



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estudio Geohidrológico Regional de la
Zona Centro Oriental del Estado de
Zacatecas.

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

Presenta

Sergio Yussim Guarneros

México, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS SIN PAGINACION

COMPLETA LA INFORMACION



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-001

SR. SERGIO YUSSIM GUARNEROS
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Emiliano Campos Madrigal, y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**ESTUDIO GEOHIDROLOGICO REGIONAL DE LA ZONA CENTRO ORIENTAL DEL ESTADO
DE ZACATECAS**

	RESUMEN
I	INTRODUCCION
II	GENERALIDADES
III	GEOLOGIA
IV	HIDROGEOQUIMICA
V	HIDROGEOLOGIA
VI	DISCUSION DE RESULTADOS
VII	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA
	ANEXO CARTOGRAFICO

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 6 de enero de 1997
EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

Es difícil, es imposible creer que el dios bueno, el "Padre", se haya involucrado en el escándalo de la creación. Todo hace pensar que no ha tomado en ella parte alguna, que es obra de un dios sin escrúpulos, de un dios tarado. La bondad no crea: le falta imaginación; pero hay que tenerla para fabricar un mundo, por chapucero que sea. Es, en último extremo, de la mezcla de bondad y maldad de la que puede surgir un acto o una obra. O un universo. Partiendo del nuestro, es en cualquier caso mucho más fácil remontarse a un dios sospechoso que a un dios honorable.

E. M. Ciorán

Índice

ÍNDICE

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	3
I.1 Objetivo	4
I.2 Antecedentes	4
I.3 Trabajos Previos.....	5
I.4 Método de Trabajo	6
II. GENERALIDADES.....	9
II.1 Localización	9
II.2 Vías de Comunicación	12
II.3 Fisiografía.....	12
II.4 Orografía	15
II.5 Hidrografía.....	16
II.6 Clima	16
II.7 Vegetación	17
II.8 Población y Cultura	18
III. GEOLOGÍA	21
III.1 Geología Regional	21
III.2 Estratigrafía.....	22
III.3 Geología Estructural.....	31
III.4 Geología Histórica.....	31
IV. HIDROGEOQUÍMICA	35
IV.1 Programa de Muestreo	35
IV.2 Actividades de Campo	36
IV.3 Estudios de Laboratorio	37
IV.4 Características Físicoquímicas	37
- Temperatura (θ)	39
- Conductividad Eléctrica (C)	40
- Potencial Hidrógeno (pH).....	40
- Sólidos Totales Disueltos (STD)	41
- Dureza (D)	41

IV.4 Aniones	42
- Cloruros (Cl ⁻).....	42
- Sulfatos (SO ₄ ²⁻).....	44
- Carbonatos (CO ₃ ²⁻) y Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻).....	45
- Nitratos (NO ₃ ⁻).....	46
- Fosfatos (PO ₄ ³⁻).....	46
- Fluoruros (F ⁻).....	47
IV.5 Cationes.....	47
- Sodio (Na ⁺).....	48
- Potasio (K ⁺).....	50
- Calcio (Ca ²⁺).....	51
- Magnesio (Mg ²⁺).....	51
- Hierro (Fe ²⁺ , Fe ³⁺).....	52
V. HIDROGEOLOGÍA.....	55
V.1 Unidades Hidrogeológicas.....	55
V.2 Delimitación de Acuíferos.....	58
V.3 Piezometría.....	61
- Profundidad al Nivel Estático.....	61
- Evolución del Nivel Estático.....	61
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	63
VI.1 Flujo Subterráneo.....	64
VI.2 Familias de Aguas.....	64
- Diagramas de Piper.....	64
- Diagramas de Stiff.....	69
- Diagramas de Wilcox.....	69
VI.3 Índices Hidrogeoquímicos.....	71
- Relación Magnesio Calcio (r Mg / r Ca).....	71
- Índice de Cambio de Base (ICB).....	71
VII. CONCLUSIONES.....	73
VII.1 Geológicas.....	73
VII.2 Geohidrológicas.....	74
VII.3 Hidrogeoquímicas.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77

ANEXO CARTOGRÁFICO

Mapa 1	Topográfico.
Mapa 2	Geológico.
Mapa 3	Aprovechamientos Muestreados.
Mapa 4	Contenido de Cloruros.
Mapa 5	Contenido de Sulfatos.
Mapa 6	Contenido de Nitratos.
Mapa 7	Contenido de Fluoruros.
Mapa 8	Contenido de Sodio.
Mapa 9	Contenido de Calcio.
Mapa 10	Contenido de Magnesio.
Mapa 11	Unidades Geohidrológicas.
Mapa 12	Elevación del Nivel Estático (msnm).
Mapa 13	Diagramas de Stiff.
Mapa 14	Relación Magnesio / Calcio (rMg/rCa).
Mapa 15	Índice de cambio de Base (ICB).

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Localización del área de estudio.....	10
2	Correspondencia cartográfica con las cartas a escala 1 : 50,000.....	11
3	Vías de comunicación.....	13
4.	Marco fisiográfico del área de estudio.....	14
5.	Columna estratigráfica propuesta para el área de estudio.....	23
6.	División hidrológica del área de estudio. Tomado de INEGI (1995).....	56
7.	Distribución geográfica de los acuíferos postulados por la CNA.....	59
8.	Diagrama de Piper del acuífero de Chupaderos.....	65
9.	Diagrama de Piper del acuífero de Guadalupe-Bañuelos.....	66
10.	Diagrama de Piper del acuífero de Benito Juárez.....	67
11.	Diagrama de Piper del acuífero de Calera.....	68
12.	Diagrama de Wilcox a partir de los aprovechamientos muestreados.....	70
13.	Distribución de los acuíferos propuestos.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Calendario de actividades	8
II.	Estaciones climatológicas.....	16
III.	Población por municipios en 1995.....	18
IV.	Correlación de unidades	24
V.	Relación entre conductividad y error admisible	37
VI.	Parámetros fisicoquímicos del Valle Oriental.....	38
VII.	Parámetros fisicoquímicos del Valle Occidental.....	39
VIII.	Clasificación del agua subterránea de acuerdo a los STD	41
IX.	Clasificación del agua subterránea de acuerdo a la dureza.....	42
X.	Análisis químicos de aniones del Valle Occidental	43
XI.	Análisis químicos de aniones del Valle Oriental.....	44
XII.	Análisis químicos de cationes del Valle Occidental	48
XIII.	Análisis químicos de cationes del Valle Oriental.....	49
XIV.	Aprovechamientos de agua subterránea, clasificados por uso.....	60

Resumen

RESUMEN

Zacatecas es una de las primeras localidades estudiadas por geólogos en nuestro país, y siempre ha sido una fuente de controversias. Posiblemente, el mayor problema es que las estructuras regionales, por su complejidad, enmascaran las características litológicas y estratigráficas. Ésto a dado pie a que continuamente se elaboren modelos sobre la evolución geológica del área, con base en nuevas evidencias.

Así, este trabajo de investigación, por una parte, resume las últimas observaciones sobre la historia geológica de Zacatecas, y por otra, aprovecha este modelo para explicar el funcionamiento hidrogeológico de la región.

A partir de un muestreo sistemático de los aprovechamientos de agua, en los acuíferos que circundan a la Ciudad de Zacatecas, se determinó la dirección preferencial del flujo subterráneo, las características físico-químicas del agua, y el patrón evolutivo de las diferentes familias de aguas definidas.

Se construyó un modelo geológico preliminar, basado en información bibliográfica; a este modelo se le sometió a comprobación con los datos obtenidos y procesados del muestreo, y se perfeccionó con nuevo material bibliográfico y más observaciones de campo.

Como resultado de este proceso se propone una columna estratigráfica distinta a la de los modelos tradicionales. Esta diferencia consiste en la exclusión de unidades calcáreas anteriores al Cretácico, y una revisión de litológica y estratigráfica de la Formación Chilitos, anteriormente llamada "Rocas Verdes".

Simultáneamente se presenta un modelo hidrogeológico, en donde los acuíferos son controlados por la estructura del basamento; ésto explica las direcciones de flujo subterráneo centripetas y la evolución química del agua subterránea.

Como medio para ilustrar los resultados y conclusiones, este trabajo cuenta con un anexo cartográfico, de quince mapas a escala 1: 275,000, que integran datos geológicos, geohidrológicos e hidrogeoquímicos.

1. Introducción

I. INTRODUCCIÓN

El Estado de Zacatecas presenta uno de los menores índices de precipitación pluvial en la República Mexicana, además, no dispone de embalses superficiales importantes que garanticen el abastecimiento y la calidad del agua para cualquiera de sus usos. Por otro lado, el agua proveniente de los escasos escurrimientos superficiales, tales como ríos y arroyos, no es constante durante el año, siendo útil sólo en ciertas épocas y cuando se dispone de presas de almacenamiento para su posterior aprovechamiento. La Ciudad de Zacatecas y la región circundante, se ven afectadas en su desarrollo agrícola y urbano, por la insuficiencia de fuentes de abastecimiento superficial. Ésto ha dado lugar a que la principal fuente de aprovechamiento sea el agua subterránea.

El costo relativamente bajo y la calidad natural de las aguas subterráneas, normalmente ha bastado para justificar su explotación a gran escala, no sólo para suministro de agua potable, sino también para usos como el agrícola, ganadero e industrial. La explotación intensiva de los mantos acuíferos de la región, ha superado su recarga natural, disminuyendo tanto la cantidad como la calidad del agua extraída, que en algunos casos puede presentar valores muy por encima de las normas para el consumo humano.

En vista de los considerables recursos y esfuerzos que se han invertido, y que se continuarán invirtiendo, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas, es necesario implementar políticas realistas para el monitoreo de la calidad de este recurso, no sólo para controlar la calidad del agua suministrada al público sino también para evaluar el estado de las reservas. Con este fin la Comisión Nacional del Agua solicitó el apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México para llevar a cabo el estudio geonidrológico de la región.

Como resultado de este convenio se llevó a cabo el proyecto de investigación "Estudio de la Calidad del Agua en la Zona de Zacatecas - Guadalupe" cuyo desarrollo y resultados presento en esta tesis.

I.1 OBJETIVO

Este trabajo tiene como finalidad el estudio hidrogeológico general del área comprendida por las cuencas hidrológicas de Calera, Benito Juárez, Guadalupe-Bañuelos y Chupaderos, que han sido nombradas y definidas así por la Comisión Nacional del Agua. Este estudio se enfocará en particular a los siguientes tres puntos:

- a) Identificación y delimitación de los acuíferos del área.
- b) Establecimiento del esquema general de flujo subterráneo.
- c) Caracterización y evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.

I.2 ANTECEDENTES

La joya colonial de la ciudad de Zacatecas se encuentra enclavada en la parte central del Estado del mismo nombre, con un índice de precipitación pluvial muy bajo, y por lo tanto, con grandes carencias de recursos hidráulicos. En esta ciudad, como en sus alrededores, debido al creciente desarrollo agrícola y a la explosión demográfica se está generando una mayor demanda de agua, y por la insuficiencia de las fuentes superficiales se ha recurrido al abastecimiento a través de la explotación de los acuíferos circundantes tanto para el abastecimiento de agua potable como para riego agrícola, el uso ganadero y el industrial.

De acuerdo con la información generada por la Comisión Nacional del Agua (CNA) en años anteriores, se ha determinado la existencia de cuatro acuíferos; sin embargo no se cuenta con datos suficientes para la caracterización de los mismos, lo cual es indispensable para determinar la distribución espacial y la calidad del agua de cada uno de ellos. Por otra parte, en las zonas de explotación intensiva, el creciente bombeo que se realiza por la gran cantidad de pozos perforados ha rebasado la recarga natural, provocando su sobreexplotación y una variación continua de la calidad del agua. Estos factores promovieron que en 1989 se implementara un sistema de monitoreo del agua subterránea, particularmente de la destinada al sistema de abastecimiento de agua potable.

Las determinaciones analíticas puntuales que se llevaron a cabo, en los pozos de abastecimiento de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe, por parte de la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua (CNA), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Instituto de Ingeniería, mostraron que de los pocos metales pesados que se monitorearon (Pb, As, Fe, Cd, Hg y Cu), algunos rebasan la norma de agua potable, y por

lo tanto se decidió la clausura de los pozos más problemáticos, aunque los análisis realizados por las diferentes instituciones no mostraron semejanza entre sí, ni aún los que se muestrearon simultáneamente. Estas determinaciones implicaron la necesidad de llevar a cabo un estudio integral que considere las causas del deterioro del agua en los pozos mencionados así como la estrategia para asegurar el abastecimiento tanto en cantidad como en calidad aceptables. Por lo que se determinó llevar a cabo el estudio geohidrológico de esta zona, para caracterizar las diferentes familias de agua, los diferentes acuíferos y el flujo hidráulico en la región.

1.3 TRABAJOS PREVIOS

Se han realizado varios estudios geohidrológicos en la parte Centro Oriental del Estado de Zacatecas, que cubren los acuíferos de Calera, Benito Juárez, Guadalupe-Bañuelos y Chupaderos, todos ellos para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) y la Comisión Nacional del Agua (CNA), tanto por el personal de estas dependencias como también por compañías contratistas, de entre las que destacan los siguientes trabajos:

En el año de 1981, se realizó el estudio "Actividades de Carácter Geohidrológico en las Zonas de Chupaderos, Villa Hidalgo y La Blanca, Zacatecas" a cargo de la compañía Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S. A., con el objetivo de cuantificar la magnitud, procedencia y distribución de la recarga de los acuíferos, los volúmenes extraídos para cada valle y conocer la posible comunicación hidrogeológica entre ellos, y de ser así, estimar los volúmenes de agua intercambiables. A partir de datos geofísicos determinó la existencia de un posible parteaguas subterráneo de dirección Norte-Sur en el Valle de Chupaderos, mientras que para la porción Oriental, no se identificó ninguna frontera. También se identificaron los límites entre los valles de Villa Hidalgo y Villa García, y la frontera con el Valle de Loreto.

Por parte de la CNA se llevó a cabo en el año de 1982 el "Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona de Trancoso, Zacatecas", con el objetivo de definir el funcionamiento de sus acuíferos, estableciendo su geometría, características hidrodinámicas, comportamiento geohidrológico, su condición de explotación, su disponibilidad de agua y su relación geohidrológica con los valles adyacentes. Se concluyó que el área de Trancoso y la de Chupaderos forman parte de una misma unidad geohidrológica y se definió un parteaguas hidrodinámico a la altura del poblado El Carmen, al Sur de la zona. También se estableció que el acuífero no presentaba efectos de sobreexplotación y que sus variaciones, tanto

verticales como horizontales, son producto de una compleja geometría y estructura geológica, que provocan una marcada anisotropía del mismo.

También en el año de 1982 se realizó el "Estudio Geohidrológico de la Zona de Guadalupe-Bañuelos, Zacatecas", con el objetivo de determinar las condiciones de explotación del acuífero y definir la relación con los valles adyacentes. Se concluyó que en la zona de Guadalupe las extracciones no habían rebasado el potencial del acuífero, mientras que en la zona de Bañuelos se mostraban efectos de la sobreexplotación. Respecto a la interrelación hidrogeológica, se determinó que existe continuidad de los acuíferos tanto al Sur de la zona de Bañuelos, como al Norte de la zona de Guadalupe, pero que no existe comunicación ni al Oriente ni al Occidente, debido a estructuras geológicas de baja permeabilidad que actúan como fronteras laterales.

En 1991, la compañía Exploraciones Coordinadas realizó el "Estudio Geológico y Geofísico de la zona de Víctor Rosales", cuya finalidad fue tener un registro litológico y estructural del valle de Calera. En este mismo año, la CNA concluyó el "Modelo Matemático de Simulación del Acuífero de Calera" y el "Modelo Matemático de Simulación del Acuífero Benito Juárez", con el fin de predecir la evolución del nivel estático en estas zonas.

El "Informe Técnico de la Zona Geohidrológica Calera" fue elaborado en 1993 por la CNA para actualizar el estado de explotación de las zonas de Calera y Benito Juárez y evaluar el balance geohidrológico. Por último, la Gerencia Estatal de la CNA en Zacatecas, realiza periódicamente recorridos piezométricos, toma de muestras para análisis fisicoquímicos y actualizaciones geohidrológicas de los acuíferos de la región.

1.4 MÉTODO DE TRABAJO

Las actividades de que consta este estudio se agruparon de acuerdo a su tipo y al espacio físico necesario para realizarlas. La primera clasificación se hizo entre las actividades de gabinete (recopilación, análisis, etc.) y las de campo (muestreo); la siguiente entre las actividades que se realizarían en Zacatecas y las que se realizarían en la Ciudad de México, y por último, se separaron las actividades que realizarían otras entidades (estudios de laboratorio). Así, se definieron para este estudio, siete etapas de la siguiente manera:

a) **Recopilación:** En ésta primera etapa se consultaron los servicios bibliotecarios de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Geología e Instituto de Geofísica de la UNAM, así

como los del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y del Consejo de Recursos Minerales (CRM). Del material consultado en estas entidades se hizo una revisión bibliográfica en los temas de geología, geohidrología, geoquímica y minería, y se obtuvo el material para elaborar el mapa topográfico base de la región.

b) Evaluación: En esta etapa, se visitó la Gerencia Regional de CNA en Zacatecas con el objeto de comparar la información que maneja la Gerencia sobre la geología e hidrogeoquímica, revisar los censos de los aprovechamientos y visitar el área de estudio.

c) Análisis: Con toda la información recabada, se elaboró un modelo previo del funcionamiento hidrogeológico de la región, y se revisaron los censos de aprovechamientos, seleccionando los que presentaban mayor interés tanto para el proyecto como para la Gerencia Regional. De esta manera se diseñó el plan de muestreo, buscando la equidistancia entre los aprovechamientos, e incluyendo a los que contaran con la mayor información en los censos.

d) Muestreo: Esta actividad se llevo a cabo durante cuatro semanas, y consistió en recorrer sistemáticamente el área de estudio obteniendo las muestras requeridas de los aprovechamientos seleccionados, y midiendo en campo algunas propiedades tanto de la muestra, como propiedades del aprovechamiento mismo.

e) Estudios de Laboratorio: Estos estudios fueron practicados en los laboratorios ABC, de la Ciudad de México, a medida de que las muestras se les hicieron llegar. De las muestras que se tomaron duplicados, los análisis se realizaron en el laboratorio del Instituto de Ingeniería.

f) Interpretación: De los análisis químicos ya terminados, se eliminaron los datos que presentaron errores analíticos mayores al 5%, y con los restantes se generaron las distribuciones geoquímicas e hidrológicas, con las que se precisó el modelo hidrogeológico de la región.

g) Informe: En esta última etapa se elaboró el texto final, los mapas, gráficas y tablas que lo acompañarían.

Estas etapas fueron elaboradas de acuerdo con la Tabla I, que muestra el calendario de actividades.

Sergio Yussim Guarneros.

Actividades	Abril				Mayo					Junio					Julio					Agosto					Septiembre					Octubre				
	Semanas																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25									
Recopilación																																		
Evaluación																																		
Análisis																																		
Muestreo																																		
Laboratorio																																		
Interpretación																																		
Informe																																		

Tabla I. Calendario de Actividades.

II. Generalidades

II. GENERALIDADES

La extensión del área de estudio se estableció atendiendo a la distribución que presentan las zonas geohidrológicas en las que operan los sistemas de abastecimiento de agua de las zonas urbanas de Zacatecas y Guadalupe, de acuerdo a los estudios realizados por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Por esta razón, aunque las baterías de extracción se centran en los aproximadamente 1,000 km² alrededor de estas ciudades, el área se extendió más allá, abarcando en su totalidad las zonas geohidrológicas de Calera, Benito Juárez, Guadalupe-Bañuelos y Chupaderos, las que incluyen ciudades importantes como Calera de Víctor Rosales y Fresnillo, con sus respectivos sistemas de abastecimiento (Mapa 1).

II.1 LOCALIZACIÓN

El estudio se realizó en el Estado de Zacatecas que se encuentra en el Centro Norte de la República Mexicana. El área está comprendida entre los meridianos 102°12'30" y 102°55' Oeste y los paralelos 22°37'30" y 23°15' Norte; en la región Centro Oriental del Estado, que limita al Oriente con el Estado de San Luis Potosí (Figura 1). Dicha área tiene una extensión de 4,500 km² y es cubierta cartográficamente por nueve cartas topográficas de la serie a escala 1:50,000 de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional CETENAL (ahora integrada al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI), que son:

a) Fresnillo	F-13-B-47,
b) Chichimequillas	F-13-B-48,
c) Hernández	F-13-B-49,
d) Víctor Rosales	F-13-B-57,
e) Zacatecas	F-13-B-58,
f) Zacatón	F-13-B-59,
g) García Salinas	F-13-B-67,
h) Guadalupe	F-13-B-68, y
i) Ojo Caliente	F-13-B-69.

Este trabajo se expresa en mapas a escala 1:275,000, y la correspondencia entre ellos y la cartografía de CETENAL se observa en la Figura 2.

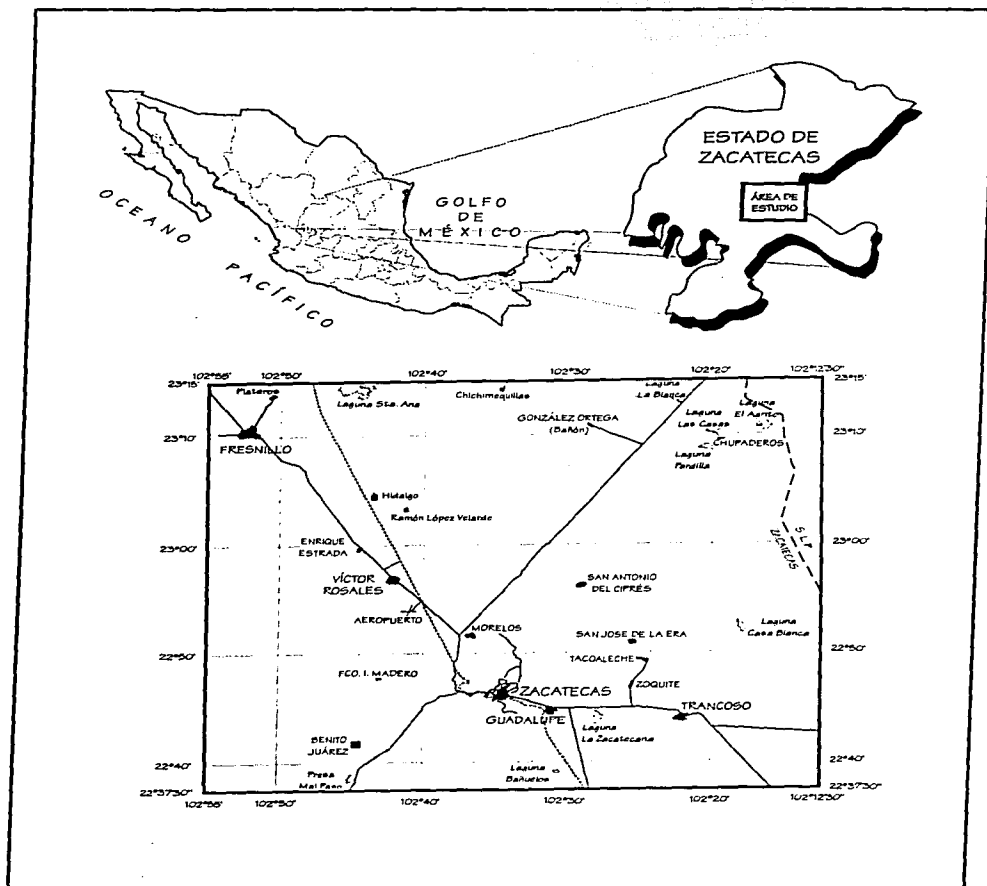


Figura 1 Localización del área de estudio.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

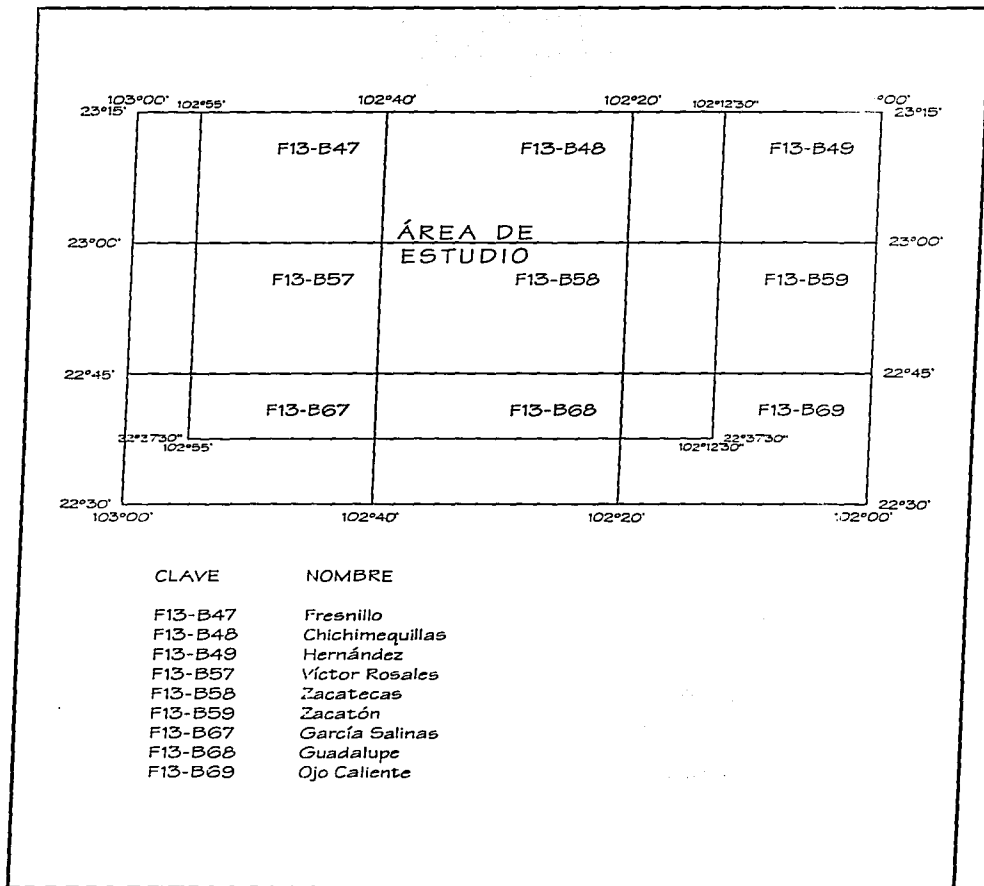


Figura 2 Correspondencia cartográfica del área de estudio con las cartas adyacentes de la serie a escala 1:50,000.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

II.2 VÍAS DE COMUNICACIÓN

La parte central del Estado se encuentra bien comunicada, tanto en su interior como con el resto del país (Figura 3). La red carretera del Estado comprende 1,573 km de red federal; cuenta con cuatro importantes carreteras federales que enlazan a la Ciudad de Zacatecas con importantes ciudades, como la número 45 que comunica con Aguascalientes y Durango, la número 49 con San Luis Potosí y Torreón, la número 54 con Guadalajara y Saltillo, y la número 23 con Guadalajara y Torreón. Cuenta con una gran infraestructura de caminos estatales, 1,557 km de los cuales 66% se encuentran pavimentados, y es el primer lugar nacional por extensión de caminos rurales, con 7,200 km. Los caminos rurales comunican a todas las poblaciones mayores de 500 habitantes con ciudades importantes.

El servicio ferroviario consta de 584 km de vía troncal, 274 km de líneas secundarias y 16 estaciones, con una ruta de importancia nacional que enlaza a las ciudades de Zacatecas y Fresnillo, por un lado con Aguascalientes y su destino final la Ciudad de México, y en el otro sentido se bifurca hacia las ciudades de Durango y Torreón, con su destino final en Ciudad Juárez. Este servicio responde, fundamentalmente, a las necesidades de transporte mineral.

Por vía aérea se comunica con la Ciudad de México, Tijuana, Guadalajara, Hermosillo, Ciudad Obregón, Durango, Mexicali, Morelia, Torreón, Monterrey y Los Ángeles, California. Cuenta con el aeropuerto "Gral. Leobardo C. Ruiz", ubicado cerca de la Ciudad de Calera de V. R., y a 20 km de la Ciudad de Zacatecas, diseñado para recibir aviones comerciales medianos.

En lo que respecta al Servicio Postal Mexicano, tiene una cobertura estatal del 90%, y en el servicio telegráfico cuenta con 27 unidades que además de prestar el servicio tradicional, cuentan con los servicios de transferencia electrónica de fondos y fax público. El servicio telefónico cubre el 100% de las cabeceras municipales.

II.3 FISIOGRAFÍA

La clasificación de INEGI (1981), ubica a la zona de estudio en la transición del flanco Sureste de la Provincia de la Sierra Madre Occidental y el límite Noroeste de la Provincia de la Mesa Central (Figura 4), caracterizadas de la siguiente forma:

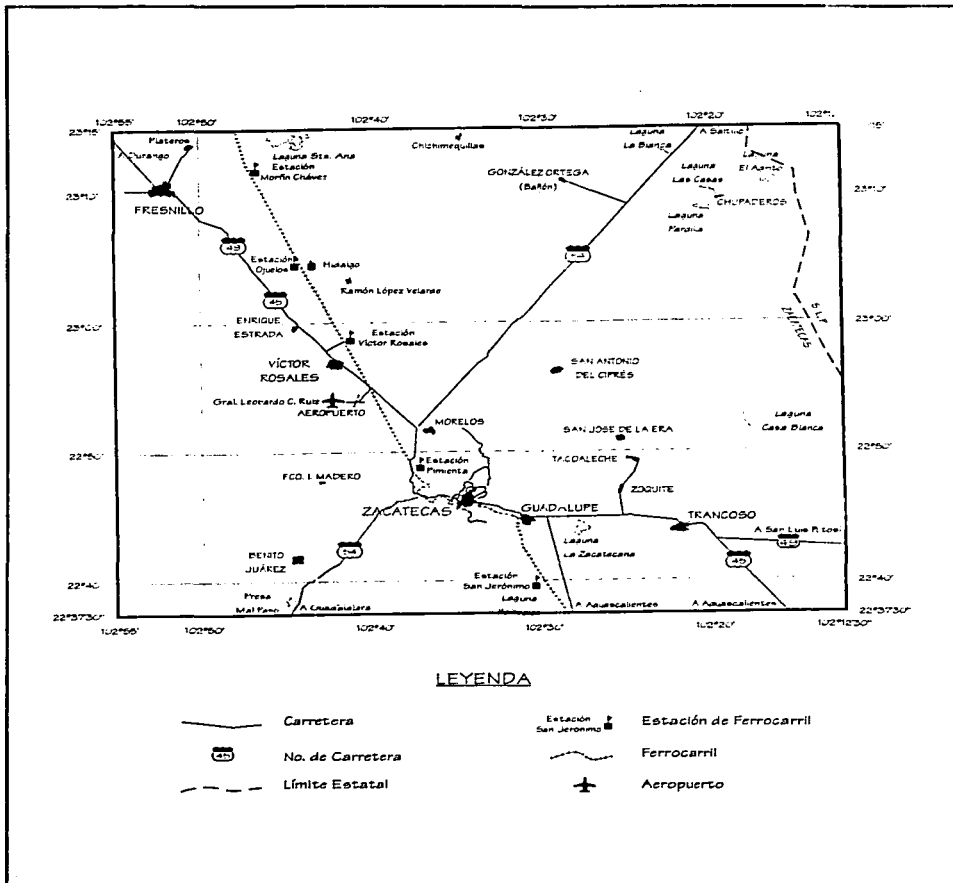


Figura 3 Vías de comunicación.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

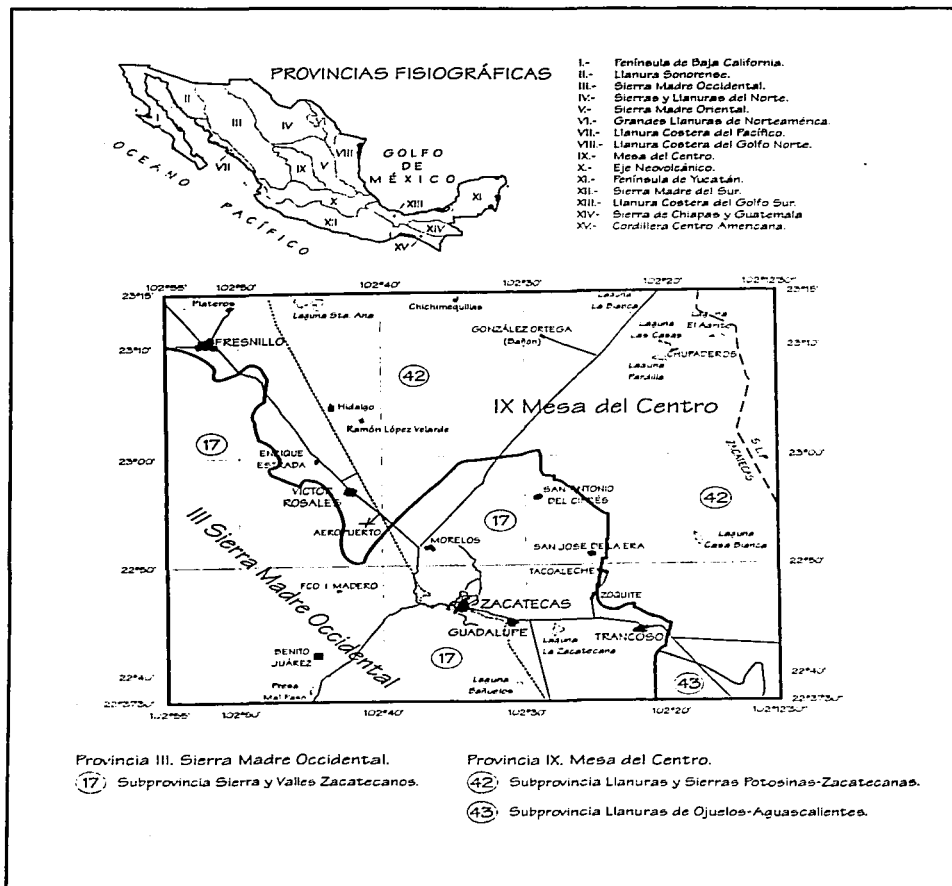


Figura 4 Marco fisiográfico del área de estudio. Tomado de INEGI (1981).

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

- Provincia De La Sierra Madre Occidental.

Este sistema montañoso se originó en el Terciario Inferior a Medio, con la extensión de los materiales volcánicos que la componen. Se le calculan espesores de 1,500 a 1,800 m, predominado las rocas ácidas e intermedias, que alcanzan elevaciones de 2,500 a 3,000 m.s.n.m. En el área de estudio sólo se presenta la subprovincia de Sierras y Valles Zacatecanos.

- Provincia De La Mesa Central.

Se caracteriza por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas, la mayoría de origen volcánico. El área de estudio es cubierta por la subprovincia de los Llanos y Sierras Potosino-Zacatecanos, que se divide en 1) Sistemas de lomeríos y bajadas del Norte, que rodean Fresnillo. 2) Un gran llano aluvial situado a 2,000 m.s.n.m. que se extiende desde Víctor Rosales, al Sur, hasta Cañitas de Felipe Pescador en el Norte. 3) En el lado Oriental del Estado la llanura rocosa Zacatecana-Potosina (a unos 2,000 m.s.n.m.), tiene un piso de caliche. En esta gran llanura hay pequeñas Sierras dispersas y franjas delgadas, alargadas y bajas llamadas "bajíos".

II.4 OROGRAFÍA

La región se caracteriza por abruptos sistemas montañosos orientados en la dirección Norte-Noreste, en donde el sistema principal se encuentra dividido en dos Sierras; al Norte la Sierra de Veta Grande y al Sur la Sierra de Zacatecas, ubicando la Ciudad de Zacatecas en la falla que divide a éstas dos. Rodeándolas se encuentran amplias llanuras interrumpidas por algunas Sierras dispersas, de menor elevación y de origen volcánico; en la parte Oriental se encuentra la Sierra del Tepezán y al Poniente las Sierras de Valdecañas, al Norte, y de Candelas, al Sur (Mapa 1).

La principal elevación del área es el Cerro de la Bufa, en la Ciudad de Zacatecas, con una altitud de 2,700 m.s.n.m. La altitud promedio de las Sierras de Zacatecas y Veta Grande es de 2,400 m.s.n.m., siguiendo en elevación la Sierra de Valdecañas (2,400 m.s.n.m.), la Sierra de Candelas (2,300 m.s.n.m.) y por último la Sierra del Tepezán (2,200 m.s.n.m.). Los valles que rodean estas Sierras varían en altitud de 2,100 m.s.n.m. en la parte Sur a 1,900 m.s.n.m. en la Laguna del Agrillo al Noreste del área.

11.5 HIDROGRAFÍA

En el área de estudio se encuentran las regiones hidrológicas de "Lerma-Santiago" (RH12), "Nazas-Aguanaval" (RH36) y "El Salado" (RH37) (INEGI, 1995), caracterizadas por tener una serie de cuencas cerradas con lagos y arroyos intermitentes. La red hidrográfica se compone de arroyos intermitentes, desintegrados y de poca densidad, con patrones de subparalelos a centrípetos. Los arroyos son de tipo torrencial y desaparecen en los valles aluviales.

Los únicos cuerpos superficiales de agua importantes en la región son, la Laguna La Zacatecana, la cual recibía las aguas negras de la Ciudad de Zacatecas, y la Presa Mal Paso, en el Sur del área. Existen pocas corrientes superficiales: el Río San Pedro, que nace al Sur de la Sierra de Zacatecas y se dirige al Sur del mismo Estado, y el Río de la Plata que sirve como desagüe de la Ciudad de Zacatecas, y que drena primero hacia la Ciudad de Guadalupe y luego hacia el Noreste con dirección a los poblados del Bordo de Buenavista y San José de la Era.

11.6 CLIMA

Para clasificar el clima de esta región se cuenta con cinco estaciones climatológicas de las que se han obtenido los climas puntuales que se muestran en la Tabla II.

Estación	Altitud (m)	Tipo de Clima
Fresnillo	2,189	BS1kw(w)(e)g
Trancoso	2,200	BS1kw(e)gw"
Zacatecas	2,450	BS1kw(e)g
Centro Agrícola Experimental V. Rosales	2,160	BS1kw(e)
Calera de V. Rosales	2,160	BS1kw(e)w"

Tabla II. Estaciones que se ubican en la zona de estudio con su respectivo clima, de acuerdo al sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1988).

De los datos de la tabla anterior se obtiene que el clima de la zona es semiárido extremo, con una temperatura media anual de 15°C, con una máxima de 35°C y 0°C como mínima, con una oscilación de las temperaturas medias mensuales de entre 7 y 14°C. Tiene un verano cálido de entre 15 y 18°C, que coincide con una marcada temporada de

lluvias, y una precipitación promedio anual de 430 mm, con valores extraordinarios de 900 mm como máximo y 325 como mínimo, así como una temporada ligera de lluvias en invierno.

II.7 VEGETACIÓN

En el área de estudio la mayor proporción de suelo es utilizada para la agricultura, predominando la de temporal sobre la de riego. Por esta razón, las comunidades vegetales han sido desplazadas a las zonas montañosas o a zonas donde por algún motivo la agricultura no se practica. INEGI (1981) agrupa a las comunidades vegetales del área en los siguientes tres tipos:

a) Pastizal Natural: Tiene una distribución altitudinal promedio de 2,085 m.s.n.m. Es explotado para el pastoreo extensivo de ganado vacuno. Sus elementos dominantes son pastos (*Stipa sp*, *Bouteloua sp*, *Lysiloma acapulcensis*, *Muhlenbergia sp*, *Stipa spp*), nopal (*Opuntia sp* y *Acacia sp*), mezquite (*Prosopis sp*).

b) Matorral: Se encuentra en elevaciones menores a los 2,000 m.s.n.m. en el extremo noreste del área de estudio, compuesto principalmente de mezquite (*Prosopis sp*), huizache (*Acacia sp*), nopal (*Opuntia*), nopal cardenche (*Opuntia sp*), uña de gato (*Acacia*), gobernadora (*Larrea sp*), biznaga (*Echinocactus sp*), y agrito (*Mahonia sp*). En esta comunidad se encuentran agrupaciones de nopales compuestas por nopal cardón (*Opuntia streptacantha*), nopal cardenche (*Opuntia sp*), nopal chaveño (*Opuntia sp*), nopal rastrero, (*Opuntia rastrera*), nopal duarznillo (*Opuntia leucotricha*), nopal cuijo (*Opuntia cantabrigiensis*) y gatúño (*Acacia*) principalmente.

c) Mezquital: Este tipo de vegetación se encuentra en las grandes llanuras aluviales, a unos 2,040 m.s.n.m. Está constituido principalmente por mezquite (*Prosopis sp*), uña de gato y huizachillo (ambos del género *Acacia*), nopal duarznillo (*Opuntia leucotricha*), nopal rastrero (*Opuntia rastrera*) y nopal tapón (*Opuntia robusta*).

En un corredor que se ubica en el Sur de la Sierra de Zacatecas, entre la Ciudad del mismo nombre y Calerilla, se encuentra la única zona que se considera erosionada en la región. La comunidad vegetal que está asociada a este proceso se compone de uña de gato (*Acacia sp*) y pastos (*Muhlenbergia sp*, *Bouteloua spp*, *Hilaria sp*).

II.8 POBLACIÓN Y CULTURA

El área de estudio cubre parcial o totalmente los municipios que se enlistan en la Tabla III, en donde además se muestra la población de cada uno de ellos y el porcentaje relativo al total del Estado de Zacatecas.

Clave	Municipio	Población	% Estatal
005	Calera	27,454	2.05
010	Fresnillo	176,885	13.24
013	Gral. E. Estrada	5,255	0.39
017	Guadalupe	107,523	8.05
032	Morelos	9,176	0.69
037	Pánuco	13,645	1.02
050	Vetagrande	6,969	0.52
051	Villa de Cos	32,502	2.43
056	Zacatecas	118,742	8.88
TOTAL		498,151	37.27

Tabla III. Población por municipio en 1995. Fuente: XI Censo General de Población y Vivienda 1990 y Censo de Población y Vivienda (INEGI, 1995).

Por lo anterior, la población de los municipios que cubre el área de estudio es de casi medio millón de personas, pero la población que realmente se encuentra en esta área es de entre 350 y 400 mil personas, de las que el 51.1% pertenecen al sexo femenino, predominando la población joven (el 51.13% de la población es menor a 25 años). La población urbana representa el 61.89% respecto a la rural que sólo representa al 38.10%.

Por su número de habitantes, las poblaciones más importantes son: Zacatecas, Fresnillo, Guadalupe, Calera de Víctor Rosales, General Enrique Estrada y Morelos, en donde se cuenta con todos los servicios. Salvo estas ciudades grandes, lo más frecuente son poblados de 100 a 1,000 habitantes, que cuentan la mayoría de la veces con los mínimos servicios.

El nivel escolar de la población es bajo, así mismo los indicadores de vivienda, salud, empleo y alimentación, lo que ubica a la entidad por debajo de la media nacional, que comparada con el resto de las entidades se encuentra entre las 10 de mayor pobreza relativa.

En el aspecto económico, el Estado de Zacatecas aportó en el año de 1993 el 0.81% del producto interno bruto nacional (PIB), en donde el PIB estatal se compone aproximadamente, de 40 % del sector agropecuario, 20% del industrial, 19% del comercial, 13% de la minería y 8 % del turismo.

Respecto a la actividad agrícola, es el primer productor nacional de frijol y de chile seco, participando con el 50 y 22% respectivamente. Es el segundo productor de guayaba y el tercero de sorgo forrajero con el 19% de la producción nacional en ambos productos. También es el tercer productor de uva y el quinto de durazno, además de maíz, alfalfa, cebolla y ajo. La participación de la ganadería al PIB estatal es del 8.8%, aportando bajos rendimientos e ingresos, a pesar de que más de la mitad de la superficie del Estado es apta para la ganadería.

El ramo industrial se concentra en los principales centros urbanos como Zacatecas, Fresnillo y Guadalupe, y recientemente en el corredor industrial de Calera. Los principales productos de la minería son Plata, Zinc, Plomo, Cobre y Oro en el grupo de minerales metálicos, y fosforita, wollastonita, fluorita, barita, caolín y bentonita en los no metálicos.

Seralo Yessim Guarneros.

III. Geología

III. GEOLOGÍA

Los primeros trabajos geológicos en Zacatecas fueron realizados en el año de 1884 por el Ingeniero Francisco Zárate, y aunque es una de las primeras regiones estudiadas en México, su complejidad ha sido fuente de fuertes controversias. Esta área es particularmente difícil en cuanto a su geología, "Esto significa que no está bien comprendida, porque la complejidad estructural del área oscurece la relación estratigráfica y algunas veces la naturaleza de la roca" (Silva-Romo et. al., 1997).

III.1 GEOLOGÍA REGIONAL.

De acuerdo con Campa y Coney (1983), el área de estudio se ubica en la porción Noreste del Terreno Guerrero, cerca del límite con el Terreno Sierra Madre, que se ubicaría más al Oriente. El Terreno Guerrero representa así un basamento integrado por elementos de terrenos fanerozoicos y precámbricos, cubierto por unidades más jóvenes de rocas metaígneas y metasedimentarias débilmente deformadas, que reflejan el desarrollo del arco magmático Cordillerano Jurásico, uno o más complejos de subducción que incluyen rocas paleozoicas, y una o más cuencas de transarco que incluyen corteza máfica y rellenos siliciclásticos. Este basamento se encuentra cubierto en su totalidad por sucesiones supercorticales marinas y continentales de edad Mesozoica y Cenozoica (Ortega-Gutiérrez, 1993; Sedlock, et al., 1993).

Dentro del Estado de Zacatecas, las rocas más antiguas son los Esquistos Caopas y la Formación Rodeo, se encuentran en la Sierra de San Julián en el Noroeste del Estado y fueron definidos por Rogers et al. como de edad Pérmica. Los primeros fueron descritos como una metarriolita con fuerte alteración hidrotermal y dinamometamorfismo, y la Formación Rodeo como una unidad que varía de filita a esquistos.

Para Sedlock et al. (1993), los Esquistos Caopas son un pórfido de cuarzo deformado que sobreyace y cambia gradacionalmente con las rocas volcánicas de la Formación Rodeo, las que pueden ser singenéticas a un plutón subvolcánico en el arco, fechándolas como del Triásico Tardío al Jurásico Temprano.

En el Sureste de Zacatecas y Oeste de San Luis Potosí, aflora la Formación Zacatecas de edad Carniana (Triásico Superior), que consiste en depósitos marinos de areniscas, lutitas, conglomerados y calizas fuertemente foliados, con plegamiento isoclinal, que fueron metamorfoseados bajo condiciones de esquistos verdes. Intercaladas con la unidad anterior se presentan las "Rocas Verdes", que son descritas como rocas volcánicas interestratificadas o intrusivos jóvenes; aunque en cortes menos deformados se observan pillow-lavas, grauwacas, lutitas, pedernales, tobas y calizas que fueron agrupadas previamente en el Triásico Zacatecas y ahora son nombradas como Formación Chillitos de edad Jurásico Tardío a Cretácico Temprano.

A partir del Jurásico se establecen los dominios sedimentológicos de las Secuencias Parrense y Mezcalera; el límite entre ambas se encuentra al Oriente del Estado de Zacatecas (Eguiluz, 1985). En el área de estudio la Secuencia Mezcalera está representada por las unidades del Jurásico Tardío al Cretácico Tardío, que son las Formaciones Chillitos, las Calizas Fortuna y Cerro Gordo e Indidura, mientras que la Secuencia Parrense es representada por la Formación Caracol.

Los depósitos de sedimentos tipo molasse continental, discordantes sobre las rocas mesozoicas plegadas, son la representación del Terciario Inferior; Estos conglomerados rellenan cuencas fluvio-lacustres endorreicas, y sobre éstos existe una cubierta volcánica inicial formada por tobas, riodacitas y andesitas del Oligoceno, que en algunas áreas preservaron momentáneamente de la erosión a las rocas mesozoicas.

Por último, existen algunas áreas con depósitos volcánicos tardíos, de carácter básico, ocurridos en el Mioceno terminal y Plio-Cuaternario, que cierran la evolución estratigráfica.

III.2 ESTRATIGRAFÍA

En el área de estudio se encuentran expuestas las secuencias mesozoica y cenozoica correspondientes a la Mesa Central (Mapa 2). La primera secuencia se encuentra constituida por tres conjuntos de unidades litoestratigráficas separadas por discordancias y/o rasgos estructurales. Al conjunto más antiguo, de edad Triásico Tardío-Jurásico Medio, pertenecen las formaciones Zacatecas y Nazas; al conjunto de edad Jurásico Tardío-Neocomiano pertenece la Formación Chillitos; y al conjunto más joven, de edad Albiano-Maastrichtiano, corresponden las Formaciones de Caliza Fortuna, Caliza Cerro Gordo, Indidura y Caracol.

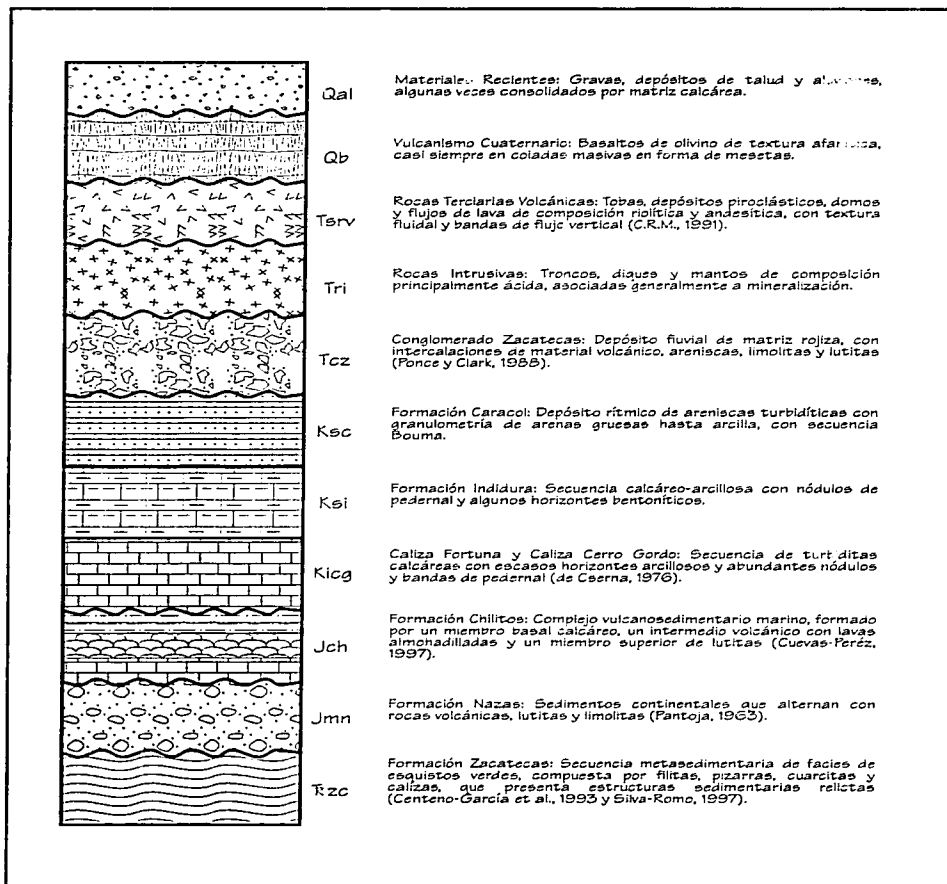


Figura 5 Columna estratigráfica propuesta para el área de estudio.

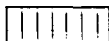
Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

La secuencia cenozoica está representada por formaciones volcánicas, troncos, diques y mantos de composición ácida y unidades sedimentarias continentales. La Figura 5 muestra la columna estratigráfica de la región así como los rasgos litológicos de las unidades, y la Tabla IV presenta la correlación de unidades.

ERA	PERIODO	ÉPOCA	EDAD	ÁREA DE ZACATECAS (Este Trabajo)	FRESNILLO, ZAC. (De Ceema, 1976)	CUENCA MESOZOICA DEL CENTRO DE MÉXICO
CENOZOICO	TERCIARIO	HOLOCENO		Depósitos Recientes	Aluvión	Aluvión
		PLEISTOCENO		Basaltos		
		PLIOCENO		Rocas Volcánicas		
		MIOCENO		Intrusivos Graníticos		Fm. Ahulchila
		OLIGOCENO				
		EOCENO		Cg. Rojo Zacatecas		
		PALEOCENO				
MESOZOICO	CRETÁCICO	TARDÍO	Maestrichtiano			
			Campaniano	Fm. Caracol	?	Fm. Caracol
			Santoniano			
			Coniaciano		Fm. Indidura	Fm. Soyatal Fm. Indidura
			Turoniano	Fm. Indidura	Caliza Cerro Gordo	Fm. Cuesta del Cura
		TEMPRANO	Senoniano	Caliza Cerro Gordo y Caliza Fortuna	Caliza Cerro Gordo	Fm. La Joya Fm. Tamaulipas Superior
			Albiano		Caliza Fortuna	Fm. Tamaulipas Inferior
			Aptiano	?	Fm. Plateros	Fm. Taraises
			Barremiano			
			Hauteriviense	?	Fm. Valdecañas	Fm. La Caja
	JURÁSICO	TARDÍO	Valanginiense	Fm. Chilitos	?	Fm. Zuloaga
			Berriasiano			
			Tithoniano			
			Kimmeridiano	?		
		MEDIO	Oxfordiano			
			Calloviano	?		
			Batoniense	Fm. Nazas		Fm. La Joya
			Bajociano	?		
	TEMPRANO	Toarciano				
		Pleisbaquiano				
Sinemuriano						
Hettangiano						
TRIÁSICO	TARDÍO	Norianense	Fm. Zacatecas	Fm. Chilitos	Fm. Zacatecas	
		Carniense		?	?	
	MEDIO	Ladiniano				
		Anisiano				
TEMPRANO	Eocriano			Fm. Guacamaya		



Contacto inferior no observado



Ausente por erosión o no depósito

Tabla IV. Tabla de correlación estratigráfica.

- Formación Zacatecas.

Definición. En el Noroeste de la Ciudad de Zacatecas, en el Arroyo del Bote (también llamado de la Calavera o de La Pimienta), fue identificada la primera secuencia del Triásico Tardío reconocida en México. La estudió originalmente Burckhardt y Scalia (1906), quienes la describieron como dos miembros de acuerdo a su grado de sericitización, separados entre sí por una discordancia. El miembro inferior se caracterizó como esquistos de sericitas de posible edad Paleozoica, y el miembro superior como esquistos silíceos y arcillosos, cuarcitas y Roca Verde del Triásico Tardío.

Carrillo-Bravo (1968), fue quien asignó el nombre informal a la Formación. McGehee (1976) caracterizó la secuencia como una unidad metasedimentaria con facies de esquistos verdes, de aproximadamente 1,000 m de espesor, reconociendo estructuras sedimentarias relictas como estratificación, huellas de corriente, gradación y probablemente estratificación cruzada. También reconoció transposición en la estratificación. Litológicamente la describió compuesta por filitas, esquistos, pizarras, cuarcitas, areniscas y calizas. Internamente esta secuencia presenta foliación, clivaje en dos direcciones y "king bands".

Esta secuencia fue nombrada como Filita la Pimienta por Ranson et al. (1982), que la caracterizaron por un metamorfismo de facies de esquistos verde, y la dividieron en ocho unidades.

Monod y Calvet (1992), consideraron a la secuencia como tres unidades triásicas y una posible cretácica. A la unidad más antigua la llamaron Formación "Pimienta" y la caracterizaron principalmente como volcánica y clástica. A la unidad intermedia la llamaron Formación "El Bote", y la definieron como una secuencia flysch de filitas negras y horizontes pardos de cuarcitas, de espesores de 2 a 10 cm, estimando su espesor total en 180 m (Monod, 1993). A la unidad triásica más joven la denominaron Formación "El Ahogado", y consiste en pizarras negras con algunos estratos gruesos de cuarcitas fuertemente tectonizados. A la unidad más joven de la secuencia, conocida como "Rocas Verdes", la consideraron basaltos con estructura almohadillada y diques, por lo que la nombraron "Pillow Lavas Zacatecas", de posible edad Cretácica.

Centeno-García et al. (1993) y Silva-Romo et al. (1997) consideran que las unidades triásicas anteriores corresponden a la Formación Zacatecas, y la caracterizan como una secuencia metasedimentaria de facies de esquistos verdes en donde se pueden reconocer

estructuras sedimentarias relictas como son la estratificación, marcas de oleaje, estratificación gradada y posible estratificación cruzada. Centeno-García *et. al* (1993) reportan una fuente continental del material.

Edad. La edad estimada para esta formación es del Triásico Tardío tomando como base a Burckhardt (1905), quien reportó fragmentos de crinoideos (Carniano). Esta unidad representa lo más antiguo que aflora en la zona y subyace a la Formación Nazas y Chilitos de manera discordante.

Distribución. Esta unidad se encuentra distribuida al Poniente de la Sierra de Zacatecas, al Norte de la Sierra de Veta Grande y en la Sierra del Tepozán.

- Formación Nazas.

Definición. La Formación debe su nombre a Pantoja A. (1963), y está constituida por una secuencia de sedimentos continentales que alternan con rocas volcánicas; "básicamente capas rojas continentales, de conglomerados que contienen fragmentos de rocas ígneas, lutitas y limolitas de color verde, gris y rojo, variando su espesor entre 155 y 300 m" (C.R.M., 1991). Monod y Calvet (1992) la llamaron Formación Pimienta, y la caracterizaron por abundante material volcanoclastico, areniscas y conglomerados bien estratificados, con un espesor de 300 m (Monod, 1993). Silva-Romo *et. al.* (1997), equipararon a la Formación Pimienta con la Formación Nazas.

Edad. La edad de esta Formación se ha asignado con base a su posición estratigráfica como posterior al Triásico Tardío, aunque se depositó en un tiempo indeterminado entre el Triásico Tardío y el Kimmeridiano, probablemente en el Jurásico Medio (Silva-Romo *et. al.*, 1997).

Distribución. Esta unidad está en contacto discordante con la Fm. Zacatecas, y se expone en un reducido afloramiento al Oeste de la Ciudad de Zacatecas, cercano al Cerro del Gato.

- Formación Chilitos. "Rocas Verdes" (Greenstones).

Definición. Los trabajos para caracterizar y definir el origen de estas rocas han causado controversia. Burkart (1833), las clasificó como una diorita, posteriormente Burckhardt y

Scalia (1906) propusieron la existencia de dos rocas verdes de la misma edad, clasificándolas como lavas espiliticas, que representaban erupciones submarinas dentro de sedimentos. Mapes (1949), la llamó andesita porfirítica y la describió como un tronco hipabisal de edad Terciaria (Eoceno).

Tomando los trabajos de Amador (1900), en las principales minas subterráneas del distrito, Pérez-Martínez *et al.* (1961), describieron la roca como un lacolito de naturaleza subvolcánica de edad Terciaria. Ranson (1975) colectó cristales de plagioclasa que sugerían un origen fuertemente intrusivo, y obtuvo edades radiométricas por el método de K-Ar de 74.3 millones de años (Cretácico Tardío, Campaniano).

Por otro lado, Servais *et al.* (1986), sugieren que las "Rocas Verdes" de Zacatecas corresponden con la secuencia de pillow-lavas de la Formación Chilitos (De Cserna, 1976), que son consideradas del Jurásico Tardío. Ponce y Clark (1988) clasifican a las "Rocas Verdes" de igual manera, sólo que las consideran de edad Cretácica Temprana. Por último, Monod y Calvet (1992) las consideran lavas submarinas de posible edad Cretácico Temprano, llamándolas "Pillow-lavas Zacatecas".

Cuevas-Peréz (1997) describe a la Formación Chilitos como un complejo vulcanosedimentario marino en el que dominan las rocas volcánicas, y la divide en tres miembros. El miembro basal esta formado de calizas, de color gris oscuro, en capas de muy gruesas a delgadas. El miembro intermedio es una sucesión volcánica, con lavas almohadilladas, intercalaciones de lutita café claro y pobremente silicificada, este miembro es lo que se conocía tradicionalmente como "Rocas Verdes". El miembro superior se compone de una sucesión de capas medianas a delgadas de lutitas silíceas gris oscuro.

Edad. La edad de la Formación es el límite Jurásico-Cretácico, asignada por la fauna, y descansa discordantemente sobre la Formación Zacatecas (Cuevas-Peréz, 1997).

Distribución. Esta Formación se encuentra distribuida en la Sierra de Yeta Grande, al Norte de la Sierra de Zacatecas, en los alrededores de Fco. I. Madero, y al Sur de Fresnillo.

- Caliza Fortuna y Caliza Cerro Gordo.

Definición. La Caliza Fortuna y la Caliza Cerro Gordo son secuencias de turbiditas calcáreas de color gris oscuro, con un espesor de 500 m la primera y 300 m la segunda.

Presentan estratificación de delgada a media, con escasos horizontes arcillosos y abundantes nódulos y bandas de pedernal negro. Ambas rocas tienen un contacto transicional entre sí, por lo que las describo como una sola unidad.

Edad. Las edades reportadas son Albiano Inferior y Superior, respectivamente (De Cserna, 1976). Este grupo se correlaciona con la Formación Cuesta del Cura (Ruvalcaba-Ruiz and Thompson, 1983), y sus relaciones estratigráficas en la base no están definidas en el área. Subyace concordante y transicionalmente con la Formación Indidura.

Distribución. Se encuentra distribuida en los lomeríos que rodean al poblado de Plateros, al Norte de la Sierra de Veta Grande, cerca del poblado de Los Números y más al Norte en el Cerro Las Pintas.

- Formación Indidura.

Definición. Kelly (1936), propuso el nombre de Formación Indidura para describir una secuencia de 30.5 m de espesor de calizas lajosas, lutitas y calizas laminadas que afloran en la parte sur de la Sierra de Santa Ana, a 19.3 km al Oeste-Suroeste de Delicias, Coah. Se caracteriza por una secuencia calcáreo-arcillosa, de color gris, de calizas arcillosas, lutitas calcáreas, lutitas y horizontes bentoníticos, que gradúan hacia la cima a calizas, lutitas calcáreas y areniscas, en estratos delgados, con nódulos de pedernal negro y abundantes fósiles.

Edad. Con base en el contenido fosilífero que presenta y en la edad que tiene la Formación Cuesta del Cura (a la cual sobreyace), se le asigna una edad correspondiente al Cenomaniano Tardío-Turoniano Temprano. Subyace concordante y transicionalmente con la Formación Caracol.

Distribución. Aflora únicamente al Noroeste de la Ciudad de Fresnillo.

- Formación Caracol.

Definición. Imlay (1937), propuso el nombre de Formación Caracol para describir una secuencia de 282 m de tobas devitrificadas intercaladas con lutitas y con algunos estratos de calizas, tal como aflora en la margen Oeste del Arroyo El Caracol, mismo que

drena la Sierra de San Ángel (Oriente de la Sierra de Parras, Coah.). En forma general esta unidad se encuentra constituida, principalmente, por una alternancia rítmica de lutitas y lutitas calcáreas, de color pardo rojizo y gris verdoso, de fractura astillosa y de limolitas, limolitas arenosas y areniscas calcáreas de grano fino a medio, color gris oscuro y verdoso.

Edad. Con base a su posición estratigráfica y al contenido fósil, Silva-Romo (1993), le asigna una edad Coniaciano-Maestrichtiano (Cretácico Superior).

Distribución. Los mejores afloramientos de la zona se encuentran en los lomeríos que hay entre las ciudades de Fresnillo y Plateros.

- Conglomerado Rojo Zacatecas.

Definición. Ponce y Clark (1988) lo caracterizan como un depósito fluvial conglomerático de matriz rojiza. Es un conglomerado poligenético, con fragmentos del tamaño de arenas y gravas que varían entre 0.2 y 20 mm, con cantidades menores de limos y arcillas y con cementante arcillo-calcáreo. Presenta intercalaciones de material volcánico y epiclástico, areniscas rojas, limolitas y lutitas rojas.

Edad. Se le asignó una edad del Paleoceno por su posición estratigráfica, porque esta unidad no contiene fósiles. Cubre discordantemente las formaciones mesozoicas de la Sierra de Zacatecas.

Distribución. Está expuesto al Poniente de la Ciudad de Zacatecas. Su espesor, aparentemente no es considerable, pero puede llegar a ser de más de 200 m.

- Roca Intrusivas Terciarias.

Definición. Las fases intrusivas incluyen cuerpos en forma de troncos, diques y mantos, que pertenecen principalmente al grupo ácido como granitos, granodiritas, monzonitas, tonalitas, sienitas y dioritas, con sus rocas hipabisales correspondientes, elongados principalmente al Noroeste. También se presentan chimeneas y zonas de brechas autoclásticas. Estas rocas están asociadas a mineralización.

Edad. Las dataciones radiométricas de los intrusivos de Fresnillo y Plateros por el método de K-Ar, indican edades de 29 y 30.8 m. a. respectivamente, ubicándolos en el Oligoceno. Estos intrusivos no afloran, pero son los únicos cuerpos que se han fechado.

Distribución. Los únicos cuerpos intrusivos que afloran, por efectos erosivos, se encuentran al Oriente de la Sierra de Zacatecas, cercanos al poblado de Zoquite.

- Rocas Terciarias Volcánicas.

Definición. Se presentan como tobas, depósitos piroclásticos, domos y flujos de lava que varían en composición de andesita a riolita. Estos cuerpos presentan un color rosa, textura afanítica, desvitrificación esferulítica y bandas de flujo vertical. En Fresnillo se han identificado riolitas con mineralización de topacio y estaño.

Edad. Las edades radiométricas que se han obtenido van desde 33 a 16 m. a., que ubica la actividad volcánica desde el Oligoceno Medio al Mioceno (C. R. M., 1991). En los alrededores de Zacatecas las riolitas fueron emitidas después del Conglomerado Rojo, además rocas porfíricas y riolíticas, atravesaron la secuencia mesozoica.

Distribución. Estas rocas son las que presentan mayor distribución en el área; se les encuentra en todas las elevaciones al Sur, desde la Sierra de Candelas hasta Trancoso, en la Sierra de Valdecañas, al Norte del Cerro Las Pintas, en la Laguna Santa Ana y en la Sierra de Zacatecas, en donde las riolitas llegan a presentar inclusiones amorfas de hematita y mica.

- Vulcanismo Cuaternario.

Afloran como derrames de basalto de olivino, de textura afanítica, color gris oscuro a negro, se presentan casi siempre en coladas masivas en forma de mesetas, en ocasiones, con desarrollo de diaclasas columnares, estructura fluidal o amigdaloides (C. R. M., 1991). Se interpreta que el magma fue emplazado en la superficie a través de fracturas, ya que no se ha reconocido ningún aparato volcánico en las áreas donde se exponen los basaltos.

Edad. Por su posición estratigráfica y su grado de alteración, se les asigna una edad pleistocénica.

Distribución. Se les encuentra en pequeños afloramientos en el área; al Poniente de la Presa Mal Paso, en el llano del Pardillo y en el poblado de Plateros.

- Depósitos Aluviales.

Comprenden materiales detríticos en proceso de consolidación, compuestos por gravas, depósitos de talud y aluviones que en algunas localidades están consolidados por una matriz calcárea. El material detrítico más grueso, generalmente se encuentra en las laderas de las montañas, y hacia los valles disminuye su granulometría hasta convertirse en gravas y arenas (C.R.M., 1991).

III.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las estructuras geológicas anteriores al Mesozoico temprano, en esta zona de Zacatecas, no son claras por la escasez de cortes para su estudio y la necesidad de mejor documentación. Burckhardt (1905), Mapes (1949) y Pérez-Martínez *et al.* (1961), consideran que la región ha experimentado dos períodos de metamorfismo. El evento más antiguo probablemente está relacionado a la deformación estructural del arco magmático Jurásico, y el segundo corresponde a la Orogenia Laramide.

La característica estructural dominante es de edad Terciaria. Las sierras de Veta Grande y Zacatecas son la expresión topográfica de estructuras de horst y graben, desarrolladas por un proceso extensivo de Noroeste-Sureste durante el Cenozoico; los límites de esta estructura se presentan como fallas normales curvadas, siendo la falla del Oeste más continua que la del flanco Este. Su trend es de N 8 a 15° E, con variaciones locales al NW. El desplazamiento total a lo largo de la falla es desconocido, pero no debe ser menor a 400 m basándose en consideraciones morfológicas.

III.4 GEOLOGÍA HISTÓRICA

Los estudios de Sm-Nd en gneiss de granulita, obtenidos de los xenolitos del vulcanismo cuaternario, indican que el basamento corresponde a una corteza continental Proterozoica, con edades modelo de 1,720 a 1,520 m. a. (Sedlock, *et al.* 1993). Este debió ser el sustrato sobre el que se acumuló un abanico submarino de edad Triásico Tardío, desarrollado en la

periferia de un área cratónica al Poniente del supercontinente de Pangea, en una margen continental de no colisión. De acuerdo con Silva-Romo (1993), la geometría, dimensiones y orientación del abanico es incierta, pero el material clástico tal vez procedió de la denudación de la franja Grenvilliana.

En el Triásico Tardío se inicia el rompimiento de la Pangea, que separaría Norteamérica de Sudamérica y África. También en el Triásico Tardío, y hasta el Jurásico Tardío, la litósfera oceánica subduce hacia el Este generando un arco magmático continental en el Suroeste de Norteamérica y Noroeste de Sudamérica -representado por el miembro volcánico de la Formación Nazas-, cerca del antiguo arco magmático Permo-Triásico. Es en este tiempo cuando se inicia el transporte tectónico de la secuencia Triásica.

Es durante el Jurásico Tardío (Oxfordiano) que la secuencia formada en el arco magmático continental y las rocas del abanico fueron dislocadas por el "megashear" Mojave-Sonora, y se inicio el depósito de las rocas volcanosedimentarias de la Formación Chilitos. Damon et al. (1984) identificaron al arco Jurásico, en el Noreste de Zacatecas, fechando su deformación estructural con edades de 140 a 200 millones de años, usando los métodos de Rb-Sr y K-Ar.

El reacomodo cortical dio como resultado el desarrollo del arco volcánico del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, y la invasión de la aguas tethysianas del Proto-Atlántico, con lo que se fueron estableciendo los dominios sedimentológicos del Mar Mexicano (Eguiluz, 1985). Los primeros sedimentos marinos se depositaron durante el Jurásico Superior y continuaron depositándose hasta el final del Cretácico; a éstos se les conoce como Secuencia Parrense, que se desarrolló como una zona de plataforma, produciendo sedimentos calcáreos. Al Poniente la sedimentación se distingue por una secuencia de turbiditas y depósitos volcanosedimentarios que se inició en el Jurásico Superior y continuó sin interrupción durante el Cretácico Inferior, y se conoce como Secuencia Mezcalera. Más al Poniente se encuentra la Secuencia de Santa María del Oro, compuesta por rocas volcano-clásticas con evidencias de metamorfismo regional.

Durante el Albiano-Cenomaniano continúa la trasgresión, cambia el régimen sedimentológico de clástico a calcáreo en condiciones de mar abierto, y se deposita la Formación Cuesta del Cura. En el límite Cenomaniano-Turoniano ocurre el aporte de volcanoclasticos, procedentes del arco volcánico occidental, registrados como horizontes bentoníticos en la Formación Indidura. La continua denudación del arco volcánico, como resultado de las primeras manifestaciones de la Orogenia Laramide, aportó terrígenos en

forma masiva originando la intercalación de turbiditas clásticas y calcáreas; pero un mayor aporte de material clástico, principalmente fragmentos de andesitas, terminó con la sedimentación calcárea, en forma de depósitos flysh y areniscas turbidíticas de la Formación Caracol. El gran volumen de terrígenos colmató la cuenca en una regresión provocada por el levantamiento y/o aproximación de los terrenos occidentales del arco volcánico. La región fue deformada por acortamiento en el sentido general Noreste (Silva-Romo, 1993).

A finales del Cretácico y principios del Terciario, la Orogenia Laramide se manifiesta por el emplazamiento de cuerpos intrusivos y un segundo período de deformación, que fue documentado por Ranson (1975) con una edad de 74.0 ± 1.5 millones de años por el método de K-Ar en muscovitas de las filitas esquistosas de la Formación Zacatecas. Esta deformación produjo durante el Eoceno el plegamiento de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y de la Sierra Madre Oriental. Una posterior fase distensiva ocasionó la dislocación de bloques en el sentido general Este-Oeste, que generó fallas con rumbo N-NE y N-NW, como es el caso de la Sierra de Zacatecas y Yeta Grande, y también dislocaciones de bloques en el sentido W-NW, como los que se interpretan en las cartas magnetométricas del C. R. M., en el fondo de los valles cubierto por material aluvial.

La deformación se acompañó de grandes abanicos aluviales y rellenó las nuevas cuencas con depósitos de tipo molasse continental. Durante el Oligoceno comienza a desarrollarse el vulcanismo calco-alcalino que representa la base de la serie volcánica ácida de la Sierra Madre Occidental. Para este período Ponce y Clark (1988), proponen el desarrollo de una estructura de caldera, en la parte Sur del distrito minero de Zacatecas.

Los esfuerzos compresivos en la dirección E-NE a W-SW cambiaron a distensivos, hace cerca de 30 m. a., provocando la inclinación de bloques y favoreciendo el emplazamiento de cuerpos graníticos, diques y vetas.

Durante el Plio-Cuaternario se produjo una nueva etapa de actividad volcánica, pero a diferencia de las anteriores, es de composición basáltica. Finalmente, el área quedó expuesta a los procesos erosivos que han acumulado grandes depósitos de pie de monte y aluviones que rellenan las cuencas y valles intramontanos.

IV. Hidrogeoquímica

IV. HIDROGEOQUÍMICA

Hn este capítulo analizaré, en primer lugar, el método de trabajo, que se refiere al análisis de la información recabada, para continuar con los puntos referentes al muestreo, los estudios de laboratorio, y la descripción de los datos hidrogeoquímicos obtenidos.

IV.1 PROGRAMA DE MUESTREO

El objetivo particular del muestreo hidrogeoquímico es obtener un conjunto de datos que sean suficientes y representativos para caracterizar la composición y el comportamiento del agua subterránea.

Para determinar los aprovechamientos de agua que se muestrearían, se fijaron los siguientes criterios:

- 1) Sólo se muestrearían pozos, ni norias ni la galería filtrante,
- 2) Se preferirían los aprovechamientos de agua potable sobre los de riego,
- 3) La distancia entre aprovechamientos muestreados sería de por lo menos 5 km, y
- 4) Se seleccionarían los pozos que tuvieran historia piezométrica, registro litológico, nivel de brocal, análisis químicos previos y características constructivas.

Desafortunadamente esta noble intención se enfrentó a la realidad de que cuando existe la información de los aprovechamientos, ésta no se encuentra sistematizada, o no es confiable, o sencillamente no corresponde con la información de sus mapas base. Bajo estas circunstancias fueron seleccionados 63 aprovechamientos, de los cuales el acuífero de Calera tendría el mayor número con 29, Chupaderos 24, y los acuíferos de Benito Juárez y Guadalupe-Bañuelos 5 cada uno. Todos los aprovechamientos son pozos, salvo el número 22 del acuífero de Guadalupe-Bañuelos, que es una noria, y fue muestreado a petición del personal de CNA. Las actividades del muestreo comprendieron la ubicación e identificación del aprovechamiento, la toma de muestras de agua subterránea, la lectura simultánea de sus parámetros físicos y químicos, y la medición de los niveles piezométricos. La fecha del muestreo se fijó para el mes de junio, en la época en que los aprovechamientos agrícolas trabajan continuamente y antes de la temporada de lluvias.

IV.2 ACTIVIDADES DE CAMPO

El trabajo de campo se realizó de lunes a viernes y ocasionalmente en sábado. La cantidad de aprovechamientos muestreados varió de 6 en el mejor día, hasta sólo uno, promediando 4 pozos al día. Las actividades que se realizaron rutinariamente para los 65 aprovechamientos muestreados, se hacían en el orden siguiente.

Ubicación. La primera labor, y la más difícil, era localizar los aprovechamientos. Ésto puede sonar trivial, pero la ubicación que se informaba en los mapas de aprovechamientos de CNA no coincidió en muchos casos con la realidad; ya sea porque la clave de identificación había cambiado, porque se encontraban mal ubicados en el mapa, o porque el aprovechamiento estaba cerrado y extrañamente tenía datos de operación recientes. En muchos de estos casos se resolvió seleccionar otro aprovechamiento, ya sea por la información disponible de éstos o por su cercanía. Con el pozo seleccionado ya localizado, se determinaba su posición por medio de un receptor GPS (Garmin 45).

Lectura de los niveles piezométricos. Cuando se encontraban los aprovechamientos en operación se medía primero el nivel dinámico, se obtenían las muestras y se detenía su operación durante 30 minutos; después de este tiempo se medía el nivel estático. En el caso contrario, primero se medía en nivel estático, se iniciaba el bombeo y después de 15 minutos se obtenía la muestra y se medía el nivel dinámico.

Toma de muestras. Las muestras se tomaron en envases de polietileno, previamente lavados y posteriormente cerrados con tapa y contratapa. Para las muestras de elementos mayores se utilizaron recipientes de 2 litros. Las muestras para análisis de metales se tomaron en envases de 250 ml, y se acidificaron con ácido nítrico de alta pureza hasta un pH menor a 2. Aleatoriamente, se duplicó el 30% de las muestras para evaluar la confiabilidad del estudio. Todas las muestras se almacenaron en hieleras a 4°C, hasta la Ciudad de México.

Medición de parámetros físicos y químicos. En el sitio de muestreo se midió temperatura, pH y conductividad eléctrica con un potenciómetro, marca Conductronic, que cuenta con diferentes electrodos para estas determinaciones. La alcalinidad se midió titulando con ácido sulfúrico hasta un pH de 4.5.

IV.3 ESTUDIOS DE LABORATORIO

Los Laboratorios ABC analizaron las muestras por elementos mayores, y determinaron además sólidos totales disueltos (STD) y dureza. El Instituto de Ingeniería de la UNAM analizó el 30% de las muestras duplicadas por elementos mayores y todas las muestras de metales. Como un método para determinar los errores analíticos y por lo tanto la validez de los datos, los resultados entregados por los laboratorios fueron verificados por medio del balance de iones (Custodio y Llamas, 1976), calculando el error de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{error(\%)} = 200 \cdot \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Los resultados se aceptaron como buenos cuando la relación entre la conductividad eléctrica y el error calculado se encuentra de acuerdo con la Tabla V. Los resultados con errores superiores fueron desechados, y sólo fueron tomados en cuenta 55 análisis, que corresponden a los aprovechamientos del Mapa 3.

	50	200	500	2,000	>2,000
	30	10	8	4	4

Tabla V. Relación entre conductividad y error admisible.

IV.4 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS

Los parámetros fisicoquímicos que se midieron son la Temperatura (θ), Conductividad Eléctrica (C), Alcalinidad y Potencial Hidrógeno (pH), medidos en el campo y Sólidos Totales Disueltos (STD) y Dureza (D), medidos en el laboratorio. Esta información se muestra en la Tabla VI, para las determinaciones en el valle Oriental, y en la Tabla VII, para el valle Occidental.

Otros parámetros como son la densidad, color, turbidez, potencial óxido-reducción (Eh), gases disueltos y las demandas química y bioquímica de oxígeno, por ejemplo, no fueron medidos.

Número de Aprovechamiento	Temperatura (°C)	Cond. Eléctrica (µS/cm)	pH	STD (mg/l)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Dureza (mg CaCO ₃ /l)
514	27.7	430	7.1	340	233	155.82
516	25.1	418	7.1	300	190	131.81
532	26.7	374	7.35	308	171	107.31
693	25.8	303	7.4	308	153	131.81
840	26.4	440	7.4	388	160	230.79
27	25.1	446	7.6	384	176	127.89
76	25.9	438	7.6	376	145	116.10
114	24.2	376	7.52	320	152	86.73
324	25.6	427	7.5	376	165	118.58
375	25.8	421	7.5	388	177	123.48
616	26.9		7.3	360	180	195.02
626	21.1	326	7.3	268	143	101.43
656	23.8	396	7.47	340	160	153.37
662	24.6	520	7.3	424	165	163.17
665	23.7	478	7.2	376	170	148.47
740	26.1	433	7.65	336	184	164.15
746	22.5	466	7.4	388	200	167.58
794	23.3	357	7.6	324	146	98.00
802	25.9	306	7.65	304	125	83.3
813	21.0	359	7.4	292	154	162.19
876	27.8	342	7.5	204	143	102.41
959	27.4	395	7.3	304	160	84.77
1135	28.5	429	7.5	348	182	196.49
1190	26.2	344	7.5	284	146	100.45
1194	26.1	259	7.89	212	120	106.33
1222	26.4	769	7.65	668	354	120.54
AZCA 10-301	25.5	340	7.55	316	144	88.69
AZCA 13-76	23.2	350	8.02	312	179	134.75
AZCA 32-10	25.6	528	7.71	356	194	179.34
PIMIENTA	25.7	684	7.2	580	162	324.87

Tabla VI. Parámetros fisicoquímicos del valle Oriental, que cubre los acuíferos de Calera y Benito Juárez.

- Temperatura (0).

La variación estacional de la temperatura generalmente no se percibe por debajo de los primeros 10 ó 20 m de la superficie, por lo que la temperatura de las aguas subterráneas es constante y ligeramente inferior a la temperatura ambiente.

Número de Aprovechamiento	Temperatura (°C)	Cond. Eléctrica (µS/m)	pH	STD (mg/l)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Purezza (mg CaCO ₃ /l)
10	23.0	1051	7.46	1028	119	476.68
36	29.6	467	7.94	364	163	63.7
70	25.8	845	7.42	723	189	247.94
96	33	465	7.76	332	195	130.18
116	29.1	470	7.8	372	175	133.28
1026	27.6	511	8.19	532	221	239.58
1064	33.7	538	7.5	396	180	172.48
1134	26.7	746	7.27	612	243	179.34
1155	28.0	729	7.47	732	174	363.09
1252	29.7	474	7.93	368	165	77.71
1310	24.3	516	7.56	804	175	394.51
1368	25.8	548	8.1	384	204	148.5
1391	27.8	542	7.77	380	174	228.69
1417	28.3	493	7.8	380	172	103.95
1482	28.1	751	7.77	560	214	301.95
1549	27.5	543	7.83	484	232	164.34
1615	26.4	638	7.52	552	193	351.45
1672	30.8	621	7.8	440	172	251.86
1795	30.7	469	7.69	324	175	131.81
5162	26.1	672	7.88	608	183	186.69
ZQ-01	25.3	410	7.65	332	177	181.79
22	22.5	639	7.92	516	265	209.38
57	29.0	465	7.72	408	189	113.85
147	30.3	433	7.77	324	188	128.7
219	35.4	540	7.26	420	177	178.2

Tabla VII. Parámetros físicoquímicos del valle Occidental, que cubre los acuíferos de Chupaderos y Guadalupe Bañuelos.

Las temperaturas medidas varían en general de los 21 a los 28°C, pero en el valle Occidental se encuentran 4 focos de actividad hidrotermal, con temperaturas mayores a los 30°C. Estas manifestaciones se encontraron en Chaparrosa (1064), Los Pozos (1672), al Este de Tacoaleche (96) y en el sistema San Ramón (147 y 219).

- Conductividad Eléctrica (C).

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para transmitir electricidad. Esta capacidad aumenta con la temperatura y el contenido de iones disueltos. Las unidades de medida son los microsiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o los micromhos/cm ($\mu\text{mhos}/\text{cm}$). La conductividad varía de 100 a 2,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para aguas dulces a 18°C, hasta 100,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para salmueras.

La conductividad eléctrica, referida a 25°C, aumenta en el área, de Oeste con 250, a Este con valores 1,051 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en la comunidad de El Porvenir (10), con tres máximos relativos en el centro y el Norte del valle Oriental.

- Alcalinidad.

La alcalinidad es la capacidad de una sustancia para neutralizar ácidos, y mide la cantidad de aniones hidrolizables. Ya que prácticamente toda la alcalinidad del agua natural es producida por los iones de carbonato y bicarbonato, sus valores se expresan como una concentración equivalente de CaCO_3 , obtenido por la adición de porciones equivalentes de CO_3^{2-} y HCO_3^- expresando la suma como mg/l de CaCO_3 .

La lecturas de alcalinidad se mantuvieron entre 150 y 200 mg/l de CaCO_3 , en gran parte del área, aumentando hacia el Norte hasta valores de 350, y hacia el Sur con máximos de 233 y 265 mg/l de CaCO_3 .

- Potencial Hidrógeno (pH).

El pH refiere la actividad (la concentración efectiva) de los iones de hidrógeno en el agua, expresado como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad del H^+ en moles por litro. A un pH de 7, la actividad de H^+ es de 10^{-7} mol/l, y la solución es considerada neutral. Las aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8.5. Los valores que se midieron en el campo son de 7.1 a 8.02, distribuidos homogéneamente, con un máximo muy ligero en el Norte del valle Oriental, de 8.19.

- Sólidos Totales Disueltos (STD).

Es el contenido total de sales disueltas en el agua subterránea como resultado de disolución de los minerales que constituyen las rocas y el suelo por los que ésta circula. Su concentración en agua subterránea puede variar de 100 a más de 100,000 mg/l, aunque el contenido en el agua de mar es de 34,000 mg/l. De acuerdo a Hem (1970), el agua subterránea se puede clasificar de acuerdo a la Tabla VIII.

Clasificación	STD, (mg/l)
Fresca	< 1,000
Moderadamente Salina	1,000 a 10,000
Muy Salina	10,000 a 35,000
Salmuera	> 35,000

Tabla VIII. Clasificación del agua subterránea de acuerdo a los STD (Hem, 1970).

En el valle Occidental los valores son de 290 a 400 mg/l, salvo al Norte, donde se tiene un pozo con 668 mg/l, y el pozo Pimienta, en la porción centroeste del valle, con 580 mg/l. En el valle Oriental los valores son más altos; los valores mínimos son de 370 mg/l, con dos máximos relativos de 620 en el Norte y 804 mg/l en la parte central, y un valor máximo de 1,028 mg/l en el aprovechamiento 10 de El Porvenir. En general, en el área el agua es "Fresca" o "Dulce", salvo el aprovechamiento 10 en el cual es "Moderadamente Salina".

- Dureza (D).

La dureza es la capacidad del agua para reaccionar con el jabón y es una escala de la acumulación de incrustaciones en los contenedores en donde el agua es almacenada o transportada. Se define como la suma de las concentraciones de los iones de Ca y Mg expresados como mg/l de CaCO_3 , y es llamada dureza total. Si la dureza como CaCO_3 excede la alcalinidad del agua como CaCO_3 , la diferencia entre las dos es llamada Dureza no carbonatada. El agua para uso doméstico no debe contener más de 80 mg/l de dureza total, aunque agua de acuíferos con calizas y yesos pueden contener 200 o 300 mg/l de dureza. La Tabla IX muestra la clasificación del agua de acuerdo a su dureza.

Tipo de Agua	Blandas	Mod. Duras	Duras	Muy Duras
	Dureza, mg/l de CaCO ₃			
Hern (1970)	0-60	61-120	121-180	> 180
Sawyer, et al. (1994)	0-75	76-150	150-300	> 300

Tabla IX. Clasificación del agua subterránea de acuerdo a la Dureza.

Las aguas se clasifican de Moderadamente Duras a Duras, en ambos valles, aumentando su dureza a medida que se acercan a la Sierra de Zacatecas o a la Sierra del Tepozán. Los aprovechamientos muestreados cercanos al flanco Oriental de la Sierra de Zacatecas presentan aguas Muy Duras, de hasta 395 mg/l, al igual que en El Porvenir (10), que presentó una dureza de 476 mg/l.

IV.5 ANIONES

Los aniones que se determinaron en el laboratorio fueron Cloruros (Cl⁻), Sulfatos (SO₄²⁻), Carbonatos (CO₃²⁻) y Bicarbonatos (HCO₃⁻), Nitratos (NO₃⁻), Fosfatos (PO₄⁻³) y Fluoruros (F⁻). Además se determinó Boro (B) y Arsénico (As), pero en las muestras los valores fueron indetectables. Un anión importante que no fue determinado es el sílice, que es un buen indicador del terreno atravesado por las aguas subterráneas y aún mejor de la temperatura del acuífero. Los valores de las determinaciones analíticas se pueden observar en las Tablas X y XI para los valles Occidental y Oriental, respectivamente.

- Cloruros (Cl⁻).

Características Químicas. Las fuentes principales de cloro en las aguas subterráneas son las evaporitas, las aguas connatas salinas, el lavado de sedimentos de origen marino y el agua de mar. Las rocas ígneas pueden contribuir con una pequeña cantidad de cloro. Una fuente de éste elemento en climas secos son las lechadas de cloruros que se acumulan en las capas superiores del suelo.

Concentraciones. En el agua dulce es de 10 a 250 mg/l, mientras que en el agua de mar es de 18,000 a 21,000 mg/l, saturándose a los 220,000 mg/l. El cloro es un elemento esencial y para consumo humano se limita su cantidad, porque más de 300 mg/l confieren un sabor salado al agua.

Número de Aprovechamiento	Cloruros (Cl)	Sulfatos (SO ₄)	Bicarbonatos (HCO ₃)	Nitratos (NO ₃)	Fosfatos (PO ₄)	Fluoruros (F)
Norma	250 mg/l	250 mg/l	800 mg/l	10 mg/l	0,1 mg/l	1,5 mg/l
514	6.28	11.16	284.20	4.45	0	1.224
516	8.64	18.11	231.73	5.19	0	1.802
532	8.11	22.19	208.60	4.79	0.27	1.708
693	13.61	33.05	186.64	4.61	0	1.098
840	43.19	57.27	195.18	10.86	0	0.645
27	13.09	52.27	214.70	8.26	0.75	1.229
76	22.51	39.28	176.94	9.12	0.32	0.947
114	7.33	23.02	185.42	8.42	0.64	1.203
324	8.64	39.05	201.28	4.98	0.77	0.958
375	10.99	41.53	215.86	7.54	0.91	0.885
616	12.57	38.27	219.52	10.86	0.11	0.635
626	6.8	16.74	174.44	9.25	0.72	0.973
656	14.92	32.05	195.18	9.96	0	1.213
662	22.25	65.48	201.28	11.05	0	1.000
665	20.16	54.74	243.99	12.45	0	1.192
740	10.73	32.72	224.41	6.81	0.54	0.885
746	14.13	36.72	243.93	11.36	0.72	1.427
794	7.59	16.89	178.10	4.57	0.59	1.031
802	5.76	20.54	152.47	5.06	0.7	1.031
813	9.68	21.91	187.86	12.05	0.47	0.896
876	10.21	13.54	174.44	11	0.73	1.01
959	7.33	23.17	195.13	5.43	0.52	1.286
1135	25.65	26.44	221.96	5.86	0.09	0.468
1190	8.11	18.71	178.10	6.59	0	1.114
1194	3.66	7.82	146.37	3.86	0.73	0.927
1222	20.16	65.29	419.65	18.04	0.31	2.07
AZCA 10-301	7.33	18.86	175.66	4.9	0.64	1.182
AZCA 13-76	4.7	11.33	218.30	3.29	0.68	0.578
AZCA 2-10	11.78	32.89	236.61	6.42	0.72	0.671
PIMIENTA	67.02	128.51	197.62	6.97	0	0.687

Tabla X. Resultado de los análisis químicos de aniones del valle Occidental, que cubre los acuíferos de Calera y Benito Juárez.

Distribución. En el valle Occidental las concentraciones de cloruros (Mapa 4) aumentan de Oeste a Este y menos sensiblemente de Sur a Norte, con valores por lo general menores a 25 mg/l, salvo en los aprovechamientos 840 con 43.19 mg/l, Pimienta con 67.02 mg/l, y 1135 con 25.65 mg/l. En el valle Oriental las concentraciones son mayores, ubicándose los

máximos cerca de la Sierra de Zacatecas, con 136 mg/l, y en el aprovechamiento 10, del poblado El Porvenir, con una concentración de 129.85 mg/l.

Número de Aprovechamiento	Cloruros (Cl ⁻)	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	Fluoruros (F ⁻)
Norma	250 mg/l	250 mg/l	800 mg/l	10 mg/l	0.1 mg/l	1.5 mg/l
10	129.85	386.11	145.15	20.44	0.16	1.684
36	16.5	39.49	198.84	14.85	0	2.083
70	57.59	220.59	230.51	9.34	0.68	2.109
96	13.61	32.88	237.83	9.7	0.01	1.036
116	14.14	47.33	213.48	6.78	0.16	0.708
1026	38.48	133.8	269.55	13.66	0.15	0.963
1064	17.02	52.3	219.52	14.24	0.16	0.734
1134	29.58	144.82	296.40	13.09	0.13	1.088
1155	88.75	147.64	212.26	41.74	0.15	0.562
1252	17.8	45.51	201.28	16.52	0.24	1.493
1310	136.13	75.25	213.48	17.47	0.01	0.416
1368	9.94	82.14	248.81	5.85	0.11	0.729
1391	53.93	36.18	212.26	18.25	0.18	0.64
1417	18.32	50.74	209.82	14.6	0.16	1.25
1482	112.57	64.39	261.01	11.89	0.01	0.974
1549	28.01	56.06	282.98	7.2	0.2	0.531
1615	75.66	103.1	235.39	33.9	0.18	0.729
1672	62.04	44.9	209.82	11.31	0.09	0.286
1795	12.82	39.75	213.48	6.6	0.16	0.63
5162	60.47	141.39	223.18	12	0.16	0.854
ZQ-01	7.07	18.11	215.86	32.96	0.13	0.645
22	27.75	59.69	323.25	28.37	0	1.493
57	11.52	33.72	230.51	7.46	0.16	2.092
147	9.68	20.18	229.29	5.8	0.22	1.345
219	29.32	40.66	215.86	7.52	0.18	3.151

Tabla XI. Resultado de los análisis químicos de aniones del valle Oriental, que cubre los acuíferos de Chupaderos y Guadalupe Bañuelos.

- Sulfatos (SO₄²⁻).

Características Químicas. Los sulfatos son formados por la oxidación de la pirita y otros sulfuros ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias. El más importante aporte de sulfatos se encuentra en los sedimentos evaporíticos como el yeso, la anhidrita

y el sulfato de sodio. En regiones áridas lechadas de sulfatos de las capas superiores del suelo pueden percolar al agua subterránea.

Concentraciones. Los sulfatos en el agua para beber no deben ser más de 250 mg/l; las aguas con mayores concentraciones, llamadas selenitosas, no quitan la sed, tienen sabor amargo y tienen propiedades laxantes. Altas concentraciones de sulfatos son perjudiciales para las plantas y en centenares de mg/l perjudican al hormigón y al concreto.

Distribución. La distribución del ion sulfato se muestra en el Mapa 5, en donde se puede apreciar que sólo un aprovechamiento tiene contenidos por encima de la norma; este es el número 10 con 386.11 mg/l. Se presentan también algunos máximos relativos a ambos lados de la Sierra de Zacatecas y en el Norte del valle Oriental, donde las concentraciones son relativamente mayores.

- Carbonatos (CO_3^{2-}) y Bicarbonatos (HCO_3^-).

Características Químicas. Las fuentes de carbonatos y bicarbonatos incluyen el CO_2 atmosférico, el producido por la biota del suelo o por la actividad de bacterias reductoras sobre los sulfatos en formaciones profundas y por varios minerales y rocas carbonatadas. Estos iones confieren alcalinidad al agua y no son oxidables ni reducibles en aguas naturales, aunque precipitan con mucha facilidad como CaCO_3 .

Concentraciones. El ion bicarbonato (HCO_3^-) varía de 50 a 300 mg/l en aguas dulces, llegando a veces hasta los 800 mg/l. Concentraciones de más de 200 mg/l no son comunes en el agua subterránea y ocurren cuando se produce CO_2 dentro del acuífero. El agua de mar tiene alrededor de 100 mg/l. El ion carbonato (CO_3^{2-}) está en concentraciones menores que el bicarbonato, y si el pH es menor de 8.3 se considera cero. En aguas alcalinas naturales con $\text{pH} > 8.3$ puede haber hasta 50 mg/l, y 1 mg/l en agua de mar. No es nocivo, pero las aguas bicarbonatadas sódicas son malas para el riego, debido a la fijación del Na en el terreno y la creación de un medio alcalino.

Distribución. El contenido de carbonatos (CO_3^{2-}) en el agua subterránea del área muestreada es cero porque el pH que se encontró en los aprovechamientos es menor a 8.3. El patrón de distribución de los bicarbonatos (HCO_3^-) no se corresponde con algún otro ion; las concentraciones se encuentran entre 140 y 400 mg/l, con el valor máximo de 419.65 mg/l en el aprovechamiento 1194, y otros máximos relativos en el valle Oriental de 296.40 y

323.25 mg/l en los aprovechamientos 1064 y ZQ-01, respectivamente. Las concentraciones en el valle Occidental son menores, presentando las concentraciones mínimas en el centro del valle (146.37 mg/l) y en el pozo Pimienta (145.15 mg/l).

- Nitratos (NO_3^-).

Características Químicas. Aunque algunas rocas volcánicas pueden contener nitrógeno, la principal fuente de nitratos en agua subterránea proviene de la biósfera. El nitrógeno molecular de la atmósfera es transformado en materia orgánica por bacterias fijadoras de nitrógeno, de la especie *Rhizobium*, que viven en nódulos relacionados simbióticamente con las raíces de plantas, principalmente leguminosas. También los abonos agrícolas, la descomposición de materia orgánica y la contaminación industrial y ganadera son fuentes importantes de este ion. Los nitratos forman sales muy solubles que difícilmente precipitan, manteniéndose estable aún en medios reductores; puede pasar a N_2 o NH_4^+ y excepcionalmente a NO_2^- . El suelo vegetal suele fijar los nitratos.

Concentraciones. Normalmente la concentración de nitratos en agua subterránea es de 0.1 a 10 mg/l, pero en aguas contaminadas puede llegar a 200 mg/l. El agua de mar tiene cerca de 1 mg/l. La mayor concentración de nitratos para agua de consumo humano debe ser 10 mg/l. Con mayores niveles de nitratos los niños pueden padecer metamoglobinemia (cianosis), y en menores de cuatro meses puede producir la muerte.

Distribución. Los nitratos tienen concentraciones de 3.88 a 18.04 mg/l en la porción Occidental, con tendencia a aumentar hacia el Norte; las concentraciones en el Oriente van aumentando hacia la porción central del valle, hasta un valor máximo de 41.74 mg/l, según se muestra en el Mapa 6.

- Fosfatos (PO_4^{3-}).

Características Químicas. Aunque algunos fosfatos son sales solubles, la mayoría lo son muy poco y precipitan generalmente como $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$. La apatita es el principal mineral que contiene fósforo.

Concentraciones. La concentración de fósforo en las aguas subterráneas es menor de 1 mg/l, pudiendo llegar a 10; no es tóxico.

Distribución. Las concentraciones que se determinaron son muy bajas, incluso cero; las mayores concentraciones se encuentran en el centro del valle Occidental, y cerca de la Sierra del Tepozán, en el valle Oriental.

- Fluoruros (F⁻).

Características Químicas. Las fuentes de fluoruros del agua subterránea son minerales como fluorita, apatito, ciertos anfíboles, la criolita en rocas ígneas y los fluoroespatos en las rocas sedimentarias. La solubilidad de este ion es limitada, y contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua.

Concentraciones. Varía de 0.1 a 1 mg/l, pudiendo llegar a 10 e inclusive a 50 mg/l en aguas muy sódicas con poco Ca, y en zonas áridas. El agua de mar tiene entre 0.6 y 0.7 mg/l. Cierta cantidad de flúor en el agua para beber es benéfica porque reduce la caída de los dientes; en concentraciones elevadas mancha los dientes (fluorosis), por lo que la concentración de flúor recomendada en agua para beber es de 1.4 a 2.4 mg/l, dependiendo de cuánta agua se ingiera.

Distribución. Las mayores concentraciones se encuentran en los aprovechamientos 219, 36 y 70 del Sur del valle Oriental, y en los aprovechamientos 1222 y el 516 en el extremo Norte y Sur, respectivamente, del valle Occidental. Las concentraciones anteriores se encuentran por arriba del 1.5 mg/l que se ha tomado como norma. En el valle Oriental los fluoruros disminuyen hacia el Norte, mientras en el valle Occidental los valores menores se encuentran cercanos a las Sierras de Valdecañas y de Veta Grande, aumentando hacia el centro del valle y hacia los extremos Norte y Sur (Mapa 7).

IV.6 CATIONES

Sólo se analizaron cinco cationes: Sodio (Na⁺), Potasio (K⁺), Calcio (Ca⁺⁺), Magnesio (Mg⁺⁺) y Hierro Total (Fe⁺⁺, Fe⁺³). No se analizó el Litio (Li), que se puede utilizar para la diferenciación hidrogeoquímica por su movilidad y carácter conservativo, pues muestra la intensidad de la interacción agua-acuífero y el tiempo relativo de residencia del agua en el acuífero. Las Tablas XII y XIII presentan las determinaciones analíticas de los cationes para los valles Occidental y Oriental, respectivamente.

Número de Aprovechamiento	Sodio (Na ⁺)	Potasio (K ⁺)	Calcio (Ca ⁺⁺)	Magnesio (Mg ⁺⁺)	Hierro Total (Fe ⁺⁺ , Fe ⁺⁺⁺)
Norma	200 mg/l	12 mg/l	200 mg/l	125 mg/l	0.3 mg/l
514	38.45	4.55	59	0.232	0
516	45.17	5.16	54.7	0.315	0
532	40.19	9.16	37.68	0.632	0
693	24.81	21.16	44.2	4.033	0
840	20.39	4.74	47.02	26.02	0.091
27	48.92	16.12	33.36	15.81	0.009
76	52.59	8.95	41.45	4.204	0.098
114	40.82	12.97	35.27	3.05	0.003
324	40.88	11.79	36.19	12.66	0.003
375	45.1	9.89	31.88	15.94	0.003
616	20.28	4.76	21.97	32.89	0
626	27.71	7.38	41.61	2.93	0.003
656	22.21	13.83	39.38	14.51	0
662	43.21	13.1	31.36	18.54	0
665	46	13.33	55.28	7.45	0.054
740	35.29	11.27	20.45	28.2	0.182
746	39.65	9.46	38.85	25.7	0.003
794	32.33	9.44	40.56	3.346	0.0164
802	27.83	10.69	35.44	1.59	0.003
813	13.12	10.57	50.21	9.24	0.031
876	27.67	11.96	37.95	6.08	0.002
959	41.42	8.49	28.75	2.616	0.003
1135	17.59	3.55	26.46	34.27	0
1190	30.44	8.56	33.65	1.489	0
1194	11.19	4.5	40.39	6.22	0.003
1222	160.8	14.25	22.29	18.22	0.8356
AZCA 10-301	34.57	11.53	30.4	2.312	0.003
AZCA 13-76	16.94	9.83	38.79	8.48	0.003
AZCA 32-10	25.15	6.74	27.39	37.59	0.0043
PIMENTA	23.61	6.15	83.64	35.03	0

Tabla XII. Resultado de los análisis químicos de cationes del valle Occidental, que cubre los acuíferos de Calera y Benito Juárez.

- Sodio (Na⁺).

Características Químicas. Se deriva principalmente del ataque a feldespatos, feldespatoides y otros silicatos de las rocas cristalinas, así como de los productos del intemperismo (minerales arcillosos) de otros materiales. Otra fuente importante es el

lavado de sedimentos de origen marino, la mezcla con agua de mar o aguas con napas saladas.

El Na⁺ puede ser transportado por la percolación de agua de los niveles superiores del suelo, y la precipitación pluvial que ha estado expuesta a los efectos de la contaminación. Localmente se debe a la disolución de rocas evaporíticas, y a la contaminación urbana y rural.

Número de Aprovechamiento	Sodio (Na ⁺)	Potasio (K ⁺)	Calcio (Ca ⁺⁺)	Magnesio (Mg ⁺⁺)	Hierro Total (Fe ⁺⁺ , Fe ⁺³)
Norma	200 mg/l	12 mg/l	200 mg/l	125 mg/l	0.3 mg/l
10	87.16	24.34	162.5	36.1	0.5172
36	74.05	8.04	26.65	4.73	0.0072
70	95.7	18.81	79.9	15.52	4.776
96	50	11.81	35.69	11.81	0.039
116	50.43	9.36	27.33	18.25	0.003
1026	87.53	4.96	27.72	40.44	0.003
1064	40.71	13	32.98	25.02	0.003
1134	122.7	7.94	32.34	27.91	0.0784
1155	48.41	9.66	61.98	62.83	0.018
1252	63.68	16.25	27.42	4.177	0.003
1310	36.66	4.39	50.44	64.77	0.003
1368	72.88	4.13	22.46	22.93	4.754
1391	33.29	6.48	39.6	33.51	0.003
1417	63.25	14.52	29.51	9.487	0.0416
1482	64.4	8.57	42.43	56.87	0.0658
1549	78.81	8.01	25.24	25.89	0.1675
1615	36.24	7.19	56.05	54.39	0.0844
1672	33.91	3.98	30.19	47.4	0.027
1795	48.59	7.25	24.96	18.65	0.003
5162	102.4	7.52	34.71	28.72	0.074
ZC-01	14	11.29	51.41	15.17	0.1193
22	60.7	20.06	79.43	14.63	0.003
57	55.91	6.66	44.04	3.082	0.0588
147	42.54	10.44	45.43	3.892	0.003
219	42.64	5.42	60.44	7.065	0.003

Tabla XIII. Resultado de los análisis químicos de cationes del valle Oriental, que cubre los acuíferos de Chupaderos y Guadalupe Bañuelos.

Seralc Yussim Guarneros.

Concentraciones. Es un ion muy soluble y muy difícil de precipitar, por lo que se ve afectado fácilmente por el cambio de base. Se presenta generalmente asociado al ion Cl^- , y a SO_4^{2-} . Su concentración en agua dulce es de 1 a 150 mg/l, en el agua de mar es de 10,000 mg/l. En las salmueras naturales puede tener hasta 100,000 mg/l; un límite que rara vez se sobrepasa es el de 500 meq/l ($\approx 110,000$ mg/l). Concentraciones elevadas de Na son perjudiciales para las plantas porque reducen la conductividad hidráulica del suelo, especialmente si los contenidos de Ca y Mg son bajos. También aumentan la corrosión en las calderas y deterioran las torres de enfriamiento. Más de 65 mg/l de Na pueden causar problemas en la manufactura del hielo.

Distribución. La distribución del sodio presenta un patrón bien definido, como se puede ver en el Mapa 8, en donde los valores de Sur a Norte primero disminuyen, para luego aumentar en esa dirección. Las concentraciones se encuentran por debajo de los 100 mg/l, salvo tres aprovechamientos que se encuentran en la porción Norte.

- Potasio (K^+).

Características Químicas. El potasio es menos común que el sodio en las rocas ígneas, pero más abundante en las rocas sedimentarias. Se deriva del ataque a minerales como los feldespatos potásicos, micas, arcillas y localmente de minerales evaporíticos como la silvita y la carnalita. En ocasiones procede de la contaminación industrial, minera y agrícola, y en pequeñas cantidades del agua de lluvia. Es un catión muy soluble y difícil de precipitar, es afectado fácilmente por el cambio de base y es absorbido de forma irreversible en las arcillas (paso de montmorillonita a illita). Por ésta razón, a pesar de la mayor abundancia de K^+ las aguas naturales tienen mayores concentraciones de Na^+ , excepto en la aguas muy diluidas.

Concentraciones. Las aguas dulces tienen concentraciones de 0.1 a 10 mg/l, aumentan en las aguas termales a más de 100 mg/l y rara vez llegan a los 100,000 mg/l como en las salmueras. El agua de mar tiene alrededor de 400 mg/l. El potasio, un elemento vital para la vida, en concentraciones mayores a las normales no es nocivo para el consumo humano, aunque es corrosivo en las calderas.

Distribución. En la porción Occidental las concentraciones de potasio evolucionan de 21.16 mg/l, en el aprovechamiento de Benito Juárez (693), a valores más bajos en la parte central y Sur del valle; aumentan nuevamente en el Norte y Noroeste. En el valle Oriental se

presenta un patrón similar: en el Sur se tienen las mayores concentraciones en la noria de San Jerónimo (22) con 20.06 mg/l y en el pozo El Porvenir (10) con 24.34 mg/l, y disminuyen hacia la parte centroccidental del valle, hasta 3.98 mg/l.

- Calcio (Ca⁺⁺).

Características Químicas. El calcio es uno de los principales cationes de las aguas subterráneas, deriva de la alteración de anfíboles, plagioclasas, piroxenos y minerales arcillosos, de rocas ígneas y metamórficas. Como la solubilidad de estos minerales es baja, el agua que circula por estas rocas es baja en Ca⁺⁺ y alta en STD. En rocas sedimentarias, el calcio proviene de la calcita, aragonita, dolomita, yeso y anhidrita. Por otro lado, el carbonato de calcio es uno de los principales agentes cementantes en areniscas y otros materiales detríticos. Las aguas que circulan por calizas y otros depósitos calcáreos son generalmente duras y pueden resultar una solución saturada de calcita. Las fuentes de calcio en materiales aluviales y no consolidados son los minerales de las rocas y fragmentos de suelo en esos depósitos. Generalmente presenta gran afinidad con los iones CO₃⁻ y HCO₃⁻. Como CaCO₃ precipita y se disuelve con facilidad al variar el pH o la presión parcial del CO₂.

Concentraciones. El contenido en aguas dulces es de 10 a 250 mg/l, en aguas selenitosas de 600 mg/l, y en el agua de mar de 400 mg/l. Salmueras de Cl₂Ca pueden llegar a concentraciones de 50,000 mg/l. No es nocivo, pero confiere dureza a las aguas y produce incrustaciones en depósitos y tuberías.

Distribución. En el Mapa 9 se muestra que en el valle Occidental el valor máximo lo alcanza el pozo Pimienta con 83.64 mg/l, las concentraciones disminuyen tanto hacia el Sur como hacia el Norte, con un incremento en el aprovechamiento 813 (al SE de Fresnillo) de 50.2 mg/l. En el valle Oriental los valores mayores son 162.5 y 79.43 mg/l, en El Porvenir (10) y en San Jerónimo (22) respectivamente. A partir de estos valores disminuyen las concentraciones hasta la porción centro Norte del valle, con 22.46 mg/l.

- Magnesio (Mg⁺⁺).

Características Químicas. El magnesio en el agua subterránea proviene primariamente de la descomposición de las rocas ígneas, derivado de los ferromagnesianos como olivino,

piroxenos, anfíboles y micas oscuras; a partir de las rocas metamórficas se deriva de la serpentina, clorita y montmorillonita, y de la dolomita, magnesita y minerales arcillosos en rocas sedimentarias.

El agua subterránea contiene relativamente pequeñas cantidades de magnesio, excepto cuando está en contacto con dolomías, evaporitas o rocas ultrabásicas. Químicamente se comporta como el calcio, aunque se disuelve más lentamente, es más soluble y más difícil de precipitar.

Concentraciones. Generalmente menos de 50 mg/l en agua para consumo humano, y 1,200 mg/l en agua de mar, llegando hasta 57,000 mg/l en salmueras. Concentraciones de más de 200 mg/l tienen propiedades laxantes y dan un sabor amargo al agua; contribuye a la dureza y con un pH elevado puede producir $Mg(OH)_2$, que es incrustante.

Distribución. La distribución del magnesio tiene un patrón muy peculiar (Mapa 10); las mayores concentraciones se encuentran en los aprovechamientos cercanos a la Sierra de Yeta Grande, principalmente del lado Oriental con valores de hasta 64.77 mg/l, y disminuyen a medida que uno se aleja de ésta. Este patrón continúa hasta El Porvenir (pozo 10), que registra un aumento en la concentración hasta 36.1 mg/l.

- Hierro (Fe^{++} , Fe^{+3}).

Características Químicas. El hierro se encuentra ampliamente distribuido en toda la corteza terrestre en minerales de rocas cristalinas como piroxenos, anfíboles, micas, magnetita y olivino, además en las rocas sedimentarias se encuentra como piritita. La química del hierro es relativamente compleja, pues puede existir en los estados de valencia +2 y +3, además forma complejos organometálicos que complican más su comportamiento. La forma común del hierro en el agua subterránea es ion ferroso (Fe^{+2}), que es soluble, cuando se expone a la atmósfera el ion Fe^{+2} se oxida al estado férrico Fe^{+3} , el cual es insoluble y precipita como hidróxido férrico $Fe(OH)_3$. Por otra parte, algunos microorganismos favorecen la formación de Fe^{+2} , mientras otros utilizan la energía de paso de Fe^{+2} a Fe^{+3} en sus procesos vitales y dan lugar a precipitados gelatinosos; estos crecimientos bacterianos se favorecen en la obscuridad y en aguas con exceso de O_2 y abundante CO_2 .

Concentraciones. En las aguas subterráneas, el hierro en estado ferroso Fe^{+2} tiene concentraciones menores a 10 mg/l, y de 0.5 mg/l en aguas aireadas. Con pH entre 5 y 8 rara vez llega a 50 mg/l, y en aguas muy ácidas se puede llegar a 100 mg/l de $Fe^{+2} + Fe^{+3}$. Las aguas alcalinas sólo tienen pequeñas cantidades de Fe^{+2} o $Fe(OH)^+$. Concentraciones de más de 0.5 mg/l son molestas o nocivas en general, 5 mg/l son tóxicos para las plantas. Produce manchas de herrumbre y depósitos orgánicos fangosos y es molesto en las aguas industriales, pues puede producir incrustaciones. La máxima cantidad de hierro recomendada en agua para consumo humano es de 0.3 mg/l, principalmente por razones de sabor y por la herrumbre que deja.

Distribución. Salvo tres muestras, todos los análisis resultaron menores a 0.17 mg/l. La muestra 1222 con 0.84 mg/l, que se encuentra al norte del valle Occidental, y las muestras 1368 y 70, ambas con 4.784 mg/l, ubicadas en la porción centronorte y centrosur del valle Oriental, respectivamente. En general, muchos de los datos obtenidos son cero, pero en la parte Oriental del área existen valores que no presentan un patrón determinado.

V. Hidrogeología

V. HIDROGEOLOGÍA

El área que se estudió, queda comprendida en tres regiones hidrológicas (Figura 6). Ocupa la mayor parte del área la región hidrológica "El Salado" (RH37), en su porción correspondiente a la cuenca Fresnillo-Yesca (E); la región hidrológica "Lerma-Santiago" (RH12) cubre la porción Sur del área, que incluyen las cuencas de Río Bolaños (K), Río Juchipila (J) y Río Verde Grande (I); y la región hidrológica "Nazas-Aguanaval" (RH36), correspondiente a la cuenca Río Aguanaval (D), que sólo cubre una pequeña porción al Oeste de Fresnillo (INEGI, 1995).

V.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Las características hidráulicas más importantes que las rocas deben tener para funcionar como acuíferos son su capacidad de almacenar y permitir la circulación de agua a través de ellas. Tomando en cuenta el comportamiento similar de las rocas respecto a su porosidad, conductividad hidráulica y transmisividad, se han clasificado en unidades geohidrológicas de alta (A), media (M) y baja (B) conductividad hidráulica (Mapa 11).

- Unidad de conductividad hidráulica alta (A).

Dentro de esta unidad geohidrológica están incluidos los depósitos clásticos continentales del Cuaternario, constituidos por aluvión, depósitos de pie de monte y de bolsón. Los aluviones presentan una conductividad hidráulica de media a alta debido al hecho de que están formados por clastos mal clasificados, constituyendo acuíferos freáticos "colgados" de escaso potencial si su espesor es reducido, pero cuando éste es considerable generalmente llegan a representar la fuente principal de agua subterránea. Su recarga ocurre tanto en la superficie propia del valle como en el contacto con las rocas que conforman las Sierras aledañas. Los depósitos de pie de monte están conformados por materiales granulares mal clasificados, por lo que poseen una alta conductividad hidráulica que facilita la infiltración del agua de lluvia, alimentando a los acuíferos granulares regionales. Esta unidad es la más importante desde el punto de vista geohidrológico ya que en ella se localiza la mayor parte de los aprovechamientos del agua subterránea y debido al espesor considerable que alcanza en las cuencas y planicies.

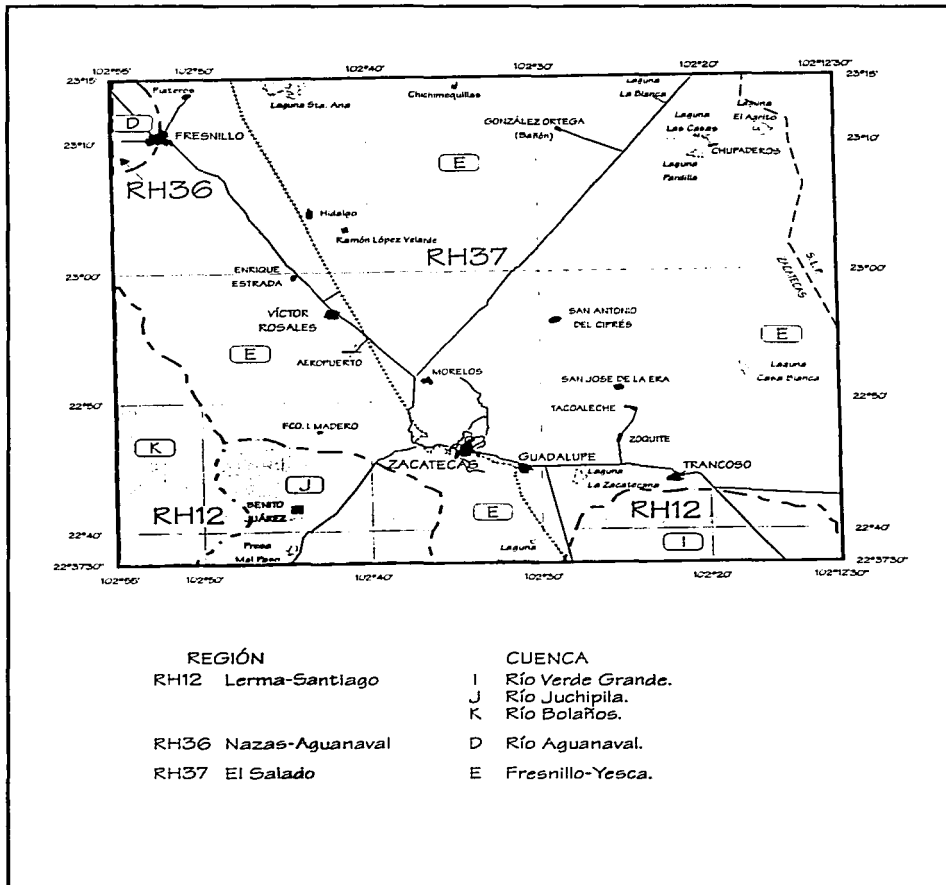


Figura 6 División hidrológica del área de estudio. Tomado de INEGI (1995).

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

- Unidad de conductividad hidráulica media (M).

Dentro de esta clasificación se incluyen las rocas que pertenecen a las Formaciones Nazas, Caliza Cerro Fortuna y Caliza Cerro Gordo (Cuesta del Cura), Indidura y Caracol, presentan conductividad hidráulica secundaria por fracturamiento y disolución que permite la infiltración. Debido a la poca extensión de sus afloramientos pueden llegar a constituir acuíferos locales. El Conglomerado Rojo de Zacatecas pertenece a esta unidad, lo mismo que los derrames basálticos cuaternarios que presentan una estructura vesicular y conductividad hidráulica secundaria por fracturamiento.

Las rocas ígneas extrusivas, principalmente las riolitas, tobas, ignimbritas y otros depósitos piroclásticos terciarios, presentan conductividad hidráulica secundaria debido a su alto grado de fracturamiento. Representan la unidad de mayor área de exposición y funcionan como zona de recarga, cuando se localizan en las partes más altas, facilitando la infiltración del agua hacia zonas más profundas en las que las características de conductividad hidráulica y porosidad permiten el almacenamiento. Dependiendo de su posición estratigráfica, respecto a la unidad de conductividad hidráulica alta y de su grado de fracturamiento, pueden funcionar también como acuitardos y, ocasionalmente, como los principales sistemas acuíferos.

- Unidad de conductividad hidráulica baja (B).

En esta unidad geohidrológica se incluyen las rocas metamórficas de la Formación Zacatecas, aunque presentan fracturamiento moderado, las fracturas se encuentran rellenas de arcilla. Generalmente funcionan como barreras impermeables o como basamento del acuífero. El metamorfismo de bajo grado que afecta a la secuencia completa reduce aún más la conductividad hidráulica, llegando a constituir fronteras impermeables al flujo subterráneo. Localmente la Formación Chilitos llega a presentar conductividad hidráulica secundaria por fracturamiento, sobre todo cuando en su litología predominan las rocas volcánicas. Las rocas intrusivas pertenecen a esta misma unidad ya que generalmente funcionan como fronteras impermeables al flujo. Cuando se encuentran fracturadas e intemperizadas llegan a presentar conductividad hidráulica alta, capaz de almacenar agua y susceptible de explotarse por medio de norias.

V.2 DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS

La Gerencia Estatal de CNA en el Estado de Zacatecas ha definido cuatro principales acuíferos en el área de estudio, que son los abastecedores de agua en esta zona. Éstos son Calera, Chupaderos, Guadalupe-Bañuelos y, definido más recientemente, Benito Juárez. La distribución de estos acuíferos se puede observar en la Figura 7.

- Acuífero de Calera.

El acuífero de Calera es el más importante desde el punto de vista de su explotación, cubre un área de 1730 km² con 1475 aprovechamientos inventariados, extrayendo un total de 117 Mm³/año. Está constituido por sedimentos granulares de origen lacustre que varían su tamaño de arcillas y limos a arenas y gravas con intercalaciones de material piroclástico y derrames lávicos de composición riolítico andesítica. Tiene un espesor entre 50 y 450 m, determinado por métodos geofísicos y por perforación. La transmisividad del acuífero es de 0.10 a 16.6 x 10⁻³ m²/s. Para el año de 1993 los niveles estáticos fluctuaron entre los 20 y los 40 m para la parte centro Norte del acuífero, hacia los flancos Oriental y Occidental la profundidad fue de hasta 60 m y para la porción Sur varió entre 10 y 80 m. El flujo preferencial en este acuífero es de Sur a Norte.

- Acuífero de Chupaderos.

De menor extensión que el anterior, el acuífero de Chupaderos tiene una superficie de 1326 km², formado por sedimentos granulares que varían desde arcillas hasta gravas, con espesores alrededor de 200 m en los flancos del valle y de 400 en la parte central, se localiza un cuerpo riolítico en la parte inferior del acuífero. Se han inventariado 861 aprovechamientos de los que se extraen 110 Mm³/año. La transmisividad varía de 0.25 a 19.0 x 10⁻³ m²/s, con un promedio de 4.5 x 10⁻³ m²/s. La profundidad del espejo de agua para el año de 1990, en la región Septentrional fue de 20 a 40 m. En los extremos Oriental y Occidental se localizaron depresiones que alcanzaron 60 y 80 m respectivamente, producidas por la concentración del bombeo. Al Sur del acuífero la profundidad fue de 10 m, aprovechados mediante una gran cantidad de norias, y aumentó lateralmente hasta los 30 m. La dirección de movimiento del acuífero es de Sur a Norte.

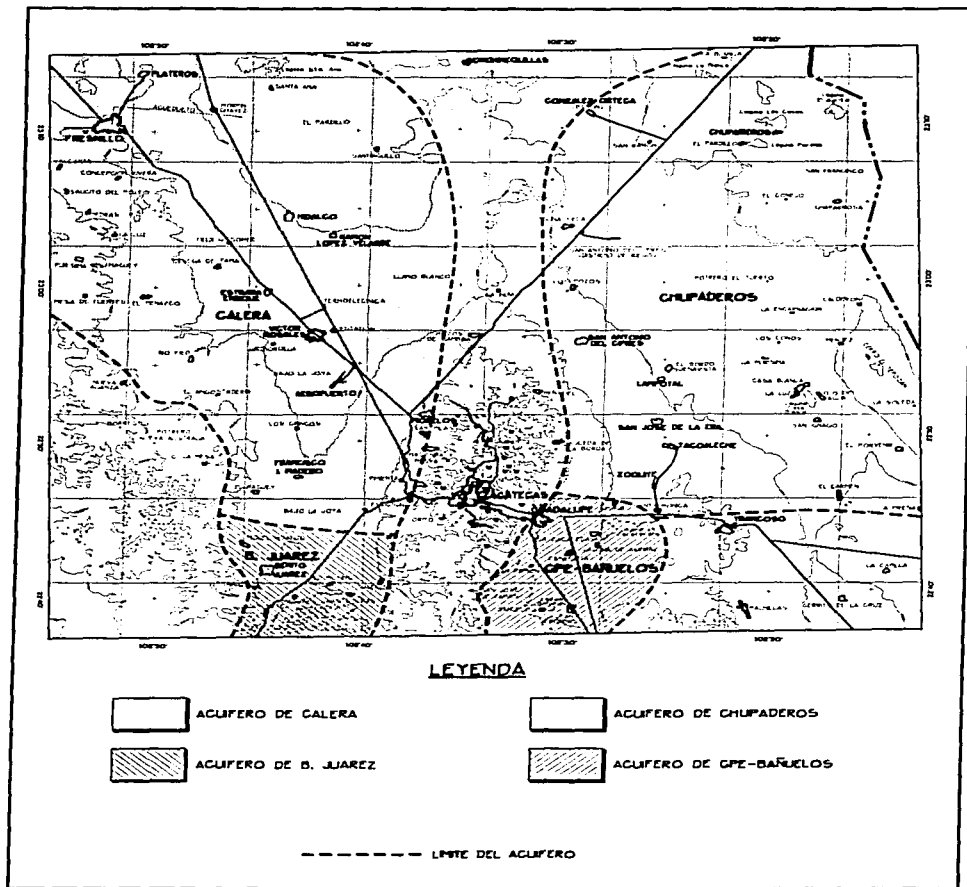


Figura 7 Distribución geográfica de los acuíferos postulados por la CNA.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

- Acuífero de Guadalupe-Bañuelos.

Con una superficie de 300 km², en el acuífero de Guadalupe-Bañuelos se han inventariado 200 aprovechamientos (en su mayor parte norias) mediante los que se extrae un volumen de 8 Mm³/año, principalmente para el suministro de agua potable de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe. Está formado por materiales granulares de compactación variable, en ocasiones con matriz arcillosa, y rocas riolíticas fracturadas que en conjunto no sobrepasan los 100 m de espesor. La transmisividad varía de 1.5 a 12 x 10⁻³ m²/s, con un promedio de 7.1 x 10⁻³ m²/s. Este acuífero se encuentra rodeado por Sierras constituidas por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas de naturaleza impermeable que funcionan como fronteras hidrológicas que delimitan al valle. La profundidad al nivel estático varió, para el año de 1990, de 5 a 40 m, incrementándose en el sentido Este-Oeste desde las inmediaciones de la Laguna La Zacatecana hasta el poblado de Laguna Honda. Controlada por la topografía, la profundidad al Noreste se incrementa de 50 a 80 m, desde Bañuelos hasta la zona montañosa, con profundidades de entre 80 y 990 m en el Sur, entre los poblados de Perales y Viboritas. La tendencia general del flujo subterráneo es de Sur a Norte, en la porción Norte del acuífero y Sureste en la porción Sur.

- Acuífero de Benito Juárez.

Por ser de reciente delimitación, el acuífero de Benito Juárez no está caracterizado completamente, pero perteneció a la parte Sur del acuífero de Calera. En la Tabla XIV se presenta un resumen del número de los aprovechamientos de agua subterránea en la región, clasificados de acuerdo con su uso.

Acuífero	Agrícola	Municipal Doméstico	Pecuario	Industrial	Total
Calera	1,295	108	54	18	1,475
Chupadero	738	41	78	4	861
Gra-Bañuelos	120	64	15	1	200
Benito Juárez	No existen datos de este acuífero				
Totales	2,153	213	147	23	2,536

Tabla XIV. Número de aprovechamientos de agua subterránea, clasificados por su uso, inventariados en el área de Zacatecas-Guadalupe. Modificado de Castañón (1994).

V.3 PIEZOMETRÍA

El nivel del agua subterránea varía con el tiempo, de acuerdo a las características hidráulicas del acuífero y su historia de explotación. Para evaluar esta variación y determinar el patrón cinemático del acuífero, durante el muestreo se midieron los niveles dinámicos y estáticos de los aprovechamientos.

- Profundidad al Nivel Estático.

Dentro del muestreo que se realizó, se ubicaron los aprovechamientos muestreados y se midió el nivel estático y dinámico. La información que se obtuvo muestra que en el acuífero de Calera la profundidad al espejo de agua es de 45 m en su parte Sur, hacia el centro de 80 m, al Sur de Ramón López Velarde; y hacia el Poniente de 120 m en Purísima del Maguey, mientras que al Norte la profundidad es de 25 m, y se observa la menor en el poblado de Morfín Chávez.

En el acuífero de Chupaderos la profundidad al nivel estático es mínima en su parte Sur, en un corredor que va E-W paralelo a la carretera, en donde se localiza gran número de norias. La menor profundidad medida fue de 17.70 m en el aprovechamiento ZQ-01, y aumenta hacia los bordes del acuífero a 40 m. En la parte central del acuífero la profundidad se encuentra entre los 60 y 90 m.

La profundidad a la que se encontró el nivel estático en el acuífero de Benito Juárez fue de entre 40 y 50 m en los flancos Este y Oeste, mientras en el flanco Sur fue de 15 m y en el Norte del acuífero fue de 90 m.

La única información que se obtuvo del acuífero de Guadalupe-Bañuelos es que la profundidad en el pozo de la Laguna de Bañuelos es de 102.10 m, y disminuye en la noria de San Jerónimo a 21.0 m y a 6.20 m en la Galería Filtrante de La Zacatecana.

- Evolución del Nivel Estático.

Para determinar las fluctuaciones en el nivel estático se estudió la información piezométrica del periodo de 1980 a 1995, obtenida por la Gerencia Estatal de CNA, y se comparó con la obtenida durante el periodo de muestreo. Esta información mostró que en

el acuífero de Calera hay un abatimiento del nivel estático de 5 m, desde Morfín Chávez en el Norte, hasta Morelos en el Sur, y en la parte central del acuífero de 10 m, como resultado de una extracción intensiva por parte de los agricultores y de las baterías de agua potable que abastecen a las ciudades de Fresnillo y Zacatecas. En el acuífero de Benito Juárez el abatimiento va de 4 a 10 m en donde se ubican las baterías de extracción para uso público. Los abatimientos medios anuales en estas dos zonas son en promedio de 0.5 m por año.

En el valle Oriental, el acuífero de Chupaderos presenta abatimientos de 5 m en general, con un cono de abatimiento de 15 m en el poblado de El Garabato. Otro abatimiento importante se da en el Sur del acuífero, en la zona de las norias, donde ha sido de 2 m. El abatimiento medio anual para la porción centro-Norte del acuífero es de 0.5 a 1.5 m, pero su parte Sur no ha sufrido cambios importantes, ya que su abatimiento anual es de 10 cm.

El acuífero de Benito Juárez no mostró variaciones importantes en la profundidad al nivel estático. Cerca de los poblados de San Ramón, Cieneguita y Las Mangas se observa un abatimiento de 1 m, al igual que al SE de San Jerónimo. El abatimiento medio anual es esta zona fue de 5 cm.

VI. Discusión

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De la información recopilada en la CNA y la obtenida durante el muestreo, se puede observar una clara diferencia entre las características geohidrológicas de los acuíferos de Chupaderos y Guadalupe-Bañuelos, en el valle Oriental, y de Calera y Benito Juárez, en el valle Occidental. Estas características son a su vez reflejo de una estructura más compleja que la determinada anteriormente. Ésto es particularmente evidente en el acuífero de Chupaderos, donde se encuentran mayores concentraciones iónicas, manifestaciones hidrotermales, y un patrón muy particular del nivel estático.

Tradicionalmente esta área ha sido asociada a la Secuencia Parrense, por lo que se ha incluido en su columna estratigráfica a la Formación Zuloaga subyaciendo a la Formación La Caja, caracterizadas por ser depósitos marinos (Castañón, 1994; C. R. M., 1991; SARH, 1983). De acuerdo a mi interpretación, el área corresponde a la Secuencia Mezcalera, por lo que las unidades anteriores no forman parte de la región, y han sido confundidas con la Formación Chilitos o la Formación Zacatecas. Ésto ha originado que se proponga a las Formaciones calcáreas como de conductividad hidráulica media, siendo de baja, y como las responsables del aporte de magnesio a las aguas subterráneas, generando un modelo de circulación en rocas calcáreas, cuando no es así.

En la paleotopografía sepultada que interpreta Nájera-Garza (1997), a partir de los mapas aeromagnéticos del C. R. M., se encuentra que el fondo de las fosas tectónicas no es una superficie continua. Las discontinuidades que presenta tienen una orientación W-NW, y por su morfología las interpreto como fallamiento normal, dividiendo a cada valle en tres cuencas, como se observa en el Mapa 2. Esta paleotopografía es el basamento de los acuíferos, donde las perforaciones que lo han alcanzado lo identifican con las Formaciones Zacatecas y Chilitos y material volcánico riolítico.

Asociadas a cuerpos de riolita sepultados por aluvión, se encuentran manifestaciones de hidrotermalismo, principalmente en los acuíferos de Chupaderos y Guadalupe-Bañuelos, que se extienden hasta el acuífero Ojo Caliente, al Sur del área de estudio.

VI.1 FLUJO SUBTERRÁNEO

A partir de la información de la elevación del nivel estático (Mapa 12), se observa que el flujo de las aguas subterráneas tiene una dirección preferencial del S-SW al N-NE, sensiblemente paralela a la estructura de pilar de la Sierra de Veta Grande. Esta información está de acuerdo con lo reportado por la CNA, pero esta dirección de flujo se ve afectada por la geometría del basamento. En el Norte de los acuíferos de Calera y Chupaderos se presentan conos de depresión debidos a un basamento más profundo, por lo que la dirección de flujo se dirige a estas depresiones.

Por otro lado, en los acuíferos de Guadalupe-Bañuelos y Benito Juárez no se realizaron suficientes mediciones para determinar el flujo subterráneo, pero Nájera-Garza (1997), presenta en su trabajo información del nivel estático al Sur del área de estudio, en donde se muestra que la dirección de flujo es hacia el Sur en el acuífero de Benito Juárez y al Oriente en Guadalupe-Bañuelos.

VI.2 FAMILIAS DE AGUAS

Para la clasificación de las familias de aguas se utilizaron los métodos gráficos de Piper, Stiff y Wilcox. Los diagramas fueron preparados con el Ground Water Software, salvo los diagramas de Stiff, que se graficaron en AutoCAD con el programa stiff.lsp, elaborado en autolisp por el sustentante.

- Diagramas de Piper.

Para estos diagramas se utilizó el modelo original propuesto por Piper (1944). Con este método se llegó a la conclusión de que las aguas cercanas a la Sierra de Veta Grande son predominantemente del tipo bicarbonatada magnésica. En el valle Oriental, las aguas de la parte central pertenecen al tipo bicarbonatada cálcica y mixta con predominio del sodio. En la Sierra del Tepezán las aguas son del tipo sulfatada cálcica y mixta. Todas estas aguas evolucionan en la dirección del flujo subterráneo a bicarbonatadas sódicas en la parte centro-Norte del valle (Figura 8).

En el acuífero de Guadalupe-Bañuelos las aguas son del tipo bicarbonatadas cálcico-sódicas, y por falta de información no se pudo determinar su evolución (Figura 9).

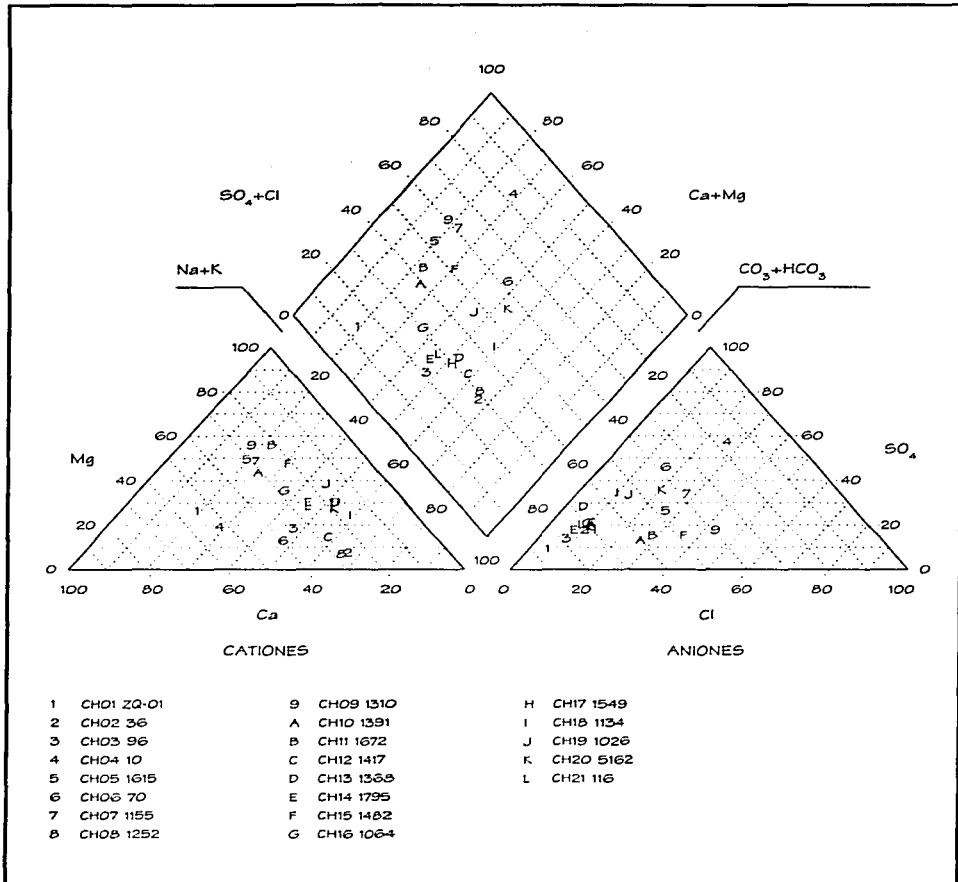
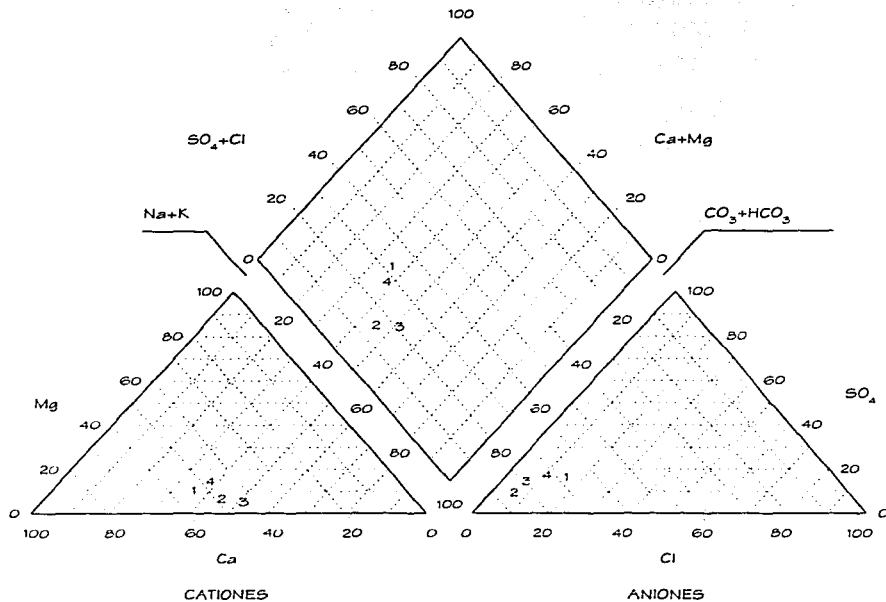


Figura B Diagrama de Piper a partir de los aprovechamientos muestreados en el acuífero de Chapaderos.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997



- 1 GBO1 219
- 2 GBO2 147
- 3 GBO3 57
- 4 GBO4 22

Figura 9 Diagrama de Piper a partir de los aprovechamientos muestreados en el acuífero de Guadalupe-Bañuelos.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

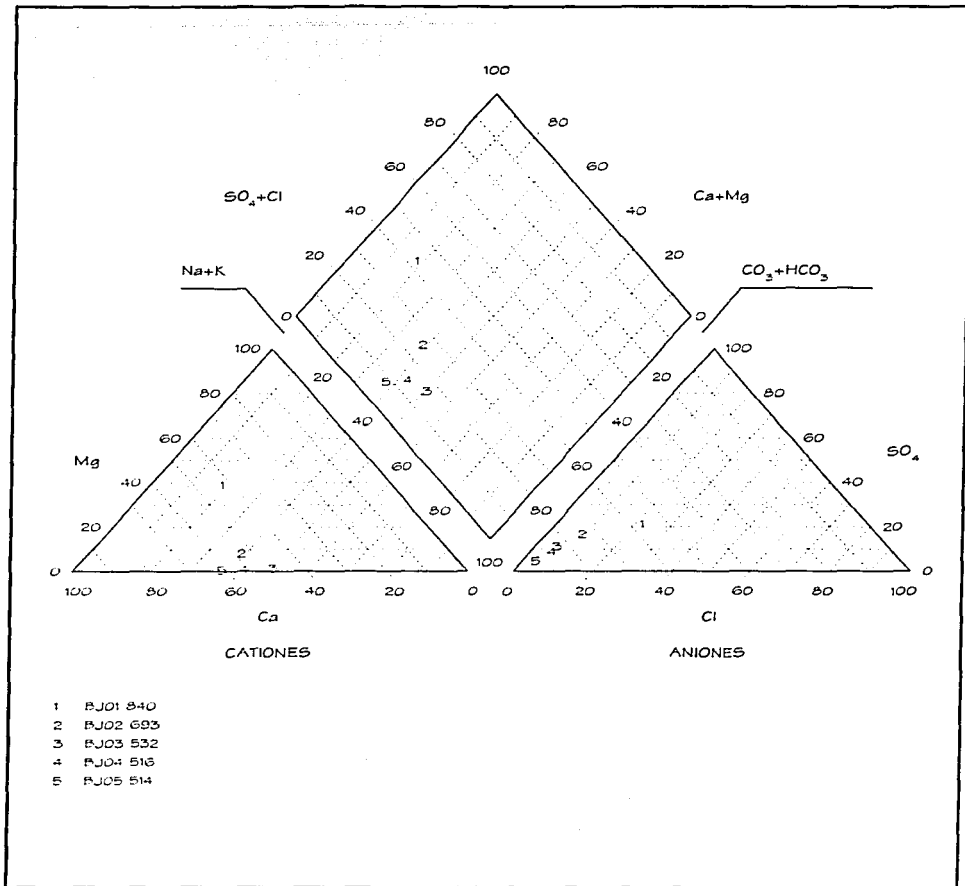


Figura 10 Diagrama de Piper a partir de los aprovechamientos muestreados en el acuífero de Benito Juárez.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

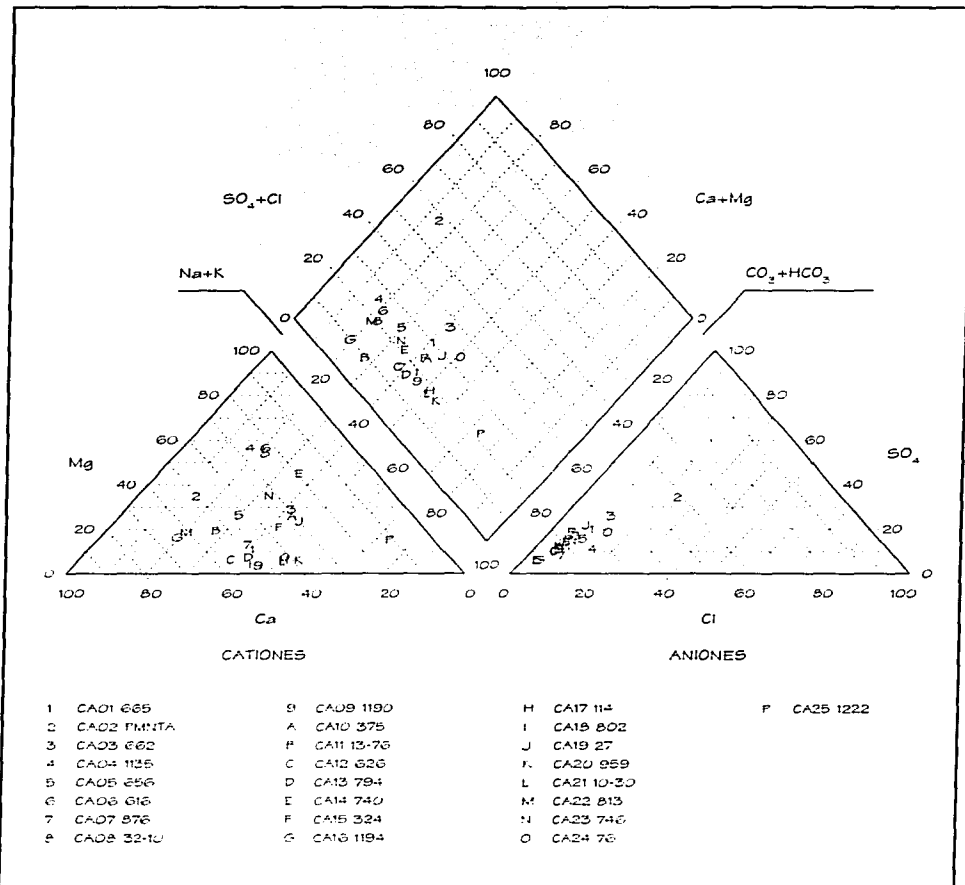


Figura 11 Diagrama de Piper a partir de los aprovechamientos muestreados en el acuífero de Calera.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional: Julio de 1997

Los tipos de aguas en el acuífero de Benito Juárez son bicarbonatada cálcico sódica, y en menor proporción bicarbonatada cálcico magnésica. Aparentemente el agua evoluciona de cálcico magnésica a cálcico sódica, pero esta relación no es clara (Figura 10).

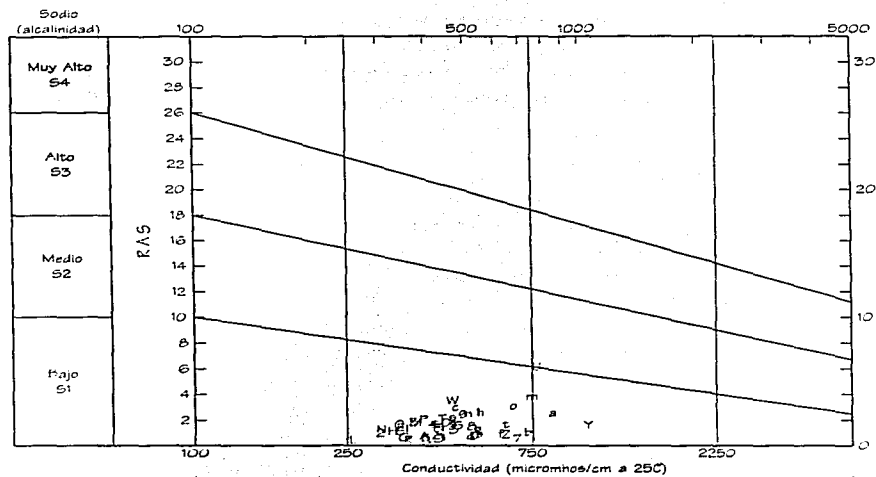
El acuífero de Calera tiene un comportamiento más claro; agua bicarbonatada magnésica junto a la Sierra de Veta Grande, bicarbonatada mixta con predominio del sodio en la parte central del valle, y bicarbonatada cálcico sódica en el Oeste del valle. Siguiendo la dirección del flujo, el agua evoluciona a bicarbonatada sódica en la parte Norte del valle (Figura 11).

- Diagramas de Stiff.

Para este trabajo se utilizaron los diagramas de Stiff (1951), modificados por Custodio (1965). Estos polígonos se agrupan fácilmente de acuerdo a su forma, que representa una relación determinada de sus contenidos iónicos. De esta manera se observan formas similares a lo largo del borde Oriente de la Sierra de Valdecañas, otras formas en el acuífero de Guadalupe-Bañuelos y otras en Benito Juárez. Estos diagramas por sí mismos no dan una clasificación, pero son una herramienta que permite observar la distribución espacial de los análisis (Mapa 13).

- Diagrama de Wilcox.

Wilcox (1955), propuso este diagrama para el estudio de las aguas de uso agrícola. Este diagrama relaciona el contenido de sodio intercambiable (índice RAS), con la conductividad eléctrica de una muestra de agua, y sugiere el mejor tipo de cosecha que se puede regar con ésta (Figura 12). Salvo tres muestras, todas se encuentran en la clasificación C2-S1, que corresponde con una salinidad media y un índice RAS bajo; se la puede utilizar sin ningún problema para regar cultivos medianamente tolerables a las sales, en terrenos que tengan un lavado ligero. Las tres muestras restantes se clasifican como C3-S1, y representan aguas de alta salinidad y bajo contenido de sodio; no se pueden utilizar en suelos de drenaje deficiente y sólo son útiles para cultivos resistentes a la salinidad. Estas tres muestras son los aprovechamientos 10 y 72 del acuífero de Chupaderos y el 1222 de Calera.



C1	C2	C3	C4
Bajo	Medio	Alto	Muy Alto

Salinidad

- | | | | | | | | |
|---|------------|---|------------|---|-----------|---|-----------|
| 1 | BJO1 840 | 9 | CA04 1135 | H | CA12 626 | F | CA20 959 |
| 2 | BJO2 693 | A | CA05 656 | I | CA13 794 | G | CA21 1030 |
| 3 | BJO3 532 | M | CA06 616 | J | CA14 740 | R | CA22 813 |
| 4 | BJO4 516 | C | CA07 576 | K | CA15 324 | S | CA23 746 |
| 5 | BJO5 514 | D | CA08 32413 | L | CA16 1194 | T | CA24 76 |
| 6 | CA01 665 | E | CA09 1190 | M | CA17 114 | U | CA25 1020 |
| 7 | CA02 PMNTA | F | CA10 376 | N | CA18 802 | V | CA26 2501 |
| 8 | CA03 682 | G | CA11 1376 | O | CA19 27 | W | CA27 24 |

Figura 12 Diagrama de Wilcox a partir de los aprovechamientos muestrados.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional: Julio de 1997

VI.3 ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS

Los índices hidrogeoquímicos son las relaciones que guardan los iones disueltos en el agua y que reflejan su procedencia, o indican la acción de fenómenos modificadores, o una característica específica del agua considerada. Las relaciones se establecen en valores de meq/l, indicado por el signo r precediendo al elemento. Se pueden establecer muchos tipos de relaciones hidrogeoquímicas, pero sólo algunas aportan información; las únicas relaciones que muestran un patrón claro son las de magnesio calcio ($r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$) y el índice de cambio de bases (ICB). Las relaciones de aniones no aportan gran información por ser el bicarbonato el ion dominante.

- Relación Magnesio Calcio ($r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$).

Este índice varía de 0.3 a 1.5 en aguas continentales; valores cercanos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos, o con serpentina, y valores superiores a 1 se relacionan con terrenos ricos en silicatos magnésicos como los gabros y basaltos. Los valores de esta relación indican que en la Sierra de Yeta Grande existen rocas básicas y/o ultrabásicas, que aportan magnesio a las aguas subterráneas. Estas rocas pertenecen a la Formación Chilitos, y por el valor de la relación sería difícil que el magnesio lo aportaran rocas calcáreas o dolomías (Mapa 14).

La distribución que presentan los máximos de esta relación, independientemente de la Sierra de Yeta Grande, pueden corresponder a zonas donde la Formación Chilitos se encuentra relativamente cercana a la superficie, como para afectar a las aguas subterráneas, pero sin aflorar.

- Índice de Cambio de Base (ICB).

Es la medida de la fijación de cationes de la misma valencia en el proceso de adsorción entre el agua subterránea y la roca por la cual circula. Este fenómeno de intercambio iónico es especialmente importante en los minerales arcillosos por presentar un alto grado de adsorción. Su interés está relacionado con acuíferos que tienen una fracción arcillosa, ya que estas unidades son impermeables para efectos prácticos. Además de las arcillas, también los compuestos orgánicos poseen capacidad de intercambio iónico que se debe tener en cuenta.

El cambio de bases afecta principalmente a los cationes Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} y también al H^+ , Li^+ y Sr^+ , mientras que el K^+ y el NH_4^+ tienden a ser fijados irreversiblemente.

Schoeller (1962), definió al índice de desequilibrio entre cloruros y alcalinos de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$icb = \frac{rCl - r(\text{Na} + \text{K})}{rCl}$$

Posteriormente, se modificó la fórmula para que fuera más sensible a los cambios en los contenidos de HCO_3 y SO_4 , y se estableció de la siguiente forma:

$$icb(-) = \frac{rCl - r(\text{Na} + \text{K})}{r(\text{SO}_4 + \text{CO}_3\text{H} + \text{NO}_3)}$$

Los valores que presenta son casi siempre negativos en aguas relacionadas con terrenos plutónicos o volcánicos, especialmente graníticos. Los valores de esta relación disminuyen con la evolución del agua y el enriquecimiento en sodio. Un aumento del valor indica un endurecimiento del agua.

Para analizar el cambio de base, se prefirió la última fórmula por más sensible a los cambios en los contenidos iónicos, y además presenta un mejor patrón de dispersión, tal como se muestra en el Mapa 15. Los valores que presenta este índice son en general negativos, salvo en el aprovechamiento 1310 donde el valor es de +0.40. Se puede observar que los valores mínimos corresponden con la parte central de cada una de las cuencas formadas en los valles. Ésto parece indicar que por un lado el flujo del agua subterránea no es sólo uno, ni única la dirección, y por el otro se presenta una evolución hidrogeoquímica del agua subterránea independiente para cada cuenca.

VII. Conclusiones

VII. CONCLUSIONES

VII.1 GEOLÓGICAS

En el área de estudio las rocas más antiguas que afloran corresponden a la Formación Zacatecas, de edad Triásico Superior, sobre las que evolucionó, a partir del Jurásico Superior, el Mar Mexicano, en lo que se conoce como Secuencia Mezcalera. A esta Secuencia pertenece la Formación Chilitos ("Rocas Verdes"), que se depositó en el límite Jurásico-Cretácico.

El área evoluciona en un ambiente de arco volcánico hasta la transgresión de la Secuencia Parrense, durante el Aptiano, en donde se depositaron las Formaciones Caliza Cerro Gordo y Caliza Fortuna, Indidura y Caracol. No se reconocieron unidades calcáreas Cretácicas o anteriores, como las Formaciones Zuloaga, Taraises o Tamaulipas, propuestas en trabajos anteriores.

El Terciario está dominado por depósitos continentales y vulcanismo ácido, así como por el emplazamiento de intrusivos graníticos durante el Oligoceno. El Cuaternario es representado por basaltos de olivino en forma de coladas masivas y por depósitos de talud y aluviones.

Regionalmente, el área ha sufrido por lo menos dos periodos de deformación; el primero durante el Jurásico y el segundo a finales del Cretácico. Al término del segundo periodo de deformación se inicia un fase distensiva que da lugar a dos sistemas de fallamiento normal; cronológicamente, el primero está orientado de S-SE a N-NW, y el segundo sistema se orienta E-W.

El primer sistema de fallamiento normal formó las dos cuencas principales, que a su vez fueron divididas formado subcuencas por el segundo sistema de fallamiento normal. El salto de la falla en el primer sistema se ha calculado de hasta 400 metros, mientras que para el segundo sistema se estima entre 100 y 200 metros.

Esta región aunque tiene muy buenos trabajos de cartografía a detalle en áreas como Fresnillo, Zacatecas, o Francisco I. Madero, no tiene un trabajo de integración reciente, por lo que se propone como un trabajo en el futuro.

VII.2 GEOHIDROLÓGICAS

Las estructuras tectónicas de horst y grabens del Terciario formaron los valles, que una vez llenos de materiales aluviales y volcánicos, alojaron a los acuíferos. Estos valles se encuentran divididos por el pilar que forman las Sierras de Veta Grande y Zacatecas, y que a su vez funciona como una barrera impermeable lateral.

Los acuíferos son del tipo "libre", formados por sedimentos clásticos de granulometría y conductividad hidráulica muy variada, que va desde arcillas hasta gravas, con intercalaciones de material piroclástico y derrames lávicos de composición riolítica y andesítica, que tienen una compactación variable. En la base de los acuíferos se presentan conglomerados, tobas y rocas riolíticas con permeabilidad secundaria, que muestran cambios notables tanto horizontal como verticalmente, reflejando la compleja estructura y geometría de los mismos. Al basamento lo integran las Formaciones Zacatecas y Chilitos, y materiales volcánicos de composición riolítica, que presentan un control estructural en el sentido E-W, que no es claro, pero se identifica por las anomalías aeromagnéticas, y se confirma por el comportamiento geohidrológico.

La recarga de los acuíferos ocurre principalmente en la superficie de los materiales granulares y en los de conductividad hidráulica media, por la infiltración del agua de lluvia, y por los retornos del riego y pérdidas en los canales de conducción. La descarga más importante del agua subterránea, se lleva a cabo a través del bombeo.

La delimitación de los acuíferos que hace la CNA, no es del todo correcta: su valoración se basa principalmente en los rasgos superficiales y no en la evolución geoquímica del agua, o la elevación del nivel estático. Por lo tanto, propongo una nueva zonificación de los acuíferos de la región, tomando en cuenta los siguientes puntos:

- * La información geofísica muestra que las fosas tectónicas en que se encuentran alojados los acuíferos no son valles continuos, sino una configuración de pilares y fosas al nivel del basamento, que dan lugar a cuencas interiores dentro del valle.
- * La geometría de las cuencas definidas en el basamento controlan la elevación del nivel estático, y por consiguiente, la dirección de flujo de las aguas subterráneas. Ésto explica por qué se presentan flujos centripetos en el Norte del área, donde la explotación no es tan intensa como en otras áreas.

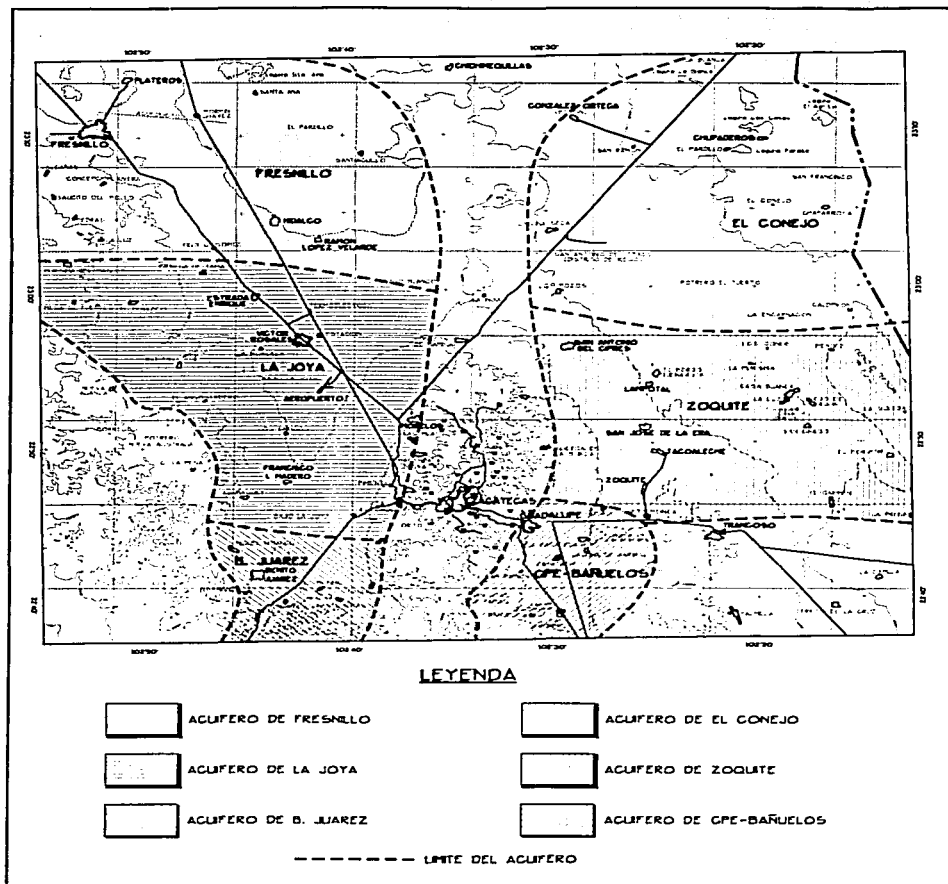


Figura 13 Distribución de los acuíferos propuestos.

Sergio Yussim Guarneros
Tesis Profesional Julio de 1997

- * La evolución en las características físicas y contenidos iónicos de las aguas subterráneas sigue patrones que presentan concordancia con la estructura del basamento.

Con estos argumentos sugiero que el acuífero de Chupaderos se separe en dos: "El Conejo" al Norte y "Zóquite" al Sur. Al igual que el acuífero de Calera en "Fresnillo" al Norte y "La Joya" al Sur, como se muestra en la Figura 13.

VII.3 HIDROGEOQUÍMICAS

El agua subterránea en la región se clasifica como del tipo "fresca", porque su contenido total de sales no excede los 1,000 mg/l, con excepción de una sola muestra. Las concentraciones de iones no exceden las normas de calidad, por lo que el agua es químicamente apta para el consumo humano y para fines agrícolas. El agua tiene un pH entre 7.1 y 8.19, con un temperatura promedio de 26.6°C.

En los acuíferos del Oriente se obtuvieron mayores concentraciones iónicas, que en los de Occidente, y éstas aumentan en la dirección del flujo subterráneo. De igual manera presentan valores más altos en conductividad eléctrica, dureza y sólidos totales disueltos, además de presentar manifestaciones de hidrotermalismo.

Las principales familias de aguas que se presentan son bicarbonatada magnésica, cercana a las Sierras de Zacatecas y Veta Grande; bicarbonatada cálcico sódica, en los acuíferos de Benito Juárez, Guadalupe-Bañuelos y en la porción Occidental del área; bicarbonatada cálcica y mixta que se encuentra en el centro de los valles; y sulfatada cálcica y mixta en la Sierra del Tepozán. Todas estas familias evolucionan en la dirección del flujo subterráneo a una bicarbonatada sódica, donde los iones dominantes son:



La clase de agua para riego es principalmente C2-S1, con una salinidad media y un índice RAS bajo. No se detectaron metales pesados en las muestras analizadas. Es posible que el bombeo constante haya impedido la concentración de metales pesados en el agua muestreada a un nivel detectable en el laboratorio.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- Bouwer, H. 1978. *Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill, Series in water resources and environmental engineering. New York. 480 p.
- Burckhardt, C. 1905. *A Faune marine du Trias Superior de Zacatecas*. Boletín del Instituto de Geología, México. No. 21, p 5-38.
- Burckhardt, C. y Scalia, S. 1906. *Geologie des environs de Zacatecas*. Congreso Geológico Internacional X, guía de excursiones, México. No. 16, p 26.
- Burkart, H. J. 1833. *Über die geognostischen Verhältnisse und Betriebs-Resultate del Silberbergwerke von Veta Grande in der Provinz Zacatecas in Mexico*. Archiv Mineralogie, Geognosie, Bergbau, Huttenkunde, V. 6, p. 319-342; V. 8, p. 230-231. Original no consultado, citado en Ponce S., B. F., and Clark, K. F. 1988. *The Zacatecas Mining District: A tertiary Caldera Complex Associated with Precious and Base Metal Mineralization*. Economic Geology, V. 83, p 1668-1682.
- Campa-Uranga, M. F. and Coney, P. J. 1983. *Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico*. Canadian Journal of Earth Sciences, V. 20, p. 1040-1051.
- Castañón-Arcos, V. M. 1994. *Estudio Geohidrológico Preliminar del Estado de Zacatecas*. México, D. F. UNAM, Facultad de Ingeniería. Tesis licenciatura (inédita), 69 p.
- Carrillo-Bravo, J. 1968. *Reconocimiento geológico preliminar de la porción central del Altiplano Mexicano*. Petróleos Mexicanos, Inédito. Original no consultado, citado en Martínez, A. y Malpica, R. 1983. *Estudio Estratigráfico Sedimentológico de la Formación Zacatecas en la Cuenca del Centro de México*. Subdirección de Tecnología de Exploración. Instituto Mexicano del Petróleo, Proyecto C-1134. Inédito. 28 p.
- Carroll, D. 1962. *Rainwater as a chemical agent of geologic processes. A review*. U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1535-G. 18 p.

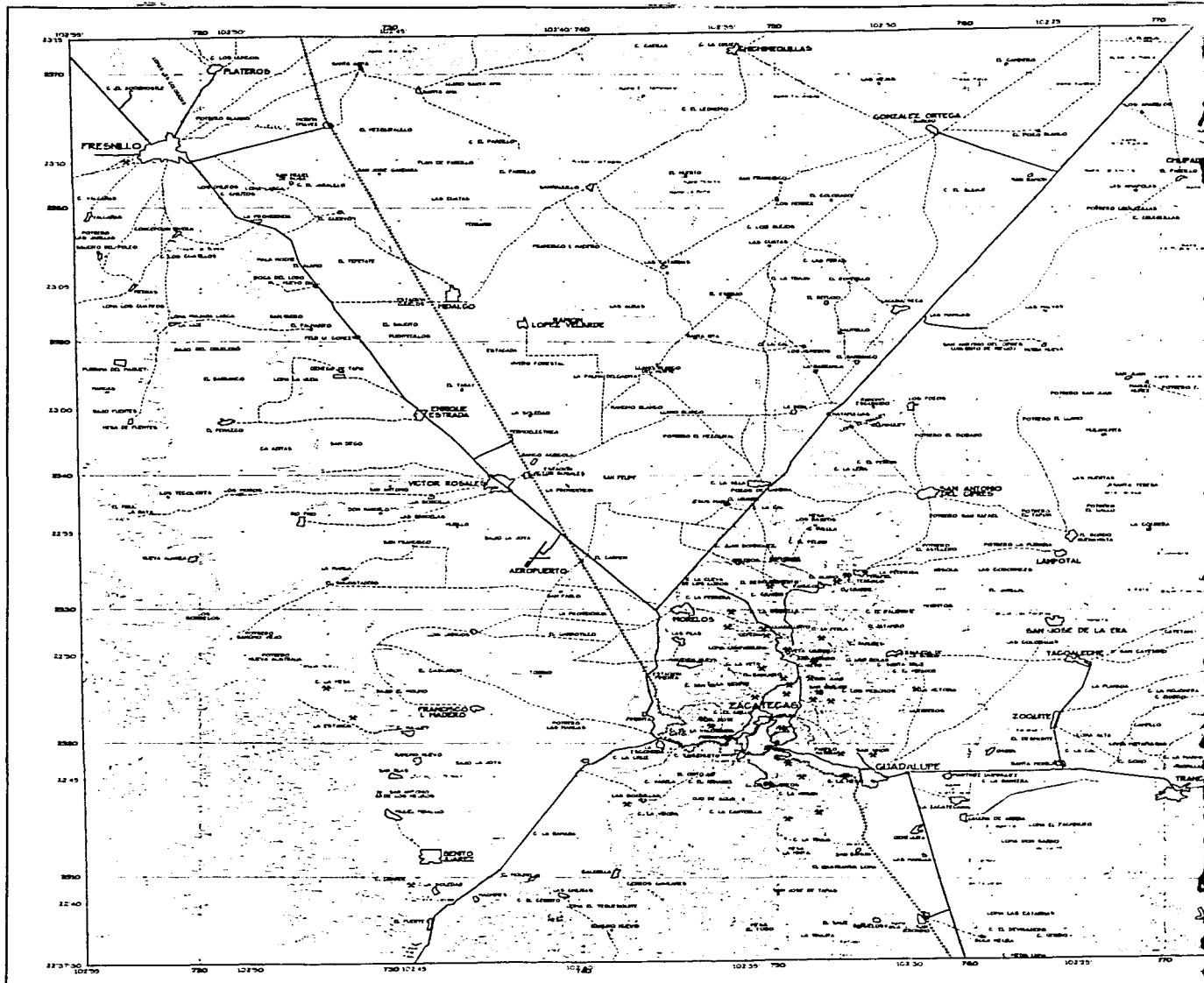
- Centeno-García, E., P. J. Coney, J. Ruiz, J. Patchett, and F. Ortega-Gutiérrez. 1993. *Tectonic Significance of the Sediments of the Guerrero Terrane from Petrographic, Trace Elements, and Nd-Isotopic Studies*. Proceeding of the First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference: Instituto de Geología, UNAM. p 30-33.
- Centeno-García, E., and G. Silva-Romo. 1993. *Geology of the San Luis Potosí-Zacatecas Region, Northeastern limit of the Guerrero Terrane*. First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference, Guidebook of field trip A: Instituto de Geología, UNAM. p 30-33.
- Consejo de Recursos Minerales. 1991. *Monografía Geológico-Minera del Estado de Zacatecas*. C. de R. M., Centro Minero, Publicación M-2e.
- Cuevas-Pérez, E. 1983. *Evolución geológica mesozoica del Estado de Zacatecas, México* (The geological evolution of the Mesozoic in the state of Zacatecas, Mexico). Zbl. Geol. Palaont. Teil 1983 H. 3/4, p 190-201.
- Cuevas-Pérez, E. 1997. *Estratigrafía mesozoica de la Sierra de Zacatecas*. Resumen, II Convención Sobre la Evolución Geológica de México. Pachuca, Hidalgo, 23-28 de junio de 1997. p 16.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. 1976. *Hidrología Subterránea*. 2ª ed. Tomos I y II. Edit. Omega, S. A. Barcelona, España. 1157 p.
- Davis, S. N. and R. J. M. De Weist. 1966. *Hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York. 463 p.
- De Cserna, Z. 1976. *Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mex.* Geological Society of America Bulletin. V. 87, No. 8, p 1191-1199.
- Eguiluz, de A. S. 1955. *Posibilidades Petroleras en el Mar Mexicano*. Revista Ingeniería Petrolera. Agosto de 1955, p 39-62.
- Enciso de la Vega, S. 1978. *Notas para la Geología del Estado de Zacatecas*. Geomimet. No. 91, p 107-113.

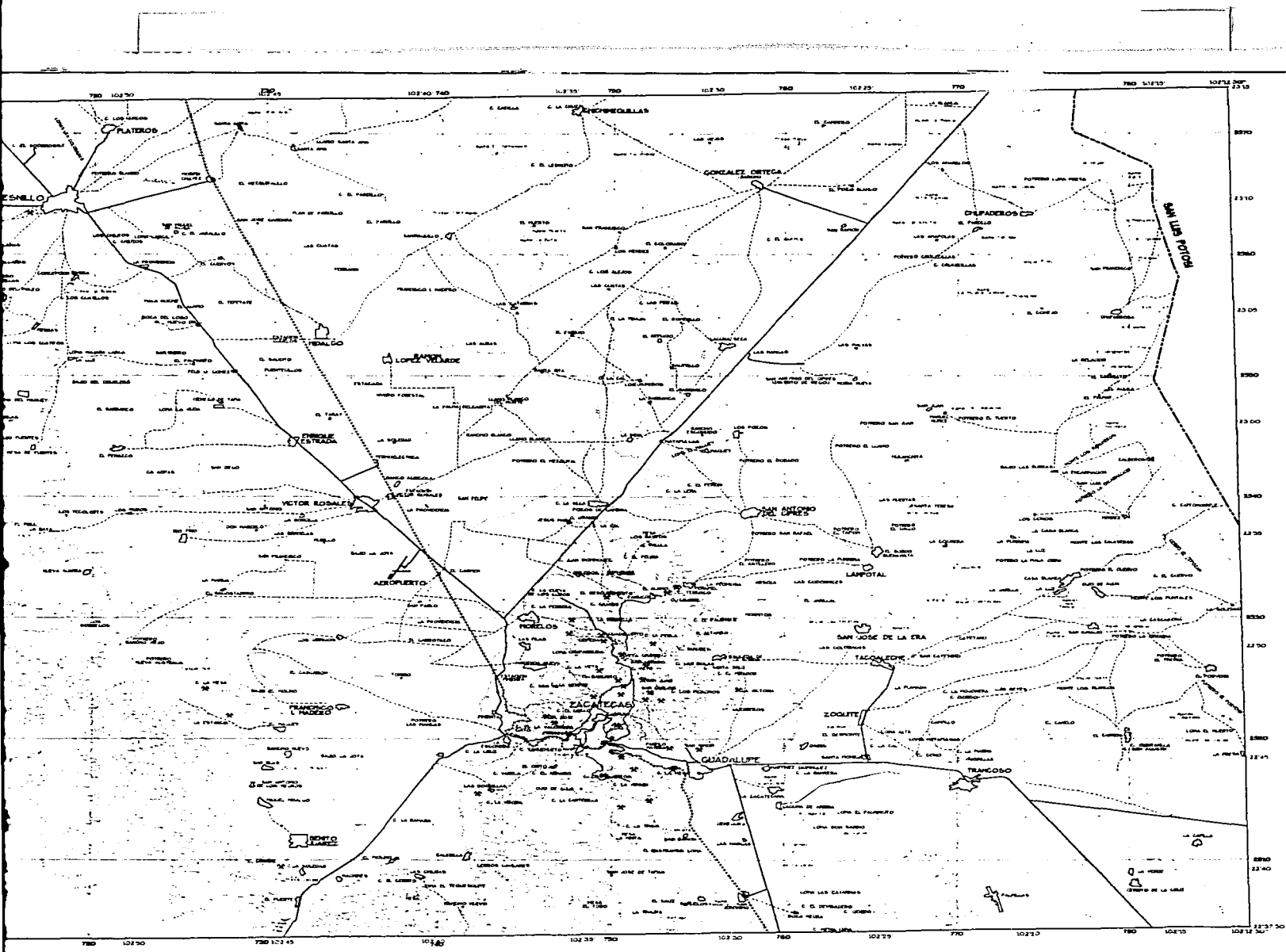
- Echeverría-Yaquero, M. P. 1995. *Contaminación de Acuíferos*. México, D. F., UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado. Tesis maestría (Inédita), 148 p.
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, N. J., U. S. A. 604 p.
- Hem, J. D. 1970. *Study and interpretation of chemical characteristics of natural water*. U. S. Geol. Survey, 2ª ed. Water-Supply Paper 1473. 363 p.
- INEGI. 1981. *Síntesis Geográfica de Zacatecas*. INEGI, Aguascalientes.
- INEGI. 1995. *Anuario Estadístico del Estado de Zacatecas*. INEGI, Aguascalientes.
- Morán-Zenteno, D. 1984. *Geología de la República Mexicana*. UNAM, Facultad de Ingeniería, e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 88 p.
- McGehee, R. 1976. *Las rocas metamórficas del Arroyo de la Pimienta, Zacatecas, Zac.* Boletín Sociedad Geológica Mexicana, V. 37, No. 1, p 1-10.
- Monod, O. y Parga, J. J. 1991. *Una nueva interpretación estructural del distrito minero de Fresnillo, Zacatecas (México)*. Resumen, I Convención Sobre la Evolución Geológica de México. Pachuca, Hidalgo, 23-28 de junio de 1991.
- Monod, O. and Calvet, P. 1992. *Structural and Stratigraphic Re-interpretation of the Triassic units near Zacatecas (Zac.), Central Mexico. Evidence of a Laramide nappe pile*. Zbl. Geol. Paläont. Teil 1, H. 6, p 1533-1544.
- Monod, O. 1993. *Pre-Eocene tectonics in the Zacatecas area-an imbrication of Triassic and Cretaceous units*. First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference. Guidebook of fel trip A: Instituto de Geología, UNAM. p 67-73.
- Nájera-Garza, J. 1997. *La importancia ambiental y de abastecimiento de los partecaguas subterráneos, en los municipios de Zacatecas, Calera, Fresnillo y Guadalupe, Estado de Zacatecas*. Resumen, II Convención Sobre la Evolución Geológica de México. Pachuca, Hidalgo, 23-28 de junio de 1997. p 48.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- Pipper, A. M. 1944. *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis*. Trans. Amer. Geophysical Union. V. 25, p 914-928.
- Ponce S., B. F. and Clark, K. F. 1988. *The Zacatecas Mining District: A Tertiary Caldera Complex Associated with Precious and Base Metal Mineralization*. Economic Geology, V. 83, p 1668-1682.
- Ranson, W., Fernández, L., Simmons, W. Jr. and Enciso de la Vega, S. 1982. *Petrology of the metamorphic Rocks of Zacatecas, Zac. Mexico*. Boletín Sociedad Geológica Mexicana, V. 43, No. 1, p. 37-59.
- SARH. 1983. *Estudio Geohidrológico de la Zona de Guadalupe-Bañuelos, Zac.* (Inedito)
- Schoeller, H. 1962. *Les eaux souterraines*. Masson & Cie. París. 642 p.
- Seldock, R. L., F. Ortega-Gutiérrez, and R. C. Speed. 1993. *Tectonostratigraphic Terranes and Tectonic Evolution of Mexico*. G. S. A. Special Paper 278. 153 p.
- Servais, M., Cuevas, P. E. y Mood, O. 1986. *Une section de Sinaloa à San Luis: nouvelle approche de l'évolution de Mexique nord-occidental*. Bulletin de la Société Géologique de France, Series (B), V. 2, No. 6, p 1033-1047.
- Silva-Romo, G. 1993. *Estudio de la Estratigrafía y Estructuras Tectónicas de la Sierra de Salinas, Estados de S. L. P. y Zacatecas*. México, D. F. UNAM, Facultad de Ciencias. División de Estudios de Posgrado. Tesis maestría (Inédita), 144 p.
- Silva-Romo, G., Arellano-Gil, J., Mendoza-Rosales, C., and Nieto-Obregón, J. 1997. *Triassic Submarine Fan in The "Mesa Central"*. Geological Society of America. En Prensa.
- Stiff, H. A. Jr. 1951. *The interpretation of chemical water analysis by means of patterns*. Jour. Petr. Technology. V 3, No. 10, p 15-17.
- Todd, D. K. 1980. *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, New York, 2ª ed. 539 p.
- Wilcox, L. V. 1955. *Classification and use of irrigation water*. U. S. Dept. Agric. Circ. 969, Washinton, D. C. 19 p.

Anexo Cartográfico

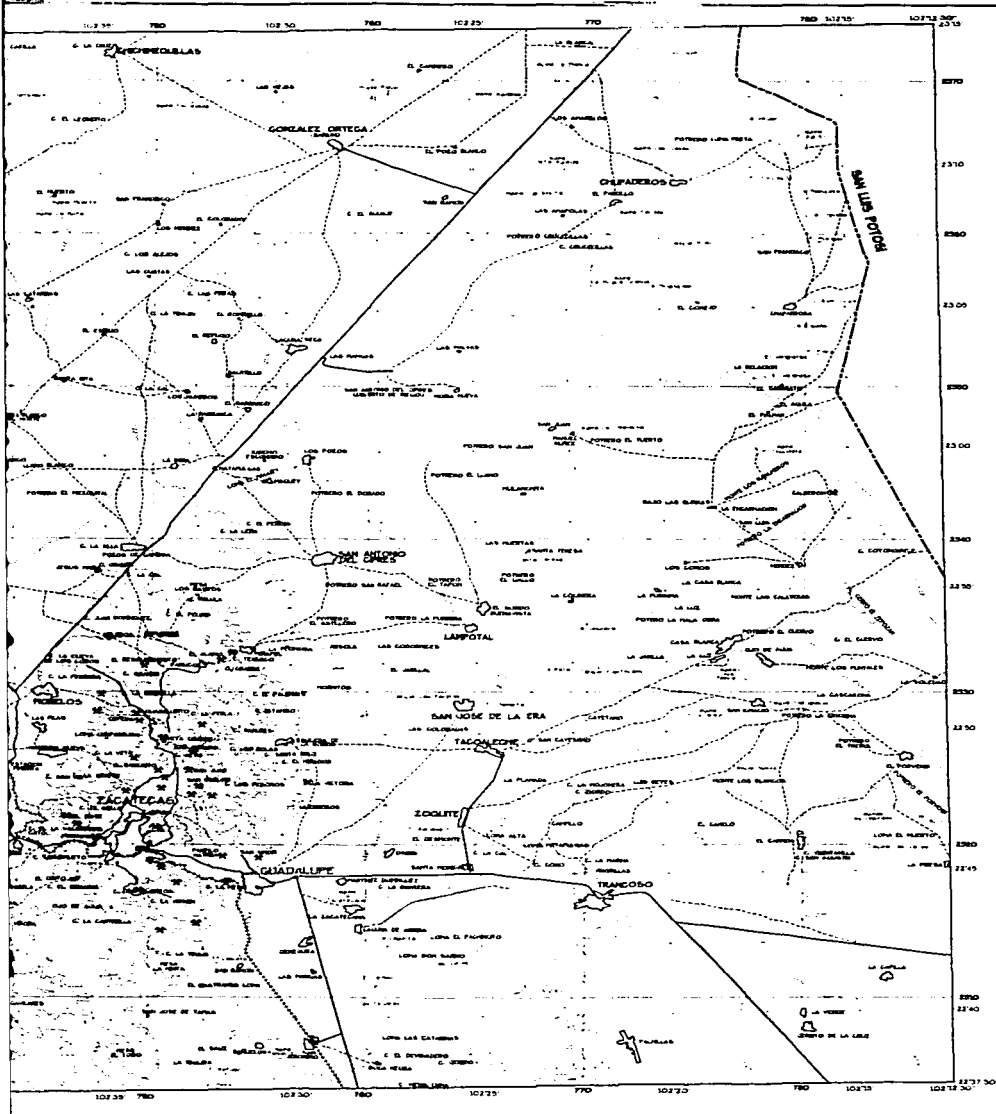




- ISONOMIA
 CURVA DE NIVEL
 ALMACENAMIENTO
 CARRETERA PAV
 TERRACERA
 BRICIA
 VIA DE FF CC.
 LIMITE ESTATAL
 POBLACION
 FINA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 Facultad de Ingeniería
 Tesis
 Sergio Yus
 Julio de 1997



CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

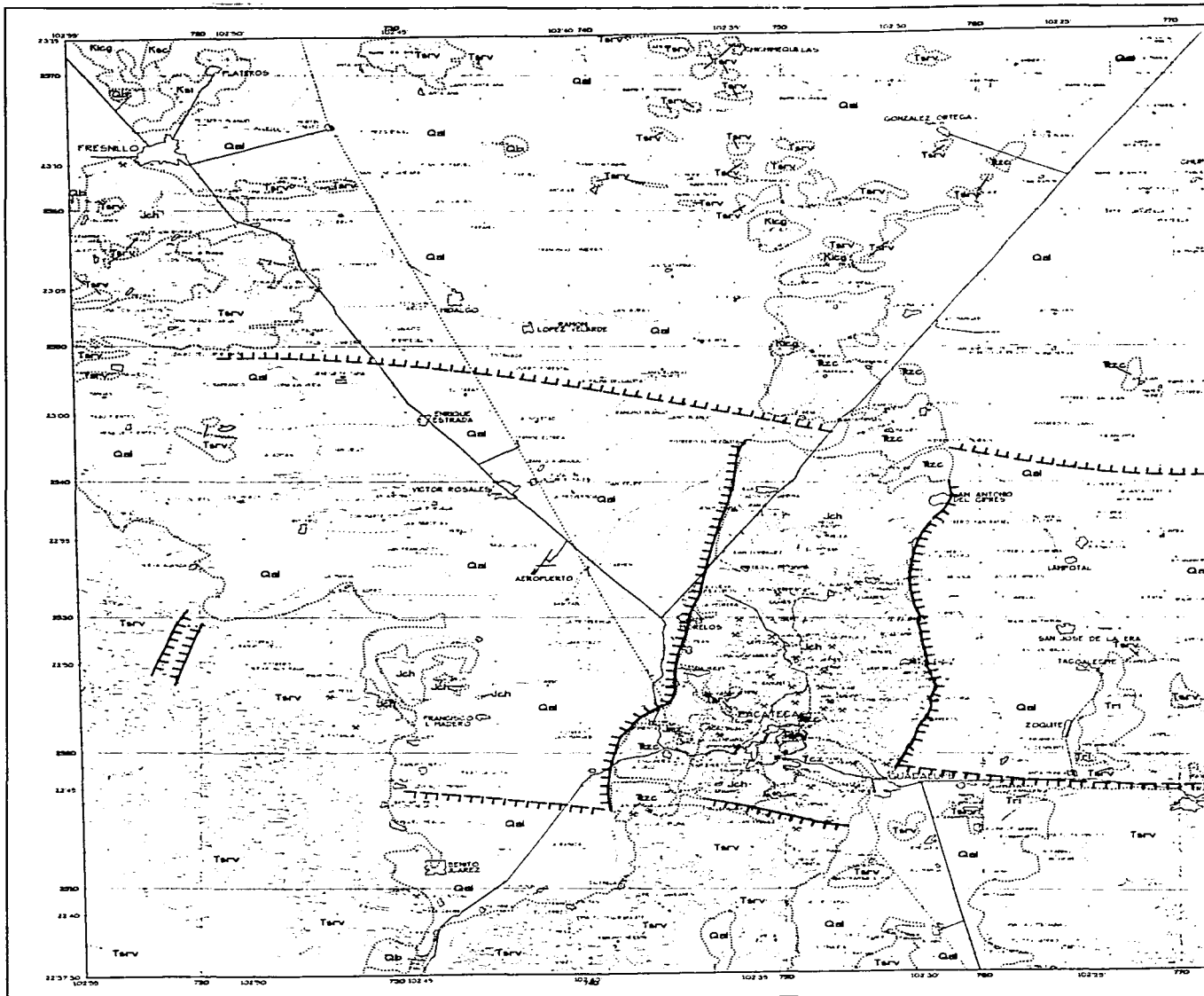
- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRETERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FF. CC.
 - LINTE ESTATAL
 - POBLACION
 - FINA

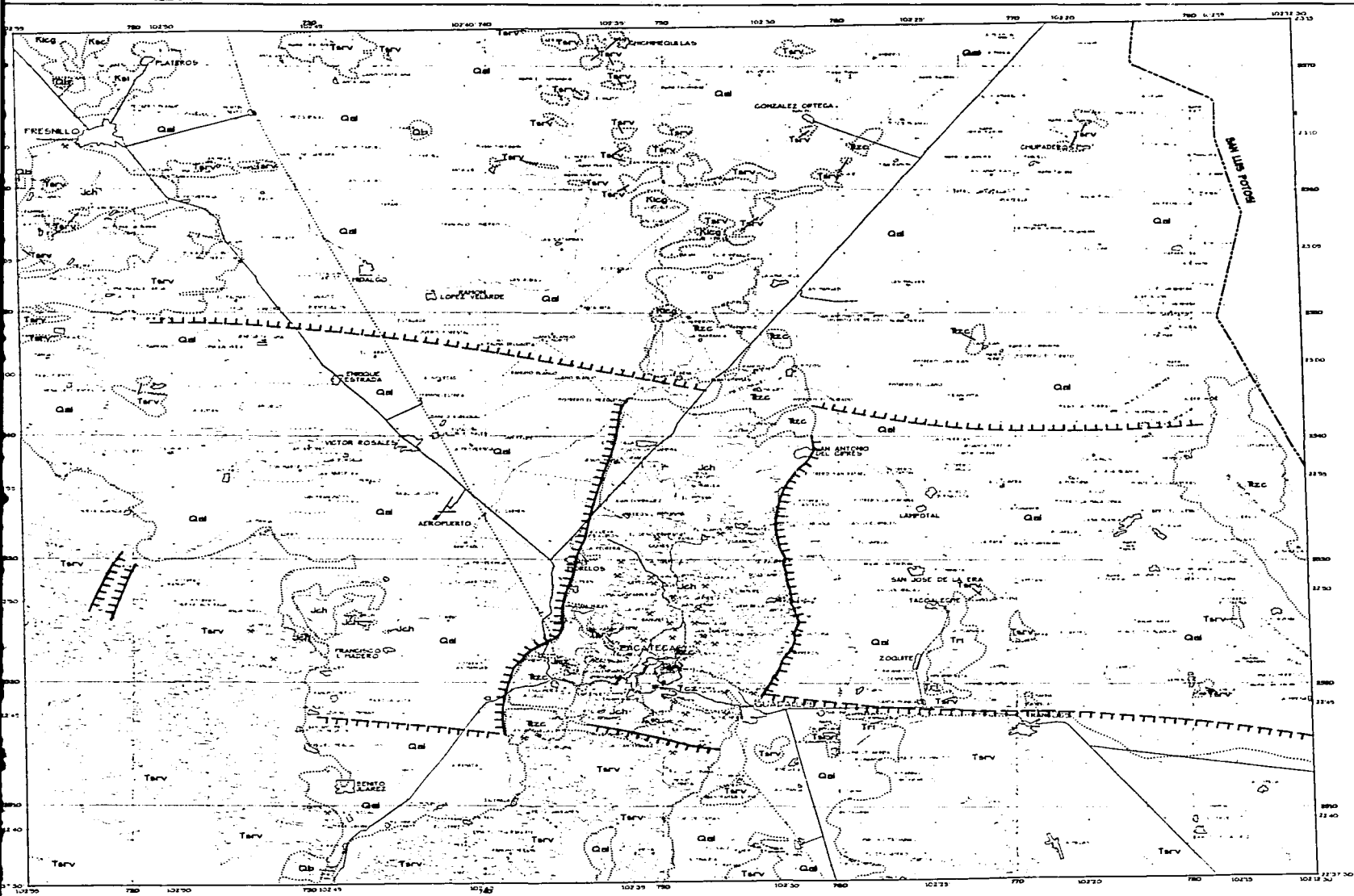


ESCALA GRAFICA (cm)

EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
Facultad de Ingenieria	
Tesis Profesional	
TOPOGRAFICO	
Sergio Yussim Guarneros	
Julio de 1997	Mapa 1
Escala 1 : 275.000	1





- LOC
- CURVA
- ALPACAS
- GABINET
- TERRAC
- BRECHA
- VIA DE
- UNTE D
- POBLAC
- HNA

- GE
- CORTA
- FALLA
- FALLA

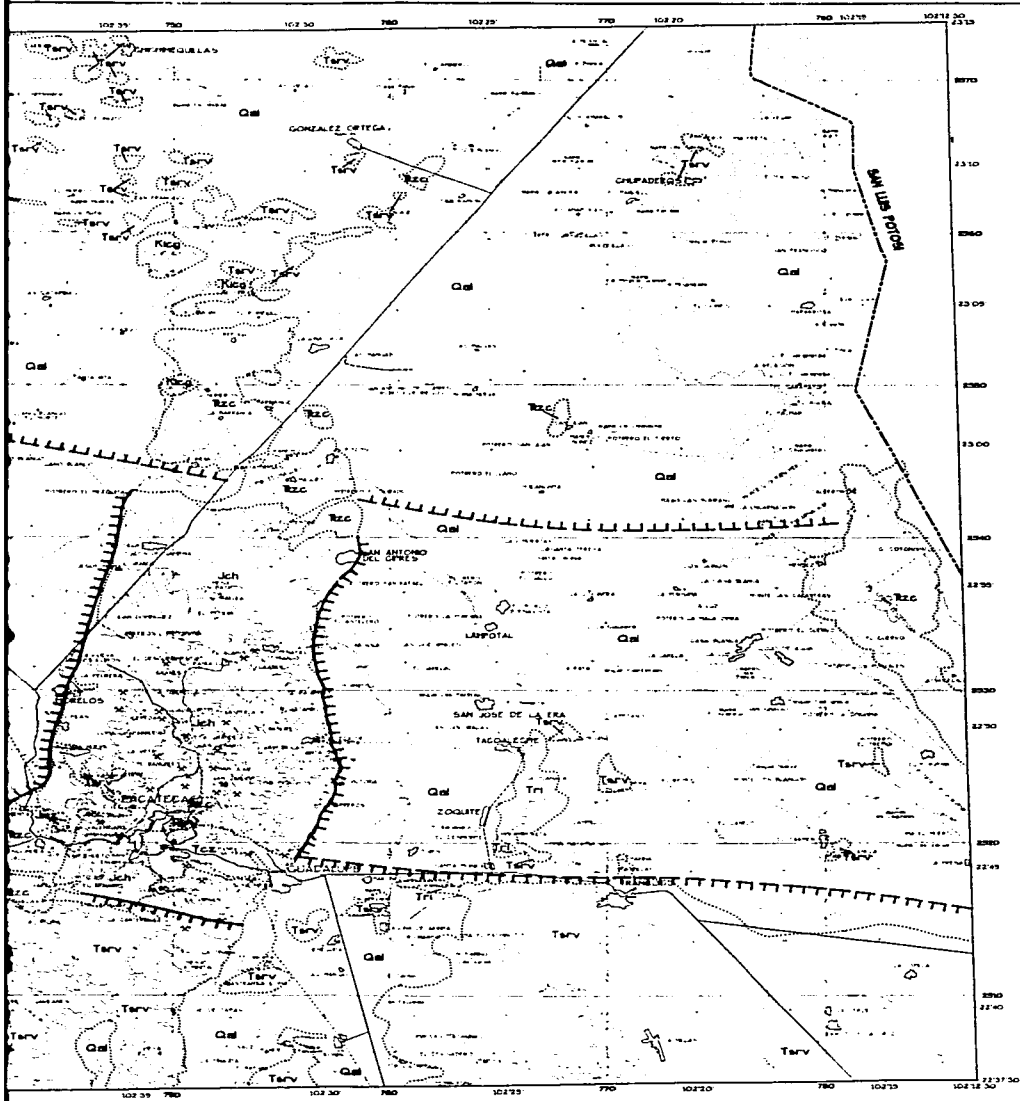
- ES:
- 1:500
 - 1:1000
 - 1:2000
 - 1:5000
 - 1:10000
 - 1:25000
 - 1:50000
 - 1:100000
 - 1:250000
 - 1:500000
 - 1:1000000

EQUIL

UNIVERSIDA
Fac

T

Serg
J40 de



CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

TOPOGRAFICA

- CURVA DE NIVEL
- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- CARRTERA PAVIMENTADA
- TERRACERA
- MEZCLA
- VIA DE FF CC
- LMITE ESTATAL
- POBLACION
- PBA

GEOLOGICA

- CONTACTO GEOLOGICO
- FALLA NORMAL
- FALLA NORMAL INVERSA

ESTRATIGRAFICA

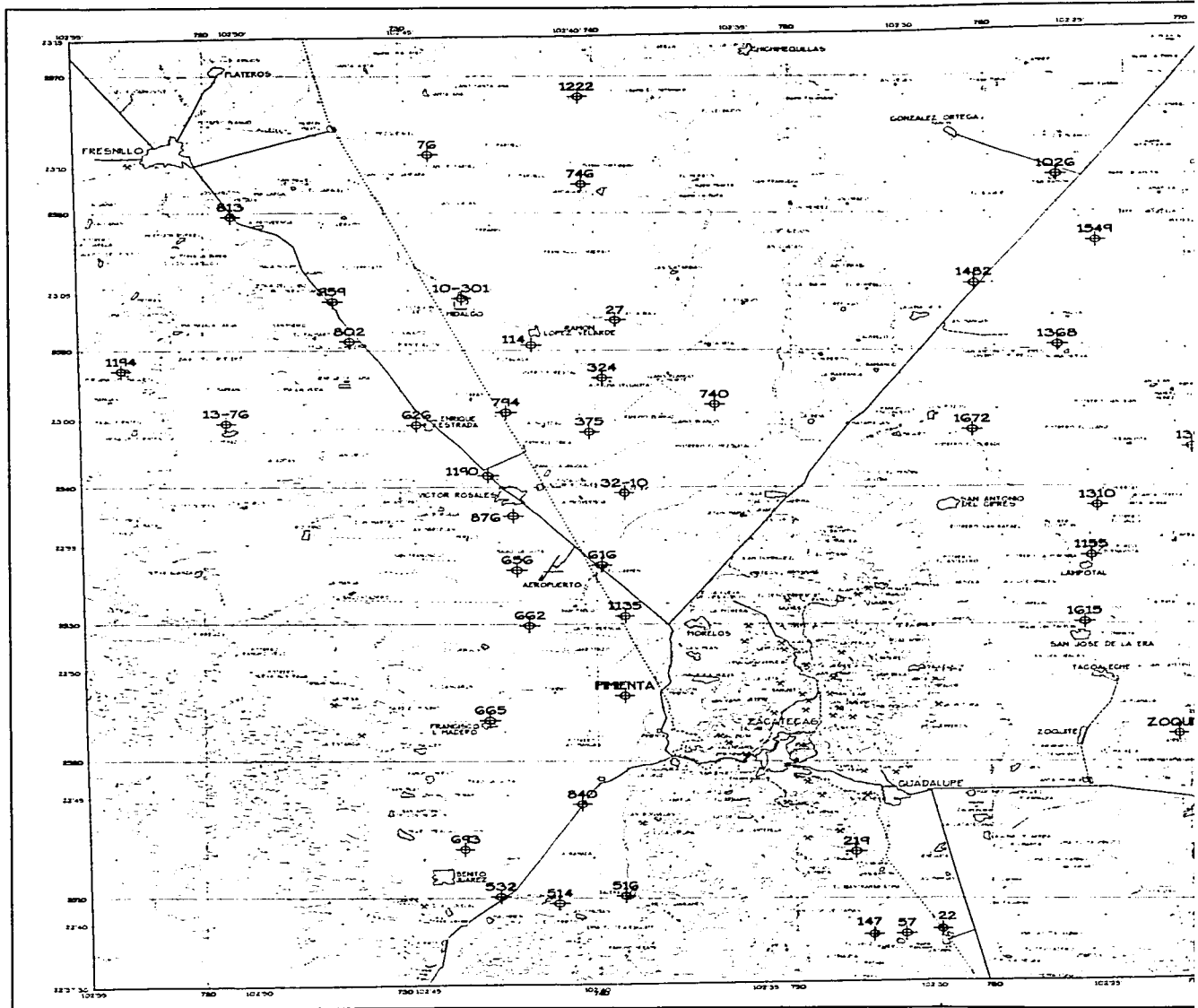
- Qal DEPOSITOS ALUVIALES
- Qal BASALTOS CUATERNARIOS
- Tarv VULCANISMO TERCIARIO
- Tru INTRUSIVOS TERCIARIOS
- Trc CONGLOMERADO ROJO ZACATECAS
- Fca FORMACION CARACOL
- Fca FORMACION INDIURA
- Fca CALIZA FORTUNA Y CALIZA CERRO GORDO
- Fca FORMACION CHILITOS
- Fca FORMACION HAZAS
- Fca FORMACION ZACATECAS

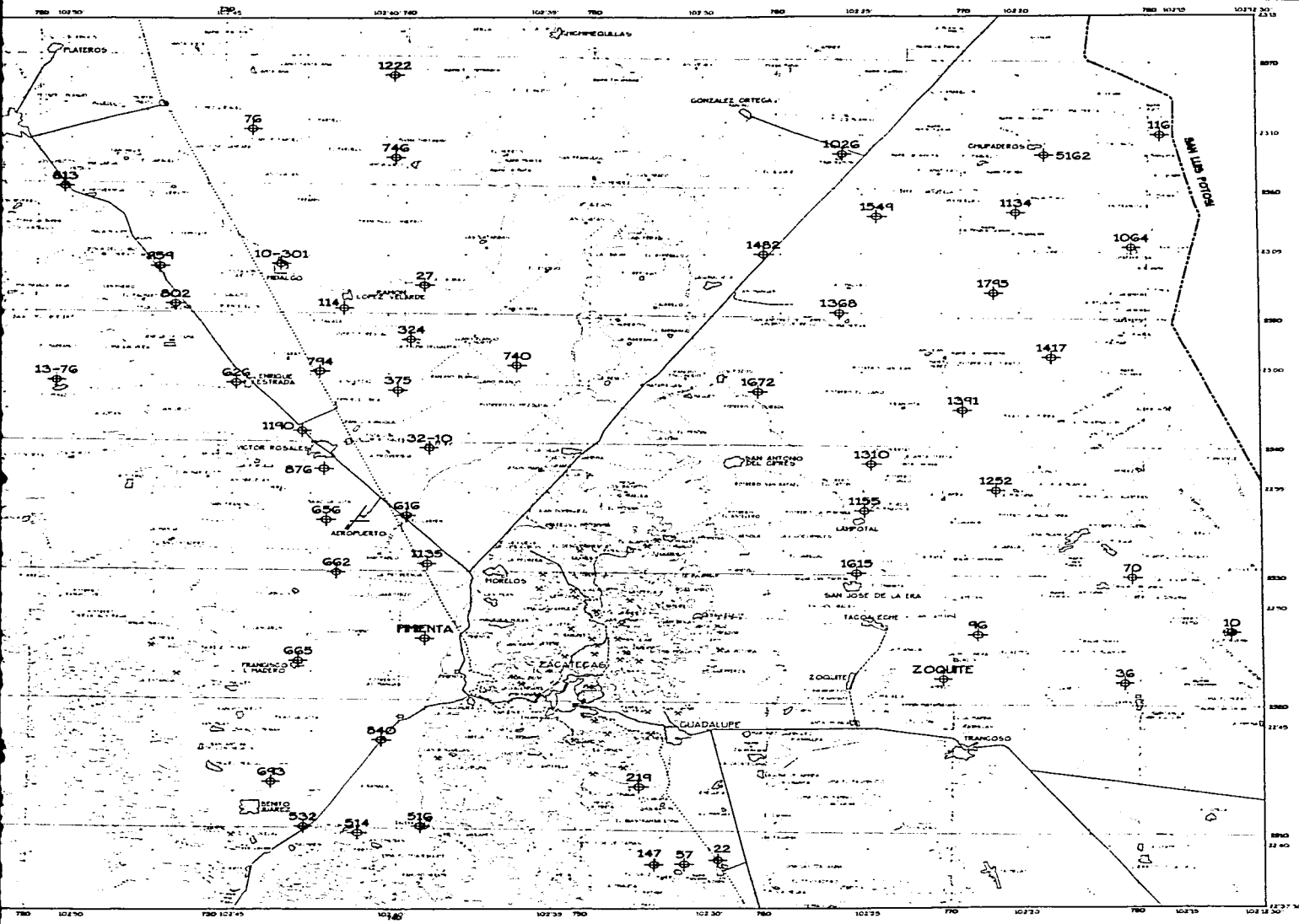


ESCALA GRAFICA (KM)

EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 M

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO Facultad de Ingeniería	
Tesis Profesional	
GEOLOGICO	
Sergio Yussim Guerneros	
Julio de 1997	Escala 1 : 275.000
Mapa	2





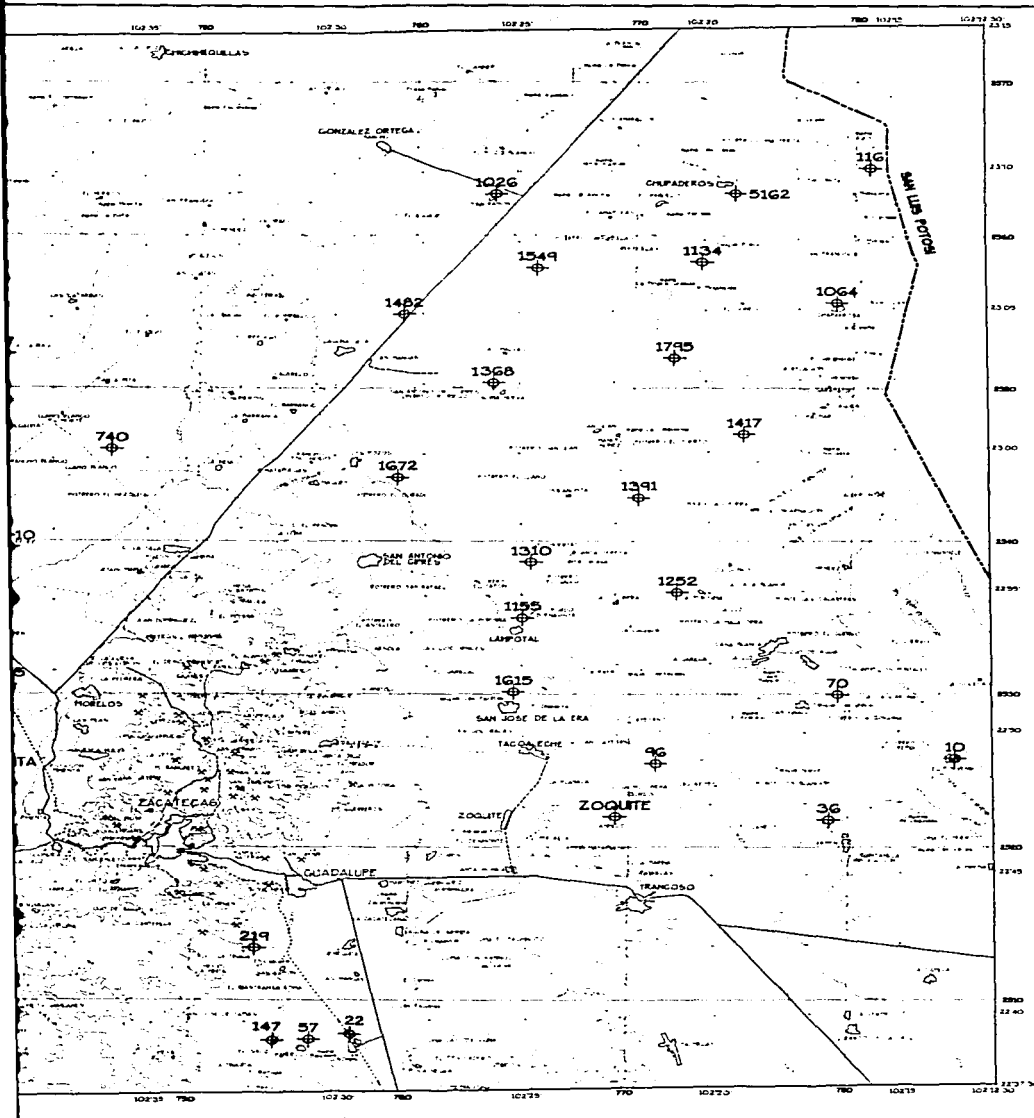
- TOPOGRAFIA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FV CC
 - LINEA ESTATAL
 - POBLACION
 - RVA

HIDROLOGIA

- APROVECHAMIENTO MUESTRA

0 1 2 3 4 5
 ESCALA GRAFICA
 EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO	
Facultad de Ingeniería	
Tesis Profesional	
APROVECHAMIENTOS	
Sergio Yussim Guzmán	
Julio de 1997	Escuela

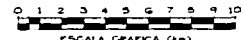


CROQUIS DE LOCALIZACION



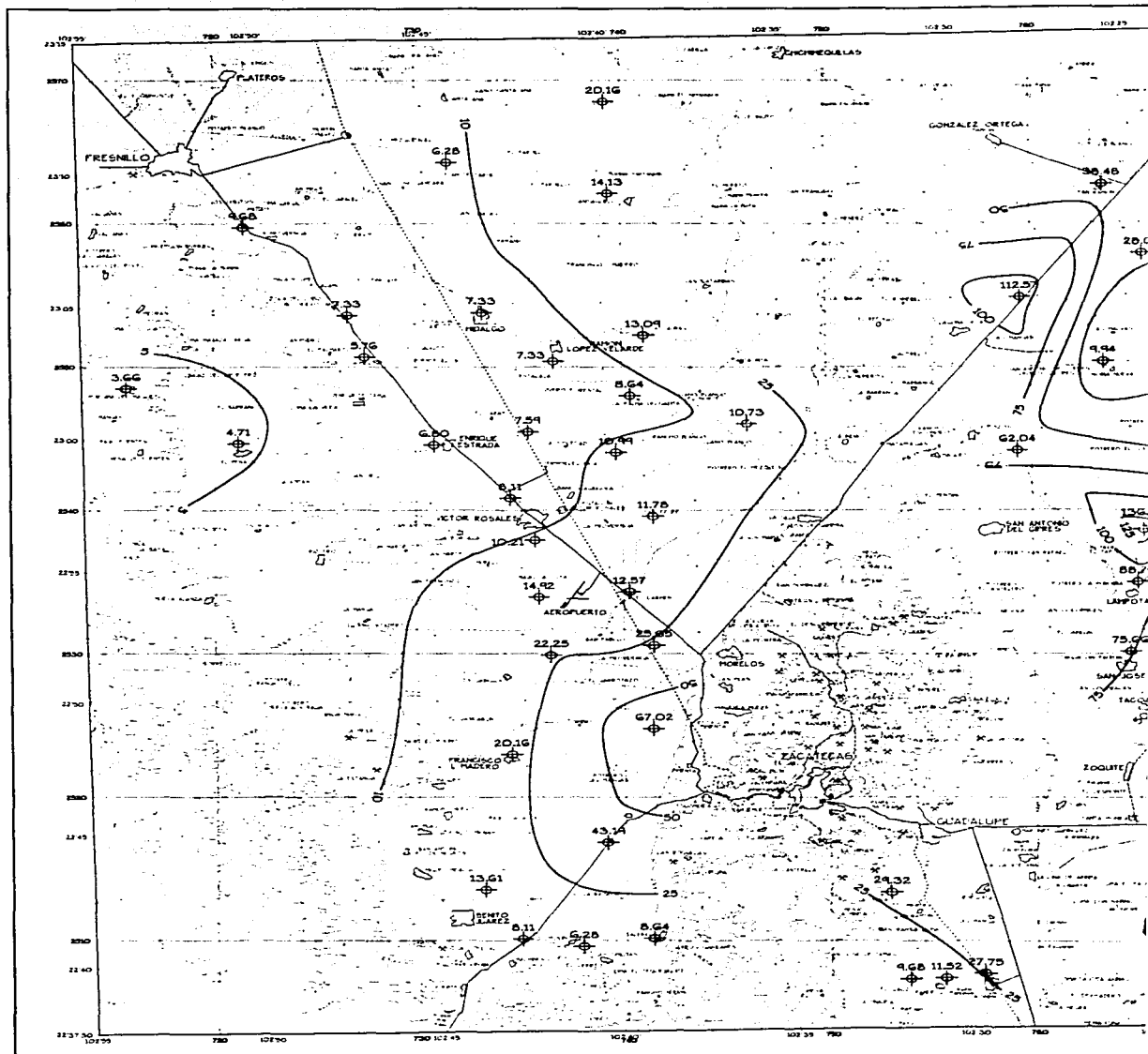
LEYENDA

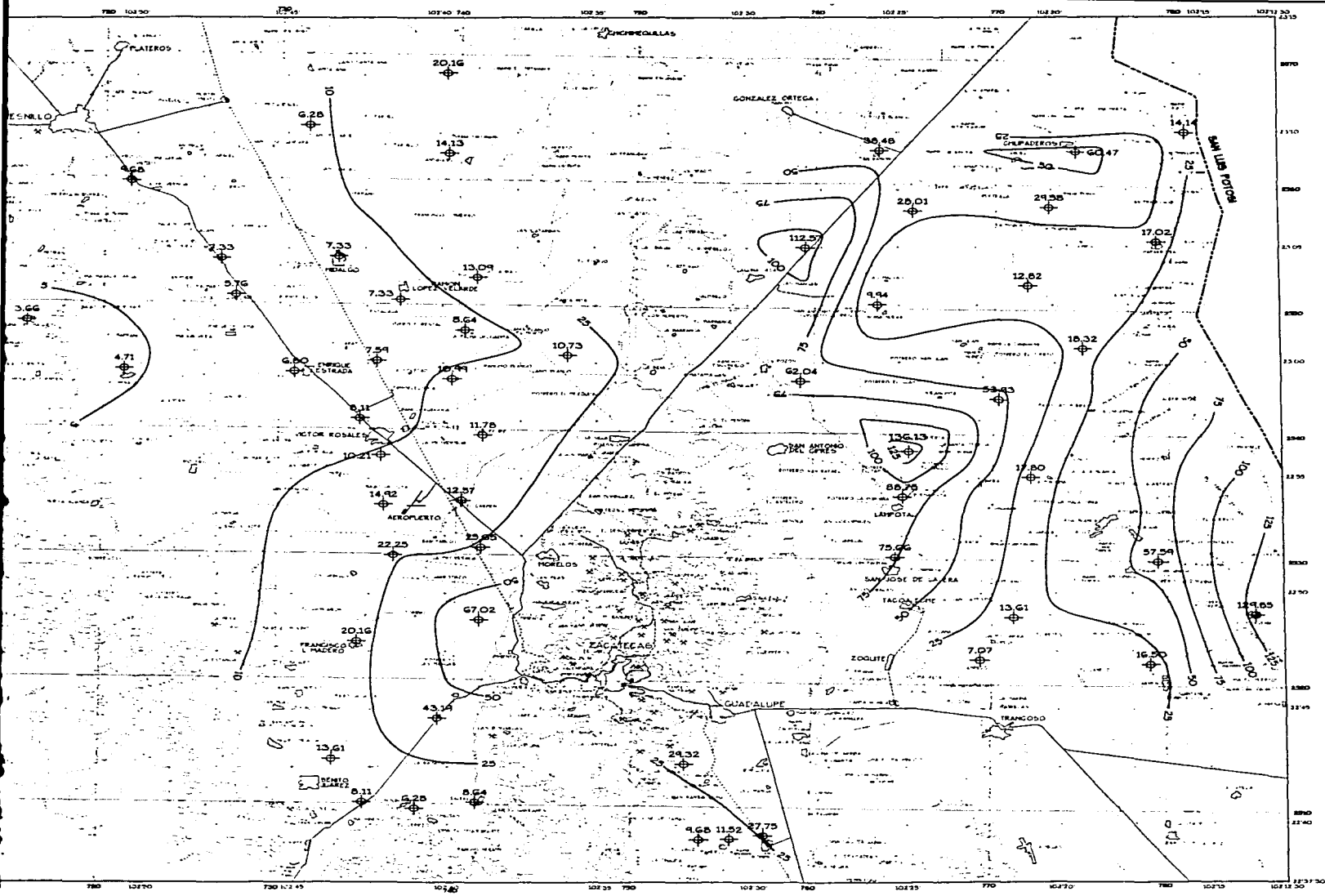
- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL _____
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA _____
 - CARRTERA PAVIMENTADA _____
 - TERRACERA _____
 - BRECHA _____
 - VIA DE FF CC _____
 - LINTE ESTATAL _____
 - POBLACION _____
 - RELA _____
- HIDROLOGICA**
- APROVECHAMIENTO MUESTREADO _____ GG5



ESCALA GRAFICA (KM)
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
Facultad de Ingenieria	
Tesis Profesional	
APROVECHAMIENTOS MUESTREADOS	
Sergio Yussim Guarneros	
Julo de 1997	Escala 1 : 275,000
Mapa	3



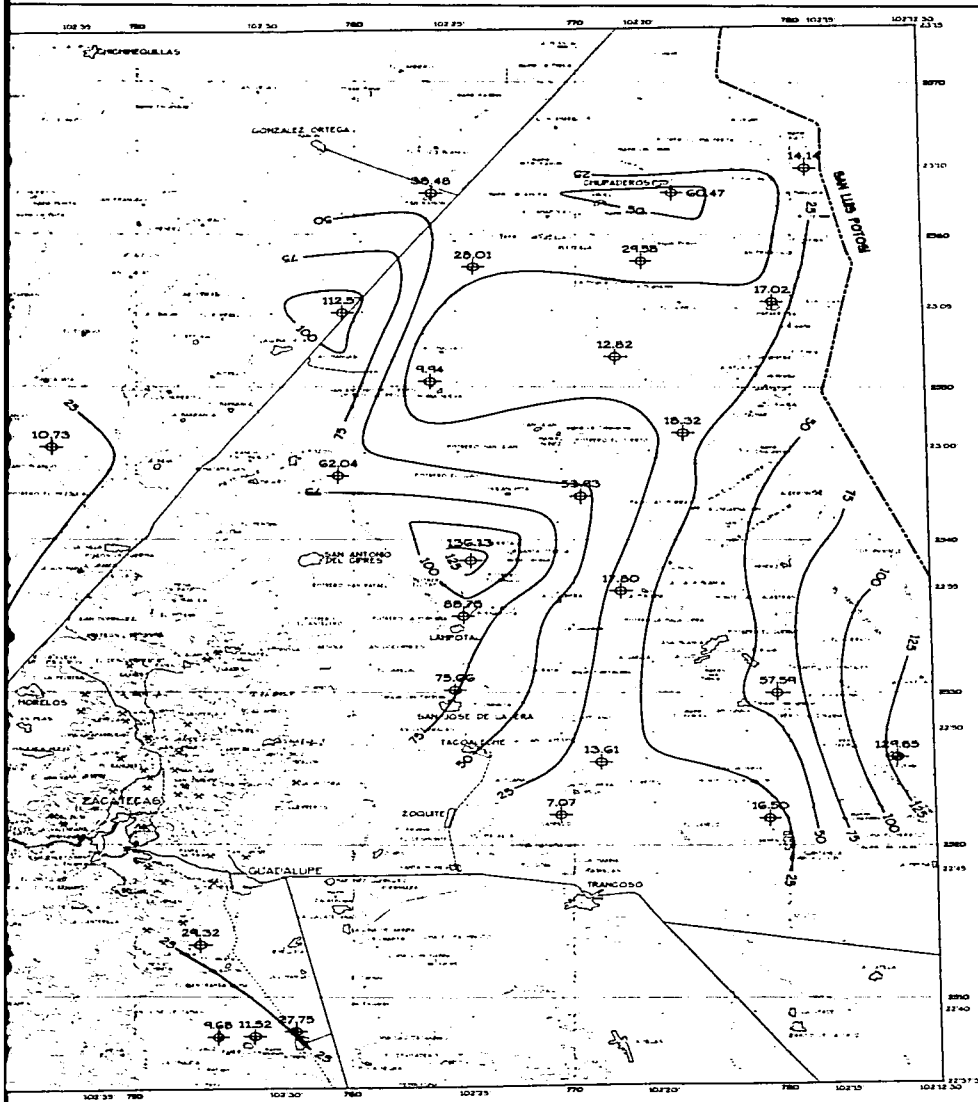


- TOPOGRAFIA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO
 - CARRERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FERROVIARIO
 - LINEA ESTADAL
 - POBLACION
 - FINCA

- HIDEOLOGIA**
- APROVECHAMIENTO
 - CURVA DE ISOCALIENTES



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 Facultad de Ingeniería
 Tesis
 CONTENIDO
 Sergio Yur...
 Julio de 1997



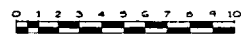
GRUPOS DE LOCALIZACION



LEYENDA

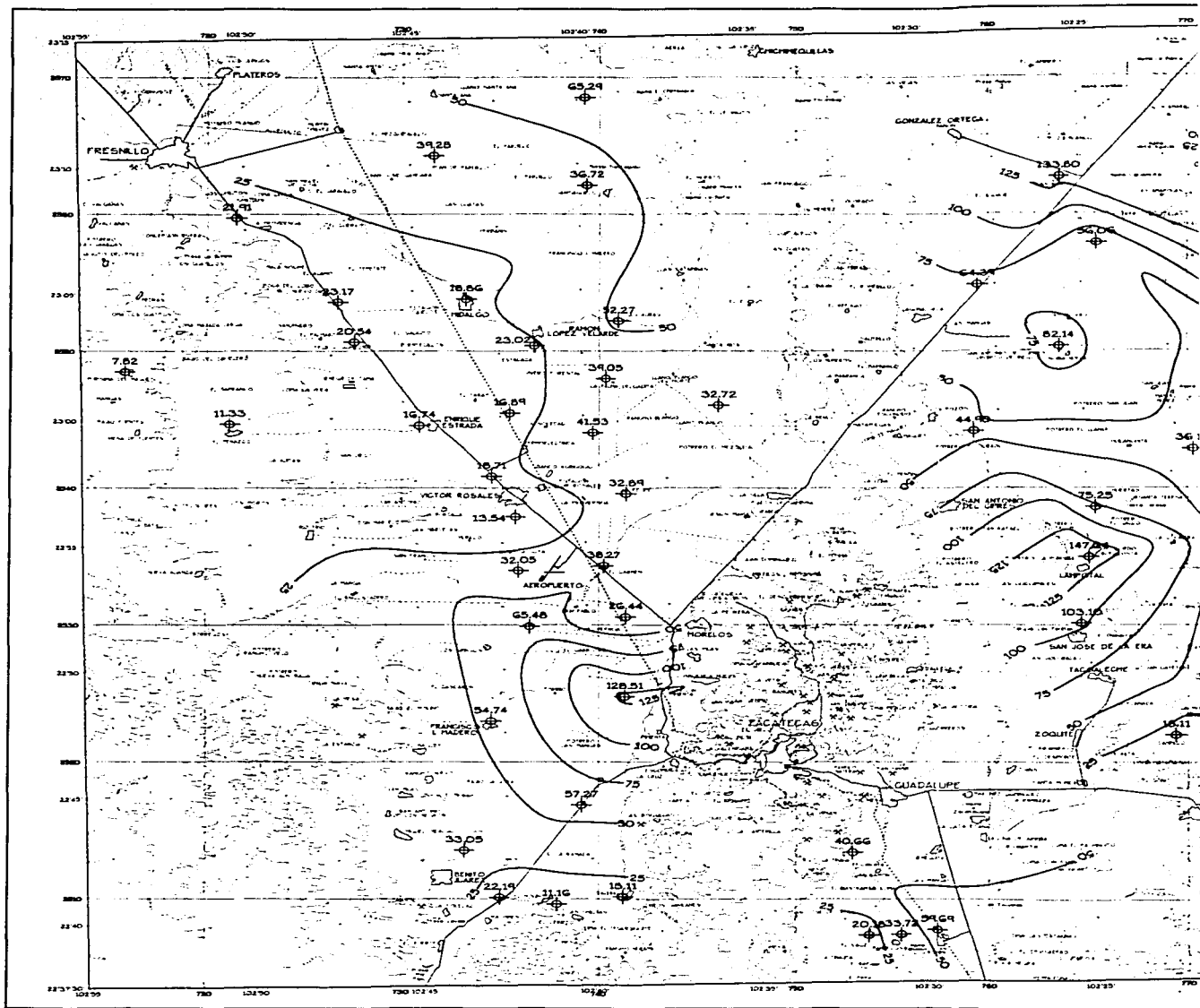
- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FF CC
 - LINTE ESTATAL
 - POBLACION
 - RINA

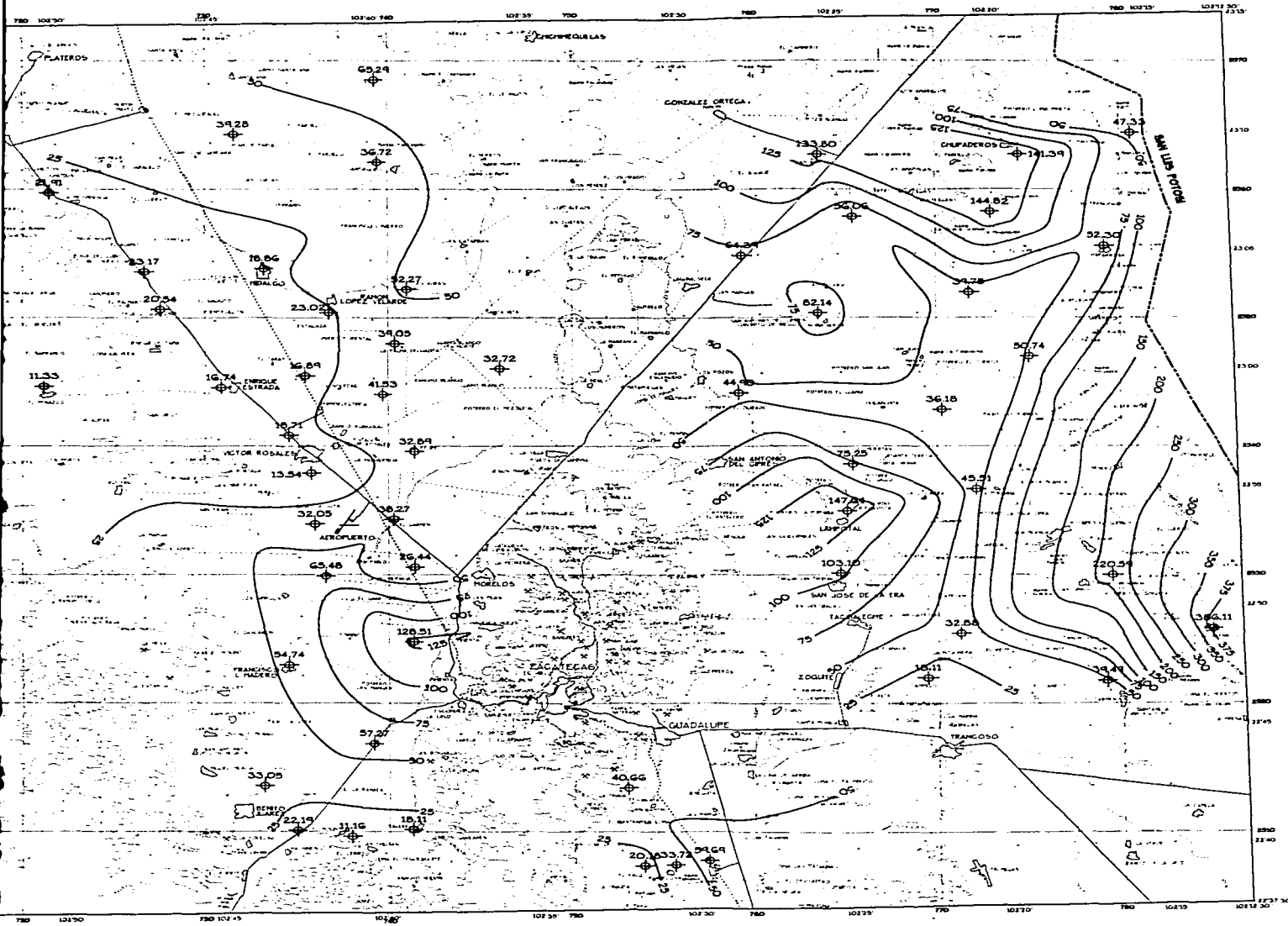
- HIDROLOGICA**
- APROVECHAMIENTO PUESTREADO
 - CURVA DE ISOCONTENIDO



ESCALA GRAFICA (CM)
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		Mapa
Facultad de Ingenieria		
Tesis Profesional		
CONTENIDO DE CLORUROS		
Sergio Yussim Guerneros		4
Julio de 1997	Escala 1 : 275.000	





CROQUIS DE LOC.

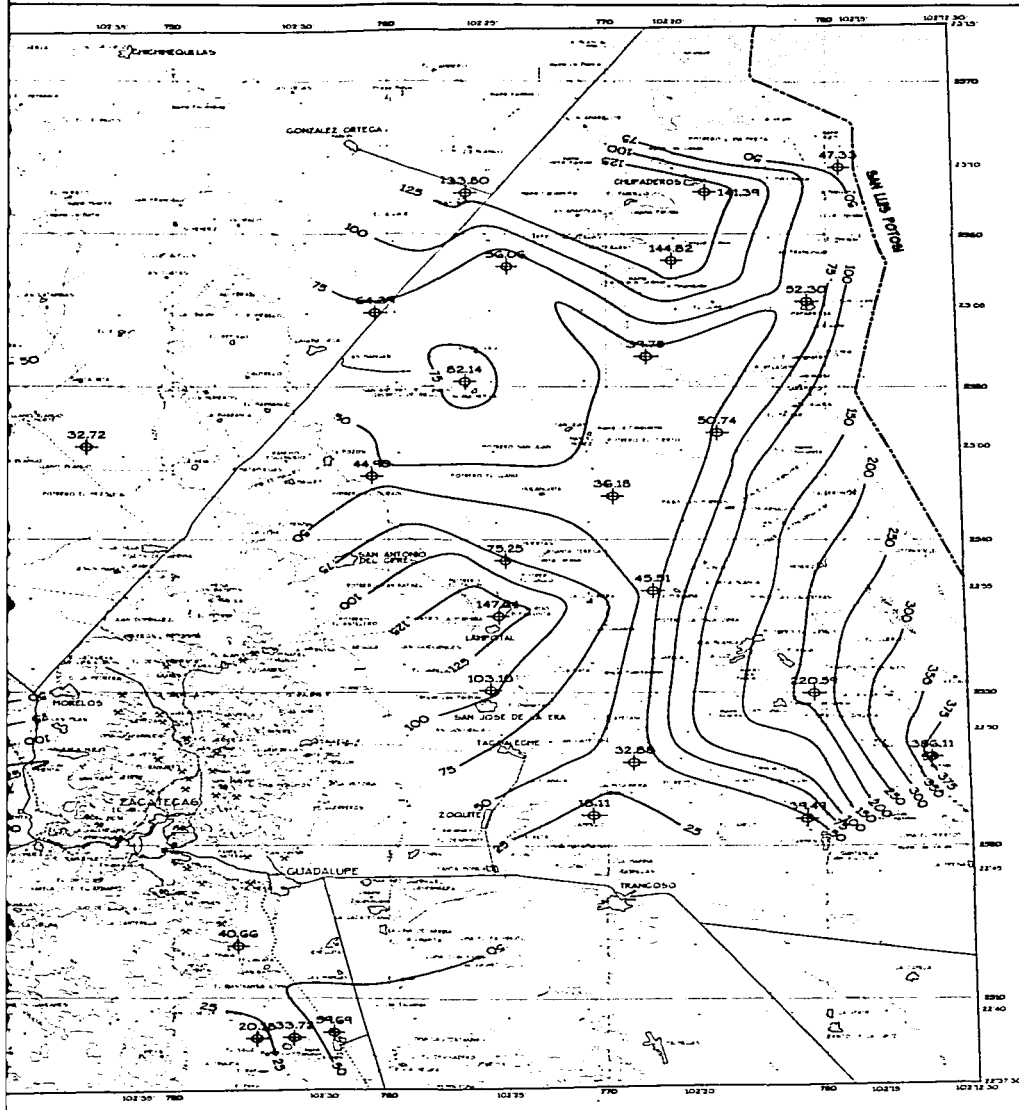


LEYENDA

- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FF CC
 - LITE ESTATAL
 - POBLACION
 - NMA
- HEZEOLOGICA**
- APROVECHAMIENTO MUESTREAD
 - CURVA DE ISOCONTENIDO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO	
Facultad de Ingeniería	
Tesis Profesional	
CONTENIDO DE LA TESIS	
Sergio Yussim Guzmán	
JUNIO DE 1947	Escuadrón



CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

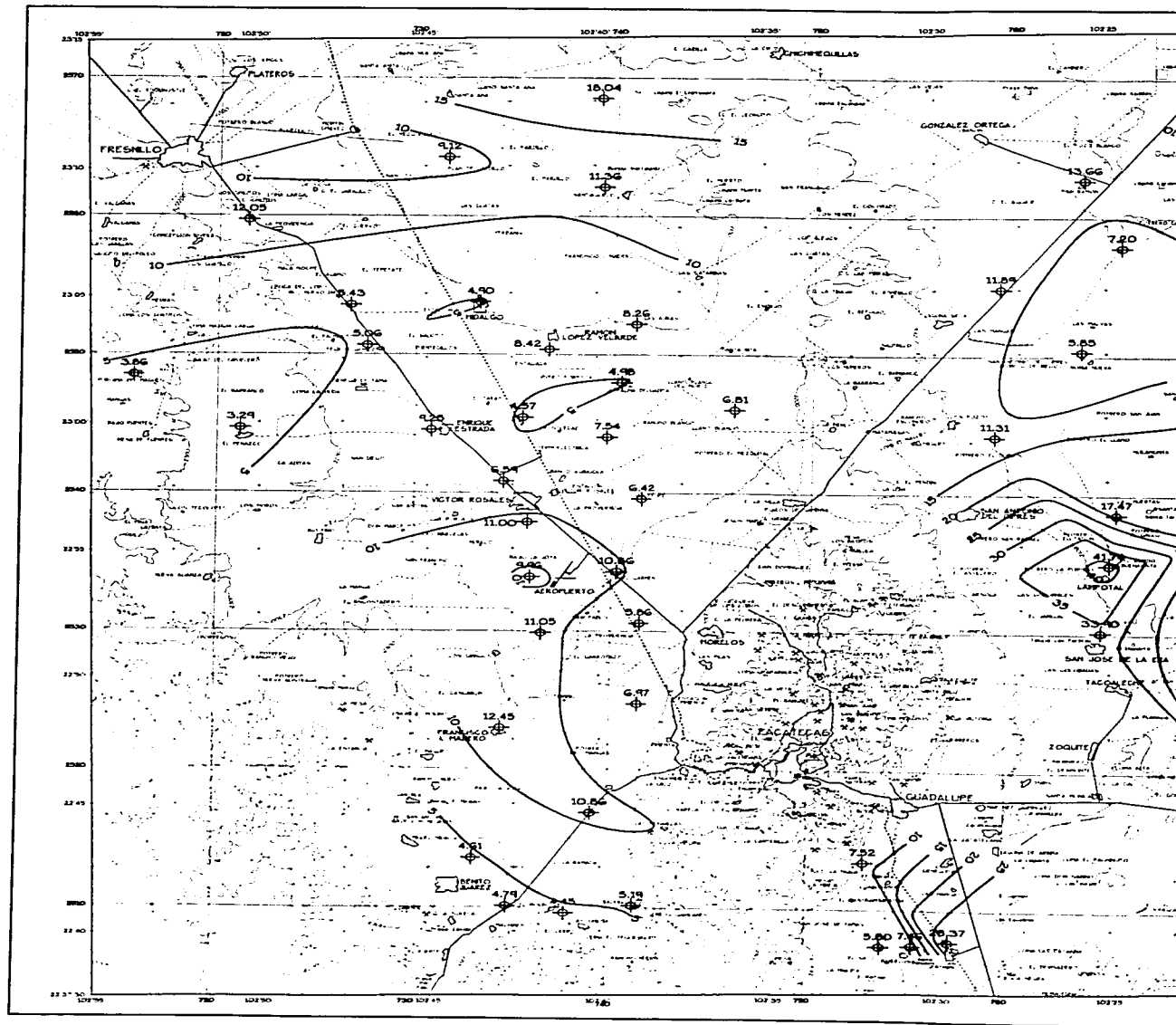
- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL _____
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA _____
 - CARRETERA PAVIMENTADA _____
 - TERRACERA _____
 - BRECHA _____
 - VIA DE FT. CC. _____
 - LINEA ESTATAL _____
 - POBLACION _____
 - HRSA _____
- HIROLOGICA**
- APROVECHAMIENTO MUESTREADO _____ 7.82
 - CURVA DE ISOCONTENIDO _____

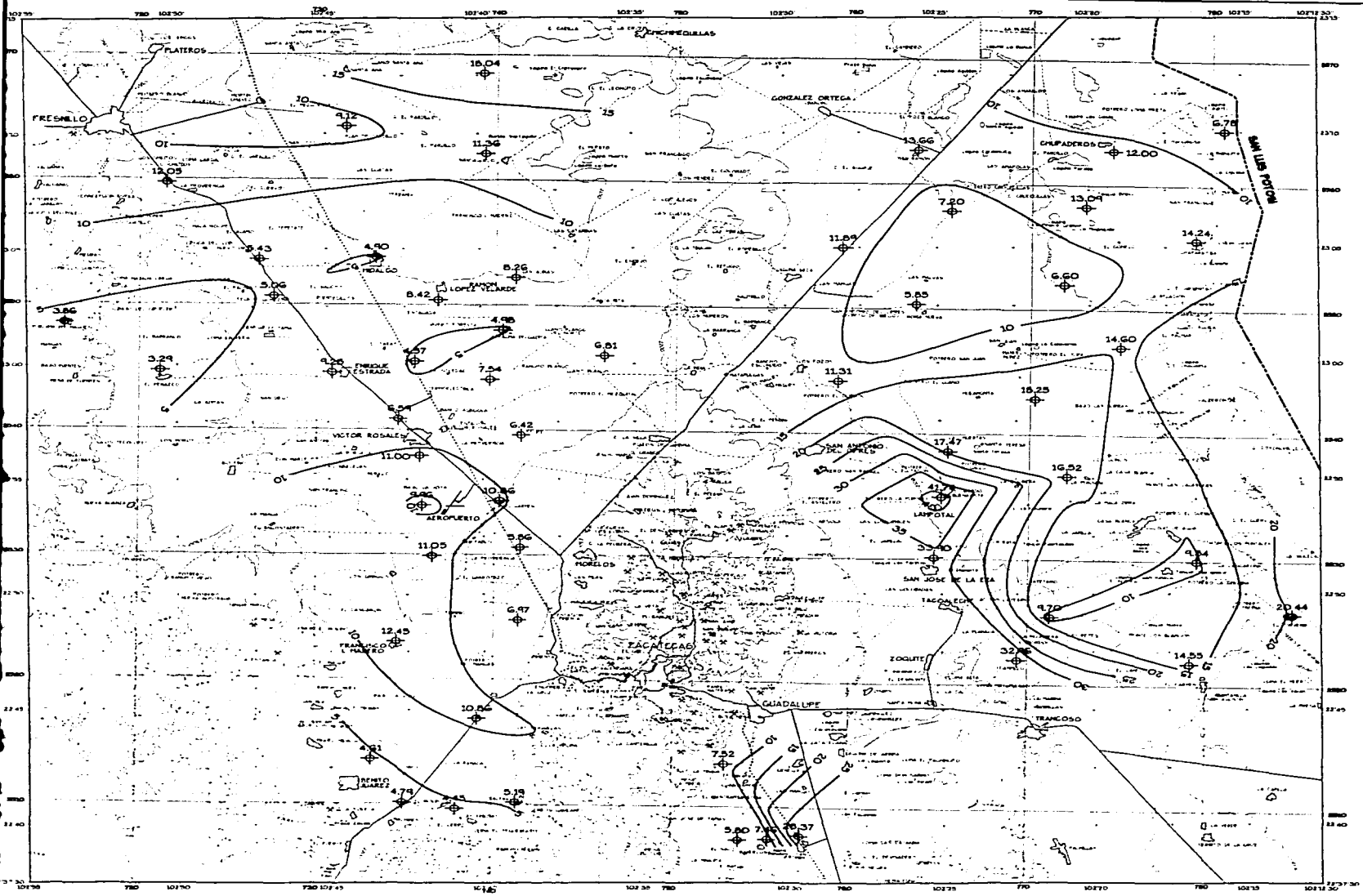


ESCALA GRAFICA (1:10)

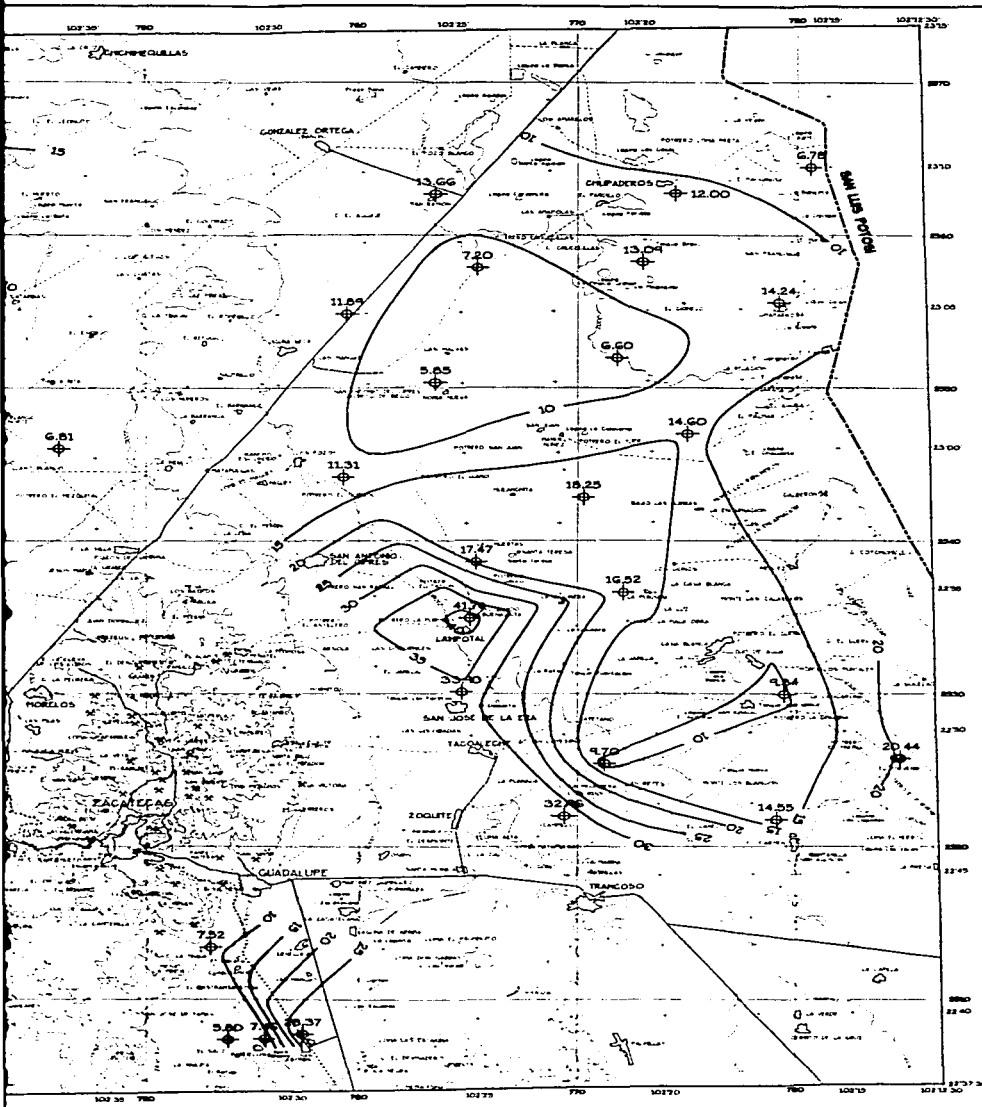
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
Facultad de Ingenieria		
Tesis Profesional		
CONTENIDO DE SULFATOS		
Sergio Yussim Guarneros		M509
Julio de 1997	Escala 1 : 275,000	5





- 10
- CURVA
- ALFAC
- CARR
- TERRA
- BRECH
- VIA DE
- LPTE
- POBLA
- FINA
- 10
- APROV
- CURVA



CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

TOPOGRAFICA

- CURVA DE NIVEL
- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- CARRETERA PAVIMENTADA
- TERMINACION
- BRECHA
- VIA DE FT CC
- LIMITE ESTATAL
- POBLACION
- RMA

HIDROLOGICA

- APROVECHAMIENTO MUESTREADO
- CURVA DE ISOCONTENIDO



ESCALA GRAFICA (KM)

EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Facultad de Ingenieria

Tesis Profesional

CONTENIDO DE NITRATOS

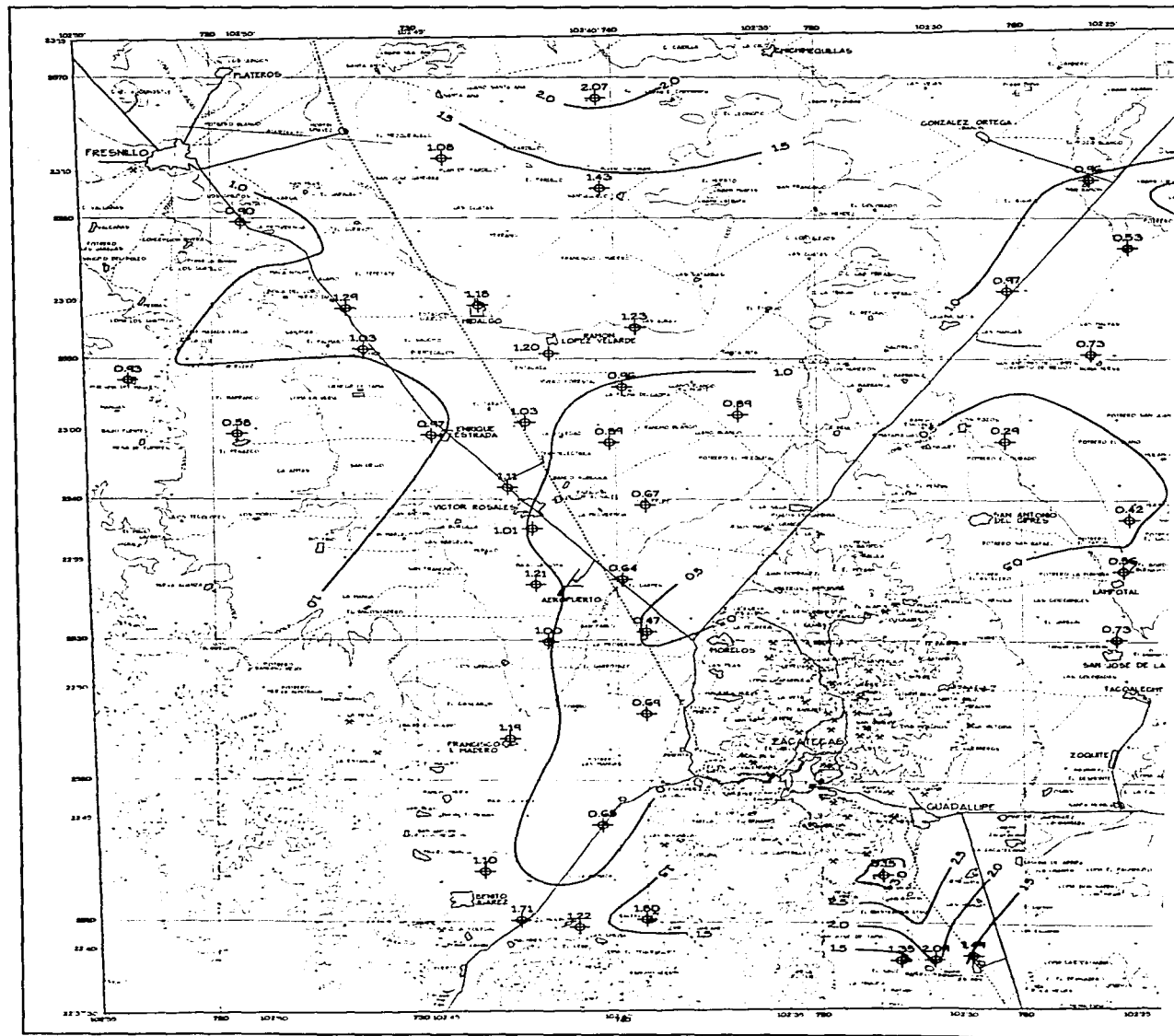
Sergio Yussim Guarneros

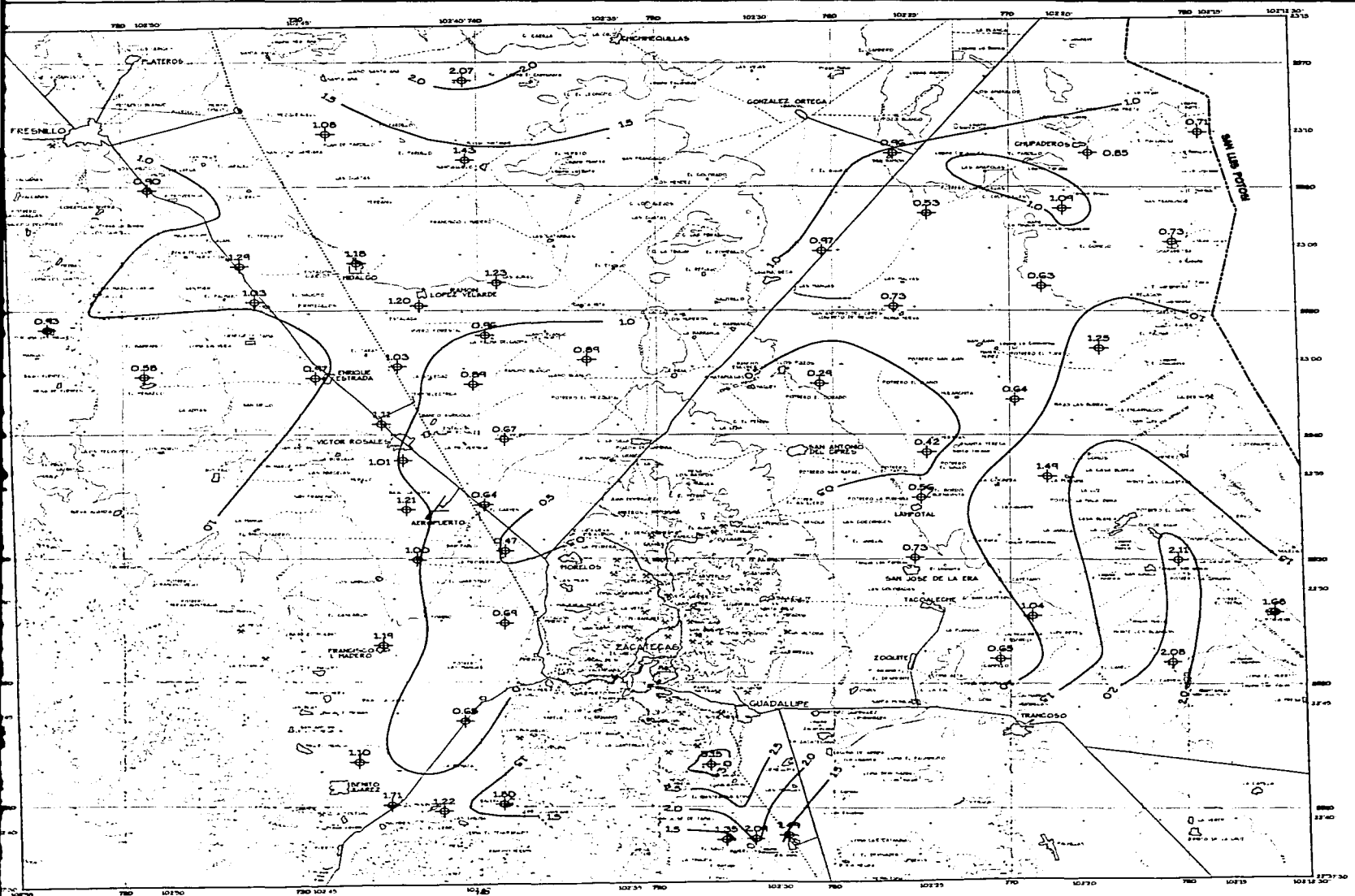
Mapa

JUNIO DE 1997

Escala 1 : 275,000

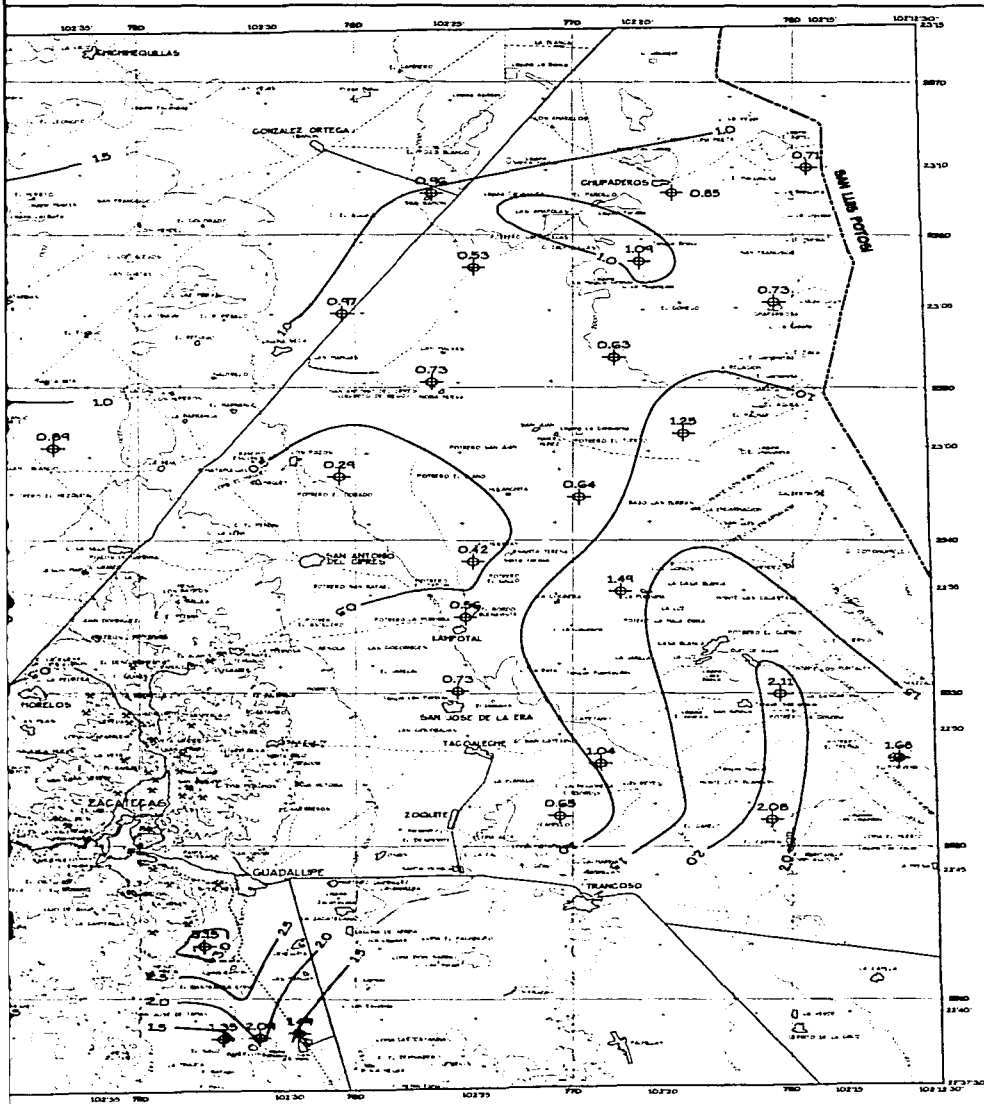
6





ITOCOG
 CURVA DE NIVEL
 ALMACENES
 CARRETERA
 TORRECIERA
 BRECCIA
 VIA DE FF C
 LINTE ESTAD
 POBLACION
 MERA

MICROLO
 APROVECHAM
 CURVA DE NIV



CROQUIS DE LOCALIZACION



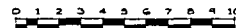
LEYENDA

TOPOGRAFICA

- CURVA DE NIVEL
- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- CARRETERA PAVIMENTADA
- TERRACERA
- BRECHA
- VIA DE FT. CC
- LIMITE ESTATAL
- POBLACION
- RNA

HIDROLOGICA

- APROVECHAMIENTO MUESTREADO
- CURVA DE ISOCONTENIDO



ESCALA GRAFICA (CM)
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Facultad de Ingenieria

Tesis Profesional

CONTENIDO DE FLUORUROS

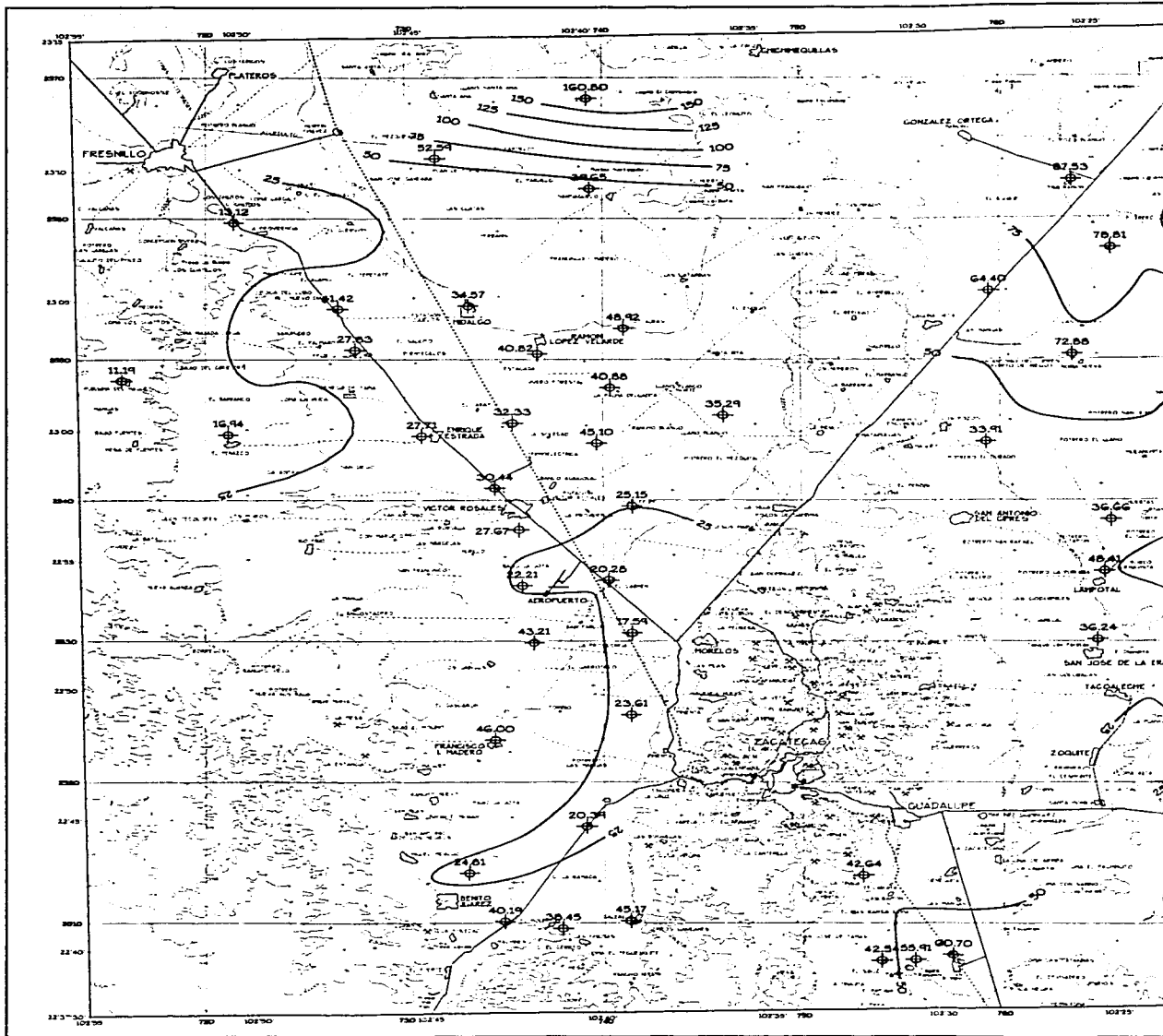
Sergio Yussim Guerneros

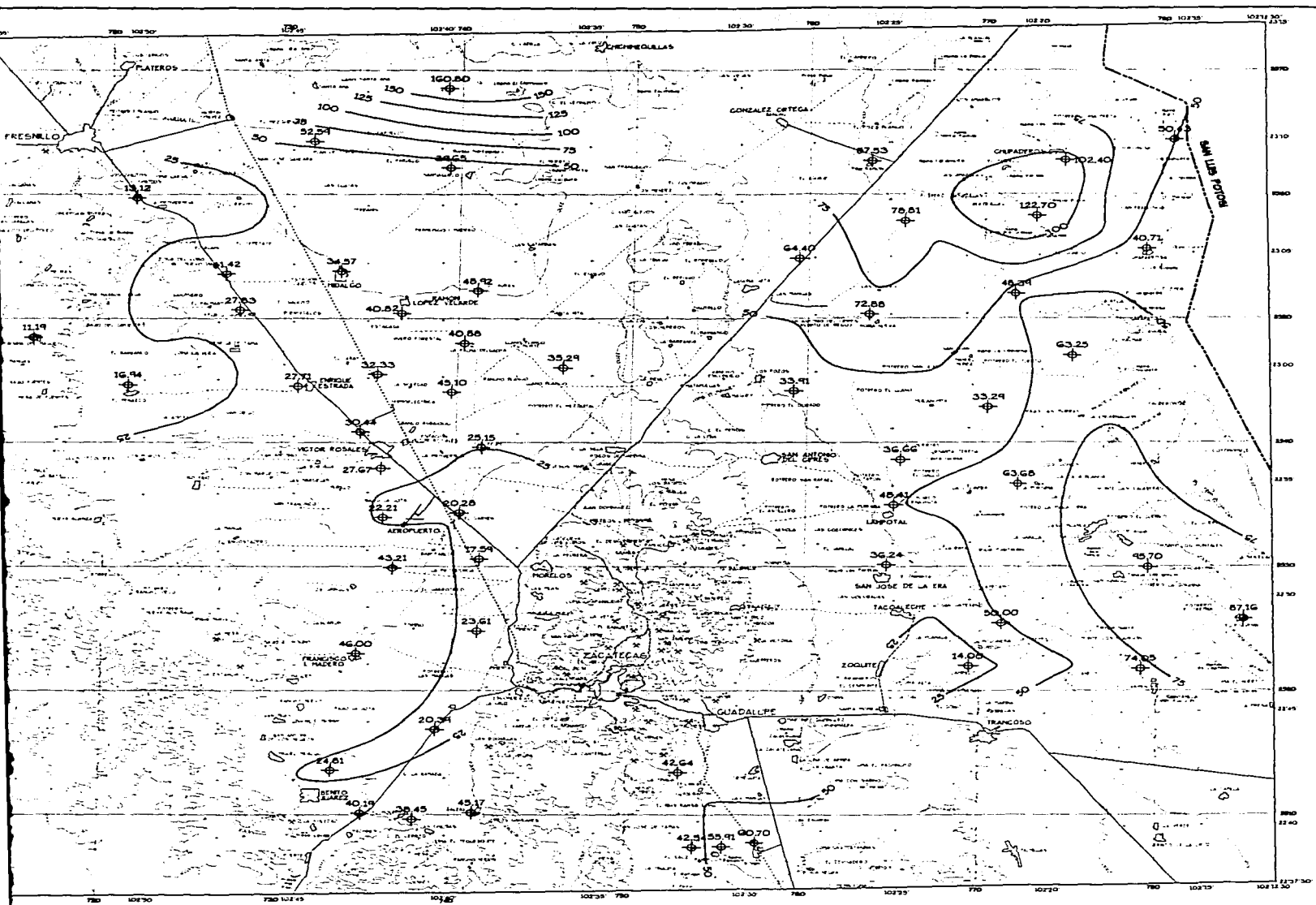
Mapa

Julio de 1997

Escala 1 : 275,000

7





CRO

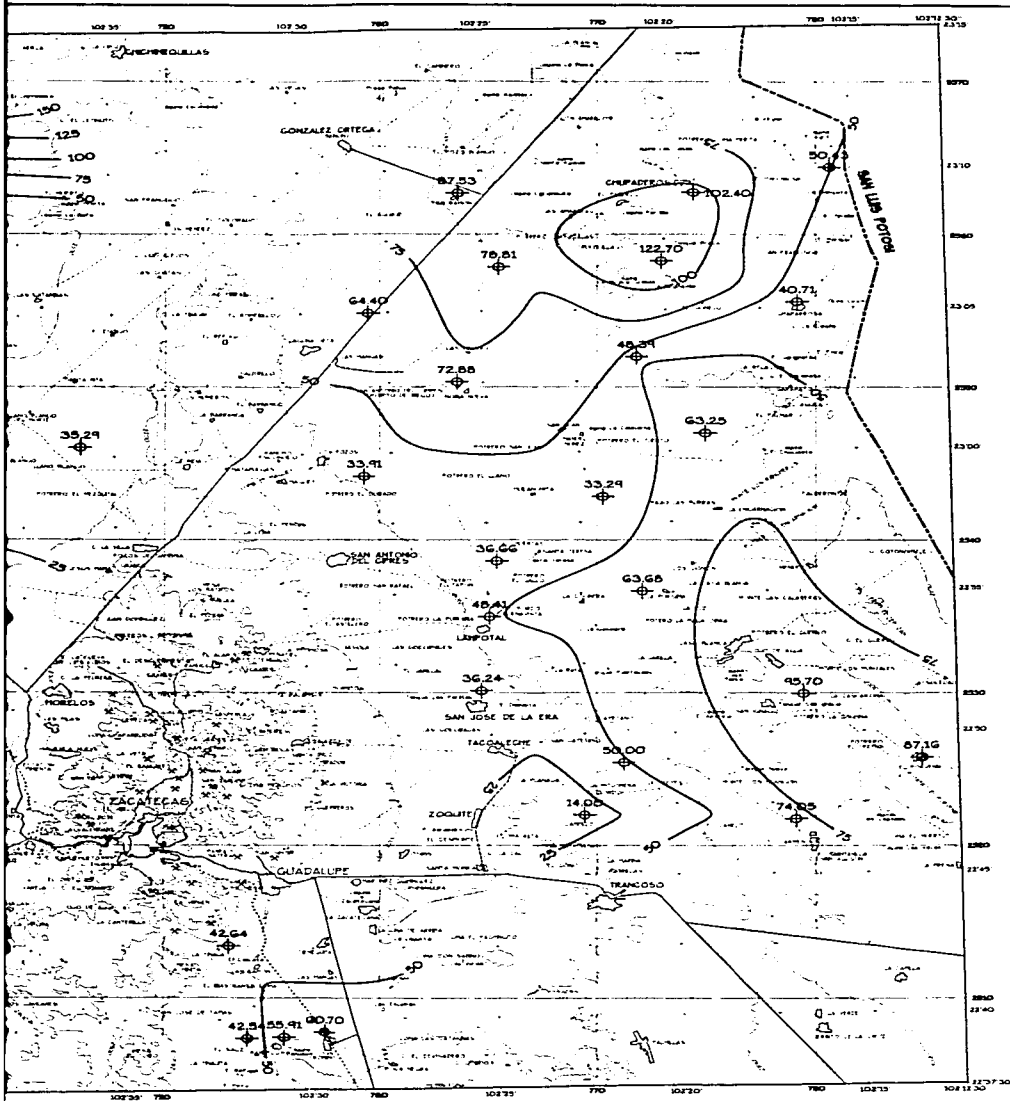
TOPOGRAFIA
 CURVA DE NV. ALMACENAMIENTO
 CARRERA PA TERRACERA
 BRECHA
 VIA DE FT. CO.
 LPTE. ESTATAL
 POBLACION
 MNA

HIDEOLOG. APROVECHAMIENTO
 CURVA DE ISO

0 1 2

 E
 EQUIDISTANCIA

UNIVERSIDAD NACIONAL
Facultad de Geografía
Tesis
CONT
 Sergio Yus
 Julio de 1997



CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

TOPOGRAFICA

- CURVA DE NIVEL
- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- CARRTERA PAVIMENTADA
- TERRACERA
- DRECHA
- VIA DE FV CC
- LINTE ESTATAL
- POBLACION
- FINA

HIDEOLOGICA

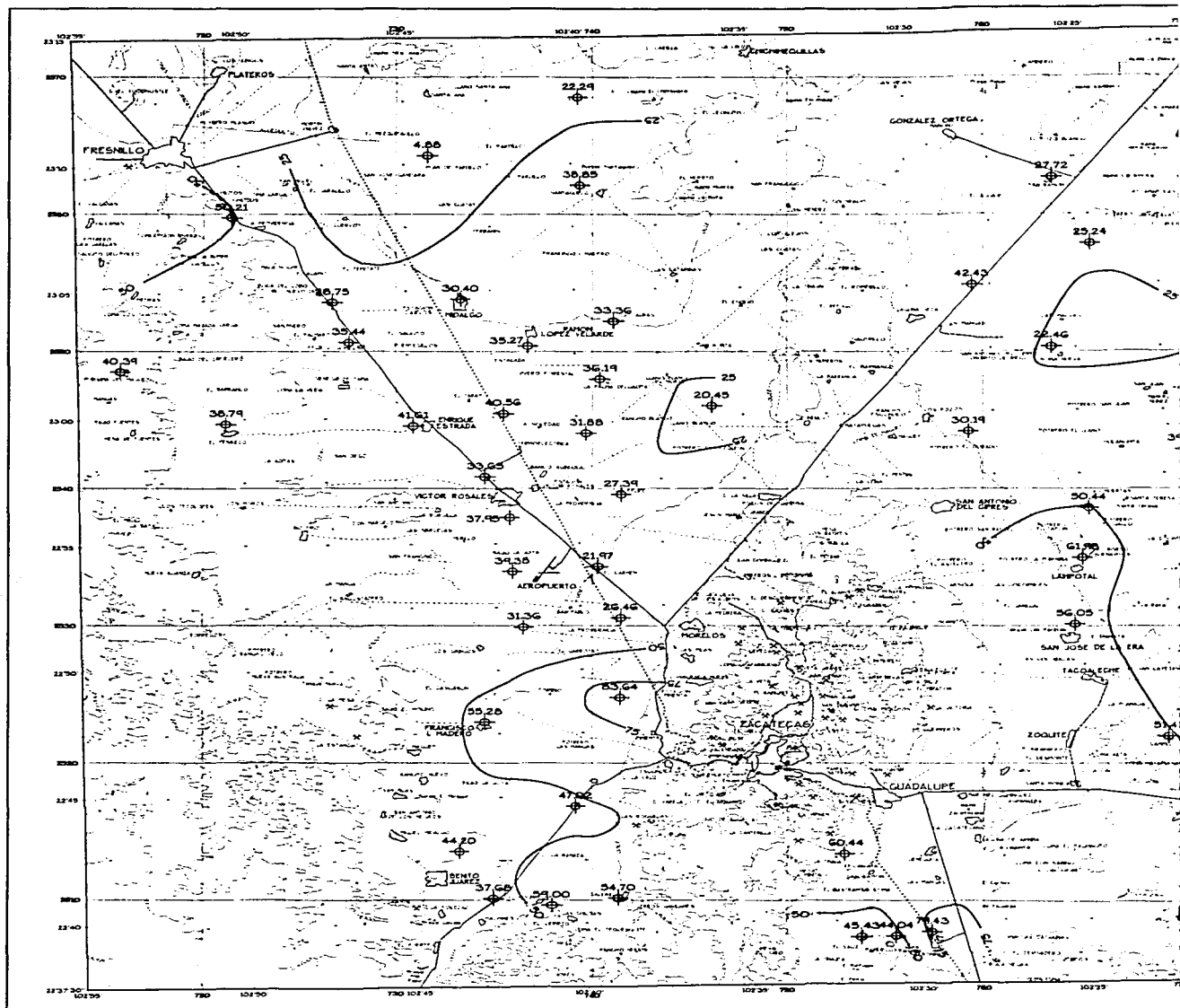
- APROVECHAMIENTO MUESTREADO
- CURVA DE ISOCONTENIDO

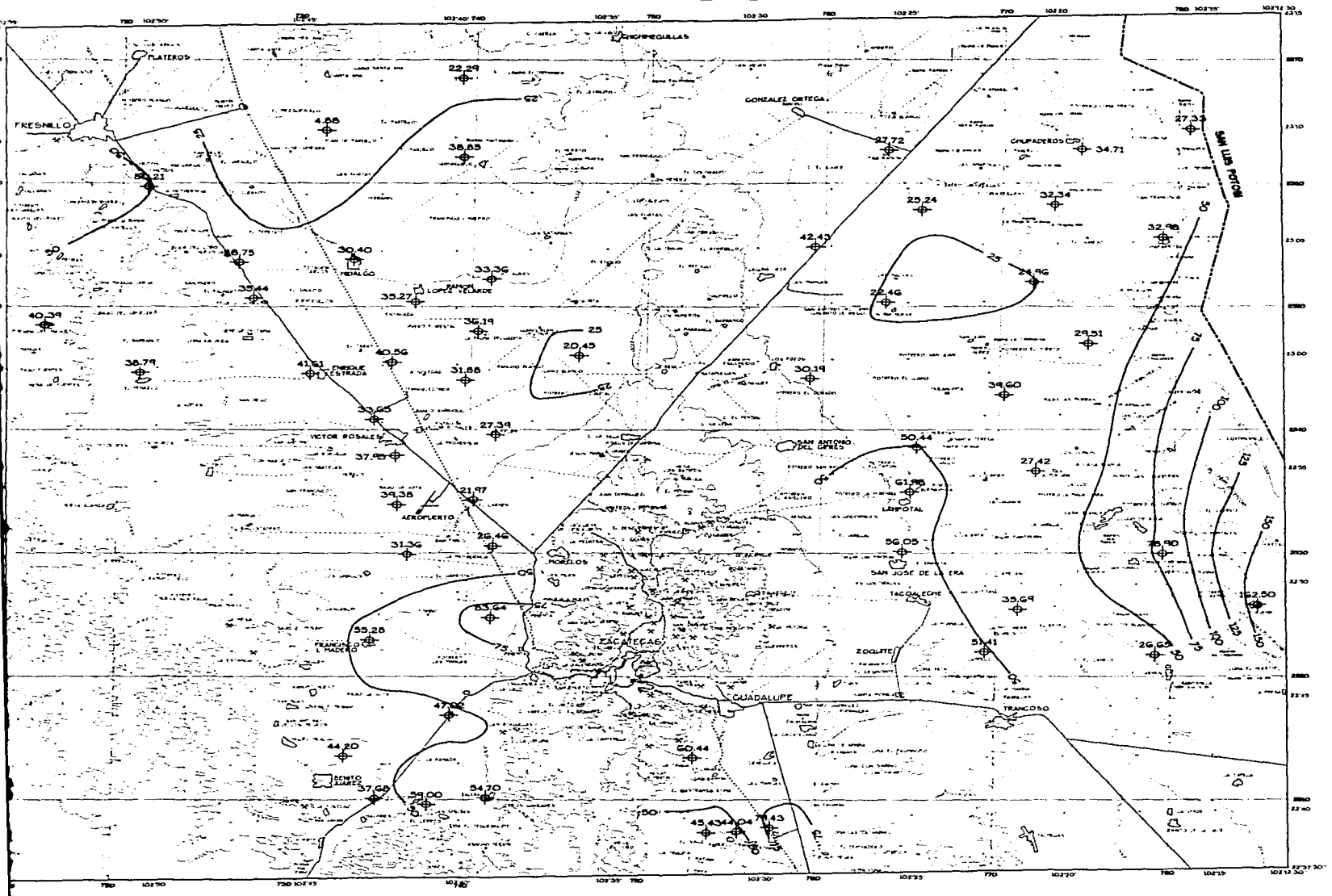


ESCALA GRAFICA (CM)

EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
Facultad de Ingenieria	
Tesis Profesional	
CONTENIDO DE SODIO	
Sergio Yussim Guarneros	
Mapa	8
Julio de 1997	Escala 1 : 275.000



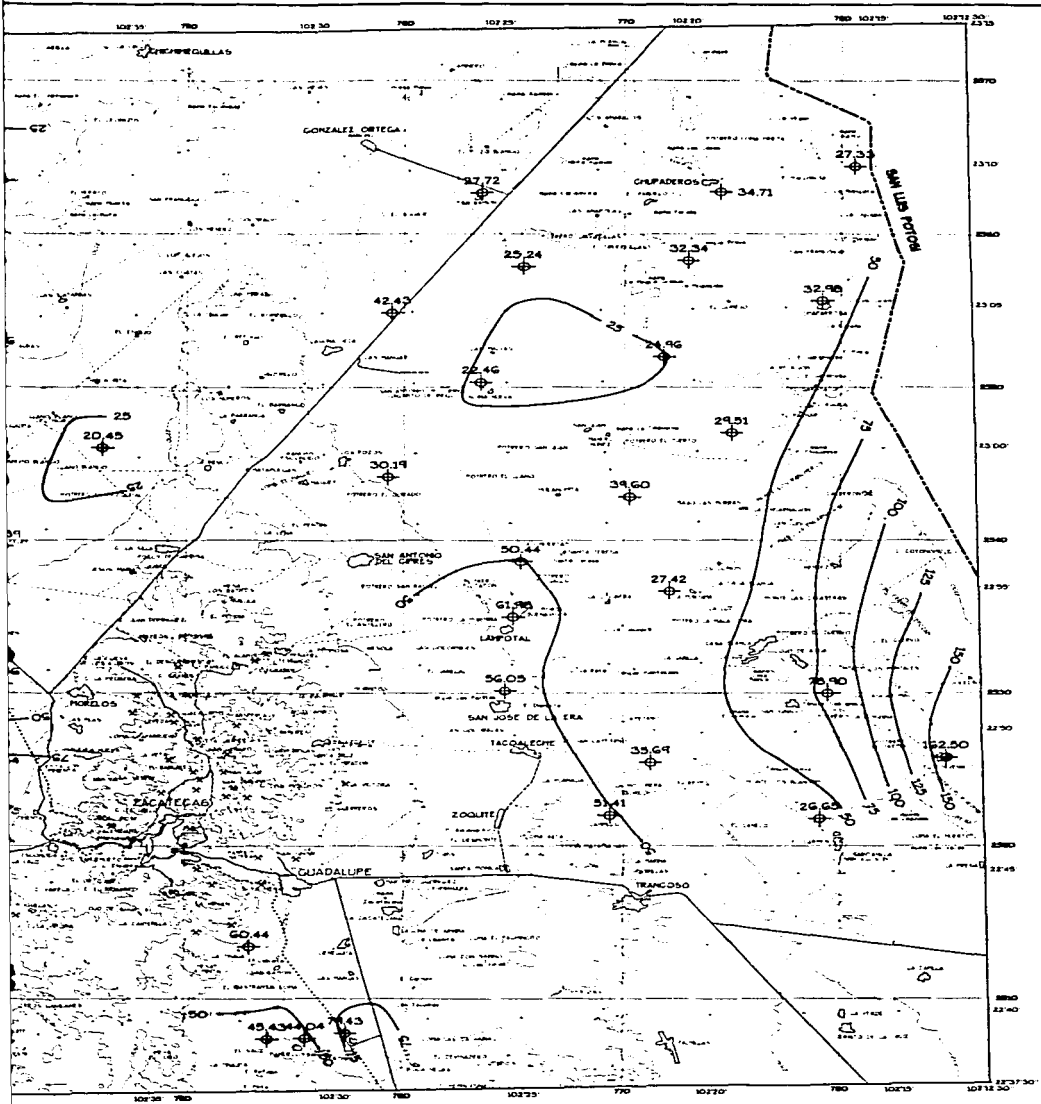


IOEG
 CURVA DE
 ALMACENA
 CARRICER
 TERRACER
 BRECHA —
 VIA DE FE
 LIMITE EST.
 POBLACION
 RMA

IDEDI
 APROVECH
 CURVA DE

EQLIDISTAR

UNIVERSIDAD N
 Facult
 Tes
 CON
 Sergio Y
 Julio de 1917

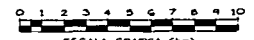


CROQUIS DE LOCALIZACION



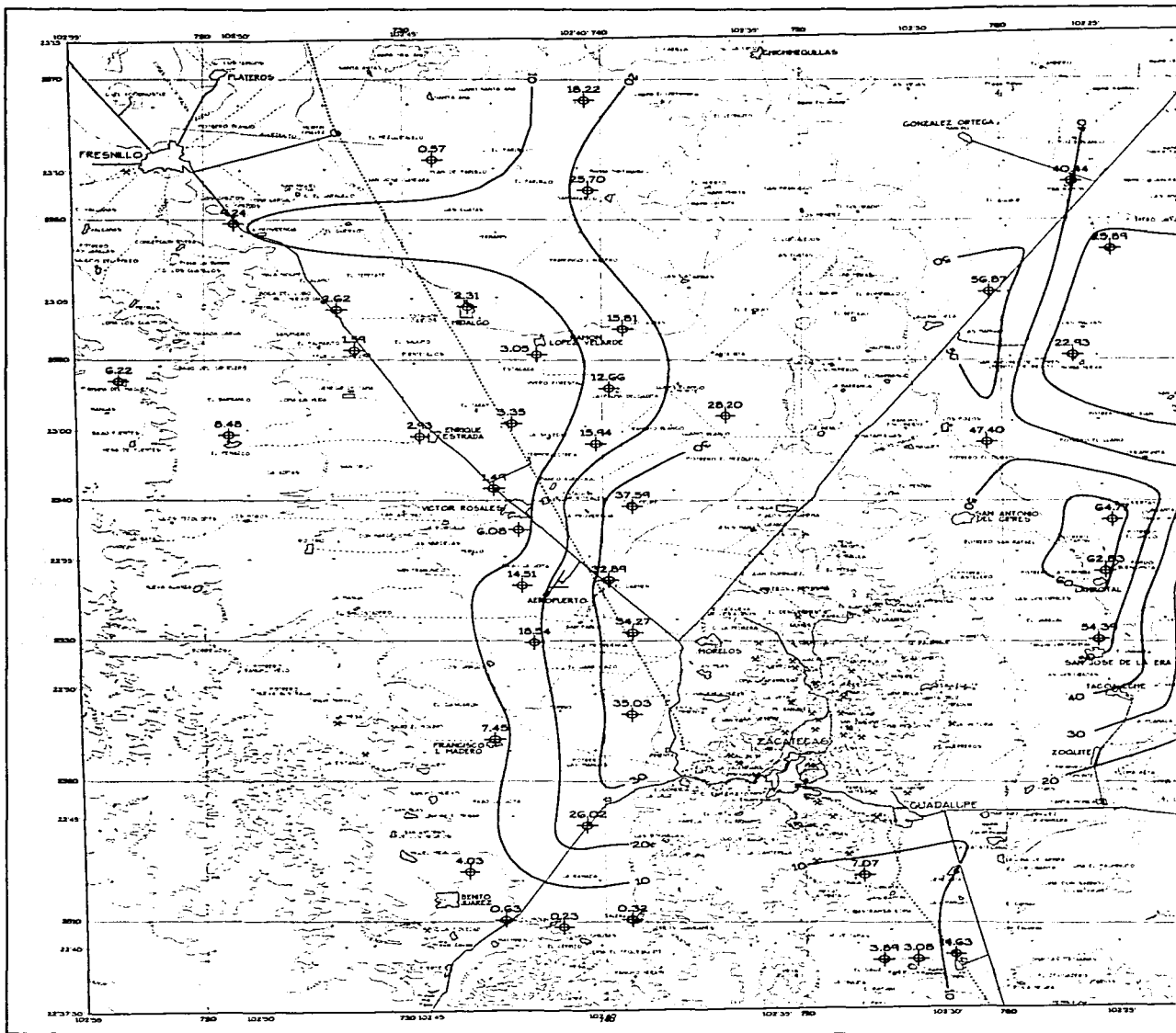
LEYENDA

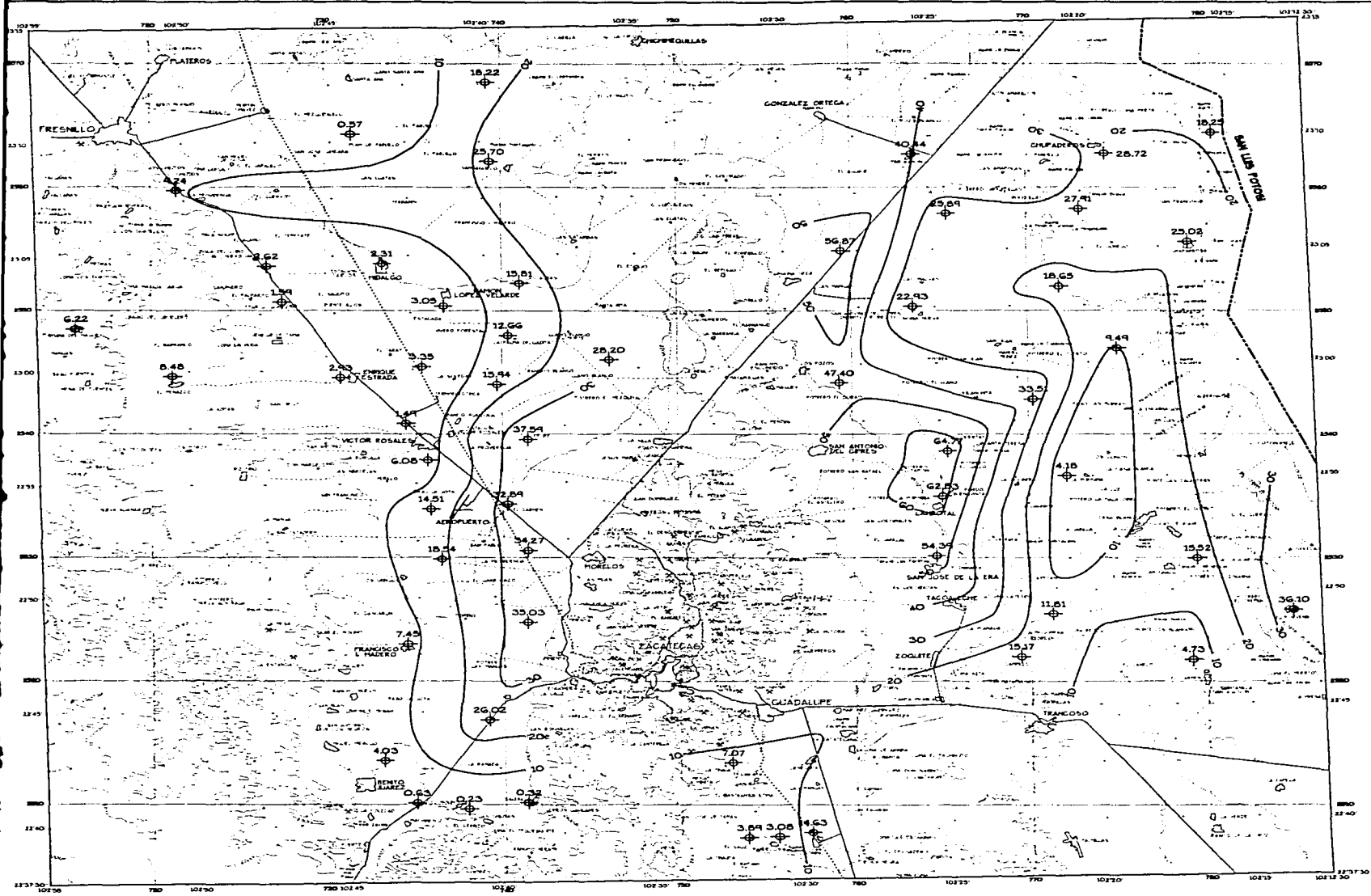
- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL _____
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA _____
 - CARRETERA PAVIMENTADA _____
 - TERRACERA _____
 - DRENAJE _____
 - VIA DE FF CC _____
 - LINEA ESTATAL _____
 - POBLACION _____
 - RIBA _____
- HIDEOLOGICA**
- APROVECHAMIENTO MUESTREADO _____ 40.39
 - CURVA DE ISOCONTENIDO _____ 25



ESCALA GRAFICA (cm)
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		Mapa 9
Facultad de Ingenieria		
Tesis Profesional		
CONTENIDO DE CALCIO		
Sergio Yussim Guerrero		
Julio de 1997	Escala 1 : 275,000	

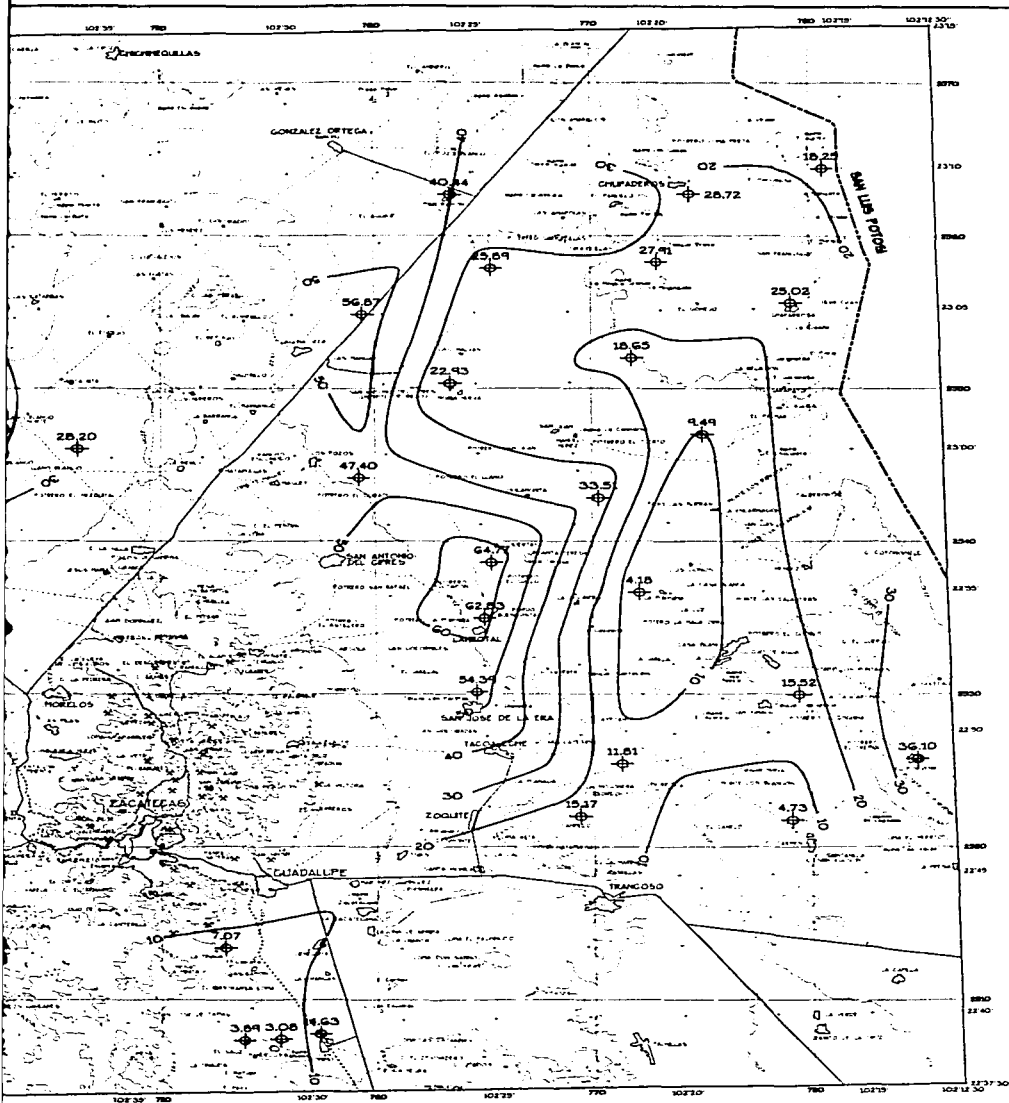




5. CURVA
 6. ALMACEN
 7. CARRERA
 8. TERRAZA
 9. BARRIO
 10. VIA DE ACCESO
 11. POZOL
 12. NUBIA

13. CUBA
 14. APPROXIMACION
 15. CURVA

UNIVERSIDAD
FACULTAD
DE
CIENCIAS
EXACTAS
Y NATURALES
INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
CIENCOGRAFICAS
Y GEOLOGICAS
DE LA CIUDAD DE MEXICO
SECRETARIA DE EDUCACION PUBLICA
MEXICO



CRUCIOS DE LOCALIZACION



LEYENDA

TOPOGRAFICA

- CURVA DE NIVEL
- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- CARRERA PAVIMENTADA
- TERRACERA
- BRECHA
- VIA DE FF CC
- LIMITE ESTATAL
- POBLACION
- RMA

HIROLOGICA

- APROVECHAMIENTO MUESTREADO
- CURVA DE ISOCONTENIDO



ESCALA GRAFICA (CM)

EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Facultad de Ingenieria

Tesis Profesional

CONTENIDO DE MAGNESIO

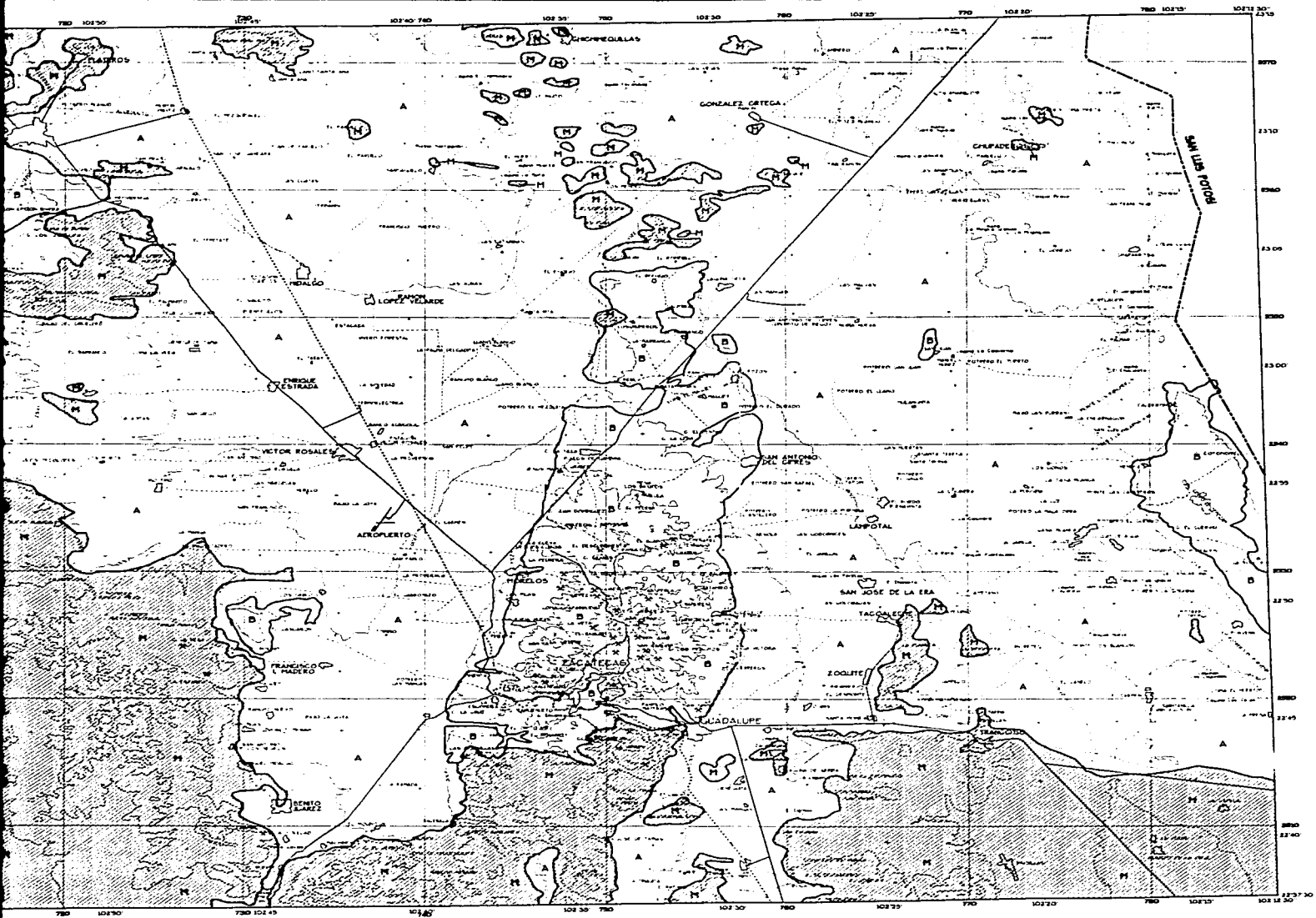
Sergio Yussim Guarneros

Mapa

Julio de 1997

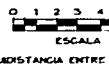
Escala 1 : 275,000

10



- TOPOGRAFIA**
- CURVA DE NIVEL _____
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA _____
 - CARRERA PAVIMENTADA _____
 - TERRACERA _____
 - BRECHA _____
 - VIA DE FF CC _____
 - LINTE ESTATAL _____
 - POBLACION _____
 - RIO _____

- HIROGEOLOGICA**
- CONTACTO HIROGEOLOGICO
- A UNIDAD DE P...
 - M UNIDAD DE P...
 - B UNIDAD DE P...



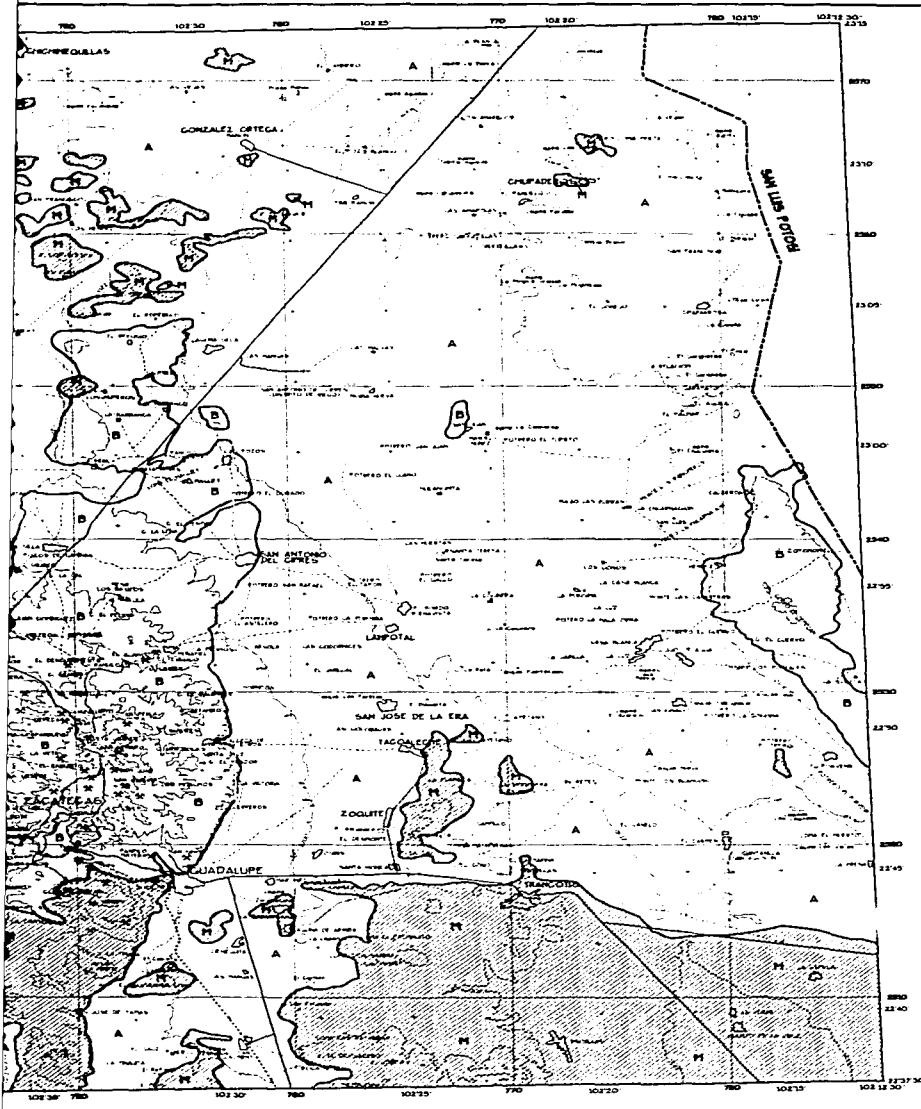
UNIVERSIDAD NACIONAL
Facultad _____

Tesis P... _____

UNIDADES GE... _____

Sergio Yussim C... _____

Julio de 1997 _____



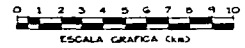
CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

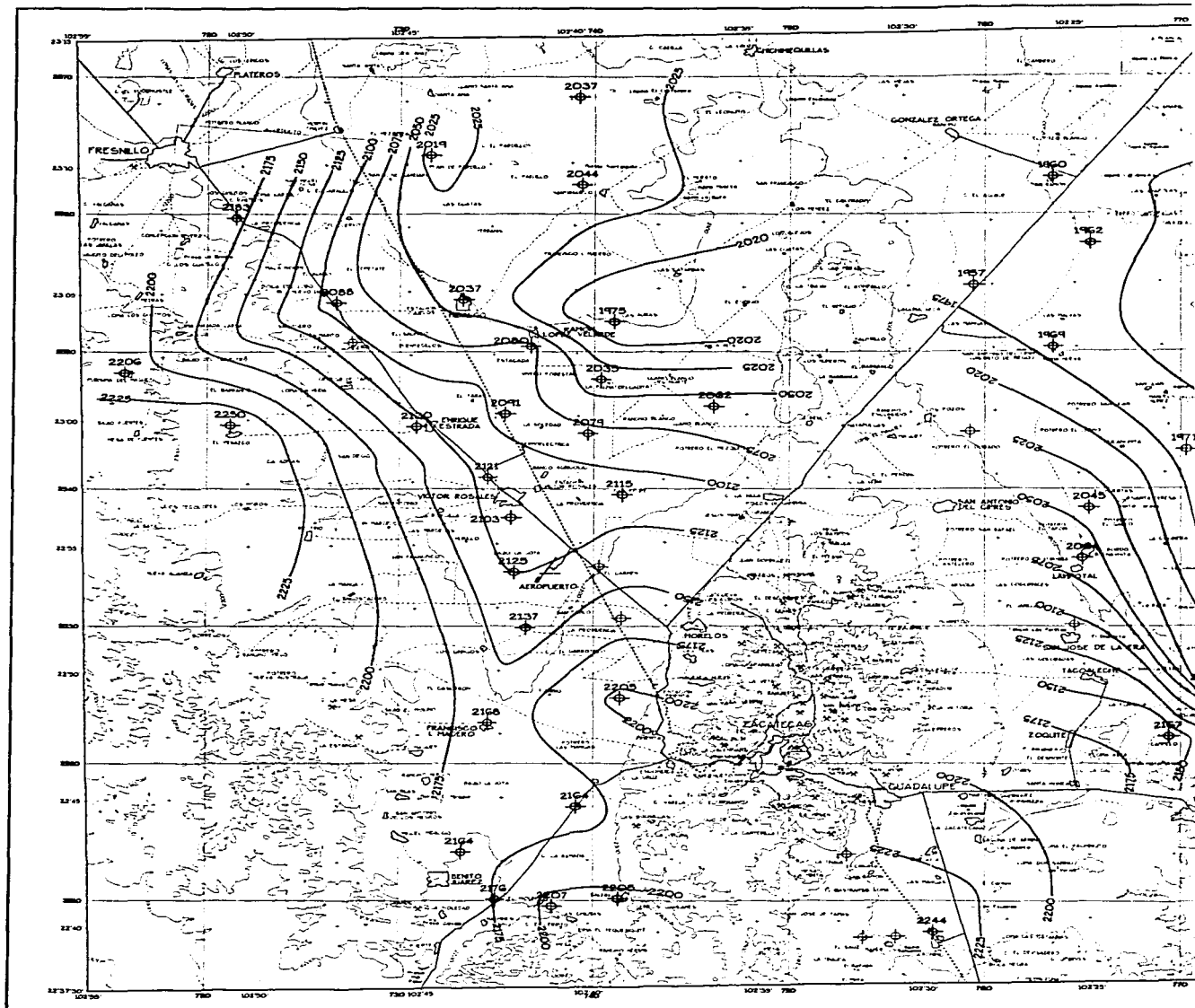
- TOPOGRAFIA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FF CC
 - LINEA ESTATAL
 - POBLACION
 - RVA

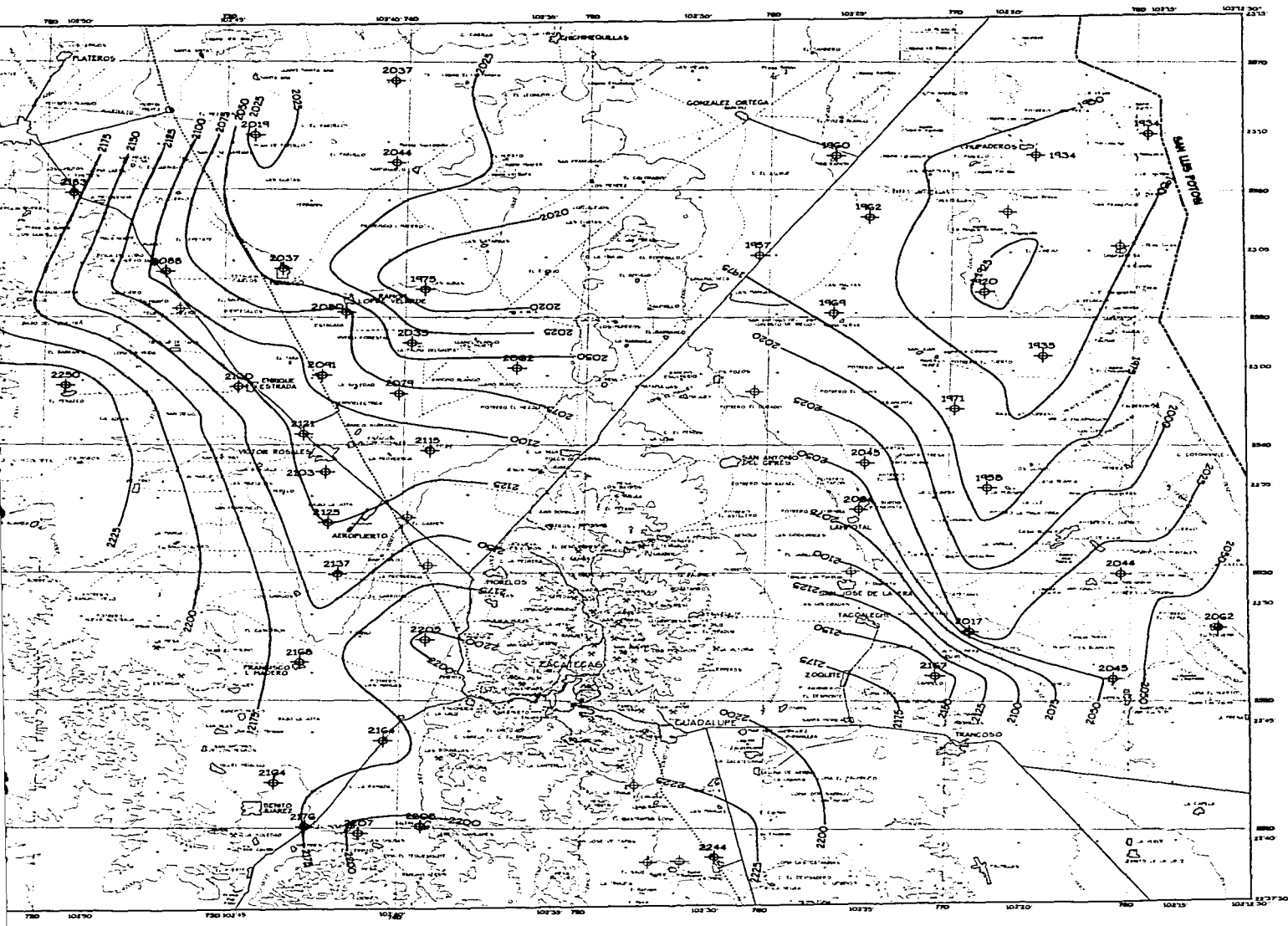
- HIROGEOLOGICA**
- CONTACTO HIROGEOLOGICO
- A** UNIDAD DE PERMEABILIDAD ALTA
 - M** UNIDAD DE PERMEABILIDAD MEDIA
 - D** UNIDAD DE PERMEABILIDAD BAJA



EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO Facultad de Ingenieria	
Tesis Profesional	
UNIDADES GEOHIDROLOGICAS	
Sergio Yussim Guarneros	
Julio de 1997	Escala 1 : 275.000
	Mapa 11





CROQUIS DE



LEYES

TOPOGRAFICA
 CURVA DE NIVEL
 ALMACENAMIENTO DE AGUA
 CARRETERA PAVIMENTADA
 TERRACERA
 BRECHA
 VIA DE FT. CC.
 LIMITE ESTATAL
 POBLACION
 FINCA

HIDEOLOGICA
 ELEVACION DEL NIVEL ESTAD.
 CURVA DE ELEVACION



ESCALA GRAF.

EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS

UNIVERSIDAD NACIONAL A
 Facultad de

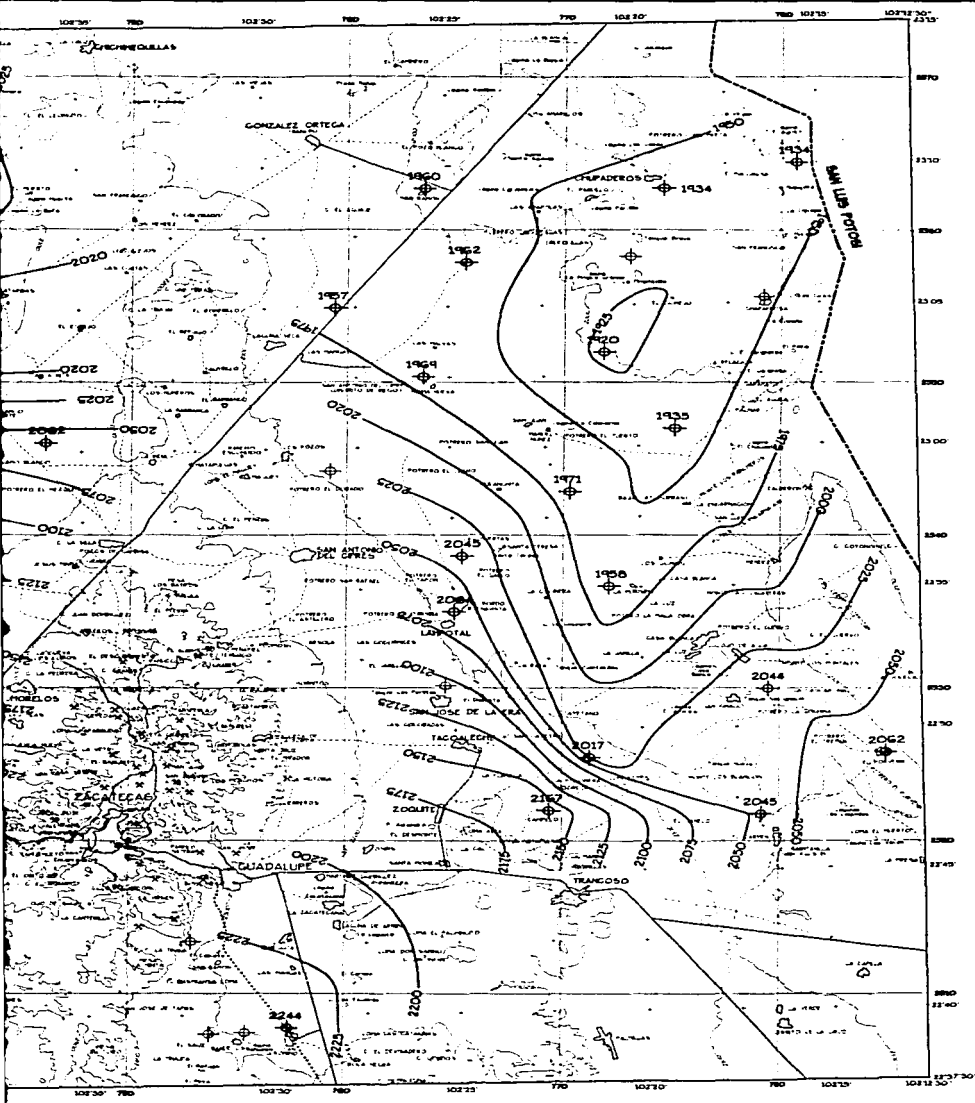
Tesis Pro

ELEVACION DEL NIVEL

Sergio Yussim Gu

Julio de 1947

Escala

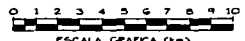


CROQUIS DE LOCALIZACION



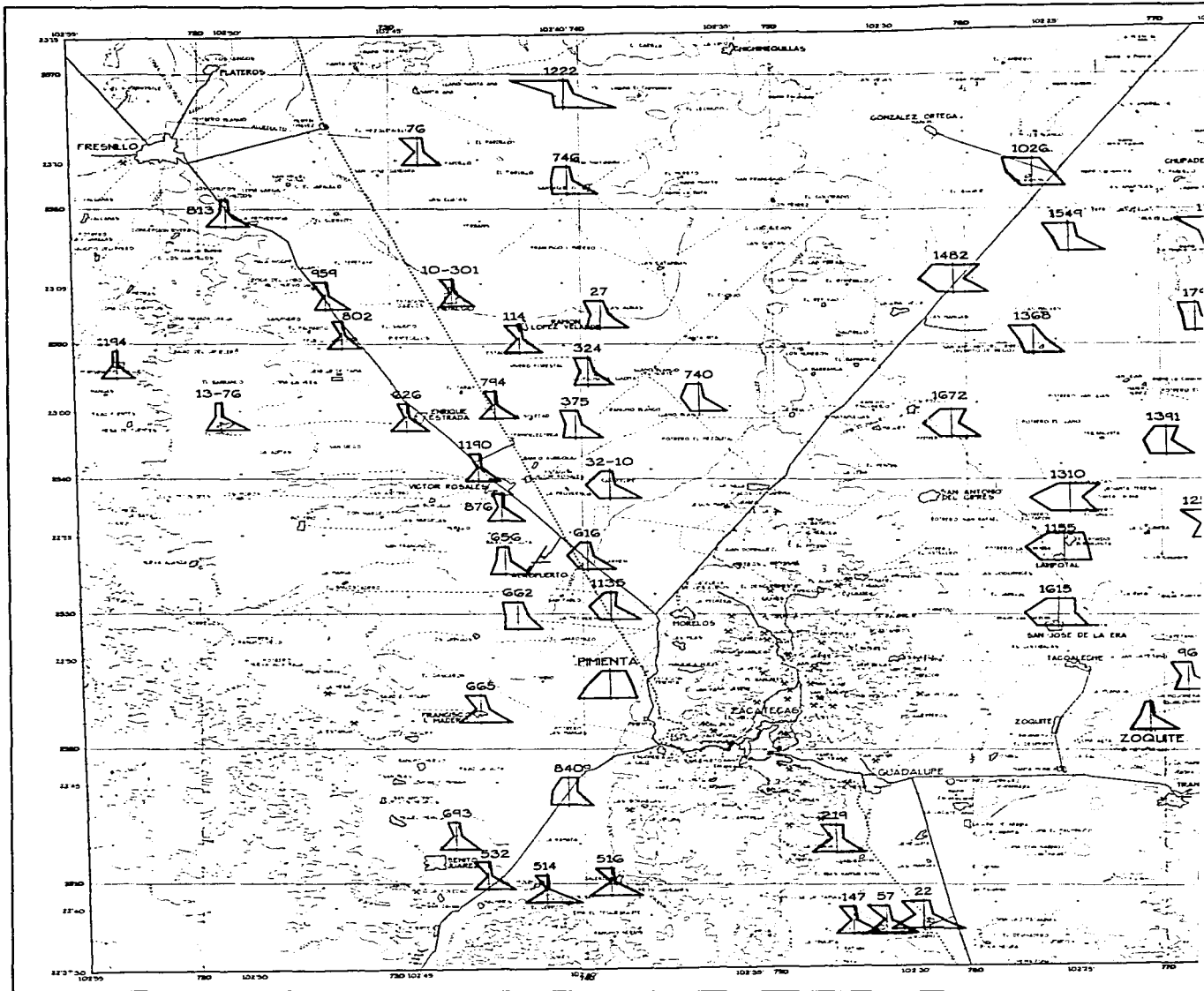
LEYENDA

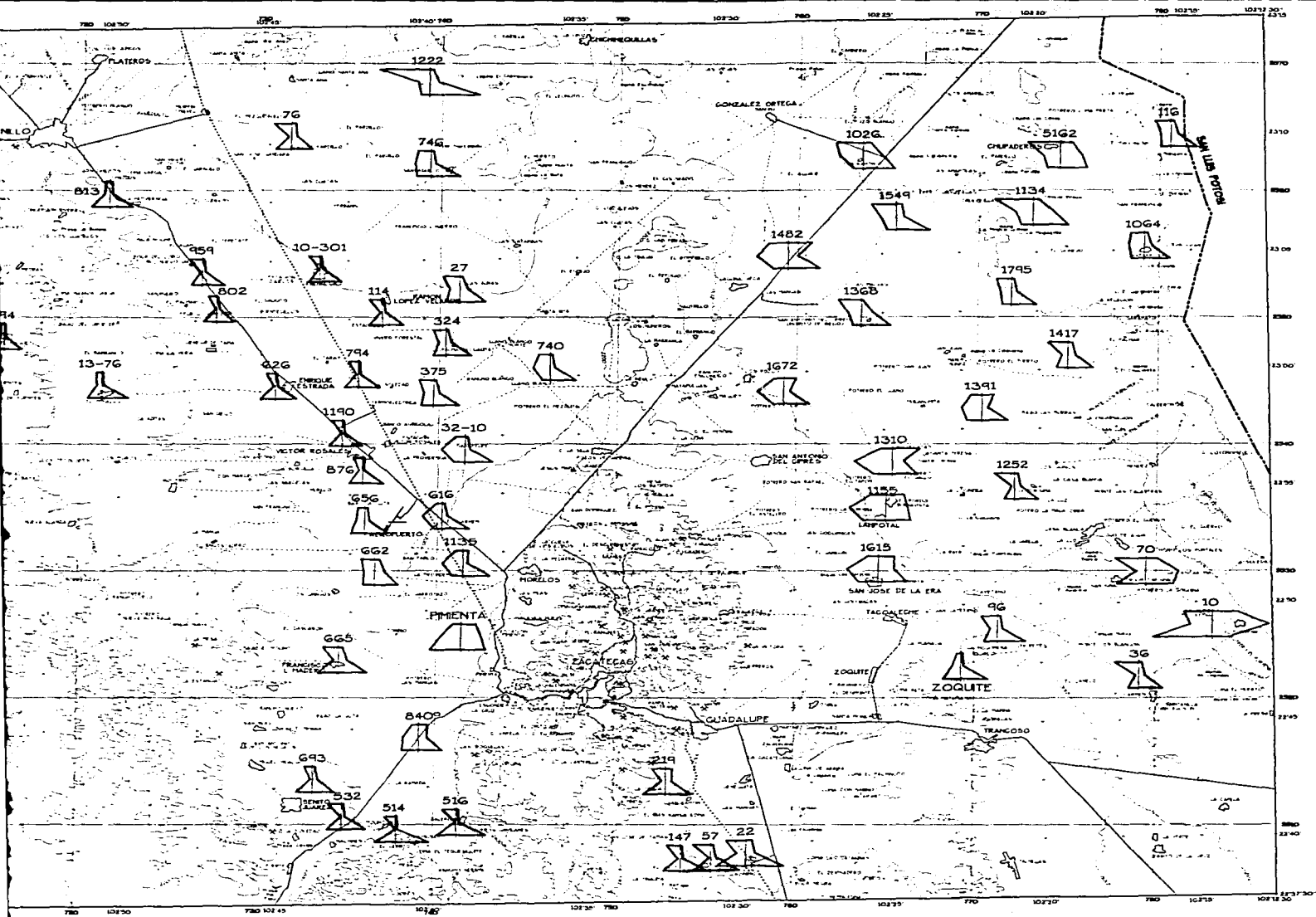
- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRETERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FF CC
 - LINEA ESTATAL
 - POBLACION
 - FINA
- HIROLOGICA**
- ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO
 - CURVA DE ELEVACION (Cmsnm)



ESCALA GRAFICA (Km)
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
Facultad de Ingenieria	
Tesis Profesional	
ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO (Cmsnm)	
Sergio Yussim Guerneros	
Mapa	12
Julio de 1997	Escala 1 : 275.000





- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE CARRITERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - BRECHA
 - VIA DE FF CC
 - LINEA ESTATAL
 - POBLACION
 - RIO

- HIROGEOLOGICA**
- DIAGRAMA DE STIFF
- PO
- No
 - Pg
 - Cg



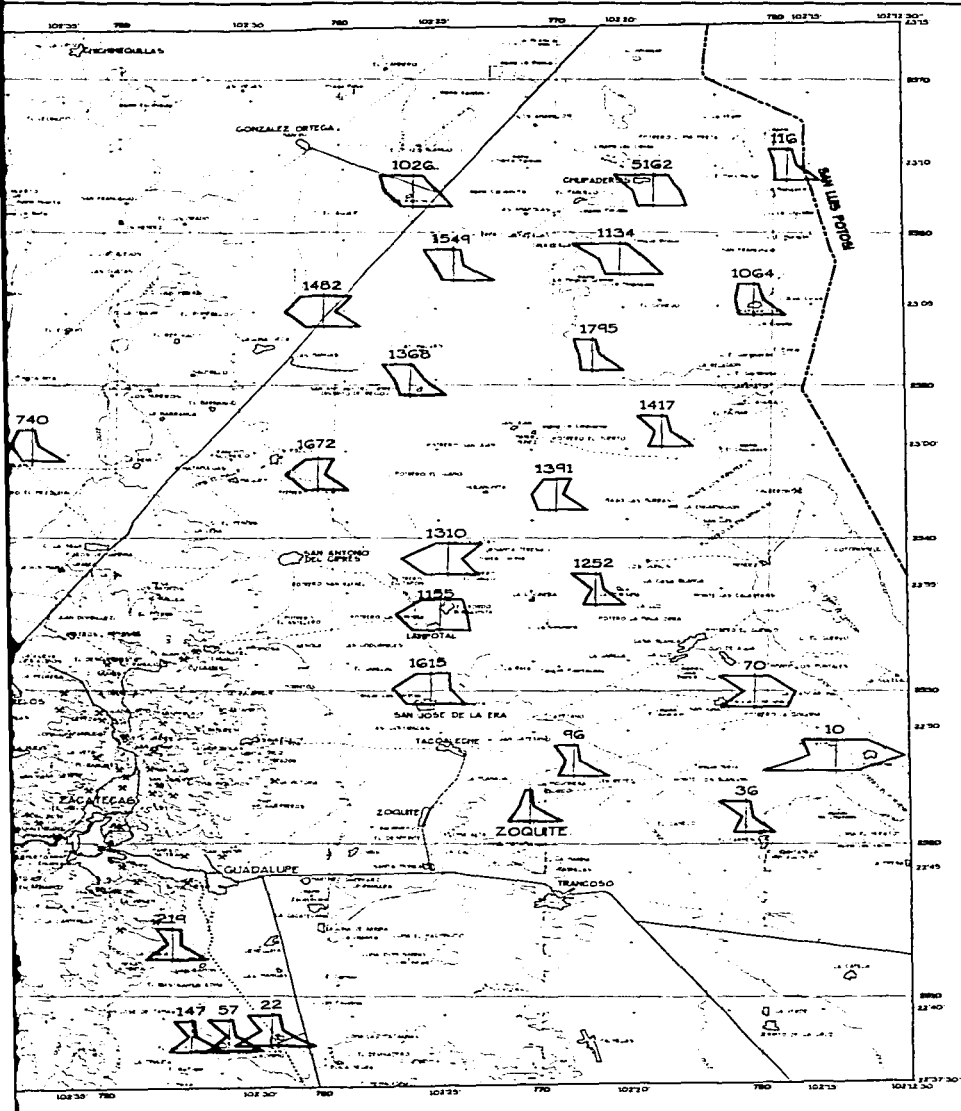
UNIVERSIDAD NACIONAL
Facultad

Tesis F

DIAGRAMA

Sergio Yussim

Julio de 1997



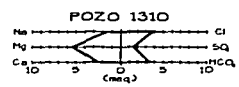
CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

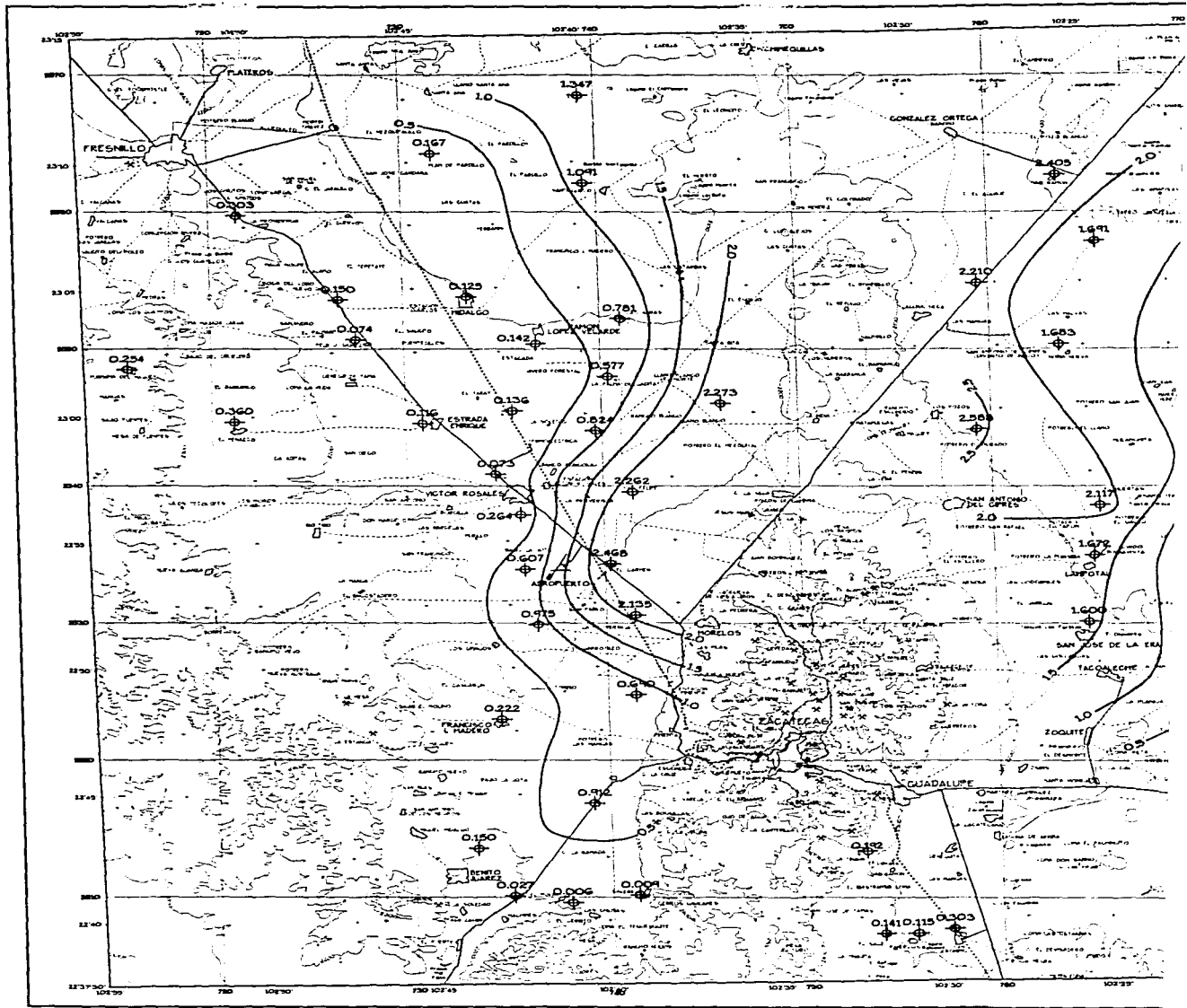
- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRERA PAVIMENTADA
 - TERRACERA
 - SERENA
 - VIA DE FF CC
 - LINEA ESTATAL
 - POBLACION
 - RMA

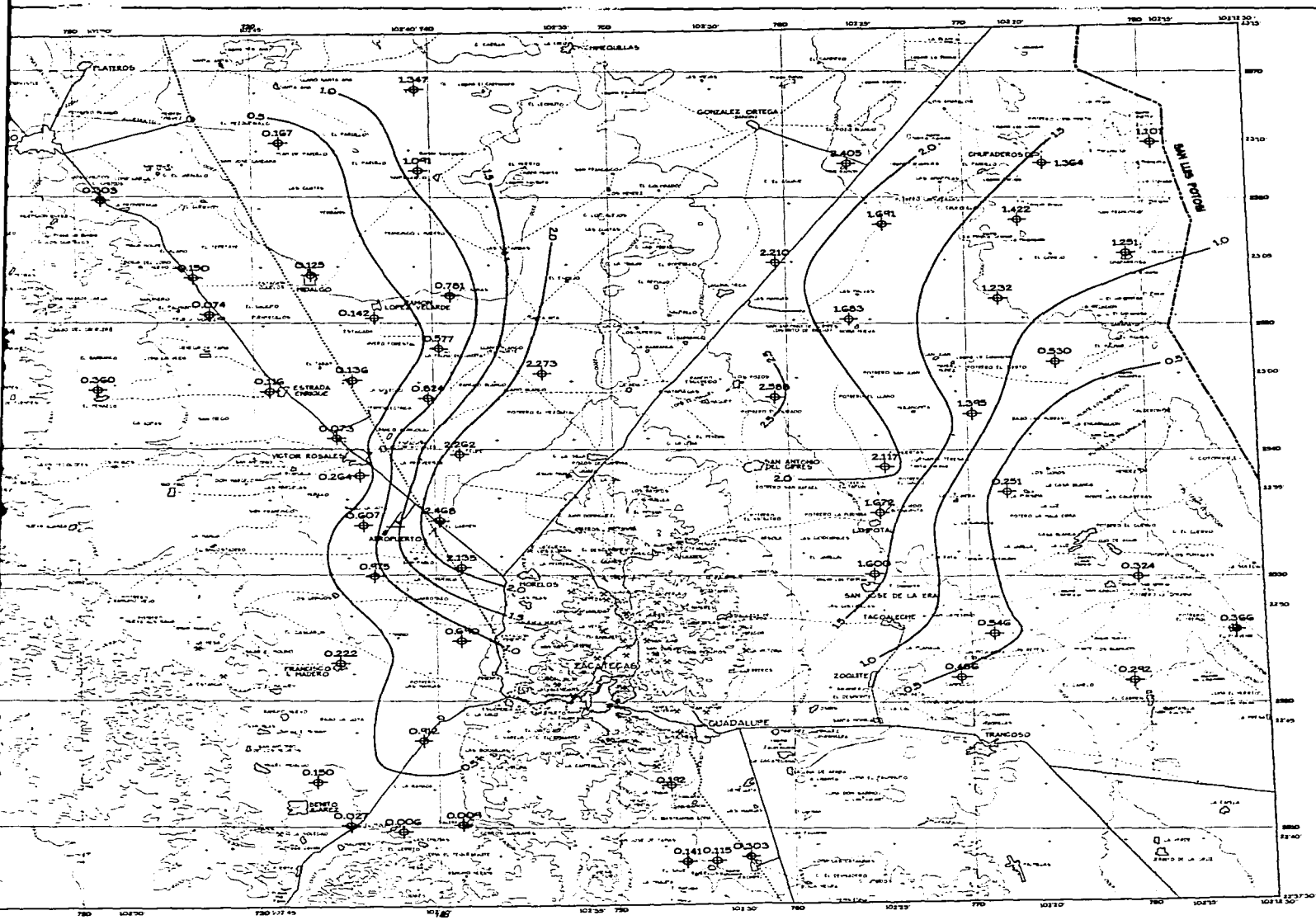
HYDROGEOLOGICA
DIAGRAMA DE STIFF



ESCALA GRAFICA (CM)
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 M

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		Mapa 13
Facultad de Ingenieria		
Tesis Profesional		
DIAGRAMAS DE STIFF		
Sergio Yussim Guerrero		
Julo de 1997	Escala 1 : 275,000	





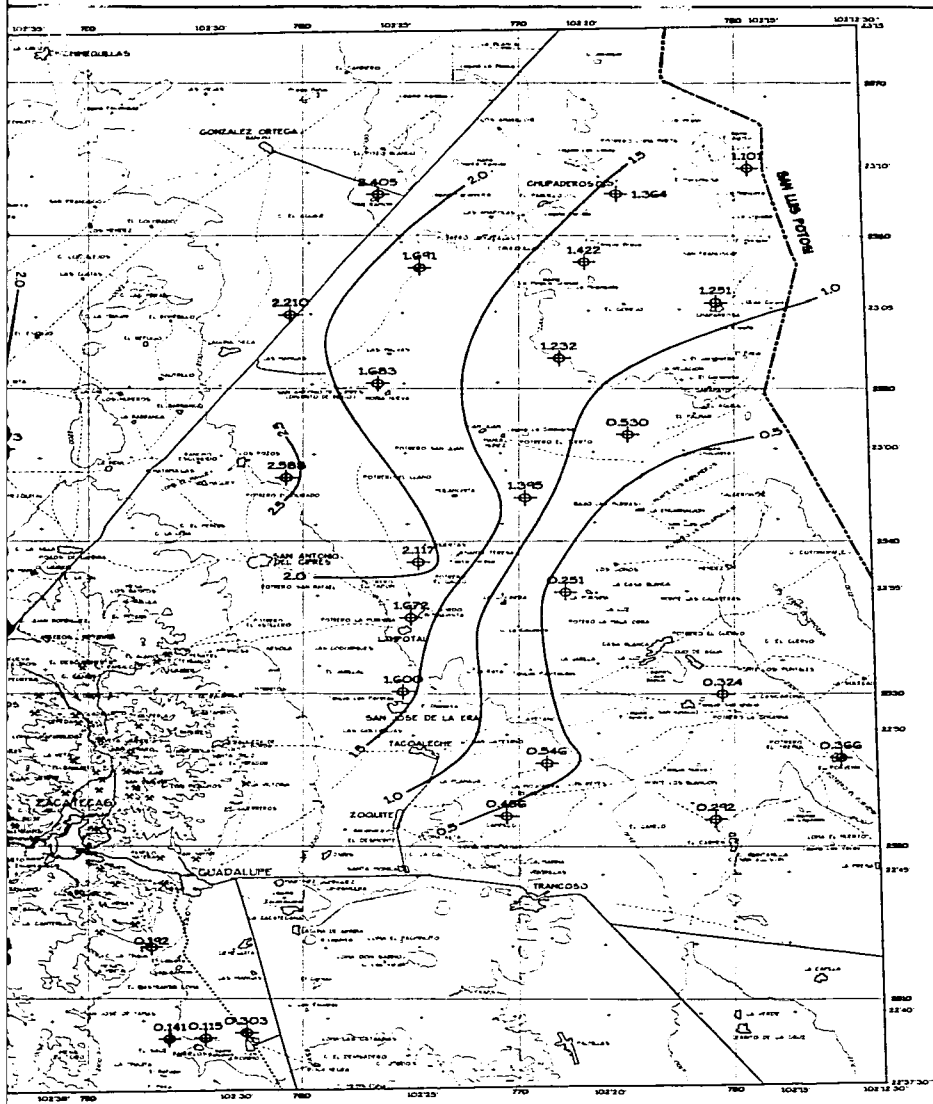
CROQUIS DE

TOPOGRAFIA
 CURVA DE NIVEL _____
 ALMACENAMIENTO DE AGUA _____
 CARRETERA PAVIMENTADA _____
 TERRACERNA _____
 BRECHA _____
 VIA DE FF CC _____
 LIMITE ESTATAL _____
 FORMACION _____
 HMA _____

HEMOLOGICA
 VALOR DE LA RELACION _____
 CURVA DE ISOVALOR _____



UNIVERSIDAD NACIO
 Facultad
 Tesis
 RELACION MAGNI
 Sergio Yuss
 Julio de 1977



CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

TOPOGRAFICA

- CURVA DE NIVEL
- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- CARRERA PAVIMENTADA
- TERRACERA
- BRECHA
- VIA DE FT CC
- LINTE ESTATAL
- POBLACION
- MINA

HIROLOGICA

- VALOR DE LA RELACION
- CURVA DE ISOVALOR



ESCALA GRAFICA (KM)

EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Facultad de Ingenieria

Tesis Profesional

RELACION MAGNESIO/CALCIO (rMg/rCa)

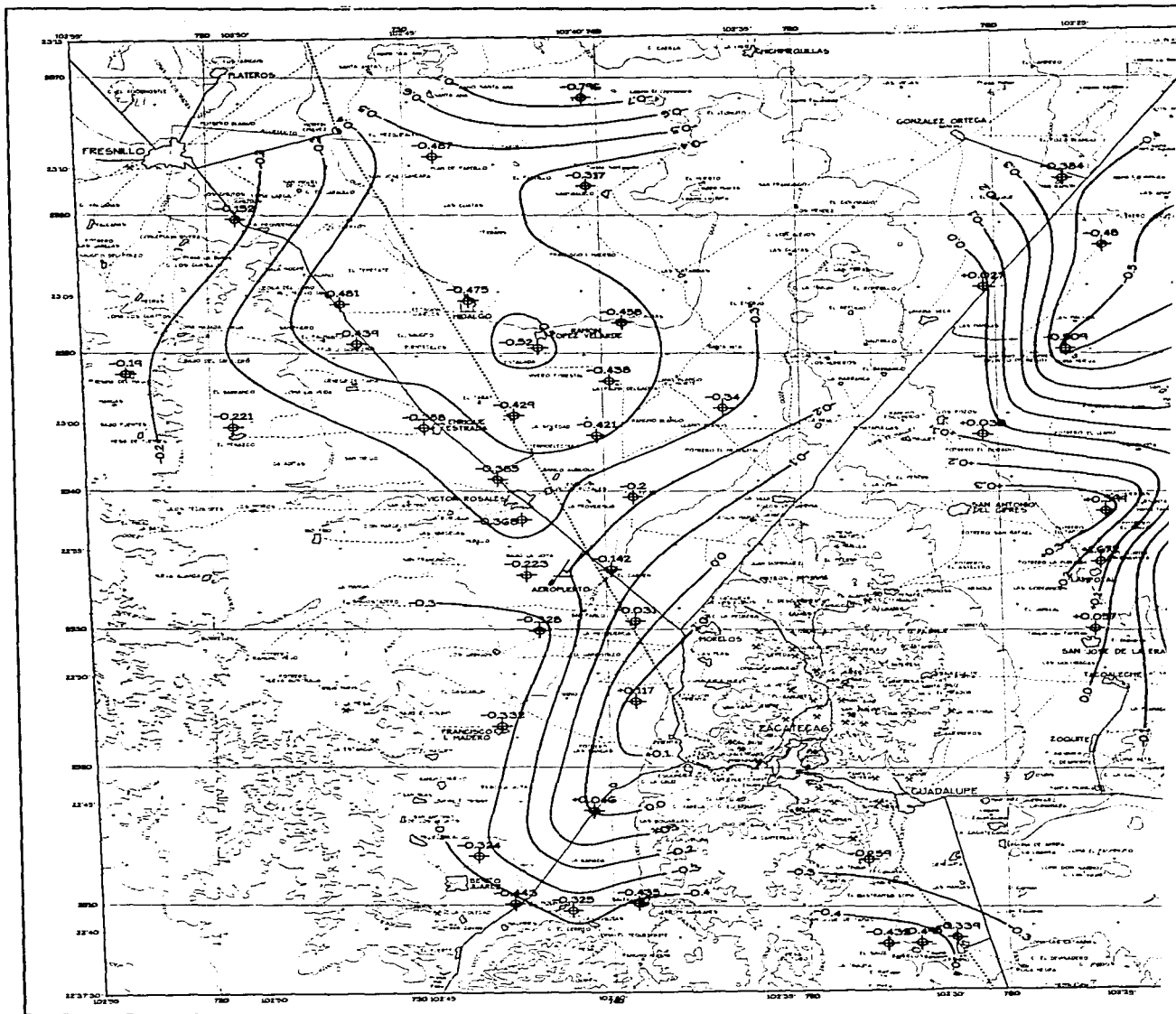
Sergio Yussim Guerneros

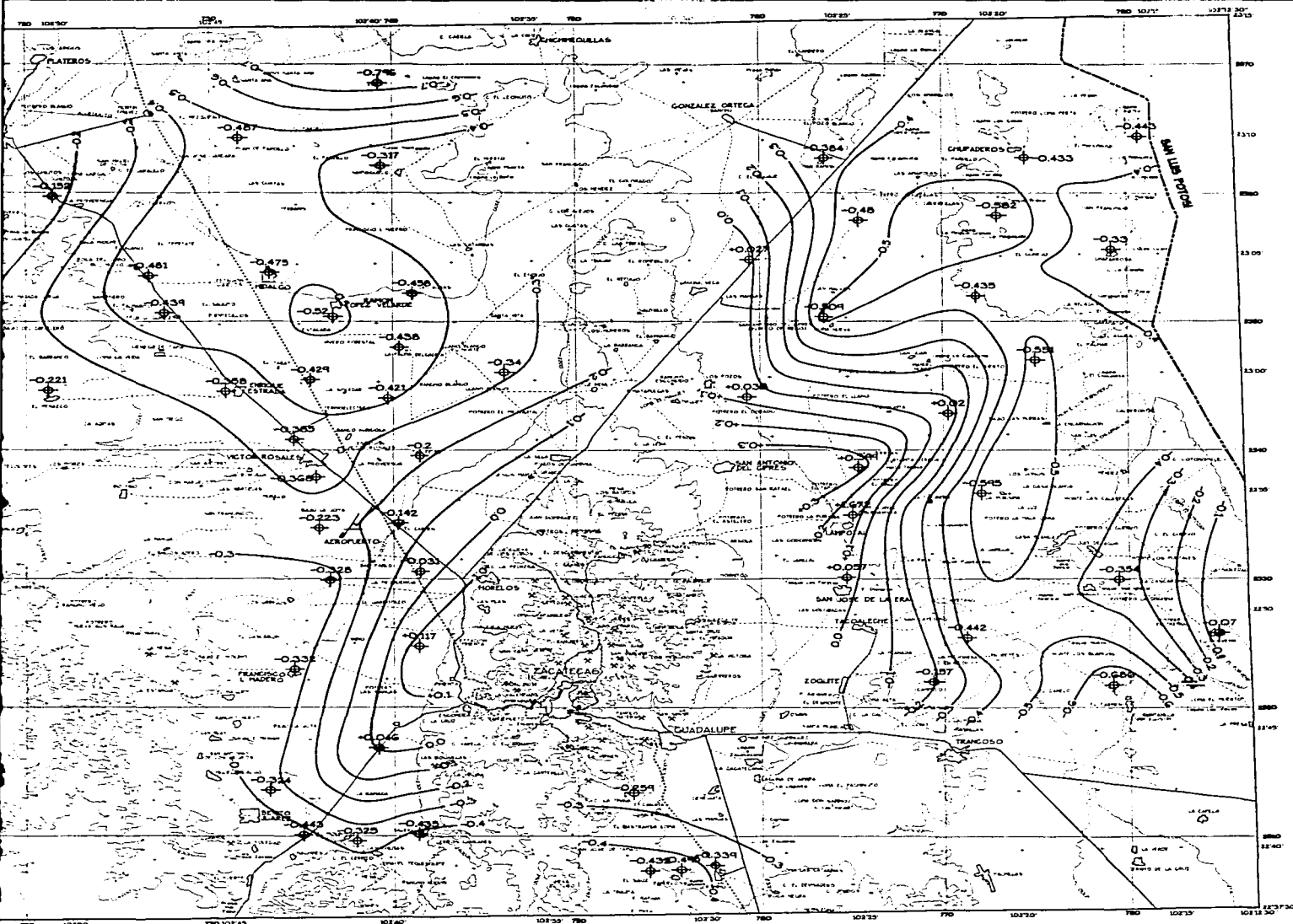
Julio de 1997

Escala 1 : 275.000

Mapa

14





CROQUIS DE LOCALIDAD



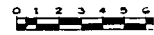
LEYENDA

TOPOGRAFICA

- CURVA DE NIVEL
- ALMACENAMIENTO DE AGUA
- CARRERA PAVIMENTADA
- TERRACENA
- BRECHA
- VIA DE FV CC
- LPSTE ESCATAL
- FORLACION
- FMA

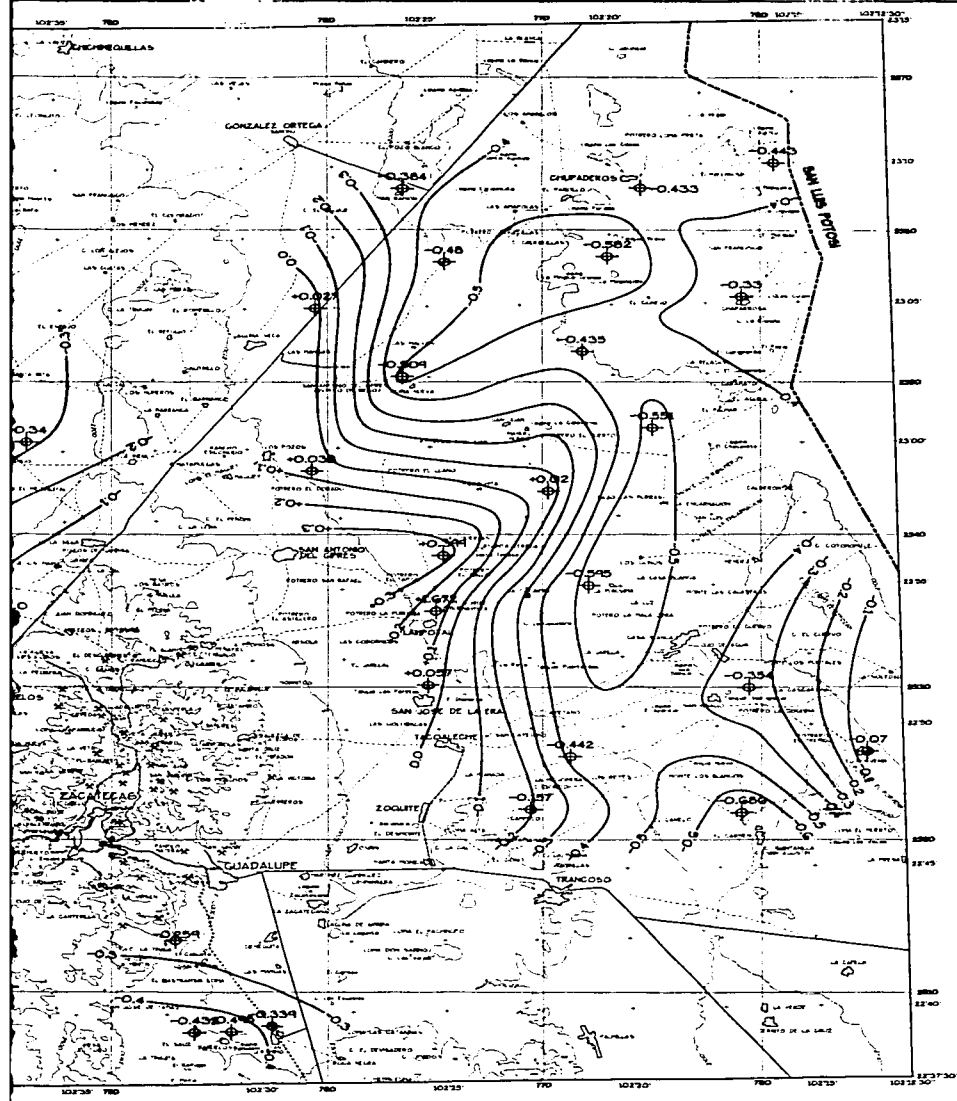
HIETOLOGICA

- VALOR DE LA RELACION
- CURVA DE ISOVALOR



ESCALA GRAFICA
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVA

UNIVERSIDAD NACIONAL AU	
Facultad de	
Tesis Prof	
INDICE DE CAMBIO D	
Sergio Yussim Guarn	
Julo de 1997	Escola

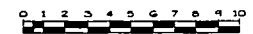


CROQUIS DE LOCALIZACION



LEYENDA

- TOPOGRAFICA**
- CURVA DE NIVEL
 - ALMACENAMIENTO DE AGUA
 - CARRETERA PAVIMENTADA
 - TERRACENA
 - BRINCO
 - VIA DE FF CC
 - LINEA ESTATAL
 - POBLACION
 - FINA
- NEUROLOGICA**
- VALOR DE LA RELACION
 - CURVA DE ISOVALOR



ESCALA GRAFICA (cm)
EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 100 =

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO Facultad de Ingenieria	
Tesis Profesional	
INDICE DE CAMBIO DE BASES (CCB)	
Sergio Yussim Guarneros	
Julo de 1997	Mapeo Escala 1 : 275,000 15

Al término, sólo me queda valuar a fondo la paciencia de ustedes, y prometerles que ésto no se volverá a repetir. Sea lo que sea, suceda lo que suceda ésto no se volverá a repetir. Y la certeza de lo irrepitable me anima para transmitirles, con la timidez del caso, mi inexorable aunque culposa gratitud.