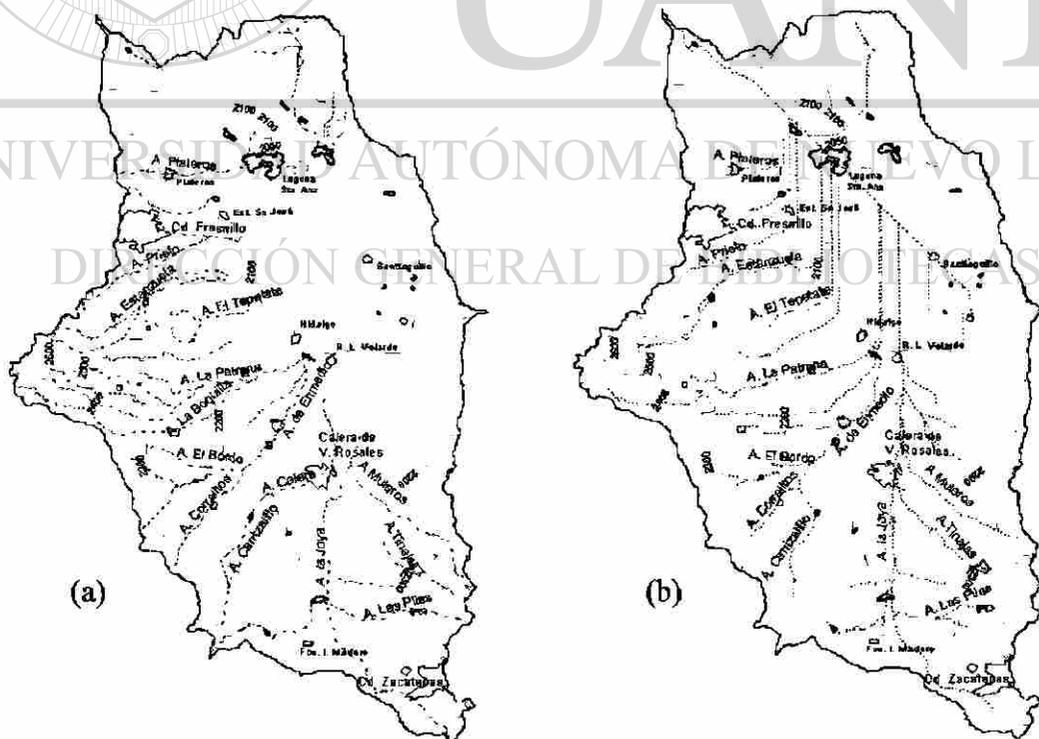


Fig. 19. (a) Red de drenaje, INEGI y (b) Red de drenaje cálculo digital

digital como es el caso del *grid* (representación de superficies, mediante una malla de puntos equidistantes entre sí, donde el promedio entre los valores de los puntos más cercanos refleja un valor de la superficie, Booth, B. ESRI, Inc. 2000), de ordenamiento de corrientes (*streamorder*), cuyo procesamiento requirió de los pasos que se describen a continuación (Fig. 20).

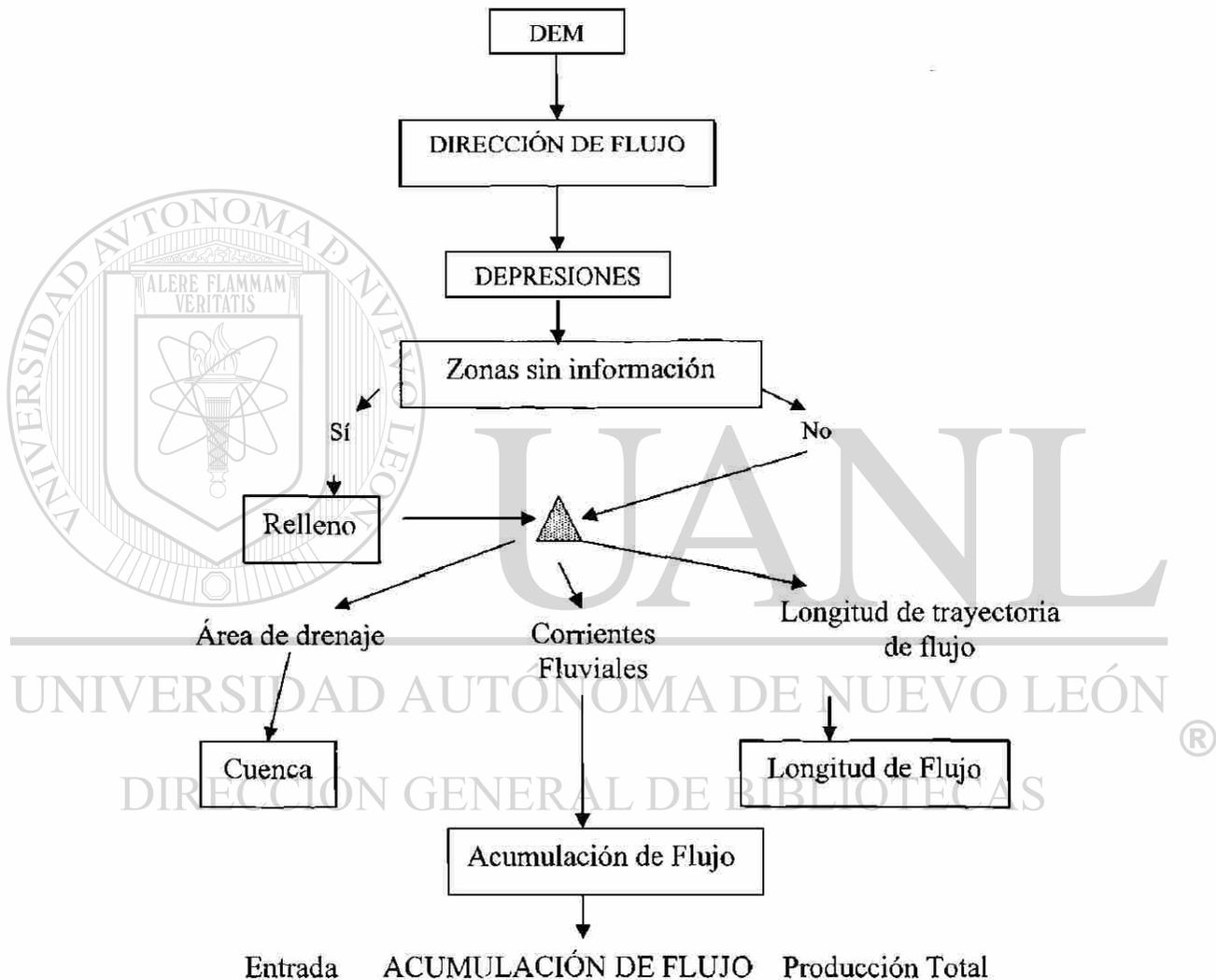


Fig. 20. Modificado del diagrama de las etapas para derivar las características de superficie, a partir de un DEM (Tomado de Manuales de ArcInfo, ESRI).

### Determinación de la Dirección de Flujo (*FLOWDIRECTION*)

Con la función "*flowdirection*" estableciendo como entrada el *grid* de superficie de elevación de los DEM, se realiza el cálculo de un *grid* de la dirección de flujo desde cada

celda, hasta la máxima pendiente de la celda vecina. En éste proceso las celdas que posean el mismo valor se irán agrupando e incrementando el área del vecindario, hasta encontrar la máxima pendiente de las celdas vecinas pendiente abajo, la cual una vez determinada, se codificará con el valor que represente esa dirección. Obteniéndose finalmente una serie de direcciones de flujo dentro del área total que comprende el *grid*. Durante el transcurso del cálculo, es común encontrar que algunas de las celdas que integran el *grid* representen huecos ó espacios vacíos, debido a errores en la base de datos, ya sea por la resolución de los datos o por el redondeo en las elevaciones. Se estima que los errores al respecto llegan a ser del orden de 0.9 a 4.7% del total de las celdas (Tarboton *et al.*, 1991).

En el caso de encontrarse espacios vacíos debe procederse a su relleno, es decir a la remoción de todos los errores en los datos, asegurando de esa forma la correcta delineación de cuenca y de las corrientes, de no hacerlo la red de drenaje que se derive puede ser discontinua.

#### **Identificación del Flujo Acumulado (*FLOWACCUMULATION*)**

Mediante la función de flujo acumulado (*flowaccumulation*) y dando como entrada el *grid* de dirección de flujo, se calcula el flujo acumulado tanto de cada celda, como de los conjuntos de celdas que fluyen hacia cada una de las respectivas pendiente abajo. De tal forma que al final del cálculo se genere el *grid* correspondiente a flujo acumulado, en el cual las celdas con mayores concentraciones de flujo significan, áreas que pueden ser usadas para la identificación de los canales que siguen las corrientes.

#### **Cálculo del Ordenamiento de Corrientes (*STREAMORDER*)**

Para el cálculo del *grid* de ordenamiento de corrientes (*streamorder*) se procesa un *grid* de la red de rasgos lineales, el cual se obtiene a partir de los resultados del *grid* correspondiente a "*flowaccumulation*". A continuación se procede al cálculo del ordenamiento de corrientes empleando para ello el método *STRAHLER*, técnica que opera bajo los siguientes criterios: (1) se asigna el valor de uno a los segmentos que no tienen tributarios, identificándolos con la clave de primer orden; (2) al unirse dos segmentos de primer orden, el segmento resultante pendiente abajo es catalogado con valor de dos y clave de segundo orden; (3) Cuando se unen dos segmentos de segundo orden, el resultante aguas abajo adquiere el valor de tres y se le asigna clave de tercer orden y así sucesivamente hasta obtener el total de la configuración de la red de drenaje digital.

### 4.2.3 Comparación de Resultados del Cálculo Digital, con la Red de Drenaje Editada por el INEGI.

En el modelo de red de drenaje que presenta el INEGI, se observa como es normal, el que las diversas corrientes superficiales que ocurren dentro de la cuenca, siguen diferentes cursos desde las zonas más elevadas a las más bajas, en donde se pierden bruscamente hacia las porciones centro-norte del área de estudio, donde el Graben de Calera forma una estructura tipo bolsón (Fig. 19 a), se aprecia además de acuerdo a los rasgos topográficos, que algunos arroyos no presentan continuidad en lo que aparentemente debería ser su cauce. En contraste con el modelo digital calculado (*streamorder*), la red de drenaje en apariencia es la misma, sin embargo ésta presenta diferencias sustanciales como lo es en: (1) sus desembocaduras están conectadas y relacionadas con una salida regional (Fig. 19 b), localizada hacia la parte noroccidental de la cuenca, (2) se observa una clara continuidad a lo largo de los diferentes segmentos que componen la red.

### 4.3 Delineación de la Cuenca Hidrológica de Calera

Para la delineación correspondiente, se utilizaron los modelos de altimetría de las hojas Zacatecas F13-3 y Fresnillo F13-6, editados por el INEGI, a escala 1:250,000; mismos que se analizaron con los softwares ArcInfo y ArcView. Con el primero de ellos se creó un *grid* de la cuenca, basado en los datos de elevación de la superficie del terreno y los *grids* de dirección de flujo (*flowdirection*), acumulación de flujo (*flowaccumulation*) y el de ordenamiento de las corrientes (*streamorder*).

El *grid* resultante "*hidrodem*" (Fig. 21) que representa en orden ascendente la elevación del terreno en tonos de verde (elevaciones menores), amarillo, café, gris y blanco (elevaciones mayores), se analizó haciendo uso de la función *surface* del software ArcView, mediante la cual se obtuvo, la representación de la elevación del terreno en un modelo denominado "*hillshade*" (Fig. 22), que muestra a través de iluminación hipotética, una imagen de áreas sombreadas de elevación. A continuación se dio profundidad a la vista a través de un procesamiento apoyado en la iluminación proporcionada por el *hillshade* y en las elevaciones del terreno del modelo del "*hidrodem*", generándose finalmente en el



Fig. 21. Grid "hidrodem" de la Cuenca Calera

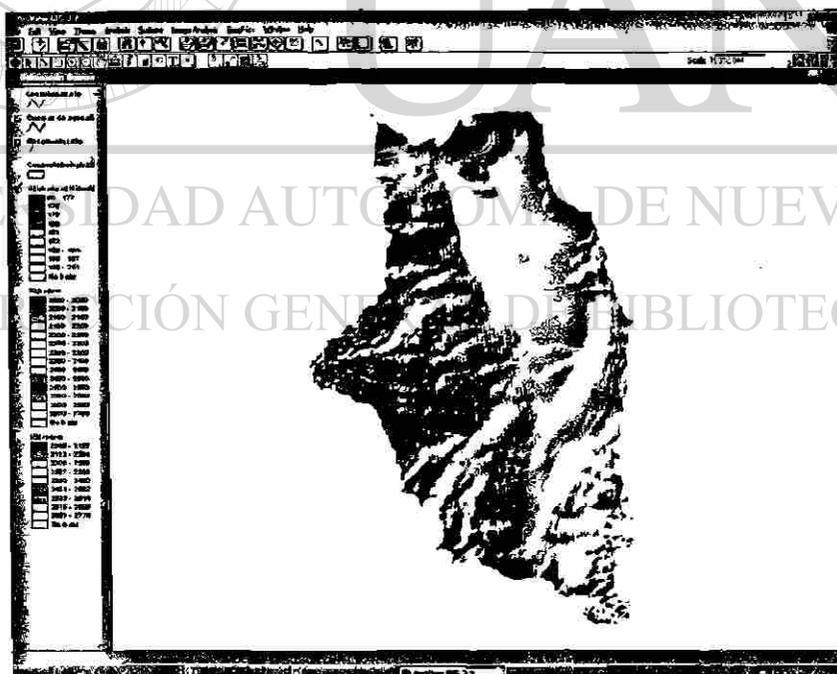
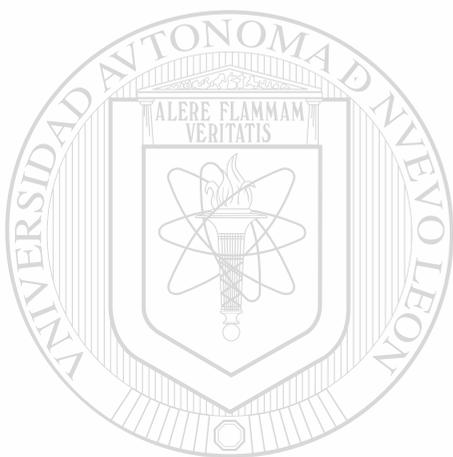


Fig. 22. Imagen que muestra el *grid hillshade* que resalta con iluminación y sombras el relieve del terreno.

Las mayores elevaciones se destacan en colores blanco, gris café, y amarillo; y corresponden a las sierras de Zacatecas y de Fresnillo; en tanto que las tonalidades verdes de claro a intenso, definen las porciones centro-norte de la cuenca, áreas donde se presentan relieves con pendientes muy suaves que tienden a la horizontalidad.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Investigaciones Hidrogeológicas Antecedentes

La realización de estudios enfocados al conocimiento de los recursos del agua subterránea en la Cuenca Hidrológica de Calera abarca de 1976 a la fecha, siendo la ex Secretaria de Recursos Hidráulicos y la actual Comisión Nacional del Agua las dependencias que han generado la mayor cantidad de información sobre el acuífero de dicha cuenca. Esta información que ha sido la base para la elaboración de la presente tesis.

Ya que este trabajo no tiene entre sus objetivos la elaboración de un resumen completo de todas las investigaciones antecedentes, ésta discusión se centra en estudios y reportes que tienen un significado regional o en aquellos que de alguna forma representan una utilidad para el desarrollo de la investigación que nos ocupa.

Los estudios realizados por la ex Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos y la actual Comisión Nacional del Agua (C.N.A.) en el periodo 1989-1999 que destacan por su importancia: a) Datos piezométricos de 166 aprovechamientos, correspondientes a los años 1989, 1990, 1991, 1993, 1994, 1995, 1997 y 1999, de un censo total que asciende a 1190 pozos, información proporcionada para el desempeño de este estudio por la gerencia Zacatecas de la C.N.A. en agosto de 2001; b) Resultados de las pruebas de bombeo practicadas a 25 pozos, en los años 1980, 1981 y 1986, que contienen datos de algunos parámetros hidráulicos como el caudal específico y la transmisividad; c) Planos de elevación del nivel estático (1993 y 1994), de profundidad del nivel estático (1993 y 1994) y de evolución del nivel estático (1980-1993 y 1980-1994). Así como los referentes a isotrasmisividades (1994) y de sólidos totales (1994); d) Reportes de la química del agua de 27 pozos; e) La descripción de los perfiles litológicos de 34 pozos; f) Modelo matemático de simulación del acuífero de calera; g) Reporte de la zona de agrietamientos superficiales en la comunidad agrícola de Francisco I. Madero, Municipio de Fresnillo.

Otro estudio que ha aportado información hidrogeológica valiosa es el realizado por Ariel Consultores en 1996, cuya finalidad fue elaborar un modelo tridimensional de simulación de los acuíferos de la región y el diseño de una nueva red de pozos de observación piezométrica, la cual propuso se incrementara de 94 a 218 pozos. En ese mismo estudio se llevó a cabo el análisis de pruebas de bombeo realizadas en el pasado por métodos tradicionales y por medio del modelo GWW. La información obtenida, permitió la

caracterización de los acuíferos interpretándoles como acuíferos de tipo libre con drenaje diferido, semiconfinados y semiconfinados con fracturamiento.

Con base en la piezometría disponible estimaron la evolución y abatimiento del nivel estático, calculada anualmente en 0.60 m promedio para la cuenca, así como las direcciones del flujo subterráneo con tendencia de sur a norte, además de la identificación de las zonas de recarga y descarga natural de los acuíferos, ubicándose las primeras en las Sierras de Fresnillo y Zacatecas y las segundas en la Laguna de Santa Ana. Aunado a lo anterior se realizó el balance hidrológico resultando un déficit hidráulico de  $-13.20 \text{ Mm}^3$  anuales.

Un segundo estudio que aporta información del Acuífero de Calera, realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1996) y que lleva el título “Estudio Hidrogeológico e Hidrogeoquímico en la Zona de Zacatecas, Zac.”, tuvo como objetivos definir las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas, en las denominadas por los autores zonas hidrogeológicas de Calera, Benito Juárez, Chupaderos y Guadalupe Bañuelos. Hicieron un muestreo de 63 pozos en las cuatro zonas, correspondiendo 25 para la zona Calera, en los que se determinaron aguas de tipo mixta-cálcica bicarbonatada. Considerándose además que con base en los valores de sólidos disueltos totales y la conductividad eléctrica, las zonas de recarga corresponden a las sierras de Zacatecas, Fresnillo y la margen suroeste de la cuenca.

## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### 5.2 Características del Acuífero

El sistema hidrológico que compone al acuífero Calera está formado por una secuencia de rocas clásticas (60% del área) pobremente consolidadas, de edad Cuaternaria (Anexo 1). En su porción centro-sur, dicha secuencia está enmarcada por un graben, delimitado al oriente por rocas metasedimentarias, rocas volcano-sedimentarias, terrígenas y volcánicas de las formaciones Zacatecas, Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, Conglomerado Rojo de Zacatecas y del Grupo Volcánico Superior. El flanco occidente del graben lo conforma un bloque de rasgos suaves y baja altitud, constituido principalmente por rocas metasedimentarias de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada y por mesetas de rocas volcanoclásticas del Grupo Volcánico Superior. La porción septentrional se caracteriza por la presencia de rocas calcáreas y samítico-pelíticas, correspondientes a la

Caliza Fortuna y al Grupo Proaño, además de otros afloramientos formados de rocas volcanosedimentarias y volcanoclásticas, semejantes a las que afloran en el sur del área, con la diferencia de que mientras en la parte occidente las volcanoclásticas Terciarias siguen formando mesetas, en su contraparte oriente constituyen cerros más redondeados de altitudes menores.

El acuífero es de régimen de flujo libre y está ubicado dentro de las unidades de aluviones, sin embargo las porciones marginales norte y oeste del acuífero tienen características litológicas diferentes a las del resto del mismo, ya las rocas ígneas aflorantes del Grupo Volcánico Superior y las rocas volcanosedimentarias de la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, se extienden hacia el subsuelo. Sin embargo, dichas zonas fueron discriminadas del análisis global del acuífero por las siguientes razones: (1) No se cuenta con información de pruebas de bombeo ni de los cortes litológicos de los pozos ahí localizados, salvo algunas referencias (comunicación personal con técnicos de C.N.A., 2002); y (2) Los datos piezométricos son limitados. En cuanto a otros parámetros del acuífero se tiene que el volumen anual de extracción estimado es de 128'500,000 m<sup>3</sup> y se realiza a través de 1,254 pozos activos, con caudales que oscilan de 6.5 hasta 49.0 l/s; la recarga asciende a 118'300,000 m<sup>3</sup> (Ariel Consultores, 1996), por lo que existe un déficit hidráulico de -13.20 Mm<sup>3</sup> anuales, hasta ese año.

### **5.3 Espesores del Acuífero y su Comportamiento Dentro de la Cuenca.**

Para conocer el espesor del acuífero dentro de las diversas zonas que conforman la cuenca, se procedió a la ubicación de los 34 pozos con descripción de cortes litológicos (C.N.A gerencia Zacatecas) en la carta hidrogeológica (Anexo 3) y al análisis de las secciones geológicas y geofísicas derivadas del estudio realizado por la empresa Ariel Consultores en 1996. Con base en esta información y en la carta geológica del área (Anexo 1), se construyeron nueve secciones geológicas (Fig. 24) sobre las cuales se trazo una plantilla compuesta por 94 puntos con equidistancias de dos kilómetros entre sí (Fig. 25) e intervalos entre sección y sección de 5 Km. A continuación se procedió a medir en forma directa, la elevación de la base del acuífero, tomando como referencia la intersección de la proyección a profundidad de los puntos trazados y el límite inferior de las capas de gravas,

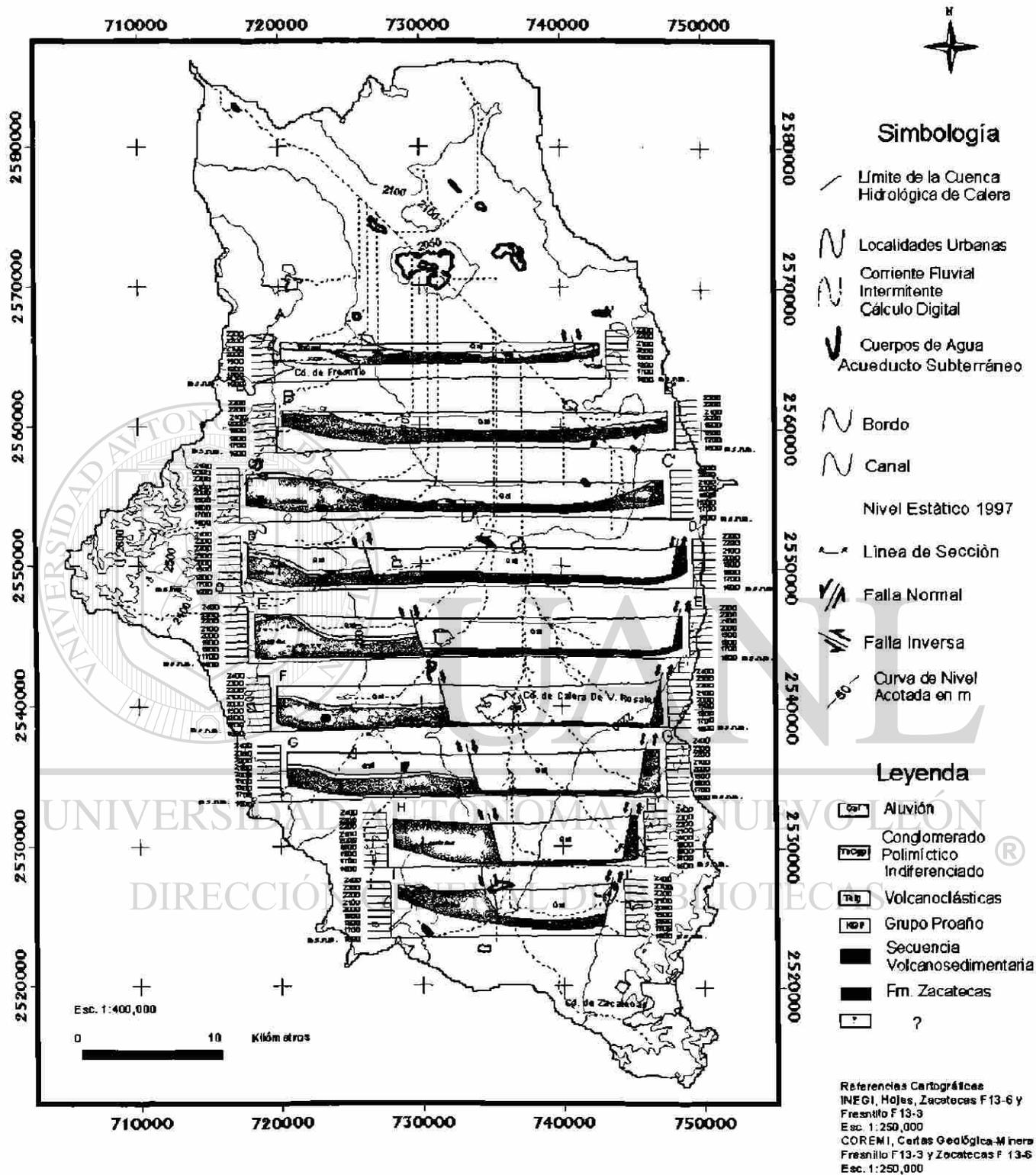
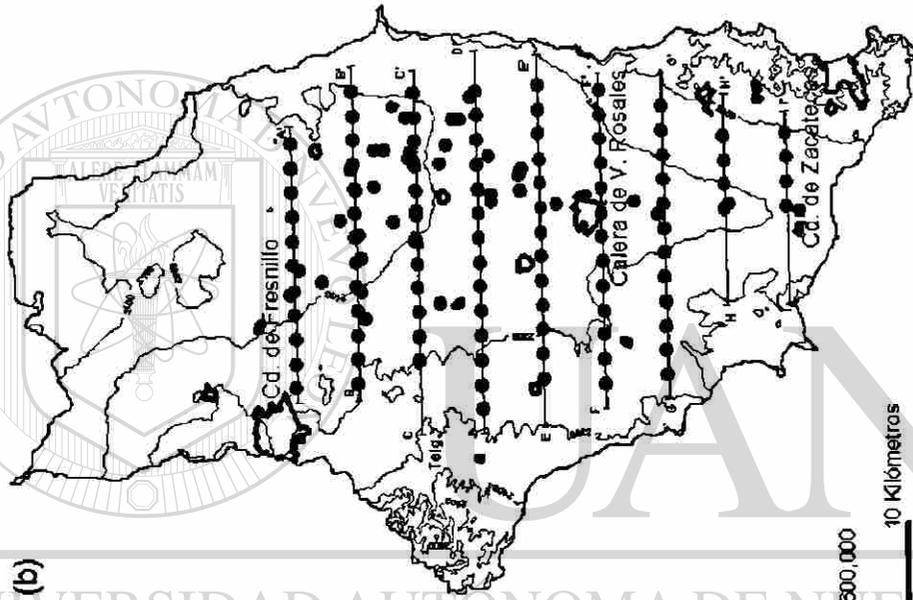
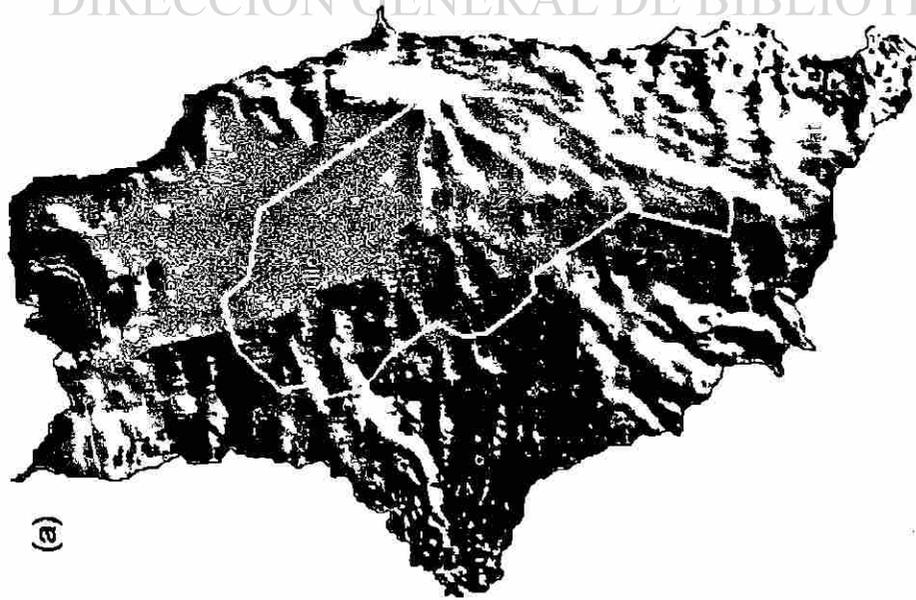


Fig. 24. Secciones geológicas



### Simbología

- Límite de la Cuenca Hidrogeológica de Calera
- N Localidades Urbanas
- Píezómetros para Cálculos Hidrogeológicos
- Malla de Elevaciones de Base del Acuífero
- Curva de Nivel Acotada en m
- A—A' Líneas de Sección

Fig. 25. Plantillas para cálculos hidrogeológicos

en cada una de las secciones geológicas. Los datos de elevación obtenidos, se utilizaron para calcular un *grid* de la base del acuífero, mediante la función *surface analysis* del software Arcview. En forma paralela, se trazó sobre la carta piezométrica (Anexo 3), un polígono que contuviese los 25 pozos con información piezométrica, con el objetivo de construir un *grid* de la elevación del nivel estático. Finalmente apoyados en la función *analysis* y de los dos *grids* tanto el de la base, como el de la parte superior del acuífero, se efectuó el cálculo del *grid* del espesor de la zona saturada, el cual muestra con claridad los diferentes espesores del acuífero en la cuenca (Fig. 24), los cuales fluctúan de 38 a 570 m (Tabla V, en anexos).

#### **5.4 Unidades Hidrogeológicas**

Considerando que el sistema acuífero en su conjunto abarca las diferentes unidades litoestratigráficas que se presentan en la zona y que algunas de estas cumplen el papel de almacenadoras y/o de trasmisoras de agua, se tomó de referencia para la subdivisión algunos de los criterios establecidos por la gerencia Zacatecas de la Comisión Nacional del agua, añadiéndose nuevos datos a su descripción.

##### **Unidad hidrogeológica de confinamiento lateral**

Esta unidad se compone por rocas de la Formación Zacatecas, presenta porosidad de tipo secundario y la constituyen fracturas de origen tectónico (fracturas de extensión, fracturas de cizalla y foliación); determinándose que la densidad de fracturamiento además de la foliación, varía de tres a cuatro fracturas por metro. Esta unidad junto con el Conglomerado Rojo de Zacatecas y la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada cumplen como barrera de confinamiento lateral del acuífero, además de que hacen el papel de trasmisoras de recarga en la porción centro-sur de la cuenca. La conductividad hidráulica de esta unidad se estima que puede ser menor de  $E \times 10^{-8}$  (Tabla VI).

##### **Unidad hidrogeológica de confinamiento del basamento**

Esta unidad la componen la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada y el paquete Terciario del Grupo Volcánico Superior, y constituyen la barrera de confinamiento del basamento del acuífero. La primera presenta porosidad por fracturamiento secundario de origen tectónico, las fracturas conjugadas tienen densidades de fracturamiento de seis a 10 por m, mientras que en las fallas normales, inversas y de rumbo la densidad de fracturas

es de 1 a 2 por m. Las rocas volcánicas Terciarias presentan fracturamiento de dos clases, tectónico y por pérdida de temperatura; en el primer caso se reconocieron fallas normales y de rumbo, con densidades de una a dos fallas por metro; mientras que las segundas presentan densidad de fracturamiento de dos a tres por metro. La conductividad hidráulica para la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada puede ser menor de  $E \times 10^{-8}$  m/s y en las rocas del Terciario puede variar de  $E \times 10^{-2}$  a  $E \times 10^{-5}$  m/s (Tabla VI).

**Unidad hidrogeológica de aluviones**

Esta unidad es la que constituye el acuífero, contiene aluviones del Cuaternario, formados por horizontes de gravas, unidades estratiformes y lenticulares de arenas y arcillas incluye además al Conglomerado Polimíctico Indiferenciado. La conductividad hidráulica en estas rocas varía de  $0.3 \times 10^{-6}$  a  $17.3 \times 10^{-6}$  m/s (Tabla VII).

Tabla VI. Rangos y valores de permeabilidad de diferentes tipos de rocas (tomado de Strukmeier y Margat, 1995).

Conductividad Hidráulica (m · s <sup>-1</sup> )	Tipo de roca		
	Sedimentos	Rocas sedimentarias	Rocas ígneas y metamórficas
1		carstificada	lava
10 <sup>-1</sup>	grava		
10 <sup>-2</sup>		caliza	
10 <sup>-3</sup>	gruesa		
10 <sup>-4</sup>	arena	arenisca	
10 <sup>-5</sup>	fina	fisurada	fisurada
10 <sup>-6</sup>			
10 <sup>-7</sup>		compacta	
10 <sup>-8</sup>	morrena		basalto
10 <sup>-9</sup>	sedimentos		granito, gneis, rocas metamórficas
10 <sup>-10</sup>	finos en la	pizarra	
10 <sup>-11</sup>	morrena		
10 <sup>-12</sup>		lutita	
10 <sup>-13</sup>			compacta

Tabla VII. Parámetros hidráulicos obtenidos con base en pruebas de bombeo.

*Pozo N°	*Profundidad Pozo (m)	*Elevación del brocal m.s.n.m.	Espesor Acuífero m	*Caudal l.p.s	*Caudal específico l.p.s	*Transmisividad Promedio $m^2/seg \times 10^{-3}$	Conductividad Hidráulica $m/seg \times 10^{-6}$
10	100	2105.00	300	15.00	0.98	0.96	3.2
17	101	2105.00	300	21.00	0.53	0.76	2.5
24	121	2103.00	300	29.00	2.35	5.20	17.3
30	114	2103.00	300	49.00	2.81	6.43	21.4
42	92	2095.00	300	15.00	1.22	0.69	2.3
46	130	2095.00	300	19.00	1.26	2.23	7.4
47	50	2095.00	300	6.50	0.36	0.10	0.3
71	75	2077.00	250	17.00	1.17	1.00	4.0
78	63	2082.00	250	20.00	1.23	0.70	2.8
98	81	2089.00	250	32.00	1.72	1.50	6.0
109	160	2093.00	330	38.00	1.68	1.36	4.1
134	90	2094.00	300	15.00	0.37	0.60	2.0
149	50	2084.00	300	6.50	0.76	1.00	3.3
237	120	2087.00	245	40.00	2.39	4.19	17.1
252	100	2088.00	240	40.00	6.06	3.55	14.8
279	100	2089.00	150	13.00	1.09	1.16	7.7
316	110	2118.00	300	22.00	1.80	1.12	3.7
367	114	2122.00	400	15.00	0.86	0.77	1.9
369	116	2126.00	400	23.00	0.77	0.60	1.5
402	110	2074.00	250	21.00	0.35	0.20	0.80
508	80	2115.50	150	38.00	2.05	1.00	6.7
701	-	-	264	27.50	1.89	2.22	8.4
705	200	2189.00	300	24.00	0.54	1.31	4.4
770	246	2079.00	245	2.78	2.78	2.09	8.5
777	218	2090.00	315	44.66	2.78	2.78	8.8
812	100	2098.00	200	14.50	0.75	0.66	3.3
931	150	2141.00	400	15.00	0.26	0.10	0.3

\* datos proporcionados por C.N.A.

### 5.5 Morfología de la Base del Acuífero

Para obtener la configuración aproximada de la morfología de la base del acuífero, se procedió al análisis del *grid* de elevación de la base del acuífero, mediante la función *surface* del software Arcview, de cuyo menú se seleccionó la opción derivación del *aspect* (azimut), obteniéndose un *grid* que muestra los azimuts de las geofórmulas existentes, a través de una gama de diferentes colores de acuerdo al valor del azimut (Fig. 26). Como segundo paso se efectuó el procesamiento del *grid* de buzamientos, cuyo cálculo se hizo

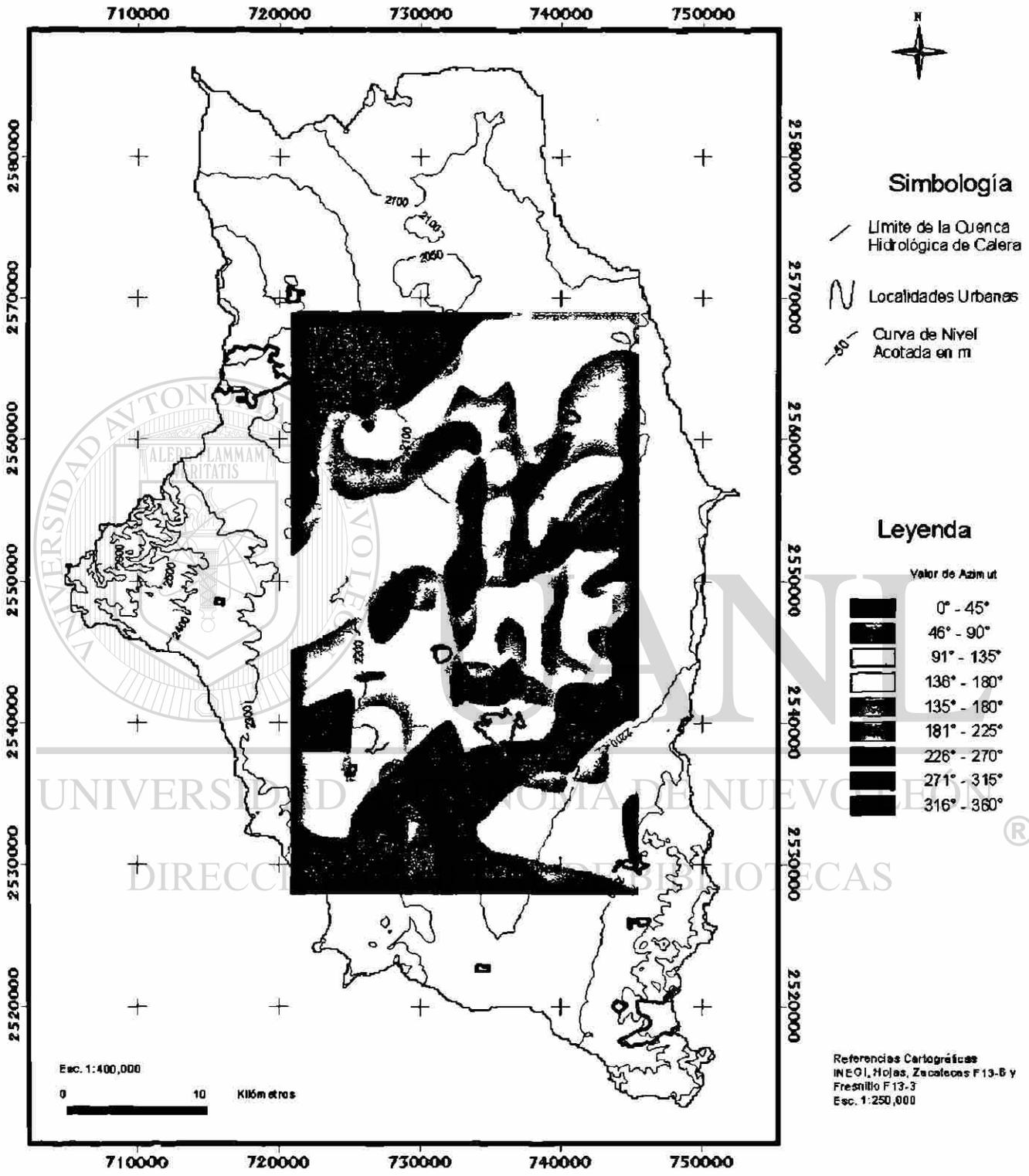


Fig. 26. Azimuts de Geformas de la Base del Acuífero

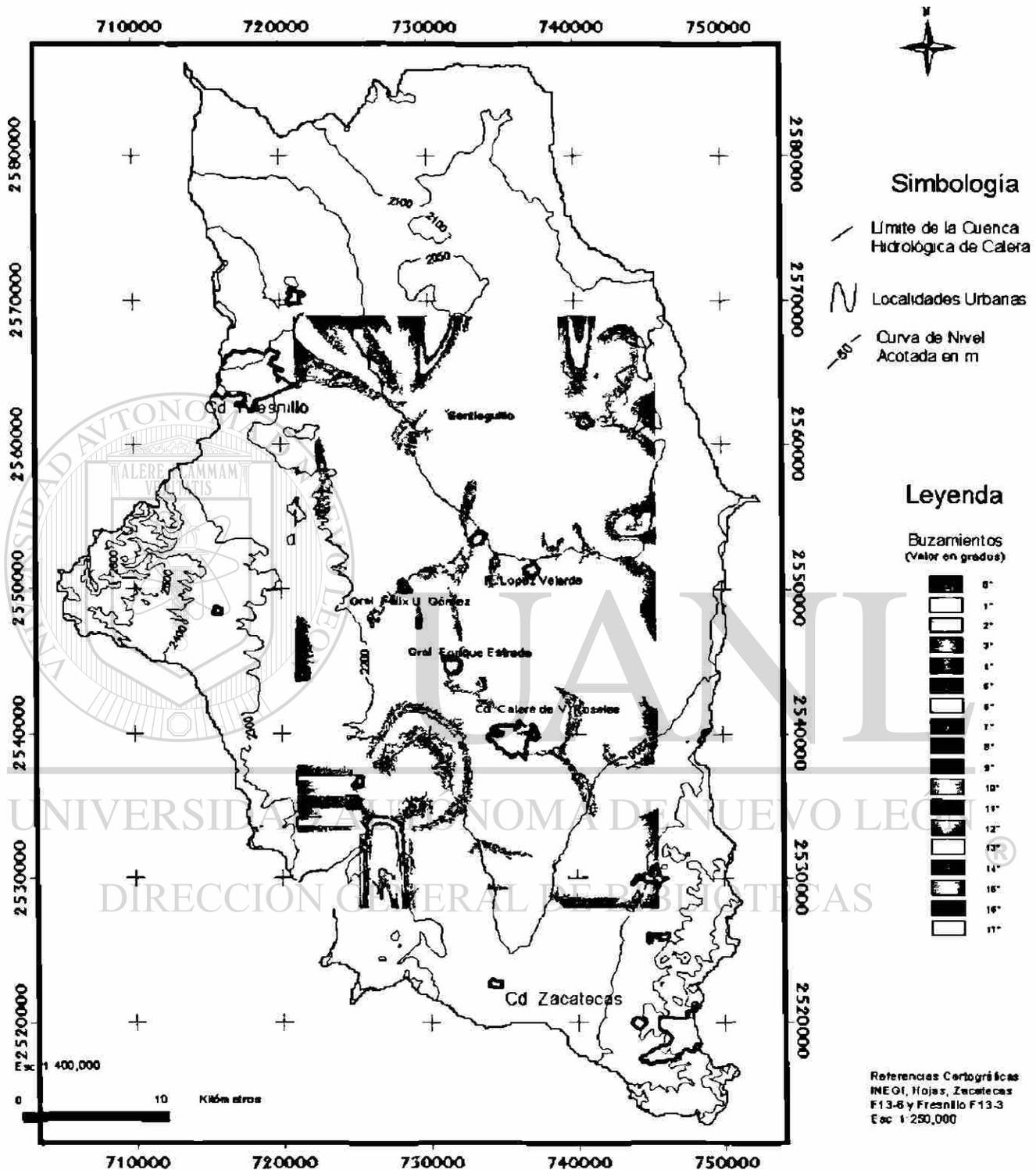


Fig. 27, Buzamientos de Geformas de la Base del Acuífero

con las mismas de que en el menú de *surface*, se seleccionó la opción *slope* (buzamiento). En la figura 27 se puede observar que la superficie correspondiente a la base del acuífero, presenta una serie de rasgos que se describen a continuación: (a) Imperan las formas suaves en la mayor parte de la cuenca, como lo indican los valores bajos de los buzamientos 0 a 5°; (b) se destacan tres zonas de forma elíptica, con relieve relativamente abrupto en comparación al resto de la cuenca. En la figura 27 la estructura principal se localiza aproximadamente 12 kilómetros al suroccidente del poblado Calera, buzando con valores máximos de buzamiento de 17° hacia los flancos norte, este y oeste, percibiéndose además que las litologías involucradas corresponden al Grupo Volcánico Superior en contacto con la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada. La segunda área en importancia presenta una elevación de forma ovoide, ubicada cuatro kilómetros al noreste de Estación San José, los echados son de 14° hacia el sureste y oeste. La tercera de estas estructuras ocurre al norte de la población Santiaguillo, también de forma elíptica, con buzamientos de 11° tanto hacia el flanco oriente como al poniente.

## **5.6 Influencia del Fracturamiento en el Sistema Acuífero**

Siendo que el tipo de acuífero de la Cuenca Hidrológica de Calera es un acuífero de gravas, se considera que las fracturas que se presentan en el conjunto del sistema acuífero no ejercen influencia en el comportamiento del régimen hidráulico de las aguas subterráneas, pero sí constituyen un factor importante en la recarga del sistema, además que como se señala en el capítulo 8, las fracturas de extensión coincidentes con los patrones extensivos de la Provincia Tectónica de Cuencas y Sierras se ven reflejados en el agrietamiento producido por sobreexplotación del acuífero.

## **5.7 Propiedades Hidráulicas**

### **5.7.1 Transmisividad**

Es el caudal de agua de viscosidad dada que pasa por unidad de anchura del acuífero, bajo un gradiente unitario. Los valores de transmisividad recopilados para el presente estudio, tienen un alto grado de variación, los cuales fluctúan de  $1 \times 10^{-4}$  a  $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$  y se obtuvieron del reporte de pruebas de bombeo (Tabla VII), efectuadas durante los años 1980, 1981, 1984 y 1986 (base de datos C.N.A.). Con el apoyo de ésta información y

empleando el paquete de cómputo ArcView, se realizaron algunas pruebas para el cálculo de contornos de éste parámetro hidráulico, desafortunadamente no se obtuvieron resultados confiables, ya que de acuerdo al número de pozos con información no es una cantidad suficiente, que permita una buena interpolación, dada la gran extensión de la cuenca. No obstante, a continuación se describe la distribución de isotransmisividades interpretada por la Comisión Nacional del Agua, en 1994: Los valores de transmisividad que presentan la magnitud más baja, están representados por la curva de  $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  y se localizan, en la porción centro-norte de la cuenca, tanto al oriente del poblado Enrique Estrada, como al sur de la población Santiaguillo. Hacia el occidente de ésta misma población, en dirección a la Ciudad de Fresnillo, los valores de isotransmisividad, se van incrementando desde 1.0, 2.0 hasta  $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . En tanto que el valor más alto de  $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  tiene un carácter local y se enmarca entre las comunidades Ramón López Velarde y Santa Rita.

### 5.7.2 Conductividad Hidráulica

El cálculo de conductividad hidráulica, se realizó mediante la fórmula  $K = T/m$ ; donde: K = permeabilidad; T= transmisividad y m= espesor del acuífero; dicha fórmula se alimentó con los datos de transmisividades y de espesores estimados del acuífero contenidos en la Tabla VII. Basados en los resultados obtenidos, el término acuífero se definió bajo los siguientes criterios. Acuífero de permeabilidad moderada, cuando los valores de permeabilidad o conductividad hidráulica fluctúan de  $E \times 10^{-5}$  a  $E \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ; si los rangos varían de  $E \times 10^{-6}$  a  $E \times 10^{-7} \text{ m/s}$  se le continúa llamando acuífero, pero de permeabilidad baja. Mientras que si los valores se sitúan entre  $E \times 10^{-7}$  a  $E \times 10^{-8} \text{ m/s}$ , el acuífero es considerada como de permeabilidad muy baja, situación que confiere a esa parte del sistema, el término de acuitardo (Fig. 28).

### 5.7.3 Coeficiente de Almacenamiento

Representa el volumen de agua por unidad de superficie, que se extrae o adiciona al acuífero, bajo un cambio unitario de potencial. El valor considerado se sitúa en el rango de los acuíferos libres y es de 0.13 (información de C.N.A.).

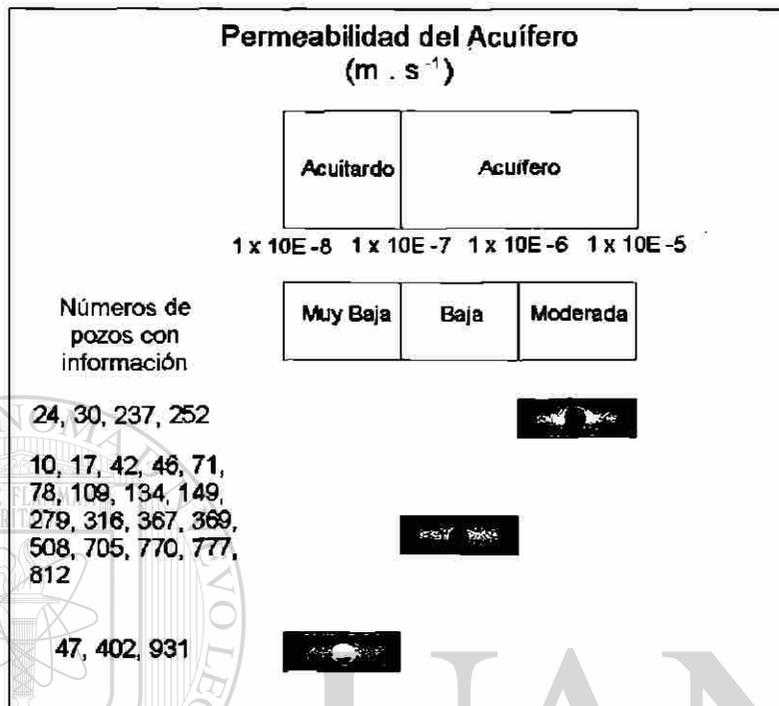


Fig. 28. Valores de permeabilidad del Acuífero de Calera

## 6 HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA HIDRÁULICO

### 6.1 Dimensiones del Acuífero

El acuífero motivo del presente estudio se encuentra localizado, dentro del perímetro que conforma el valle de la Cuenca Calera, su superficie se calcula en aproximadamente 1,214 km<sup>2</sup> y su espesor fluctúa desde 38 m en su porción norte, hasta 570 m en la parte centro-sur.

### 6.2 Elevación del Nivel Estático

Para el cálculo de la elevación del nivel estático, se procedió al análisis de la historia piezométrica de los aprovechamientos monitoreados en los últimos 20 años. Encontrándose que la información correspondiente al año de 1997, es la más completa con un total de 166 registros. A partir de esos datos, se procedió a la interpolación entre los valores de elevación de los niveles estáticos de cada uno de pozos, con la finalidad de trazar los contornos de isopiezas correspondientes (Anexo 3). Una vez construidos dichos contornos se digitalizaron y se incorporaron a un archivo digital.

El siguiente paso consistió en ajustar digitalmente con las herramientas del software arcview, las diferentes isopiezas a una plantilla base (Fig. 25 a), para evitar el que los cálculos realizados por la paquetería de los sistemas de información geográfica, se dispararan indiscriminadamente hacia otras zonas de la misma cuenca, las cuales, al carecer de información, distorsionaran la información existente; además de que con dicha plantilla se facilitarían los cálculos hidrogeológicos digitales que se fueran requiriendo durante el desarrollo del trabajo.

Concluido lo anterior, mediante el software ArcInfo, se calculo el *grid* de elevación de la superficie del nivel estático (Anexo 3); en el cual se puede observar que a la altura del Poblado de Francisco I. Madero se delinea una isopieza con valor de 2,170 m.s.n.m., a partir de la cual se desprenden en orden decreciente, cada diez metros las demás equipotenciales, hasta llegar a la equipotencial 2,030 m.s.n.m., situada al sur de la Laguna Santa Ana.

### 6.3 Profundidad del Nivel Estático

El cálculo de las profundidades de elevación del nivel estático, referido al año de 1997, se efectuó a partir de la diferencia entre la elevación del brocal y la elevación del nivel estático. Con los resultados obtenidos y haciendo uso de la función *surface analysis* del software ArcInfo, se realizó la construcción del *grid* correspondiente (Anexo 3), el cual muestra, mediante una gama de tonalidades color azul, la profundidad a la que se encuentra el nivel de las aguas subterráneas, con relación a la elevación de la superficie del terreno. Resultando las profundidades más someras (<10 a 10 m) en las inmediaciones de las localidades urbanas, Ramón López Velarde, Enrique Estrada y Fresnillo. Las áreas que presentan los mayores niveles de depresión, entre 80 y 100 m, son dos, una situada al noroccidente del poblado Félix U. Gómez y la otra al noreste de la población Calera de Víctor Rosales. En el resto del acuífero, las cotas de profundidad adquieren valores intermedios respecto a los ya mencionados.

### 6.4 Evolución del Nivel Estático

Durante el periodo comprendido de 1980 a 1997 el nivel estático sufrió una evolución con abatimientos máximos con valores que fluctúan de -10 a -20 metros. Los valores de -10 m circundan los poblados de Morfín Chávez, Sta. Ana, Santiaguillo, Las Catarinas, Pozo de Gamboa, Noria de los Gringos, Calera de Víctor Rosales y Enrique Estrada. Los valores de -15 y -20 m se presentan en la porción central del valle al nororiente de Calera de Víctor Rosales; y al norte, en los alrededores de Ramón López Velarde, al suroriente de Santiaguillo y entre las comunidades de los pardillos ubicadas aproximadamente 15 km al oriente de la Ciudad de Fresnillo.

### 6.5 Fluctuaciones del Nivel de Agua Subterránea

El agua subterránea en el acuífero Calera ocurre bajo condiciones no confinadas y la superficie potenciométrica la constituye el nivel freático. Las fluctuaciones del mismo representan cambios de almacenamiento de agua en el subsuelo, ya que el nivel piezométrico es una superficie dinámica que se mueve hacia arriba y hacia abajo, de acuerdo a las condiciones locales y regionales de recarga y descarga. Estas condiciones son fuertemente controladas por factores como la precipitación, movimiento de las corrientes

superficiales y extracción de agua a través de pozos. En general, las fluctuaciones son analizadas con referencia a los dos periodos de precipitación que se presentan en el transcurso del año. Durante el verano se presenta el 90 por ciento de la precipitación anual, cuando la tasa de evaporación es mayor y la demanda de agua para riego y consumo industrial y doméstico es alta; contrastando en forma favorable se presenta la situación de que sólo una pequeña parte de la precipitación que ocurre en las porciones bajas de la cuenca contribuye al flujo superficial, debido a que los suelos tienen rangos moderados de infiltración por los prolongados periodos de estiaje. Por lo tanto se estima que una buena parte de la lluvia se infiltra hacia las aguas subterráneas. En los meses de octubre y noviembre el nivel de agua desciende, debido a la falta de recarga. Siendo hasta el invierno el segundo periodo de recarga anual, debido a la precipitación del diez por ciento restante, estimándose que la mayor parte del volumen de agua precipitado se percola hacia el manto acuífero, ya que la radiación solar es moderada y en consecuencia la evaporación es baja. A partir del mes de febrero y hasta finales del mes de junio se registra nuevamente una baja en el nivel piezométrico, finalizando con ello el total de un ciclo de recargas y descargas y dando principio a uno nuevo.

#### **6.6 Recarga y Descarga**

La recarga de agua hacia el acuífero se debe a la infiltración directa de la precipitación a través de (1) flujo lateral del bloque formado por la Sierra de Zacatecas, las mesetas que forman las rocas del Grupo Volcánico Superior y por el bloque de la Sierra de Fresnillo; (2) flujo subterráneo del basamento adyacente formado por la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada y el Grupo Volcánico Superior; (3) retorno de agua por irrigación de zonas de cultivo, (4) infiltración de agua a través de pozos secos y corrientes superficiales durante los periodos de lluvia.

La descarga de agua del sistema formado por el acuífero Calera es debida principalmente a: (a) la extracción de agua a través del bombeo de pozos destinados a servicios de la agricultura, industria y agua potable, y (b) la evaporación.

La estimación de recarga y descarga que se presenta, fue tomada del balance hidrológico presentado en el trabajo de Ariel Consultores (1996), en el cual se establece lo siguiente:

“Se considero recarga vertical a la lluvia que multiplicada por el coeficiente de infiltración  $I_1$  y el área da un valor de  $53.5 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ , más el público urbano y el agrícola, que se calculó de la misma forma, los cuales aportan a la recarga vertical  $4.1$  y  $20.8 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ , respectivamente; además se consideró una entrada lateral de  $40 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ , lo que da un total de entradas de  $118.3 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ . En las salidas se consideró el rebombeo, la evaporación y salidas laterales, lo que da un total de  $131.5 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ . Se obtuvo cambio de almacenamiento de  $13.1$ , coeficiente de almacenamiento de  $0.05$  y volumen drenado de  $-264 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ , contrastando con un cambio de almacenamiento de  $-72 \text{ Mm}^3 / \text{año}$  y un volumen de entradas de  $-1,024 \text{ Mm}^3 / \text{año}$  para 1977 con una extracción de 50% del agua.”

### Balance Hidrológico\*

Fecha			Junio del 96
Residual		$\text{Mm}^3 / \text{año}$	11.10
Lluvia	Área	$\text{Km}^2$	2,200.00
	Coeficiente de infiltración	$I_1$	0.050
		mm	486.20
Público urbano + Industrial		$I_2$	0.30
		$\text{Mm}^3 / \text{año}$	24.70
Agrícola		$I_3$	0.20
		$\text{Mm}^3 / \text{año}$	103.80
Entradas	Recarga vertical	Lluvia	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 53.50
		Público urbano	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 4.10
		Agrícola	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 20.80
	Lateral Subterránea	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 40.00	
	Total	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 118.30	
Salidas	Bombeo	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 128.50	
	Evaporación	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 1.00	
	Lateral	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 2.00	
	Total	$\text{Mm}^3 / \text{año}$ 131.50	
Almacenamiento		$\text{Mm}^3 / \text{año}$	-13.20
S (Coeficiente de almacenamiento)			0.05
Volumen drenado		$\text{Mm}^3 / \text{año}$	-2,64

\* Tomado de Ariel Consultores (1996)

## 7 CALIDAD DEL AGUA

En términos generales las aguas subterráneas que componen el acuífero de la Cuenca Hidrológica de Calera son de buena calidad y son adecuadas para cualquier uso. La recarga por infiltración de la precipitación es moderada y se considera que esta constituye una suficiente fuente de renovación a los mantos acuíferos. Para la determinación de los tipos de aguas en la cuenca, se utilizó la base de información de análisis químicos de 27 pozos, proporcionada en la gerencia Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua. Los

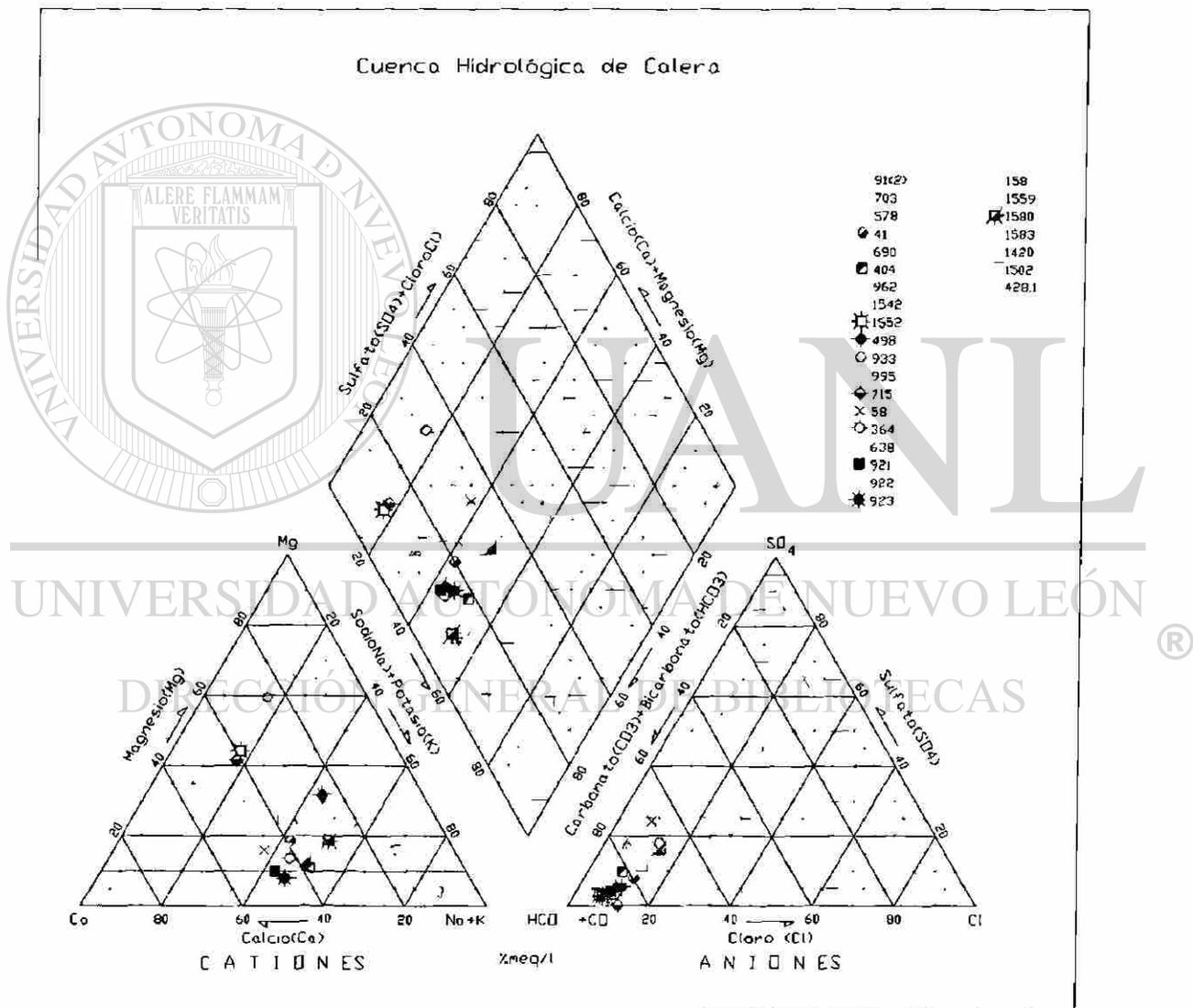


Fig 29. Porcentajes de iones mayores en muestras de agua del Acuífero Calera

datos referidos (Tabla VIII) se vaciaron en un archivo digital para su posterior análisis mediante el diagrama de Piper, a través del programa de cómputo Rockware (2000).

De acuerdo a los resultados que se aprecian en el diagrama de Piper (Fig. 29), se interpreto la existencia de tres tipos de aguas:

- 1) Mixtas bicarbonatadas
- 2) Mixtas calcico-sódicas, bicarbonatadas
- 3) Sódico bicarbonatadas

Estas composiciones, probablemente deben su origen, a la disolución de sedimentos químicos presentes en las rocas de ambiente marino que constituyen la columna estratigráfica de la región, los cuales son aportados en forma paulatina a las aguas subterráneas del interior de la cuenca.

### **7.1 Contaminación del Agua Subterránea**

A través de estudios realizados por el departamento de aguas subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (C.N.A.), se han detectado algunos problemas en cuanto a la calidad de la misma, derivados de dos fuentes potenciales de contaminación; actividades antropogénicas y de origen natural. En el primer caso se tiene el depósito de jales de beneficio mineral en tierras agrícolas entre las poblaciones La Pimienta y Noria de los Gringos, Vetagrande, así como en las áreas circunvecinas a la Ciudad de Fresnillo, donde se localiza otra zona de explotación minera con sus respectivos depósito de jales. En lo que corresponde a contaminaciones de origen natural se tiene la presencia de arsénico, elemento frecuentemente asociado a mineralizaciones de polimetálicos de plata, plomo y zinc, las cuales ocurren en los alrededores de la Ciudad de Zacatecas, al noroccidente de la comunidad Francisco I. Madero y en Fresnillo.

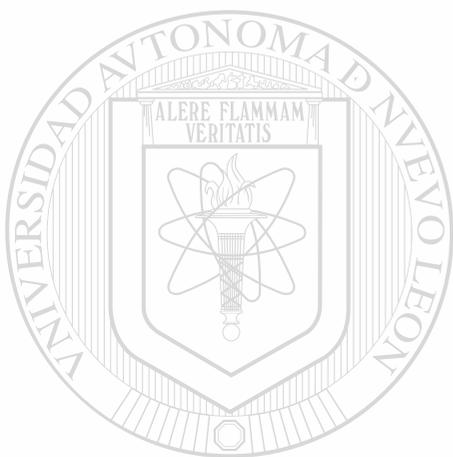
Con el propósito de evaluar la calidad del agua subterránea para consumo humano la C.N.A. ha realizado en diferentes periodos, desde 1989, monitoreos en algunos aprovechamientos de los sistemas que abastecen de agua potable a las poblaciones de Zacatecas, Guadalupe y zona conurbada. Los resultados acerca de la distribución y comportamiento espacial de metales pesados Ag, Cu, Cr, Zn, en el sistema La Joya

Tabla VIII. Análisis hidroquímicos de la Cuenca Hidrológica de Calera

N° Aprov.	Familia	Std	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Ca <sup>++</sup>		Mg <sup>++</sup>		Na <sup>++</sup>	pH	Cond. Elec. micro Siemens/cm	
			M <sub>e</sub> /l	PPM	M <sub>e</sub> /l	PPM	M <sub>e</sub> /l	PPM	M <sub>e</sub> /l	PPM	M <sub>e</sub> /l	PPM				
41	C2-51	285,38	0,3	14,4	0,45	15,95	2,96	180,56	1,41	28,25	67	8,14	1,52	34,96	7,3	370
58	C2-51	360,14	1,15	55,2	0,40	14,18	3,2	195,2	2,21	44,28	0,76	9,24	1,76	40,48	7,4	450
91(2)	C2-52	468,79	0,7	33,6	0,74	26,23	4,56	278,16	0,49	9,81	0,21	2,55	4,20	96,6	8,10	440
158	C2-51	563,00	1,1	52,8	0,45	15,95	5,74	350,14	2,58	51,7	1,45	17,63	3,22	64,06	7,2	690
364	C2-51	317,46	0,12	5,76	0,40	14,18	3,51	214,11	1,64	32,86	0,54	6,56	1,76	40,48	7,4	370
404	C2-51	278,3	0,35	16,8	0,3	10,63	2,9	176,9	1,36	27,25	0,4	4,86	1,82	41,86	7,5	310
428(1)	C2-51	342,84	0,64	30,72	0,74	26,23	3,04	185,44	1,49	29,85	0,42	5,1	2	46	7,3	330
498	C2-51	374,5	0,25	12,0	0,45	15,95	4,16	253,73	1,20	24,04	1,54	18,72	2,11	48,53	7,5	450
578	C2-51	268,09	0,1	4,8	0,3	10,63	3,18	193,98	0,92	18,43	1,2	14,59	0,98	22,54	6,9	390
638	C2-51	306,51	0,13	6,24	0,35	12,4	3,4	207,4	1,6	32,06	0,46	5,59	1,76	40,48	7,4	340
690	C2-51	345,13	0,1	4,8	0,3	10,63	4,14	252,54	1,36	27,25	1,9	23,1	1,03	23,69	7,5	410
703	C2-51	285,56	n.d.	n.d.	0,30	10,63	3,39	206,79	0,98	19,63	0,62	7,53	1,68	38,63	7,70	370
715	C2-51	17,3	n.d.	n.d.	0,72	25,52	5,10	311,1	2,32	46,49	2,33	28,33	0,98	22,54	7,1	520
921	C2-51	316,52	0,17	8,16	0,34	12,05	3,49	212,89	1,88	37,67	0,40	4,86	1,71	39,33	7,3	350
922	C2-51	307,56	0,24	11,52	0,38	13,47	3,34	203,74	1,65	33,06	0,31	3,76	1,76	40,48	7,4	340
923	C2-51	295,54	0,20	9,60	0,40	14,18	3,17	193,37	1,69	33,86	0,30	3,64	1,71	39,33	7,4	340
929	C2-51	304,81	0,10	4,80	0,35	12,4	3,45	210,45	1,49	29,85	0,32	3,89	1,82	41,86	7,4	330
933	C2-51	397,43	1,0	48,0	0,75	26,58	3,82	233,02	1,39	27,85	3,35	40,73	0,89	20,47	7,4	490
962	C2-51	272,56	0,4	19,2	0,35	12,4	2,78	169,58	1,57	31,46	0,59	7,17	1,39	31,97	7,5	310
985	C2-51	422,37	0,10	4,80	1,02	36,15	4,5	274,5	2,08	41,68	1,36	16,53	2,05	47,15	7	500
1420	C2-51	154,28	n.d.	n.d.	0,2	7,09	1,85	112,85	0,52	10,42	0,22	2,67	0,89	20,47	6,8	190
1502	C2-51	270,31	0,1	4,8	0,15	5,31	3,16	192,76	0,5	10,02	0,49	5,95	2,17	49,91	7,2	320
1542	C2-51	246,36	0,15	7,2	0,35	12,4	2,66	162,26	1,26	25,25	0,52	6,32	1,33	30,59	7,4	300
1552	C2-51	274,4	0,10	4,80	0,26	9,21	3,24	197,64	1,38	27,65	1,56	18,96	0,6	13,8	7,3	330
1559	C2-51	223,85	0,2	9,6	0,2	7,09	2,44	148,84	0,58	11,62	0,66	8,02	1,58	36,34	7,2	290
1580	C2-51	249,65	0,1	4,8	0,2	7,09	2,88	175,68	0,9	18,03	0,57	6,93	1,58	36,34	7,1	300
1583	C2-51	370,4	n.d.	n.d.	0,25	8,86	4,44	270,84	0,98	19,63	0,64	7,78	2,65	60,95	7	490

n.d. no detectado

(localizado al sur-orientado del poblado Calera), están dentro de la norma, incluyendo el As, que presenta valores de 0.010 a 0.037 mg/l, correspondiendo los rangos más bajos al sureste de la batería de pozos y los más altos hacia el norte de la misma.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **8 DESARROLLO SUSTENTABLE**

### **8.1 Orígenes y Concepto**

Las primeras ideas que forjan las bases del concepto de desarrollo sustentable fueron planteadas en 1972, en la Ciudad de Estocolmo, Suecia, durante la Conferencia sobre el Desarrollo Humano. En 1980 la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza introduce, bajo este seudónimo, a la política de sustentabilidad ecológica. Siete años más tarde como resultado de la publicación del documento *Nuestro Futuro Común*, a cargo de la ex primer ministro sueca Harlem Brundtland, surge la definición más completa y de mayor difusión, la cual se transcribe en las siguientes líneas “El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades”. Afortunadamente los años que prosiguieron a estos planteamientos han descollado en la adhesión de más países, organizaciones e individuos de todo el mundo al abanderamiento de que toda decisión de inversión debe contemplar una visión a largo plazo, que redunde en la mitigación de un mayor deterioro de nuestro planeta (Enkerlin, E., *et al.*, 1997).

### **8.2 Recursos del Desarrollo Sustentable**

Los recursos que se consideran para el logro del desarrollo sostenible se agrupan en tres importantes ramas (Enkerlin, E., *et al.*, 1997):

- a) Sociales y humanos.- Componen la administración, la política, la legislación, la planificación familiar, la contabilidad ambiental, los valores éticos, la valorización de los servicios ecológicos, participación de las comunidades, etc.
- b) Naturales.- Están representados por elementos como el agua (aguas superficiales y subterráneas), aire, energía, suelos y biodiversidad.
- c) Tecnológicos y sistemas de producción.- Este tercer grupo está constituido por recursos como la computación (sistemas de información geográfica, etc.), sensores remotos, biotecnología, manejo integrado de plagas, sistemas de producción, etc.

### **8.3 Factores que Intervienen en el Desarrollo Sustentable de un Sistema Acuífero**

Desde un punto de vista ideal, para el óptimo aprovechamiento de los acuíferos existentes en un ecosistema, lo deseable sería la identificación y conocimiento de los diversos recursos pertenecientes al mismo antes de iniciar su explotación, de tal forma que apoyados con herramientas tecnológicas y nociones adecuadas de sistemas modernos de producción, se realice una planeación para el desarrollo integral y sostenido no tan solo de ese ecosistema en particular, sino de los ecosistemas circunvecinos. Sin embargo eso, ya es prácticamente imposible para una gran extensión del territorio mexicano, ya que las regiones que ocupan nuestra atención, constituyen polos de desarrollo que atienden las necesidades de las comunidades de su entorno. De ahí la necesidad de retomar el análisis de los recursos hidrológicos subterráneos en términos de reconocer la verdadera importancia y pertinencia de las actividades económicas que se realizan en esa área o región, estableciendo criterios que coadyuven al manejo sustentable del sistema.

Los factores que influyen en el desarrollo sostenible de un sistema acuífero son:

- a) Recarga y descarga del sistema
- b) Déficit hidráulico
- c) Comportamiento hidrodinámico del acuífero o acuíferos
- d) Actividades económicas actuales (agropecuarias e industriales) y planes de desarrollo ya sean de crecimiento o de incorporación de nuevas actividades, dentro del área del sistema.
- e) Explosión demográfica
- f) Autoridad moral de las instituciones gubernamentales, en sus diferentes niveles.
- g) Impacto sobre el acuífero y calidad del mismo.

### **8.4 Problemática del Acuífero Calera**

La relación recarga y descarga hidráulica del acuífero, como se vio en el capítulo seis, presenta un déficit anual de 13.20 millones de metros cúbicos, lo cual se debe por una parte a la baja precipitación pluvial en la región (Tabla III), pero por otra a la sobreexplotación del acuífero, alcanzándose un abatimiento de aproximadamente un metro por año. Esta situación se ha mantenido prácticamente constante a lo largo de la última

década. Además, se han identificado que algunas áreas son explotadas con mayor intensidad como lo demuestran los conos de abatimiento formados entre las poblaciones de Enrique Estrada y General Félix U. Gómez, así como entre los poblados de Ramón López Velarde y Santiaguillo (Fig. 24). Existen otras evidencias aún más graves, producidas también por la sobreexplotación del acuífero al sur del poblado de Santiaguillo, como lo son agrietamientos en la superficie del terreno e inicios de colapsos (Fig. 30).

### 8.5 Relación entre Agrietamiento y Estructuras Geológicas

Los agrietamientos que se presentan en la comunidad agrícola de Francisco I. Madero, municipio de Fresnillo siguen rumbos que varían de NE 05° SW a NE 40° SW y echados que fluctúan de 52 a 72° al SE y de 70° al NW; tienen longitudes entre 100 y 300 m, profundidades de 2.70 a 3.0 m y aperturas entre 10 cm y 1.30 m. Observándose que los agrietamientos identificados siguen los patrones generales de fracturamiento de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras.

La seriedad de este tipo de fenómenos es la existencia de otras zonas con igual o mayor vulnerabilidad dentro de la cuenca, donde se puedan magnificar este tipo de problemas, como lo son aquellas áreas del subsuelo que presentan irregularidades contrastantes de la morfología de la base del acuífero. Ya que se ha encontrado la existencia de una relación muy estrecha entre las zonas abruptas de la superficie del basamento de un acuífero y conos de abatimiento pronunciados. Basta referir antecedentes con estas características, documentados por investigadores de la UNAM en el estado de Querétaro (Pacheco, J. *et al.*, 2002).

En el capítulo 5 referente a la morfología de la base del acuífero, se identificaron tres zonas donde el relieve del terreno presenta algunas irregularidades que contrastan con el resto del área y aunque esta primera interpretación solo se valió de las bondades que ofrecen los sistemas de información geográfica, nos da una idea de que es necesario delinear con mayor precisión las geformas del subsuelo, empleando otras técnicas como la gravimetría y magnetometría, herramientas que ya han aportado resultados alentadores en la interpretación de áreas con problemas de agrietamiento y subsidencia por sobre explotación de acuíferos.

De no emprenderse acciones a la brevedad que acrecienten los conocimientos sobre la vulnerabilidad del sistema acuífero de la Cuenca Hidrológica de Calera y se reorienta la administración del uso del agua, los problemas de agrietamiento en la cuenca tenderán a incrementarse, con las consabidas pérdidas irreparables de tierras destinadas actualmente a la agricultura, ganadería, industria e infraestructura habitacional y de comunicaciones.



Fig. 30 Grietas producidas por sobreexplotación del acuífero de calera, en el poblado Francisco I. Madero, Municipio de Fresnillo.

## 9 CONCLUSIONES

- La macroestructura principal que delinea la Cuenca Hidrológica de Calera se encuentra formada por un graben de edad Mioceno Medio a Tardío, el cual sigue el patrón de deformación de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras.
- Las mesoestructuras cartografiadas correspondientes a fallas normales, revelan un campo predominante de extensión con dirección NE-SW, que coincide con los patrones de la provincia de Cuencas y Sierras. Las fallas inversas y pliegues se relacionan con los estilos de deformación de la Orogenia Laramide.
- La Cuenca Hidrológica de Calera presenta flujos de corrientes superficiales intermitentes que concurren hacia el norte del área a un cuerpo de agua de tipo Sabkha, las cuales, de acuerdo al cálculo de drenaje digital, se conectan a una salida regional ubicada en el extremo noroccidental del área de estudio.
- El sistema hidrológico del Acuífero de Calera lo componen, una unidad hidrogeológica compuesta por un grupo de conglomerados inmaduros que sobreyacen a la unidad hidrológica de confinamiento del basamento, formada por rocas Terciarias del Grupo Volcánico Superior y por la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada. Por último se presenta la unidad hidrogeológica de confinamiento lateral, conformada por la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, el Conglomerado Rojo de Zacatecas y la Formación Zacatecas.
- El acuífero es de tipo libre y tiene carácter de acuífero cuando su permeabilidad es de moderada a baja  $E \times 10^{-5}$  a  $E \times 10^{-7}$  m/s y de acuitardo cuando la permeabilidad alcanza valores de  $E \times 10^{-7}$  a  $E \times 10^{-8}$  m/s.
- La morfología de la base del acuífero presenta tres zonas con relieve relativamente abrupto con relación al total de su superficie: Una localizada al suroccidente de la comunidad Calera de Víctor Rosales, otra al oriente de Estación San José y la tercera al norte del poblado Santiaguillo.
- Las dimensiones del acuífero se calculan en  $1214 \text{ km}^2$  con espesores que van de 38 a 570 m.

- La elevación del nivel estático del acuífero para el año 1997 revela isopiezas que toman valores decrecientes de sur a norte, iniciando con 2170 m al oriente del poblado Francisco I. Madero hasta 2030 en la porción sur de la laguna de Santa Ana, con direcciones de flujo en el mismo sentido de sur a norte.
- Los valores más someros de profundidad del nivel estático, iguales o menores a 10 m, ocurren en los alrededores de las poblaciones Fresnillo, Ramón López Velarde y Enrique Estrada, mientras que los valores más profundos de 80 a 100 m, se presentan al noroccidente de Félix U. Gómez y al noreste de Calera de Víctor Rosales.
- Los abatimientos del nivel estático, en el periodo 1980-1997 adquieren valores de -10 m en la porción nor-noreste de la cuenca y de -15 a -20 m en la parte central de la cuenca.
- Utilizando los análisis químicos disponibles, se determinaron tres tipos de agua: (1) mixtas bicarbonatadas, (2) mixtas cálcico-sódicas, bicarbonatadas y (3) sódico bicarbonatadas.
- Se identificaron dos zonas de sobreexplotación del acuífero, la primera ubicada entre los poblados de Félix U. Gómez y Enrique Estrada y la segunda entre Ramón López Velarde y Santiaguillo, donde ya se han generado agrietamientos e inicios de colapsos.

- Los agrietamientos producidos al sur de la población de Santiaguillo, tienen longitudes entre 100 y 300 m, se orientan con rumbos entre NE 05° SW y NE 40° SW, y siguen los patrones extensionales de la Provincia Tectónica de Cuencas y Sierras
- Las áreas con sobreexplotación del acuífero ponen de manifiesto la necesidad de replantear la administración del uso del agua subterránea, a fin de salvaguardar el desarrollo equilibrado y sostenido de la superficie dedicada a la agricultura, ya que de no hacerlo se corre el grave riesgo de la inminente pérdida de superficie cultivable a partir de que se intensifique la generación de agrietamientos y colapsos por el desarrollo inadecuado del acuífero de la cuenca.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aranda-Gómez, J.J. (2000): Evolución tectonomagmática post-Paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. LIII: 59-71.
- Ariel Consultores. (1996): Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca, inédito. Contrato GAS-012-PRO-96.
- Burckard, C. (1906): "Sobre el descubrimiento del Tríasico marino en Zacatecas". Soc. Geol. Mex., Bol., Vol.2, p 43-45.
- Burkart, J. (1836): Aufenthalt und Reisen in México in der Jahren 1825 bis 1834, vol. 2: Stuttgart, Schweizerbart, 286 p.
- Booth, B. ESRI, Inc. (2000): Using ArcGis "3D Analyst". Ed. ESRI, Inc. 212 p.
- Booth, B., y Mitchell, A. ESRI, Inc. (2001): Getting started with ArcGis. Ed. ESRI, Inc. 53 p.
- Best, M. G., y Christiansen E. H. (2001): Igneous petrology. Ed. Blackwell Science, United Kingdom. 458 p.
- Clark, K. F., Foster, C.T. y Damon, P. E. (1982): Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. Geological Society of American Bulletin. Vol. 93: 23-51.
- Cuevas, E. (1983): "Evolución geológica mesozoica del Estado de Zacatecas, México", 2B1, Geol.Paleont. Vol. 1983, ¾: 190-201, Stuttgart. Alemania.
- Coney, P.J., Campa-Uranga, M.F. (1987): Tectono-stratigraphic terranes and mineralresources distributions of Mexico. Canadian Journal of Earth Sciences. Vol. 20, p. 1040-1051.
- C.N.A. (1980, 1981 y 1986): Resultados de las pruebas de bombeo practicadas a de 47 aprovechamientos de la Cuenca Hidrológica de Calera. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1989-1999): Datos piezométricos de 166 aprovechamientos de la Cuenca Hidrológica de Calera. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1991): Estudio geológico-geofísico de la zona de Víctor Rosales, Zac. Reporte interno, inédito.

- C.N.A. (1991): Modelo matemático del acuífero calera, Zac. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1993 y 1994): Planos de elevación del nivel estático de la Cuenca Hidrológica de Calera. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1993 y 1994): Planos de profundidad del nivel estático de la Cuenca Hidrológica de Calera. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1993 y 1994): Planos de elevación del nivel estático de la Cuenca Hidrológica de Calera. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1994): Planos de isotransmisividad de la Cuenca Hidrológica de Calera. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1996): Estudio hidrogeológico en la zona de Zacatecas, Zac. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1997): Actualización del modelo matemático de del acuífero Calera, Zac. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. (1998): Estudio para evaluar la contaminación de los acuíferos donde están ubicadas las fuentes de abastecimiento para agua potable de las poblaciones de Zacatecas, Guadalupe y poblaciones circunvecinas. Reporte interno, inédito.
- C.N.A. Guardado-Pérez R. (2001): Informe preliminar de la visita realizada a la comunidad Francisco I. Madero, Municipio de Fresnillo, Zac. Reporte interno, inédito: 6 p.
- COREMI. (1991): Monografía geológico-minera del estado de Zacatecas. 154 p.
- COREMI. (1998): Carta geológico-minera Zacatecas (F 13-6), Esc. 1:250,000. SECOFI.
- COREMI. (1998 ): Carta geológico-minera Fresnillo (F 13-3), Esc. 1:250,000. SECOFI.
- De Cserna, Z. (1976) : Geology of the Fresnillo area, Zacatecas. Boletín de la Geological Society of America. Vol. 87: 1191-1199.
- Dickinson, W. R., y Coney, P.J. (1980): Plate tectonics constraints on the origin of the Gulf of Mexico and the early opening of the central north Atlantic Ocean: Louisiana State University Symposium, Baton Rouge, Proceedings: 27-37.
- Dickinson, W. R. Y Lawton T.F. (2001): Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of México. Boletín de la Geological Society of America. Vol. 113, num 9: 1142-1160.

Damon P.E., *et al.* (1981) : Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis. Revista del Instituto de Geología, UNAM. Vol. 5, num. 2: 223-238.

Estudios y proyectos en agua subterránea, S.A. de C.V. (1999): Estudio hidrogeológico del Proyecto Francisco I. Madero, Zacatecas, inédito.

Esquilin, R. (1999): Edwards aquifer hydrogeologic report for 1998. Edwards aquifer authority, San Antonio Texas. 36 p.

Escalona-Alcazar, F., *et al.* (2000): La secuencia volcánica de la margen noroccidental del Cerro La Virgen, Zacatecas, una aproximación. Boletín de la Unión Geofísica Mexicana, A.C., Resúmenes de la 2ª Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra: 305-306.

Escalona-Alcazar, F., *et al.* (2000): Los piroclastos y volcánoclastos los Alamitos, una descripción alterna, Cerro La Virgen, Zacatecas. Boletín de la Unión Geofísica Mexicana, A.C., Resúmenes de la reunión anual 2001: 319.

Escalona-Alcazar, F., *et al.* (2000): Early Tertiary volcanism in La Virgen Hill, Zacatecas, México ¿does it reflect the evolution of a caldera?. Boletín de la Unión Geofísica Mexicana, A.C., Resúmenes de la III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra: 397-398.

Goldhammer, R. K. (1999): Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico. Boletín de la Geological Society of America. Special paper 340: 58 p.

Iturbe, R., Castro, A., Martínez José. (1996): Estudio hidrogeológico e hidrogequímico en la zona de Zacatecas. Instituto de Ingeniería de la UNAM, inédito.

MacDowell F.W. y Clabaugh, S. E. (1979): Boletín de la Geological Society of America Vol. Special paper 180: 113-124.

Magallanes Q. Rafael. (1992): Simulación del acuífero de Calera, Zacatecas. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coah.

Ortega F., *et al.* (1994): Phanerozoic tectonic evolution of México. Geological Society of America. Vol. DNAG: 265-259.

Ponce, B. F., y Clark, K F. (1985): The Zacatecas mining district: A Tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization. *Revista Economic Geology*. Vol. 83: 1668-1682.

Pacheco, J. *et all.* (2002): Configuración del basamento y agrietamientos superficiales del suelo en el valle de Querétaro. *Boletín de la Unión Geofísica Mexicana, A.C., Resúmenes de la III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra*: 425.

Ranson, W. A. (1975): *Geology and petrology of portions of the Zacatecas and Guadalupe quadrangles, Zacatecas, Mexico*: Unpublish. M.S. thesis, University of Orleans. 83 p.

S.A.R.H. (1968): *Estudio geohidrológico de la zona de Calera, Zac.* Inédito

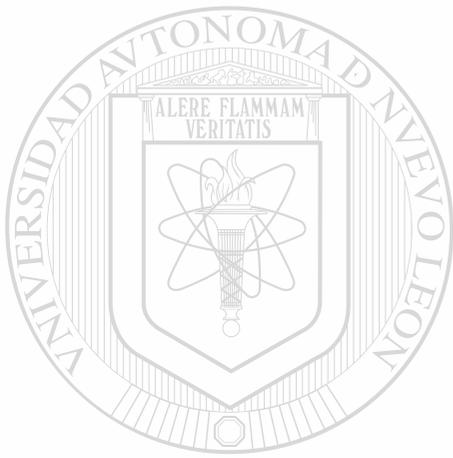
S.A.R.H. (1978): *Estudio Hidrogeológico de la cuenca Calera, Zac.* Inédito

S.A.R.H. (1980): *Trabajos relativos a la actualización del estudio geohidrológico de la zona Calera, Zac.*

SEDUE. (1986): *Estudio geohidrológico para la Ciudad de Zacatecas, Zac.* Inédito  
Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F. Y Speed, R.C. (1993): Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of México. *Boletín de la Geological Society of America*. Vol. Special paper 278: 153 p.

Struckmeier, W., Margat J. (1995): *Hydrogeological maps a guide and a standard legend*. Association of hydrogeologists, Vol. 17. 177 p.

Yta, M. (1992): *Etude géodynamique et metallogénique d'un secteur de l "Faja de Plata", Mexique-La zone de Zacatecas-Francisco I.Madero-Saucito*: Université d'Orleans, Ph.D. dissertation, 266p. (unpublished).



**ANEXOS**

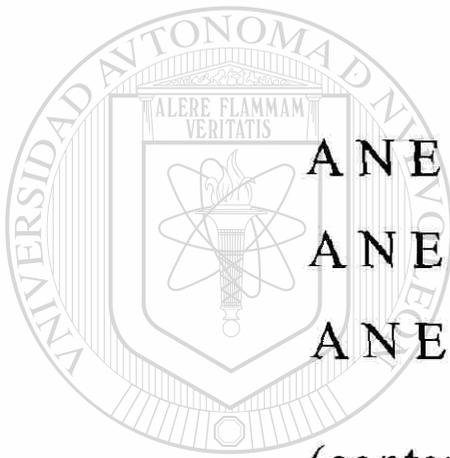
UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**A N E X O 1, Carta Geológica**

**A N E X O 2, Carta Estructural**

**A N E X O 3 Carta Hidrogeológica**

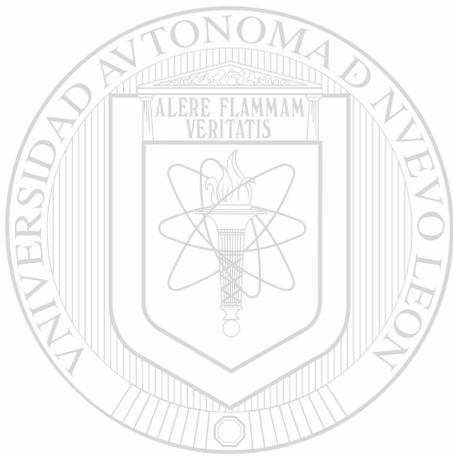
**(contenidos al final en sobre)**

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**





ANEXO 4

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla I. Fracturamiento en la Cuenca Hidrológica de Calera

Sitio	Coordenadas		Tipo de roca	Formación	Rumbo o Dir. Flujo		Sistemas de fracturamiento			Dens
	E	N			Azmut	Echado	1	2	3	
1	751877	2518096	Conglomerado	Cgl. Rojo Zac.	88	15 NW	41°/90°	2/m	175°/90°	
2	751626	2518438	Conglomerado	Cgl. Rojo Zac.			86°/86° SE			
3	750852	2518690	Arenisca lobacea, color pardo amarillento, estratos 25,30 y 50 cm	?	151°	28° SW	5°/83 SE	2/m	150°/80° SW	2/m 126°/90°
4	750684	2518624	Toba intensa, soldada, color rosa pálido a pardo alterada por FeO.				111°/90°			
5	748935	2517018	Filitas color verde olivo	Zacatecas ?	315	75° NE	315°/75° NE		121°/75° SW	356°/90°
6	749516	2516637	Toba intensa, soldada, color rosa pálido, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			Falla normal 78°/69° NW		23°/66° NW	2/m 303°/76° SW 2/m
7	749686	2516758	Toba modera, soldada, color rosa pálido, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.	33°	21° NW	2°/90°	1/m	269°/90°	2/m
8	749973	2516890	Toba modera, soldada, color rosa pálido, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			Juntas enfr. 9°/90°	2/m	Falla normal 110°/79° SW	279°/71 NE 2/7m
9	750503	2516267	Domo riolítico	Gpo. Vol. Sup.			116°/82° NE	3/m	62°/73° NW	
10	751198	2517563	Ignimbrita intensa, sold, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.	20°	16° SE	334°/90°	2/m	212°/60° NW	3/m 17°/51° NW
11	748367	2517971	Domo riolítico	Gpo. Vol. Sup.			107°/82° NE	3/m	32°/68° SE	2/m
12	744642	2516834	Filitas color violaceo	Fm. Zacatecas	Foliación	22° SE	122°/74° NE	4/m		
13	743520	2515358	Metarenisca color gris oscuro a pardo rojizo		Foliación		30°/59° NW	2/m	61°/64° NW	4/m 45°/74° SE 2/m
14	743627	2515155	Toba intensa, soldada, color rosa pálido, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.	Falla normal	46° SW	342°/76° NE	1/m	130°/90°	2/m
15	743247	2514837	Toba modera, soldada, color rosa pálido, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.	Falla normal	358° 90°	30°/84° SE	2/m		
16	743534	2514922	Toba modera, soldada, color rosa pálido, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			117°/90°	3/m	20°/90°	2/m
17	743521	2514131	Toba pobremente soldada, desvirificada a color crema, intemperiza a color ocre	Gpo. Vol. Sup.			35°/90°	3/m	325°/90°	4/m

Tabla I. Fracturamiento en la Cuenca Hidrológica de Calera (Continuación)

GPS	Coordenadas E N	Tipo de roca	Formación	Rumbo o Dir. Flujo		Sistemas de fracturamiento		Dens
				Azmut	Echado	Dens	Dens	
18	730159	2523793 Calizas color gris obscuro fuertemente deformadas con estructura laminar	Sec. Volcsed	332°	37° SW			
19	730751	2523755 Calizas color gris obscuro fuertemente deformadas con estructura laminar Se tiene además un paquete de pizarras color violáceo.	Sec. Volcsed	283°	29° SW	318°/90°	6/m	60°/86° NW 1/m
20	728951	2522967 Ignimbrita cristalina intensamente soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.	286°	6° SW	Juntas de enfria. 57°/90°	2/m	23°/90° 1/m
21	728222	2522689 Ignimbrita cristalina intensamente soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			41°/90°	2/m	
22	729083	2520908 Ignimbrita textura eutaxítica, intensamente soldada de composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			50°/90°	2/m	303°/90°
23	727712	2521823 Ignimbrita cristalina intensamente soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			42°/90°	3/m	285°/90° 3/m
24	723538	2521447 Ignimbrita cristalina intensamente soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.	108°	16° NE	102°/90°	2/m	20°/90° 309°/90° 1/m
25	726506	2519533 Toba moderna, soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			330°/90°	2/m	62°/90° 1/m
26	728938	2521124 Ignimbrita cristalina intensamente soldada, color rojo ladrillo, composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			111°/90°	2/m	182°/90° 1/m 35°/90° 1/m
27	722791	2523993 Toba moderna, soldada, color rosa violáceo, de composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.			70°/56° NW	2m	303°/70° SW 1/m 300°/90° 1/m

**Tabla I. Fracturamiento en la Cuenca Hidrológica de Calera (Continuación)**

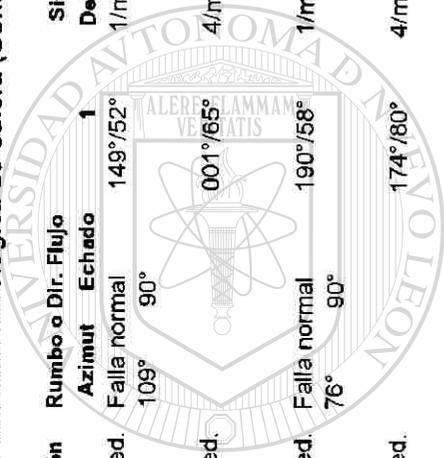
GPS	Coordenadas		Tipo de roca	Formación	Rumbo o Dir. Flujo		Sistemas de fracturamiento			Dens	
	E	N			Azimut	Echado	1	2	3		Dens
28	722719	2524842	Ignimbrita cristalina intensamente soldada, color rosa violáceo, de composición riolítica	Gpo. Vol. Sup.	282°/90°	282°/90°	1/m	50°/77° NW	2/m	7°/90°	1/m
29	719061	2533747	Posible domo de comp. riolítica, intensamente silicificado	Gpo. Vol. Sup.	142°/79° NE	142°/79° NE	3/m	96°/63° NE	3/m	65°/90°	3/m
30	749180	2522560	Pizarras color gris verde	Sec. Volcsed.	85°	27° SE	1/m	330°/90°	4/m	312°/90°	6/m
31	749340	2522504	intensamente silicificadas Metavolcánicas, posible protolito basalto	Sec. Volcsed.	Falla a rumbo 269°/78° NW	269°/78° NW	3/m	318°/80° NE	3/m	250°/55° NW	2/m
32	749528	2522303	Pizarras color gris verde intemperizan a pardo rojizo	Sec. Volcsed.	Falla normal 250°	55° NW	2/m	300°/73° NE	2/m	05°/75° NW	2/m
33	749135	2522059	Metavolcánicas, posible protolito basalto	Sec. Volcsed.	285°	90°	3/m	36°/65° SE	2/m		
34	748906	2521575	Metavolcánicas	Sec. Volcsed.	325°	43° SW	2/m	74°/72° SE	2/m	300°/90°	2/m
35	749049	2521189	Pizarras	Sec. Volcsed.	Falla normal 59°	35° SE	4/m	55°/73° NW	4/m	05°/69° NW	4/m
36	748544	2520797	Andesita color verde textura porfírica, altera a color pardo rojizo	Sec. Volcsed.	Falla normal 44°	90°	4/m	65°/90°	2/m	161°/90°	
37	748355	2520777	Andesita color verde textura porfírica, altera a color pardo rojizo	Sec. Volcsed.	Falla normal 235°	33° SE		355°/72° NE			
38	747690	2520349	Andesita color verde textura porfírica, altera a color pardo rojizo	Sec. Volcsed.	Falla normal 35°	90°	2/m	75°/58° SE	3/m	329°/80° SW	3/m
39	746550	2540422	Andesita color verde textura porfírica, altera a color pardo rojizo, se observan estructuras almohadilladas	Sec. Volcsed.	Falla normal 273°	90°	3/m	150°/75° NE	3/m		
40	746400	2520578	Meta-areniscas color gris verdoso	Sec. Volcsed.	335°	46° NE	4/m	130°/72° SW	4/m		3/m

**Tabla I. Fracturamiento en la Cuenca Hidrológica de Calera (Continuación)**

GPS	Coordenadas E N	Tipo de roca	Formación	Rumbo o Dir. Flujo		Sistemas de fracturamiento		Dens	
				Azmut	Echado	Dens	Dens		
41	746697	2520606 Andesita color verde textura porfirítica, altera a color pardo rojizo	Sec. Volcsed.	17°/52° SE	4/m	109°/80° SW	4/m	248°/76° NW	4/m
42	745578	2520380 Basalto gris obscuro,	Sec. Volcsed.	260°	45° NW	321°/53° SW	2/m	285°/90°	
43	744779	2520977 Andesita color verde textura porfirítica, altera a color pardo rojizo	Sec. Volcsed.	03°/80° SE	2/m	270°/90°	4/m		
44	743927	2521885 Meta-areniscas color gris altera a ocre	Zacatecas	233°	8° SE	216°/78° SE	3/m	2/m	
45	745081	2531178	Sec. Volcsed.	234°/90°	4/m				
46	745358	2529708 Basalto color negro intemperizan a pardo, se observan estructuras almohadilladas y fuente deformación	Sec. Volcsed.						
47	751226	2525361 Andesita color verde textura porfirítica, estructuras lavas almohadilladas	Sec. Volcsed.	Falla normal 266°	76° NW	191°/90°	2/m	228°/75° NW	2/m
48	751226	2525361 Andesita color verde textura porfirítica, estructuras lavas almohadilladas	Sec. Volcsed.	191°/70°	3/m	116°/81° SW	3/m		
49	750424	2526512 Andesita color verde textura porfirítica, estructuras lavas almohadilladas	Sec. Volcsed.	219°/75° NW	4/m	135°/48° NE	6/m	246°/54° NW	3/m
50	750099	2526865 Andesita color verde textura porfirítica, estructuras lavas almohadilladas	Sec. Volcsed.	65°/73° SE	10/m	167°/90°			
51	749763	2520510 Conglomerado	Cgl. Rojo Zac.	70°/81° NW	1/m	100°/90°	2/m	100°/40° NE	1/m
52	750334	2520234 Conglomerado	Cgl. Rojo Zac.	Falla normal 120°	2/m	90°/74° NE	1/m		
53	748470	2514853 Toba modera, soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Sec. Volcsed.	242°/90°	2/m	16°/76°	4/m	301°/90°	2/m

**Tabla I. Fracturamiento en la Cuenca Hidrológica de Calera (Continuación)**

GPS	Coordenadas		Tipo de roca	Formación	Rumbo o Dir. Flujo		Sistemas de fracturamiento			Dens	
	E	N			Azimut	Echado	Dens	2	Dens		3
54	748446	2514853	Toba modera, soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Sec. Volcsed.	Falla normal	109°	149°/52°	1/m			
55	748351	2514708	Toba modera, soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Sec. Volcsed.	Falla normal	90°	001°/65°	4/m	314°/75°	2/m	153°/78°
56	748449	2514728	Conglomerado Polimítico	Sec. Volcsed.	Falla normal	76°	190°/58°	1/m		5/m	132°/85°
57	748527	2514775	Toba modera, soldada, color rosa violáceo, composición riolítica	Sec. Volcsed.	Falla normal	90°	174°/80°	4/m	87°/73°	1/m	307°/74°

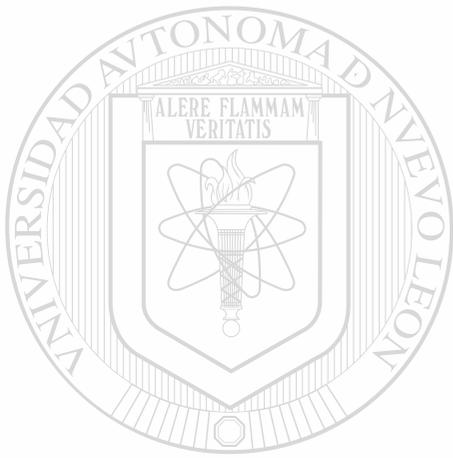


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





ANEXO 5

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

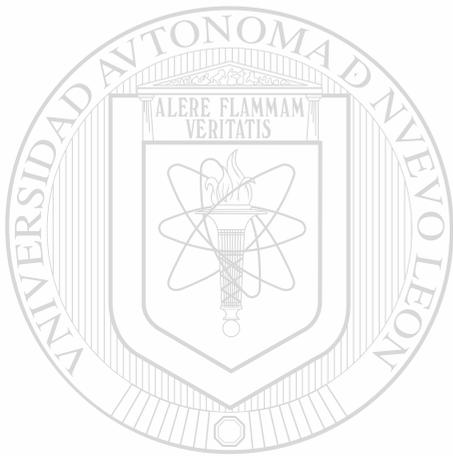


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla V. Espesores estimados de la zona saturada, a partir de secciones geológicas.

Sección	Nº Punto en la malla	Espesor del acuífero (m)	Elevación de la base del acuífero (m.s.n.m.)
A-A'	1	100	2050
	2	100	2035
	3	100	2012
	4	95	2015
	5	90	1985
	6	115	1962
	7	138	1955
	8	142	1955
	9	148	1958
	10	138	1998
	11	38	2058
B-B'	12	60	2118
	13	45	2115
	14	150	1988
	15	185	1928
	16	220	1880
	17	252	1855
	18	268	1835
	19	268	1835
	20	263	1842
	21	250	1852
	22	220	1882
	23	170	1935
	24	120	1995
C-C'	25	60	2125
	26	165	1995
	27	248	1892
	28	300	1825
	29	312	1790
	30	308	1792
	31	312	1788
	32	315	1785
	33	318	1780
	34	360	1800
	35	228	1870
	36	95	2025
D-D'	37	215	2040
	38	360	1912
	39	380	1875
	40	340	1895
	41	372	1785
	42	330	1820
	43	338	1755
	44	350	1800
	45	362	1785
	46	372	1775
	47	385	1765
	48	395	1758

Sección	Nº punto en la malla	Espesor del acuífero (m)	Elevación de la base del acuífero (m.s.n.m.)
	49	405	1745
	50	402	1750
E-E'	52	215	2030
	53	288	1928
	54	270	1920
	55	260	1912
	56	408	1715
	57	442	1705
	58	442	1705
	59	445	1675
	60	448	1678
	61	445	1678
	62	442	1700
	63	453	1705
	64	470	1715
F-F'	65	255	1980
	66	335	1885
	67	248	1902
	68	275	1872
	69	280	1865
	70	512	1892
	71	555	1620
	72	535	1620
	73	518	1632
	74	518	1650
	75	540	1645
	76	568	1640
	77	530	1655
G-G'	78	270	2010
	79	310	1898
	80	305	1892
	81	295	1880
	82	263	1912
	83	315	1852
	84	520	1680
	85	515	1690
	86	515	1685
	87	548	1668
	88	565	1672
	89	570	1675
H-H'	90	545	1655
	91	555	1648
	92	568	1665
	93	570	1665
I-I'	94	390	1860
	95	432	1815
	96	448	1820
	97	435	1865



ANEXO 6

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Chichimequillas F-13 B48
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	41
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	28,25	1,41	18,47
Mg :	8,14	0,67	8,77
Na :	34,96	1,52	19,93
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>71,35</b>	<b>3,60</b>	<b>47,18</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	180,56	2,96	38,84
SO4 :	14,40	0,30	3,93
Cl :	15,95	0,45	5,89
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>210,91</b>	<b>3,71</b>	<b>48,66</b>

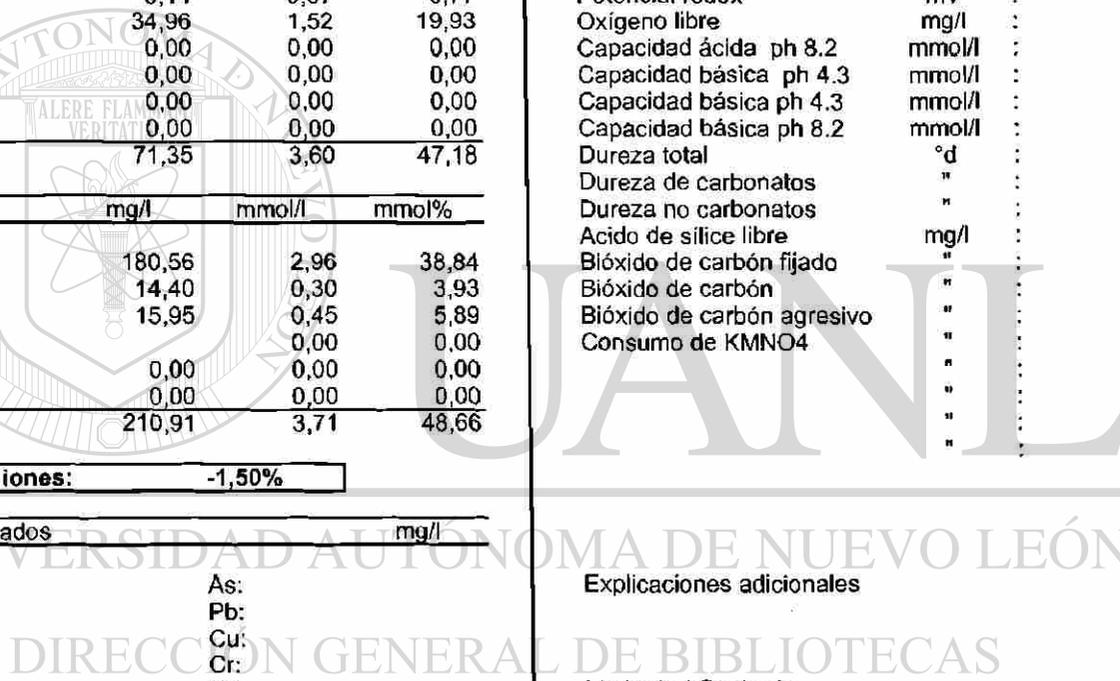
**Balance de iones:** -1,50%

Metales pesados	mg/l
Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad electrica	mS/cm	370,00
ph	:	7,30
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología



### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Fresnillo F-13B47
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	58
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m : 27,65
Nivel del agua	msnm : 2.057,35
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	44,28	2,21	28,96
Mg :	9,24	0,76	9,96
Na :	40,48	1,76	23,08
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>94,00</b>	<b>4,73</b>	<b>61,99</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	195,20	3,20	41,98
SO4 :	55,20	1,15	15,08
Cl :	14,18	0,40	5,24
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>264,58</b>	<b>4,75</b>	<b>62,30</b>

**Balance de iones: -0,19%**

**Metales pesados mg/l**

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:
Color	:
Turbiedad	:
Temperatura	°C :
Conductividad eléctrica	mS/cm : 450,00
ph	: 7,40
Potencial redox	mV :
Oxígeno libre	mg/l :
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l :
Dureza total	°d :
Dureza de carbonatos	" :
Dureza no carbonatos	" :
Acido de sílice libre	mg/l :
Bióxido de carbón fijado	" :
Bióxido de carbón	" :
Bióxido de carbón agresivo	" :
Consumo de KMNO4	" :
	" :
	" :
	" :
	" :

Explicaciones adicionales

Litología / Geología





### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Calera F-13B57
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	364
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	32,86	1,64	21,49
Mg :	6,56	0,54	7,07
Na :	40,48	1,76	23,08
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>79,90</b>	<b>3,94</b>	<b>51,64</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	214,11	3,51	46,05
SO4 :	5,76	0,12	1,57
Cl :	14,18	0,40	5,24
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>234,05</b>	<b>4,03</b>	<b>52,87</b>

**Balance de iones:** -1,12%

**Metales pesados** mg/l

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	370,00
ph	:	7,40
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Chichimequillas F-13 B48
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	404
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	27,25	1,36	17,82
Mg :	4,86	0,40	5,24
Na :	41,86	1,82	23,86
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>73,97</b>	<b>3,58</b>	<b>46,92</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	176,90	2,90	38,05
SO4 :	16,80	0,35	4,59
Cl :	10,63	0,30	3,93
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>204,33</b>	<b>3,55</b>	<b>46,57</b>

**Balance de iones:** 0,44%

Metales pesados	mg/l
Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	310,00
ph	:	7,50
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales ®

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Fresnillo F-13B47
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	428(1)
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	29,85	1,49	19,52
Mg :	5,10	0,42	5,50
Na :	46,00	2,00	26,22
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>80,95</b>	<b>3,91</b>	<b>51,24</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	185,44	3,04	39,89
SO4 :	30,72	0,64	8,39
Cl :	26,23	0,74	9,69
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>242,39</b>	<b>4,42</b>	<b>57,97</b>

**Balace de iones: -6,11%**

Metales pesados	mg/l
Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	330,00
ph	:	7,30
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Fresnillo F-13B47
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	498
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m : 28,05
Nivel del agua	msnm : 2.036,95
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	24,04	1,20	15,72
Mg :	18,72	1,54	20,18
Na :	48,53	2,11	27,66
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>91,29</b>	<b>4,85</b>	<b>63,56</b>

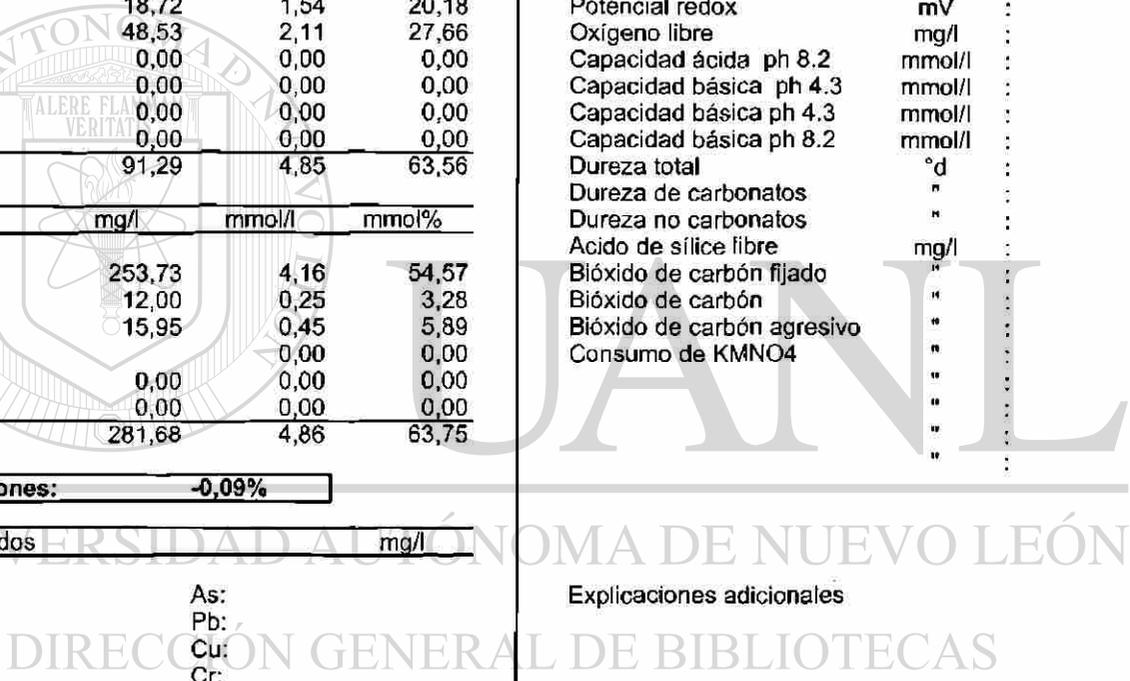
ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	253,73	4,16	54,57
SO4 :	12,00	0,25	3,28
Cl :	15,95	0,45	5,89
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>281,68</b>	<b>4,86</b>	<b>63,75</b>

**Balance de iones: -0,09%**

Metales pesados	mg/l
Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	450,00
ph	:	7,50
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales ®  
Litología / Geología



### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Fresnillo F-13B47
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	578
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	18,43	0,92	12,05
Mg :	14,59	1,20	15,72
Na :	22,54	0,98	12,85
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>55,56</b>	<b>3,10</b>	<b>40,63</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	193,98	3,18	41,72
SO4 :	4,80	0,10	1,31
Cl :	10,63	0,30	3,93
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>209,41</b>	<b>3,58</b>	<b>46,96</b>

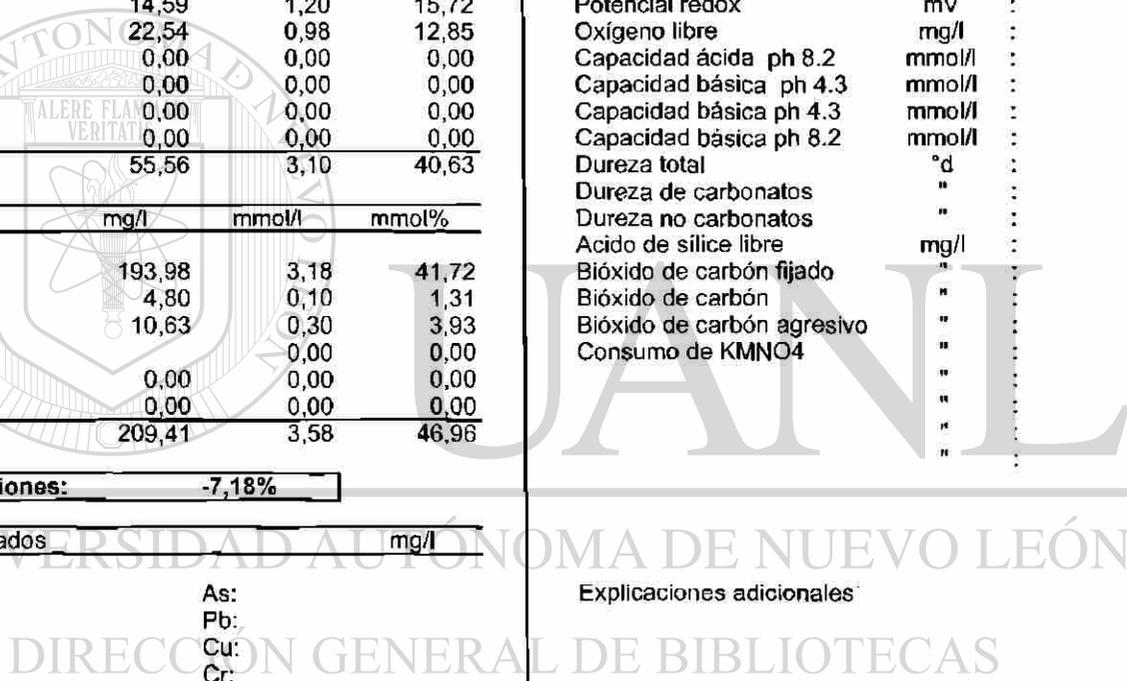
**Balance de iones:** -7,18%

Metales pesados	mg/l
Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	390,00
ph	:	6,90
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología



### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Calera F-13B57
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	638
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	32,06	1,60	20,97
Mg :	5,59	0,46	6,02
Na :	40,48	1,76	23,08
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>78,13</b>	<b>3,82</b>	<b>50,07</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	195,20	3,20	41,98
SO4 :	55,20	1,15	15,08
Cl :	14,18	0,40	5,24
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>264,58</b>	<b>4,75</b>	<b>62,30</b>

**Balance de iones: -10,83%**

**Metales pesados mg/l**

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	340,00
ph	:	7,40
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales ®

Litología / Geología

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Calera F-13B57
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	690
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	27,25	1,36	17,82
Mg :	23,10	1,90	24,90
Na :	23,69	1,03	13,50
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>74,04</b>	<b>4,29</b>	<b>56,22</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	252,54	4,14	54,32
SO4 :	4,80	0,10	1,31
Cl :	10,63	0,30	3,93
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>267,97</b>	<b>4,54</b>	<b>59,56</b>

**Balace de iones: -2,82%**

**Metales pesados mg/l**

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	410,00
ph	:	7,50
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Fresnillo F-13B47
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	703
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	19,63	0,98	12,84
Mg :	7,53	0,62	8,12
Na :	38,63	1,68	22,02
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>65,79</b>	<b>3,28</b>	<b>42,98</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	206,79	3,39	44,48
SO4 :	0,00	0,00	0,00
Cl :	10,63	0,30	3,93
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>217,42</b>	<b>3,69</b>	<b>48,41</b>

**Balance de iones:** -5,89%

**Metales pesados** mg/l

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silíce	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	370,00
ph	:	7,70
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología



### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Calera F-13B57
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	921
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	37,67	1,88	24,64
Mg :	4,86	0,40	5,24
Na :	39,33	1,71	22,42
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>81,86</b>	<b>3,99</b>	<b>52,29</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	195,20	3,20	41,98
SO4 :	55,20	1,15	15,08
Cl :	14,18	0,40	5,24
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>264,58</b>	<b>4,75</b>	<b>62,30</b>

**Balance de iones: -8,68%**

Metales pesados	mg/l
Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	350,00
ph	:	7,30
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Calera F-13B57
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	922
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	33,06	1,65	21,62
Mg :	3,76	0,31	4,05
Na :	40,48	1,76	23,08
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>77,30</b>	<b>3,72</b>	<b>48,75</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	203,74	3,34	43,82
SO4 :	11,52	0,24	3,15
Cl :	13,47	0,38	4,98
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>228,73</b>	<b>3,96</b>	<b>51,95</b>

**Balance de iones: -3,12%**

**Metales pesados mg/l**

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:
Color	:
Turbiedad	:
Temperatura	°C :
Conductividad eléctrica	mS/cm :
ph	:
Potencial redox	mV :
Oxígeno libre	mg/l :
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l :
Dureza total	°d :
Dureza de carbonatos	" :
Dureza no carbonatos	" :
Acido de sílice libre	mg/l :
Bióxido de carbón fijado	" :
Bióxido de carbón	" :
Bióxido de carbón agresivo	" :
Consumo de KMNO4	" :

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Calera F-13B57
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	923
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	33,86	1,69	22,14
Mg :	3,64	0,30	3,92
Na :	39,33	1,71	22,42
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>76,83</b>	<b>3,70</b>	<b>48,49</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	193,37	3,17	41,59
SO4 :	9,60	0,20	2,62
Cl :	14,18	0,40	5,24
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>217,15</b>	<b>3,77</b>	<b>49,45</b>

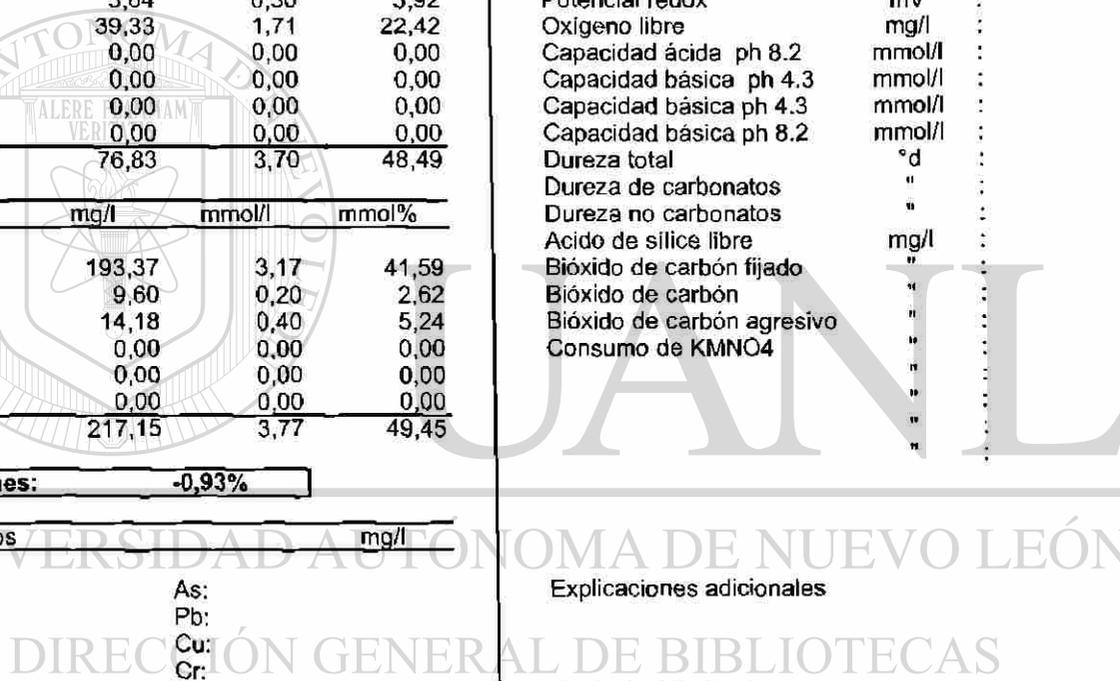
**Balance de iones: -0,93%**

Metales pesados	mg/l
Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	340,00
ph	:	7,40
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología



### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Calera F-13B57
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	933
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	27,85	1,39	18,21
Mg :	40,73	3,35	43,90
Na :	20,47	0,89	11,67
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>89,05</b>	<b>5,63</b>	<b>73,78</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	233,02	3,82	50,12
SO4 :	48,00	1,00	13,11
Cl :	26,58	0,75	9,82
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>307,60</b>	<b>5,57</b>	<b>73,05</b>

**Balace de iones: 0,55%**

**Metales pesados mg/l**

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	490,00
ph	:	7,40
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Fresnillo F-13B47
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	962
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m
Nivel del agua	msnm
Profundidad	m
Caudal	l/s

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	31,46	1,57	20,57
Mg :	7,17	0,59	7,73
Na :	31,97	1,39	18,22
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>70,60</b>	<b>3,55</b>	<b>46,53</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	169,58	2,78	36,47
SO4 :	19,20	0,40	5,24
Cl :	12,40	0,35	4,58
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>201,18</b>	<b>3,53</b>	<b>46,30</b>

**Balace de iones: 0,30%**

**Metales pesados mg/l**

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	310,00
ph	:	7,50
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	"	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:
	"	:
	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	Fresnillo F-13B47
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	995
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	41,68	2,08	27,26
Mg :	18,53	1,36	17,82
Na :	47,15	2,05	26,88
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>105,36</b>	<b>5,49</b>	<b>71,95</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	274,50	4,50	59,04
SO4 :	4,80	0,10	1,31
Cl :	36,15	1,02	13,36
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>315,45</b>	<b>5,62</b>	<b>73,71</b>

**Balance de iones:** -1,15%

**Metales pesados** mg/l

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:	:
Color	:	:
Turbiedad	:	:
Temperatura	°C	:
Conductividad eléctrica	mS/cm	500,00
ph	:	7,00
Potencial redox	mV	:
Oxígeno libre	mg/l	:
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l	:
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l	:
Dureza total	°d	:
Dureza de carbonatos	:	:
Dureza no carbonatos	"	:
Acido de sílice libre	mg/l	:
Bióxido de carbón fijado	"	:
Bióxido de carbón	"	:
Bióxido de carbón agresivo	"	:
Consumo de KMNO4	"	:

Explicaciones adicionales

Litología / Geología

### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	1420
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m : 1,00
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	10,42	0,52	6,81
Mg :	2,67	0,22	2,88
Na :	20,47	0,89	11,67
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>33,56</b>	<b>1,63</b>	<b>21,36</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	112,85	1,85	24,27
SO4 :	0,00	0,00	0,00
Cl :	7,09	0,20	2,62
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>119,94</b>	<b>2,05</b>	<b>26,89</b>

**Balance de iones:** -11,41%

**Metales pesados:** mg/l

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Silice	SiO2:

Olor	:
Color	:
Turbiedad	:
Temperatura	°C :
Conductividad eléctrica	mS/cm : 190,00
ph	: 6,80
Potencial redox	mV :
Oxígeno libre	mg/l :
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l :
Dureza total	°d :
Dureza de carbonatos	" :
Dureza no carbonatos	" :
Acido de sílice libre	mg/l :
Bióxido de carbón fijado	" :
Bióxido de carbón	" :
Bióxido de carbón agresivo	" :
Consumo de KMNO4	" :

Explicaciones adicionales

Litología / Geología



### Análisis Hidroquímico

**Coorden. X** **Coord. Y**  
 Pozo Cuenca Calera  
 Mapa Topogr.  
 Ubicación  
 Quien tomó la muestra? C.N.A.  
 Numero 1542  
 Fecha  
 Nr. De laboratorio  
 Nivel del agua m :  
 Nivel del agua msnm :  
 Profundidad m :  
 Caudal l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	25,25	1,26	16,51
Mg :	6,32	0,52	6,81
Na :	30,59	1,33	17,44
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>62,16</b>	<b>3,11</b>	<b>40,76</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	162,26	2,66	34,90
SO4 :	7,20	0,15	1,97
Cl :	12,40	0,35	4,58
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>181,86</b>	<b>3,16</b>	<b>41,45</b>

**Balance de iones: -0,78%**

**Metales pesados mg/l**

Arsénico As:  
 Plomo Pb:  
 Cobre Cu:  
 Cromio Cr:  
 Nickel Ni:  
 Zinc Zn:  
 Cadmio Cd:  
 Mercurio Hg:  
 Cianuro CN:  
 Selenio Se:  
 Bario Ba:  
 Sílice SiO2:

Olor :  
 Color :  
 Turbiedad :  
 Temperatura °C :  
 Conductividad eléctrica mS/cm : **300,00**  
 ph : **7,40**  
 Potencial redox mV :  
 Oxígeno libre mg/l :  
 Capacidad ácida ph 8.2 mmol/l :  
 Capacidad básica ph 4.3 mmol/l :  
 Capacidad básica ph 4.3 mmol/l :  
 Capacidad básica ph 8.2 mmol/l :  
 Dureza total °d :  
 Dureza de carbonatos " :  
 Dureza no carbonatos " :  
 Acido de sílice libre mg/l :  
 Bióxido de carbón fijado " :  
 Bióxido de carbón " :  
 Bióxido de carbón agresivo " :  
 Consumo de KMNO4 " :  
 " :  
 " :  
 " :  
 " :  
 " :  
 " :

Explicaciones adicionales

Litología / Geología







### Análisis Hidroquímico

<b>Coorden. X</b>	<b>Coord. Y</b>
Pozo	Cuenca Calera
Mapa Topogr.	
Ubicación	
Quien tomó la muestra?	C.N.A.
Numero	1583
Fecha	
Nr. De laboratorio	
Nivel del agua	m :
Nivel del agua	msnm :
Profundidad	m :
Caudal	l/s :

CATIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
Ca :	19,63	0,98	12,84
Mg :	7,78	0,64	8,39
Na :	60,95	2,65	34,75
K :	0,00	0,00	0,00
NH4 :	0,00	0,00	0,00
Fe :	0,00	0,00	0,00
Mn :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>88,36</b>	<b>4,27</b>	<b>55,97</b>

ANIONES:	mg/l	mmol/l	mmol%
HCO3 :	270,84	4,44	58,25
SO4 :	0,00	0,00	0,00
Cl :	8,86	0,25	3,27
NO3 :	0,00	0,00	0,00
NO2 :	0,00	0,00	0,00
PO4 :	0,00	0,00	0,00
<b>SUMA :</b>	<b>279,70</b>	<b>4,69</b>	<b>61,53</b>

**Balance de iones: -4,68%**

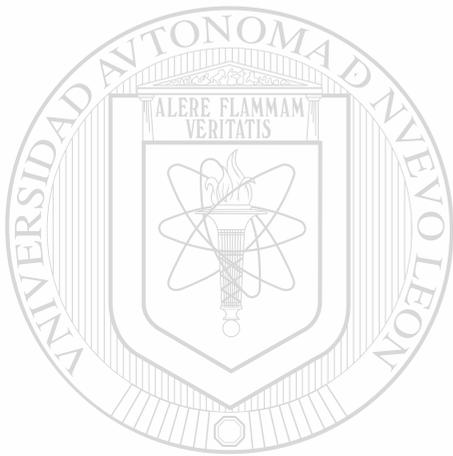
**Metales pesados mg/l**

Arsénico	As:
Plomo	Pb:
Cobre	Cu:
Cromio	Cr:
Nickel	Ni:
Zinc	Zn:
Cadmio	Cd:
Mercurio	Hg:
Cianuro	CN:
Selenio	Se:
Bario	Ba:
Sílice	SiO2:

Olor	:
Color	:
Turbiedad	:
Temperatura	°C :
Conductividad eléctrica	mS/cm :
ph	:
Potencial redox	mV :
Oxígeno libre	mg/l :
Capacidad ácida ph 8.2	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 4.3	mmol/l :
Capacidad básica ph 8.2	mmol/l :
Dureza total	°d :
Dureza de carbonatos	" :
Dureza no carbonatos	" :
Acido de sílice libre	mg/l :
Bióxido de carbón fijado	" :
Bióxido de carbón	" :
Bióxido de carbón agresivo	" :
Consumo de KMNO4	" :

Explicaciones adicionales

Litología / Geología



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**neri**

®

Encuadernaciones

Encuadernado en:

**Neri Encuadernaciones**

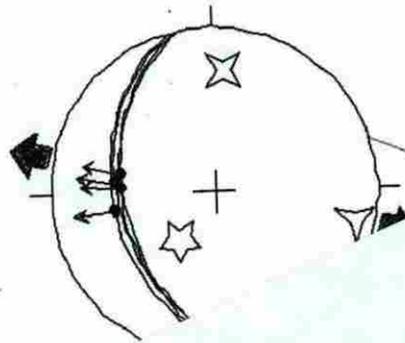
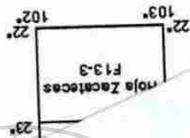
Cjón. Juventino Rosas # 203  
Centro Histórico Zacatecas, Zac.

C. P. 98000

Tel. 01 (492) 924 11 92

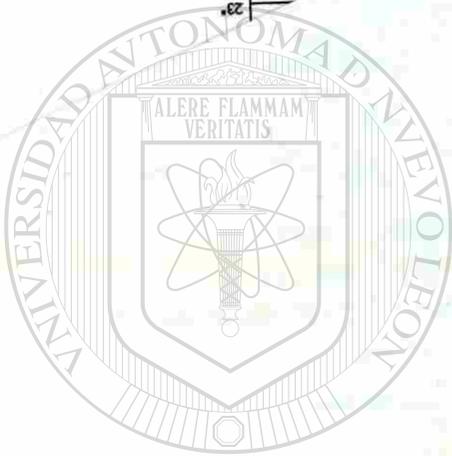
GIS:ab	Fecha: Julio 2003	Emesto P. Nuñez P.
Anexo 2		
El Acuífero de Calera, Zacatecas Situación Actual y Perspectivas para un Desarrollo Sustentable		
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA		

Referencias Cartográficas  
 INEGI, Hojas, Zacatecas F13-B y  
 Fresnillo F13-3  
 Esc. 1:250,000  
 COREMI, Cartas Geológicas-Minera  
 Fresnillo F13-3 y Zacatecas F13-B  
 Esc. 1:250,000



750000

( 3 CARTAS )

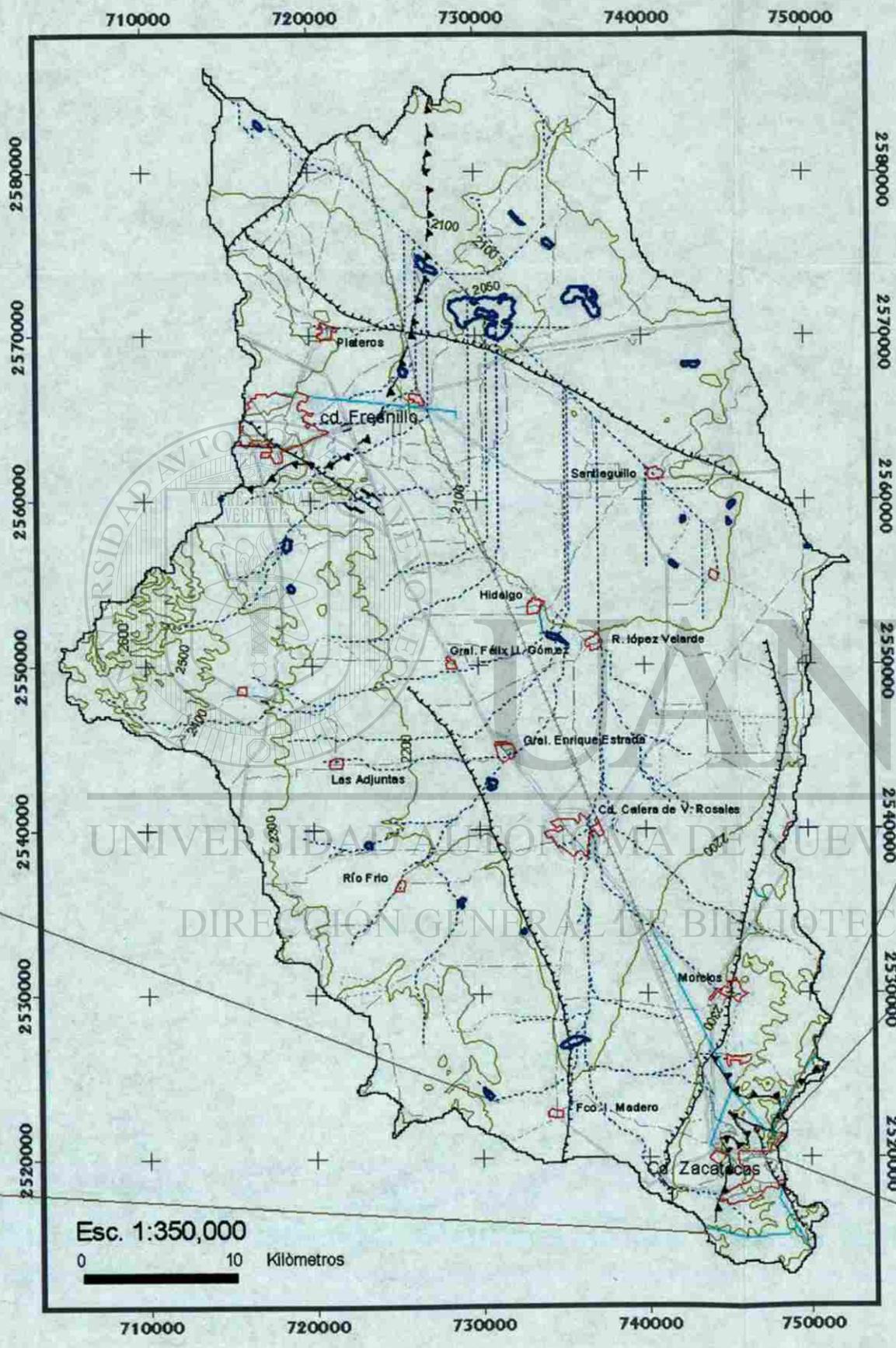


# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

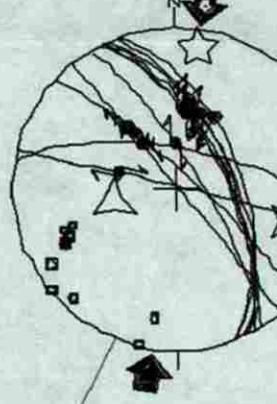


Esc. 1:350,000  
 0 10 Kilómetros

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



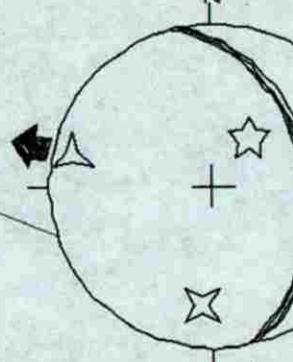
Mina El Bote  
 Fallas Inversas

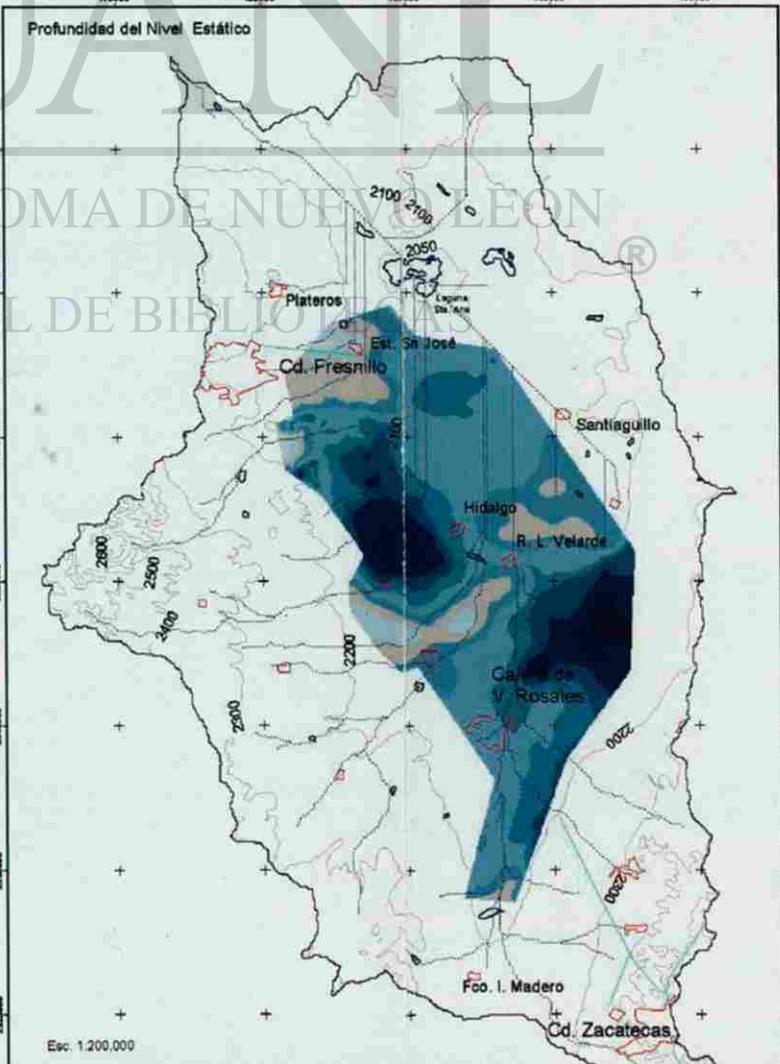
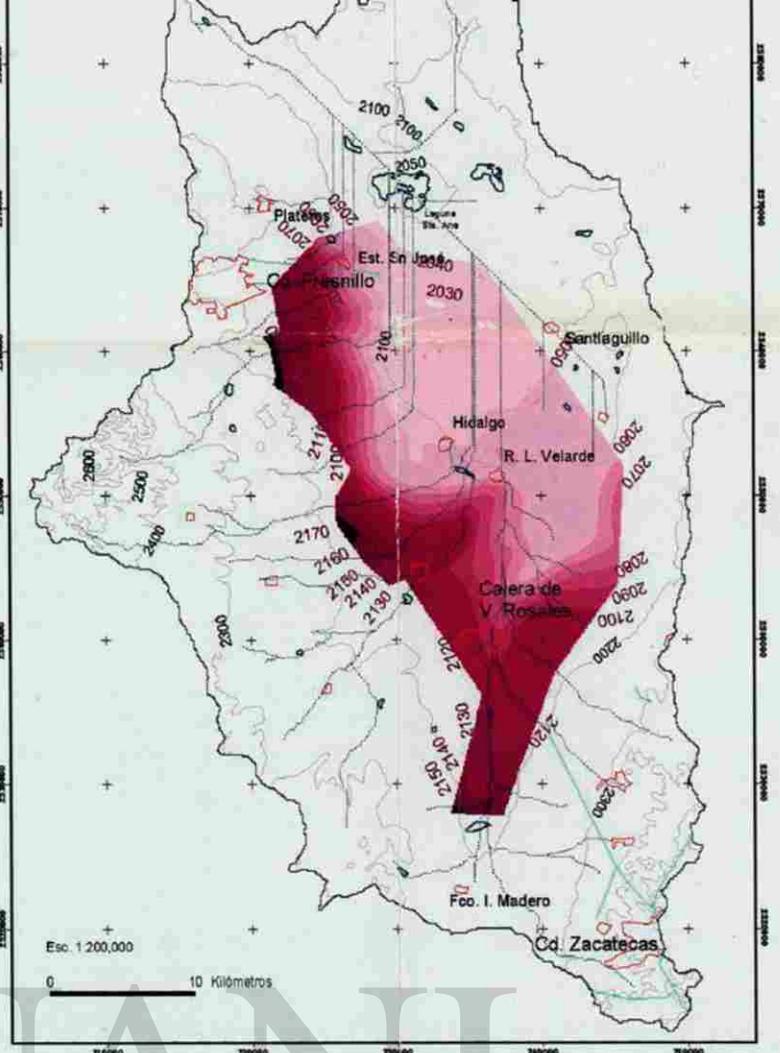


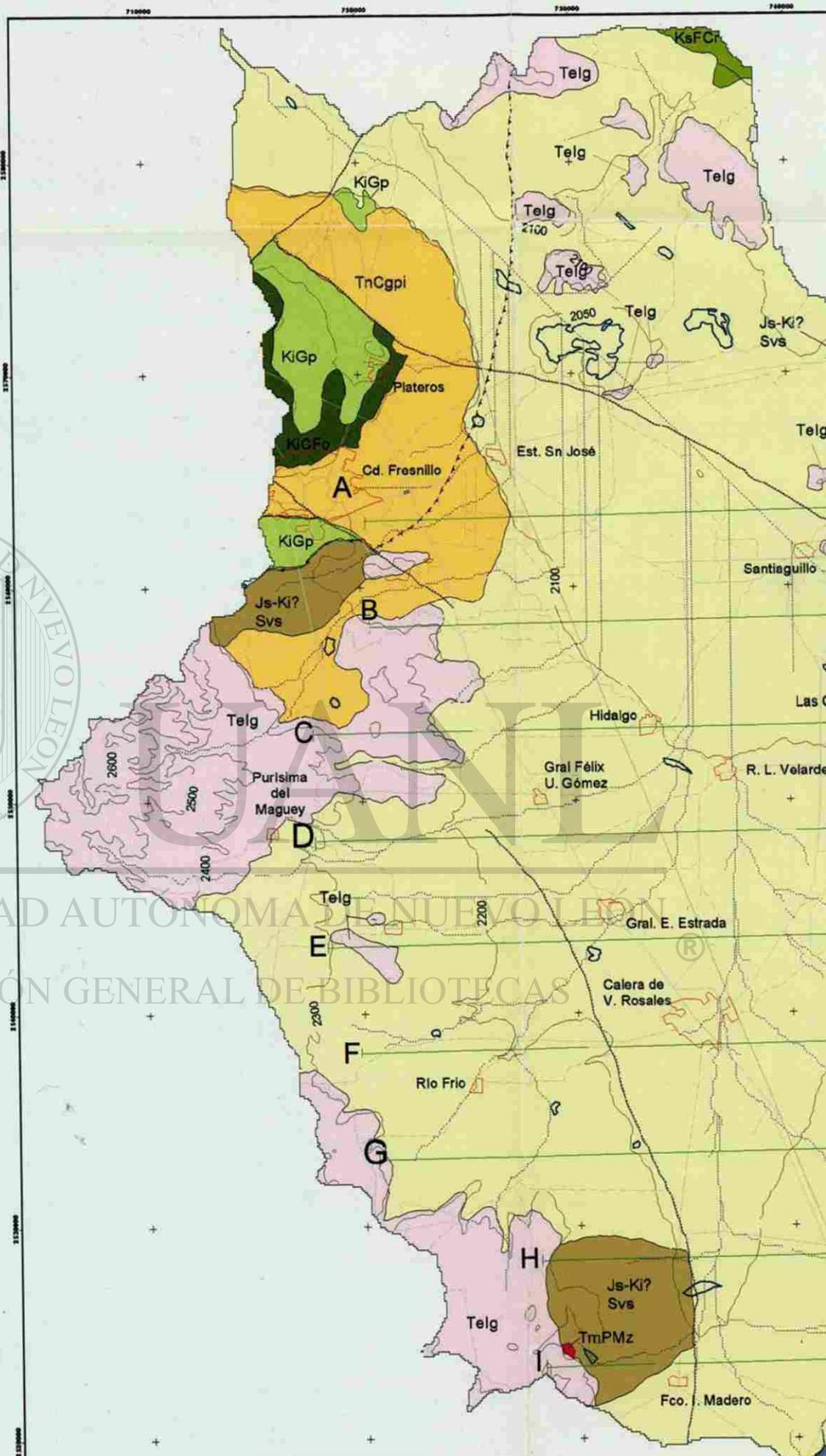
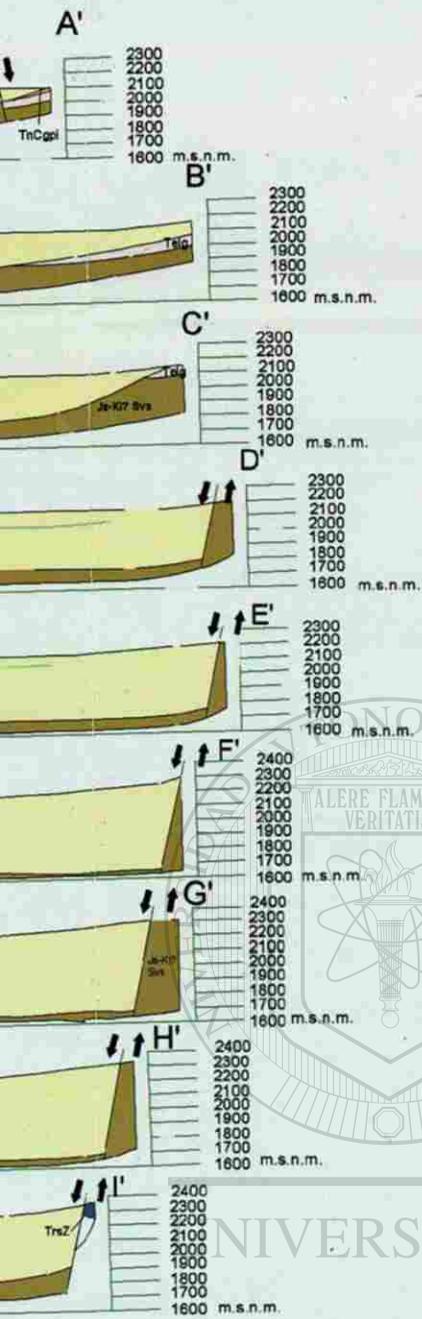
Mina El Bote  
 Fallas Normales



Presidencia Municip  
 Zacatecas  
 Fallas Normales







DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



