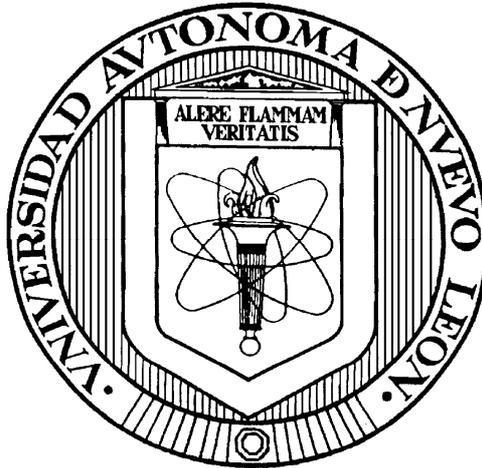


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y GEOQUÍMICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE "EL HUNDIDO" EN SISTEMAS FRACTURADOS Y GRANULARES

Por

LILIA EVANGELINA ARRIAGA DÍAZ DE LEÓN

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

AGOSTO 2012



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Oficio SDEPI-240-2012

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de
Archivo de la UANL
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que la **Ing. Lilia Evangelina Arriaga Díaz de León**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Especialidad en Hidrología Subterránea**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución. De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,
"ALERE FLAMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria a 7 de agosto del 2012.

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

C.c.p. Archivo.
Rtp.



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO.
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, UANL.
Presente.-

Estimado Dr. Valdéz Tamez:

Por este medio le comunico a usted que la **Ing. Lilia Evangelina Arriaga Díaz de León**, pasante de la Maestría en Ciencias con especialidad en Hidrología Subterránea, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis titulado **“Comportamiento hidráulico y geoquímico del acuífero del valle “El Hundido” en sistemas fracturados y granulares”**, por lo que no tenemos inconveniente en solicitarle que de, las instrucciones necesarias para iniciar los trámites de solicitud de examen de grado de la **Ing. Lilia Evangelina Arriaga Díaz de León**, de acuerdo al Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución.

Agradeciendo de antemano su atención a la presente solicitud, y quedamos a sus apreciables ordenes para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE
“ALERE FLAMMAM VERITATIS”
Cd. Universitaria, a 02 de Julio de 2012.

DR. JUAN MANUEL RODRÍGUEZ MARTÍNEZ.
DIRECTOR DE TESIS.



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO.
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, UANL.

En atención a su oficio, en el que se me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis **“Comportamiento hidráulico y geoquímico del acuífero del valle “El Hundido” en sistemas fracturados y granulares”**, que presenta la **Ing. Lilia Evangelina Arriaga Díaz de León**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Hidrología Subterránea, le comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, la cual considero como **APROBADA**, yo como evaluador de la tesis considero que llena el contenido y requisitos de la misma, por lo cual no hay ningún motivo de no Aprobar dicha tesis.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

ATENTAMENTE
“ALERE FLAMMAM VERITATIS”
Cd. Universitaria, a 02 de Julio de 2012.

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ
EVALUADOR DE LA TESIS



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



García N. L., a 02 de Julio de 2012

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO.
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, UANL.

En atención a su oficio, en el que se me informa que fui designado como Evaluador de la tesis “**Comportamiento hidráulico y geoquímico del acuífero del valle “El Hundido” en sistemas fracturados y granulares**”, que presenta la **Ing. Lilia Evangelina Arriaga Díaz de León**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Hidrología Subterránea, le comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, la cual considero como **APROBADA**, yo como evaluador de la tesis considero que llena el contenido y requisitos de la misma, por lo cual no hay ningún motivo de no Aprobar dicha tesis.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

M.C. JUAN MANUEL CHAPA GUERRERO
EVALUADOR DE LA TESIS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: LILIA EVANGELINA ARRIAGA DÍAZ DE LEÓN

Tema de la tesis: COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y GEOQUÍMICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE "EL HUNDIDO" EN SISTEMAS FRACTURADOS Y GRANULARES.

Este documento certifica la corrección _____
Del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(NINGUNA)

Nombre y firma de quien corrigió:

Ramón Longoria
Arq. Ramón Longoria Ramírez

[Firma]

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Universitaria, a 3 de AGOSTO de 2012



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx

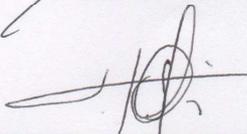
COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y GEOQUÍMICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE "EL HUNDIDO" EN SISTEMAS FRACTURADOS Y GRANULARES

COMITÉ DE TITULACIÓN

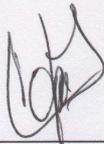
Aprobación de la Tesis:



Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez
Director de Tesis



Dr. Héctor de León Gómez
Evaluador



M.C. Juan Manuel Chapa Guerrero
Evaluador



Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de estudios de posgrado e investigación

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por permitirme concluir este trabajo y este ciclo, y a su vez, conocer a toda la gente que me apoyado hasta este punto de mi vida.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez, director de esta tesis, que ha sido como un segundo padre en su enseñanza. Así como al Dr. Héctor de León Gómez y al M.C. Juan Manuel Chapa Guerrero por formar parte del comité de tesis, por sus valiosas sugerencias e interés en la revisión del presente trabajo.

Así mismo al subdirector de estudios de posgrado e investigación Dr. Pedro L. Valdez Tamez por brindarme su apoyo al facilitar las instalaciones y equipo necesarios para la realización del trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para la realización de mis estudios al igual que la realización de esta tesis por medio del proyecto de investigación **CONACYT- SEMARNAT 2007 (Clave C-O -1-0083)**.

A mi madre Evangelina Díaz de León Barragán (*†*) que me brindó su apoyo incondicional y gracias a esto he llegado hasta aquí, se que me sigue cuidando y apoyando en todos mis proyectos.

A mi padre Dionisio Arriaga Martínez, porque ha sido un gran ejemplo en decisión e ingenio y cuento con su gran ayuda para lograr mis metas y objetivos.

A mis hermanos: Fernando López Díaz de León, Jorge Héctor López Díaz de León, Jesús Arriaga Solís, Dionisio Arriaga Solís y Avelino Arriaga Solís por el apoyo moral que siempre me han brindado.

A mi abuelita María Luisa Navarro, por brindarme sus sabios consejos junto con una valiosa guía espiritual para no rendirme nunca y seguir adelante.

A mi amigo Heriberto González Treviño, que tuvo la paciencia del mundo para escucharme, compartir mis logros y fracasos a lo largo de todo este tiempo.

Gracias a todos mis amigos que me ayudaron en llevar a cabo todas las metas de este escrito y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

Resumen

El presente estudio trata sobre el comportamiento hidráulico y geoquímico en el valle El Hundido en el municipio de Cuatro Ciénegas de Flores, Coahuila, México.

Se describen los diferentes marcos conceptuales tanto climático, geológico, geohidrológico y geoquímico del valle, se plantea la unión con el valle de Cuatro Ciénegas, por medio del cañón del valle El Hundido con base en métodos geofísicos.

Los estudios realizados en este trabajo demuestran la conexión a través de ambos valles, al igual que se demuestra que el acuífero de este valle tiene una recarga natural subterránea por parte del Río Nazas.

Las características hidrogeoquímicas e isotópicas del lugar corroboran la hipótesis planteada en este trabajo. De tal manera se comprobó que los parámetros hidráulicos corresponden con las unidades geológicas.

Con base en el balance hidrológico de la cuenca, se tiene noción de que este sistema hidráulico, cuenta con una recarga subterránea por medio de la Falla de San Marcos, la cual pasa por el valle funcionando como fuente de recarga y sello del mismo sistema. Los factores climáticos de la región como la evaporación y evapotranspiración son altas y hacen que el grado de infiltración sea nulo, lo que hace que el sistema de recarga dependa completamente de su aporte subterráneo.

Summary

This study deals with the hydraulic and geochemical behavior in the valley El Hundido in the town of Cuatro Cienegas de Flores, Coahuila, Mexico.

We describe the various frameworks both climate, geological, geohydrology and geochemical valley, there is the union with the valley of Cuatro Cienegas, through the barrel of the valley El Hundido based geophysical methods.

Studies in this work demonstrate the connection through both valleys, as demonstrating that the aquifer of the valley has a natural recharge groundwater by the Nazas River.

Hydrogeochemical and isotopic characteristics of the site support the hypothesis of this work. Thus it was found that the hydraulic parameters correspond to the geologic units.

Based on the water balance of the basin, it is this notion that the hydraulic system has a groundwater recharge through the San Marcos Fault, which passes through the valley running as a source of recharge and seal the same system.

The climatic factors of the region as evaporation and evapotranspiration are high and cause the degree of infiltration is zero, which causes the charging system completely dependent on their contribution underground.

Índice

	Pag.
Índice.	I
Índice fotográfico.	V
Índice de figuras.	VI
Índice de tablas.	X
Apéndices.	XI
Capítulo 1. Introducción.	1
1.1. Introducción.	1
1.2 Antecedentes.	3
1.3 Hipótesis	7
1.4 Objetivos.	7
1.5 Metodología	7
1.6 Localización.	8
1.7 El uso del agua.	11
1.7.1 La situación actual.	11
1.8 Estado del arte.	15
Resúmenes de los contenidos de algunas investigaciones previas.	
1.8.1 IMTA, CNA, SEMARNAT, INE. Estudio hidrogeológico de los acuíferos El Hundido y Cuatrociénegas. Coahuila. (2004).	15
1.8.2. Lesser y Asociados, S.A. de C. V. Estudio de la evaluación hidrogeológica e isotópica en El Valle el Hundido, Coahuila. Gerencia de aguas subterráneas, Comisión Nacional del Agua, contrato GAS-006-PRO01, diciembre 2001.	15
1.8.3. SARH, Estudio geohidrológico preliminar en la zona de Cuatrociénegas – Ocampo, Coahuila. Elaborado por la compañía ININSA, S.A. para la subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1980.	16
1.8.4. The formation and water resource management of the Cuatrociénegas de Carranza Valley, Coahuila, México. Suzanne Pierce. University of Texas at Austin, EUA, 2002 webpace.utexas.edu/sawp33/www/index.html .	17
1.8.5. Investigaciones desarrolladas por la Dra. Valeria Souza. Investigadora del Instituto del Ecología de la U.N.A.M.	18
1.8.6 Investigaciones desarrolladas por el Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez, Investigador del Instituto de Ingeniería Civil de la U. A. N. L.	21
1.8.6.1. Tectonic fame rock the Hundido valley.	21

1.8.6.2. Importancia de la falla de San Marcos en el marco geológico y estructural del Valle El Hundido, Cuatrociénegas, Coahuila, México.	21
1.8.6.3. The overexploitation on the aquifer of the Hundido Valley and corresponding ecological impact on the reserves in Cuatrociénegas valley in Coahuila, México. (M. J. M. Rodríguez., S. V. Souza, L. E. Arriaga Díaz de León) Water Resources & environmental problems in Karst.	27
1.8.7. Tipos de investigaciones.	27
Capítulo 2. Climatología.	28
2.1.- Introducción.	28
2.2.- Clima que se presenta en el sitio de estudio.	29
2.2.1 Temperaturas.	30
2.2.2. La radiación solar.	34
2.3.- Precipitaciones en el sitio.	40
2.4.- Conclusiones.	45
Capítulo 3. Geología.	46
3.1.- Introducción.	46
3.2.- Geología regional.	48
3.3- El marco tectónico.	47
3.4.-Marco geológico.	51
3.4.1.- Estratigrafía:	56
Formación Lechos Rojos.	60
Formación San Marcos.	60
Formación La Virgen.	60
Formación Cupido.	62
Formación La Peña.	62
Formación Aurora.	62
Formación Acatita	63
Formación Kiamichi.	63
Grupo Washita Indiferenciado.	64
Formación Georgetown.	64
Formación Del Río.	64
Formación Buda.	65
Formación Eagle Ford.	65
Conglomerado terciario.	65
Rocas ígneas.	66
Sedimentos aluviales.	66
3.5.- El marco geodinámico.	66
3.6.- Geología estructural del sitio.	69
3.7.- Conclusiones.	71
Capítulo 4. Geohidrología.	72

4.1.-Introducción.	72
4.2.- Características hidrogeológicas de las formaciones.	73
4.3.- El censo de aprovechamiento.	76
4.3.1.- Pozos en funcionamiento.	81
4.3.2.- Pozos secos de observación y fuera de servicio.	82
4.4.- Piezometría.	83
4.5.- Geometría del acuífero.	85
4.6.- Características de recarga.	94
4.6.1.- Balance del agua subterránea.	92
4.7.- Conclusiones.	94
Capítulo 5. Hidrogeoquímica.	95
5.1 Introducción.	95
5.2 Métodos.	96
5.2.1. Los sistemas de muestreo.	96
5.2.2. Determinación de los parámetros en el campo.	96
5.2.3. Determinación de los parámetros en el laboratorio.	96
5.3.- Caracterización del agua subterránea.	97
5.3.1. Los datos disponibles.	97
5.3.2. Determinación de las características hidrogeoquímicas de las formaciones.	101
5.3.2.1. Formación Aurora.	101
5.3.2.2. Formación La Peña.	101
5.3.2.3. Formación Cupido.	101
5.3.2.4. Aluvión.	102
5.3.3. Registros de conductividad eléctrica, temperatura y profundidad de tres pozos claves.	102
5.3.4. Características de la composición ion Cl en el medio.	107
5.3.5. Diagramas de caracterización.	111
5.3.6. Isotopos ambientales.	123
5.3.7. Estudio del $18^{\circ} 2H$ Tritio	124
5.3.8. Estudio de la relación $^{18}O/^{2}H$ del agua subterránea	125
5.3.9 Tritio	127
5.4 Determinación del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico e isotópico del acuífero.	129
5.5 Conclusiones.	123
6. Resultado y discusión.	132
6.1 Introducción.	132
6.2. Conclusión general.	133
6.3 -Logros	135
6.4 Recomendaciones	135
Bibliografía.	136

Índice fotográfico

	Pag
Fotografía 1.1 Transporte de candelilla desde los sitios de recolección.	12
Fotografía 1.2 Transporte de candelilla desde los sitios de recolección.	12
Fotografía 1.3 Proceso de elaboración de la cera.	13
Fotografía 1.4 Proceso de elaboración de la cera.	13

Índice de figuras

	Pag
Figura 1.1 Localización del desierto Chihuahuense.	3
Figura 1.2 Localización del municipio de Cuatro Ciénegas.	4
Figura 1.3 Localización de la zona de estudio.	8
Figura 1.4 Regiones Hidrológicas	9
Figura 1.5 Plano carretero.	11
Figura 2.1 Mapa climático del estado de Coahuila.	29
Figura 2.2 Gráfica de temperatura media en los meses del año	32
Figura 2.3 Grafico de la temperaturas en los primeros 6 meses desde 1942 al 2001.	33
Figura 2.4 Gráfica de los meses de julio a diciembre.	33
Figura 2.5 Gráfica de radiación neta en los meses del año.	38
Figura 2.6 Gráfica de precipitación de diferentes años.	42
Figura 2.7 Gráfica de la precipitación.	43
Figura 3.1 Unidades tectónicas.	47
Figura 3.2 Unidades geológicas.	48
Figura 3.3 Sistema de fallas en el noreste de Coahuila.	49
Figura 3.4 Mapa geológico generalizado del estado de Coahuila y regiones adyacentes.	51
Figura 3.5 Marco tectónico estructural de valle del Hundido.	52
Figura 3.6 Plano geológico de la zona de estudio.	54
Figura 3.7 Sección A-A' geológica de la zona de estudio.	55
Figura 3.8 Sección B-B' geológica de la zona de estudio.	56
Figura 3.9 Sección C-C' geológica de la zona de estudio.	57
Figura 3.10 Sección D-D' geológica de la zona de estudio sacada con geoelectrica.	58
Figura 3.11 Tabla estratigráfica de Coahuila.	61
Figura 3.12 Modelo de caja	68
Figura 3.13 Modelo de rampa.	70

Figura 4.1	Sección estratigráfica regional.	74
Figura 4.2	Estratigrafía y unidades hidrogeológicas.	75
Figura 4.3	Localización de censo de aprovechamientos hidráulicos en el valle El Hundido.	80
Figura 4.4	.Curvas equipotenciales valle El Hundido	84
Figura 4.5	Grafico de los límites del acuífero en el valle El Hundido obtenido por medio de métodos Geofísicos.	86
Figura 4.6	Curva de Theis.	87
Figura 4.7	Esquema de flujo radial hacia un pozo, para el análisis de solución de Theis.	90
Figura4.8	Esquema del abatimiento residual.	91
Figura 4.9	Esquema del flujo radial hacia un pozo, para el análisis de métodos de recuperación de Theis.	92
Figura 5.1	Localización de pozos muestreados.	100
Figura 5.2	Gráfico de temperatura contra la conductivada que presenta.(IMTA 129)	104
Figura 5.3 y 5.4	Gráficas donde se muestra la relacion que existe entre los cambios de fase, al cambiar de medio.(IMTA 129).	104
Figura 5.5	Gráfico de temperatura contra la conductivada que presenta.(IMTA 130).	105
Figura 5.6 y 5.7	Gráficas donde se muestra la relacion que existe entre los cambios de fase, al cambiar de medio.(IMTA 130).	105
Figura 5.8	Gráfico de temperatura contra la conductivada que presenta.(IMTA 148).	106
Figura 5.9 y 5.10	Gráficas donde se muestra la relacion que existe entre los cambios de fase, al cambiar de medio.(IMTA 148).	109
Figura 5.11	Gráfica Cl-Na.	108
Figura 5.12	Gráfica Cl-Mg.	109
Figura 5.13	Gráfica Cl-K.	109
Figura 5.14	Gráfica Cl-Ca.	109

Figura 5.15 Gráfica Cl-HCO ₃ .	110
Figura 5.16 Gráfica Cl-SO ₄ .	110
Figura 5.17 Diagrama de Piper para la caracterización del agua en los 20 puntos muestreados en el valle.	112
Figura 5.18 Diagrama de Durov.	114
Figura 5.19 Diagramas de balance de iones en los pozos CNA 4, CNA 6 CNA9 y CNA 7..	115
Figura 5.20 Diagramas de balance de iones en los pozos CNA 138, CNA 138 y CNA 140.	116
Figura 5.21 Diagramas de balance de iones en los pozos CNA 146, CNA 25 y CNA 23.	117
Figura 5.22 Diagramas de balance de iones en los pozos IMTA 85, IMTA 86 y IMTA 87.	118
Figura 5.23 Diagramas de balance de iones en los pozos IMTA 81, IMTA 82 IMTA 83 y IMTA 84.	119
Figura 5.24 Comportamiento de pH en el valle de estudio	120
Figura 5.25 Diagrama de Shouller de los pozos de Santa Teresa	122
Figura 5.26 Diagrama de Shouller de los pozos de San Fernando	122
Figura 5.27 Plano de localización de isotopía Diciembre 2005	124
Figura 5.28 Línea de agua metodológica mundial	126
Figura 5.29 Decaimiento del tritio.	128
Figura 5.30 Análisis comparativo de unidades tritio por aprovechamiento en el valle El Hundido.	129
Figura 5.31 Datación de muestras de agua subterránea por aprovechamientos	129
Figura 6.1 Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero en el valle El Hundido	134
Figura 6.2 Decreto de veda	135

Índice de Tablas

	Pag.
Tabla 2.1 Temperaturas registradas en la estación de Cuatro Ciénegas en el periodo de 1942- 2001.	30
Tabla 2.2 Radiación solar RA en el tope de la atmósfera en Lagleys/día.	34
Tabla 2.3 Duración promedio máxima diaria de horas de insolación (N) .	35
Tabla 2.4 n tiempo observado de luz diaria, en promedio, de cada mes.	36
Tabla 2.5 Radiación incidente.	36
Tabla 2.6 Radiación solar reflejada.	36
Tabla 2.7 Radiación neta de onda larga.	37
Tabla 2.8 Radiación neta en la zona de estudio.	37
Tabla 2.9 Evaporación a lo largo del año	39
Tabla 2.10 Evapotranspiración a lo largo del año	39
Tabla 2.11 Precipitaciones registradas en la estación de Cuatro Ciénegas en el periodo de 1942 a 2003.	40
Tabla 2.12 Desviación estándar y media aritmética	43
Tabla 5.1 Características físico – químicas de pozos muestreados con un despliegue de los iones mayores en cationes.	98
Tabla 5.2 Características físico – químicas de pozos muestreados con un despliegue de los iones mayores en aniones.	99
Tabla 5.3 Datos obtenidos a distintas profundidades de tres pozos. Estas muestras indican como es el cambio de fases entre un acuífero y otro.	103
Tabla 5.4 Pozos muestreados con un despliegue de los iones mayores.	111
Tabla 5.5 Conductividad y pH de los pozos muestreados.	113
Tabla 5.6 Conductividad, R.A.S. y Willcox.	121
Tabla 5.7 Toma de muestras para análisis isotópicos	124

Apéndices

Apéndice 1	147
Valores del Albedo (α) medio diario para diversas superficies evaporantes.	
Apéndice 2	148
Presión de vapor de saturación e_2 en mm de mercurio.	
Apéndice 3	149
Distribución t de Student.	
Apéndice 4	150
Tipos de Climas según Köppen.	

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

El agua es de vital importancia para los seres vivos, un ejemplo es el hombre que está compuesto en un 75 % de ella; las formas de vida están compuestas por agua entre un 65 y 95% de su peso. Al mismo tiempo, el agua está compuesta por una molécula simple y extraña, considerándose a la misma como el *líquido de la vida*. (UNESCO,2010)

En la actualidad, en el nivel mundial, se puede decir que existe una crisis de agua, debido a que pese a que en nuestro planeta está en su superficie compuesto en su mayor parte por este líquido y que se puede encontrar en tres distintos estados; la cantidad disponible para el consumo humano es mínima.

La mayor concentración de agua dulce se encuentra congelada en los casquetes polares; la otra fuente de mayor importancia de agua dulce es el agua subterránea y por último se encuentran los efluentes superficiales (ríos, lagos, lagunas, pantanos etc.). Todo lo anteriormente mencionado es el 5% del agua que se encuentra en nuestro planeta.

Con lo anterior, y tomando en cuenta la explosión demográfica en el planeta, se debe hacer notar que para el 2050 se tendrá un 70% de demanda de agua potable por arriba de lo que se pueda suministrar en el nivel mundial (UNESCO 2010).

En el país de México se puede contar con un suministro de agua potable de forma superficial y de forma subterránea. Se cuenta con obras hidráulicas de gran capacidad hacia el sureste del país, esto se debe a las condiciones climáticas que se presentan en la zona.

Un caso contrario sucede en el Noreste de la República Mexicana, ya que debido a las características climáticas que se presentan en esta zona, las obras hidráulicas superficiales no son tan efectivas, como los son en el sur del país.

En toda la República Mexicana existen 655 acuíferos censados por la CNA, los que son explotados para satisfacer distintas necesidades, del pueblo mexicano; estas necesidades son de carácter agrícola, industrial, ganadero y doméstico (CONAGUA, 2006).

En algunos de estos acuíferos, debido a la zona donde se encuentran y las características geológicas en las que están, son únicos, y tomando en cuenta su régimen de explotación, hay casos en que están sobre-explotados, causando estragos importantes en el medio ambiente.

Esto se debe a que se rompe el equilibrio que hay entre ellos, para mantener su balance; aunque el acuífero no es percibido por nuestros sentidos, se manifiesta en el medio ambiente de formas muy sutiles. La presencia de un acuífero se manifiesta de distintas formas, por ejemplo, un acuífero a poca profundidad se puede percibir con la presencia de vegetación, dependiendo del tipo plantas que haya en el lugar, eso determinará un grado de la profundidad del acuífero.

Otra manifestación de la presencia de un acuífero es su área de recarga, ya que debido a la infiltración del líquido en el subsuelo, provoca las condiciones idóneas para el crecimiento de vegetación con determinadas características. Lo mismo sucede en la descarga del acuífero ya que el agua es vertida a diferentes ecosistemas o sistemas de agua. Esta descarga hace que dichos sistemas o ecosistemas dependan directamente de la descarga del acuífero, y que cualquier variación en el gasto de la descarga afecte a los ecosistemas dependientes.

Por este motivo, se puede considerar que cuando se tiene una sobre-explotación de los acuíferos, este equilibrio que se tiene con el medio ambiente tiene un impacto muy importante, que en algunos casos es irreversible.

Los estudios realizados por diferentes instituciones como CONAGUA en el noreste de la república, para conocer las capacidades de los acuíferos, marcan ciertas características.

La UNAM, IMTA, UANL, UASLP, CIRA y SAGARPA entre otros han realizado estudios en un sitio muy particular debido a sus características únicas que es la reserva nacional de Cuatro Ciénegas Coahuila la cual tiene características únicas que depende las conexiones con otros acuíferos vecinos.

1.2. Antecedentes

Un ejemplo del equilibrio que se puede tener entre los acuíferos y los distintos ecosistemas, que presentan una vulnerabilidad que nuestros sentidos puede captar con facilidad se localiza en el desierto Chihuahuense.



Figura 1.1 Localización del desierto Chihuahuense.

Fuente: Elaboración propia con datos de **SEMARNAT**

El desierto Chihuahuense se localiza en:

- La cuenca del Río Conchos, incluyendo la Sierra Tarahumara, en Chihuahua.
- Las zonas Protectoras Forestales del estado de Chihuahua.
- La zona transfronteriza del río Bravo, en Chihuahua y Coahuila.
- El humedal de Cuatro Ciénegas, en Coahuila.
- La Sierra de Zapalinamé, en Coahuila.
- La cuenca del río Nazas, en Coahuila.
- La cuenca del Río Aguanaval, en Zacatecas, Durango y Coahuila.
- El Altiplano Occidental en los estados de Nuevo León, Coahuila y San Luis Potosí.
- La zona Wixárika en el estado de San Luis Potosí.
- En Guadalcázar y Xilitla, en San Luis Potosí. (Marroquín *et al*, 1981)

Esto se muestra en la **figura 1.1** donde se representa de manera más detallada la ubicación y magnitud del desierto Chihuahuense.

Se describe la extensión de este desierto, que circunscribe varios Estados de la República Mexicana y por lo tanto, es lógico pensar que en él se encuentran varios acuíferos.



Figura 1.2 Localización del municipio de Cuatro Ciénegas

Fuente: Gobierno del estado de Coahuila

Un caso muy particular del que es posible hablar es el del Humedal de Cuatro Ciénegas, en Coahuila.

Cuatro Ciénegas está situado en Coahuila y presenta una extensión de aproximadamente 150000 km². Su altitud promedio es de 735 m. s. n. m. Se encuentra en la región conocida como altiplano septentrional o Desierto Chihuahuense, a 80 km al oeste de la ciudad de Monclova, **figura 1.2**, localizado entre dos provincias geológicas de México: la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental.

El valle está rodeado por montañas de hasta 3000 m de altitud, con una extensión de 40 km de este a oeste y 30 km de norte a sur, a su vez se encuentra cortada en dos por las Sierra de San Marcos y de Pinos. Colindan con Cuatro Ciénegas dos valles, que son El Hundido y el de Calaveras; al este y al norte, respectivamente.

En este valle existen 77 especies endémicas; por lo cual el 7 de noviembre de 1994 fue declarada área natural protegida en la categoría de Área de protección de flora y fauna por el Instituto de Ecología, bajo el Plan de desarrollo Nacional de 1989 a 1994. El 12 de noviembre de 1997 en la Conferencia General de la UNESCO, en su 29ª reunión, en la Declaración sobre la responsabilidad de las generaciones actuales para las generaciones futuras, se ratificó la responsabilidad que se debe tener con las áreas de protección.

El área de protección de flora y fauna tiene una superficie de 85000 Ha y se localiza en las coordenadas 26° 45' 00" y 27° 00' 00" de la latitud norte; 101° 48' 49" y 102°17' 53" de longitud oeste.

Una de las especies que se encuentran en este valle son los estromatolitos, dicha especie es digna de mencionarse, debido a que es la base de la cadena trófica de las diferentes especies que habitan en el valle.

Los estromatolitos, por definición, son estructuras biológicas primarias órgano-sedimentarias, fósiles o recientes, de aguas salinas, salobres o dulceacuícolas. (Beraldi, 2011)

Su estructura es laminar, compuesta principalmente de CaCO_3 , estas estructuras se encuentran adheridas al sustrato; debido al producto de la actividad metabólica de microorganismos, mediante la interfase sedimento-agua, o la precipitación y atrapamiento de CaCO_3 junto con otros minerales. Los microorganismos que tienen mayor participación en este proceso son las cianobacterias o algas cyanoprokariotas. (Beraldi, 2011)

Cianobacterias:(**Cyanobacteria**, gr. *kuavós kyanós*, "azul") corresponde a una división del reino Mónica, que comprende las bacterias capaces de realizar fotosíntesis oxigénica y, en algún sentido, a sus descendientes por endosimbiosis, los plastos. Son los únicos procariontes que llevan a cabo ese tipo de fotosíntesis, por ello también se les denomina oxifotobacterias (Oxyphotobacteria).

Las cianobacterias fueron designadas durante mucho tiempo como cianófitas (Cyanophyta, literalmente "plantas azules") o cianofíceas (algas Cyanophyceae, literalmente "algas azules"), castellanizándose a menudo como **algas verdeazuladas**. Cuando se descubrió la distinción entre célula procariota y eucariota se constató que éstas son las únicas "algas" procarióticas, y el término "Cyanobacteria" (se había llamado siempre bacterias a los procariontes conocidos) empezó a ganar preferencia. Los análisis genéticos recientes han venido a situar a las cianobacterias entre las bacterias gamnegativas. (Wikipedia, 2012)

En la actualidad, los estromatolitos pueden crecer adosados a taludes o en el fondo de aguas someras. Como se marco anteriormente, estos organismos van creciendo bajo su estructura sedimentaria.

Una de las cualidades principales de estos organismos, es su participación en el ciclo del carbono que es fundamental en los procesos atmosféricos, las concentraciones de CO_2 y la conversión de ozono, al igual que la formación de carbonatos, etc. Los cambios climáticos, tales como el efecto invernadero y los biológicos, como base principal de moléculas orgánicas. Una manera de entrar al ciclo del carbono es fijándolo en forma de sal, como el carbonato de calcio, CaCO_3 , esto lo hacen los estromatolitos. (Beraldi, 2011)

Estos son de los primeros oxigenadores en la atmósfera, ya que los primeros estromatolitos aparecieron en el Precámbrico, los estromatolitos más antiguos que se han descubierto son de Warrawona, Australia y tienen una edad de 3600 millones de años, correspondientes a la era precámbrica.

Los organismos constructores de estromatolitos son fotosintéticos oxigénicos, es decir, que al hacer fotosíntesis, liberan oxígeno a la atmósfera. El incremento de este oxígeno está evidenciado geológica y biológicamente. Actualmente, el 98% de los organismos eucariontes prescinde del oxígeno para llevar a cabo funciones metabólicas vitales. Los eucariontes son organismos uni o multicelulares constituidos por células con núcleo.

Como se ha mencionado antes el crecimiento de los estromatolitos se da en el fondo de aguas someras o taludes. En el valle de Cuatro Ciénegas existen 200 pozas, que se encuentran interconectadas, sus diámetros van desde 1 m, hasta 100 m y las profundidades van desde 50cm hasta 18 m, lo cual permite su crecimiento.

Debido a las corrientes que pasan por las pozas del valle, se tiene una gran diversidad de formas y tipos de estromatolitos; coexistiendo con animales vertebrados e invertebrados, dando eso a entender que dichos estromatolitos

son la base principal de la cadena trófica de distintos ecosistemas que coexisten en el valle.

Se ha presentado graves problemas en estos sistemas de pozas, debido a que en los últimos años se ha visto un notorio descenso de los niveles de agua en las pozas y la desecación de otras, poniendo en riesgo los frágiles ecosistemas de muchas especies endémicas de la zona.

Este problema se empezó a notar con la aparición de distintas actividades agropecuarias que se asentaron en lo que es el valle El Hundido; por tal motivo, fue necesario realizar un modelo hidráulico y geoquímico para poder tener una idea de cuál es la capacidad de este acuífero y la forma en la que este afecta al acuífero del valle de Cuatro Ciénegas.

1.3. Hipótesis.

El tipo de esfuerzos a los que fueron sometidas las diferentes estructuras geológicas en el área, de ahí se desprende que el acuífero investigado El Hundido con clave por CONAGUA RD0506 se encuentra en medios fracturados y que su posible conexión con la reserva ecológica de Cuatro Ciénegas por medio de su acuífero denominado por CONAGUA RD0528 a través de la falla pliegue de San Marcos.

1.4. Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es determinar el comportamiento hidráulico del acuífero del valle El Hundido y su posible conexión con el valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

Objetivos específicos:

- Determinar la Recarga del acuífero.
- Conocer el tiempo de residencia de los parámetros hidráulicos en el valle.
- Analizar el proceso de descarga o salida del flujo hacia el valle de Cuatro Ciénegas.

1.5. Metodología.

Para la determinación de la recarga del acuífero se hace mediante el balance hidrológico de la cuenca; tomando en cuenta la geología del sitio, mediante la aplicación de un modelo estructural, tomando como parámetros el sistema de fracturas y fallas en el nivel regional, así un análisis estadístico de las variables, climatológicas como:

- La precipitación media anual.
- La luminosidad.

- La evaporación.

Para la determinación de parámetros hidráulicos del acuífero y el tiempo de residencia se utilizarán pruebas de bombeo, que es la forma más idónea, para determinar los parámetros, que son:

- Gasto ($Q = m^3/día$, lt/seg)
- Coeficiente de Almacenamiento(S)
- Transmisibilidad ($T = m^2/día$)
- Tiempo de Residencia

Al definir el comportamiento del acuífero que está sometido a un régimen de sobre explotación no regulado, se puede establecer la dirección preferencial del flujo en el subsuelo así como: su salida hacia el valle de Cuatro Ciéneas, Coahuila.

1.6. Localización.

La zona de estudio se encuentra en la parte central del estado de Coahuila, entre los paralelos 26° 20' y 27° 20' de latitud norte y entre los meridianos 101° 45' y 102° 45' de longitud oeste con una superficie aproximada de 952 Km² **Figura 1.3**

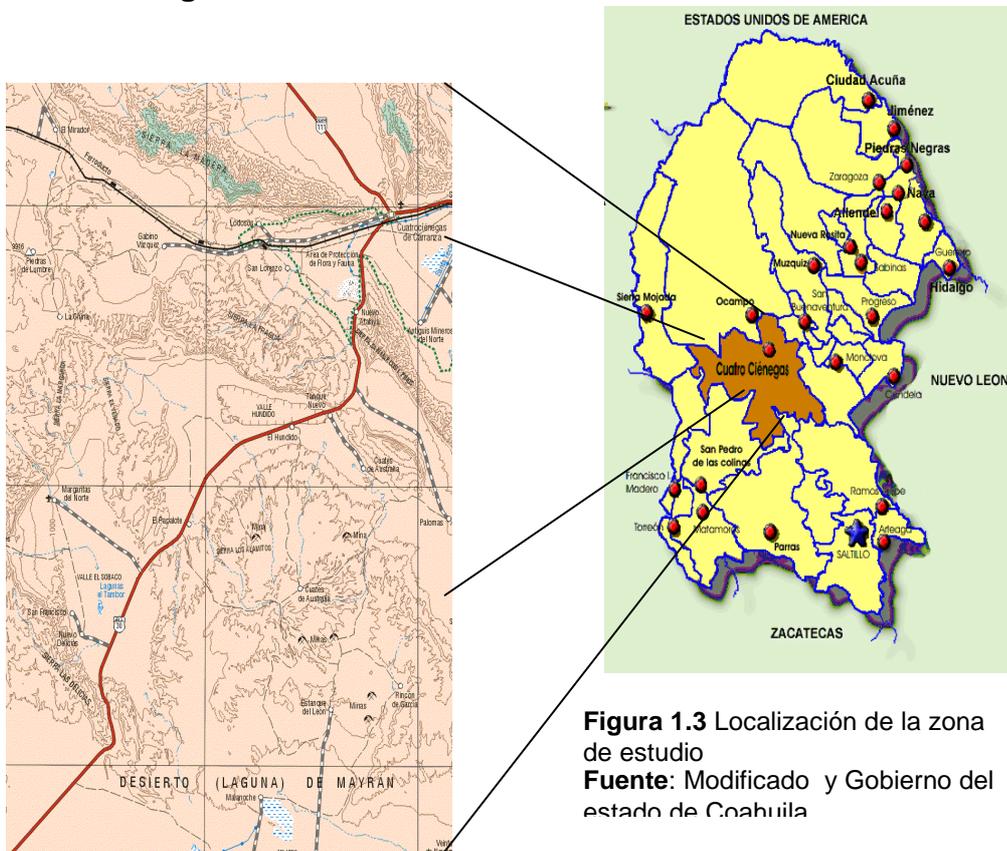


Figura 1.3 Localización de la zona de estudio
Fuente: Modificado y Gobierno del estado de Coahuila

El valle El Hundido se encuentra delimitado al norte por la sierra La Fragua, al sur y al oeste se encuentra la sierra Alamitos; al este por la sierra El Venado y al poniente con la sierra del Granizo.

El acuífero del valle El Hundido pertenece a la Región Hidrológica 35, del Bolsón de Mapimí, mientras que el acuífero de Cuatro Ciénegas pertenece a la Región Hidrológica 24, Río Bravo-Conchos. **Figura 1.4**

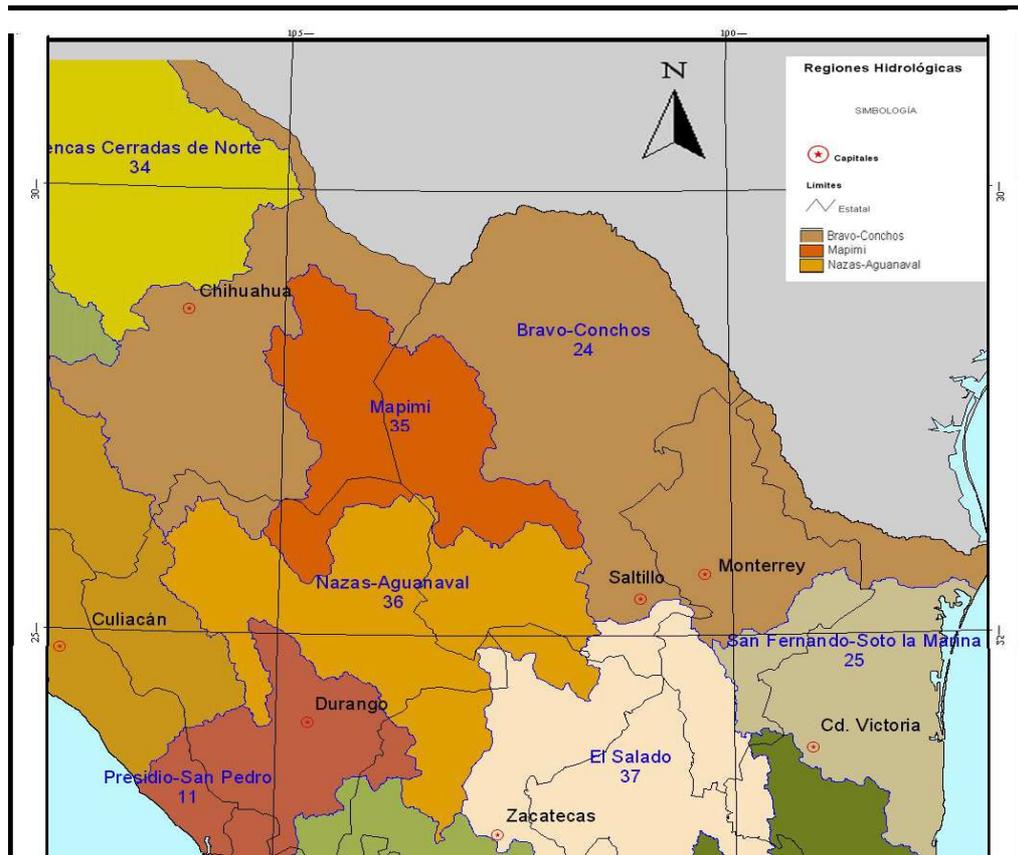


Figura 1.4 Regiones Hidrológicas

Fuente: CONAGUA (SIGA 2008)

Las principales vías de comunicación son la carretera federal N° 57, que comunica desde el centro del país con la parte norte del mismo, pasando por México, Querétaro, San Luis Potosí, Saltillo, Castaños, Monclova y llega hasta Piedras Negras. La carretera N° 30, que parte de la ciudad de Monclova a San Pedro y Torreón, Coahuila, une las diferentes cabeceras municipales: San Buenaventura, Sacramento, La Madrid, Cuatro Ciénegas etc. **Figura 1.5**

El aeropuerto de Torreón es el único que ofrece servicio internacional; los restantes sólo dan servicio nacional y local. Los más cercanos a la zona de estudio son el de Torreón y el de Monclova, a una hora y media de camino por la carretera N° 30, el primero y el segundo a dos horas por la misma carretera.

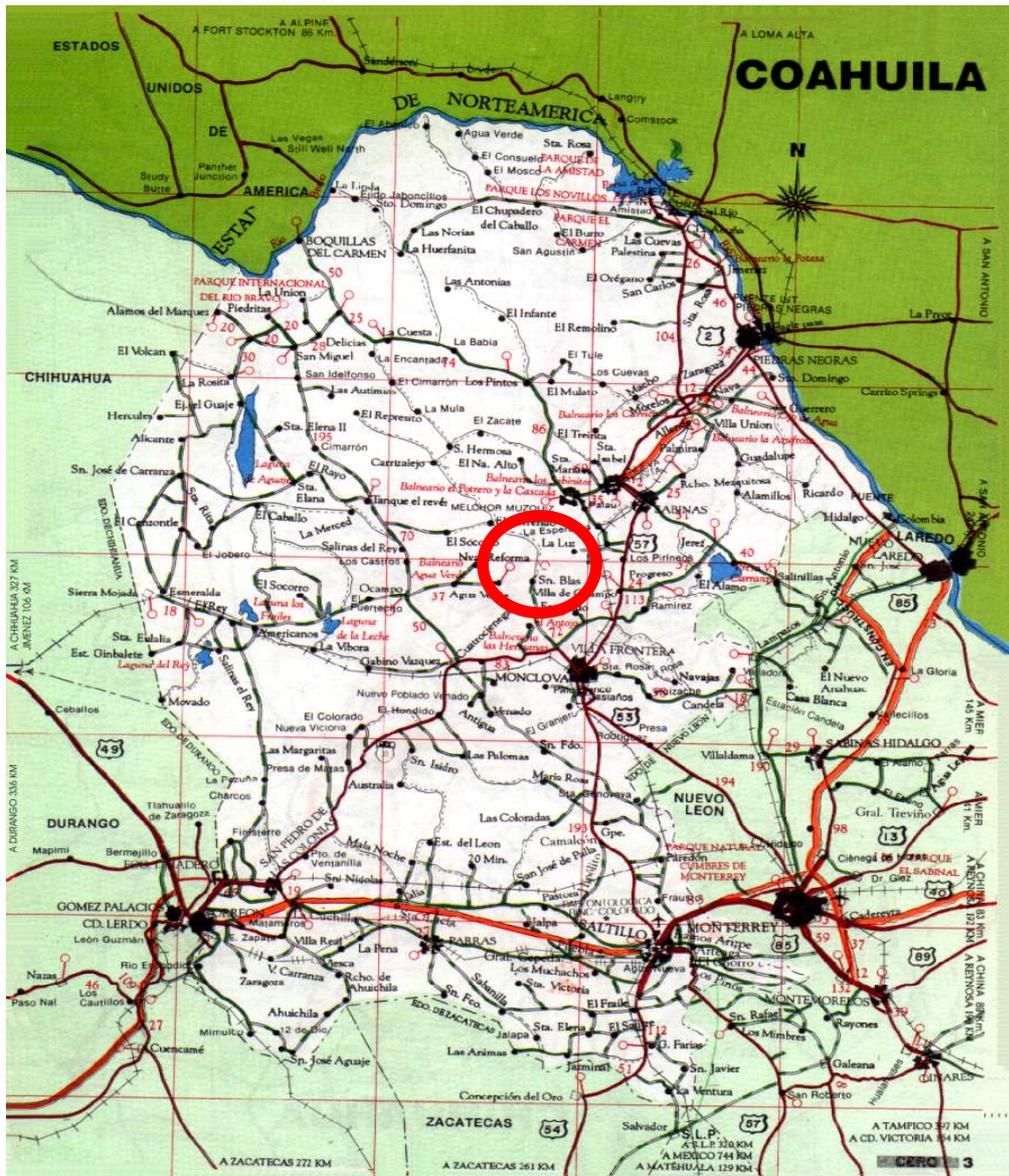


Figura 1.5 Plano Carretero

Fuente: Guía roji (2008)

1.7. El uso del Agua.

Es de gran importancia saber la calidad de agua, ya que se debe considerar las características del agua.

En la zona de estudio se conoce que son pocos los aprovechamientos hidráulicos aptos para el suministro de agua de uso doméstico, esto es debido a las características del agua, que es muy dura debido a su alto contenido de sales; dichos pozos se encuentran en los ejidos Tanque Nuevo y Santa Teresa de Sofía; otros pozos que se encuentran en la zona de estudio con calidad para el uso doméstico se encuentran en la agropecuaria Beta Sta. Mónica.

Las demás comunidades, como son: las Morenas, El Hundido, Buenavista y El Papalote, la calidad del agua de los pozos con que cuentan no es apta para el consumo humano, así que estos ejidos, para satisfacer sus necesidades básicas, se surten por medio de pipas de agua desde Cuatro Ciénegas.

La mayoría de los pozos que se encuentran en la zona se dedican para la agricultura o para la creación de cera de candelilla. Esto se debe a las características que presenta el agua (que es sulfurosa o con alto contenido en sales).

El agua, que se encuentra en la mayoría del valle El Hundido es dura, sólo utilizable para las actividades antes mencionadas como la agricultura y la creación de cera; aunque las características que tiene esta agua no favorece el crecimiento de muchos cultivos, pero la alfalfa debido a su tolerancia a altas concentraciones de sales, es el cultivo más apto para la región; pero el consumo de agua de esta planta es muy elevado.

1.7.1. La situación actual.

El valle El Hundido comprende los ejidos de Tanque Nuevo, Santa Teresa de Sofía, El Hundido, San Fernando, Las Morenas, Buenavista y El Papalote.

El principal sustento económico de estos ejidos es la industria de la candelilla es decir, la obtención de cera a partir de esta planta.

El método de explotación y distribución de la planta de candelilla es muy rudimentario. Los recolectores se trasladan en burros o en camiones hacia las zonas donde puede encontrarse la candelilla. Esta se arranca manualmente, con todo y raíz. Posteriormente, se preparan pacas de 20-30 kg de planta de candelilla libre de impurezas (tierra, material pétreo, hierba seca, etc.), para después ser transportarlas.(Candelilla, 2008)

La hierba recolectada se concentra en centros de acopio, donde será sometida a un proceso de extracción de la cera. **Fotografía 1.1 y 1.2**



Fotografía 1.2
Transporte de candelilla desde sitios de recolección

Fuente: Tomas en el lugar del sitio de estudio.

Fotografía 1.1
Transporte de candelilla desde sitios de recolección

Fuente: Tomas en el lugar del sitio de estudio.



Para la extracción de la cera, la planta de candelilla se coloca en calderos de hierro llamados “pailas” por los candelilleros; en una mezcla del agua acidificada con ácido sulfúrico.

La carga de candelilla inmersa en la solución agua-ácido se calienta mediante fuego directo hasta el punto de ebullición de la solución, ocurriendo así la fusión de la cera en el baño y su separación de la planta. El ácido sulfúrico evita la formación de una emulsión entre la cera de candelilla y el agua, la cual podría generarse dadas las condiciones de turbulencia creadas por el proceso de ebullición. Mediante esta técnica, la cera de candelilla fundida flota en la superficie del agua en forma de espuma. **Fotografía 1.3 y 1.4**



Fotografía 1.3 Proceso de elaboración de la cera.

Fuente: Tomas en el lugar del sitio de estudio.

Fotografía 1.3 Proceso de elaboración de la cera.

Fuente: Tomas en el lugar del sitio de estudio.



La cera espumosa caliente se retira de la “paila” mediante utensilios con orificios o “espumaderas”, para ser recogida en tanques de acero, cubetas, agujeros cónicos en el piso o en moldes de barro, que se colocan en el nivel del piso. En cualquiera de estos recipientes, la espuma caliente (cera) se separa, por decantación, de un color pardo que precipita hacia el fondo del recipiente y que es posteriormente reciclado a la “paila” de extracción.

En la parte intermedia del recipiente, justo encima de la fase acuosa, se forma una capa de fina crema de color amarillo que constituye la cera de candelilla, a la cual se le conoce con el nombre de “cerote”. En la parte superior del recipiente se forma una tercera capa, que consiste en una pasta formada por cenizas, burbujas e impurezas sólidas. Las plantas escaldadas por la ebullición sirven como combustible para la paila, una vez secadas al sol.

El cerote se deja enfriar para solidificar a temperatura ambiente. La cera endurecida se quiebra en pedazos golpeándola con un marro y los trozos se funden para que liberen las impurezas de tierra y materia orgánica, que son finalmente separadas de la cera por sedimentación. La cera decantada libre de

impurezas sólidas conocida como “cera de candelilla cruda” se deja enfriar y solidificar nuevamente.

Sin embargo, ya conociendo la principal actividad de estos ejidos es importante mencionar que otra actividad que tienen, aunque de menor importancia, es la agricultura; pero el único producto que se desarrolló en la zona es el cultivo de alfalfa.

Esto porque en el valle El Hundido se asentaron tres distintas agropecuarias que se dedican únicamente al cultivo de dicho producto.

Hasta 2008, las agropecuarias que se encontraban en el sitio son:

1. Agrícola El Pilar
2. Agrícola Beta Sta. Mónica.
3. Agrícola de Florentino Rivera.

La agropecuaria que se encuentra actualmente es Agrícola Beta Sta. Mónica.

Actualmente el único ejido dedicado a la agricultura de la alfalfa es el ejido de Santa Teresa de Sofía.

Otra de las actividades existentes en el área es la cría de ganado menor o caprino que se practica en la mayoría de los ejidos.

1.8. Estado del arte.

Resúmenes de los contenidos de algunas investigaciones previas en el sitio de estudio.

1.8.1 *Imta, CNA, SEMARNAT, INE. Estudio hidrogeológico de los acuíferos El Hundido y Cuatro Ciénegas. Coahuila. (IMTA 2004)*

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento hidrodinámico del acuífero El Hundido y su conexión con el acuífero de Cuatro Ciénegas Coahuila.

Los trabajos realizados en el campo incluyeron el censo de aprovechamiento, 9 pruebas de infiltración y 1 prueba de bombeo, la hidrometría de los aprovechamientos y 40 nivelaciones de brocales.

Evaluación Geológica:

- Determinación de las unidades geológica.
- Elaboración de 5 secciones Geológico-estructurales.

Se obtuvieron resultados de hidrogeoquímica, resultados isotópicos donde se muestra el origen del agua, resultados de carbono 14 y formación del modelo conceptual del los dos valles y el modelo matemático de ambos valles.

1.8.2. *Lesser y Asociados, S.A. de C. V. Estudio de la evaluación hidrogeológica e isotópica en el Valle el Hundido Coahuila. Gerencia de Aguas subterráneas, Comisión Nacional del Agua, contrato GAS-006-PRO01, diciembre 2001*(LESSER, 2001)

Los objetivos del estudio fueron:

- Determinar las condiciones geológicas, estructurales estratigráficas que gobiernan la ocurrencia del agua subterránea en la zona de estudio.
- Definir los diferentes sistemas y subsistemas hidrogeológicos existentes en la región y la posible conexión hidráulica subterránea entre ellos.
- Estimar el balance del agua subterránea, la condición actual de la explotación y las características hidráulicas subterráneas entre ellos.
- Determinar las características físico-químicas del agua del subsuelo, superficiales y de los manantiales.
- Determinar los contenidos de los isótopos ambientales: deuterio, oxígeno 18 y tritio, con el fin de identificar el sistema o sistemas de acuíferos en las zonas cársticas.

Las actividades realizadas en este estudio fueron geológicas, geohidrológicas, censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, análisis Físico-químico de muestras de agua, muestreo y análisis isotópico y pruebas de bombeo, con el objeto de determinar la conexión hidráulica entre los valles El Hundido, Cuatro Ciénegas y Ocampo, al igual que la realización de impacto sobre manantiales de Cuatro Ciénegas por extracción en El Hundido.

1.8.3. SARH, Estudio geohidrológico preliminar en la zona de Cuatro Ciénegas – Ocampo, Coahuila. Elaborado por la compañía ININSA, S.A. para la subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1980.(SARH, 1980)

Los objetivos de este estudio fueron:

- Obtener conocimiento general de la geometría del acuífero.
- Conocer la forma preliminar del volumen actual de la explotación del agua subterránea.
- Determinar la recarga del acuífero de explotación.
- Delimitar áreas con agua de buena calidad.
- Recomendar un régimen de explotación racional y definir áreas favorables para el emplazamiento de nuevas captaciones.

Se realizaron actividades de campo como censo de captaciones de agua subterránea, 10 pruebas de bombeo de 3 a 8 hrs, 41 muestras de agua, 14 afloramientos de manantiales, 99 nivelaciones topográficas de brocales y 30 sondeos eléctricos verticales de geofísicos, 3 secciones geológicas interpretación y análisis de actividades de campo y en geofísica, geología, hidrogeoquímica, y hidrología Subterránea.

1.8.4. The formation and water resource management of the Cuatro Ciénegas de Carranza Valley, Coahuila, México. Suzanne Pierce. University of Texas at Austin, EUA, 2002 webspace.utexas.edu/sawp33/www/index.html.(Pierce, 2002)

El valle de Cuatro Ciénegas es un sistema cerrado de agua superficial, pero debido a las prácticas de irrigación del valle vecino, éste se ha hecho artificialmente abierto. Recientemente, las disminuciones en los niveles del agua dentro del valle interrumpen los ecosistemas superficiales.

En este documento se describe la fisiografía y la climatología del lugar. Las lluvias coinciden con los periodos de alta evaporación, presentando aproximadamente 200mm de precipitación anual y temperaturas desde de 44° C en verano hasta bajo 0° C en invierno (Minckley 1969 y Pronatura, 1998).

También se describe la geología e hidrogeología, dando una visión de las formaciones que se encuentran en la zona y sus características hidrogeológicas. Se indican las posibles condiciones de frontera, las zonas de recarga, almacenamiento y descarga. El coeficiente de almacenamiento se encuentra entre 0.022 y 0.0003 (Lesser, 2001).

Además, se presentan datos de la calidad del agua; pero, sobre todo, basados en el estudio de Lesser.

1.8.5. Investigaciones desarrolladas por la Dra. Valeria Souza, Investigadora del Instituto del Ecología de la U.N.A.M.

La Dra. Valeria Souza y su equipo de trabajo han llevado a cabo una investigación amplia en la zona. Se ha publicado información en artículos de divulgación para dar un panorama de la misma que, se resume a continuación:

Cuatro Ciénegas: Oasis en el desierto de Coahuila. Escenario de una gran diversidad biológica. Revista Ciencia y Desarrollo Gutiérrez, G.(2004) Nueva Época, volumen 30, número 176. México. (Souza, 2004)

En este documento se dice que Cuatro Ciénegas presenta una combinación de agua dulce y salada que podría ser un símil de la encontrada en Marte(Souza)(2004); en Cuatro Ciénegas se cuenta con especies de flora y fauna únicas en el mundo, pero hay algo más trascendental: presenta una combinación de agua dulce y salada. La primera proviene de las montañas; y la segunda, ubicada en un lecho profundo, consiste en un mar conservado desde el Cretácico. Además, según la National Aeronautics and Space Administrations (NASA), el agua de Cuatro Ciénegas podría ser un símil de la encontrada en Marte, profunda y salada.

Este grupo de trabajo realizó un estudio bacteriológico entre los valles El Hundido, Calaveras y Cuatro Ciénegas, teniendo como resultado la identificación de genes marcadores de la patogénesis en eteropatógenos de diversas fuentes; por medio de microarreglo. Para hacer esta investigación se utilizó la técnica "Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism" (TRFLP) con la cual se obtuvo la radiografía de la comunidad, mediante picos gráficos indicadores de lo que se encuentra en cada lugar y rápidamente la diversidad de secuencia de ADN bacteriano, de las muy particulares bacterias de Cuatro Ciénegas, claramente marinas y de composición distinta en cada sitio, lo que explica la diversidad de ecología. Encontraron que el agua subterránea de los tres valles situada en triangulo (El Hundido, Calaveras y Cuatro Ciénegas) tienen la misma temperatura y comparten el agua de este mar.

En lo que respecta a la contaminación del agua, estudios realizados por la U.N.A.M. señalan que al aumentar las concentraciones de fosfatos desaparecerían los estromatolitos y todas las especies asociadas, más aun, un exceso de fertilizantes traería consigo problemas de eutrofización (aumento de nutrientes en el agua) y favorecería el ingreso de especies invasoras acuáticas.

Análisis de las comunidades bacterianas de Cuatro Ciénegas y su relación con el Valle El Hundido, Coahuila.

Desde el punto de vista geológico, los valles de Cuatro Ciénegas y El Hundido presentan una complejidad en su estructura, sobre todo en los

plegamientos de las distintas formaciones y en la naturaleza misma de cada una de ellas. Debido a las fuerzas laterales, las formaciones han sufrido grandes plegamientos en distintas orientaciones. El resultado de estas fuerzas es la aparición de cabalgaduras, así como las fallas inversas. En la Sierra de San Marcos, así como en la Sierra de La Fragua, se observan formaciones en posición casi horizontal, orientadas al oeste. Aunado a esto, entre la formación San Marcos y Acatita (estratos impermeables) se encuentran dos grandes estratos de yeso los que, ocasionaron el desplazamiento de la formación por arriba de ésta.

- Existe evidencia de que entre la sierra de San Marcos y la de La Fragua corre una falla. Esta falla comunicaría subterráneamente el valle de Cuatro Ciénegas con el valle el Hundido (Mosser y Rodríguez.)
- La disposición de las formaciones sugiere que las rocas impermeables sufrieron grandes fracturas debido a los fuertes plegamientos, los cuales ocasionaron una paulatina conexión con el valle de Cuatro Ciénegas (Mosser y Rodríguez.)

La Dra. Souza hace algunas recomendaciones como:

1. Regular de manera muy cuidadosa el uso del agua en El Hundido, para que no se contamine el manto freático con pesticidas y fertilizantes y para que se utilice sólo parte del agua cárstica de recarga. Sugiere que se haga una evaluación muy seria de cuánta agua se captura por recarga y que se limite a sólo el número de hectáreas que, utilizando riego por goteo y fertilización por goteo, no sobrepasen la cuota mínima supuesta de recarga.
2. Debido a la gran heterogeneidad observada en el agua profunda, se requiere determinar la afiliación de cada pozo de agua en El Hundido y Calaveras para determinar los límites del tipo marino. Recomienda utilizar sólo aquellos pozos que no muestren agua marina.
3. Aconseja utilizar otras fuentes de información como: los datos de isótopos, la paleomagnetismo, determinación cuidadosa de los estratos (geología clásica), estudios de geofísica y tipos de sales en el agua profunda. Los resultados existentes indican que el agua superficial es kárstica; sin embargo, se ignora cuál es el origen y la composición del **manto** profundo, las concentraciones de oxígeno, los niveles del manto freático. Esto es importante para determinar no sólo los límites del agua marina, sino también el camino de esta agua (las conexiones), lo cual es tan importante como su origen. (Souza 2004)

Reporte de análisis de las comunidades bacterianas de Cuatro Ciénegas y su posible relación con el valle El Hundido, Coahuila. Informe A

En este reporte se presenta un primer análisis de las comunidades bacterianas de Cuatro Ciénegas y sus alrededores, usando tanto métodos moleculares como tradicionales. Los resultados indican una extraordinaria heterogeneidad entre las localidades, pero una clara división entre las comunidades bacterianas que habitan cuerpos de agua dulce y las que habitan cuerpos de agua salada, quedando las muestras del valle El Hundido cerca de las muestras de agua salada de Cuatro Ciénegas. Los métodos usados son promisorios y se concluye que se necesita obtener más muestra y llevar a cabo análisis detallados.

Reporte de análisis de las comunidades bacterianas de Cuatro Ciénegas y su posible relación con el valle El Hundido, Coahuila. Informe B

En este reporte se demuestra que la señal genética aportada por los microorganismos coincide con la evaluación geológica. Esto es posible ya que los recientes avances en las técnicas moleculares permiten iniciar el análisis formal de las comunidades bacterianas, objetivo antes imposible, ya que la mayor parte de las especies bacterianas no se habían podido cultivar con los métodos estándares de la microbiología.

Los resultados obtenidos indican una extraordinaria diversidad en las localidades estudiadas y similitud en las comunidades bacterianas de los valles El Hundido, Cuatro Ciénegas y Calaveras. Los resultados indican conexión entre los valles.

Con los datos se realizó un análisis de “clusters” que agrupa a cada sitio, de acuerdo con la semejanza o diferencia entre los genotipos y la abundancia de cada uno. Estos análisis indican, sin ninguna duda, que los dos manantiales principales del valle de Cuatro Ciénegas (Becerra y Churince) están relacionados con el resto de los sitios muestreados, incluidos los valles colindantes de El Hundido y Calaveras.

Además, existe una asociación cercana entre las muestras de los tres valles; por ejemplo: Churince, Calaveras y El Hundido forman un grupo bien definido. Estos datos son señal inequívoca de que el agua profunda de los tres valles es compartida actualmente; ya que en el pasado, si estos tres valles hubieran estado aislado, uno del otro, las comunidades bacterianas hubieran divergido con el tiempo (50 millones de años) generando patrones diferentes. Hay que agregar además que las bacterias que se encontraron de manera común en estos tres valles son microorganismos sumamente raros, de origen principalmente marino y que no migran por el aire.

Como recomendación, se debe regular de manera muy cuidadosa el uso de agua en El Hundido. Debido a la gran heterogeneidad, observada en el agua profunda, se requiere determinar la afiliación de cada pozo de agua en El Hundido y Calaveras, para determinar los límites de agua marina. También se aconseja utilizar otras fuentes de información, como refuerzo; isótopos, paleomagnetismo, determinación cuidadosa de los estratos (geología clásica), geofísica y distinción de los tipos de sales en el agua profunda.

1.8.6 Investigaciones desarrolladas por el Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez, Investigador del Instituto de Ingeniería Civil de la U. A. N. L.

El Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez ha estado investigando, junto con su equipo, la zona del Hundido y ha realizado artículos como:

1.8.6.1. Tectonic fame rock the Hundido valley.(Rodríguez, 2007)

En este artículo se hace una descripción de lo que es el marco geológico del valle El Hundido. Esta descripción muestra las estructuras que se encuentran en el sitio. También que se hace una descripción del sistema de fallas que se encuentra en el área.

Describió las formaciones que se encuentran en un perfil geológico del valle, además de una pequeña relación de las temperaturas que se registran en la zona de protección; en específico, en las pozas, con el agua que se tiene en el valle.

Otra de las investigaciones realizadas por el equipo del el doctor Juan Manuel Rodríguez es la de:

1.8.6.2. IMPORTANCIA DE LA FALLA DE SAN MARCOS, EN EL MARCO GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL DEL VALLE DEL HUNDIDO, CUATRO CIÉNEGAS, COAHUILA, MÉXICO.

En este trabajo se presenta nueva evidencia sobre el Noreste de México, que confirma la historia del Sureste de Norte-América, antes del Cretácico. En la primera etapa del estudio se establecieron los siguientes objetivos:

- Definir la presencia de la Falla de San Marcos y la reactivación de ésta, a principios del Eoceno.
- Establecer el marco geológico y estructural del Valle del Hundido
- Establecer el patrón de fallamiento y fracturamiento en el nivel regional.

MARCO GEOLÓGICO

En el Norte y Noreste de México se localiza un sistema de lineamientos de fallas, que se muestran. Dichas fallas son:

- Al norte, Falla La Babia
- En la parte central, Falla San Marcos.
- Al sur, Megasher Mojave- Sonora. Este sistema de fallas cruza la parte noreste del estado de Coahuila.

En la parte central del estado de Coahuila, al noreste, en tiempos del Jurásico tardío y el Cretácico temprano, la Isla de Coahuila estaba definida por la Falla de San Marcos (Mc Kee and Jones, 1997). El nombre de San Marcos fue tomado a partir de la exposición que presenta en el Valle de San Marcos. La Falla de San Marcos tiene una dirección N62W.

La Sierra de La Fragua está asociada a una estructura dómica fraccionada por fallas menores y plegamientos que dieron lugar a pliegues en forma de caja. La sierra de la Fragua está limitada, al sur, por la Falla de San Marcos, con rumbo NW- SE de edad precretácica y por una falla inversa producto de la orogenia Laramide. Dichos eventos ocurrieron a fines del Eoceno, el cabalgamiento se originó como producto de dos eventos estratigráficos.

El desplazamiento principal genera acortamientos, formando escarpes muy pronunciados, como los que se presentan en el flanco sur occidental de las Sierras de San Marcos-El Pino, El Granizo y en la parte sur de La Fragua. El desplazamiento principal genera acortamientos, formando escarpes muy pronunciados, como los que se presentan en el flanco sur occidental. Este modelo explica cómo la contracción horizontal del material, separado del sustrato tiende a generar una cuña, que crece verticalmente provocada por la fuerza de gravedad.

El desplazamiento débil tenderá a generar el acortamiento sobre una zona más amplia, y creará una cuña más suave sobre la rampa la presencia de evaporitas en dos niveles, Formación Minas Viejas, del Jurásico Inferior y Formación Acatita del Cretácico Inferior.

Las rocas clásticas y carbonatadas, que conforman la estructura de la mayoría de las sierras de la región Noreste de México generan un despegue basal, en el flanco sur del Valle del Jabalí. El basamento cristalino aflora en la parte sur de este valle.

EL MARCO GEOFÍSICO

Algunos cabalgamientos observados en el área investigada tienen una geometría lítrica y son el resultado de llanos y rampas alternantes, como las que se presentan en la Sierra de la Fragua, la Sierra del Granizo y en el flanco sur occidental.

Objetivos

- Establecer el marco geológico y estructural del Valle del Hundido.
- Definir los contactos estratigráficos de cada una de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio.
- Establecer el patrón de fallamiento y fracturamiento de forma regional.

Metas

- Se establecerá la relación posible entre los epicarstos presentes en la Formación Aurora con los que se detectaron en el subsuelo mediante técnicas geofísicas, lo cual conducirá a suponer que a través de viejos carstos presentes en el subsuelo, exista comunicación hidráulica entre ambos valles (El Hundido- Cuatro Ciénegas).
- Se entenderá que los cabalgamientos observados en el área investigada tienen una geometría lítrica y son el resultado de llanos y rampas alternantes, como las que se presentan en la Sierra de la Fragua, la Sierra del Granizo y en el Flanco Sur occidental de la Sierra de San Marcos-El Pino.
- Así se sabrá la vergencia de los movimientos que dieron lugar a los cabalgamientos en el área de investigación, procedieron del norte, producto del último evento orogénico ocurrido en el Eoceno. El modelo geodinámico que dio lugar al plegamiento de las estructuras en el Valle del Hundido., se ha basado en los siguientes elementos:
 - La presencia de evaporitas en dos niveles:
 - Formación Minas Viejas del Jurásico Inferior.
 - Formación Acatita del Cretácico Inferior.
 - La existencia de rocas clásticas y carbonatadas, las cuales conforman las estructura de la mayoría de las sierras de la región Noreste de México.
 - Un despegue basal, en el flanco sur del Valle del Jabalí.
 - El basamento cristalino que aflora en la parte sur de este valle.

A partir de estos criterios se logró determinar el modelo geodinámico que dio lugar al plegamiento de las estructuras en el área de investigación, en el Valle del Hundido.

El levantamiento actuó en la deformación de las estructuras, generando una geometría de pliegues, producto de un anticlinal recumbente, que fue cabalgado al Sur contra el alto de la "Isla de Coahuila". La geometría asociada a pliegues inició su despegue en el nivel salino. En aquellos sitios donde los depósitos evaporíticos no están presentes, la estructura se acuña. El mecanismo del modelo de cuña explica que las contracciones de las capas de material que se despliegan de su base, tienden a producir una cuña. (Davis et al, 1983. Dahlem et al, 1984).

Resultados y Discusiones

El modelo geodinámico de cuña es válido, tanto para la cuenca de Sabinas, como para la Sierra Madre Oriental. Este modelo explica cómo la contracción horizontal del material, separado del sustrato, tiende a generar una cuña, la cual crece verticalmente provocada por la fuerza de gravedad. La geometría de la cuña desarrolla y refleja un equilibrio entre la tensión del material de ésta, necesaria para causar el deslizamiento a lo largo del esfuerzo principal. El desplazamiento principal fuerte tenderá a generar acortamientos generando escarpes muy pronunciados, como los que se presentan en el flanco sur occidental de las Sierras de San Marcos-El Pino, El Granizo y en la parte sur de La Fragua. El desplazamiento débil tenderá a generar el acortamiento sobre una zona más amplia, y creará una cuña más suave sobre la rampa.

La apertura del ángulo de la cuña depende de la resistencia del material que forma la rampa de despegue basal.

Los despegues en rocas dúctiles (yesos y anhidritas) y menos resistentes, tienen una prolongación mayor, siendo menor el acortamiento.

A partir del modelo estructural de cabalgamientos, basado en información de campo, y el levantamiento de secciones geológicas apoyadas con imágenes de satélite y descripción de afloramientos, en las Sierras de San Marcos, La Fragua y El Granizo, se concluye lo siguiente:

La Sierra de la Fragua se sobrepone a los cabalgamientos frontales, con la Sierra de San Marcos; las escamas de despegue, como los contactos entre las formaciones: Georgetown, Aurora, Peña y Cupido, producen comunicación hidráulica entre los valles del Hundido y al de Cuatro Ciénegas.

Estos criterios confirman los resultados obtenidos por la Dra. Valeria de Souza, investigadora del Instituto de Ecología de la UNAM, en su trabajo: (Marine Jurassic microbes in a continental karst setting, with implications for ecosystem conservation), a partir del análisis de comunidades bacterianas de Cuatro Ciénegas y su posible relación con el Valle del Hundido.

Aunado a esto, el pozo perforado en diciembre del año pasado en el flanco oriental de la Sierra de la Fragua aproximadamente a 300 metros de la carretera, el agua reporta una temperatura de 32 C° similar a la que presentan las pozas: Churince, La Becerra y Poza Azul. (Forti P., Giulivo I., Piccini, Tedeschi R., 2003)

En el diagrama se muestran dos mecanismos diferentes que intervienen en la formación de la estructura de caja como de los pliegues en las sierras de la Fragua, El Granizo y San Marcos-El Pino.

La formación de la caja y los pliegues ocurren a través de la migración de la bisagra; esto es similar a lo que ocurre durante la formación de los esquistos. Posteriormente, el estrato del limbo se coloca en forma vertical formando un ángulo de 90°. Este tipo de migración de bisagra es similar al mecanismo que da lugar falla-pliegue y a propagación de falla tipo plegamiento. (Suppe, 1983, Medwedeff, 1990)

Las estructuras de caja pliegue se forman a través de un combamiento. El limbo vertical en este modelo forma lengüetas a través de la rotación de cuerpos rígidos. El mecanismo operador del modelo pliegue-caja requiere de estratos móviles y plásticos, tal es el caso de los yesos y anhidritas presentes en la Formación Minas Viejas y en la Formación Acatita, dentro del área de estudio.

Partiendo de este modelo geodinámico, se logró demostrar que el modelo conceptual hidrogeológico del Valle El Hundido que presentó la Empresa Lesser y Asociados no es correcto. Se demostró en el campo que dicha estructura no es un sinclinal, sino que la zona de estudios fue sometida a fines del período Cretácico a esfuerzos provenientes del norte, los cuales plegaron las estructuras de las Sierras de La Fragua, El Granizo y San Marcos-El Pino, dan lugar a cabalgamientos, además los resultados preliminares de geofísica, lo cual demuestra un alto gravimétrico que puede estar asociado a zonas cársticas en las formaciones cretácicas correspondientes a las Formaciones Aurora y Cupido del Cretácico Inferior.

Conclusiones

- Hay presencia de evaporitas en dos niveles, Formación Minas Viejas del Jurásico Inferior y Formación Acatita del Cretácico Inferior.
- Rocas clásticas y carbonatadas, conforman la estructura de la mayoría de las sierras de la región Noreste de México.
- Hay un despegue basal, en el flanco sur del Valle del Jabalí. El basamento cristalino aflora en la parte sur de este valle.
- Los resultados preliminares de geofísica demuestran una heterogeneidad, teniendo anomalías positivas y negativas.
- Existe una relación entre las anomalías gravimétricas y la tectónica de la zona.
- La configuración de las anomalías gravimétricas muestran la presencia de una falla regional con fallas perpendiculares a su eje, lo que conforma un sistema de fallas escalonadas.
- Los cabalgamientos observados en el área investigada tienen una geometría lístrica y son el resultado de llanos y rampas alternantes, como las que se presentan en la Sierra de la Fragua, la Sierra del Granizo y el flanco sur occidental de la Sierra de San Marcos-El Pino.
- La vergencia de los movimientos que dieron lugar a los cabalgamientos en el área de investigación procedieron del norte, como producto del último evento orogénico ocurrido en el Eoceno.
- La Sierra de la Fragua se sobrepone a cabalgamientos frontales con la Sierra de San Marcos; las escamas de despegue como los contactos entre las formaciones: Georgetown, Aurora, Peña y Cupido, producen comunicación hidráulica entre los valles del Hundido y de Cuatro Ciénegas.

1.8.6.3. The overexploitation on the aquifer of the Hundido valley and corresponding ecological impact on the reserves in Cuatro Ciénegas valley in Coahuila, México. (M. J. M. Rodríguez., S. V. Souza, L. E. Arriaga Díaz de León) Water Resources & environmental problems in Karst.(Rodríguez, Souza, Arriaga 2007)

En este trabajo se describen las condiciones de la sequía que prevalece en la parte norteña del estado de Coahuila y las exigencias del uso racional del agua. Dicho recurso, en la región, debe controlarse para evitar el daño de diversos ecosistemas; uno es la reserva ecológica única del valle de Cuatrociénegas de Coahuila México; en ella habitan 73 especies endémicas puestas en peligro. En los últimos dos años y cerca de esta área se encuentra un desarrollo agrícola intensivo, que genera cierta amenaza al ecosistema de la región. El análisis del equilibrio de la hidrología de la cuenca de las reservas del valle El Hundido se calcula usando la ecuación siguiente: $E_s + V_{inf} = E_{ext} - A_s$. Esto demuestra que después de dos años de iniciar estos proyectos de desarrollos agrícolas, la capacidad acuífera del valle es sobre-explotada. El origen del agua en el valle El Hundido se relaciona con el proceso de sedimentación de las rocas, el inicio de la depositación en los Karts y la falla inversa producto de la trasgresión del antiguo Golfo de México. Como se profundiza la estructura de la roca, la concentración de las sales va en aumento debido a la circulación y a la saturación de la roca.

1.8.7 Tipos de Investigaciones

Los tipos de investigaciones que se han realizado en esta zona de estudio pertenecen a las áreas de geohidrología y biología.

El valle de Cuatro Ciénegas es donde se han concentrado más estudios de distintas ramas.

La razón por la que en el valle El Hundido sólo se realizaron estudios de geohidrología se debe a poder hacer una determinación de la relación que pudiera existir entre el valle y el área de protección ecológica. Los estudios que se han realizado contribuyen a la comprobación de las teorías que se han generado por los estudios geohidrológicos.

Capítulo 2. Climatología

2.1. Introducción

El clima en una región es importante, ya que éste dictamina el comportamiento de las precipitaciones que se suceden en la zona, de esta forma ambas están íntimamente relacionadas.

En el ciclo del agua la precipitación que es una parte fundamental del mismo, junto con la evaporación, la transpiración, el escurrimiento superficial, la infiltración; el escurrimiento subterráneo y el almacenamiento son influenciados en gran parte por climatología del medio.

En el desierto Chihuahuense se presentan condiciones extremas de temperatura y baja precipitación. Una de las causas pertenece a los sistemas montañosos que lo rodean; aunando a esto, su cota sobre el nivel del mar. En dicho desierto, como ya se ha mencionado antes, se encuentra la reserva ecológica nacional de Cuatro Ciénegas, en el estado de Coahuila. Esta reserva se ve afectada por los distintos valles que la rodean: el valle El Hundido, el valle de las Calaveras y el valle del Jabalí.

El valle El Hundido es, como ya se ha mencionado antes, la zona a la que se dedica el presente estudio, en el valle cuyo desarrollo agropecuario fuerte ha venido afectando en distintas formas los ecosistemas del lugar, (impactando en el suelo, el agua, las plantas, los animales y el micro clima de sitio) esto en el mismo valle así como el valle de la reserva ecológica de Cuatro Ciénegas.

Las comunidades que se encuentran en la zona de estudio se dedican a la actividad de siembra de alfalfa, generando todo esto un exceso de consumo de agua que es extraída del subsuelo, ya que en la región las cuencas hidrológicas no cuentan con cuerpos de agua superficiales. El acuífero que se encuentra en el valle El Hundido tiene sobre-explotación (CNA 2004)(INEGI,2010), debido a los volúmenes de extracción que tiene actualmente, esto genera diferentes impactos ambientales.

2.2. Clima que se presenta en el sitio de estudio

El estado de Coahuila está situado en su mayor parte en la zona oriente de una gran zona denominada: desierto de Chihuahua, o desierto del Norte de México.

Éste se caracteriza por poseer clima continental, seco y muy seco; predominando el semicálido, esto con base en cartas climáticas del INEGI. Se han encontrado en los bolsones coahuilenses hasta los templados de las partes altas y las más septentrionales. **Figura 2.1**

Los climas muy secos se encuentran sobre las extensas llanuras del poniente de Coahuila y en su centro se tiene clima muy seco semicálido, con lluvias en verano que coincide con las temperaturas más altas e inviernos frescos.

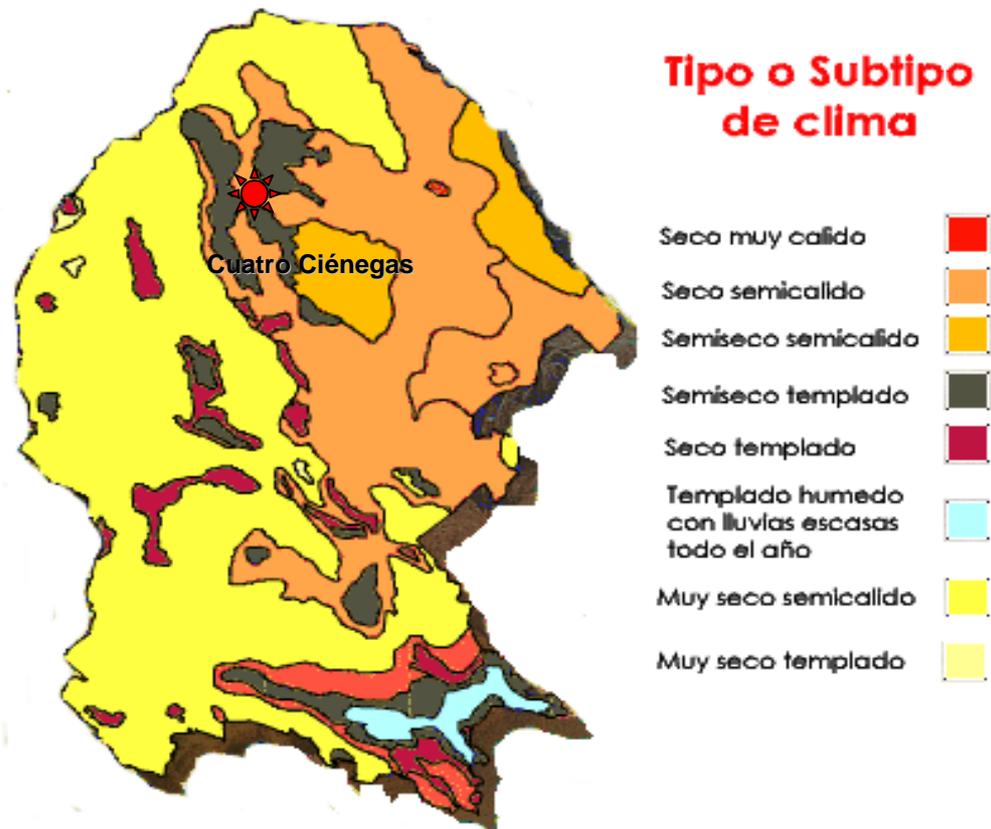


Figura 2.1 Mapa climático del estado de Coahuila

Fuente: Modificado pero basado en datos de INEGI.

Este tipo de clima se puede localizar en gran parte del Estado, como es el caso del Bolsón de Mapimí, las lagunas de Mayrán y Viesca, la Comarca Lagunera; así el gran llano de Ocampo y los de San Marcos, Cuatro Ciénegas y El Hundido. (INEGI, 2010)

2.2.1. Temperaturas

Los datos de temperatura recabados en la zona proceden de la estación Meteorológica de Cuatro Ciénegas, cuyas coordenadas son 102.07° longitud oeste y 26.98° latitud norte **Tabla 2.1**

Tabla 2.1 Temperaturas registradas en la estación de Cuatro Ciénegas en el periodo de 1942 a 2001
Fuente: CONAGUA estación meteorológica Cuatro Ciénegas.(CNA, 2010)

Cuatro Ciénegas

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual (°C)
1942	5.3	7.8	10.7	17.0	22.1	25.8	25.2	24.9	20.3	16.8	10.4	6.3	16.1
1943	5.0	9.0	11.5	16.9	22.1	23.9	24.3	24.7	19.9	14.2	8.9	7.1	15.6
1944	5.5	11.6	11.4	15.4	19.7	25.1	24.9	23.7	20.0	15.3	10.0	5.8	15.7
1945	7.0	8.2	13.0	14.8	21.1	25.1	24.1	23.9	20.2	15.2	11.0	5.3	15.7
1946	5.1	8.6	12.2	18.2	20.4	23.2	23.9	23.1	21.8	17.5	10.3	7.0	15.9
1947	4.6	5.0	9.9	14.8	20.4	23.1	23.5	22.3	20.2	17.8	10.0	6.8	14.9
1948	4.1	9.3	12.5	20.3	24.8	27.5	27.3	26.2	21.0	15.9	9.7	9.8	17.4
1949	5.5	11.0	13.3	15.9	22.7	25.4	24.9	23.0	21.8	17.0	8.6	9.0	16.5
1950	10.5	11.1	12.0	16.9	21.9	23.4	23.7	21.8	21.4	16.7	8.5	4.7	16.1
1951	3.7	5.3	11.1	15.6	20.1	24.3	25.4	24.3	20.6	16.4	9.5	8.4	15.4
1952	7.6	7.3	10.6	15.1	19.7	24.0	24.0	24.1	20.0	12.0	9.3	4.7	14.9
1953	4.8	6.8	15.8	17.5	21.5	26.8	26.5	24.1	18.0	15.1	7.9	4.2	15.8
1954	7.1	8.5	10.9	17.8	20.1	24.1	23.6	23.3	20.8	15.7	7.7	5.7	15.4
1955	5.6	6.3	11.9	16.3	21.0	23.1	23.3	21.5	20.5	13.4	8.6	4.6	14.7
1956	4.0	6.8	10.6	14.7	20.6	23.4	23.5	23.0	18.2	15.5	7.8	6.0	14.5
1957	6.7	10.8	9.2	14.6	19.1	23.5	24.8	22.9	19.2	13.8	7.6	6.0	14.9
1958	2.9	6.0	8.5	14.8	18.6	23.2	23.9	22.7	21.4	15.1	11.1	5.3	14.5
1959	5.5	8.8	9.4	14.8	22.3	23.9	23.1	23.0	21.6	16.9	7.9	6.7	15.3
1960	6.6	5.7	9.7	17.4	20.8	25.1	25.4	24.6	20.5	19.6	12.8	6.2	16.2
1961	6.3	8.7	12.5	19.9	22.3	23.9	23.5	22.8	22.1	16.0	9.7	8.3	16.3
1962	4.0	10.6	12.3	17.1	22.8	25.3	26.0	24.9	23.0	19.9	11.7	8.6	17.2
1963	3.7	7.1	13.7	20.7	23.2	24.5	26.1	26.3	23.0	17.9	11.3	5.3	16.9
1964	5.1	5.9	12.6	19.2	22.6	23.8	24.9	25.5	23.4	15.4	13.0	7.5	16.6
1965	7.9	6.4	9.7	19.1	21.4	24.6	24.4	24.0	22.4	14.9	13.9	9.7	16.5
1966	5.2	6.3	12.3	17.1	19.7	23.1	24.8	24.1	22.3	15.3	11.0	5.4	15.6
1967	5.0	8.6	14.2	20.2	20.7	24.6	23.5	22.5	19.7	15.1	11.6	7.4	16.1

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual (°C)
1968	6.5	8.4	10.7	17.0	21.2	23.0	23.2	23.0	19.9	17.3	10.3	8.0	15.7
1969	8.4	10.3	10.1	17.4	19.5	24.6	25.1	24.7	21.5	16.7	10.5	7.9	16.4
1970	5.5	9.3	11.1	18.6	18.7	22.1	23.4	23.5	21.2	14.1	9.1	9.9	15.5
1971	8.4	8.0	12.0	16.4	21.5	22.6	23.0	22.6	21.7	18.7	12.9	10.0	16.5
1972	8.8	9.9	15.5	20.3	21.6	23.3	24.2	23.5	23.0	20.6	11.5	9.2	17.6
1973	6.4	9.1	14.3	16.4	22.0	23.7	25.0	23.5	23.4	18.1	13.5	6.9	16.9
1974	7.9	8.9	17.6	20.9	23.7	24.1	24.5	24.7	20.6	17.9	11.7	7.4	17.5
1975	8.1	10.3	14.1	18.7	22.8	23.7	23.0	23.5	19.6	16.1	11.3	8.0	16.6
1976	6.3	9.7	14.0	17.7	18.6	25.3	22.5	23.5	22.5	14.6	8.7	6.7	15.8
1977	6.2	8.7	14.2	18.3	23.8	25.3	25.1	25.3	23.3	18.9	11.6	9.9	17.6
1978	8.4	9.8	13.9	19.5	23.1	24.7	26.3	23.9	21.1	16.8	14.4	8.4	17.5
1979	4.8	8.6	13.3	19.2	21.3	23.8	25.5	24.3	20.8	17.7	10.5	8.9	16.6
1980	8.1	9.0	14.2	16.7	23.1	28.0	28.5	24.9	25.1	17.4	9.7	9.1	17.8
1981	6.6	9.5	12.7	19.3	22.8	25.5	27.0	26.7	23.6	19.3	12.7	10.0	18.0
1982	8.8	9.4	14.9	20.4	22.2	25.3	25.8	26.3	23.3	17.2	10.8	9.2	17.8
1983	7.7	9.5	13.8	16.8	22.6	23.5	26.0	24.9	22.9	19.2	13.2	5.9	17.2
1984	7.0	9.9	14.7	19.7	21.8	24.9	24.4	25.6	21.4	18.2	11.8	12.1	17.6
1985	5.3	7.9	14.2	18.9	22.9	23.5	23.4	25.1	22.8	17.2	12.4	6.5	16.7
1986	6.4	9.9	13.1	19.1	21.2	22.8	23.9	24.9	22.9	17.8	12.1	8.5	16.9
1987	6.5	9.4	11.6	16.0	21.8	23.4	24.8	25.7	22.6	18.3	12.2	9.4	16.8
1988	6.1	10.5	14.0	18.3	22.2	23.8	23.7	24.0	21.2	16.7	13.5	9.5	17.0
1989													
1990													
1991	7.1	10.1	16.1	18.9	22.3	24.2	23.1	24.3	20.5	17.7	9.8	10.3	17.0
1992	7.2	9.3	13.5	16.7	20.1	23.4	24.7	23.6	21.9	18.4	11.1	10.5	16.7
1993	9.5	11.2	12.6	17.1	20.2	23.8	24.4	24.9	21.2	15.5	11.0	8.0	16.6
1994	6.3	9.8	14.1	17.0	21.6	24.2	23.8	23.5	20.8	17.4	14.2	10.3	16.9
1995	12.6	17.0	18.6	21.6	27.1	28.3	28.6	27.4	25.9	21.4	16.6	12.5	21.5
1996	12.1	15.9	16.2	21.4	27.2	28.6	29.3	26.6	25.5	20.7	16.9	12.9	21.1
1997	10.9	13.7	18.9	19.5	24.2	26.8	28.6	23.6	25.5	20.8	15.8	10.9	19.9
1998	14.6	15.6	18.5	22.0	28.1	30.7	29.8	27.7	26.2	21.5	17.6	12.6	22.1
1999													
2000	14.5	17.2	21.2	22.4	28.4	27.7	29.6	28.5	26.6	19.9	14.6	14.2	22.1
2001	11.6	16.0	16.9	24.5	26.8	28.4	30.1	29.5	26.0	21.6	17.5	12.8	21.8
Tmed	6.6	9.0	12.5	17.1	20.9	23.4	23.8	23.2	20.8	16.3	10.8	7.8	
Tmax	14.6	17.2	21.2	24.5	28.4	30.7	30.1	29.5	26.6	21.6	17.6	14.2	
Tmin	2.9	5.0	8.5	14.6	18.6	22.1	22.5	21.5	18.0	12.0	7.6	4.2	

La antigüedad de esta estación meteorológica data de 1942. Los datos de temperatura se muestran en la **Figura 2.2**

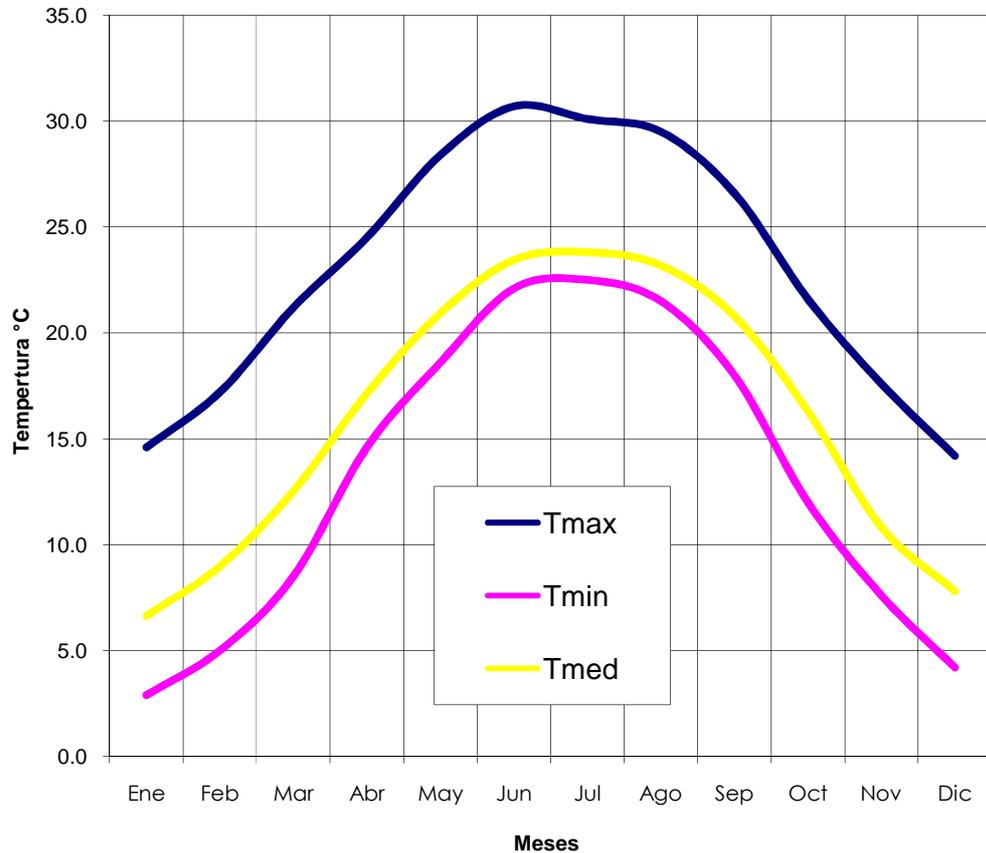


Figura 2.2 Gráfica de temperatura media en los meses del año

Fuente: Realizada en base a los datos de estación meteorológica Cuatrociénegas CONAGUA

En esta gráfica se observa que las temperaturas más elevadas, en la zona, se presentan en los meses de Junio y Julio por lo cual la evaporación en estos meses tiende a aumentar.

Observando el nivel medio de estas temperaturas, las más elevadas van de 20 a 25 ° C

Con la información obtenida se logra definir el tipo de clima que se presenta en la zona de estudio. Para hacer un análisis más a fondo de las características de sitio y para tener una visión más amplia, es necesario ver las **Figuras 2.3 y 2.4.**

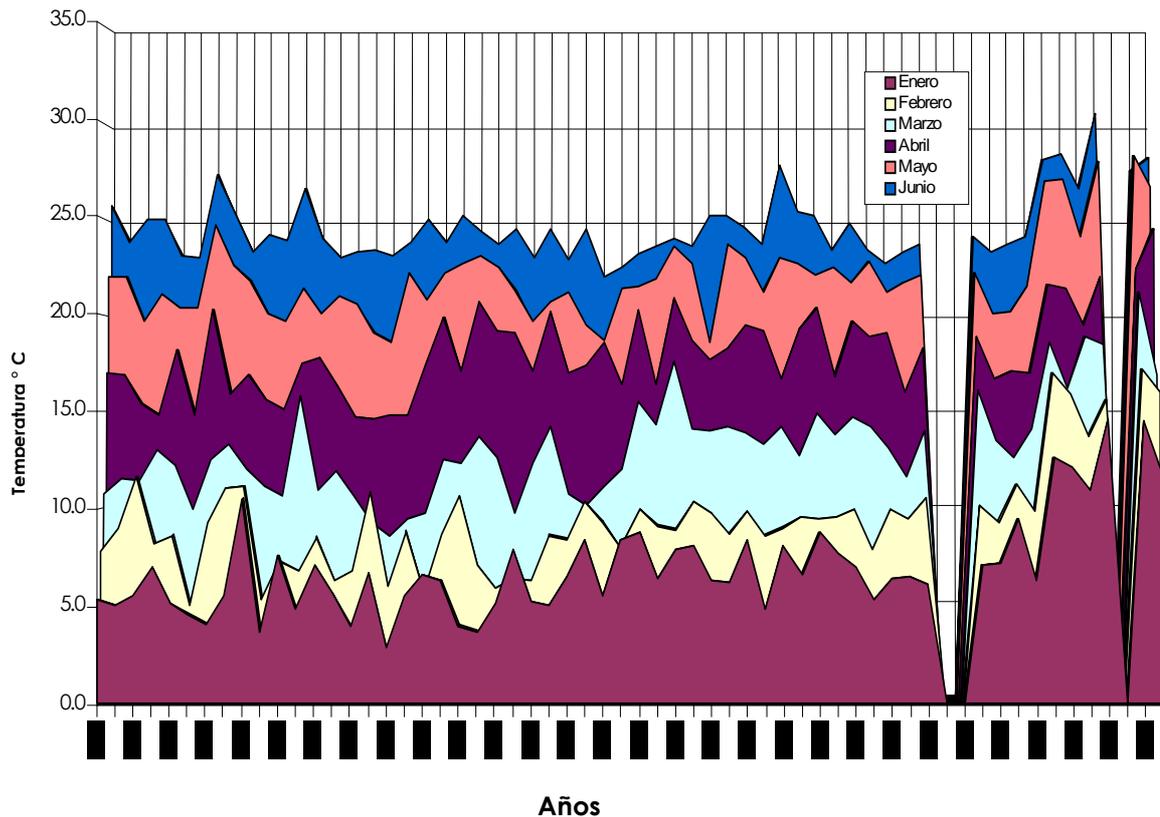


Figura 2.3 Gráfico de Temperaturas en los primeros 6 meses desde 1942 al 2001 **Fuente:** Realizada en base a los datos de estación meteorológica Cuatrociénegas CONAGUA

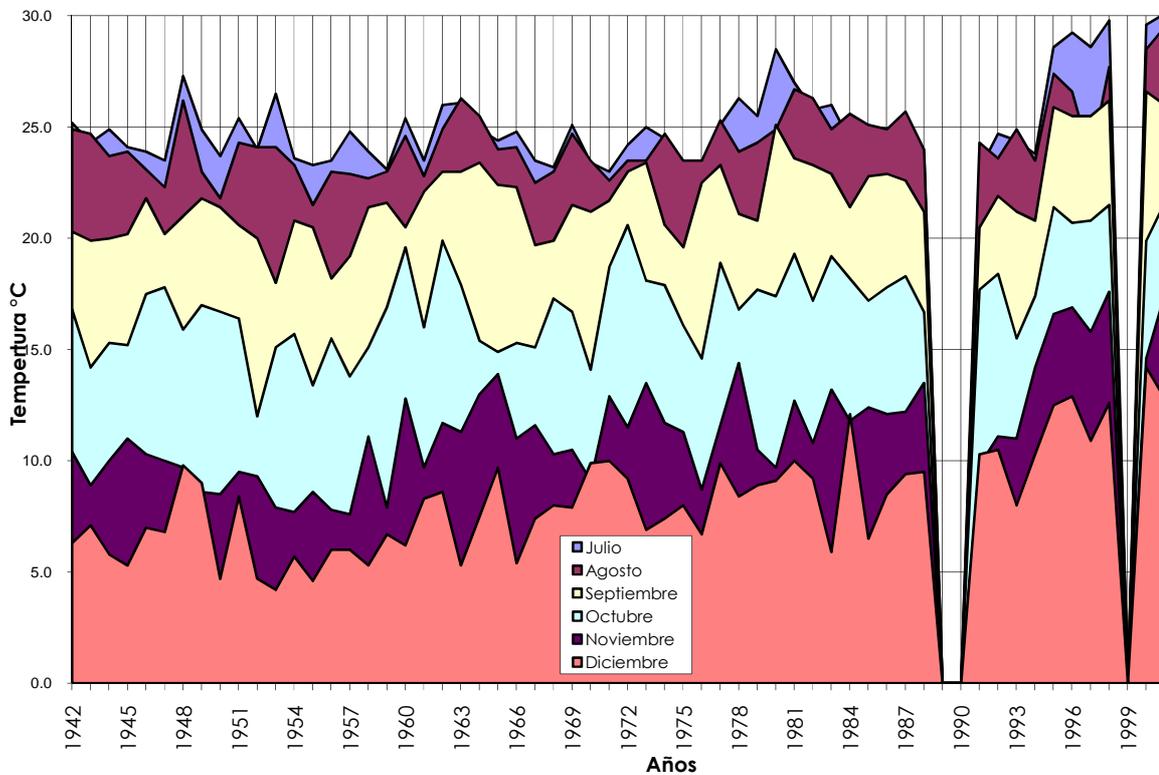


Figura 2.4 Gráfico de los meses de Julio a Diciembre **Fuente:** Realizada en base a los datos de estación meteorológica Cuatrociénegas CONAGUA

La variación de las temperaturas en los meses en cada año registrado, se puede observar claramente los períodos de retorno como se muestran en las **figuras 2.3 y 2.4** que se presentaron en la zona a lo largo de los años. Se observa en estos gráficos que las temperaturas más bajas se presentan en el mes de enero, al igual que en los meses de febrero y diciembre se mantienen temperaturas relativamente similares, lo mismo se puede decir de los meses de marzo y noviembre. El resto de los meses presenta una variación que va desde los 10° a los 25°, mostrando una temperatura constante en el transcurso del mes.

2.2.2. La radiación solar.

Con base en las tablas para la constante de radiación solar, en el tope de la atmósfera en el lugar de estudio, que sería a 29° latitud norte, interpolando con método simple se obtiene el R_A en la **tabla 2.2**.

Tabla 2.2 Radiación solar R_A en el tope de la atmósfera, en *Langleys/día*

Norte Latitud	Mar 21	Mar 13	May 6	May 29	Jun 22	Jul 15	Ago 8	Ago 31	Sep 23	Oct 16	Nov 08	Nov 30	Dic 22	Ene 13	Feb 04	Feb 26
90°		423	772	99	1072	994	765	418								
80°	155	423	760	9884	1060	980	754	418	153	7						7
70°	307	525	749	939	1012	934	742	519	303	129	24				24	131
60°	447	635	809	934	979	929	8801	629	442	273	146	72	49	73	146	276
50°	575	732	867	958	989	954	859	725	568	414	286	204	176	205	289	419
40°	686	807	910	972	991	967	901	798	667	545	429	348	317	350	434	670
30°	775	865	929	967	975	960	921	856	765	663	564	492	466	494	568	670
29°	781.6	867.9	928.4	963.8	971	957	920.5	858.8	771.6	672.7	576.1	505.5	479.9	507.6	580.3	679.9
28°	788.2	870.8	927.8	960.6	967	954	920	861.6	778.2	682.4	588.2	519	493.8	521.2	592.6	689.8
27°	794.8	873.7	927.2	957.4	963	951	919.5	864.4	784.8	692.1	600.3	532.5	507.7	534.8	604.9	699.7
26°	801.4	876.6	926.6	954.2	959	948	919	867.2	791.4	701.8	612.4	546	521.6	548.4	617.2	709.6
25°	808	879.5	926	951	955	945	918.5	870	798	711.5	624.5	559.5	535.5	562	629.5	719.5
24°	814.6	882.4	925.4	947.8	951	942	918	872.8	804.6	721.2	636.6	573	549.4	575.6	641.8	729.4
23°	821.2	885.3	924.8	944.6	947	939	917.5	875.6	811.2	730.9	648.7	586.5	563.3	589.2	654.1	739.3
22°	827.8	888.2	924.2	941.4	943	936	917	878.4	817.8	740.6	660.8	600	577.2	602.8	666.4	749.2
21°	834.4	891.1	923.6	938.2	939	933	916.5	881.2	824.4	750.3	672.9	613.5	591.1	616.4	678.7	759.1
20°	841	894	923	935	935	930	916	884	831	760	685	627	605	630	691	769
10°	882	897	893	881	873	877	886	887	871	835	789	748	733	752	795	845
0°	895	873	837	804	790	800	830	863	885	886	870	961	843	855	878	896

Calculando la radiación incidente media diaria para el mes, por el método de A. Ångström

$$R_i = R_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.1)$$

Donde

R_i Radiación incidente

R_A Constante de Radiación solar

a y b son constantes empíricas

n es la duración observada de horas luz del día

N es el número máximo diario de las horas luz en función de la latitud

Ya que la zona de estudio está a 29° latitud Norte y usando el método simple para la interpolación, se obtiene la **tabla 2.3** para calcular N y también para establecer los valores propuestos por J. Glover y J. G. S. McCulloch (1958) se utilizan las formulas de Jáuregui para la Republica Mexicana donde. (Campos 1986)

$$a = 0.2909 * \text{Cos } \phi \quad (\phi \text{ es la latitud en grados}) \quad (2.2)$$

$$b = 0.550 \text{ (constante)}$$

Tabla 2.3 Duración promedio máxima diaria de horas de insolación (N)

Latitud Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
5°	11.9	12.0	12.1	12.2	12.4	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
10°	11.6	11.8	12.1	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.2	11.9	11.7	11.5
15°	11.4	11.6	12.1	12.4	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
20°	11.1	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
25°	10.8	11.3	12.0	12.8	13.4	13.7	13.6	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
26°	10.7	11.3	12.0	12.8	13.5	13.8	13.7	13.0	12.3	11.6	10.9	10.5
27°	10.7	11.2	12.0	12.8	13.5	13.9	13.7	13.1	12.3	11.6	10.8	10.4
28°	10.6	11.2	12.0	12.9	13.6	13.9	13.8	13.1	12.4	11.5	10.8	10.4
29°	10.6	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.8	13.2	12.4	11.5	10.7	10.3
30°	10.5	11.1	12.0	12.9	13.7	14.1	13.9	13.2	12.4	11.5	10.7	10.2
35°	10.2	10.9	12.0	13.1	14.1	14.6	14.3	13.5	14.4	11.3	10.3	9.8
40°	9.7	10.6	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.4
45°	9.2	10.4	11.9	13.6	14.9	15.6	15.3	14.1	12.5	11.0	9.5	8.8
50°	8.6	10.1	11.9	13.8	15.5	16.3	15.9	14.5	12.6	10.8	9.1	8.1
55°	7.7	9.6	11.8	14.2	16.4	17.5	17.0	15.1	12.7	10.4	8.4	7.2
60°	6.8	9.1	11.8	14.6	17.2	18.7	18.0	15.6	12.7	10.1	7.6	6.3

Se calculan a y b:

$$a = -0.21693668$$

$$b = 0.550$$

Se obtienen los valores para el tiempo de luz diaria, como se muestra en la **tabla 2.4**

Tabla 2.4 n tiempo observado de luz diaria, en promedio, de cada mes

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
n	10.9	11.5	12.4	13.3	14.1	14.5	14.3	13.6	12.8	11.9	11.1	10.6

Es posible ya calcular R_i . Los resultados están en la **tabla 2.5**

Tabla 2.5 Radiación incidente

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
R_i	178.4	221.4	274.7	305	332.5	341.2	336.3	312.6	271.1	236.4	190	168.6

Para obtener la radiación solar reflejada se usó la formula:

$$R_r = r * (R_i) \quad (2.3)$$

El valor de r procede del **Apéndice 1** de este Capítulo. En la zona de estudio se tienen dos tipos de albedo, un en los campos de cultivo de la alfalfa, del cual se tiene un albedo que iría de, 0.19 a 0.25. Como la zona de estudio se presenta condiciones extremas, se tomara las más alta y el valor del albedo para el resto de la zona de estudio que se tomó como suelo desnudo seco de 0.18. Los resultados sobre el comportamiento de la radiación solar reflejada en la zona se mostraran en la **tabla 2.6**

Tabla 2.6 Radiación solar reflejada

R	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cultivo	44.59	55.35	68.66	76.24	83.11	85.3	84.07	78.16	67.78	59.1	47.51	42.16
General	32.11	39.85	49.44	54.9	59.84	61.42	60.53	56.27	48.8	42.55	34.21	30.35

La estimación de la radiación neta de onda larga se obtuvo a partir de la ecuación de D. Brunt (1944) (Campos 1986)(17)

$$R_i = \sigma T^4 \left(0.56 - 0.924 \sqrt{e_2} \right) \left(0.10 + 0.90 \frac{n}{N} \right) \quad (2.4)$$

Donde

R_i = radiación neta de onda larga.

σ = constante de Stefan-Boltzman, Igual a $1.171 \times 10^{-7} \frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{°K} \cdot \text{día}}$

e_2 = Presión del vapor en el aire a una altura de 2m **Apéndice 2** en mm de mercurio

T = Temperatura en °K

n = Duración observada de horas luz del día

N = Numero máximo diario de las horas luz en función de la latitud

Con esto se obtiene la **tabla 2.7**

Tabla 2.7 Radiación neta de onda larga

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
R_i	229.1	220.8	205.2	176.9	146.2	122	117.8	124.1	147.1	182.5	213.3	225.3

Para obtener la radiación neta se deriva de la siguiente ecuación

$$R_n = R_i(1-r) - R_l \quad (2.5)$$

Teniendo la **tabla 2.8**

Tabla 2.8 Radiación neta en la zona de estudio

R_n	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cultivo	95.36	54.75	0.815	51.8	103.1	133.9	134.4	110.4	56.28	5.165	70.8	98.81
General	82.87	39.25	20.04	73.14	126.4	157.8	157.9	132.3	75.26	11.38	57.5	87.01

EL comportamiento de la radiación solar neta que se determinó en la zona de estudio se puede observar con claridad en la **Figura 2.5**

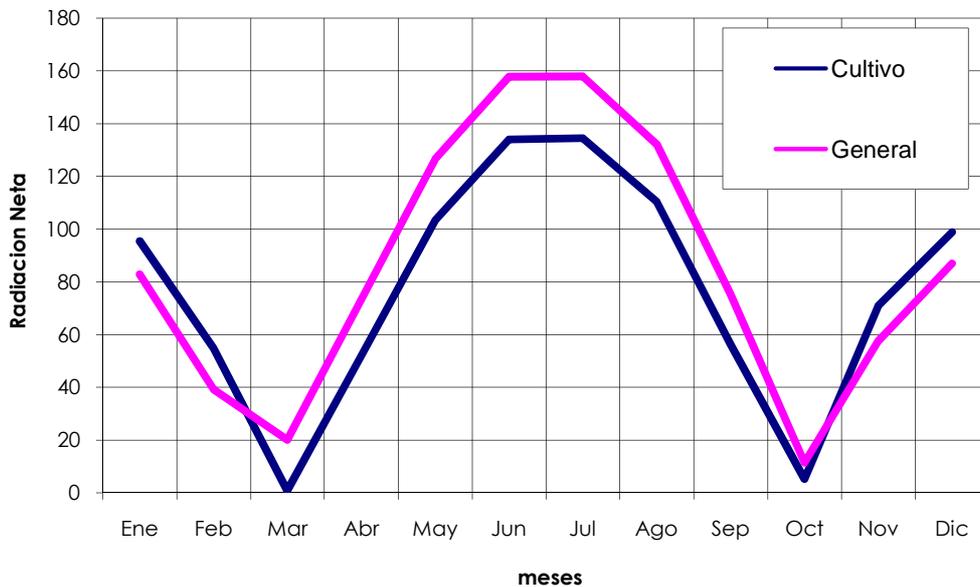


Figura 2.5 Gráfica de radiación neta en los meses del año

Como se puede apreciar en la figura, hay un incremento de la radiación solar en los meses de junio y julio, al igual como sucede con el aumento de la temperatura; estos dos factores están estrechamente relacionados e influyen de manera directa en la evaporación que ocurre en la zona.

El cálculo de la evaporación promedio en la zona de acuerdo a los meses y basándonos en la método de balance de energía mediante la siguiente fórmula:

$$E_r = \frac{1}{l_v \rho_w} (R_n - H_s - G)$$

Si se supone que el campo de flujo de calor sensible H_s y el campo de flujo de calor del suelo G equivalen a cero, entonces la tasa de evaporación E_r puede calcularse como la tasa a la cual toda la radiación neta de entrada se absorbe por la evaporación obteniendo la ecuación:

$$E_r = \frac{1}{l_v \rho_w} (R_n)$$

Donde:

l_v = Calor latente de vaporización $\left(\frac{J}{Kg} \right)$

ρ_w = densidad del agua

$$R_n = \text{Radiación Neta } (W/m^2)$$

Obteniendo la **tabla 2.9** donde se muestra la evaporación en cada uno de los meses y la evaporación media anual.

Tabla 2.9 Evaporación a lo largo del año.

R_n	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cultivo	95.36	54.75	0.815	51.8	103.1	133.9	134.4	110.4	56.28	5.165	70.8	98.81
General	82.87	39.25	20.04	73.14	126.4	157.8	157.9	132.3	75.26	11.38	57.5	87.01
Temp. med(°C)	6.6	9	12.5	17.1	20.9	23.4	23.8	23.2	20.8	16.3	10.8	7.8
ρ_w	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00	997.00
L_v	5.77	5.92	6.16	6.50	6.81	7.04	7.07	7.02	6.81	6.44	6.04	5.85
Evaporación (mm)												
Cultivo	16.57	9.27	0.13	7.99	15.18	19.09	19.06	15.78	8.29	0.80	11.75	16.95
General	14.40	6.65	3.26	11.28	18.61	22.49	22.39	18.91	11.09	1.77	9.54	14.93

La evaporación anual de 140.87 mm en cultivos y en terreno natural es de 155.33 mm

Presentándose una Evaporación máxima mensual de 22.49mm

La evapotranspiración potencial calculada por el MÉTODO DE JENSEN – HAISE la cual dice:

$$E_{tp} = R_s (0,025T_a + 0,08)$$

Donde: R_s = radiación solar total diaria
 T_a = temperatura media diaria (°C)

Tabla 2.10 Evapotranspiración a lo largo del año.

Evapotranspiración (mm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cultivo	23.36	16.70	0.32	26.29	62.12	89.04	90.72	72.86	33.77	2.52	24.78	27.17
General	20.30	11.97	7.87	37.12	76.16	104.94	106.58	87.32	45.16	5.55	20.13	23.93

Dando una evapotranspiración anual de 469.65 mm en cultivos y 547.01 mm en terreno natural.

2.3. Precipitaciones en el sitio

Las precipitaciones que se dan en la zona de estudio se recopilaron de dos estaciones meteorológicas: una es la de Cuatro Ciénegas y la otra estación es de Santa Teresa de Sofía.

Los datos registrados son los siguientes, ordenados en la **tabla 2.9**

Tabla 2.11 Precipitaciones registradas en la estación de Cuatro Ciénegas en el periodo de 1942 a 2003 (mm)

Fuente: CONAGUA estación meteorológica Cuatro Ciénegas.(CNA, 2010)

Cuatro Ciénegas

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (mm)
1942	0	0	0	0	1.7	1.5	0	3.5	27	8.6	0	0.5	42.6
1943	38.1	2.5	0	2	8.5	0	0	0	70.5	27	0	0	148.6
1944	0	0	0	0	2.5	0	9.5	106	36.1	1.3	29.7	4	189.1
1945	24.5	26.5	0	2.8	4	3.9	44.2	30.5	0	13.1	0	0	149.5
1946	25.5	4.2	0	2.5	22	1.7	15	22.5	13.5	53.4	21.7	10	192
1947	25.8	0	0	0	14.5	48	2	32.7	0	2.5	0	5.1	130.6
1948	0	0	9.5	17.5	0	33.5	0	0	60.8	22	0.2	0	143.5
1949	8	0	0	0	105.5	25	43.7	37.5	57	22.5	0	29	328.2
1950	8.5	4	0	0	26	11.5	89.1	20	20.5	21.4	0	0	201
1951	0.5	4	4.3	3.2	36.5	13.5	1.5	5.5	22	37.5	6.5	9.5	144.5
1952	0	0.5	0	8	15.2	51.2	0	0	0.3	0	5.8	5.4	86.4
1953	0	16.8	0	23	0	0	0	23	24.8	64.7	0	14	166.3
1954	0	0	0	45	48.5	4	1.7	5	0	0	0	4.5	108.7
1955	6	11	0	0	39.5	20.5	18	80.5	35.5	2	32	0	245
1956	10.5	0	0	18	0	1.5	1	2	37	0	0.2	0	70.2
1957	0	38.5	11	5.5	1	4	0	2	108.5	39.5	4.8	3	217.8
1958	16	22	7.5	0	34	3.5	1.5	36	180	73	10	33	416.5
1959	0	8	3	6.5	5.5	9	7.5	28	8	12	4.6	6	98.1
1960	9.5	24	0	5	0	10.5	77.5	81	28	23	26	21.5	306
1961	9	8.1	5.5	27	13.5	49.5	65	4.2	47.5	19	22.5	0.5	271.3
1962	0	0	0	7	0	12	13	24.5	56	45	2	7	166.5
1963	0	6.5	51	18	0	146.4	0	2	63	6.3	2	23.5	318.7
1964	3.5	3	1	11	1	48	1	2.5	34	10.5	43	5	163.5
1965	3	5.2	0.3	0	32.2	6	10	0.5	77	4	26.1	34.7	199

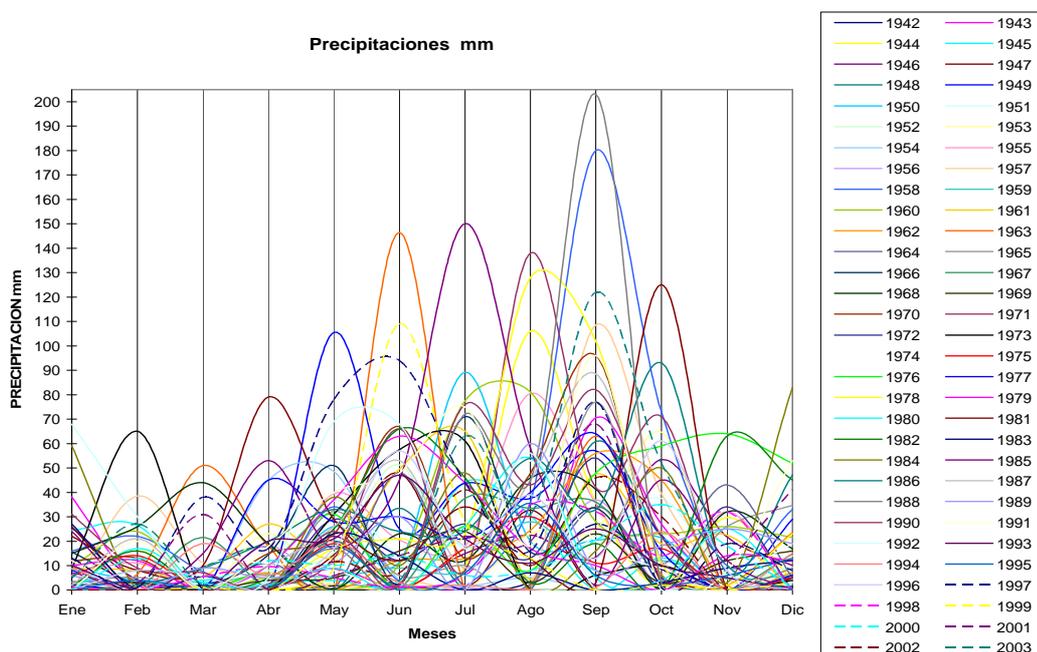
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (mm)
1966	15.6	2.5	2	14.5	51	2.5	71	15.5	33.5	0	0	1.5	209.6
1967	0	1	21.5	0.5	0	0.5	37.5	33.5	36	5.5	0	14.7	150.7
1968	15	26	44	19	0.5	23	12	46	41.3	0	32	17	275.8
1969	2	3	0	4	5	16	24	3	23	3	12	16	111
1970	12	13	0	15	23	67	13	48	96	3	0	0	290
1971	1	0	0	1	13	66	8	138	42	71	0	6	346
1972	0	0	2	0	29	12	27	13	54	3	34	0	174
1973	9	65	0	0	31	57.5	61	0	6	10	0	4	243.5
1974	12	0	11	11	8	0	0	53	20	9	6	19	149
1975	6	14	0	0	19	1	17	30	11	17	0	5	120
1976	0	0	0	10	31	0	26.1	8	48	59	64	52	298.1
1977	2	0	0	45	28	30	21	40	64	16	0	6	252
1978	0	0	0	0	17	21	23	128	102	11	2	23	327
1979	10	12	0	10	37	63	44	17	10	0	14	12	229
1980	0	17	3	2	9	0	26.1	54	5	4	25	0	145.1
1981	22	8.1	10	79	29	12	34	12.8	3	125	0	5	339.9
1982	2	16	0	5	25	66	46	3	19	0	63	45	290
1983	27	0	5.5	0	23	14	0	7	0	3	9	12.1	100.6
1984	59	0	0	0	38	10	48	0	16	50	3	83	307
1985	24	0	15	53	17	45	150	58	2	45	12	0	421
1986	0	2	9	20	33	24	24	54	33	93	7	47	346
1987	2	21	0	10	26	53	9	45	88.5	13	0	0	267.5
1988	0	0	0	2.5	17	2	72	45	203	3	0	9	353.5
1989	6	0	9	5	11	30	0	60	8	18	25	19	191
1990	31	9	7	0	24	2	76	43	82	22	0	0	296
1991	0	20	0	18	40	48	75	18	96	0	8	53	376
1992	68	30	0	5	69	68	17	56	0	0	0	3	316
1993	10	0	0	20	21	47	21	11	25	10	5	0	170
1994	9	0	19	6	20	3	2	0	1	24	0	15	99
1995	0	4	0	0	18	0	7	35.5	6	2	6	13	91.5
1996	0	8	5.5	0	17	57	18	39	13	61	8	0	226.5
1997	13	1	38	17	78	94	44	16	77	1	19	8	406

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (mm)
1998	1	0	5.5	9.6	5	1	6	35	32	14	32	0	141.1
1999	0	0	1	0	9	109	28	13	0	2	0	3	165
2000	0	13	4	12	10	14	6	8	20.5	35	18	1	141.5
2001	7	3	31	0	6	14	22	20	68	5	13	41	230
2002	0	0	0	0	11.6	7	41	10	46	30	0	0	145.6
2003	5	27	2	1	20	4	63	31	122	52	10	0	337
Pmed	9	8.1	5.5	9.6	20.7	25.6	26.1	29	41.3	21.4	10.7	12.1	219.1
Pmax	68	65	51	79	105.5	146.	150	138	203	125	64	83	421
Pmin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42.8

Para entender mejor el comportamiento de la precipitación en la zona de estudio, en las gráficas se muestra el comportamiento de este parámetro en distintos años **Figura 2.6**

Figura 2.6 Gráfica de precipitación de diferentes años

Fuente: Realizada en base a los datos de estación meteorológica Cuatro Ciénegas CONAGUA



Para tener una perspectiva del comportamiento de las precipitaciones, en el siguiente gráfico se muestra las precipitaciones media, máxima y mínima **Figura 2.7**

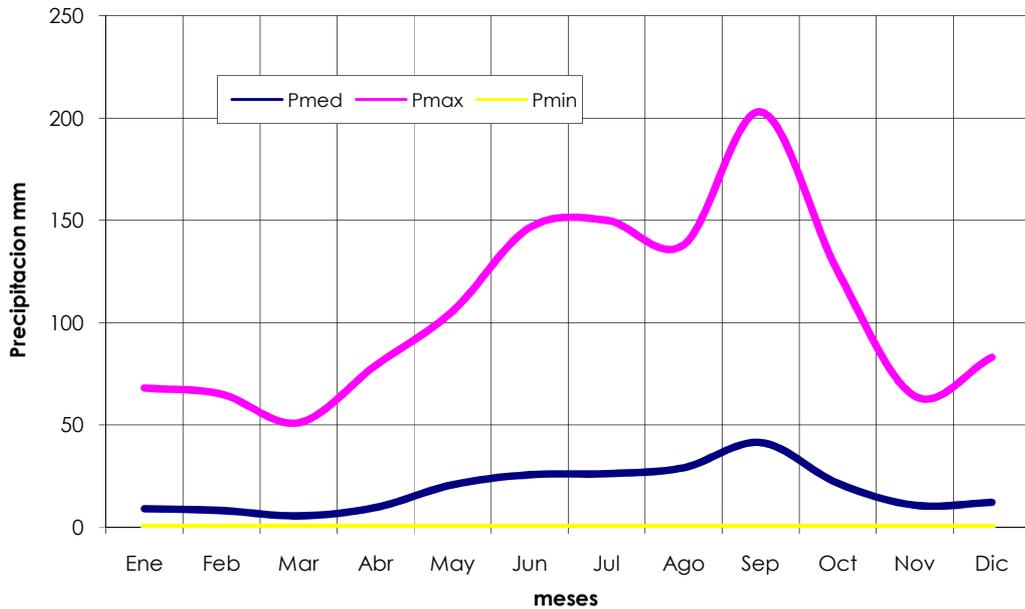


Figura 2.7 Gráfica de la precipitación

Fuente: Realizada en base a los datos de estación meteorológica Cuatrociénegas CONAGUA

Para la determinación de la homogeneidad de los registros que se tienen, se hará con base en pruebas estadísticas su determinación (Murray 1982).

Debido a la gran diferencia que existe entre las precipitaciones anuales en distintos años, se usara la prueba estadística de la t de Student, y para complementar los resultados usaremos la prueba estadística de Cramer. (Murray 1982)

La prueba de t de Student se llevara a cabo para un primer período de 1942 a 1970 y un segundo periodo de 1971 a 2003, con base en la **tabla 2.9** se obtiene la media aritmética y la desviación estándar de dichos periodos, que aparece en la **tabla 2.10**:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3.6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (3.7)$$

Tabla 2.12 Desviación estándar y media aritmética

	Periodo	N	\bar{X}	S	S ²
1	1942-1970	29 años	191.06 mm	85.37 mm	7287.33 mm ²
2	1971-2003	33 años	243.68 mm	96.82 mm	9375.01 mm ²

Tomando la ecuación de la prueba t de Student que es:

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (2.8)$$

Sustituyendo los valores de la **tabla 2.10** en la fórmula **2.8** se obtiene

$$t_d = \frac{191.06 - 243.68}{\left[\frac{(29 * 7287.33) + (33 * 9375.01)}{29 + 33 - 2} * \left(\frac{1}{29} + \frac{1}{33} \right) \right]^{1/2}} = \frac{-52.62}{23.71} = -2.22 \therefore |t_d| = 2.22$$

Del **Apéndice 3** se toma el valor de t de la prueba de t de Student, con el grado de libertad obtenido que es de $u = n_1 + n_2 - 2$ **(2.9)** obteniendo $u = 29 + 33 - 2 = 60$ dando un valor de $t = 2.22$ y como el valor de absoluto de t_d es casi igual al de t se comprueba con la prueba de Cramer con el mismo subperíodo dos (Murray 1982)

$\bar{X} = 215.59\text{mm}$
 $S = 95.31 \text{ mm}$
 $n = 62 \text{ años}$

$n' = 33 \text{ años}$
 $\bar{X}_k = 243.68\text{mm}$

Se tiene en la prueba de Cramer definidas las ecuaciones:

$$\tau_k = \frac{(\bar{X}_k - \bar{X})}{S} \quad (2.10) \quad t_k = \left\{ \frac{n'(n-2)}{n - n'[1 + (\tau_k)^2]} \right\}^{1/2} (\tau_k) \quad (2.11)$$

Haciendo una sustitución de valores en las ecuaciones **2.10** y **2.11** se obtiene:

$$\tau_k = \frac{(243.68 - 215.59)}{95.31} = 0.29$$

$$t_k = \left\{ \frac{33 * (62 - 2)}{62 - 33 * [1 + (0.29)^2]} \right\}^{1/2} (0.29) = 2.57$$

Tomando los grados de libertad que se tienen de la prueba de Cramer $\nu = n - 2$ **(2.12)** $\nu = 62 - 2 = 60$ se consulta en el **Apéndice 3**, en la tabla de t student para dos colas y t es igual a 2, con esto se puede decir que en las dos pruebas que se realizaron para comprobar la homogeneidad de los datos procesados esta es contundente, ya que en ambas pruebas la diferencia que existe es mínima lo cual indica que los datos son confiables hasta cierto grado.

2.4.- Conclusiones:

- ❖ A partir del análisis climático de la región, se logró cuantificar la evaporación y evapotranspiración de la zona de estudio
- ❖ Con una evaporación anual de 140.87 mm en cultivos y en terreno natural es de 155.33 mm
- ❖ Y una Dando una evapotranspiración anual de 469.65 mm en cultivos y 547.01 mm en terreno natural.
- ❖ Estos valores son muy elevado si se compara con las precipitaciones de la región, la cual es de 210 mm. Esto permite constatar que la recarga del acuífero en el valle El Hundido es mínima o casi nula.

- ❖ Lo anterior se debe a que se encuentran registradas en este periodo las mayores precipitaciones del año.

- ❖ El tipo de clima que se encuentra en la zona de estudio es BSOhw **(Apéndice 4)**

Capítulo 3. Geología

3.1. Introducción

El valle El Hundido se encuentra sobre el desierto Chihuahuense. Dicho valle está rodeado por distintas serranías que pertenecen a la Sierra Madre Oriental; estas serranías son: La Fragua, la del Venado, la de Los Alamos y El Granizo.

Es importante mencionar que la falla de San Marcos atraviesa el valle y en él se observan afloramientos de basamentos sobre los que descansan las formaciones subyacentes: Lechos Rojos, San Marcos, La Virgen, Cupido, La Peña, Aurora, Acatita, Kiamichi, Grupo Washita indiferenciado, Georgetown, Del Río, Buda y Eagle Ford.

Hacia los valles se encuentran sedimentos aluviales del Cuaternario y esporádicas lavas basálticas también del Cuaternario. El basamento cristalino de edad Permotrásica, está aflorando en el Valle del Jabalí, localizado al este del valle El Hundido.(Rodríguez 2007)

3.2. Geología Regional

La zona de estudio se encuentra en la parte central del estado de Coahuila, dentro de la unidad geológica denominada Golfo de Sabinas; determinada al oriente y poniente por los paleoelementos: Península de Tamaulipas e Isla o Península de Coahuila.

La sierra Madre Oriental atraviesa de sur a norte todo el estado de Coahuila, por la región central-oriental. Ésta es la columna vertebral del sistema montañoso y tiene ramificaciones que cubren todo el Estado; del este, junto con el sureste. Los principales elementos tectónicos mesozoicos y terciarios que controlan los depósitos y la deformación de las secuencias sedimentarias mesozoicas y terciarias en la república son:

- La Isla o Península de Coahuila, el Golfo Mesozoico de Sabinas, la Península de Tamaulipas o Levantamiento Burro-Picachos, el Antiguo Golfo de México, la cuenca de Burgos, el Archipiélago de Tamaulipas-Yucatán, la cuenca de Tampico-Tuxpan con la subcuencas de Magiscantzín y Chincotepec, el bloque tectónico de Teziutlán, la Cuenca de Veracruz, el bloque Tectónico de los Tuxtlas, la cuenca Salinas del Istmo, el Pilar Tectónico de Reforma-Akai, la Cuenca de Macuspana, la Plataforma de Chiapas y la Franja plegada de la Sierra Madre Oriental. (Schumberger, 1984) **Figura 3.1**

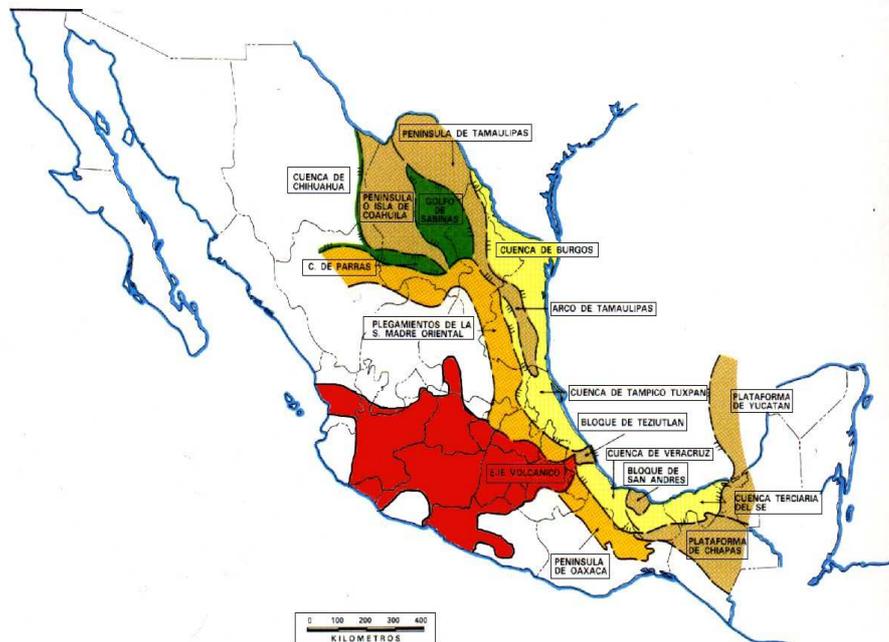


Figura 3.1 Unidades Tectónicas

Fuente: Tomada de Schlumberger basada en datos de PEMEX(Schlumberger, 1984)

Se ha designado como Antiguo Golfo de México a una zona negativa que, durante el Jurásico Tardío, Cretácico Temprano, Medio y Tardío y gran parte del terciario, ocupó lo que actualmente es el Golfo del mismo nombre y, además, cubrió lo que es la planicie Costera del Golfo y las porciones surorientales de los estados de Texas, Luisiana y Alabama, E.U.

El antiguo Golfo de México, durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano y Medio, estaba delimitado, al norte, por una gran plataforma que abarca los Estados de Coahuila (Mex.), Texas, Luisiana, Alabama y Florida (E.U.); al oeste, por la plataforma de Valles-San Luis Potosí y al sur – sureste, por la plataforma Yucateca. (Schumbergerber, 1984)

La unidad geológica conocida como Golfo de Sabinas, se localiza en la posición noreste del país; comprende parte de los Estados de Coahuila y Nuevo León. Geológicamente, está limitada, al noreste, por la Península de Tamaulipas; al sureste por la Sierra Madre Oriental; al Suroeste, por la Isla o Península de Coahuila y al noreste, con información geológico-geofísica, es probable que se comuniquen desde el Jurásico, con la cuenca de Chihuahua.

Figura 3.2

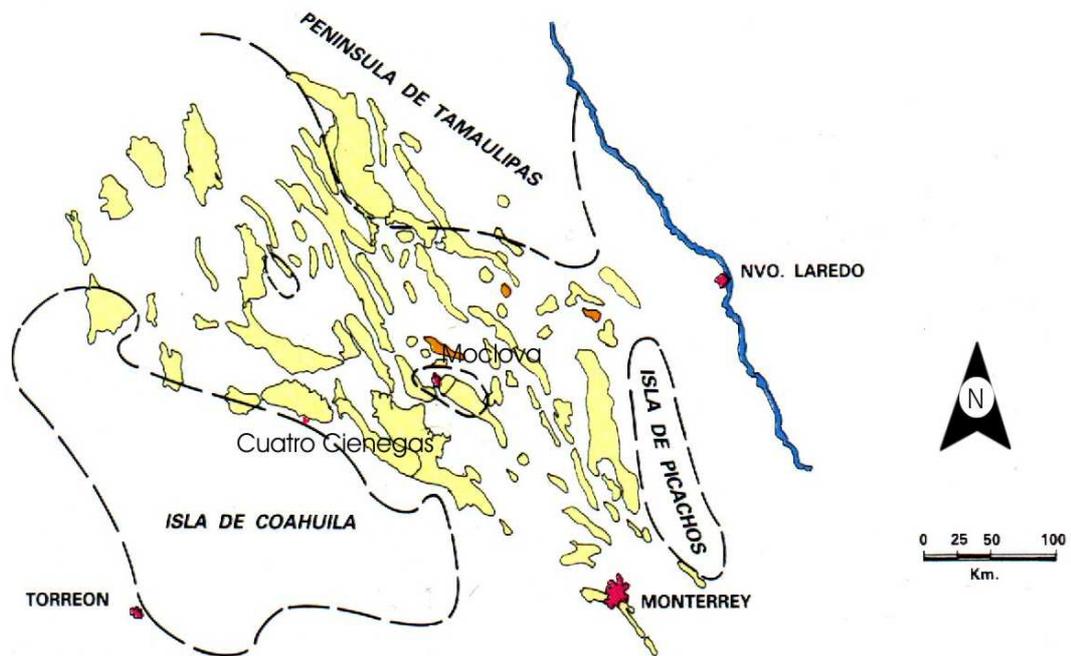


Figura 3.2 Unidades Geológicas

Fuente: Tomada de Schlumberger basada en datos de PEMEX(Schumbergerber, 1984)

En esta región se encuentran rocas calcáreas del Cretácico Inferior; dichas formaciones se encuentran en una serie de anticlinales, que están en sierras, con una orientación de 20° NW. Dichas sierras se levantan sobre plataformas de materiales aluviales de reciente formación.

Las rocas calcáreas de la zona, como se ha marcado con anterioridad, son del cretácico inferior, de depósitos de ambiente de borde de plataforma, ideales para la formación de bancos arrecifales, tipo bioherma y biostroma, específicamente en las formaciones: Cupido, Aurora etc.

En general, la mitad del noreste de la región, en la zona de estudio, corresponde a sedimentos calcáreos de depósitos en el Golfo de Sabinas y, al sureste de la misma, se encuentran depósitos sedimentarios de la Península de Coahuila.

La tectónica del sitio en el estado de Coahuila, indica que en esta región existe un sistema de fallas, que atraviesan el Estado de norte a sur, en toda su extensión. Estas se encuentra: una al norte del Estado, que es la falla de la Babia; por el centro del Estado la cruza la falla de San Marcos y al sur del Estado recorre la falla Megasher Mojave-Sonora. **Figura 3.3**

Estos sistemas cruzan la parte noreste del estado de Coahuila.

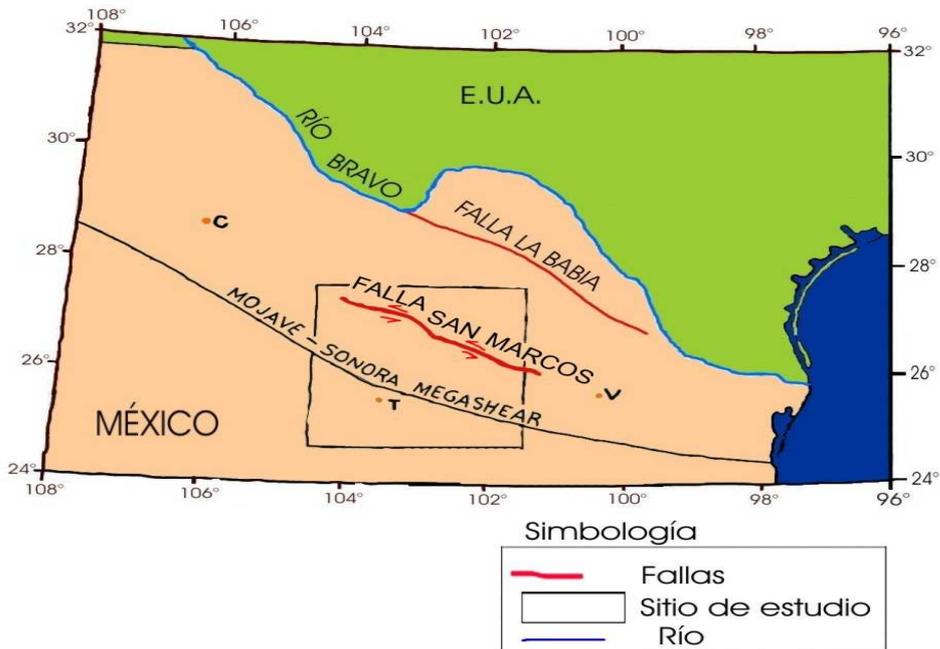


Figura 3.3 Sistema de Fallas en el noreste de Coahuila
Fuente: Tomada de Schlumberger basada en datos de PEMEX(Schlumberger, 1984)

3.3. El marco tectónico

En el norte y el noreste de México se localiza un sistema de lineamientos de fallas que se muestran. Dichas fallas son: al norte, la Falla La Babia, parte en la central, la Falla San Marcos (FSM) y al sur la Megasher Mojave- Sonora. Este sistema de fallas cruza la parte noreste del estado de Coahuila **Figura 3.3.**

En la parte central del estado de Coahuila, al noreste, en el tiempo entre el Jurásico tardío y el Cretácico temprano, la Isla de Coahuila estaba definida por la FMS (Mc Kee and Jones, 1990). El nombre de San Marcos fue tomado a partir de la exposición que se presenta en el Valle de San Marcos. La FSM tiene una dirección N62W. Esta fue definida por Charleston (1981) y es la única falla de basamento en el noreste de México para la que se han compilado en superficie evidencia estratigráfica y estructural que documentan su existencia de forma convincente (Charleston, 1981; Padilla y Sánchez, 1982, 1986; McKee et al., 1984, 1990). La traza de la FSM tiene una longitud mínima de 300 km, cruza, con un rumbo WNW al estado de Coahuila dividiéndolo en dos partes y se inclina hacia el NNE; la falla separa estructuralmente el bloque de Coahuila del Cinturón Plegado de Coahuila. Se ha sugerido que la FSM puede extenderse otros 300 km más hacia el WNW de la localidad de Sierra Mojada (Aranda-Gómez et al., en prensa, a), sólo que ese segmento se encuentra sepultado por una cubierta gruesa de rocas volcánicas del Paleógeno y Neógeno. La FSM también ha sido nombrada Lineamiento Sierra Mojada-China (Padilla y Sánchez, 1982).(Chávez Cabello 2005)**Figura 3.4**

La Sierra de La Fragua está asociada con una estructura dómica fraccionada por fallas menores y plegamientos que dieron lugar a pliegues en forma de caja. La sierra de la Fragua está limitada, al sur, por la FSM con rumbo NW- SE de edad precretácica y por una falla inversa, producto de la orogenia Laramide. Dichos eventos ocurrieron a fines del Eoceno, el cabalgamiento se originó como producto de dos eventos estratigráficos.

El desplazamiento principal genera acortamientos, formando escarpes muy pronunciados como los que se presentan en el flanco sur occidental de las Sierras de San Marcos-El Pino, El Granizo y en la parte sur de La Fragua. Este modelo explica como la contracción horizontal del material, separado del sustrato tiende a generar una cuña, la cual crece verticalmente provocado por la fuerza de gravedad.

El desplazamiento débil tenderá a generar el acortamiento sobre una zona más amplia, y creará una cuña más suave sobre la rampa, la presencia de evaporitas en dos niveles, Formación Minas Viejas del Jurásico Inferior y Formación Acatita del Cretácico Inferior. Las rocas clásticas y carbonatadas; que conforman las estructura de la mayoría de las sierras de la región Noreste de México. Hay un despegue basal, en el flanco sur del Valle del Jabalí. El basamento cristalino aflora en la parte sur de este valle.

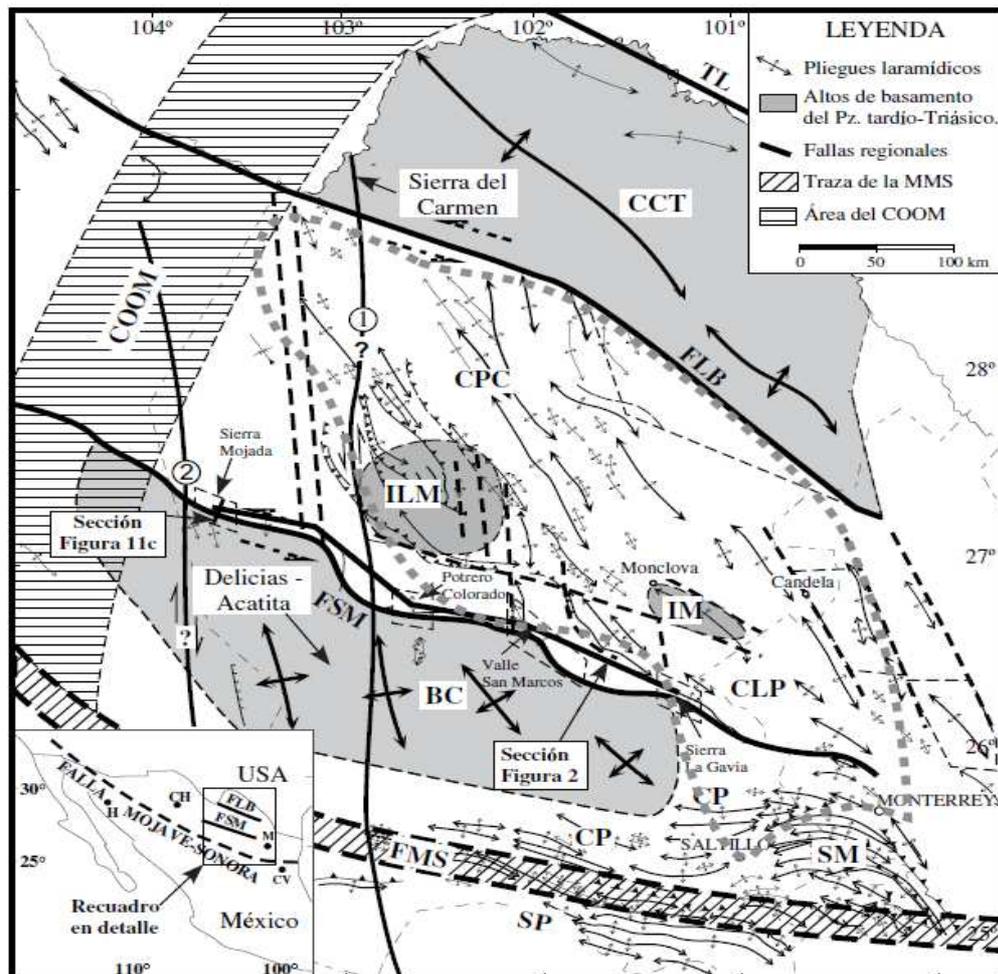


Figura 3.4 Mapa geológico generalizado del estado de Coahuila y regiones adyacentes. En él se muestran la localización de las estructuras mayores de basamento como el Texas Lineament (TL), las fallas de La Babia (FLB), San Marcos (FSM) y la traza inferida de la falla Mojave-Sonora (FMS). Nótese que las fallas La Babia y San Marcos separan regiones con estilos contrastantes de deformación, como el cratón Coahuila-Texas (CCT) del Cinturón Plegado de Coahuila (CPC), y éste a su vez del bloque de Coahuila (BC), respectivamente. Estructuras de segundo orden en el basamento también parecen limitar a rasgos paleogeográficos importantes como la isla La Mula (ILM) e isla de Monclova (IM). Otros rasgos morfológicos –estructurales como la saliente de Monterrey (SM), Sierra de Parras (SP) y las cuencas de antepaís de Parras (CP) y La Popa (CLP), falla Almagre (1) y El Caballo (2) también son señaladas así como varias localidades citadas en el texto. La franja COOM representa a la prolongación sepultada del Cinturón Orogénico Ouachita-Marathon. La línea gris punteada gruesa entre el BC y el CCT representa a los límites de la cuenca de Sabinas de acuerdo con Eguiluz (2001).

Fuente: Tomada de Chaves –Cabello, 2005

Marco tectónico estructural del valle El Hundido.

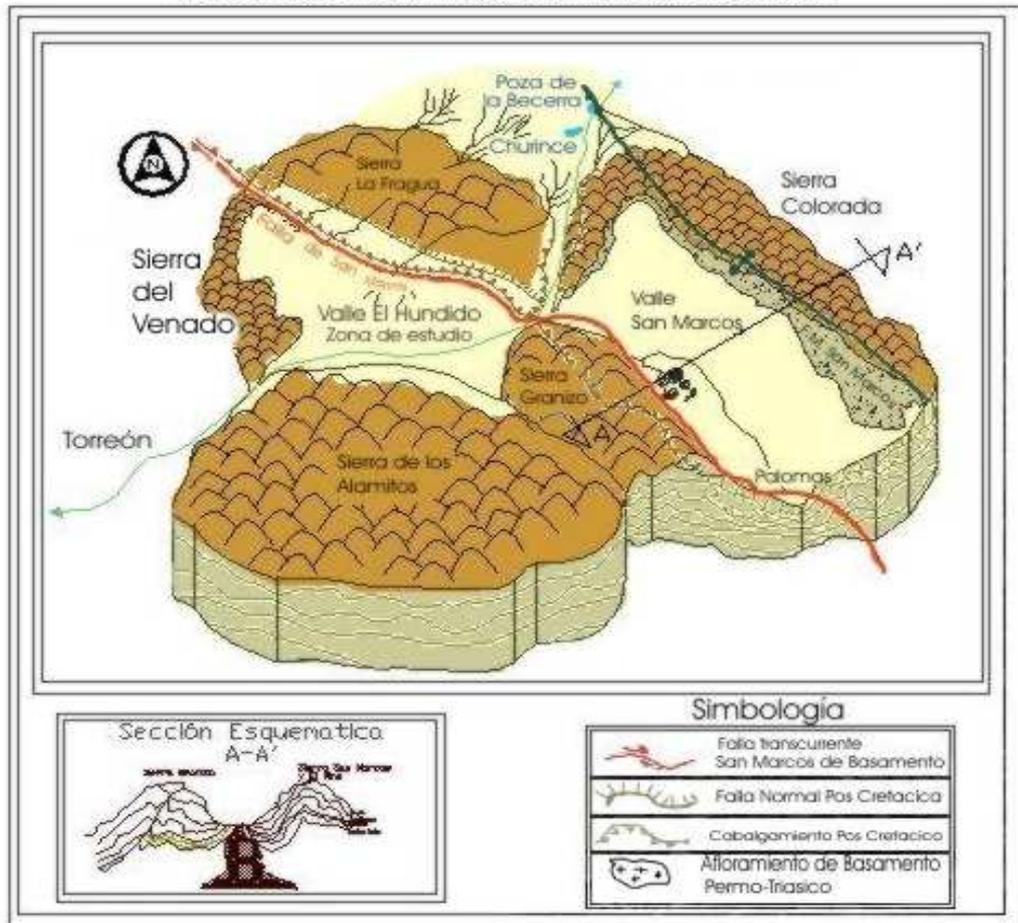


Figura 3.5 Marco tectónico estructural de valle El Hundido
Fuente: Realizado por Arriaga 2006 con base a visitas en campo y cartas de INEGI

3.4. Marco Geológico

La zona de estudio se encuentra rodeada por diferentes estructuras que forman parte de la Sierra Madre Oriental.

Al noreste se encuentra la Sierra de La Fragua, y al noroeste, la sierra de San Marcos-El Pino; al suroeste se encuentra la sierra del Granizo, en el suroeste la Sierra de los Alamitos y en el este flanco se encuentra la sierra del Venado, dando lugar a una cuenca endorreica.

Recorriendo la Sierra de la Fragua, la Sierra de San Marcos el Pino y la Sierra de el Granizo, se tiene la FSM, como se muestra en la **figura 3.5**

La FSM tiene una dirección de NW a 62°.

En la zona se tienen sedimentos calcáreos correspondientes a depósitos del Golfo de Sabinas, que se formaron en el Jurásico tardío y el Cretácico temprano.

3.4.1 Estratigrafía

La secuencia sedimentaria que conforma el área de estudio está constituida por depósitos de origen marino y continental, en edades que van desde el Permo-Triásico al reciente, descansando sobre un basamento cristalino de edad Pérmica.

El basamento del Golfo de Sabinas es poco conocido; sin embargo, por la información que se tiene, se infiere que está formado principalmente por metasedimentos paleozoicos incrustados por cuerpos ígneos intrusivos de composición ácida, en el área de estudio aflora en el valle de San Marcos **figura 3.6** (Plano Geológico).

A principios del Oxfordiano, las aguas del Antiguo Golfo de México penetraron hacia el poniente a través de un canal (de Ramones) estrecho y somero, propiciando el depósito de evaporitas (Formación de Minas Viejas) en lagunas extensas y semicerradas, localizadas hacia la porción sureste del Golfo de Sabinas.

En el resto del Oxfordiano, con oscilaciones menores, continuó la transgresión marina, depositándose calizas de aguas someras de la formación Zuloaga encima de la evaporitas y sus terrígenos equivalentes, las que gradúan a depósitos marginales de la formación La Gloria hacia los bordes de las áreas peninsulares. Durante el Kimeridgiano-Titoniano, la línea de costas se movió intermitentemente hacia los elementos positivos, depositándose secciones principalmente arenosas de la Formación La Casita hacia los bordes, las que se interdigitan, en echado abajo con rocas arcillo-carbonatadas.

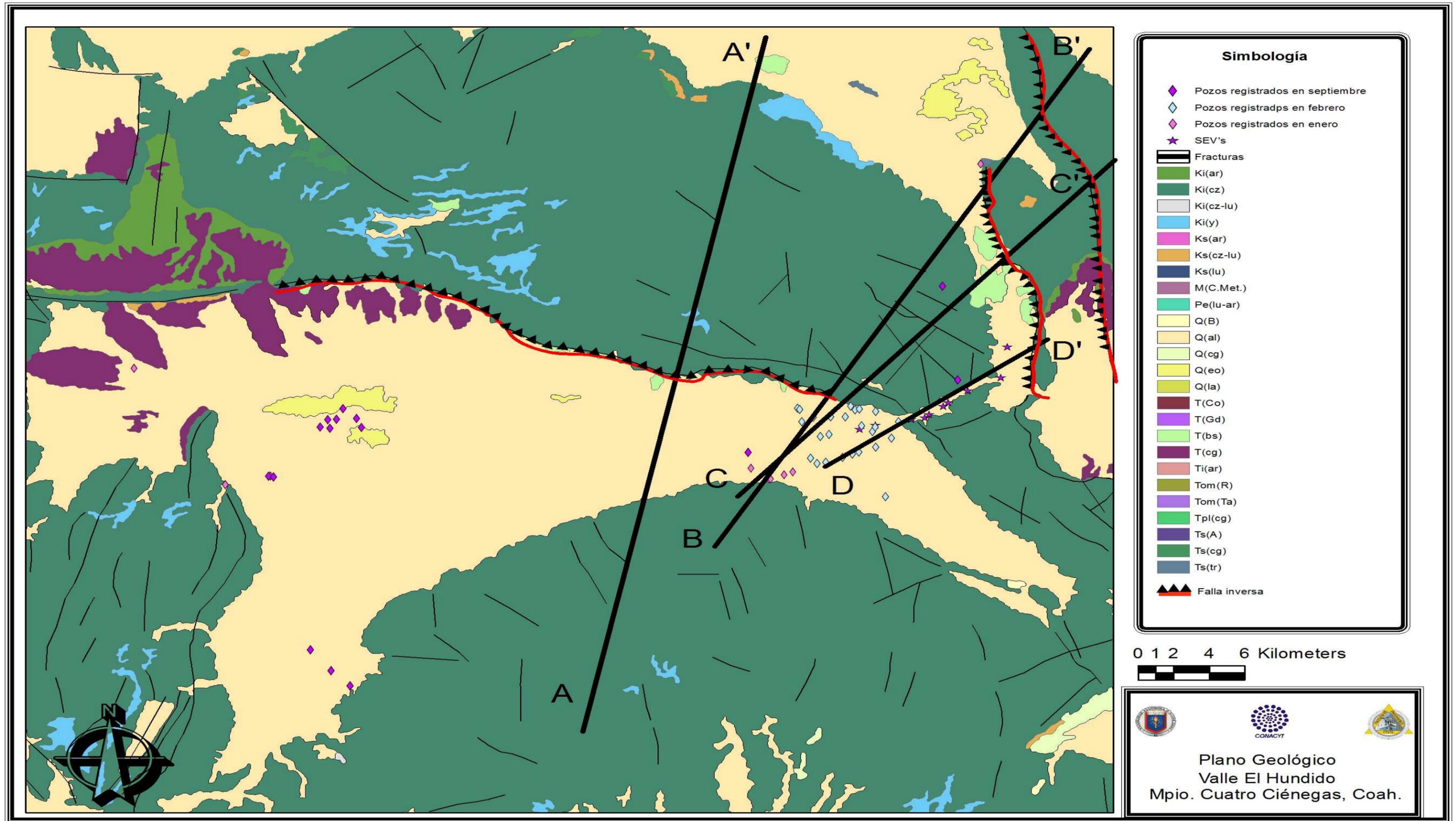


Figura 3.6 Plano geológico de la zona de estudio.
Fuente: Realizado y modificado por Arriaga (2010) basado en INEGI

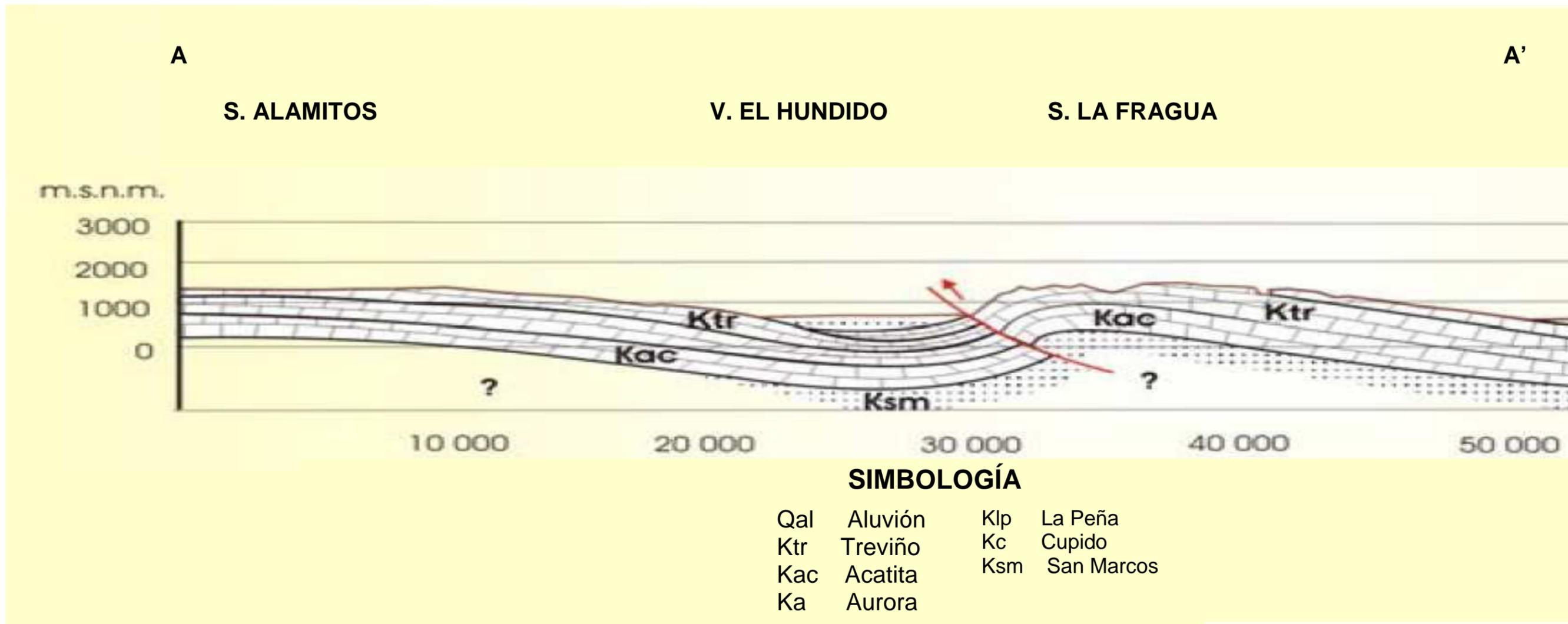


Figura 3.7 Sección A-A' geológica de la zona de estudio.
Fuente: Realizado Rodríguez 2004 y modificado Arriaga 2010 basado en INEGI

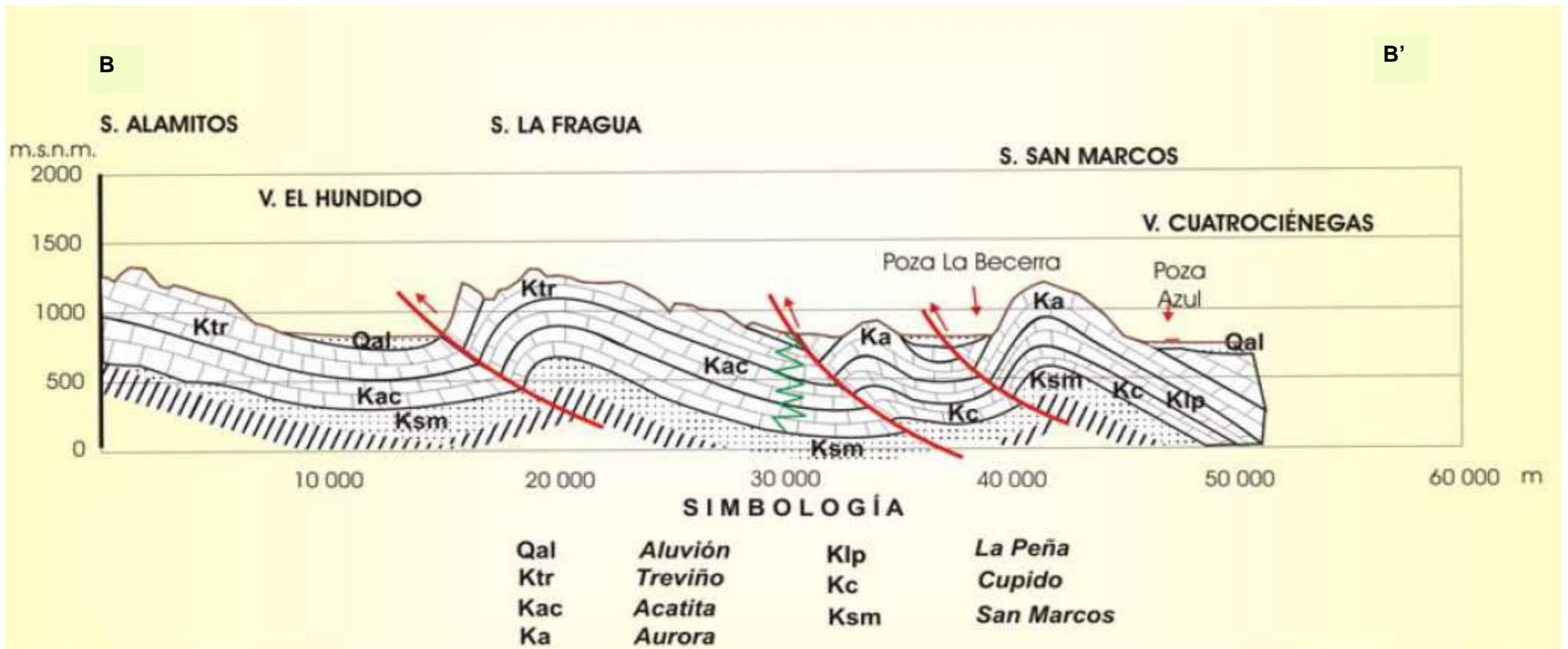


Figura 3.8 Sección B-B' geológica de la zona de estudio.
Fuente: Realizado Rodríguez 2004 y modificado Arriaga 2010 basado en INEGI

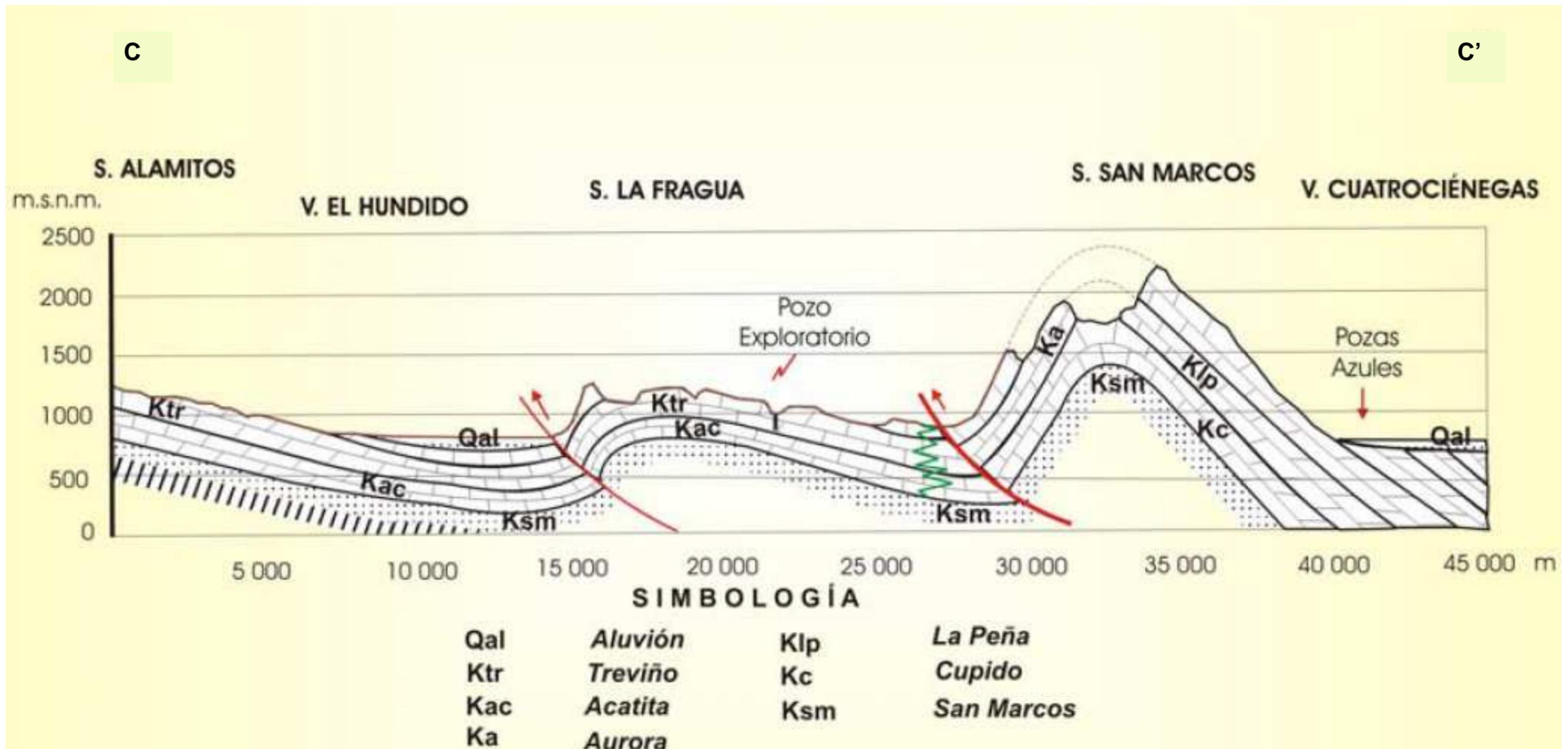


Figura 3.9 Sección C-C' geológica de la zona de estudio.
Fuente: Realizado Rodríguez 2004 y modificado Arriaga 2010 basado en INEGI

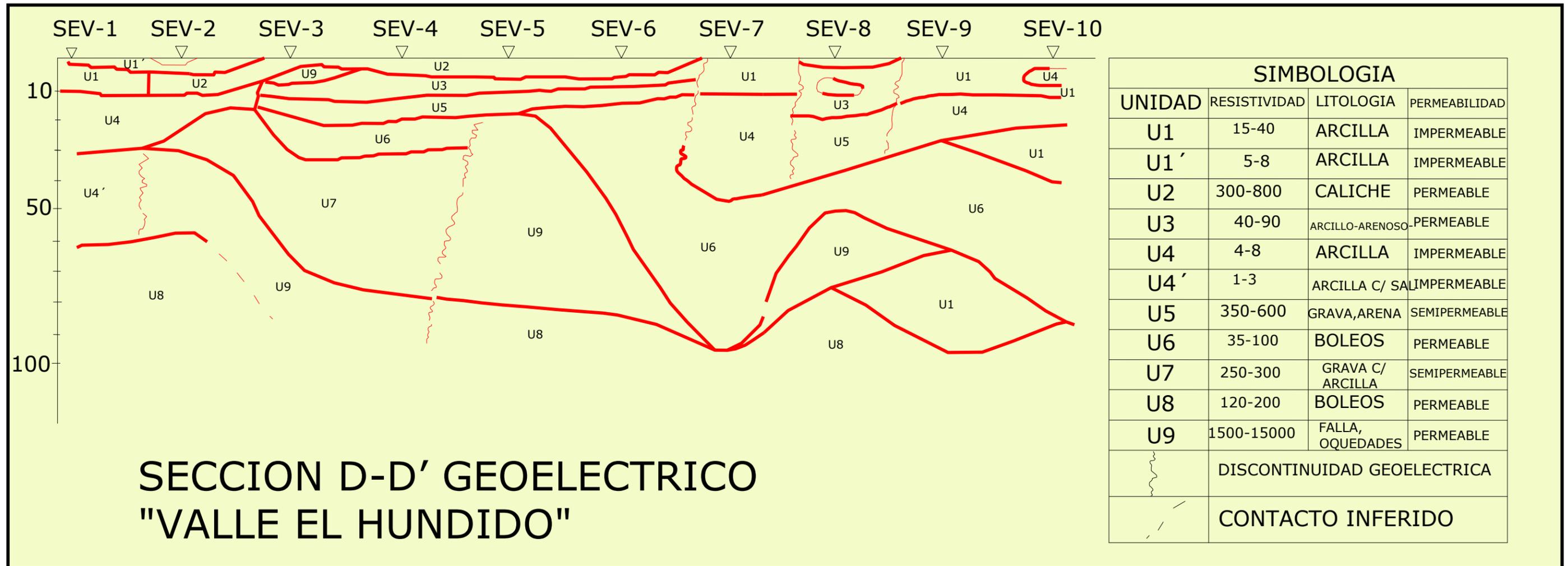


Figura 3.10 Sección D-D' geológica de la zona de estudio sacada con geoelectrica.
Fuente: Realizado Rodríguez 2004 y modificado Arriaga 2010 basado en datos de campo obtenidos Yutisis 2006

La presencia de lechos rojos del Triásico y la Formación San Marcos del Neocomiano Temprano, en el Cañón de San Marcos y su valle, destacando discordantemente sobre sedimentos costeros del Grupo La Casita, lo que permite suponer que a fines del Jurásico Tardío, hubo movimientos ascendentes de las áreas positivas.

En el Neocomiano Temprano y Medio, se observa la alteración de clásticos marginales y a veces continentales con lodos calcáreos, lo que hace suponer que durante dicho lapso hubo inestabilidad tectónica, mayormente reflejada en los bordes de la cuenca. En el Neocomiano Tardío-Aptiano Temprano se depositaron rocas carbonatadas de la Formación Cupido y sus equivalentes (Formaciones: La Virgen, La Mula y Padilla) con las cuales se define la presencia de una plataforma muy amplia que rodeó las áreas emergidas peninsulares.

En el Aptiano Tardío el hundimiento fue mayor que la sedimentación, quizás debido a un basculamiento regional, lo que originó nuevamente condiciones de mar abierto y aguas relativamente profundas, depositándose las lutitas y las calizas arcillosas de la Formación La Peña. Esta unidad en el noreste de México se considera como niveladora, dada la amplia distribución que tiene.

Durante el Albiano –Cenomaniano, el Golfo de Sabinas continuó la subsidencia, depositándose calizas y lutitas del mar abierto, las que gradúan a calizas de plataforma hacia los elementos positivos. La inclinación del Cretácico Tardío en el noreste de México está señalada por un cambio definido en las condiciones de sedimentación. En dicha época empezaron los levantamientos de las áreas continentales en la parte central y occidental de México, originando una regresión de los mares hacia el este. Este movimiento se realizó en forma lenta durante el Cenomaniano, Turoniano y Coniaciano, acentuándose durante el Campaniano, formándose en esta última época cuencas de rápida subsidencia (de Parras y Carbonífera de Sabinas) con grandes acumulaciones de arenas y arcillas. **Figura 3.11**

Dentro de la zona en estudio afloran las formaciones: Lechos Rojos, San Marcos, La Virgen, Cupido, La Peña, Aurora, Acatita, Kiamichi, Grupo Washita indiferenciado, Georgetown, Del Río, Buda y Eagle Ford; casi todas ellas del Cretácico, a excepción de Lechos Rojos que, como ya se mencionó, es Jurásico Inferior. Hacia los valles se encuentran sedimentos aluviales del Cuaternario y esporádicas lavas basálticas también del Cuaternario.

Formación Lechos Rojos

Se llama lechos rojos porque; ahí el hierro está oxidado hasta formar hollín. Los lechos rojos son considerados un signo de oxígeno atmosférico, a causa de las hematites que recubren los granos de arena y que denuncian un grado de aridez del entorno de deposición, donde la lámina acuífera permaneció baja permitiendo a los minerales de hierro su oxidación.(Rueda –Gaxiola 1998)

Los colores impartidos por el mineral hematita (Fe_2O_3) que actúa como cementante de los detritos y es el producto de la oxidación de hierro en este ambiente expuesto al oxígeno de la atmósfera. La localidad tipo fue situada en el Cañón de San Marcos, de la Sierra del mismo Nombre, a 30 ó 40 Km al suroeste de Cuatro Ciénegas Coahuila. Al igual que se encuentra en los potreros de San Marcos (Valle del Jabalí) y en el Potrero de La Virgen, esta formación subyace de la formación San Marcos.(Rodríguez 2004)

Formación San Marcos

La Formación San Marcos fue propuesta por William G. Jane y citada por Imlay (1940 pág. 121)(Humphery 1951 pag. 171). La localidad tipo fue dada en el Cañón de San Marcos, de la sierra del mismo nombre, a 30 – 40 km al suroeste de Cuatro Ciénegas, Coahuila. En el sitio, esta formación descansa sobre sedimentos arenosos marinos del Jurásico Superior y Lechos Rojos subyace a las calizas y dolomitas de la Formación Cupido, aflora dentro de los potreros de San Marcos (Valle del Jabalí) y en el Potrero de La Virgen.

La Formación San Marcos está constituida esencialmente por sedimentos clásicos de ambiente mixto, donde predominan los conglomerados y areniscas conglomeráticas de color rojizo en su porción basal; areniscas cuarcificadas de grano grueso a medio, en su sección media, con intercalaciones delgadas de lutitas de color gris y gris verdoso, en su porción superior. El Cañón de la Mina (flanco sur del anticlinal de la Madera), tiene 237 metros de espesor. No se reportan ahí fósiles que determinen su edad, pero su posición estratigráfica representa una edad del Neocomiano.

Formación La Virgen.

El término de esta Formación fue introducido por W. E. Humphrey(1956 pag 236) para designar los yesos, anhidritas y calizas del Cretácico Inferior que afloran en la porción central de Coahuila. Está limitada en la parte superior, por la formación Cupido y en la inferior por la Formación La Mula. Su localidad tipo fue asignada por el Potrero de La Virgen, a aproximadamente 10 km al noreste de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

Está constituida por estratos de yesos de gran espesor que se alternan con calizas eólicas y escasas dolomitas, en estratos de delgados a medios. Dentro del los estratos de los yesos existen delgadas capas de limolitas de

color gris claro. Tiene un espesor de 304 m en la porción sur del Potrero de la Mula, Coahuila.

LOCALIDAD				COAHUILA (GOLFO DE SABINAS)		
ERA	PERIODO SISTEMA	EPOCA	(SERIE)	EDAD (PISO)	FORMACION	
CENOZOICA	CUATERNARIO	RECIENTE			ALUVION	
		PLEISTOCENO			CONGLOMERADO SABINAS	
	TERCIARIO	PLIOCENO			ASTIANO PLAISANCIANO	
			MIOCENO	SUP	SAHELIANO	
		MED		WINDOBONIANO		
		INF		BURDIGALIANO AQUITANIANO		
		OLIGOCENO	SUP	CHATTIANO		
			MED	RUPELIANO		
			INF	TONGRIANO		
		EOCENO	SUP	LUDIANO BARTONIANO AUVERCIANO		
			MED	LUTECIANO		
			INF	CUISYANO YPRESIANO		
		PALEOCENO		LANEYANO MONTIANO DANIANO		
		MESOZOICA	CRETACICO	SUPERIOR	SENON	MAESTRICHTIANO
	CAMPANIANO					AUSTIN
	SANTONIANO CONIACIANO					EAGLE FORD
	MEDIO				TURONIANO	GRUPO WASHITA KIAMICHI
					ALBIANO	AURORA (Mar Abierto)
	INFERIOR			NEOCOMIANO	APTIANO	LA PEÑA
BARREMIANO HAUTERIVIANO VALANGINIANO BERRIASIANO			LA VIRGEN LA MULA PADILLA BARRIL VIEJO MENCHACA			
TITONIANO			CUPIDO TARAISES			
JURASICO	SUPERIOR		KIMMERIDGIANO OXFORDIANO CALLOVIANO BATHONIANO BAJOCIANO	LA CASITA ZULUAGA MINAS VIEJAS		
	MEDIO			GLORIA		
	INFERIOR		LIASICO			
TRIASICO				CARNICO	HUIZACHAL LECHOS ROJOS	
PALEOZOICA	PERMIICO					COMPLEJO IGNEO PERMO-TRIASICO
	PEN					
	MISS					
	DEV.					
	SIL.					
PROTEROZOICA	ORD.					
	CAM.					
	PRECAMBRICO					

Figura 3.11 Tabla estratigráfica de Coahuila

Fuente: Tomada de Schlumberger basada en datos de PEMEX (Schumbergerber, 1984)

Formación Cupido

Fue dado este término por Imlay (1937 pag 606) en Humphrey (1956 pag 191) para una unidad de calizas de color gris y estratificación gruesa, delgada y mediana que se presenta en la porción media de la sierra de Parras, encajonada por la formación la Peña, en la parte superior y la formación Taraises, en la parte inferior.

En la zona de estudio, la formación Cupido aflora en los potreros de La Virgen y San Marcos, así como en la parte alta de la sierra de San Marcos. El contacto superior con la formación la Peña es brusco y concordante. El contacto inferior varía de concordante a transicional.

Formación La Peña

Su nombre fue inicialmente definido por R. W. Imlay (1936 pag 1119) en (Humphrey 1956 pag 263) para distinguir dos cuerpos con dos miembros. El miembro inferior, compuesto por calizas y el superior por calizas y lutitas. Su localidad tipo se encuentra en el flanco norte de la Sierra de Taraises, aproximadamente de 4.8 km al este sureste de la Hacienda La Peña, en extremo sur del estado de Coahuila.

En el lugar de estudio aflora en la sierras de San Marcos y La Virgen. Morfológicamente se observa en una ligera depresión entre las formaciones Cupido y Aurora, que está constituida por calizas delgadas impuras y margas rosadas con intervalo de lutitas entre los planos de estratificación. Tiene 42 m de espesor en la Sierra de La Madera. Su contacto inferior es la formación Cupido y el superior es la formación Aurora. Dichos contactos son bruscos y concordantes.

Se le considera como horizonte índice paleontológico. Conserva el mismo nombre en todas las localidades dentro de la sierra Madre Oriental hasta las proximidades de Cd. Victoria, Tamaulipas, donde tiene como equivalente a la formación Otates. Se la asigna al Aptiano Superior.

Formación Aurora

El término de la formación Aurora es utilizado en Humphrey(1956 pag 305) fue aplicado por primera vez por Burrows, para una secuencia dominante de estratos de calizas en área del Cuchillo, parado al norte de Chihuahua. El nombre fue tomado de la Mina La Aurora en la sierra de Cuchillo Parado (Sierra de la Aldea) situada alrededor de 4.8 km al noreste del campamento del mismo nombre. La formación varía en espesor de 183 a 475 m y va en aumento hacia el este.

La Formación Aurora está ampliamente distribuida en la zona de estudio. Forma la mayor parte de los “espinazos” de las sierras. Está formada por capas

gruesas a masivas de densidad, de color gris a café grisáceo al estar intemperizado y gris claro a oscuro en muestras sanas. Presenta nódulos y bandas de pedernal gris claro y líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación. Tiene un espesor de 534m en el flanco sur del extremo oriental del anticlinal de La Madera, en el cañón de El León.

Esta unidad presenta su contacto con la Formación Kiamichi (superior) y la formación La Peña (Inferior). Estos contactos son bruscos y concordantes. Por estudios micropaleontológicos y su posición estratigráfica se le da la edad del Albiano Inferior y medio.

Formación Acatita

El término Formación Acatita fue propuesto por Humhrey (1956), para una unidad sedimentaria de facies lagunar del Albiano Inferior y Medio, que ocurre sobre un área considerable del Sur-Centro de Coahuila y Noreste de Durango. Consiste de interestratificaciones de caliza, yeso, dolomía y anhidrita.

Como localidad tipo fue asignado el frente Suroeste de la Sierra de Acatita, entre el Cañón Grande y Las Uvas, Coahuila, y la sección tipo se considera la medida por Kelly, justamente al Oriente del Cañón de Pezuña, aproximadamente a 3 Km., del Rancho Acatita. En la localidad tipo, la formación descansa sobre un miembro basal calcáreo potente, en forma de escarpe, sobre calizas impuras y clásticos de la formación Las Uvas, y a la vez es cubierta por estratos con rudistas referenciados a la formación Aurora. A la formación Acatita, se le considera del Albiano Inferior y Medio, siendo correlacionable con la parte media y superior de la formación Aurora.

Formación Kiamichi

La localización tipo está en la planicie del Río Kiamichi, cerca de Fort Towson al oriente del condado de Choctow, Oklahoma. En la zona de estudio, aflora en las sierras La Virgen, La Madera y Purísima. Muestra, como en la formación La Peña, una ligera depresión entre calizas que la encajonan. Consiste en una alternación de calizas impuras con margas y lutitas de color crema, rosa y amarillento, debido al intemperismo. En esta formación es común encontrar fósiles (amonitas) determinadas como oxytropiceras.

Esta formación muestra una disminución de su espesor y sus características litológicas, conforme se avanza al poniente, hacia el área de la Madera, hasta acuñarse en esa dirección, contra la formación Aurora, la cual tuvo mayor desarrollo hacia esta zona; es decir, el crecimiento de la formación Aurora pudo llegar hasta la edad de la formación Kiamichi. El contacto de la formación grupo Washita Indiferenciado o sus equivalentes, es concordante y define dónde se inician las calizas de estratificación delgada a media. Se le asigna una edad del Albiano Medio y Superior.

Grupo Washita Indiferenciado

Este fue un término empleado por Humphrey (1956 pag 386) para designar a rocas del Albiano Superior, especialmente en secciones dentro de las Provincias paleogeográficas del golfo de Sabinas y la Península de Tamaulipas. Consiste principalmente en una alternancia de clásicos finos y rocas carbonatadas impuras, fases que fueron perfectamente desarrolladas sobre las áreas del antiguo golfo de Sabinas y a lo largo de sus márgenes. Al sur y al suroeste pasa a calizas extra litorales y con abundante pedernal.

El grupo Washita Indiferenciado aflora en las sierras de San Marcos, La Madera, La Fragua y Alamitos. Hacia el oriente de la sierra de San Marcos, cambia de fases y se definen perfectamente las tres formaciones de este grupo, integradas por las unidades Georgetown, del Río y Buda.

Las fosas depositadas sobre el borde de golfo de Sabinas, marcada como Grupo Washita indiferenciado, consiste de calizas de estratificación media a gruesa, de alta energía, con algunas concentraciones de rudistas e intervalos de lutitas y margas grises. Su espesor estimado es de 116 metros.

Su contacto inferior con la Formación Kiamichi es brusco y concordante. El superior no fue observado. Presenta microfósiles que la sitúan en el Albiano Superior y el Cenomaniano Inferior.

Formación Georgetown.

La Formación Georgetown (Humphrey 1956 pag 400) es una unidad de calizas equivalente a la parte inferior del grupo Washita, en el norte de Texas. Presenta amplios afloramientos en el norte del estado de Coahuila.

Esta Formación aflora en las sierras de Menchaca y Purísima y está ausente donde el Grupo Washita es Indiferenciado; esto es, en el oeste del área trabajada. Es una unidad caracterizada por calizas delgadas y medias, con abundantes lentes de pedernal de color gris y negro. Sus contactos Inferior y Superior con las formaciones Kiamichi y Del Río respectivamente, son concordantes y transicionales. Su edad es del Albiano Superior – Cenomaniano Inferior.

Formación Del Río

La formación Del Río (Hill y Vaughan 1989 pag 236) en (Humphrey 1956) es la extensión en el suroeste de Texas, Transpecos Texas y norte de México de la formación Grayson (Gracig 1984 pag 40, 43) en la porción norte central de Texas. En el sitio de estudio aflora en las sierras de Menchaca y Purísima. Consiste en una alternancia casi constante de calizas arcillosas delgadas y laminares, predominando las lutitas hacia la base. Su espesor varía de 15 a 31m. Los contactos que la limitan son: formación Georgetown en la parte

inferior, y formación Buda, en la parte superior, son transicionales y concordantes. Se le asigna edad del Cenomaniano Inferior.

Formación Buda

El nombre se uso por primera vez por Vaughan(1900 pag 18) para remplazar el término Shola Creek (Hill 1889 1899 pag 803) que previamente había sido llamado caliza Burnt y caliza Vola(Adkins 1933 pag 396 – 400) (humphrey 1956 pag 413). La formación Buda, en la localidad tipo, tiene un espesor máximo de 23 m y consiste en lechos medianos de calizas compactas impuras, nodulares de color amarillento.

Esta formación tiene íntima relación con las formaciones Del Río y Georgetown, e igual que estas aflora en las sierras de Menchaca y Purísima. Está constituida por calizas que varían de delgada a medias, con escasas alteraciones de lutitas. El color de la roca sana es de gris a gris claro y cuando está intemperizado es gris y ocasionalmente amarillento. Su espesor es de 77 m. Su contacto inferior es con la Formación Del Río y es concordante al igual que transicional; el superior, con la formación Eagle Ford. Este contacto es brusco y discordante.

Formación Eagle Ford.

Según Sellard (1932 pag 422) la primera mención de los equivalentes Eagle Ford en la bibliografía geológica fue dada por Ferdinand Roemer, quien en 1852 la incluyo en sus formaciones de la región de New Braunfels, a las lutitas negras Eagle Ford, con restos de peces. Hill, en 1887 colocó dichos estratos en la base de las series del Golfo, encima de las arenas Wodbine y que el primero que aplicó el nombre de lutitas de Eagle Ford. La localidad tipo está en Eagle Ford, condado de Dallas, alrededor de 9 km al oeste de Dallas, Texas, donde la porción superior está expuesta.

En la zona de trabajo se encuentran pequeños afloramientos al este de la sierra de San Marcos. Esta formación está constituida por calizas altamente arcillosas, con estratificación laminar y abundantes pelicipodos. Alternan con lutitas de color gris, en ocasiones carbonatadas. Se le estima un espesor de 300m presenta su contacto inferior con la Formación Buda, nítido y discordante; su contacto superior con la formación Austin es claramente transicional y concordante.

Conglomerado terciario.

Corresponde a los materiales clásticos de pie de monte que se encuentran principalmente en las estribaciones de algunas sierras, que son marcados en los planos como de la edad Terciaria y son diferenciados de los materiales aluviales que constituyen la mayor parte de los bolsones con espesores de 30 a 50 m de profundidad.

Rocas ígneas.

Dentro de la zona existen algunos afloramientos de rocas ígneas extrusivas constituidas por derrames de basaltos, los cuales se encuentran tanto en la porción central del valle de Ocampo como en el extremo noroeste del mismo, inmediatamente al oeste de poblado de Ocampo. Están constituidos por derrames lávicos de basalto de color negro y rojizo, los cuales han sido asignados al terciario.

Hacia el suroeste del valle de Cuatro Ciénegas, se encuentran pequeños afloramientos de un cuerpo intrusivo, de textura granítica y composición ácida.

Sedimentos aluviales.

Rellenando los valles El Hundido, Cuatro Ciénegas y Ocampo se encuentran materiales granulares producto de la erosión y el transporte de las sierras hacia los flancos de los bolsones.

Los clásticos son de mayor tamaño; gravas, arenas y limos y se hacen más finos hacia el centro de los valles, donde se interdigitan con sedimentos evaporíticos lacustres de lagunas intermitentes.

3.5. El marco geodinámico

En la zona de estudio, los cabalgamientos observados tienen una geometría lítrica y son el resultado de llanos y rampas alternantes, como las que se presentan en la Sierra de la Fragua, la Sierra del Granizo y en el flanco sur occidental.

Estableciendo el marco geológico y estructural del valle El Hundido, es posible definir los contactos estratigráficos de cada una de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, junto con el establecimiento del patrón de fallamiento y fracturamiento, en el nivel regional.

Por lo antes dicho se logró establecer la relación entre los epikarstos presentes en la Formación Aurora, con los que se detectan en el subsuelo, mediante técnicas geofísicas como sondeos eléctricos verticales y gravimetría, que conducen a suponer que a través de viejos karstos existentes en el subsuelo exista comunicación hidráulica entre ambos valles (El Hundido – Cuatro Ciénegas).

La vergencia de los movimientos que dieron lugar a los cabalgamientos en el área de investigación, procedieron del norte, producto del último evento

orogénico ocurrido en el Eoceno. El marco geodinámico que dio lugar al plegamiento de las estructuras en el valle El Hundido se ha basado en los siguientes elementos:

- Presencia de evaporitas en dos niveles:
 - Formación Minas, Viejas, del Jurásico Inferior.
 - Formación Acatita, del Cretácico Inferior.
- Rocas clásticas y carbonatadas, que conforman las estructura de la mayoría de las sierras de la región Noreste de México.
- Despegue basal, en el flanco sur del valle del Jabalí.
- El basamento cristalino aflora en la parte sur de este valle.

A partir de estos criterios, se logró determinar el marco geodinámico que dio lugar al plegamiento de las estructuras en el área de investigación, en el valle El Hundido.

El levantamiento actuó en la deformación de las estructuras, generando una geometría de pliegues, producto de un anticlinal recumbente, que fue cabalgado al Sur contra el alto de la Isla de Coahuila. La geometría asociada a pliegues inició su despegue en el nivel salino. En aquellos sitios donde los depósitos evaporíticos no están presentes, la estructura se acuña. El mecanismo del modelo de cuña explica que las contracciones de las capas de material que estén desplegadas de su base, tiendan a producir una cuña. (Davis et al, 1983. Dahlem et al, 1984). Dicho modelo es tanto válido para la cuenca de Sabinas como para la Sierra Madre Oriental. El cual explica como la contracción horizontal del material, separado del sustrato tiende a generar una cuña, la cual crece verticalmente provocado por la fuerza de gravedad. La geometría de la cuña desarrolla y refleja un equilibrio entre la tensión del material de ésta, necesaria para causar el deslizamiento a lo largo del esfuerzo principal. El desplazamiento principal fuerte, tenderá a generar acortamientos generando escarpes muy pronunciados como los que se presentan en el flanco sur occidental Sierras de San Marcos-El Pino, El Granizo y en la parte sur de La Fragua. El desplazamiento débil tenderá a generar el acortamiento sobre una zona más amplia, y creará una cuña más suave sobre la rampa.

La apertura del ángulo de la cuña depende de la resistencia del material que forma la rampa de despegue basal. Los despegues en rocas dúctiles (yesos y anhidritas) y menos resistentes, en ellos la prolongación es mayor, y es menor el acortamiento.

A partir del modelo estructural de cabalgamientos basado en información de campo, levantamiento de secciones geológicas apoyadas con imágenes de satélite y descripción de afloramientos, en las Sierras de San Marcos, La Fragua y El Granizo se obtuvo lo siguiente:

La Sierra de la Fragua se sobrepone a cabalgamientos frontales, con la Sierra de San Marcos; las escamas de despegue, como los contactos entre las formaciones: Georgetown, Aurora, Peña y Cupido, producen comunicación hidráulica entre los valles del Hundido y de Cuatro Ciénegas.

Aunado a esto, en el pozo perforado en diciembre del 2010 en el flanco oriental de la Sierra de la Fragua, aproximadamente a 300 metros de la carretera, el agua reporta una temperatura de 32 C°, similar a la que presentan las pozas: Churince, La Becerra y Poza Azul. (Forti P., Giulivo I., Piccini, Tedeschi R., 2003)

En el diagrama **Figura 3.12** se muestran dos mecanismos diferentes que intervienen tanto en la formación de la estructura de caja como de los pliegues en las sierras de la Fragua, El Granizo y San Marcos El Pino.

La formación de la caja y los pliegues ocurre a través de la migración de la bisagra. Esto es similar a lo que ocurre durante la formación de los esquistos. Posteriormente, el estrato del limbo se coloca en forma vertical formando un ángulo de 90°. Este tipo de migración de bisagra es similar al mecanismo que da lugar a una falla-pliegue y a propagación de una falla de tipo plegamiento. (Suppe, 1983, Medwedeff, 1990)

Las estructuras de caja pliegue se forman a través de un combamiento. El limbo vertical en este modelo forma lengüetas a través de la rotación de cuerpos rígidos. El mecanismo operador del modelo pliegue-caja requiere de estratos móviles y plásticos, tal es el caso de los yesos y anhidritas presentes en la Formación Minas Viejas y en la Formación Acatita, dentro del área de estudio.

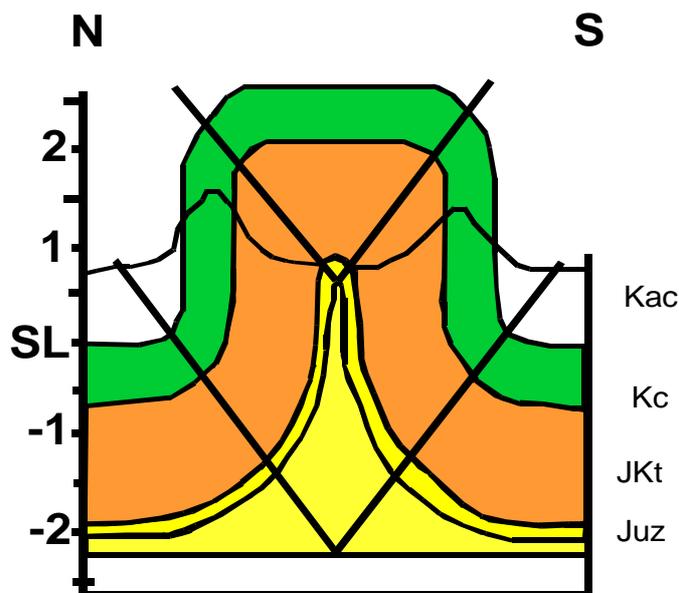


Figura 3.12 Modelo de caja

Fuente: Rodríguez 2004

Partiendo de este modelo geodinámico, se logró demostrar que el modelo conceptual hidrogeológico del valle El Hundido que presentó la Empresa Lesser y Asociados no es correcto, se demostró en campo que dicha estructura no es un Sinclinal, la zona de estudios fue sometida a fines del período Cretácico a esfuerzos provenientes del norte, los cuales plegaron las estructuras de las Sierras de La Fragua, El Granizo y San Marcos El Pino, dan lugar a cabalgamientos, además los resultados preliminares de geofísica nos demuestran un alto gravimétrico el cual puede estar asociado a zonas cársticas en las formaciones cretácicas correspondientes a las Formaciones Aurora y Cupido del Cretácico Inferior.

3.6 Geología estructural del sitio

En la zona de estudio se presenta un marco geodinámico de cuña que es válido tanto para la cuenca de Sabinas como para la Sierra Madre Oriental. Este marco explica cómo la contracción horizontal del material, separado del sustrato tiende a generar una cuña, que crece verticalmente debido a la fuerza de la gravedad. La geometría de la cuña desarrolla y refleja un equilibrio entre la tensión del material de ésta, necesaria para causar el deslizamiento a lo largo del esfuerzo principal. El desplazamiento principal fuerte tenderá a generar acortamientos, generando escarpes muy pronunciados como los que se presentan en el flanco sur occidental de las Sierras de San Marcos-El Pino, El Granizo y en la parte sur de La Fragua. El desplazamiento débil tenderá a generar el acortamiento sobre una zona más amplia, y creará una cuña más suave sobre la rampa.

La apertura del ángulo de la cuña depende de la resistencia del material que forma la rampa de despegue basal. Es la mayor prolongación en los despegues en rocas dúctiles (yesos y anhidritas) y menos resistentes, siendo menor el acortamiento.

A partir del marco estructural de cabalgamientos basado en información de campo y el levantamiento de secciones geológicas apoyadas con imágenes de satélite y descripción de afloramientos, en las Sierras de San Marcos, La Fragua y El Granizo se concluye lo siguiente:

- La Sierra de la Fragua se sobrepone a cabalgamientos frontales, con la Sierra de San Marcos; las escamas de despegue como los contactos entre las formaciones: Georgetown, Aurora, Peña y Cupido, producen comunicación hidráulica entre los valles El Hundido y de Cuatro Ciénegas **Figura 3.13.**

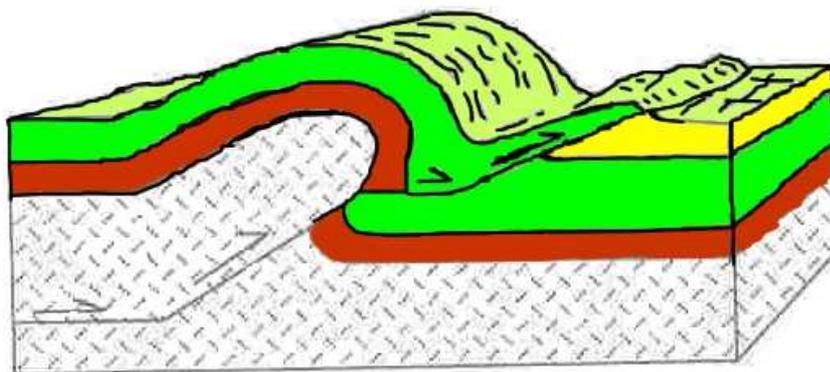


Figura 3.13 Modelo de rampa

Fuente: Rodríguez 2004

En el diagrama se muestran dos mecanismos diferentes que intervienen en la formación de la estructura de caja, como de los pliegues en las sierras de la Fragua, El Granizo y San Marcos-El Pino.

La formación de la caja y los pliegues ocurren a través de la migración de la bisagra, esto es similar a lo que ocurre durante la formación de los esquistos.

Posteriormente, el estrato del limbo se coloca en forma vertical formando un ángulo de 90° . Este tipo de migración de bisagra es similar al mecanismo que da lugar a una falla-pliegue y a la propagación de la falla de tipo plegamiento. (Suppe, 1983, Medwedeff, 1990).

Las estructuras de caja pliegue se forman a través de un combamiento. El limbo vertical, en este modelo, forma lengüetas a través de la rotación de cuerpos rígidos. El mecanismo operador del modelo pliegue-caja requiere de estratos móviles y plásticos.

Tal es el caso de los yesos y anhidritas presentes en la formación Minas Viejas y en la Formación Acatita, dentro del área de estudio.

Partiendo de este marco geodinámico, se logró demostrar que el modelo conceptual hidrogeológico del valle El Hundido **Figura 3.14**.

La zona de estudios fue sometida a fines del período Cretácico a esfuerzos provenientes del norte, los cuales plegaron las estructuras de las Sierras de La Fragua, El Granizo y San Marcos-El Pino.

Estos dan lugar a cabalgamientos; además los resultados preliminares de geofísica demuestran un alto gravimétrico que puede estar asociado a zonas cársticas en las formaciones cretácicas correspondientes a las Formaciones Aurora y Cupido del Cretácico Inferior.

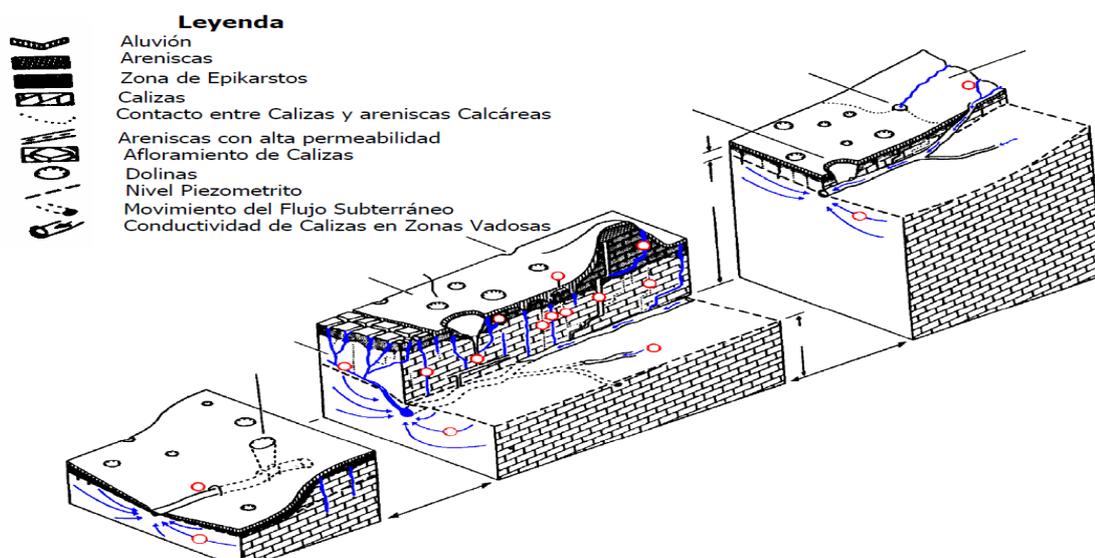


Figura 3.14 Modelo conceptual Hidrogeológico a la salida del cañón del valle El Hundido

Fuente: Modificado Arriaga basado en Rodríguez 2006

3.7.- Conclusiones

Se concluye los siguientes con el estudio geológico que se hizo en la zona:

- ❖ Hay presencia de evaporitas en dos niveles:
 - ◆ En la Formación Minas Viejas del Jurásico Inferior
 - ◆ En la Formación Acatita del Cretácico Inferior.
- ❖ La presencia de rocas clásticas y carbonatadas, que conforman la estructura de la mayoría de las sierras de la región Noreste de México.
- ❖ Se encuentra un despegue basal en el flanco sur del Valle del Jabalí. Este basamento cristalino aflora en la parte sur de este valle.
- ❖ Los cabalgamientos observados en el área investigada tienen una geometría lístrica y son el resultado de llanos y rampas alternantes como las que se presentan en la Sierra de la Fragua, la Sierra del Granizo y en flanco sur occidental de la Sierra de San Marcos-El Pino.
- ❖ La vergencia de los movimientos que dieron lugar a los cabalgamientos en el área de investigación procedieron del norte, como producto del último evento orogénico ocurrido en el Eoceno.
- ❖ La Sierra de la Fragua se sobrepone a cabalgamientos frontales, con la Sierra de San Marcos; las escamas de despegue, como los contactos entre las formaciones: Georgetown, Aurora, Peña y Cupido, producen comunicación hidráulica entre los valles El Hundido y de Cuatro Ciénegas

Capítulo 4. Geohidrología

4.1. Introducción

Los parámetros climatológicos y geológicos afectan de forma directa la recarga natural. Para definir el comportamiento de un acuífero se tiene que realizar una serie de pruebas que se explican en este capítulo.

En el desierto Chihuahuense se encuentran distintas unidades acuíferas, con características y potenciales distintos; algunas de ellas pueden tener una intercomunicación, haciendo que se afecten directamente, de forma recíproca.

Cuando se presentan estos casos, para tener una idea completa de su comportamiento, se debe hacer un estudio regional, para así determinar el balance que existe entre las unidades acuíferas.

El estudio que se realizó en el valle El Hundido es de tipo local, ya que sólo se enfoca en el comportamiento del acuífero que se encuentra en la zona.

Esto quiere decir que sólo se basa en la cuenca El Hundido y se determinará sus entradas y sus salidas, sin tomar en cuenta hacia donde se encuentra su salida.

De esta forma, se intenta realizar un modelo conceptual Geohidrológico de la cuenca del valle El Hundido.

4.2. Características hidrogeológicas de las formaciones.

Es importante conocer la caracterización de las formaciones estableciendo las unidades geohidrológicas y dando una definición adecuada del sitio en estudio.

Como se mencionó en el Capítulo 2, los tipos de las formaciones que se encuentran en el sitio de estudio junto con la ubicación de los mismos, se muestra en la **figura 3.5** en la que se observa el tipo de estructura que tiene el valle y las características físicas del mismo.

Las unidades geológicas, como se mostró en el capítulo 2, se muestra en la **figura 4.1**

Debido a la diversidad de los tipos litológicos y las génesis de las formaciones sedimentarias presentes en el área de estudio, estas presentan dos unidades acuíferas: una en medios granulares asociadas a depósitos aluviales y la otra vinculada con rocas consolidadas (calizas).

Las unidades hidrogeológicas en rocas consolidadas son las que forman los acuíferos muy potentes, en el nivel regional; estas unidades de acuerdo con la posición estratigráfica que guardan en la zona son: la formación Cupido, del Hauterviano y la formación Aurora, del Albiano; ambas del Cretácico Inferior. **Figura 4.2**

La unidad correspondiente a los rellenos aluviales está estrechamente relacionada con depósitos de pie de monte y eólicos, de edad reciente. La unidad en las rocas consolidadas corresponde a un acuífero profundo; en cuanto a la segunda unidad, esta forma un acuífero somero.

La geometría de los acuíferos que yacen a diferentes profundidades queda controlada principalmente por los contrastes de la permeabilidad existente entre los diferentes tipos de sedimentos interestratificados.

Zona de estudio valle El Hundido

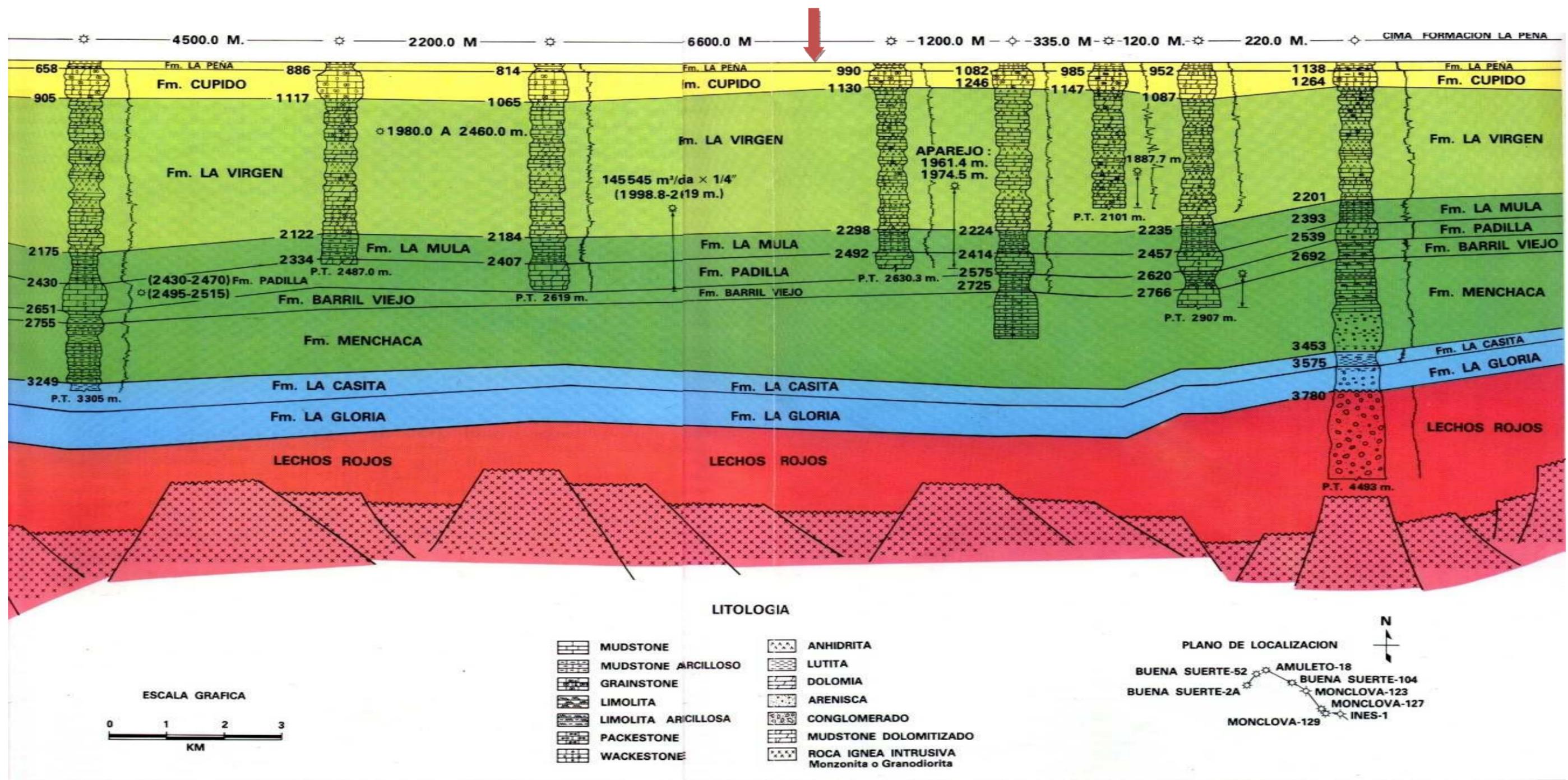


Figura 4.1 Sección estratigráfica regional
Fuente: Tomada de Schlumberger basada en datos de PEMEX (Schumberger, 1984)

Todos estos aspectos inciden en un mayor grado de anisotropía y heterogeneidad del medio y por lo tanto la circulación del agua subterránea (Custodio, 1986)

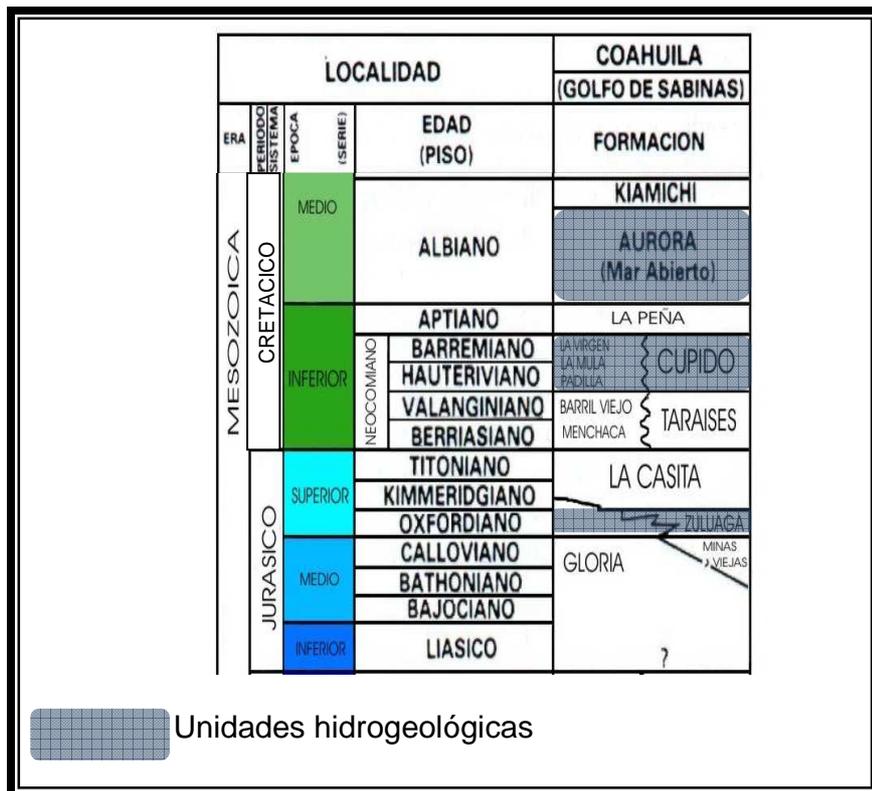


Figura 4.2 Estratigrafía y unidades hidrogeológicas
Fuente: Tomada de Schlumberger basada en datos de PEMEX
 (Schumberger, 1984) Modificada por Arriaga

4.3. El censo de aprovechamiento.

La verificación del censo e inventario de aprovechamiento hidráulicos consistió en un recorrido de campo, para la confirmación de la ubicación de los pozos.

En el valle El Hundido existen 98 pozos de los cuales hasta el 2005 eran los siguientes:

N° DE POZO PARA ESTUDIO	N° DE POZO SAGARPA /CNA	PROPIETARIO	UBICACIÓN	FECHA DE CENSO	COORDENADAS	
					X	Y
1	1	EJIDO CERROS PRETOS	EJIDO DE CERROS PRIETOS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	04/09/2001	782659	2937827
2	1R	EJIDO CERROS PRETOS	EJIDO DE CERROS PRIETOS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	04/09/2001	78662	2937836
3	2	EJIDO CERROS PRETOS	EJIDO DE CERROS PRIETOS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	783210	2938174
4	3		EJIDO DE CERROS PRIETOS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	773172	2943294
5	4	EJIDO TANQUE NUEVO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	777845	2943792
6	5	EJIDO TANQUE NUEVO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	777251	2944034
7	6	EJIDO TANQUE NUEVO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	777883	2945802
8	7		COMUNIDAD TANQUE NUEVO	04/09/2001	778206	2947639
9	8	LUIS DÍAZ DE LEÓN	LA VIRGEN MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/09/2001	761680	2943448
10	9	LUIS DÍAZ DE LEÓN	EL PAPALOTE MPO. SAN PEDRO	07/09/2001	744380	2926250
11	10	LUIS DÍAZ DE LEÓN	EL PAPALOTE MPO. SAN PEDRO	06/09/2001	746741	2930333
12	11	LUIS DÍAZ DE LEÓN	EL PAPALOTE MPO. SAN PEDRO	06/09/2001	776689	2930699
13	12	LUIS DÍAZ DE LEÓN	BUENAVISTA MPO. SAN PEDRO	06/09/2001	745585	2931875
14	13		EJIDO SANTA TERESA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/09/2001	799566	2946469
15	14		PUENTE ARRROYO SECO EL HUNDIDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/09/2001	756197	2941816
16	15		EL HUNDIDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/09/2001	749393	2935342
17	16	EJIDO LAS MORENAS	EJIDO LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	11/09/2001	743523	2944731
18	17	EJIDO LAS MORENAS	EJIDO LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	12/09/2001	735989	2952809
19	19	FERNANDO DÍAZ DE LEÓN	PREDIO SAN FERNANDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	12/09/2001	746741	2947836
20	22	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA	LAS ESPERANZAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	10/09/2001	755441	2944339

N° DE POZO PARA ESTUDIO	N° DE POZO SAGARPA /CNA	PROPIETARIO	UBICACIÓN	FECHA DE CENSO	COORDENADAS	
					X	Y
21	23		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	10/09/2001	772654	2945096
22	24		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	772159	2944905
23	25		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	770313	2945392
24	26		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	773806	2945575
25	26A		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	772732	2946057
26	27		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	771396	2944599
27	28		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	773322	2948476
28	31	LUIS DÍAZ DE LEÓN	BUENAVENTURA MPO. SAN PEDRO	06/09/2001	745479	2931819
29	32	ARTURO CANTÚ	LA CUESTIÓN MPO. CUATRO CIÉNEGAS	19/09/2001	750396	2953454
30	36	EJIDO GABINO VÁZQUEZ	EL PORVENIR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	755871	2953023
31	37	EJIDO GABINO VÁZQUEZ	PROVIDENCIA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/09/2001	764089	2946226
32	38	EJIDO GABINO VÁZQUEZ	PROVIDENCIA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/09/2001	764050	2946137
33	39	EJIDO EL CAMPIZAL	EL CAMPIZAL MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	746552	2948998
34	41	EJIDO EL CAMPIZAL	EL CAMPIZAL MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	747392	2949826
35	42	EJIDO EL CAMPIZAL	EL CAMPIZAL MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	747050	2949036
36	43	EJIDO EL CAMPIZAL	EL CAMPIZAL MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	748161	2949105
37	44	EJIDO LAS MORENAS	LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	11/09/2001	743239	2944777
38	45	LUIS DÍAZ DE LEÓN	EL PAPALOTE MPO. SAN PEDRO	06/09/2001	747813	2929208
39	46	EJIDO LAS MORENAS	LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	11/09/2001	740798	2944155
40	47	ARTURO CANTÚ	LA CUESTIÓN MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	748200	2951411
41	48	ARTURO CANTÚ	LA CUESTIÓN MPO. CUATRO CIÉNEGAS	19/09/2001	749578	2951386
42	49	FERNANDO DÍAZ DE LEÓN	SAN FERNANDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	746129	2948449
43	50	FERNANDO DÍAZ DE LEÓN	SAN FERNANDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	746688	2948355
44	51	LÁZARO VILLARREAL	SAN FERNANDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	08/09/2001	746960	2946726
45	52	LÁZARO VILLARREAL	SAN FERNANDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	08/09/2001	746579	2946561
46	54	LÁZARO VILLARREAL	SAN FERNANDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	08/09/2001	748453	2948439
47	55	LÁZARO VILLARREAL	SAN FERNANDO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	18/09/2001	747303	2948294
48	56	EJIDO LA BAVIA	LA BAVIA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	12/09/2001	738879	2950024

N° DE POZO PARA ESTUDIO	N° DE POZO SAGARPA /CNA	PROPIETARIO	UBICACIÓN	FECHA DE CENSO	COORDENADAS	
					X	Y
49	58A	EJIDO LA BAVIA	LA BAVIA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	12/09/2001	739261	2949805
50	61	MARCO ANTONIO RODRÍGUEZ	LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	12/09/2001	746348	2945550
51	63		EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	771293	2944599
52	64	FAMILIA VILLARREAL	ARROYO SECO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/12/2001	755383	2938940
53	71	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	11/09/2001	768415	2945767
54	72	JORGE CÁRDENAS	LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	11/09/2001	744023	2943506
55	73	JORGE CÁRDENAS	LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	11/09/2001	743414	2945881
56	74	ARTURO CANTÚ	LA CUESTIÓN MPO. CUATRO CIÉNEGAS	19/09/2001	749288	2953573
57	75	ARTURO CANTÚ	LA CUESTIÓN MPO. CUATRO CIÉNEGAS	19/09/2001	749012	2952992
58	76	JORGE CÁRDENAS	LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	19/09/2001	744725	2945270
59	77	RAÚL ANAYA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	20/09/2001	744388	2942901
60	78	RAÚL ANAYA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	20/09/2001	7438917	2942352
61	79	RAÚL ANAYA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	20/09/2001	751870	2940301
62	80	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	08/09/2001	744258	2946161
63	81	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	08/09/2001	745429	2945959
64	82	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	747049	2945910
65	83	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	747543	2946367
66	84	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	748014	2947117
67	85	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	748339	2947952
68	86	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	08/09/2001	746467	2946532
69	87	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	748741	2948880
70	88	JORGE CÁRDENAS	LAS MORENAS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	08/09/2001	745608	2946456
71	89	COMUNIDAD TANQUE NUEVO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	04/09/2001	782778	2944704
72	90	COMUNIDAD TANQUE NUEVO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	04/09/2001	778592	2948854
73	91	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	05/09/2001	775807	2947632

N° DE POZO PARA ESTUDIO	N° DE POZO SAGARPA /CNA	PROPIETARIO	UBICACIÓN	FECHA DE CENSO	COORDENADAS	
					X	Y
74	92	LUIS DÍAZ DE LEÓN	CIÉNEGAS MPO. SAN PEDRO	07/09/2001	751447	2936735
75	93	RAÚL ANAYA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	745435	2942307
76	94	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	750059	2948890
77	95	AGRICOLA EL PILAR S.A. DE C.V.	AGRICOLA EL PILAR MPO. CUATRO CIÉNEGAS	07/09/2001	749761	2948331
78	96	RAÚL ANAYA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	10/09/2001	752316	2938697
79	97	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	10/09/2001	756439	2942854
80	98	HILARIO GARCÍA	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	10/09/2001	778245	2948360
81	99	EJIDO GABINO VÁZQUEZ	EJIDO GABINO VÁZQUEZ MPO. CUATRO CIÉNEGAS	10/09/2001	768400	2945908
82	24 FIC(1)	GRUPO N° 2	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	771130	2945100
83	23 FIC(2)	GRUPO N° 1	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	772605	2945291
84	27 FIC(3)	GRUPO N° 3	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	771249	2944795
85	63 FIC(4)	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	771249	2944800
86	25 FIC(5)	GRUPO N° 4	EJIDO SANTA TERESA DE SOFÍA MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	770226	2945587
87	5 FIC(6)	PROP. PRIVADA "EL PILAR"	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	770226	2944235
88	4 FIC(7)	EJIDO TANQUE NUEVO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	777203	2943986
89	006 FIC(8)	EJIDO CERROS PRETOS	EJIDO DE CERROS PRIETOS MPO. CUATRO CIÉNEGAS	28/12/2003	779436	2942307
90	IMTA 131	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	774451	2946030
91	IMTA 132	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	773960	2945939
92	IMTA 133	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	773604	2946325
93	IMTA 135	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	773130	2947039
94	IMTA 124	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	774631	2948104
95	IMTA 125	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	777207	2948665
96	IMTA 126	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	777078	2948314
97	IMTA 127	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	777078	2948314
98	IMTA 129	RANCHO FLORENTINO RIVERO	EJIDO TANQUE NUEVO MPO. CUATRO CIÉNEGAS	06/03/2005	777078	2948314

La ubicación de estos pozos se muestra en la **figura 4.3** en la zona de estudio.

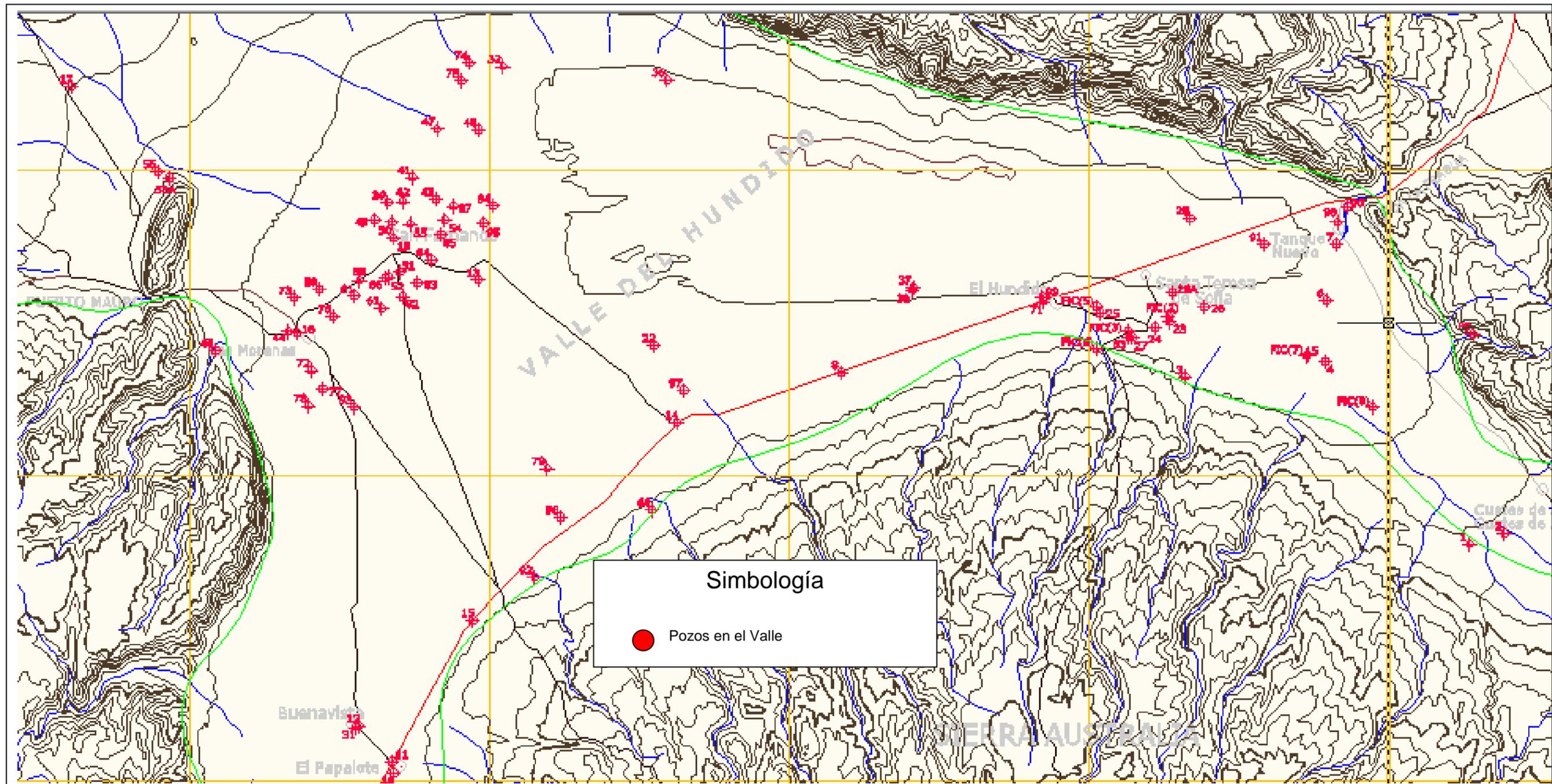


Figura 4.3 Localización de los aprovechamientos hidráulicos en el Valle El Hundido.
 Fuente: Modificado pero basado en datos de INEGI.

4.3.1. Pozos en funcionamiento

Los siguientes pozos que se encuentran en funcionamiento:

GENERAL N° DE POZO PARA ESTUDIO	CONSTRUCTIVAS				RÉGIMEN DE OPERACIÓN		
	PERFORACIÓN		ADEME		NIVEL (m.)	GASTO L.P.S.	VOL. ANUAL 10 ³ m ³
	DIÁMETRO	PROF. (m.)	DIÁMETRO	PROF. (m)	ESTÁTICO		
3	10"	200	2.5"	200		9	8748
5	12	100	8	100	51.26	50	
6	14	100	10	100		80	
8	10		2		S/O	4	15552
11	10	70		70	43	2	13140
13		35	2	35	33.05	2	13140
21	14	150	10	150	28.74	90	1944000
22	14	200	8	200		64	1990656
23	14	100		100	S/O	50	1555200
26	14	100	10	100	N/S	100	1555200
29	16	40	2	40	17.35	2	25920
33	14	100	8	100	NO B/S	50	864000
34	14	100	8	100		60	155200
35	14	100	8	100		21	544320
36	14	100	8	100	28.93	64	1382400
37	10	100	4	10	NO B/S	16	6912
38	10	70	1	70	52.25	1	10368
39	10	90	2	90	76.72	2	10512
40	16	100	1	100	23.86	1	12960
48	8	140		140	85.49	4	2592
50	14	70	4	70	29.93		322560
51	8	94	2	94	32.41	16	20736
62	16	120	8	120		40	1036800
63	16	120	10	120		60	1555200
64	16	120	10	120		60	1555200
65	16	120	8	120		60	1555200
68	16	85	8	85	36.24	60	1555200
69	16	120	8	120	25.56	64	1658880
70	14	120		120	25.82	64	1105920
80	10	55	1	55	32.29	0.5	648
82	14	150	12	130	30.63	100	
83	14	150	12	130	29.15	100	

4.3.2. Pozos secos, de observación y fuera de servicio.

Los siguientes pozos son los que se encuentran secos o fuera de funcionamiento:

N° DE POZO PARA ESTUDIO	ADEME		NIVEL (m.)	
	PROF. (m.)	DIÁMETRO	PROF. (m)	ESTÁTICO
2	150		150	129.9
4		14"		64.19
7	90		90	30.3
9	21.78	16		22.83
10	70	10	70	67.57
12	70	10	70	AZOLVADO
14		8		SECO
15	95	10	95	31.96
16		8		43.96
17	70		70	40.8
18	70	10	70	27.98
19				33.58
20	15		15	11.4
24	100	14	100	25.58
25	120	14	120	21.78
27	50	8	50	7.59
30	11		11	10.06
31				6.15
41				17
42	100	14	100	32.27
43		14		34.22
44	100	16	100	21.16
45	100		100	33.95
46	100	16	100	26.96
47	100	14	100	31.64
52	200	12	200	63.14
53				AZOLVADO
54	120	16	120	22
55	100	14	100	90.16
56	25		25	22.16
57		14		20.18
58	10	14	10	31.86
59	70		70	19.75
60	100	16	100	17.03
61	95	16	95	27.82
66	120		120	23
67	120	16	120	26.78
71		14		SECO
72	150	10	150	44.11
73	150		150	19.64
74				46.65
75	120		120	15.2
76	142	16	142	29.57
77	142	16	142	21.2
78		16		38.8
79		8		25.11
81				23.28
88		14	130	40.76
89	100			63.78
90				22
92				24
93				9.83
94				35.44
95				28.15
96				25.18
97				43.52
98				43.52

4.4. Piezometría.

Teniendo ubicados los pozos y las norias junto con los niveles estáticos en todo el valle, tomados de los censos de aprovechamiento, se genera una configuración de curvas de isopropundidad en el valle como se muestra en la **figura 4.3** previamente se hizo un levantamiento topográfico para tomar la referencia sobre el nivel del mar.

Las curvas de isopropundidad se hicieron de 10 en 10, hasta llegar a una profundidad de 50, comenzando en 20 m, que es el valor más cercano al nivel estático.

De acuerdo en los niveles estáticos tomados en el valle observando las curvas de isopropundidad de los niveles estáticos que se presentan en la **figura 4.4** se establece que las líneas del flujo que se tienen en el valle van dirección NE, de forma que se tiene una salida por medio del la Falla de San Marcos, en dirección al valle de Cuatro Ciénegas.

Se tienen dos sentidos en estas líneas, como se muestra en la **figura 4.4**, donde se ven las líneas de Flujo que marcan el sentido del mismo que corre hacia la falla de San Marcos.

La configuración que se tiene en estas curvas indica cómo es la estructura del acuífero y cómo se presentan las líneas de flujo que corren de SW-NE, denotando una vulnerabilidad en la parte central del valle debido a los estudios geofísicos que se realizaron en la zona, debida a que el tiempo de transición que se determino por medio de pruebas de bombeo se presenta en esta zona un tiempo de residencia alto.

El problema se agrava, dado que la explotación del acuífero se encuentra en esta parte.

Las agropecuarias y los mismos ejidos se encuentran situados en la parte central del valle **Figura 4.4**.

-

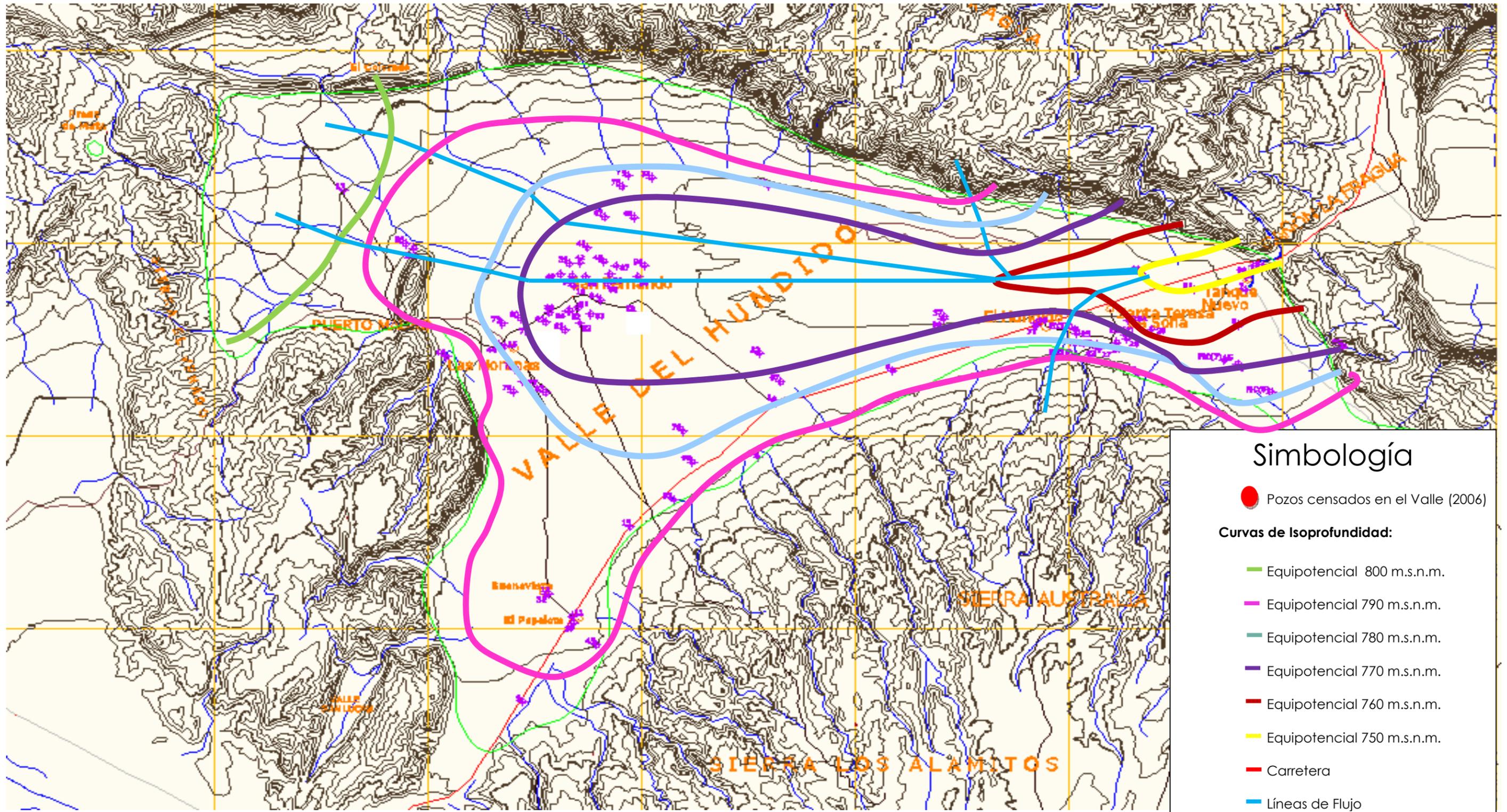


Figura 4.4 Curvas equipotenciales valle El Hundido.
Fuente: Modificado pero basado en datos de INEGI.

4.5. Geometría del acuífero.

La geometría que se tiene en el acuífero se muestra en la **figura 4.5**. El acuífero tiene un área de 8147 km² según los parámetros que maneja la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

Para hacer una mejor determinación de los parámetros del acuífero se realizaron pruebas de bombeo utilizando el método que a continuación se describe, de acuerdo con el modelo conceptual planteado y el comportamiento observado en las pruebas de bombeo que se realizaron.

Para una interpretación adecuada de las pruebas de bombeo se utilizó el método de Theis (1935), recuperación de Theis y Neuman (1975). (Custodio, 1986)

El método de Theis.

La ecuación diferencial parcial que describe el flujo radial saturado en dos dimensiones (horizontal) en un acuífero confinado en coordenadas radiales, es:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{\partial h}{r \partial r} = \frac{S \partial h}{T \partial t}$$

La condición inicial requerida para resolver la ecuación diferencial anterior es:

$$h(r, 0) = h_0 \text{ para todo } r$$

Donde h_0 es la carga hidráulica inicial (i.e la superficie piezométrica es inicialmente horizontal).

La condición de frontera supone que no ocurre abatimiento en una distancia radial infinita y que la tasa de bombeo es constante.

Theis(1935) desarrolló una solución analítica para la ecuación del flujo radial a un pozo de un acuífero confinado.

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u}; \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

La integral se conoce como la función del pozo, $W(u)$ y se puede representar con una serie de Taylor infinita

Donde:

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 * 2!} + \frac{u^3}{3 * 3!} - \frac{u^4}{4 * 4!} + \frac{u^5}{5 * 5!} - \dots$$

Usando esta función, la solución de Theis se transforma en:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Cuando se grafica en escala log-log, $W(u)$ en el eje Y y $1/u$ en el eje X, resulta lo que se conoce como la curva de Theis. Los datos de campo se grafican como t o t/r^2 en el eje X y el abatimiento (s) en el eje de Y.

El análisis de datos se hace ajustando la línea que resulta de graficar los datos, observados a la curva propuesta por Theis **figura 4.6**

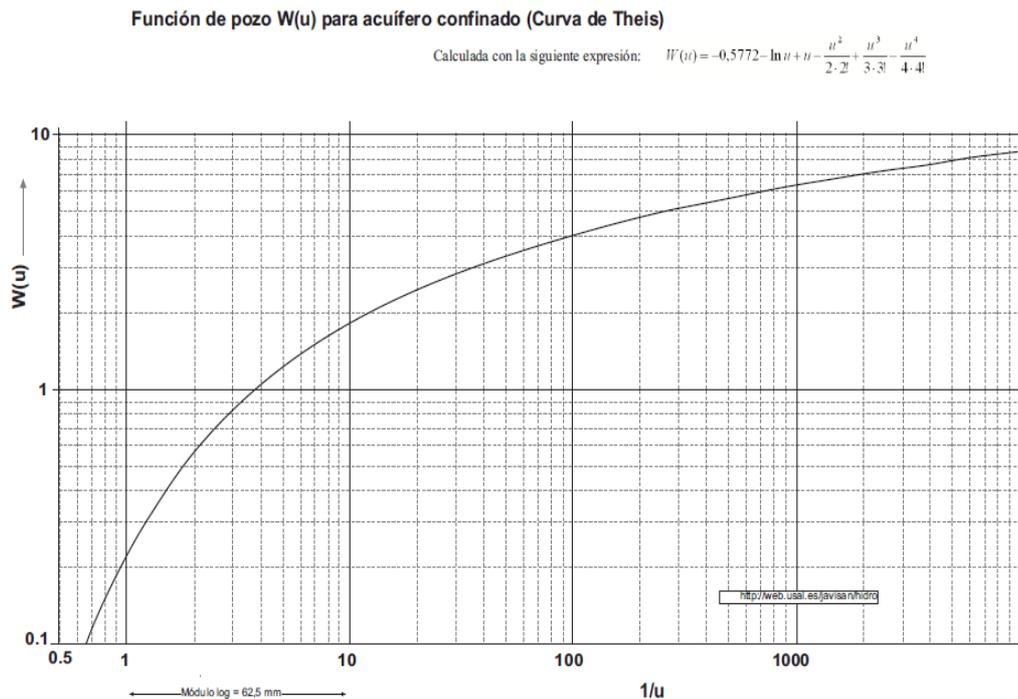


Figura 4.6 Curva de Theis
Fuente Custodio & Llamas(1989):

Un ejemplo de cómo es el comportamiento del acuífero se muestran en la **figura 4.7**

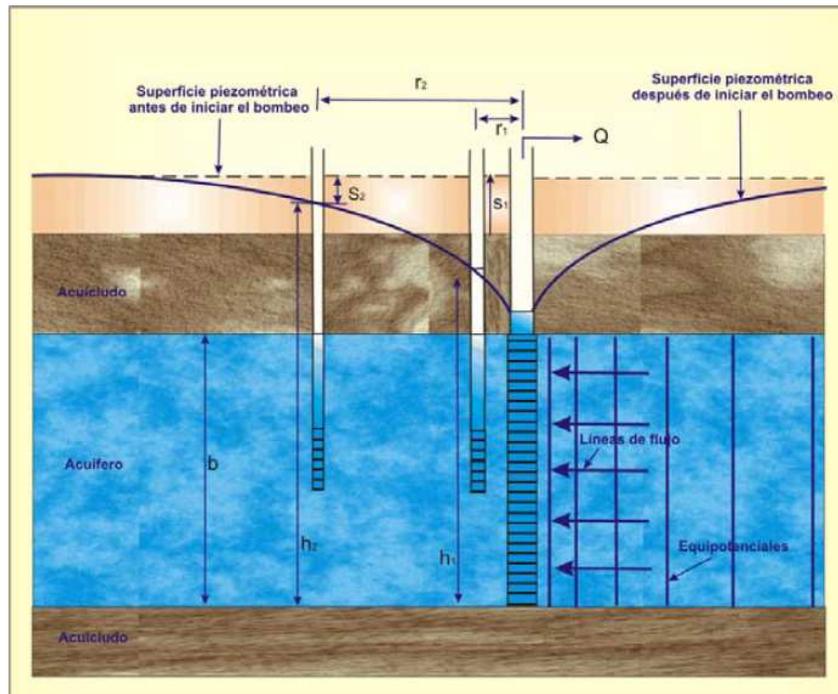


Figura 4.7 Esquema de flujo radial hacia un pozo, para el análisis de la solución de Theis.

Fuente Custodio & Llamas(1989):

La solución que Theis supone lo siguiente:

- El acuífero es confinado y tiene una extensión radial infinita.
- El acuífero es homogéneo, isotrópico y de un espesor uniforme en el área de bombeo.
- Antes del bombeo la superficie piezométrica es horizontal.
- El pozo penetra completamente y bombea a una tasa constante.
- El diámetro del pozo es pequeño, por lo que el almacenamiento del pozo es despreciable.

Los datos que se requieren son:

- El abatimiento contra el tiempo, en el pozo de observación.
- La distancia del pozo de bombeo, al pozo de observación.
- La tasa de bombeo (constante).

Método de recuperación de Theis.

Cuando el bombeo se suspende, el nivel de agua en los pozos de observación y de bombeo comienza a recuperarse. Esta recuperación en los niveles del agua se conoce como abatimiento residual(s') **figura 4.8**. Las mediciones del nivel dinámico en la etapa de recuperación permiten calcular la transmisividad del acuífero.

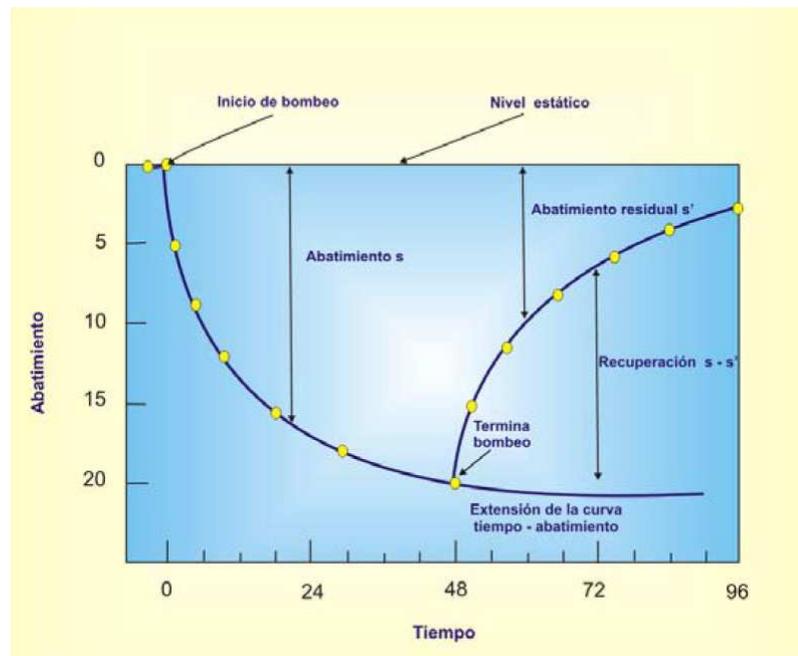


Figura 4.8 Esquema de abatimiento residual.

Fuente Custodio & Llamas(1989):

Los datos de la etapa de recuperación pueden ser más confiables que los de la etapa de bombeo porque la recuperación ocurre a una tasa constante. Los datos de la etapa de recuperación se pueden recolectar tanto en el pozo de bombeo como en los de observación.

Esta solución es apropiada para las condiciones que se muestran en la **figura 4.9**. Sin embargo, este método también se puede usar para acuíferos no confinados (Kruseman y de Ridder,1990) utilizando solamente los datos de recuperación final.

En los tiempo finales, el efecto del almacenamiento elástico ya ha desaparecido, por lo que, los datos de la recuperación se ajustan a una línea recta, en una gráfica semi-log de s' contra t/t' **figura 4.9**.

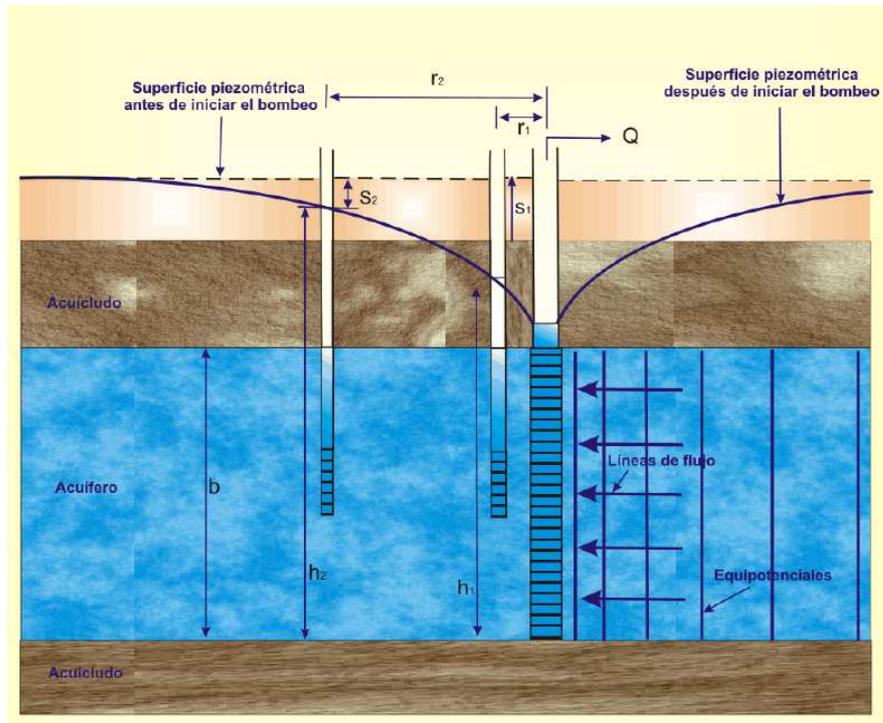


Figura 4.9 Esquema de flujo radial hacia un pozo, para el análisis del método de recuperación de Theis.

Fuente Custodio & Llamas(1989).

De acuerdo con Theis (1935) el abatimiento residual es igual a:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} W(u) - W(u')$$

Donde

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad u' = \frac{r^2 S'}{4Tt'} \quad \text{Donde:}$$

s' = abatimiento residual

r = distancia del pozo al piezómetro.

T = Transmisividad del acuífero.

S y S' son valores del almacenamiento durante el bombeo y la recuperación.

t y t' son tiempo de inicio y de cesó de bombeo, respectivamente.

Usando la aproximación de la función de, $W(u)$ del método de Cooper-Jacob, la ecuación del abatimiento residual se puede expresar como;

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4Tt}{r^2 S} - \ln \frac{4Tt'}{r^2 S'} \right)$$

Cuando S y S' son constantes e iguales y T es constante, la ecuación anterior se reduce a:

$$s' = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

Para analizar los datos, s' se grafica en el eje Y logarítmico y el tiempo en el eje de X lineal **figura 4.11**, como la relación de t / t' (tiempo total desde el comienzo del bombeo dividido entre el tiempo desde que cesó el bombeo).

Este método supone la misma teoría que en la prueba.

4.6. Características de recarga.

Para la definición de los parámetros que conllevan para la recarga del acuífero, se realizaron pruebas de bombeo de 72 hrs, en dos distintas comunidades del valle.

Una de las pruebas de bombeo se realizó en la comunidad de Santa Teresa de Sofía y la otra se realizó en el ejido de San Fernando.

Estas pruebas mostraron los siguientes parámetros, en cada uno de los pozos, teniendo tres pozos de observación, para poder definir el comportamiento que se observó en los mismos.

Obteniendo las gráficas del tiempo de abatimiento, según los cálculos de Cooper y Jacob, se obtienen los parámetros.

Ubicación	Coordenadas			Nivel Estático m	Nivel dinámico m	Parámetros hidráulicos					
	X	Y	Z			Gasto (l/s)	T (m2/día)	S			
Ejido Santa Teresa de Sofía											
1	Pozo 1	CNA	24	778603	2945313	804	29.	29.12	90	20592.3	5.03E-01
2	Pozo 2	CNA	25	772111	2945102	798	30.7	32.5	101	6821.7	3.02E-02
3	Pozo 3	CNA	27	771350	2944797	806	33.7	37.7	80.9	8877.13	2.19E-01
4	Pozo 4	CNA	63	771247	2944798	801	31.62	40	64.17	895.95	7.63E-03
San Fernando											
5	Pozo	CNA	54	748411	2948697	819	36.5	65.6	105.29	571.8	8.74E-03
6	Pozo	CNA	49	746076	2948650	827	25.15	43.52	95	571.8	1.00E-02
7	Pozo	CNA	51	746914	2946921	822	36.5	64.36	103.04	571.8	7.07E-03
8	Pozo	CNA	21	746648	2948553	826	25.72	65.8	95	262.09	5.63E-03

4.6.1. Balance del agua subterránea.

Para la obtención de la cantidad de agua que se tiene en el valle, se realizará el balance de agua subterránea, la que tiene una precisión de primera aproximación, ya que se trabajara en un balance en medios porosos, teniendo en cuenta que en el valle existen regiones con medios cársticos.

Se debe tomar en cuenta que gran cantidad del terreno a estudiar corresponde a medios granulares, como se ha manejado en esta unidad, considerando así dos unidades.

Lo primero que se hace es un trazo con los niveles estáticos lo cual permite hacer una simulación donde solo se cuenta con una unidad, que en su mayoría es del medio granular y que recibe el aporte de la unidad de calizas.

La ecuación de balance para hacer una cuantificación del agua es el principio básico

Entradas= salidas + cambio de almacenamiento (1)

Donde las entradas equivalen a:

Entradas por flujo subterráneo. (**Es**)

Infiltración vertical. (**Inf**)

Las salidas equivalen a:

Extracciones por bombeo. (**Ext**)

El cambio de almacenamiento a:

Abatimiento del nivel estático (**As**)

Se genera la ecuación:

Es+ Inf = Ext +As (2)

Las entradas de flujo en el sistema corresponden al aporte de agua subterránea (**Es**) correspondiente a la infiltración que se tiene de la sierra, contando también con la aportación por lluvia, que es muy poca debido al alto grado de evapotranspiración que se da en la zona.

Luego se obtiene el gasto, según Darcy, para hacer un corte transversal y obtener así la transmisibilidad del material, que se pasará por una longitud que dará el gradiente hidráulico

Las pruebas de bombeo realizadas en la zona de estudio; se determina con un trazo unidimensional, el conductividad hidráulica o permeabilidad de 0.001 a .0001 m/s

Haciendo una referencia de la longitud y el área que se tiene en el valle basados en la estructura geológica del sitio que se tiene de recarga en el valle, es de 17.28 Mm³ / año.

Las salidas, estimadas por la extracción que se tiene en el lugar, son de 21.6 Mm³/año (CONAGUA 2010)

El cambio de almacenamiento se obtiene al multiplicar el coeficiente de almacenamiento por el caudal. El coeficiente de almacenamiento, como este planteamiento es de primer grado, y se marco que se estaba en medios granulares, el coeficiente de almacenamiento es de 0.03, multiplicado por el caudal, lo cual reporta un déficit de 1.87 Mm³/año.

Donde para calcular la infiltración, se despeja de la ecuación (2). La infiltración que se tiene en el acuífero, dado un caso muy idealizado, es de 2.45 Mm³ /año.

4.7. Conclusiones

Para concluir este capítulo, se tomaran en cuenta dos unidades geohidrológicas:

- Una unidad de reciente edad, hecha en medios granulares, que constituye la formación de un acuífero somero.
- Una segunda unidad, de roca consolidada (caliza), que se encuentra ubicada en las formaciones Cupido y la formación Aurora, que recorre todo el valle. Estas dos formaciones indican la presencia de un acuífero profundo.
- Se encontró que la primera unidad cubre gran parte del valle El Hundido.
- Los parámetros hidráulicos que se obtuvieron en esta investigación mostraron que el tiempo de residencia, en promedio, en una primera aproximación en la parte central del valle, es de 3 días promedio, contando con un coeficiente de almacenamiento de 0.509 y con una transmisividad de $20,574.32 \text{ m}^2/\text{día}$.
- A partir de la información en el balance del agua subterránea en el valle El Hundido, se tiene una sobreexplotación, debida al cambio de almacenamiento., Este se encuentra en números negativos, indicando que no se le está dando al acuífero tiempo para su recuperación oportuna, lo cual podría causar estragos irremediables en el mismo, un claro ejemplo son los decensos de los niveles del agua tanto en El Hundido como en Cuatro Ciénegas haciendo que el daño en las pozas de la reserva sea visible.

Capítulo 5. Hidrogeoquímica.

5.1. Introducción.

El agua es un buen solvente, razón por la cual es capaz de infiltrarse en el terreno para luego surgir en otro sitio.

La detección e interpretación de tales halos de dispersión forma las bases para conocer la prospección hidrogeoquímica.

La hidrogeoquímica ha encontrado una aplicación mundial, como una poderosa herramienta en la exploración de acuíferos y también en el uso de los mismos.

En este capítulo se presentan las características hidrogeoquímicas de 20 muestras de agua cruda, en igual número de aprovechamientos hidráulicos, en el Valle El Hundido.

Investigando las distintas variables hidrogeoquímicas, su distribución espacial y la evolución hidrogeoquímica temporal, mediante diagramas triangulares de Piper, Shoeller-berkalov y Wilcox, se puede hacer una adecuada definición de las características del agua.

5.2. Métodos.

Para la toma de muestras de agua de los pozos seleccionados en forma estratégica en el valle El Hundido, se utilizaron depósitos de doble tapón, de un litro de capacidad.

Estas muestras se conservaron en una hielera, a fin de preservar características parámetros, como el pH, la temperatura y la salinidad.

El estudio hidrogeoquímico del agua subterránea se definió mediante una red de muestreo en los puntos donde se consigue agua.

Se tomaron muestras en 20 pozos, seleccionados en forma aleatoria, que se distribuyeron de forma homogénea en toda la zona de estudio **Figura 5.1**.

5.2.1. Sistemas de muestreo.

Esta selección se apoyó en el censo de aprovechamientos que se realizó previamente, con el fin de facilitar la toma de las muestras, de acuerdo con las normas que se tienen para muestreo (**NOM-014-SSA1-1993**).

5.2.2. Determinación de los parámetros en el campo.

En los sondeos del área que no está siendo explotada se realizaron registros en "in situ", con el apoyo del equipo Hydrolab Sound 4^a y 4b. Así se reconocieron los parámetros: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, salinidad y la profundidad a la que fue tomada la muestra.

Las muestras obtenidas se almacenaron en botellas de polímero de doble tapón, con una capacidad de 1000 ml, sin burbujas de aire y resguardadas de la luz. Se determinaron los parámetros en el campo, dado que estas pueden cambiar con facilidad en cuestión de horas (**NOM-014-SSA1-1993**).

5.2.3. Determinación de los parámetros en el laboratorio.

Los análisis químicos en el laboratorio incluyen los de iones mayoritarios. La totalidad de estas determinaciones se realizaron en el laboratorio de geoquímica de agua, de la Comisión Federal de Electricidad, con sede en la ciudad de Piedras Negras, Coahuila.

Metodología

Las técnicas analíticas utilizadas fueron:

- Para la determinación de iones mayoritarios (Na, K, Mg, Cl, SO₃, NO₃, NO₂, CO₃, HCO₃), se utilizó la técnica de espectrografía de absorción, con un autoanalizador de flujo continuo (EPA-300.0-1993, EPA-200.7-1994, NMX-AA-077-SCFL-2001, SM 2340B-2005).

La descripción de este método de espectrografía conocido como (AA), es la siguiente:

Se trata de un método instrumental, basado en la atomización del analito en una matriz líquida y que utiliza comúnmente un nebulizador pre-quemador (o cámara de nebulización), para crear una niebla de la muestra y un quemador con forma de ranura que da una llama con una longitud de trayecto más larga.

La niebla atómica es desolvatada y expuesta a una energía a una determinada longitud de onda, emitida ya sea por una Lámpara de Cátodo hueco, construida con el mismo analito a determinar o una Lámpara de Descarga de Electrones (EDL).

Normalmente las curvas de calibración no cumplen la Ley de Beer-Lambert en su estricto rigor.

La temperatura de la llama es lo bastante baja para que la llama de por sí no excite los átomos de la muestra de su estado fundamental.

El nebulizador y la llama se usan para desolvatar y atomizar la muestra, pero la excitación de los átomos hace por el uso de lámparas que brillan a través de la llama, a diversas longitudes de onda, para cada tipo de *analito*.

En el AA, la cantidad de luz absorbida después de pasar a través de la llama determina la cantidad existente en la muestra.

Hoy día se utiliza frecuentemente una mufla de grafito (u horno de grafito), para calentar la muestra, a fin de desolvatarla y atomizarla, aumentando la sensibilidad.

Mediante el método del horno de grafito se pueden también analizar algunas muestras sólidas o semisólidas.

Debido a su buena sensibilidad y selectividad, este sigue siendo un método de análisis comúnmente usado para ciertos elementos traza en muestras acuosas y otros líquidos.

5.3. Características del agua subterránea.

Para tener una adecuada modelación se deben tener como prioridad los parámetros hidráulicos y contar con los datos de laboratorio.

5.3.1. Datos disponibles.

Los datos obtenidos en el laboratorio son los que se muestran en la **tabla 5.1** y la **tabla 5.2** donde se tiene un reporte de los parámetros para hacer una adecuada caracterización del agua que se analiza.

Tabla 5.1 Características físico-químicas de pozos muestreados con un despliegue de los iones mayores en cationes.

Pozo	Conductividad m mhos/cm	pH	Cationes			
			Ca ⁽⁺²⁾	Mg ⁽⁺²⁾	Na ⁽⁺¹⁾	K ⁽⁺¹⁾
1 IMTA 12	5772.00	7.31	583.20	264.48	446.20	16.38
2 IMTA 17	2394.00	7.91	82.40	42.00	331.20	8.58
3 IMTA 81	4210.00	7.65	562.80	173.28	366.16	11.70
4 IMTA 82	4922.00	7.49	542.40	202.80	461.38	14.04
5 IMTA 83	4782.00	7.44	554.00	200.16	446.20	16.38
6 IMTA 84	4733.00	7.36	552.00	190.32	433.78	11.70
7 IMTA 85	4858.00	7.50	579.20	202.80	458.62	12.48
8 IMTA 86	4800.00	7.57	585.20	197.76	393.76	11.70
9 IMTA 87	4919.00	7.42	562.00	192.72	453.56	12.78
10 CNA 4	4364.00	7.35	388.00	170.40	270.94	10.14
11 CNA 6	2558.00	8.71	117.60	66.72	373.52	9.36
12 CNA 7	5394.00	7.11	535.20	150.72	553.84	7.80
13 CNA 9	1671.00	7.11	235.20	69.12	90.16	3.90
14 CNA 23	2595.00	7.40	342.00	116.40	190.90	5.46
15 CNA 25	3100.00	7.84	332.00	121.44	248.40	6.24
16 CNA 44	4557.00	7.33	520.00	175.44	388.70	12.48
17 CNA 138	97520.00	7.43	3330.00	1208.88	19080.34	168.48
18 CNA 139	68040.00	7.60	2250.00	1045.68	11406.62	171.60
19 CNA 140	26560.00	7.20	2250.00	346.08	3208.96	90.48
20 CNA 146	1710.00	6.91	190.00	71.75	55.20	8.58

Tabla 5.2 Características físico-químicas de pozos muestreados con un despliegue de los iones mayores en aniones.

Pozo			Aniones				
			HCO ₃ ⁽⁻¹⁾	CO ₃ ⁽⁻²⁾	SO ₄ ⁽⁻²⁾	Cl ⁽⁻¹⁾	NO ₃ ⁽⁻¹⁾
1	IMTA	12	102.48	0.00	2701.44	445.17	0.00
2	IMTA	17	622.20	9.60	129.60	300.33	2.48
3	IMTA	81	97.60	0.00	2415.36	198.09	27.28
4	IMTA	82	112.24	0.00	2614.01	265.54	48.36
5	IMTA	83	102.48	0.00	2701.44	445.17	0.00
6	IMTA	84	102.48	0.00	2647.68	220.10	40.92
7	IMTA	85	97.60	0.00	2688.00	230.04	68.20
8	IMTA	86	87.84	0.00	2493.12	239.98	73.16
9	IMTA	87	97.60	0.00	2563.20	255.60	71.92
10	CNA	4	146.40	0.00	1614.72	295.36	14.88
11	CNA	6	58.56	0.00	860.16	290.39	0.00
12	CNA	7	200.08	0.00	2259.84	465.76	16.12
13	CNA	9	234.24	0.00	771.84	771.84	2.48
14	CNA	23	175.68	0.00	1250.88	164.01	74.40
15	CNA	25	170.80	0.00	1366.08	195.96	0.00
16	CNA	44	107.36	0.00	248.00	195.25	22.32
17	CNA	138	585.60	0.00	32349.12	15316.83	9.92
18	CNA	139	434.32	0.00	21903.36	8509.35	7.32
19	CNA	140	297.68	0.00	7643.52	4204.62	7.44
20	CNA	146	48.80	0.00	777.60	53.96	2.48

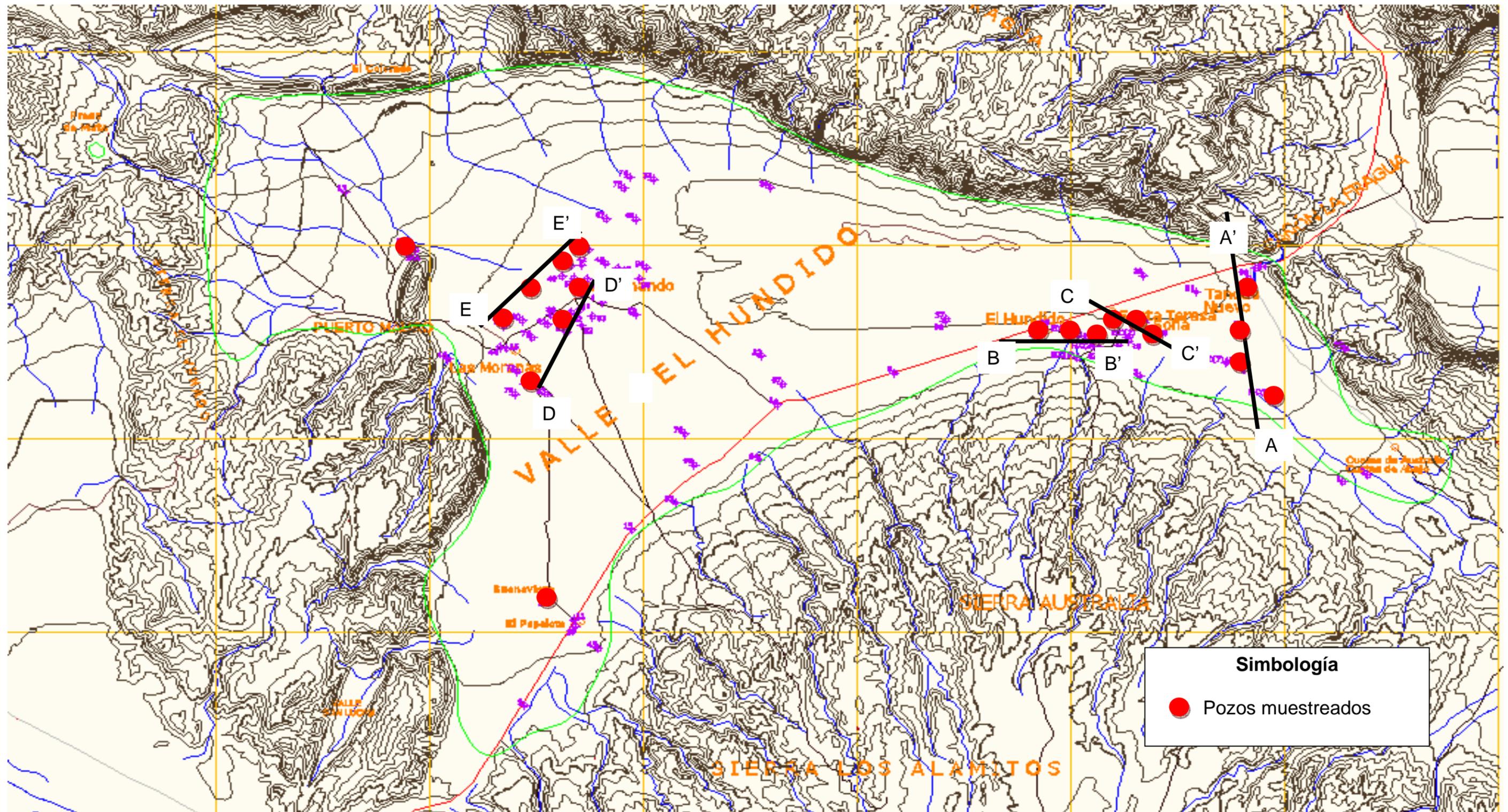


Figura 5.1 Localización de pozos muestreados.
 Fuente: Modificado pero basado en datos de INEGI.

5.3.2. Determinación de las características hidrogeoquímicas de las formaciones.

Los parámetros hidráulicos que definen el comportamiento del acuífero son determinados por el modelo conceptual hidrogeológico, a partir del estudio geológico estructural,

5.3.2.1 Formación Aurora

Los depósitos de carbonatos de plataforma y la cuenca profunda por parte del ambiente marítimo, hacen que el agua con alto contenido en cloruros esté almacenando aguas de formaciones connatas, la cuales quedaron atrapadas en la diagénesis.

Debido a que en estos, periodos, en la zona de estudio es patente la presencia de calizas, siendo estas el elemento mayoritario el carbonato de calcio (CaCO_3), otros elementos que se encuentran en este tipo de roca son:

- Magnesio.
- Manganeso.
- Hierro.
- Zinc.
- Estroncio.
- Plomo en mezcla isomorfa.
- Impurezas de limonita
- Hematitas.
- Carbón.

Las rocas calcáreas a menudo son ricas en fósiles de gasterópodos de agua dulce o caracoles.

5.3.2.2 Formación La Peña

Este tipo de formaciones tiene poco espacio para almacenamiento, pero cuenta con un alto grado de conductividad vertical, debido a los tipos de estructuras con que cuenta.

La interacción y el cambio de fase que se presenta en este tipo de estructura denotan una alta presencia de potasio (K) que es lo que hace que exista un cambio de fase en los perfiles verticales que se obtuvieron hidrogeoquímicamente.

5.3.2.3 Formación Cupido

Los periodos de glaciación que se presentaron en esta época hacen que en la zona del valle El Hundido se formara un sistema de lagunas, haciendo que

varios de estos sistemas tuvieran comunicación entre ellos debido a la formación de carbonatos de calcio (CaCO_3) que se tuvieron en esta época, creándose carsticidad en este tipo de formaciones, vinculada está a procesos de disolución de los carbonatos por la acción del agua, así como de los ácidos húmicos y la acción bacteriana.

5.3.2.4 Aluvión

En este tipo de formación de reciente creación, el material que se acentúa en este lugar induce a encontrar acuíferos potenciales, pero en medios granulares. En este tipo de formaciones hay con presencia de NaCl.

5.3.3. Registros de conductividad eléctrica, temperatura y profundidad de tres pozos clave.

En 3 diferentes pozos se hizo un muestreo en “in situ”, para ver el comportamiento vertical de estos parámetros.

La profundidad se determinó desde el nivel estático hacia abajo.

Los datos que se compilaron en estos pozos se muestran en la **tabla 5.3** que a continuación se menciona.

Dichos parámetros muestran una conductividad alta, en estos pozos que se encuentran en el centro del valle. Lo cual indica que el flujo subterráneo pasa por un abanico de yesos y anhidritas que incrementan la salinidad del agua (Adams 1930).

Las gráficas del pozo lmta 129 se muestran en la **figura 5.2**. En las gráficas de las figuras **5.3, 5.4** se demuestra el cambio de fases de una unidad a otra, marcando una interdigitación de diferentes elementos en el subsuelo, que afectan la calidad del agua.

Las gráficas del pozo lmta 130 se muestran en la **figura 5.5**. En las gráficas de las figuras **5.6, 5.7** se demuestra el cambio de fases de una unidad a otra.

Las gráficas del pozo lmta 148 se muestran en la **figura 5.8**. En las gráficas de las figuras **5.9, 5.10** se demuestra el cambio de fases de una unidad a otra. En estas gráficas se denota más esta interdigitación en el medio (Ohmoto 1979).

Tabla 5.3 Datos obtenidos a distintas profundidades de tres pozos. Estas muestras indican como es el cambio de fases entre un acuífero y otro.

Pozo IMTA 129	Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{mohs/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
	0.56	45558	24.19
	2.31	46007	24.23
	4.9	46460	24.27
	7.23	46574	24.28
	9.87	47129	24.29
	11.94	47764	24.31
	14.49	47914	24.34
	16.3	47923	24.34
	18.79	47932	24.35
	21.62	48194	24.31

Pozo IMTA 130	Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{mohs/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
	0.54	29934	24.39
	2.54	29943	24.39
	4.45	29946	24.4
	6.3	29947	24.41
	9	29949	24.42
	11.3	29958	24.42
	13.29	30156	24.43
	15.9	33315	24.5
	18.58	33320	24.51
	20.71	33343	24.5

Pozo IMTA 148	Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{mohs/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
	0.25	34379	23.81
	1.45	32649	23.82
	3.29	32658	23.82
	4.96	32668	23.82
	6.59	32695	23.82
	7.95	32695	23.82
	9.61	32704	23.82
	11.12	33149	23.82
	14.13	34139	23.82
	16.06	34379	23.81
	17.84	34397	23.82

21.05	34478	23.81
-------	-------	-------

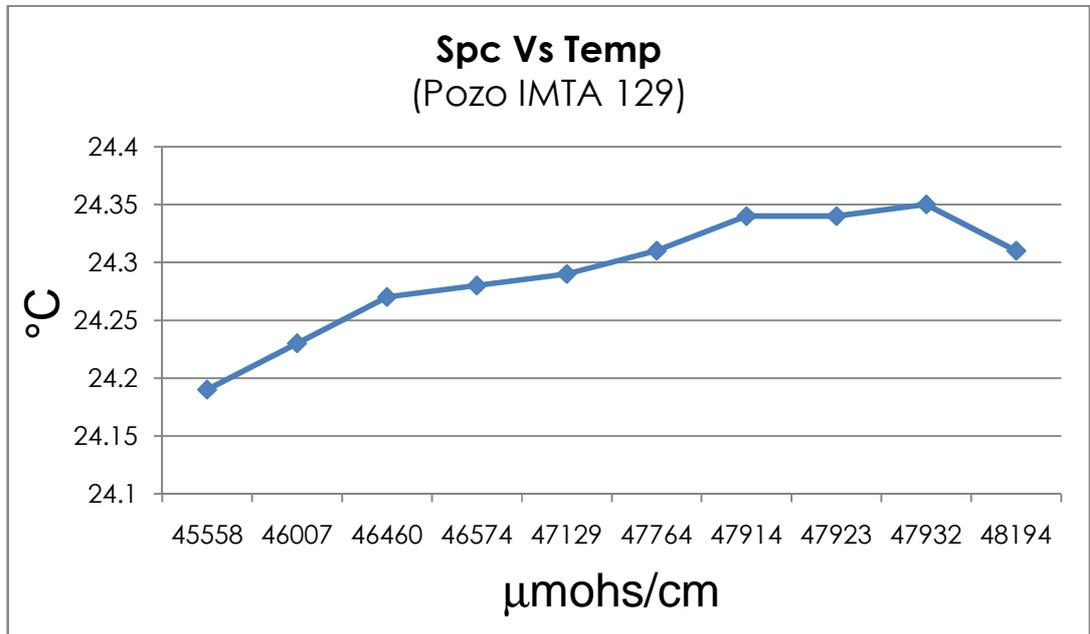


Figura 5.2 Gráfico de temperatura contra la conductividad.

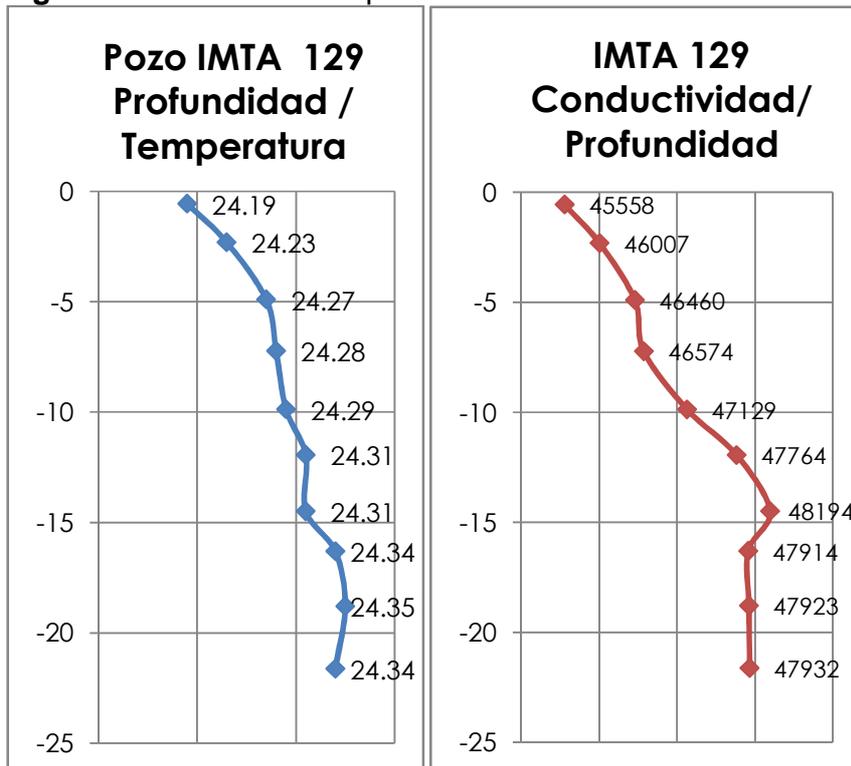


Figura 5.3 y 5.4 Gráficas donde se muestra la relacion que existe entre los cambios de fase.

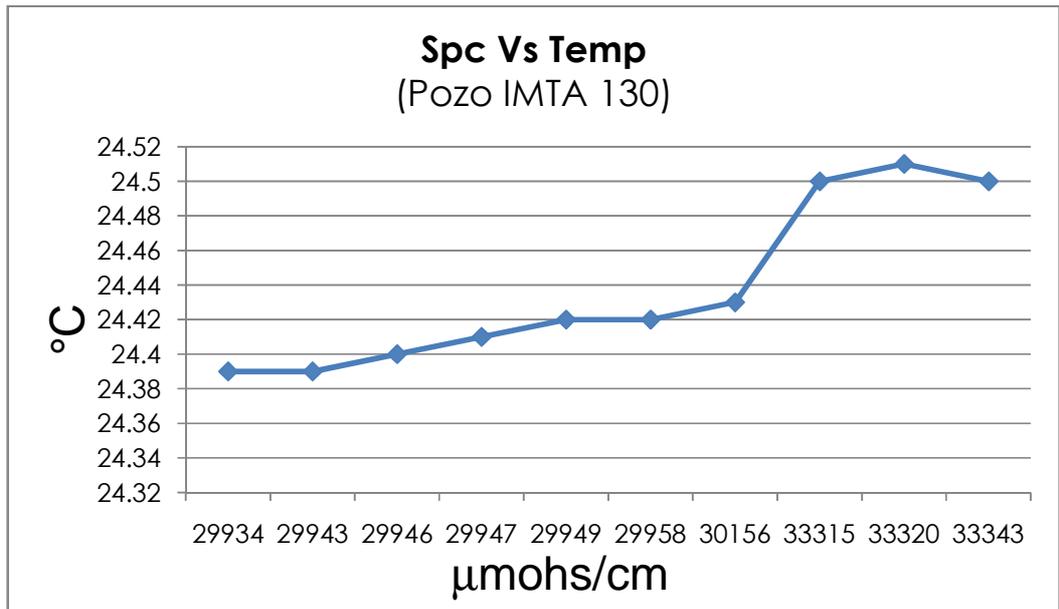


Figura 5.5 Gráfico de temperatura contra la conductividad.

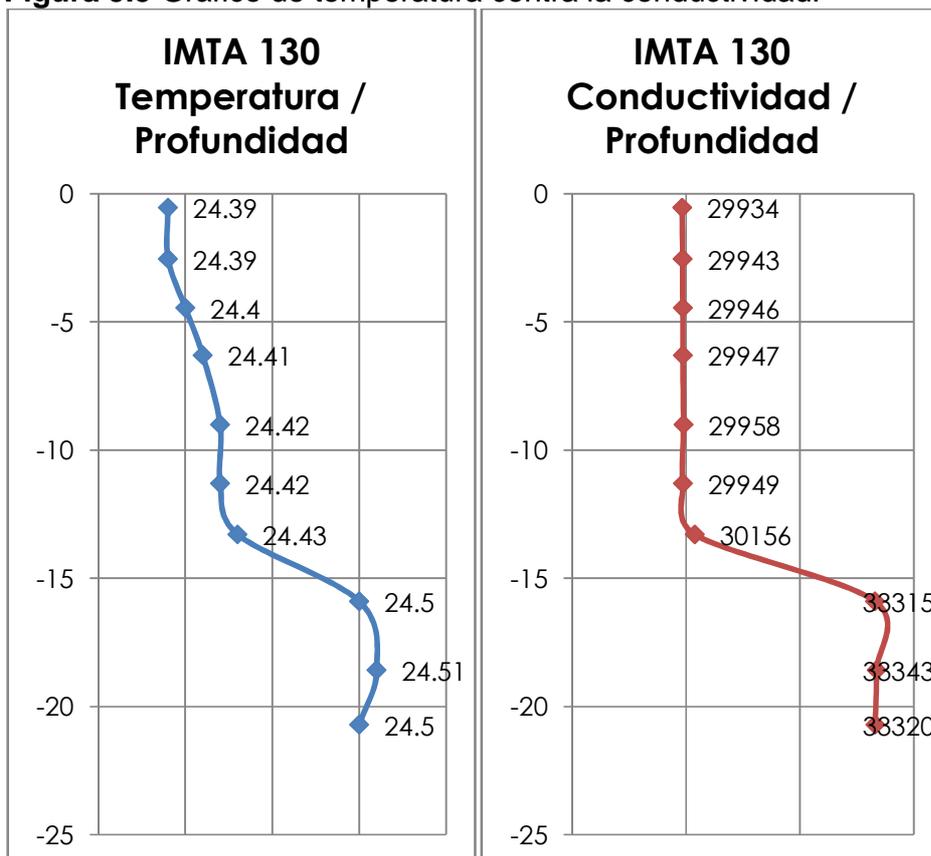


Figura 5.6 y 5.7 Gráficas donde se muestra la relación que existe entre los cambios de fase.

5.3.4. Características de la composición Ion Cl en el medio.

Las concentraciones (mg/l) de los cationes Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y de los aniones HCO_3^- y SO_4^{2-} se graficaron de acuerdo con las concentraciones ascendentes del ion Cl^- para examinar la relación que existe entre estos iones. (Prieto 1997)

Las gráficas ilustran que las concentraciones de los cationes y aniones estudiados presentan una relación directa con las concentraciones del ion Cl^- . (Harvie 1982).

Relaciones ion Cl^- con cationes

En la gráfica que muestra las relaciones entre Cl^- y Na^+ **Figura 5.11**, se puede observar que la concentración de Na^+ se eleva desde 100 hasta 1000 mg/l, de acuerdo como la concentración de Cl^- muestra un incremento de 50 a 500 mg/l.

Cuando la concentración del ion Cl^- se disparó de 500 a 15300 mg/l, se observó también un incremento en la concentración de Na^+ (ej. 1000-10000 mg/l).

A pesar de que la relación entre ambas concentraciones es una relación directa, esta relación no es de tipo lineal.

Los valores obtenidos de la relación de las concentraciones Na/Cl , en las veinte muestras, nueve de ellas presentaron un valor entre 1.5 y 2.0.

Este incremento de cloro y sodio que se presenta en la zona de estudio se debe a la recarga del acuífero, después de tener su tiempo de residencia en las formaciones Aurora y Cupido; pasa por un paquete de la formación La Peña, que contiene gran cantidad del elemento $NaCl$.

Para el caso de la relación entre las concentraciones de los iones Cl^- y Mg^{2+} , **figura 5.12** se observa también un incremento en la concentración del Mg^{2+} conforme la concentración del Cl^- va en aumento.

La relación Mg/Cl indica que once valores caen dentro del nivel 0.75-1.33, mientras que nueve valores cayeron en el intervalo de relación 0.08-0.62.

Igual que en la relación entre los iones Cl^- y Na^+ , las concentraciones de Cl^- y Mg^{2+} presentan una relación directa pero no lineal.

Los valores obtenidos en los pozos CNA 6 y IMTA17 muestran un decremento en la concentración de Mg^{2+} , con respecto a los demás valores; sin embargo, dicha disminución no se considera significativa.

En las gráficas siguientes ($Cl-K$, $Cl-Ca$, $Cl-HCO_3$ y $Cl-SO_4$) muestran también una desviación estándar que está fuera de la tendencia general de los

elementos; sin embargo, esto no altera las relaciones que se tienen entre cada uno de los iones con el cloro.

La gráfica **figura 5.13** que muestra las concentraciones de los iones de Cl^- y K^+ muestra que la concentración de K^+ se mantuvo alrededor de los 10 mg/l, cuando la concentración del ión Cl^- estaba en el nivel 50-500 mg/l.

La concentración de K^+ aumenta hasta alrededor de 100 mg/l, cuando el ión Cl^- está en el intervalo de 4000-15000 mg/l.

Las concentraciones de Ca^{2+} que se muestran en la figura 5.13 se mantuvieron entre 100 y 1000 mg/l, cuando el ion Cl^- estaba en el nivel de 50-500 mg/l; a pesar de que los puntos tomados de los pozos CNA6 y IMTA17 muestran concentraciones más bajas que la tendencia general.

Cuando la concentración de Cl^- subió de 4000 mg/l a 15000 mg/l, la concentración de Ca^{2+} subió hasta el nivel 2000-3000 mg/l.

Todo este comportamiento de los elementos en la muestras, es debido a el tiempo de residencia en el acuífero confinado, esto determinado por el modelo estructural geológico generando una combinación química de los elementos que componen a la rocas calizas haciendo que el agua tenga grandes cantidades de sales y haciéndola más pesada para el consumo humano.

Pero siendo precursora para la formación o sustento de otros ecosistemas más primitivos, como son los que se presentan en el Valle de Cuatro Ciéngas, como es el caso de los estromatolitos que requieran cantidades determinadas de Na, Cl, Mg y K para poder comenzar su producción de oxígeno.

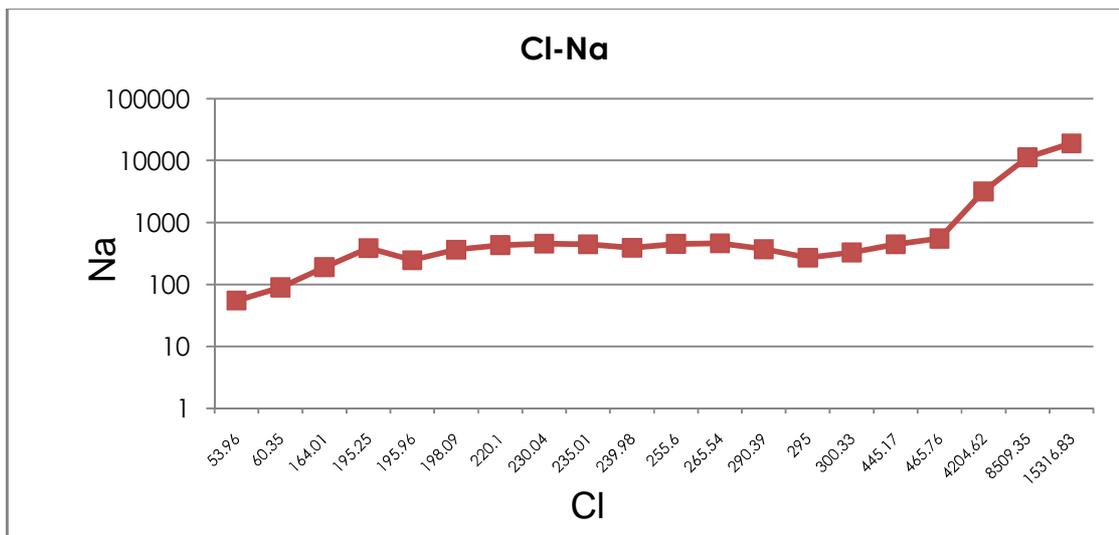


Figura 5.11 Gráfica Cl - Na

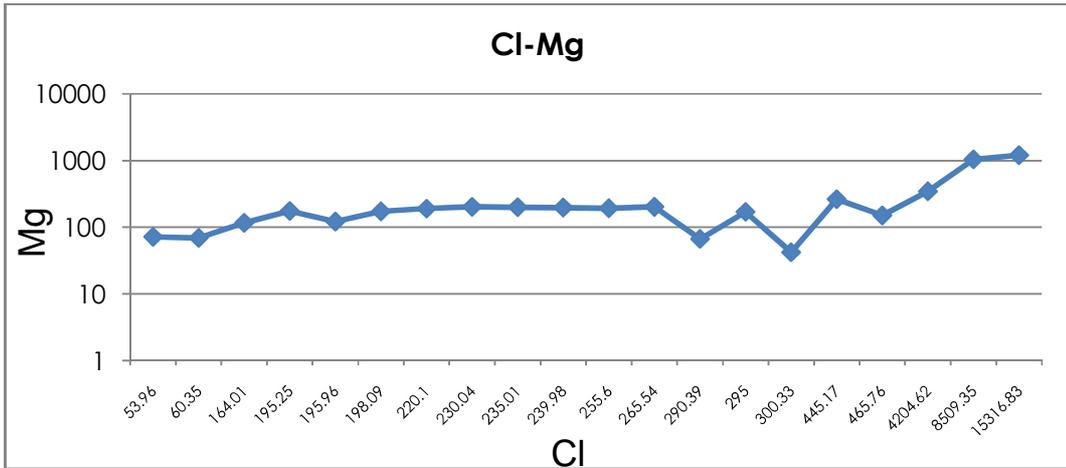


Figura 5.12 Gráfica Cl - Mg

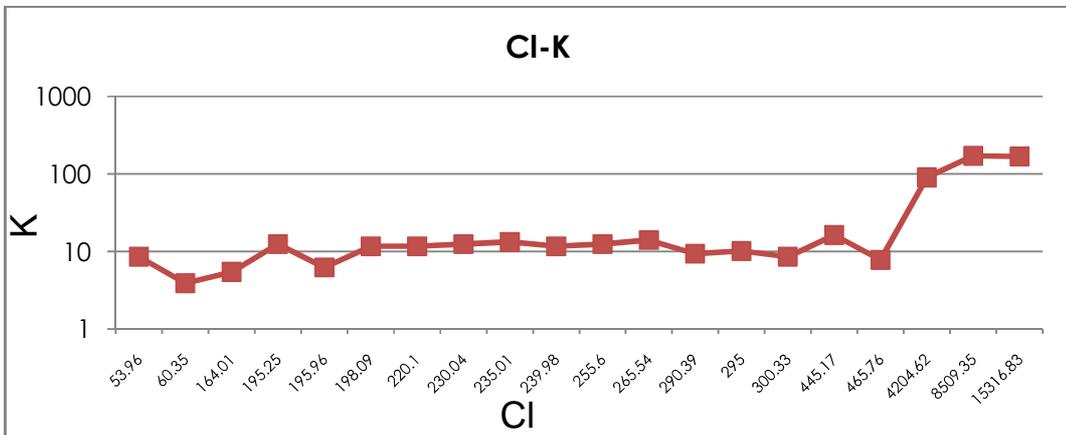


Figura 5.13 Gráfica Cl - K

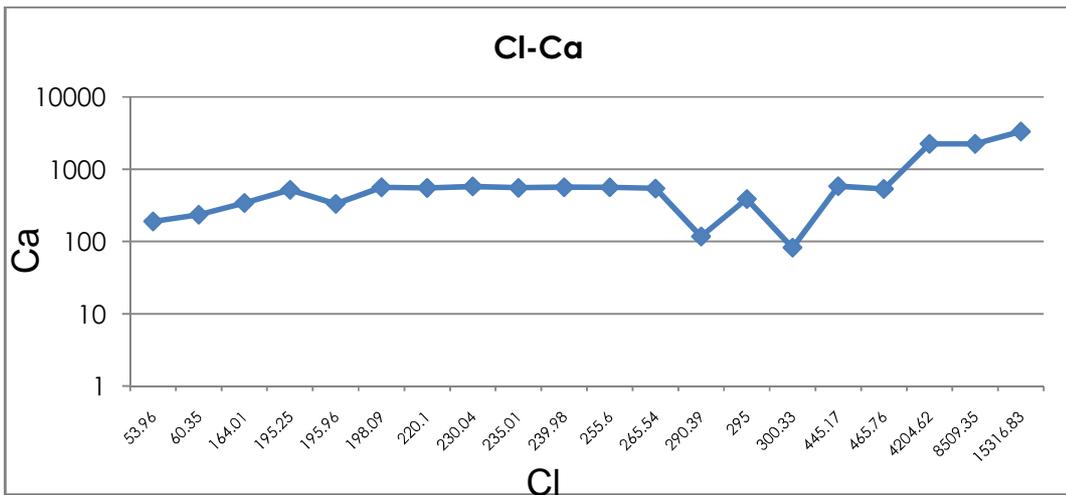


Figura 5.14 Gráfica Cl - Ca

Relaciones ion Cl⁻ con aniones

Las últimas dos gráficas (**Figura 5.15 y 5.16**), muestran las relaciones entre las concentraciones del ión Cl⁻ y los aniones HCO₃⁻ y SO₄²⁻.

Para el caso del HCO₃⁻, la concentración de este anión se mantuvo alrededor de los 100 mg/l cuando el Cl⁻ estaba entre 50 y 500 mg/l; salvo en el caso del pozo IMTA17, cuyo valor está arriba de los 600 mg/l.

Una vez más, una tendencia de incrementar la concentración del ion en estudio se observa cuando la concentración del ion Cl⁻ aumenta de 4000 a 15000 mg/l.

Esta misma tendencia se puede observar en el caso del anión SO₄²⁻, en donde la concentración del sulfato se dispara en el nivel 4000-15000 mg/l del ion Cl⁻.

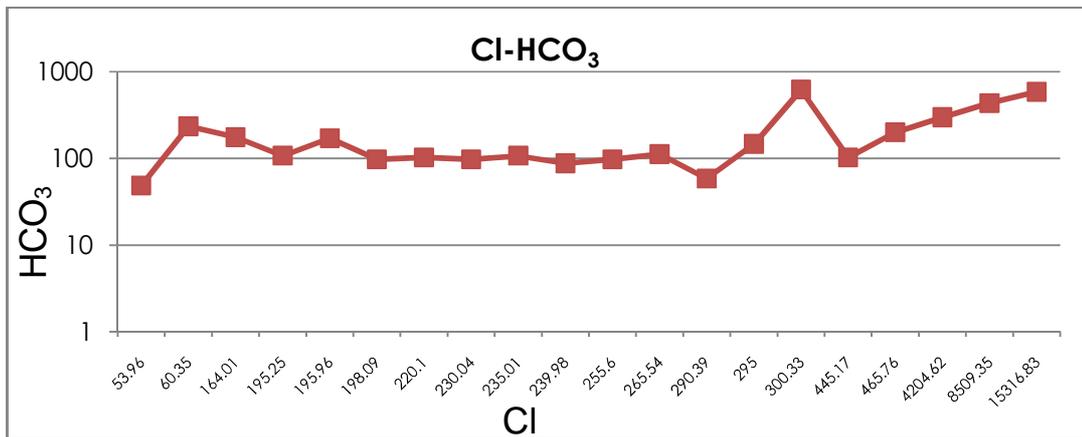


Figura 5.15 Grafica CI-HCO₃

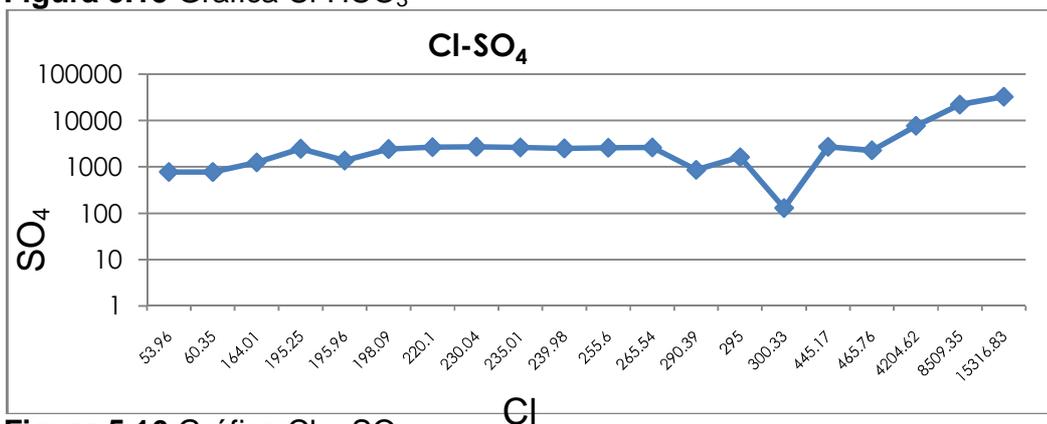


Figura 5.16 Gráfica Cl – SO₄

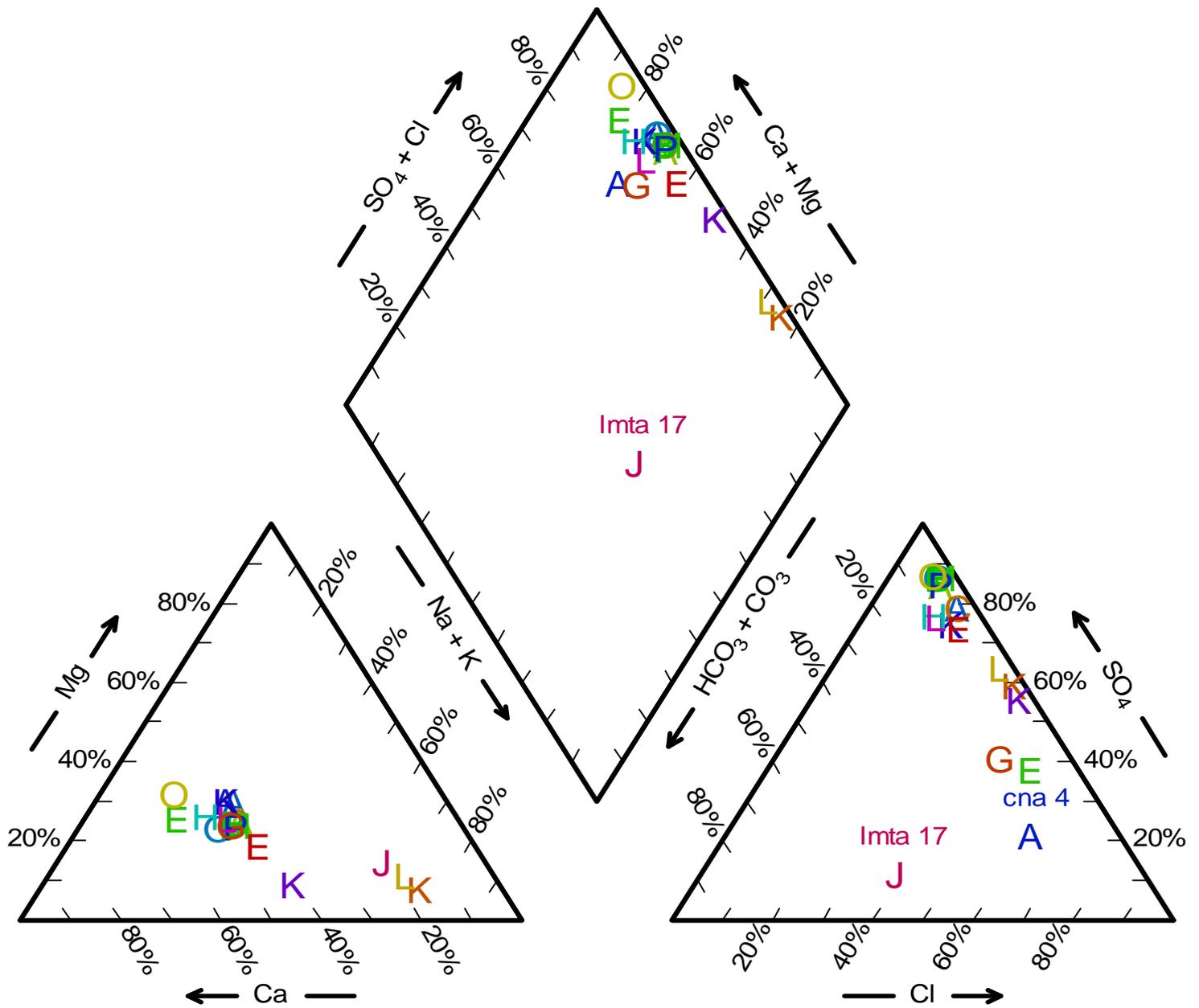
5.3.5 Diagramas de caracterización.

En este capítulo se encuentra la caracterización de los pozos en la zona de estudio, en las **figura 5.17**. El diagrama de Piper informa que hay aguas cálcico- sulfatadas y sólo uno de los pozos el cual se encuentra en San Fernando, cuenta con características de cálcico-sulfatadas. Con esto, se confirma que el ambiente en el que se tienen las unidades hidrogeológicas que contienen gran cantidad de sales, en específico, por unidad consolidada.

Los valores que guiaron a la obtención de este diagrama de Piper se dan en la **tabla 5.3**

Tabla 5.4 Pozos muestreados con un despliegue de los iones mayores.

Pozo	Cationes				Aniones				
	Ca (+2)	Mg(+2)	Na(+1)	K(+1)	HCO3 (-1)	CO3 (-2)	SO4(-2)	Cl (-1)	NO3 (-1)
1 Pozo IMTA 12	583.20	264.48	446.20	16.38	102.48	0.00	2701.44	445.17	0.00
2 Pozo IMTA 17	82.40	42.00	331.20	8.58	622.20	9.60	129.60	300.33	2.48
3 Pozo IMTA 81	562.80	173.28	366.16	11.70	97.60	0.00	2415.36	198.09	27.28
4 Pozo IMTA 82	542.40	202.80	461.38	14.04	112.24	0.00	2614.01	265.54	48.36
5 Pozo IMTA 83	554.00	200.16	446.20	16.38	102.48	0.00	2701.44	445.17	0.00
6 Pozo IMTA 84	552.00	190.32	433.78	11.70	102.48	0.00	2647.68	220.10	40.92
7 Pozo IMTA 85	579.20	202.80	458.62	12.48	97.60	0.00	2688.00	230.04	68.20
8 Pozo IMTA 86	585.20	197.76	393.76	11.70	87.84	0.00	2493.12	239.98	73.16
9 Pozo IMTA 87	562.00	192.72	453.56	12.78	97.60	0.00	2563.20	255.60	71.92
10 Pozo CNA 4	388.00	170.40	270.94	10.14	146.40	0.00	1614.72	295.36	14.88
11 Pozo CNA 6	117.60	66.72	373.52	9.36	58.56	0.00	860.16	290.39	0.00
12 Pozo CNA 7	535.20	150.72	553.84	7.80	200.08	0.00	2259.84	465.76	16.12
13 Pozo CNA 9	235.20	69.12	90.16	3.90	234.24	0.00	771.84	771.84	2.48
14 Pozo CNA 23	342.00	116.40	190.90	5.46	175.68	0.00	1250.88	164.01	74.40
15 Pozo CNA 25	332.00	121.44	248.40	6.24	170.80	0.00	1366.08	195.96	0.00
16 Pozo CNA 44	520.00	175.44	388.70	12.48	107.36	0.00	248.00	195.25	22.32
17 Pozo CNA 138	3330.00	1208.88	19080.34	168.48	585.60	0.00	32349.12	15316.83	9.92
18 Pozo CNA 139	2250.00	1045.68	11406.62	171.60	434.32	0.00	21903.36	8509.35	7.32
19 Pozo CNA 140	2250.00	346.08	3208.96	90.48	297.68	0.00	7643.52	4204.62	7.44
20 Pozo CNA 146	190.00	71.75	55.20	8.58	48.80	0.00	777.60	53.96	2.48



- imta 12
 - Imta 17
 - imta 81
 - imta 82
 - imta 83
 - imta 84
 - imta 85
 - imta 86
 - imta 87
 - cna 4
 - cna 6
 - cna 7
 - cna 9
 - cna 23
 - cna 25
 - CNA 44
 - cna 138
 - CNA 139
 - cna 140
 - CNA 146
- A J O A C M B P P A K E E H L G K L K O

Figura 5.17 Diagrama de Piper para la caracterización del agua en los 20 puntos muestreados en el valle

Para interpretar el diagrama de Durov se integraron las **tablas 5.3 y la 5.4** así se tiene una relación de los iones mayores y los parámetros de pH y la conductividad para su obtención.

En la **figura 5.18** en el diagrama de Durov se representa el mismo régimen del tipo de aguas con las que se trabajo; sólo que en éste se nota el grado de alcalinidad que tiene la zona, debida a que los parámetros de pH van de 7.5, que se encuentra en casi todos pozos, hasta un grado mayor que 8.5 que se encuentra en el pozo de CNA 140, en el ejido de Santa Sofía.

Con esto se genera un marco hidrogeológico que demuestra cómo el agua atraviesa los diferentes estratos en las unidades geológicas.

Tabla 5.5 Conductividad y ph de los pozos muestreados

Pozo	Conductividad	
	m mhos/cm	pH
1 Pozo IMTA 12	5772.00	7.31
2 Pozo IMTA 17	2394.00	7.91
3 Pozo IMTA 81	4210.00	7.65
4 Pozo IMTA 82	4922.00	7.49
5 Pozo IMTA 83	4782.00	7.44
6 Pozo IMTA 84	4733.00	7.36
7 Pozo IMTA 85	4858.00	7.50
8 Pozo IMTA 86	4800.00	7.57
9 Pozo IMTA 87	4919.00	7.42
10 Pozo CNA 4	4364.00	7.35
11 Pozo CNA 6	2558.00	8.71
12 Pozo CNA 7	5394.00	7.11
13 Pozo CNA 9	1671.00	7.11
14 Pozo CNA 23	2595.00	7.40
15 Pozo CNA 25	3100.00	7.84
16 Pozo CNA 44	4557.00	7.33
17 Pozo CNA 138	97520.00	7.43
18 Pozo CNA 139	68040.00	7.60
19 Pozo CNA 140	26560.00	7.20
20 Pozo CNA 146	1710.00	6.91

Durov Diagram

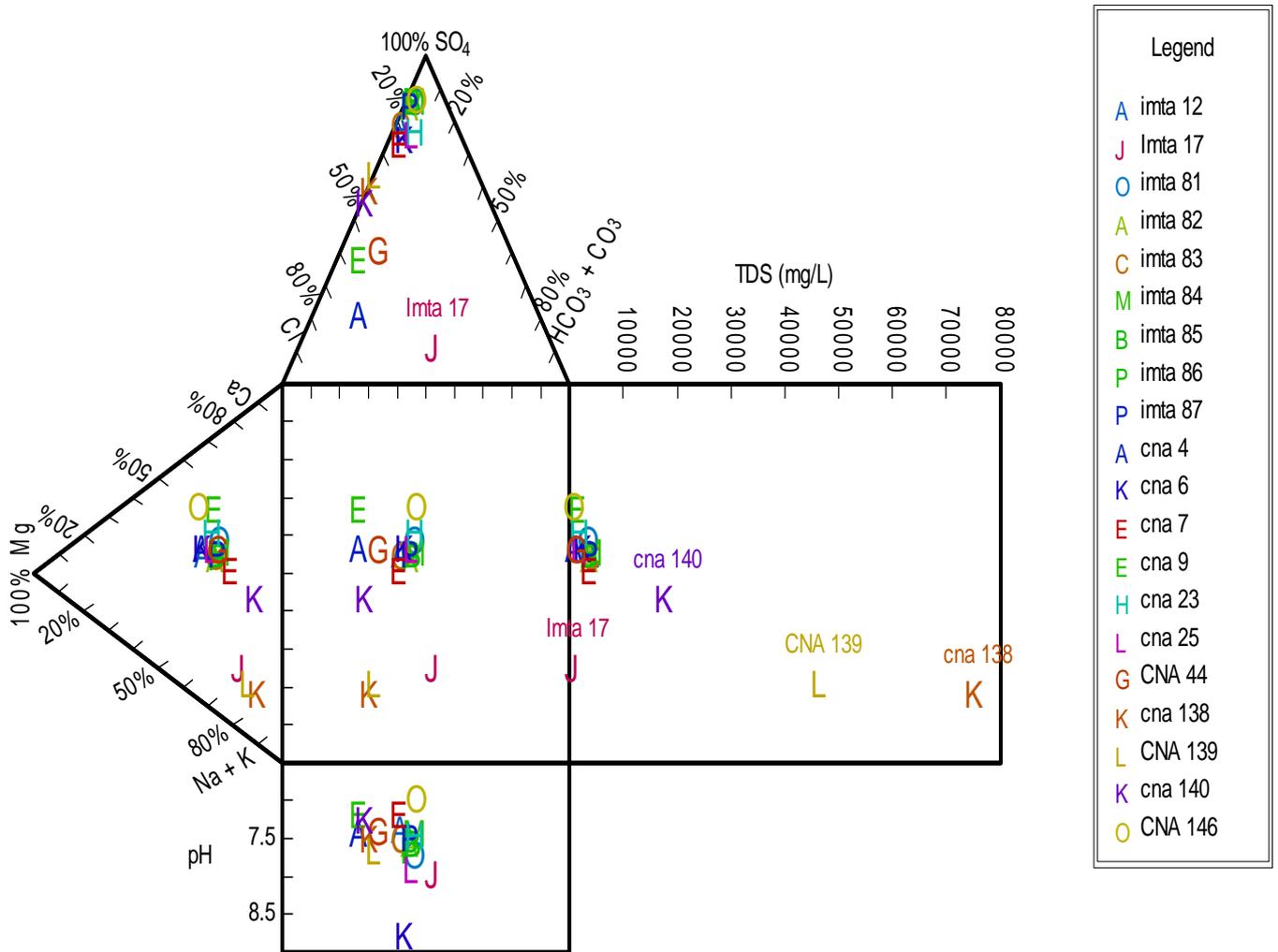


Figura 5.18 Diagrama de Durov

En los diagramas de balance iónico de cada uno de los pozos estudiados se hace un análisis a fondo de los porcentajes de los elementos químicos que contiene el agua en dichos pozos.

De la misma forma para poder para una mejor visualización del un marco hidrogeoquímico del valle se generaron perfiles hidroquímicos.

Para comenzar con el análisis se bosquejara con el primer perfil de la sección A-A' basado en la **figura 5.1**.

La sección A-A' corresponde a los pozos CNA 4, CNA 6, CNA 9 y CNA 7 comenzando de sur a norte que sería de derecha a izquierda en el orden anteriormente marcado

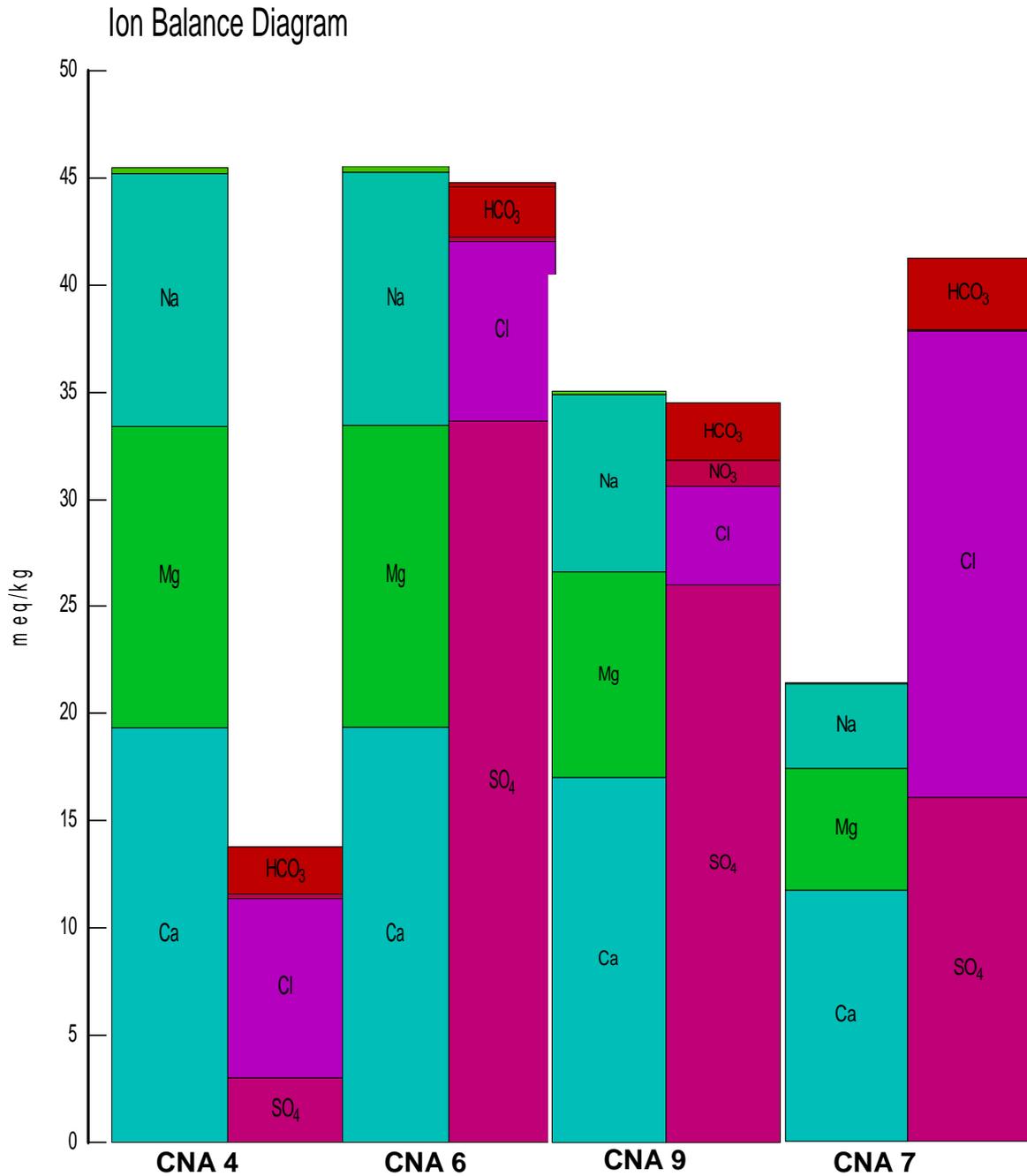


Figura 5.19 Diagramas de balance de iones en los pozos CNA 4, CNA 6, CNA 9 y CNA 7.

En la **figura 5.19**, que representa el perfil de balance de los pozos CNA 4 CNA 6 CNA9 y CNA7, que se encuentran en el ejido de Santa Sofía. La configuración que se tiene en estos cuatro pozos muestra como el agua pasa de una zona de recarga un abanico de yesos dirigiéndose a una salida.

Los pozos CNA 6 y CNA 4 se mantiene una constante en los cationes, también nos indica la cercanía a el sitio de recarga debido a la presencia alta del cloro (Cl⁻) y el sodio (Na⁺) ya que estos son elementos de rápido intercambio iónico como se tiene en CNA 6 pero se ve que en CNA 4 concuerda que se encuentra en el con la presencia de yesos, esto debido al aumento de sulfatos en el agua (SO₄⁺²), siguiendo la línea de flujo llegamos a CNA 9 en el cual se nota una transición de los aniones y cationes para finalizar con CNA 7 donde se nota un aumento del cloro y un descenso de sodio esto es debido a la que el sitio de muestreo se encuentra en la salida de la cuenca geohidrológica del valle.

Para la definición de la sección B-B' que se encuentra en el centro del valle está definida por los pozos CNA 138, CNA139 y CNA 140 **figura 5.20**.

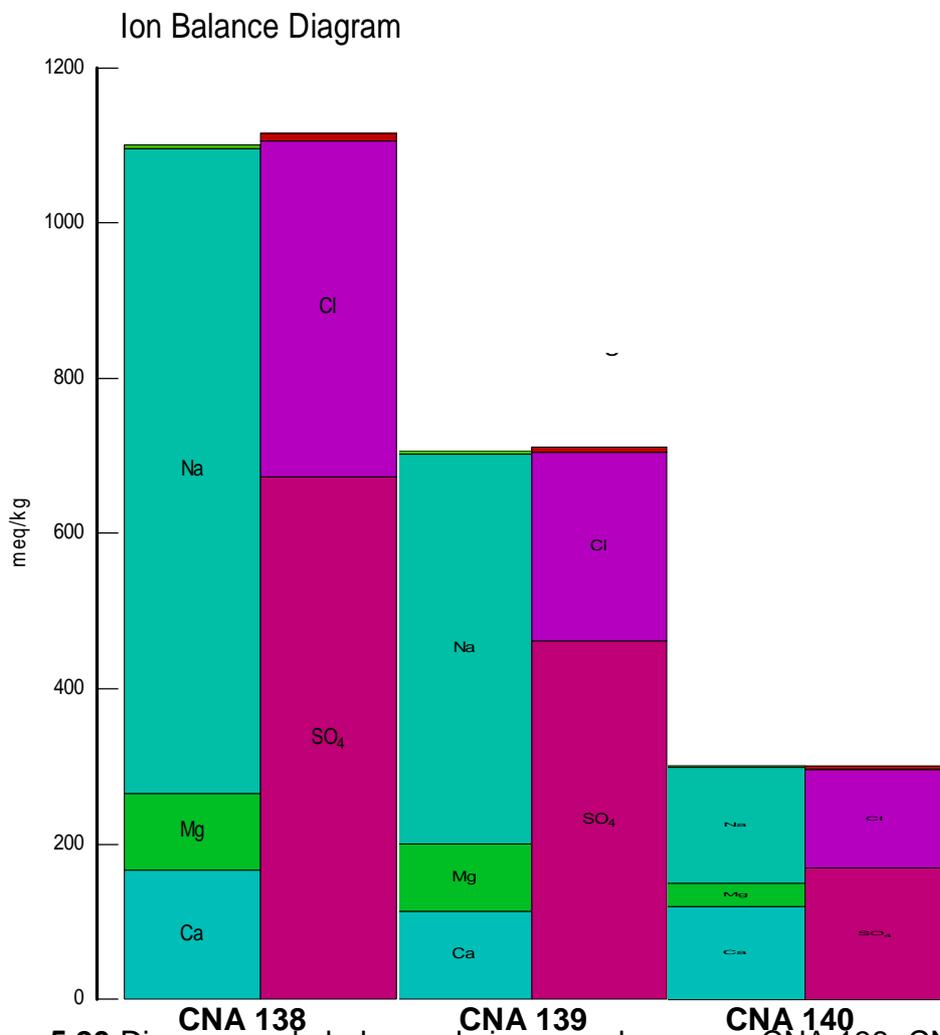


Figura 5.20 Diagramas de balance de iones en los pozos CNA 138, CNA 138 y CNA 140.

En la **figura 5.20**, que representa el perfil de balance de los pozos CNA 138 CNA 139 y CNA140, que se encuentran en la zona central del valle. La configuración que se tiene en estos tres pozos muestra altas concentraciones de sodio (Na^+), cloro (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{-2}), lo que indica que el tiempo de residencia en este parte es prolongada.

Las altas concentraciones del estos elementos indica que el flujo de agua subterránea pasa por los abanicos de yesos y anhidritas que son localizadas en el centro del valle aportando al flujo y calidad del agua estas condiciones, haciendo que las condiciones del agua no sea apta para el consumo humano solo resistiendo algunos cultivos como la alfalfa los altos contenidos de sales de la misma.

Para la definición de la sección C-C' que se encuentra en el centro del valle está definida por los pozos CNA 146, CNA 25 y CNA 23 **figura 5.21**.

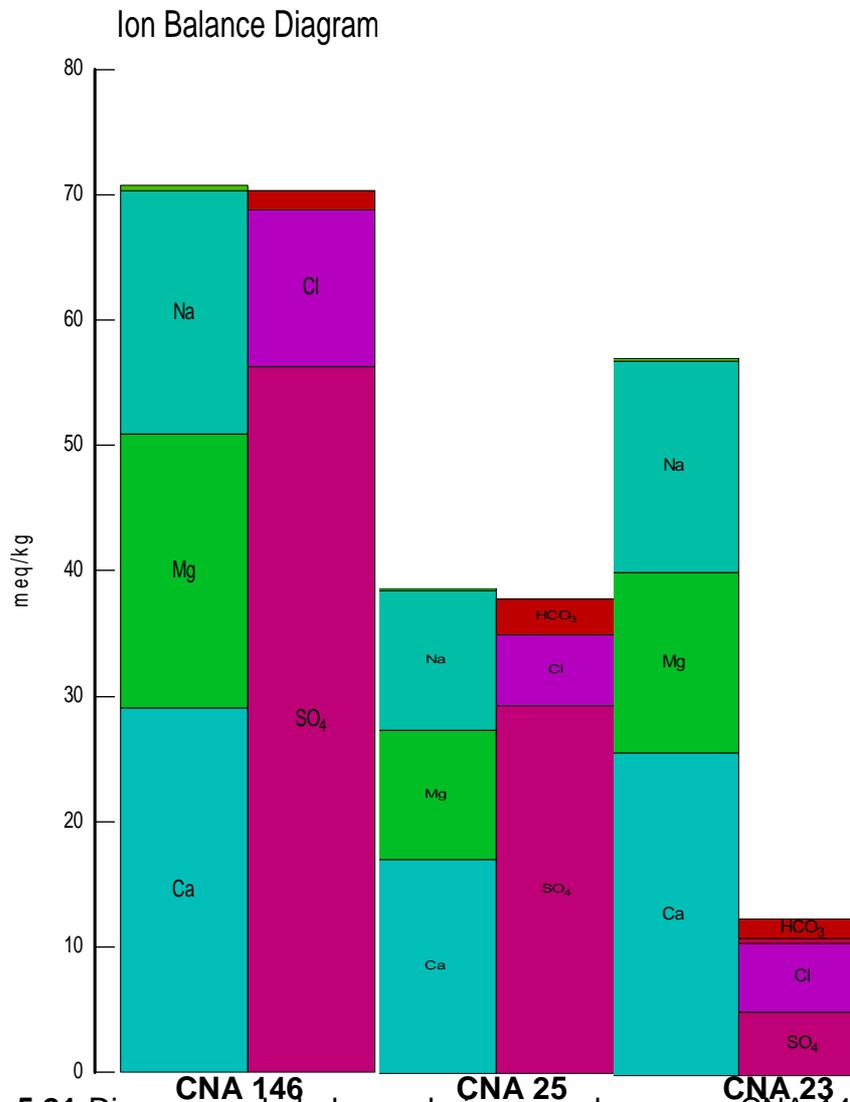


Figura 5.21 Diagramas de balance de iones en los pozos CNA 146, CNA 25 y CNA 23.

En la **figura 5.21**, que representa el perfil de balance de los pozos CNA 146 CNA 25 y CNA 23, que se encuentran en el Ejido de Santa Sofia. Debido a la posición de la sección se hace un corte transversal a la línea de flujos comprobándose la dirección ya que la composición del agua se nota muy baja correlación entre las cantidades de aniones y cationes.

Las concentraciones de los elementos comprueban que el flujo de agua subterránea pasa por los abanicos de yesos y anhidritas que son localizadas en el centro del valle aportando al flujo y calidad del agua estas condiciones, haciendo que las condiciones del agua no sea apta para el consumo humano

Para la definición de la sección D-D' que se encuentra en el centro del valle está definida por los pozos IMTA 85, IMTA 86 y IMTA 87 **figura 5.22**.

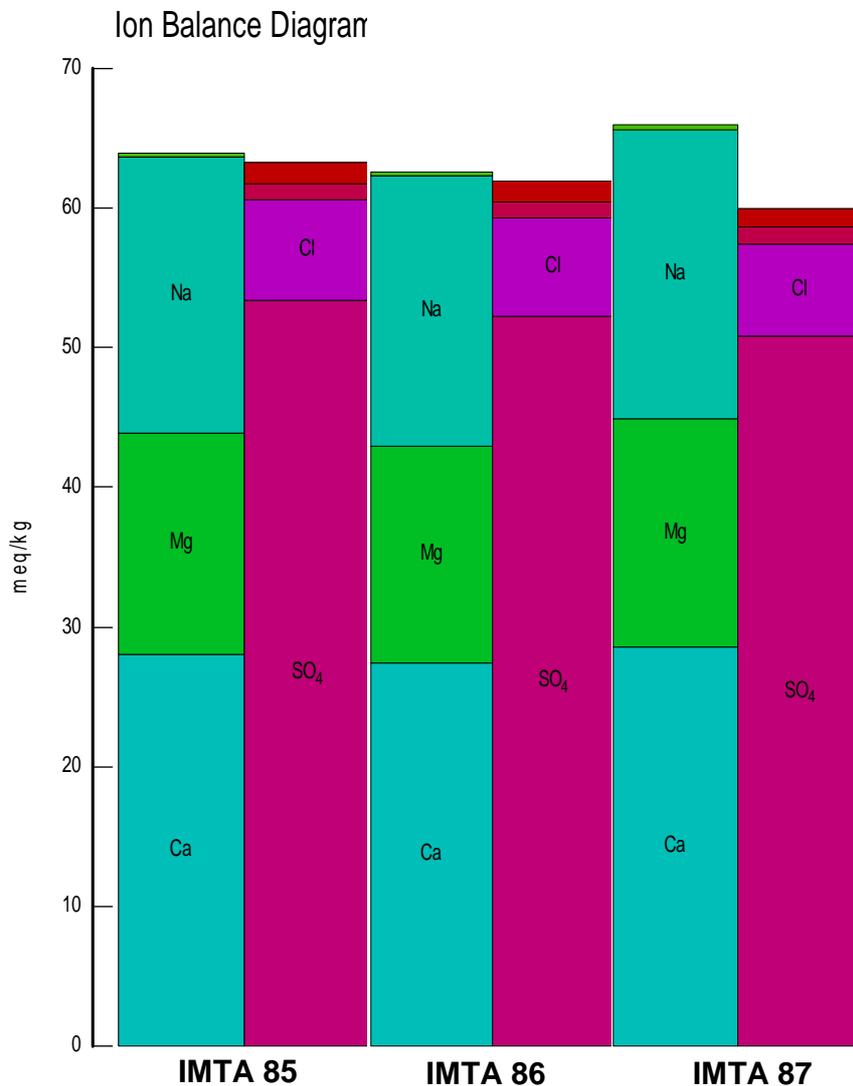


Figura 5.22 Diagramas de balance de iones en los pozos IMTA 85, IMTA 86 y IMTA 87.

En la **figura 5.22**, que representa el perfil de balance de los pozos IMTA 85, IMTA 86 y IMTA 87, que se encuentran en el Ejido Las Morenas. Como se ve en este perfil que se encuentra al noreste del valle.

Debido a la composición química que se muestra en el agua se dice que estas se encuentran sobre bancos de yesos y anhidritas debido a los altos índices de sulfato con los que cuenta la composición química del agua. Ya que los parámetros en estos tres sitios se mantienen de forma constante y con poca variación en sus características químicas.

Para la definición de la sección E-E' que se encuentra en el centro del valle está definida por los pozos IMTA 85, IMTA 86 y IMTA 87 **figura 5.23**.

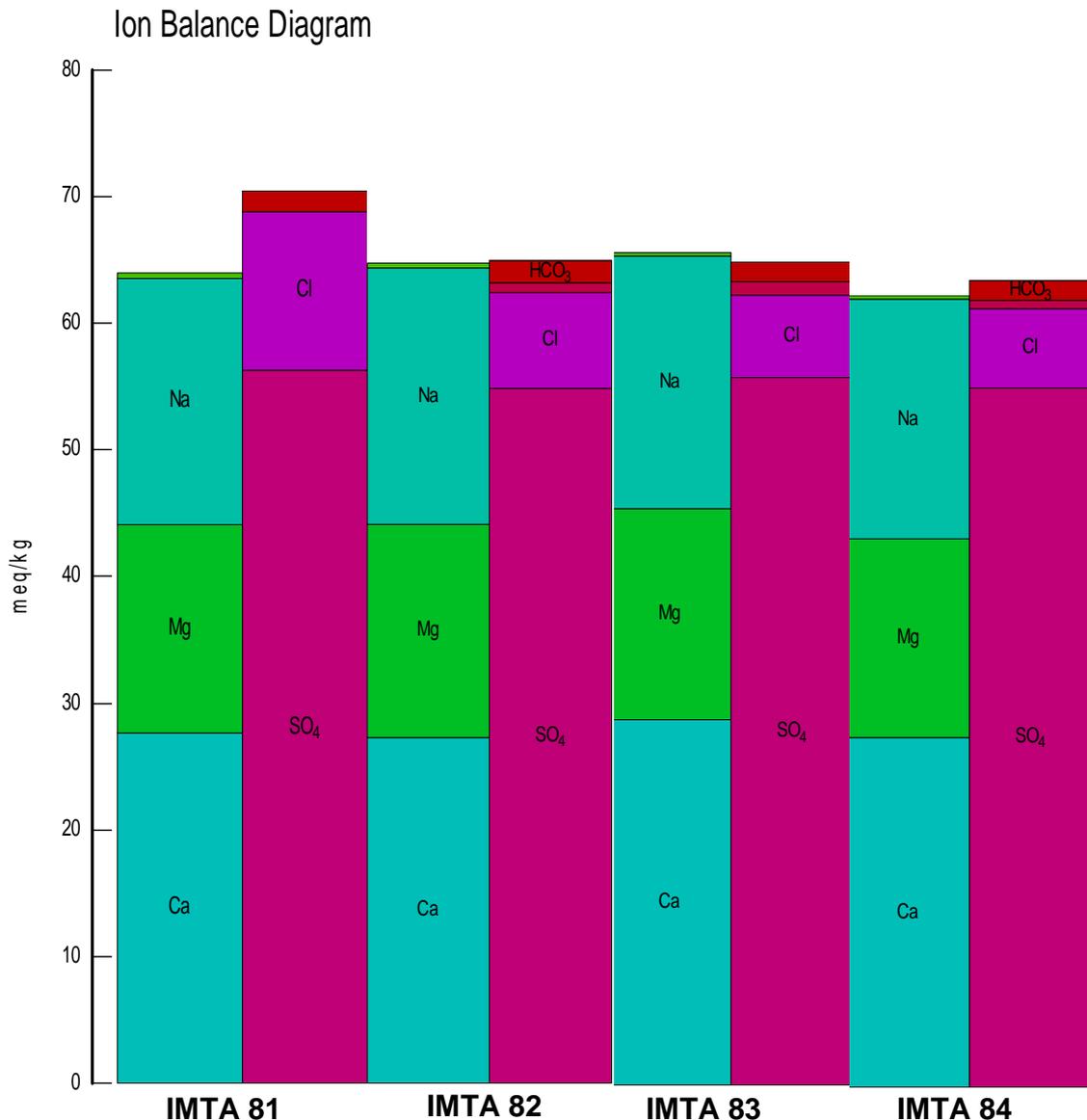


Figura 5.23 Diagramas de balance de iones en los pozos IMTA 81, IMTA 82, IMTA 83 y IMTA 84.

En la **figura 5.23**, que representa el perfil de balance de los pozos IMTA 81, IMTA 82, IMTA 83 y IMTA 84, que se encuentran en el Ejido Las Morenas. Como se ve en este perfil que se encuentra al noreste del valle.

Debido a la composición química se presenta el mismo caso que en la figura 5.22 donde la constatación en los elementos en este sitio es similar volviéndose a comprobar que el agua se encuentra sobre bancos de yesos y anhidritas debido a los altos índices de sulfato con los que cuenta la composición química del agua. Ya que los parámetros en estos tres sitios se mantienen de forma constante y con poca variación en sus características químicas.

Debido al gran contenido de NaCl y SO₄, y con base en los datos recabados en los muestreos; se hizo, bajo las series de plot, un esquema regional sobre el comportamiento en el acuífero, de la conductividad y la alcalinidad en el mismo, como se muestra en las **figuras 5.24**.

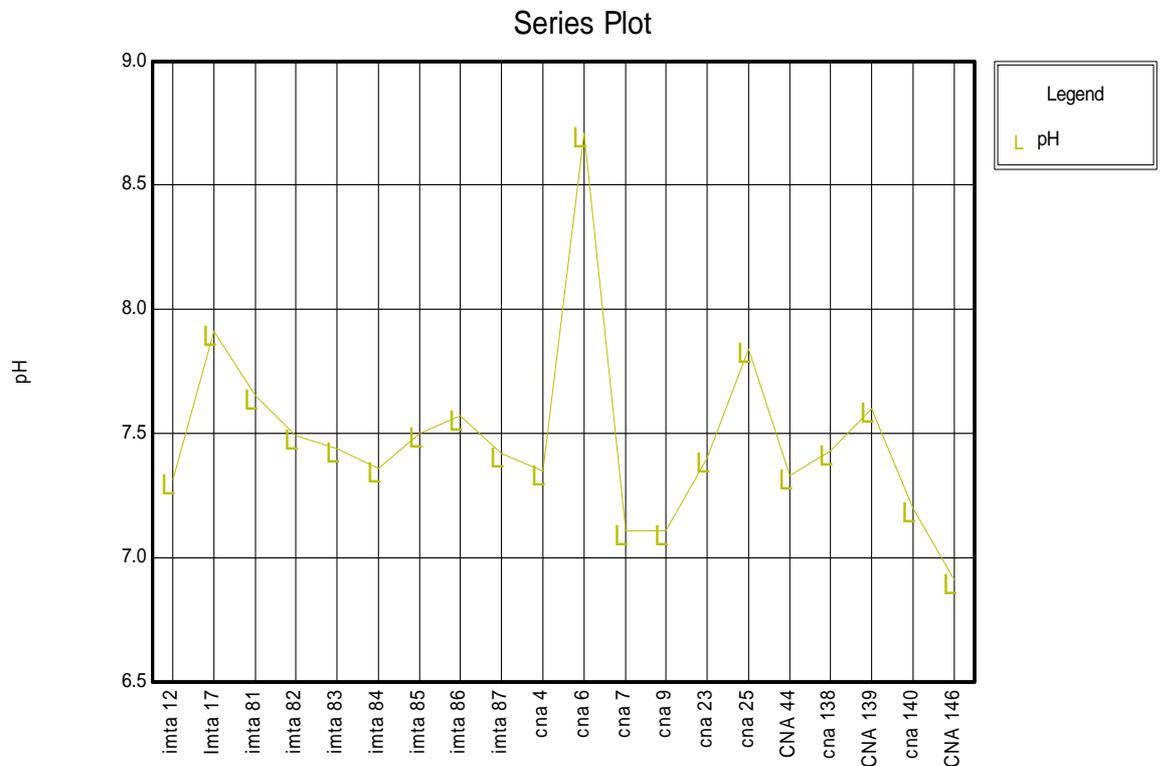


Figura 5.24 Comportamiento del pH en el valle de estudio

Tabla 5.6 Conductividad, R.A.S. y Willcox

Pozo	Conductividad	R.A.S.	Clasificación	Condiciones de Salinidad	
	□ mhos/cm	(Meq/l)	Wilcox	Peligro de salinidad	Peligro de Sodio
1 Pozo IMTA 12	5772.00	3.83	c4-s2	Muy alta	Medio
2 Pozo IMTA 17	2394.00	7.37	c4-s2	Muy alta	Medio
3 Pozo IMTA 81	4210.00	3.45	c4-s2	Muy alta	Medio
4 Pozo IMTA 82	4922.00	4.27	c4-s2	Muy alta	Medio
5 Pozo IMTA 83	4782.00	4.12	c4-s2	Muy alta	Medio
6 Pozo IMTA 84	4733.00	4.05	c4-s2	Muy alta	Medio
7 Pozo IMTA 85	4858.00	4.16	c4-s2	Muy alta	Medio
8 Pozo IMTA 86	4800.00	3.62	c4-s2	Muy alta	Medio
9 Pozo IMTA 87	4919.00	4.20	c4-s2	Muy alta	Medio
10 Pozo CNA 4	4364.00	2.87	c4-s2	Muy alta	Medio
11 Pozo CNA 6	2558.00	6.80	c4-s2	Muy alta	Medio
12 Pozo CNA 7	5394.00	5.43	c4-s2	Muy alta	Medio
13 Pozo CNA 9	1671.00	1.32	c3-s1	Alta	Bajo
14 Pozo CNA 23	2595.00	2.27	c4-s1	Muy alta	Bajo
15 Pozo CNA 25	3100.00	2.95	c4-s2	Muy alta	Medio
16 Pozo CNA 44	4557.00	3.75	c4-s2	Muy alta	Medio
17 Pozo CNA 138	97520.00	71.80	c4-s4	Muy alta	Muy Alto
18 Pozo CNA 139	68040.00	49.63	c4-s4	Muy alta	Muy Alto
19 Pozo CNA 140	26560.00	16.60	c4-s4	Muy alta	Muy Alto
20 Pozo CNA 146	1710.00	0.86	c3-s1	Alta	Bajo

Con base en la **tabla 5.6**, donde se expresa el comportamiento del agua, según los criterios de Wilcox y Shouller, se marca el tipo de agua que se maneja en el valle, recurriendo a las unidades geológicas en las que se encuentra ya demostrado el tipo de agua.

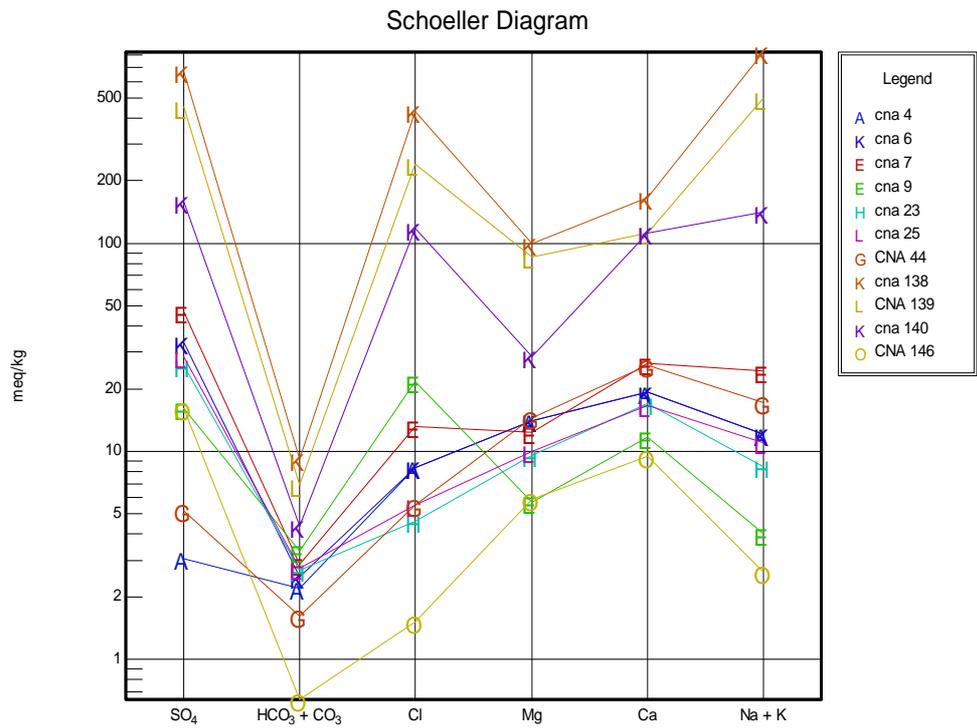


Figura 5.25 Diagrama de Shoeller de los pozos en Santa Teresa de Sofía

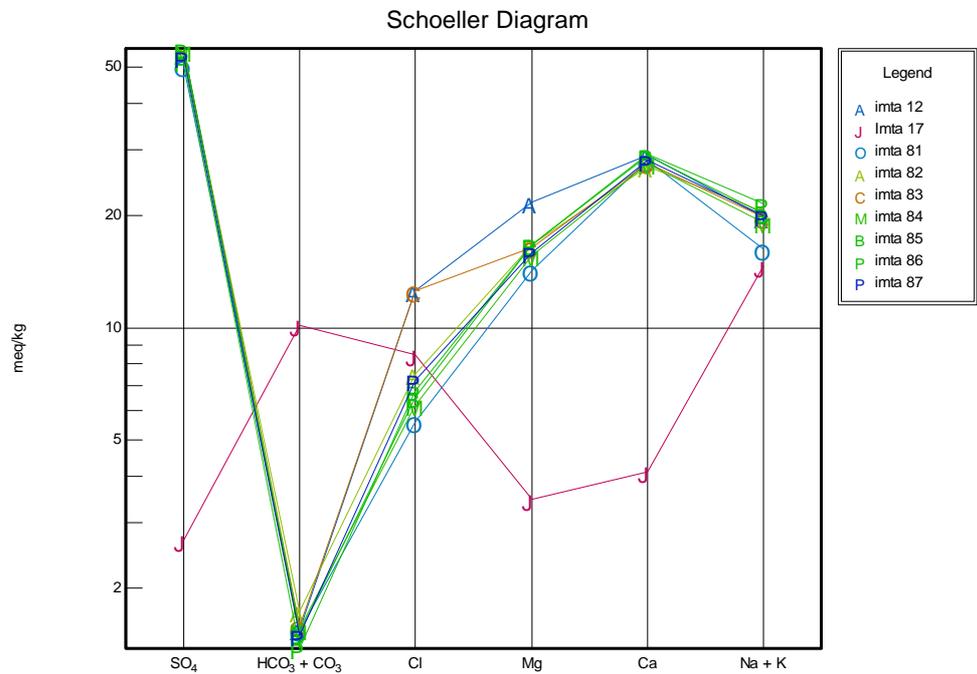


Figura 5.26 Diagrama de Shoeller en los pozos de San Fernando

5.3.6 ISÓTOPOS AMBIENTALES

Los isótopos estables utilizados en esta investigación corresponden al ^{18}O , ^2H , mientras que el isótopo radiactivo utilizado fue el Tritio. Los procesos que llevan al fraccionamiento isotópico natural del ^{18}O y ^2H se producen principalmente por procesos de evaporación y condensación (Custodio y Llamas, 1983). En esta investigación fueron realizados análisis de ^{18}O y Tritio en 10 muestras de agua subterránea.

La composición isotópica del agua subterránea en regiones áridas puede ser en ocasiones bastante diferente de la precipitación local. La causa más común es el enriquecimiento isotópico del agua por evaporación. A diferencia de la transpiración, la evaporación es un proceso altamente fraccionante. El agua puede ser evaporada desde la superficie de agua libre, durante la escorrentía antes de la infiltración, y desde la zona no saturada y saturada (Clark y Fritz, 1997). Sin embargo, en algunos casos es posible encontrar situaciones en que el agua subterránea tiene una composición isotópica que se asemeja a la de la precipitación. Algunos autores como (Mathieu y Bariac) explican que este comportamiento es posible debido a la existencia de macroporos y canales de flujo preferencial en zonas no saturadas (nidos de termitas, grietas de desecación profundas, carstos y raíces de plantas) que permiten un rápido desplazamiento del agua de lluvia hacia la zona saturada.

También puede ocurrir que la composición isotópica de las aguas subterráneas en zonas áridas sea mucho más ligera que la composición isotópica media de las precipitaciones. Estas diferencias en muchos casos tienen su origen en cambios climáticos que indican que la recarga se produjo en condiciones climáticas más húmedas en períodos anteriores a la aridez. (Brouste et al. 1997) estudiaron la composición isotópica de la precipitación y del agua subterránea del acuífero en el Bolsón del Hueco en el desierto de Chihuahua en México. En este estudio se concluyó que la composición isotópica más ligera del agua subterránea respecto a las precipitaciones actuales se deben a que la recarga se produjo en condiciones climáticas más húmedas.

Las aguas subterráneas en climas áridos como las del desierto chihuahuense donde se localiza el proyecto de investigación (Valle del Hundido) son extremadamente susceptibles a cualquier cambio ambiental y en particular a cambios en el uso de los suelos, la cubierta vegetal y la morfología superficial (Gat, 1991).

El grado de condensación de una masa de vapor depende de la temperatura y así la composición isotópica de la precipitación extremadamente variable en el tiempo y en el espacio, esta controlada sobre todo por la temperatura de formación de la masa de vapor. Este hecho explica la mayoría de los efectos observados en la precipitación, tales como: latitud, altitud, cantidad, continentalidad y estacionalidad. (Gonfiantini y Araguas. 1988)

El estudio de los isótopos estables ^{18}O , ^2H y Tritio son herramientas muy útiles para determinar el origen de las aguas subterráneas, así como para identificar el origen de la salinidad del agua subterránea. La composición

isotópica del agua de mar es estable y muy diferente a la composición isotópica de las aguas continentales, lo que da una marca conservativa que permite el trazado de la mezcla del agua de mar con las aguas subterráneas.

5.6.7. Estudio del ^{18}O ^2H Tritio.

Los datos utilizados para la caracterización isotópica de la precipitación fueron tomados por el autor en el marco de la presente investigación, son los primeros resultados obtenidos en el estudio realizado en el Valle del Hundido. Se trabajó con muestras correspondientes a cuatro eventos puntuales de precipitación tomados por el autor durante los trabajos de campo. Las muestras de lluvia obtenidas el 02/11/2003, 20/11/2003 y el 12/12/2003., corresponden a eventos de precipitación que ocurrieron en lluvias invernales muy leves. Los análisis isotópicos fueron realizados en el **GEOCHRON LABORATORIES a division of KRUEGER ENTERPRISES, INC., Cambridge, Massachusetts, USA.**

Las muestras de agua subterránea obtenidas de pozos para análisis isotópico de Tritio se muestran en la Tabla 5.7. y en el plano **Figura 5.27**

En el anexo se muestran los resultados que arrojaron los análisis de cada muestra como la toponimia de los pozos que fueron monitoreados.

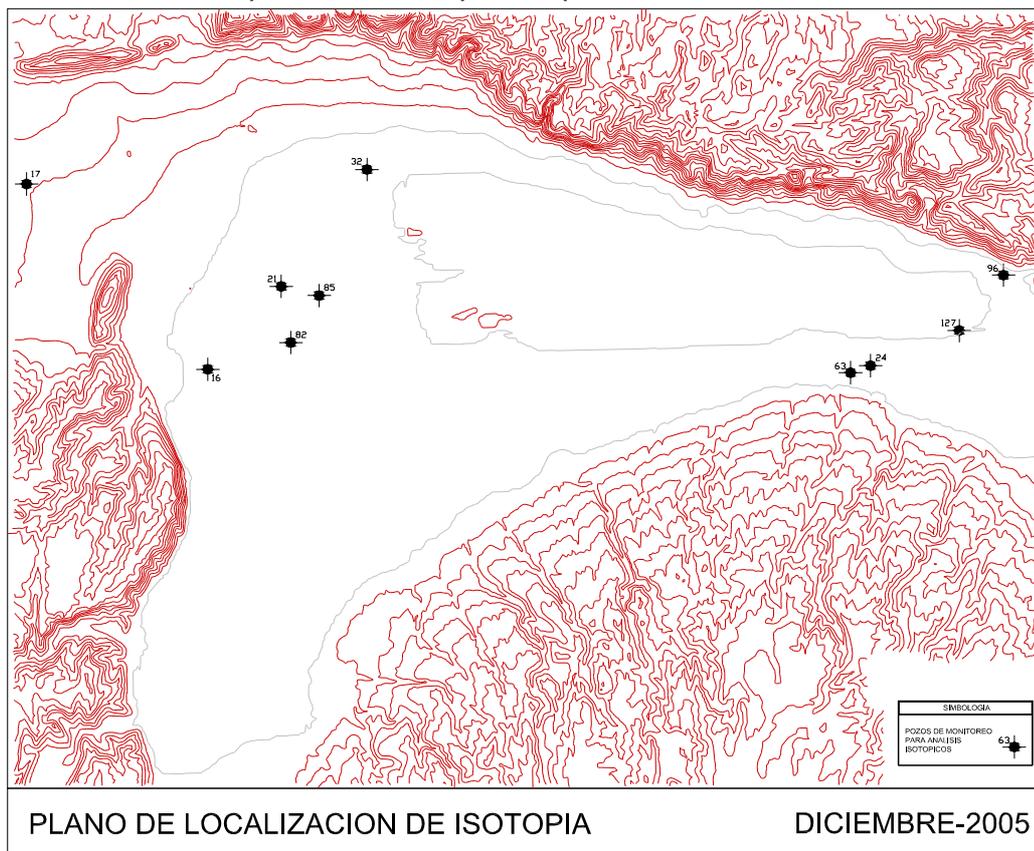


Figura 5.27. Plano de localización de isotopía Diciembre 2005
Fuente: Rodríguez-Arriaga Modificado de INEGI

Tabla 5.7. Toma de muestras para análisis isotópicos

CLAVE	POZO	UNIDADES DE TRITIO	COORDENADAS		
			X	Y	Z
T-8046	CNA 127	11.7±2.0	776321	2946787	799
T-8047	IMTA 17	5.2±1.9	13735644	2953015	954
T-8048	CNA 32	5.8±1.9	750350	2953643	811
T-8049	CNA 16	4.6±1.9	130743470	2944941	828
T-8050	IMTA 82	7.6±1.9;6.4±2.0	13747063	2946112	828
T-8051	CNA 85	3.6±1.9	748284	2948144	816
T-8052	IMTA 63	4.9±1.9	130771249	2944798	810
T-8053	IMTA 96	3.9±1.9	7778552	2949047	824
T-8054	IMTA 21	3.9±1.9			
T-8055	CNA 24	4.3±1.9	772111	2945103	798

5.3.8. Estudio de la relación $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ del agua subterránea

Las variaciones en oxígeno 18 y Deuterio en las aguas dulces son estrictamente paralelas y obedecen a una correlación del tipo:

$$\delta D = a \cdot \delta^{18} + b$$

Con $a= 8$ y $b= 0/00$ representando los valores normalmente observados en las aguas naturales. Esta línea denominada "World Meteoric Water Line" (WMWL) fue definida por Craig, (1961).

Los diferentes procesos que modifican el contenido isotópico de las aguas subterráneas son:

- a). Mezcla de otras masas acuosas.
- b) Intercambio iónico
- c) Evaporación
- d) Intercambio químico e isotópico con la matriz del acuífero.
- e) Disolución de sales y lixiviados de minerales en las rocas.

Otros procesos que afectan las aguas subterráneas son el tiempo de residencia en formaciones geológicas, como la ultrafiltración en membranas arcillosas como es el caso de las formaciones la Peña y Kiamich presentes en el área de estudio y que actúan como sello en los acuíferos de la región.(Gonfiantini y Araguas, 1988)

La relación general entre la composición isotópica del hidrógeno y el oxígeno en las aguas naturales, en la mayoría de los casos obedecen a la Línea de Agua Meteorica cuya ecuación es la siguiente: $\delta D = \delta^{18}O + 10$ (Craig, 1961).

El grado de empobrecimiento en isótopos pesados depende principalmente de la temperatura de formación de la precipitación, las aguas sometidas a evaporación siguen en general una tendencia diferente, con un enriquecimiento inicial rápido en isótopos pesados, que tienden a alcanzar un valor estacionario dependiendo de la humedad relativa en la atmósfera y la composición isotópica del vapor atmosférico. Finalmente el intercambio isotópico entre la matriz del acuífero y el agua subterránea produce generalmente un enriquecimiento en el contenido en el oxígeno 18 de esta.

En la figura 5.28. se presentan los datos $\delta^{18}O$ y δD en las muestras de aguas subterráneas en el área de estudio, donde se comparan con la línea meteorica mundial. En dicha figura se agrupan las muestras de agua subterránea del Valle del Hundido. Se observa que cuatro muestras de agua se ubican por debajo de la recta meteorica los valores de oxígeno 18 son más ligeros, mientras que los valores de Deuterio se mantienen constantes.

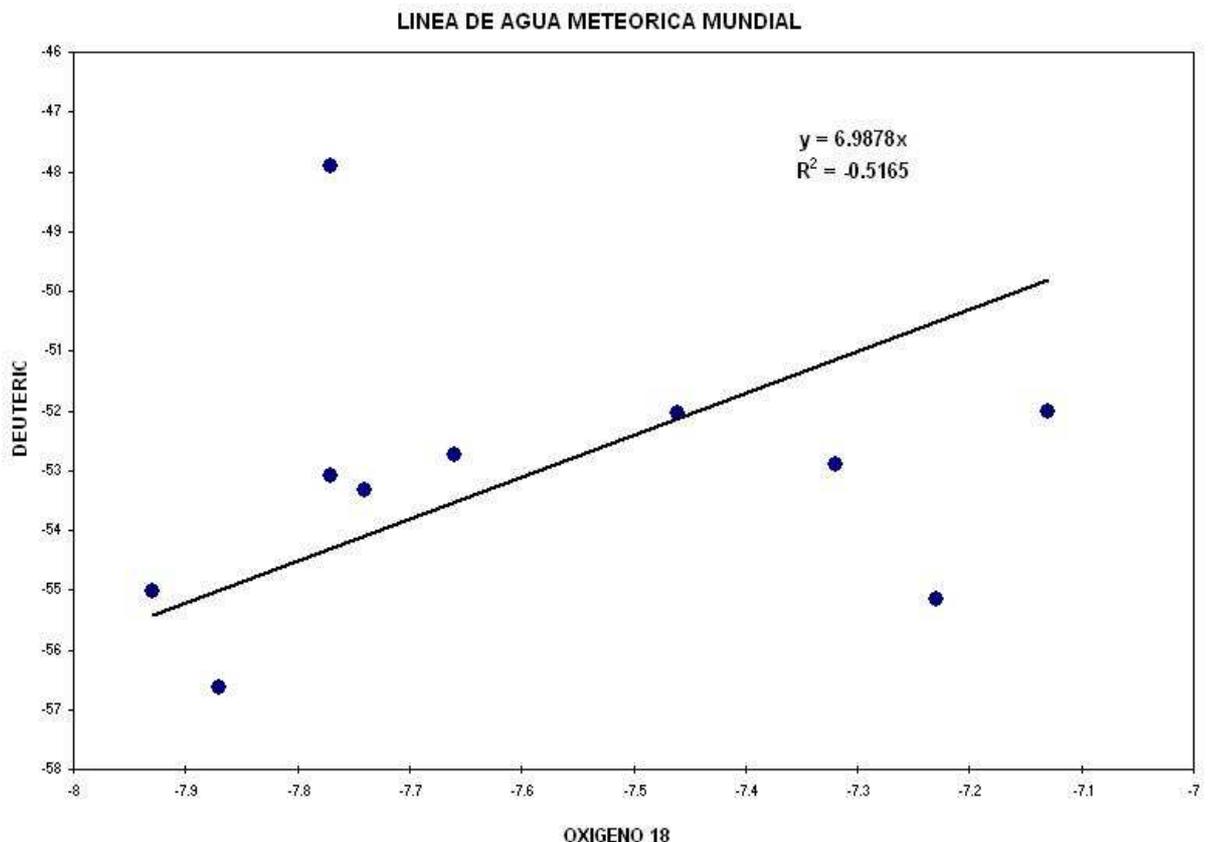


Figura 5.28 Línea de agua meteorológica mundial
Fuente: CONAGUA

5.3.9 Tritio

Las concentraciones de Tritio en las aguas subterráneas son muy variables entre las aguas de los aprovechamientos muestreados en la figura 5.29. se muestra el decaimiento del Tritio. Las concentraciones de Tritio en las aguas subterráneas se expresa en Unidades de Tritio (T U) 1 unidad de Tritio corresponde a un átomo de Tritio por cada 10¹⁸ átomos de hidrógeno. El nivel mínimo de detección es de 0.3 TU si la medida se realiza con enriquecimiento y con contador de gas, y el entorno al doble si se realiza mediante centelleo líquido.

El rango de la concentración de Tritio en la precipitación en el hemisferio norte, donde están localizadas la mayor parte de las emisiones de Tritio, es en la actualidad de 10-30 TU. En la primavera de 1963 poco tiempo después de las explosiones termonucleares realizadas en la atmósfera, se alcanzaron valores de hasta 10,000 TU. Con anterioridad a 1953, el nivel natural de Tritio en la precipitación estaba situado entorno a 10 TU. En la tabla 7.6.5 se muestran los resultados de los análisis realizados por el **GEOCHRON LABORATORIES a division of KRUEGER ENTERPRISES, INC., Cambridge, Massachussets, USA.**

En el gráfico 7.6.6. se muestra el decaimiento del Tritio en las muestras de agua subterránea analizadas, así mismo se puede observar la ecuación de correlación la cual presenta un factor de correlación de $R = 0.9863$. Esta correlación nos permite afirmar que las aguas en el Valle del Hundido están estrechamente relacionadas con los últimos eventos ciclónicos ocurridos en la década de los 50. Otro parámetro que se observó en las muestras de agua analizadas es de que a medida que se incrementa el contenido de cloruros en el agua subterránea, los contenidos de Tritio se reducen.

En general los contenidos de Tritio observados en los pozos de monitoreo varían entre 0.5 - 12.0. Si bien los contenidos de Tritio son bajos, estos resultados se pueden explicar por la presencia de dos acuíferos siendo el profundo que se localiza en medios fracturados (calizas) el que recarga en forma ascendente al acuífero en medios granulares a través de fallas y fracturas.

DECAIMIENTO DEL TRITIUM EN EL VALLE DEL HUNDIDO

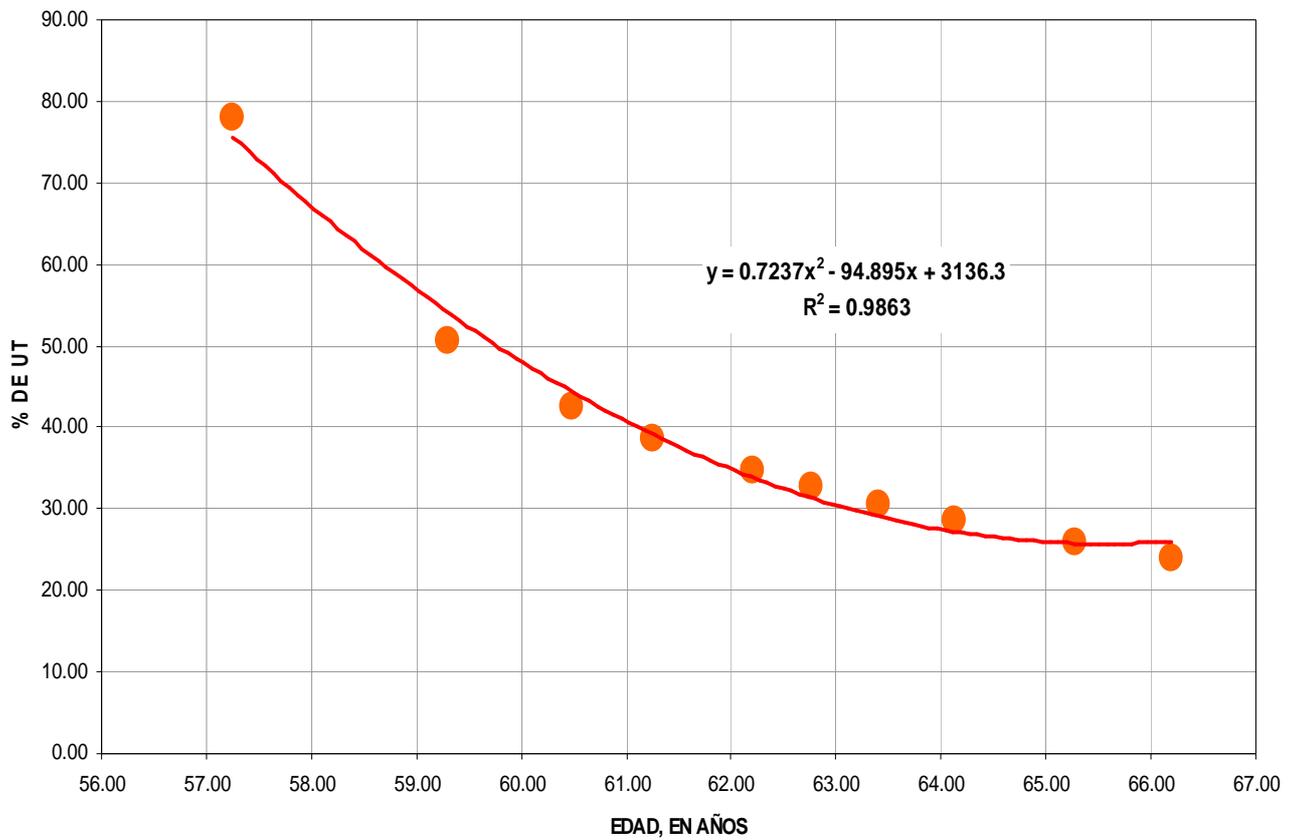


Figura 5.29. Decaimiento del Tritio, el factor de correlación es bueno

En las figuras 5.30 y 5.31 se muestran los resultados comparativos de cada sondeo analizado, el pozo que muestra mayor contenido de Tritio corresponde al pozo CNA 127 y el de menor rango con respecto al Tritio es el Pozo CNA 85.

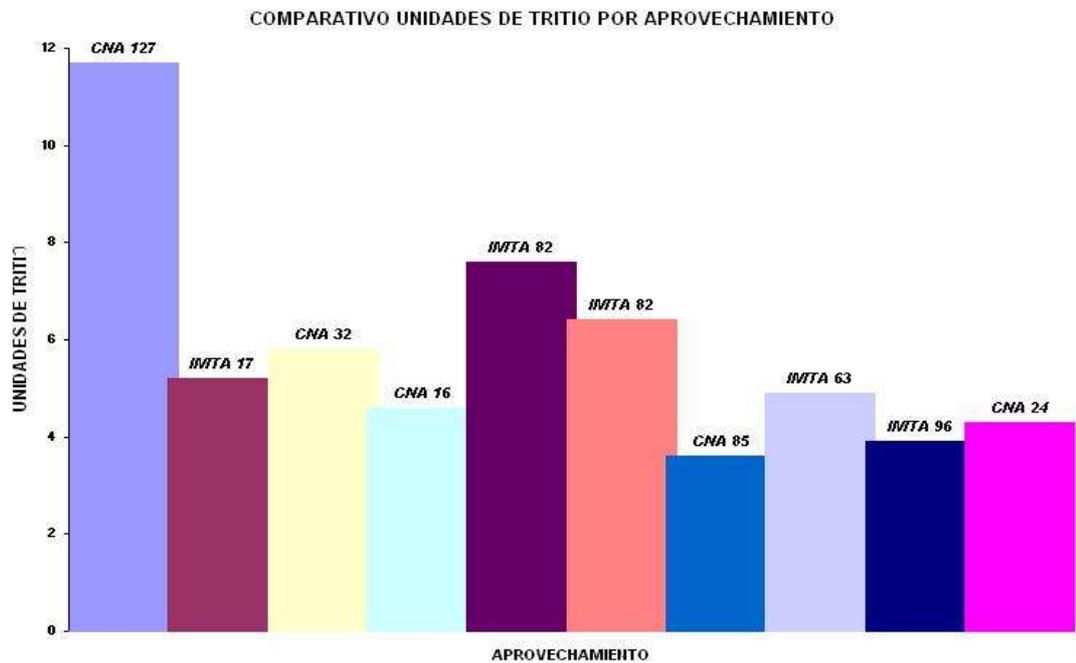


Figura 5.30. Análisis comparativo de Unidades de Tritio por aprovechamiento en el valle El Hundido.

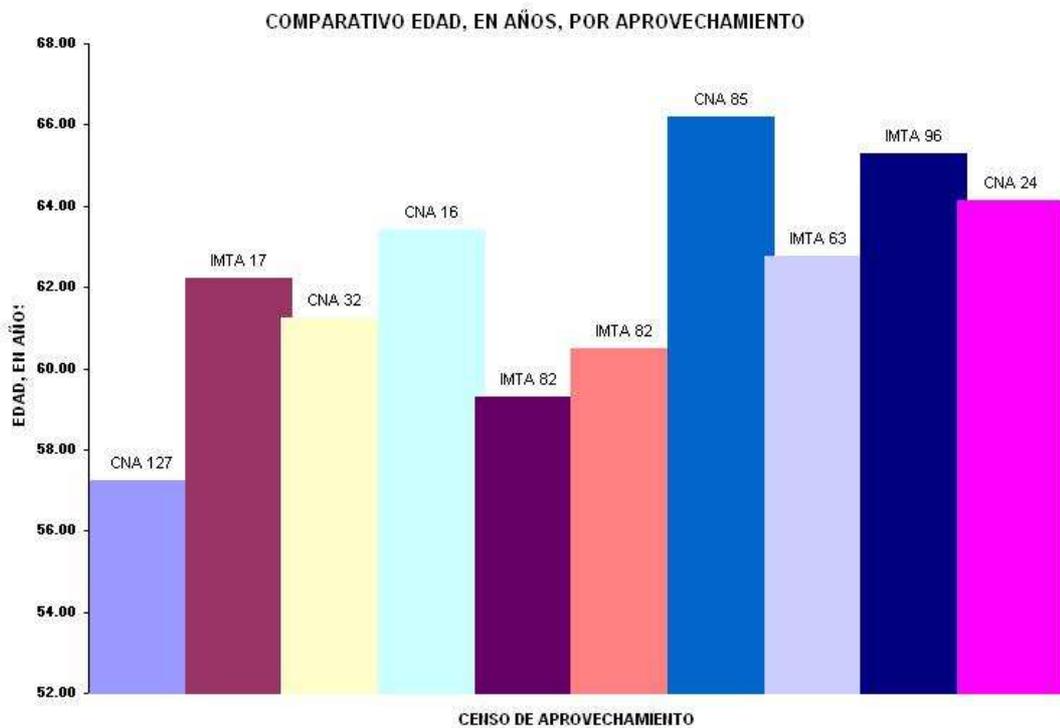


Figura 5.31 Datación de muestras de agua subterránea por aprovechamientos el pozo que representa mayor edad en relación a UT es CNA 85 y el de menor edad corresponde al Pozo CNA 127.

5.4. Determinación del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico e isotópico del acuífero.

La aplicación de isótopos ambientales representa una herramienta complementaria de los estudios de hidrogeoquímica e hidrogeología en el Valle del Hundido, la aplicación de dichas técnicas nos permitió definir el comportamiento de los acuíferos en el área de estudio, determinando la génesis de las aguas en el Valle del Hundido, su calidad, evolución geoquímica, procesos de recarga, interacción agua –roca, origen de la salinidad.

Como parte del estudio de investigación realizado en el período de 2003-2007 se tomaron un total de 10 muestras para realizar análisis de isotopía, 20 muestras para la realización de análisis fisicoquímicos de muestras de aguas en igual número de aprovechamientos hidráulicos, realización de 8 pruebas de bombeo escalonadas de larga duración (72 horas), censo de aprovechamientos hidráulicos, aplicación de métodos geofísicos (gravimetría, magnetometría y geoelectrónico) toda esta información fue apoyada con trabajos de geología de campo.

El conjunto de los resultados actuales nos permitió establecer un modelo hidrogeológico sobre el comportamiento hidráulico del acuífero y su conexión con el Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

5.5. Conclusiones

- Lo que se concluye con este apartado de hidrogeoquímica es la comprobación de que se cuenta con dos paquetes geohidrológicos que funcionan como acuíferos uno en medios granulares, que dan la caracterización de temperaturas bajas y conductividad estable y el otro en medios consolidados, que presentan un cambio de temperatura, donde la caracterización del agua cambia por completo, haciendo que el agua contenga un alta concentración de sales.
- También se concluye que la fuente de abastecimiento de la mayoría de los pozos es un acuífero libre debido a la calidad del agua ya que esta tiene un amplio contacto con los yesos y anhidritas del lugar y estos están en la parte Aluvial sedimentario del valle, localizado en la parte central del mismo.
- Las características del agua de los pozos que tienen diferentes contenidos pertenecen a la unidad fracturamiento o carstico, como es el caso del IMTA17. Razón porque este pozo se encuentra sobre las serranías encontrándose en la recarga del mismo acuífero.
- Por lo demás, la configuración química con la que se contó en la mayoría de los pozos, indica que esa agua no es de reciente formación ya que presentan las mismas características que las de la reserva ecológica de Cuatro Ciénegas en sus contenidos de Sulfatos.
- Como resultado, la composición química e isotópica heterogénea, al igual que el rango de sólidos totales disueltos los valores oscilan desde 83,448mg/l en el pozo CNA 138 localizado en el Ejido Tanque Nuevo hasta 1,233mg/l pozo CNA 17 Ejido El Campizal, lo cual indica que el agua presente en el Valle del Hundido no forma parte de un solo acuífero, sino que está asociado a la presencia de dos uno en medios fracturados y el otro en granulares.
- El acuífero profundo calizo recarga en forma ascendente al acuífero somero, a través de fallas normales e inversas.
- Los análisis de Tritio nos permitieron determinar de forma totalmente fehaciente la presencia de recarga moderna procedente de la precipitación de hace aproximadamente 62.5 años.
- Estos valores nos indican que la recarga al acuífero en rocas carbonatadas y es muy lenta.
- A partir de la información de los isótopos de Deuterio ^2H y Oxígeno ^{18}O se confirma que la
- Las aguas subterráneas en la zona de estudio, provienen exclusivamente de la precipitación, con poca o nulo efecto de la evaporación.
- Tomando en cuenta la baja precipitación en la zona y la baja recarga al acuífero, se considera que son mayores los volúmenes de extracción que la recarga misma.

Capítulo 6. Resultados y Discusión.

6.1. Introducción.

A partir del análisis de la información geológica, geofísica, geohidrológica y geoquímica; basándose en la mecánica de acuíferos, se determinó en un modelo conceptual del valle El Hundido.

La geometría del acuífero del valle El Hundido se logró definir con el apoyo de métodos geológicos, geofísicos, hidráulicos e hidrogeoquímicos.

Se realiza un modelo regional donde se planteó que el valle El Hundido no depende de la precipitación pluvial, en una zona donde su recarga proviene tanto del flujo proveniente del Río Nazas, como del aporte proveniente de la Falla de San Marcos, que se extiende aproximadamente 300 km, así como de la sierra de los Alamitos y la sierra del Venado.

6.2. Conclusión general.

Se tiene como conclusión general que la conexión que se tiene entre el acuífero de El Hundido con el exterior a el acuífero de Cuatro Ciénegas se realiza por medio de una falla localizada en la el cañón El Hundido.

La geología del sitio, mostrando las diferentes fallas y fracturas inversas como es la FSM es una de las fuentes de recarga para el acuífero aunque por la estructura indica que el acuífero se encuentra aislado la discordancia que se presenta en el cañón como se demostró en el perfil geofísico realizado por medio de SEV's demuestran que la comunicación que existe entre estos dos acuíferos.

Otro punto que se puede concluir con respecto a la climatología es el déficit que tiene el acuífero en lo que va a la recarga natural de forma superficial, debido a las altas temperaturas que se presentan en la cuenca, sus niveles de evaporación y evapotranspiración hacen que la recarga superficial se prácticamente nula.

Según el modelo conceptual geohidrologico los parámetros de conductividad y permeabilidad en el acuífero se presentan con mayor capacidad en la parte de la unidad hidrogeológica de aluviales.

Debido a esto la calidad del agua presenta ciertas características que no son aptas para el consumo humano debido a sus altos contenidos de sulfatos. En este modelo conceptual también se cuentan con otras dos unidad es hidrogeológicas a mayor profundidad como son formación Aurora y Cupido , el agua que se capta en estas unidades es de mejor calidad pero se encuentran a mayor profundidad **Figura 6.1.**

Uno en medios porosos donde se encuentras características de agua mixta, ya que se cuenta con la recarga del Rio Nazas y por medio de aportaciones verticales de la segunda unidad que se encuentra en rocas consolidadas.

Contando con una línea de flujo de SE a NW, también se tiene que, en el centro del valle, el agua tiene un tiempo de residencia de 3 días, lo cual indica que el mayor aporte para este acuífero, en medio poroso, es de la unidad de medios consolidados; ya que, con el tiempo de residencia que tienen las reacciones químicas del agua con el ambiente, esta es muy poca para obtener la caracterización que se tiene en los diferentes pozos del valle.

Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero en el valle El Hundido

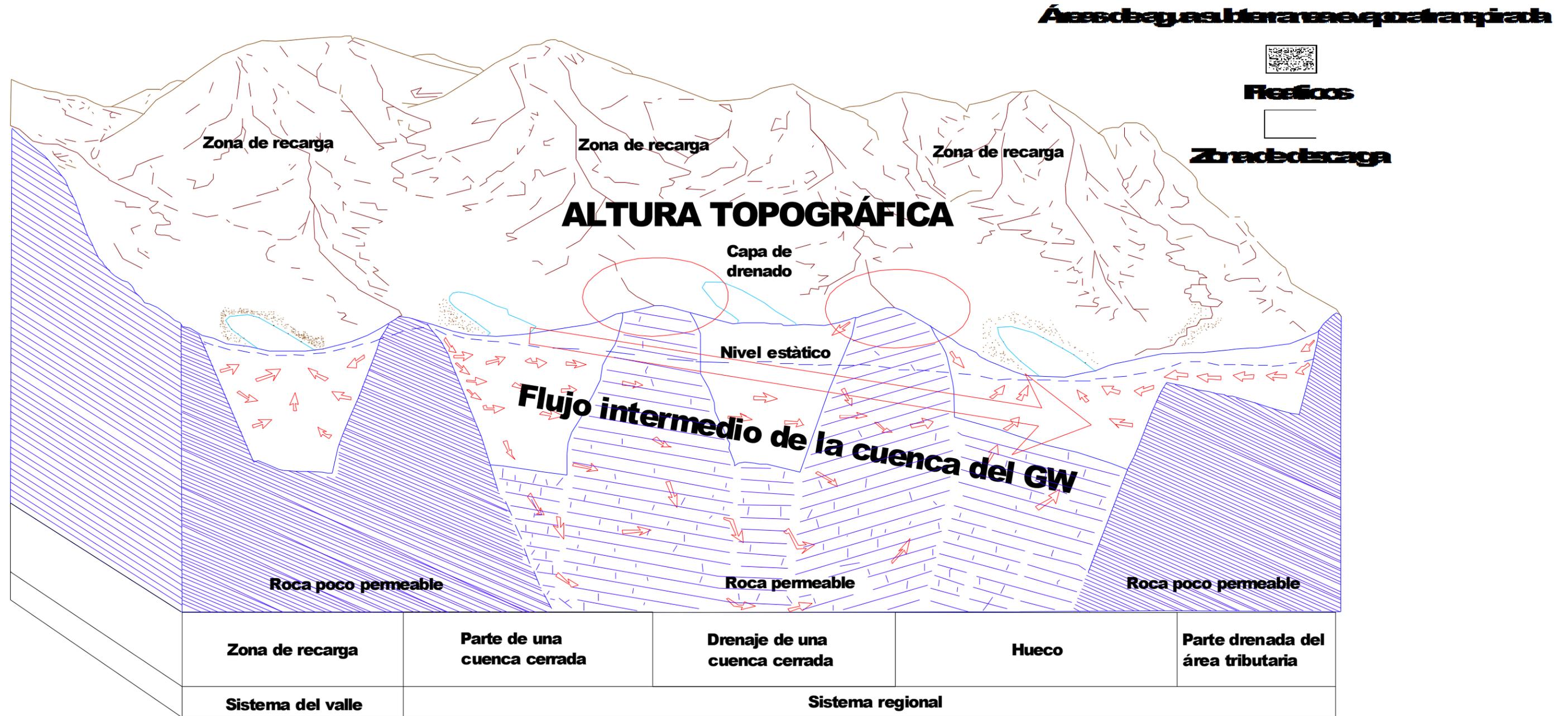


Figura 6.1 Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero en el valle El Hundido.
Fuente: Rodríguez-Arriaga

6.3. Logros.

En el momento que se ha logrado establecer la conexión que se tiene entre estos dos valles se logro con esta investigación obtener el decreto de veda en el valle El Hundido **Figura 6.2**

Lunes 23 de abril de 2007

DIARIO OFICIAL

DECRETO por el que por causas de utilidad e interés público se veda la extracción, uso, aprovechamiento y explotación de las aguas del acuífero El Hundido en el Estado de Coahuila.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Presidencia de la República.

FELIPE DE JESÚS CALDERÓN HINOJOSA, Presidente Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, en uso de la facultad que me confiere el artículo 89, fracción I, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y con fundamento en el párrafo quinto del artículo 27 Constitucional y en lo dispuesto en los artículos 4, 6, fracciones II y III, 7, fracciones II y IV, 7 BIS, fracciones IV a VII, 38, 39 BIS, fracción I, 40 y 43 de la Ley de Aguas Nacionales, y

Figura 6.2 Decreto de veda

Con esto se cerraron dos de las tres agropecuarias de la zona que generaban una sobreexplotación del acuífero impactando de forma directa a la reserva ecológica de Cuatro Ciénagas Coah. .

Con el paso del tiempo se ha logrado que el acuífero El Hundido que en el 2007 se encontraba sobreexplotado a la fecha se haya recuperado según informes de CONAGUA en su boletín **acuífero (0506) El Hundido** publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto de 2009.

6.4. Recomendaciones.

Es necesario llevar a cabo un monitoreo en el valle El Hundido a fin de mitigar la acción de contaminantes (pesticidas y no pesticidas) al acuífero así como la aplicación de técnicas para controlar los procesos erosivos dejados por los desmontes en aquellas áreas asignadas a cultivos que requieran grandes volúmenes de agua.

Hacer una concientización de las comunidades y hacer programas para tener un aprovechamiento óptimo de las tierras de cultivo de acuerdo a las características del valle y su calidad de agua, con esto ayudando a mejorar la calidad de vida en las comunidades.

Bibliografía

- Adams, L. H., and Gibson, R.E., (1930). The melting curve of sodium chloride dehydrate, *Chem. Soc. Jour.*, v. 52, p. 4252-4264.
- Aguilar G. . *Herminia III Simposium de Geología de subsuelo Zona Noreste*, Ed. Petróleos Mexicanos Exploración
- Alfonso, Z. J., (1978), Geología regional del sistema sedimentario Cupido, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros Boletín, v. 30, n.1, 2, p. 1-55.
- Anderson, G.M., (1983). Some geochemical aspects of sulfide precipitation in carbonate rocks. In: Kisvarsanyi, G., Grant, S.K., Pratt, W.P.,
- Anderson, T. H. and Schmidt, V. A., (1983), The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time, *Geological Society of American Bulletin*, v. 94, p. 941-966.
- Aranda-Gómez.J.J., Housh, T.B., Luhr, J.F., Henry, C.D., Becker, T., and Chávez-Cabello, G., (2005a). Reactivation of the San Marcos fault during mid-to late- Tertiary extention, Chihuahua: México, *Geological Society of America Special Paper*.
- Arne, D.C., Curtis, L.W., Kissin, S.A., (1991). Internal zonation in a carbonate-hosted Zn-Pb-Ag deposit, Baffin Island, Canada, *Economic Geology*, v. 86, p. 699-717.
- Arne, D.C., Kissin, S.A., (1989). The significance of the «diagenetic crystallization rhytmities» at Nanisivik Pb-Zn-Ag deposit, Baffin Island, Canada, *Mineral Deposita*, n. 24, p. 210-218.
- Back William /Resenshein Joseph S. (1988) *Geology of North America Volumen 0-Z Hidrogeology*, Ed. The Geological Society of America.
- Back William /Resenshein Joseph S. (1988) *Geology of North America Volumen I geology* Ed. The Geological Society of America.
- Barnes, H.L., (1983). Ore deposition in Mississippi Valley deposits. Kisvarsanyi, G., Grant, S.K., Pratt, W.P., Koenig, J.W. (eds.), *International Conference on MVT lead-zinc deposits*. University of Missouri-Rolla, p. 77-85.
- Barton, P.B. Jr., (1967). Possible role of organic matter in the precipitation of the Mississippi Valley ores, *Economic Geology Mon.* 3, p.371-378.
- Belkin H. E. . (1994). Microthermometric investigations: Th and Tm. Practical and Theoretical aspects. In *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*, Short course of the working group (IMA) "inclusions in minerals" Benedetto De Vivo and Maria Luce Frezzotti eds. Pontignano-Siena, p. 7-23.
- Beraldi H. (2011). **ESTROMATOLITOS** .
<http://profesores.sanvalero.net/~w0548/FSVdocumentos/Estromatolitos.pdf>
- Berner, R.A. (1971). *Principles of Chemical Sedimentology*, McGraw-Hill, New York.
- Bischoff, J.L. and Pitzer, K.S. (1989). Liquid-vapor relations for the system NaCl-H₂O: Summary of the P-T-x, surface from 300°C a 500°C, *American Journal of Science*, p. 217-248.
- Blount , C.W., F.W. Dickson, (1969). Solubility of anhydrite (CaSO₄) in NaCl-H₂O from 100 to 450°C and 1 to 1000 bars, *Geochim. Cosmochim. Acta* 33, p. 227-245.
- Bodnar R. J. (2003a). Introduction to fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, y D. Marshall, eds..*Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*, Mineralogical Association of Canada, short Course Series v. 32, p.1-8.
- Bodnar R. J. (2003b). Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, y D. Marshall, eds..*Fluid Inclusions: Analysis and*

- Interpretation, Mineralogical Association of Canada, short Course Series v.32, p. 81-100.
- Bodnar R. J. (2003c). Reequilibration of fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, y D. Marshall, eds..Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation, Mineralogical Association of Canada, short Course Series v. 32, p. 213-231.
- Bodnar R. J. and Vityk M. O. (1994). Interpretation of microthermometric data for H₂O-Na-Cl fluid inclusions. In Fluid inclusions in minerals: methods and Applications. Short course of the working group (IMA) "inclusions in minerals", Benedetto De Vivo and Maria Luce Frezzotti eds. Pontignano-Siena, p. 117-130.
- Brudtorb de MK, Ramos V, Barbieri M, Ametrano S (1982). The evaporitic celestite-barite deposits of Neuquén, Argentina, Mineral Dep. 17, p. 423-426.
- Bullard, E. C., Everett, J. E., Smith, A. G., (1965). The fit of the continents around the Atlantic; A symposium on continental drift. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, series A, v. 258, p. 41-51.
- Burkhard A (1978). Baryt-celestin und ihre Mischkristalle aus Schweizer Alpen und Jura. Schweiz, Mineral Petrogr, v. 58, p. 1-95.
- Burrows, R. H., (1909). Geology in northern Mexico, Mining and Scientific Press, v. 99, p. 290-294.
- Campos Aranda (1986) Procesos del Ciclo Hidrológico D.F. Ed. U.A.S.L.P.
- Candelilla (2008) <http://www.candelilla.org/es/>
- Carlson, E.H. (1987). Celestine replacements of evaporates in the Salina Group, Sedimentary Geology, v. 54, p. 93-112.
- Charleston, S., (1973). Stratigraphy, tectonics and hydrocarbon potential of the lower Cretaceous, Coahuila series. Coahuila México, University of Michigan [Ph. D. Dissertation], p. 268.
- Charleston, S., (1981), A summary of the structural geology and tectonics of the state of Coahuila, Mexico, *en* Schmidt, C. I., Katz, S. B., (eds.), Lower Cretaceous stratigraphy and structure, northern Mexico: West Texas Geological Society, Field Trip Guidebook, Publication, 81-74, 28-36
- Charleston, S., (1981). A summary of the structural geology and tectonics of the State of Coahuila, Mexico, in Schmidt, C. I., y Katz, S. B., Eds., Lower cretaceous stratigraphy and structure, northern Mexico, West Texas Geological Society Field Trip Guidebook, Publication, p. 81-74, p. 28-36.
- Chaves Cabello G. (2005) La falla San Marcos: una estructura jurásica de basamentos multirreactivada del noreste de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Tomo LVII Num. 1,2005, p 27-52
- Claypool GE, Holser, WT, Kaplan, IR, Sakai, H, Zak, I., (1980). The age curves of sulfur and oxygen in marine sulfate and their mutual interpretations, Chem Geol v. 28, p. 199-260.
- CNA (2010) Base de datos de CNA <http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=62&n3=62>
- Cody, R.D. y Hull, A.B. (1980). Experimental growth of primary anhydrite at low temperatures and water salinities, Geology, p. 505-9.
- Conklin, J., y Moore, C., (1977), Paleoenvironmental analysis of the Lower Cretaceous Cupido Formation, northeast Mexico, in Bebout, D.G., and Loucks, R.G., eds., Cretaceous carbonates of Texas and Mexico, University of Texas Bureau of Economic Geology Report of Investigations v. 89, p. 302-323.
- Consejo de Recursos Mineros (1991) Monografía geológico-minera del estado de Zacatecas. Secretaría de Energía, minas e industria para estatal

- subsecretaría de minas e industria básica México Ed. R.M. Consejo de Recursos Mineros.
- Corbella, M., Ayora, C., Cardellach, E., (2004). Hidrotermal mixing, carbonate dissolution and sulfide precipitation in Mississippi Valley-type deposits, *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 344-357.
- Custodio & Llamas (1983) *Geohidología* Ed. Omega Tomo I Anexo 2
- Dana Cornelius S. Hulbut J.R.(1960) Manual de Mineralogía Barcelona Ed. Reverte S.A.
- Dash, E.J. and Biscaye, P.E., (1971). Isotopic composition of strontium in Cretaceous to Recent pelagic foraminifera, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.11, p. 201-204.
- De Cserna, Z., (1956). Tectónica de la Sierra Madre Oriental de México entre Torreón y Monterrey, *Publicaciones del XX Congreso Geológico Internacional, Monografía*, p. 60.
- Denilson, R.E., Burke, Jr., W.H., Hetherington, E.A. and Otto, J.B., (1970). Basement rock framework of parts of Texas, southern New Mexico and northern Mexico. In: K. Seewald and D. Sundeen (Editors), *The Geologic Framework of the Chihuahua Tectonic Belt*. West Texas Geol. Soc., Midland, Tex., p. 3-14.
- Diamond, L. W. (2003). Systematics of H₂O inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, short Course Series vl. 32, p. 55-81.
- Dickinson, W.R., and Coney, P.J. (1980). Plate tectonic constraints on the origin of the Gulf of México and the early opening of the central north Atlantic: Baton Rouge, Louisiana State University, p. 27-36.
- Dumble, E.T., (1982). Notes on the geology of the Valley of the middle Rio Grande, *Geological Society of America Bulletin*, v.3, p. 219-230.
- Dzulynski, S., Sass-Gustkiewicz, M., (1985). Hydrothermal karst phenomena as a factor in the formation of Mississippi Valley-type deposits. In: Wolf, K.H. (ed.), *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits*, v. 13, Amsterdam, Elsevier Science Publications Company, p. 391-439.
- Eguiluz, De A., S., (2001). Geologic Evolution and Gas Resources of the Sabinas Basin in Northeastern México.
- En: Fenoll Hach-Alí, P., Torres-Ruiz, F., Gervilla, F. (eds.): *Current Research in Geology Applied to Ore Deposits*. Universidad de Granada, p. 11-14.
- Euger, H.P. y Hardie, L.A. (1978). Saline lakes: In: *lakes: Chemistry, Geology, Physics* (ed. A. Lerman) Springer, New York; p. 237-334.
- Faure, G., (1978). *Principles of Isotope Geology*. Wiles, New York, N.Y., p. 464.
- Feeley GW, Kulp J.L., (1957). The origin of Gulf Coast salt dome sulfur deposits, *Bull Am Assoc Petrol Geol* v. 41, p.1802-1853
- Fontboté, L., (1993). Self-organization fabrics in carbonate-hosted ore deposits: the example of diagenetic crystallization rhythmites (DCRs).
- Gil, P.P., Martínez, R., Velasco, F., (1984). Ritmitas diagenéticas en las mineralizaciones de hierro de Bilbao. *Congreso Español de Geología*, v. II, p. 491-499.
- Gil, P.P., Velasco, F., (1992). Génesis de los yacimientos de hierro de Bilbao (Cretácico inferior, Cuenca Vasco-Cantábrica). *Boletín Sociedad Española Mineralogía*, v. 15, p. 238-242.
- Goldhammer, R. K., Lehmann, P. J., Todd, R. G., Wilson, J. L., Ward, W. C., Johnson, C. R., (1991). Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental, northeast Mexico, a field guide-book. Gulf Coast Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 85.
- Goldhammer, R.K., (1999). Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast of Mexico, *in* Bartolini, C., Wilson, J.L., and Lawton, T.F., eds., *Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of*

- North-Central Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of North America Special Paper 340. p. 1-58.
- Goldstein Robert H. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds..Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada, short Course v.32, p. 9-49.
- Goldstein, R. H. And Reynolds, T. J. (1994). Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM Short course 31, Tulsa, p.199.
- Goldstein, R. H. And Reynolds, T. J. (1994): Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM Short course 31, Tulsa, p.199.
- González- Sanchez F. Antoni Camprubí i Cano González-Partida E., (2007 b). Regional stratigraphy and distribution of epigenetic stratabound celestine, fluorite, barite and Zn-Pb deposits in the MVT Province of Northeastern México. (enviado a Mineralium Deposita) p. 40.
- González- Sanchez F., Puente- Solis R., González-Partida E., Antoni Camprubí i Cano,(2007^a). Estratigrafía del Noreste y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, (en prensa) p.35.
- González-García, R., (1976). Bosquejo Geológico de la Zona Noreste: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v.28, p. 1-50.
- González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Grimmer, J.O.W. Pironon, J., (2002). Petroleum-Rich Fluid Inclusions in Fluorite, Purísima Mine, Coahuila, Mexico. International Geology Review, v. 44, p. 755-764.
- González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Grimmer, J.O.W., Pironon, J., Mutterer, J. Levresse, G., (2003). Fluorite deposits at Encantada- Buenavista, Mexico: products of Mississippi Valley type processes. Ore Geology Reviews, v. 23, p. 107-124.
- Grajales-Nishimura, J. M., Terrell, D. J., y Damon, P. E., (1992). Evidencias de la prolongación del arco magmático cordillerano del Triásico Tardío-Jurásico en Chihuahua, Durango y Coahuila. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 42, p. 1-18.
- Halas S., y Miodchowski L.; (1978). Isotopic composition of oxygen in sulfate minerals of calcium and strontium and in water sulfates from various regions of Poland. Universitatis Mariae Curie-Sklodowska, v. 33, p. 115-130.
- Handschy, J.W. Keller, G.R., and Smith, K.J., (1987).The Ouachita system in northern Mexico. Tectonics, v. 6, p. 323-330.
- Hanor JS (1968). Frecuency distribution of composition in the barite-celestite series. Am mineral 53, p.1215-1222.
- Hanor JS (1979). Sedimentary genesis of hydrothermal fluids. In Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd. Ed. HL Barnes (Ed) John Wiley and Sons, New York, p. 137-168.
- Hanor JS (1994). Origin of saline fluids in sedimentary basins. In Geofluids: Origins and migration of luids in sedimentary basins. J. Parnell (Ed) Geol. Soc. London Spec. Pub. 78, p.151-174.
- Hanor JS (1996a). Variations in chloride as a driving force in siliciclastic diagenesis. In Siliciclastic Diagenesis in Fluid Flow: Concepts and Aplications. LJ Crossey, R Loucks, MW Totten (Eds) Soc. Econ. Paleo Mineral Spec. Pub. 55, p. 3-12.
- Hanor JS (2004). A model for the origin of large carbonate and evaporite-hosted Celestine (SrSO₄) deposits. Journal of sedimentary Research. v. 74, p.168-175.
- Hanor JS, (2000). Barite-celestine geochemistry and environments of formation: Reviews of Mineralogy and Geochemistry, v. 40, p. 193- 275.
- Hardie, L.A. (1967). The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. In Special Publication 5, International Association of Sedimentologists, p. 187-210.

- Hardie, L.A., Eugster, H.P., (1970). The evolution of closed-basin brines, Mineral Soc. Am. For shallow clastic accumulation; *Sedimentol* v. 16, p.187-220.
- Harvie, C.E., Eugster, H.P. y Weare, J.H. (1982). Mineral equilibria in the six-component seawater system, Na-K-Mg-Ca-SO₄-Cl-H₂O at 25 °C. 2 Composition of the saturated solutions. *Geochimica et Cosmochimica, Acta* 48, p. 723-51.
- Haynes, F. M.. (1985). Determination of fluid inclusion composition by sequential freezing. *Econ. Geol.*, v.80, p.1436-1439.
- Hendry JP, Taberner C, Marshall JD, Pierre C y Carey PF, (1999). Coral reef diagenesis records pore-fluid evolution and paleohydrology of a siliciclastic basin margin succession (Eocene South Pyrenean foreland basin, northeastern Spain. *Geological Society of America. Bulletin* v.111, p. 395-411.
- Humphrey, W.E., (1949). Geology of the Sierra de los Muertos-Area, Mexico (with descriptions of Aptian Cephalopods-from the La Peña Formation). *Geol. Soc. Am. Bull.* 60, p. 80 – 176.
- Humphrey., W.E., y Díaz, T., (1956). Jurassic and Lower Cretaceous stratigraphy and tectonics of northeastern Mexico: Unpublished manuscript.
- Humphrey, W.E., and Díaz, T., (1956). Correlation of the Mesozoic strata of northeast Mexico.- *GCAGS, Trans.*, v. 6, p. 32-34.
- IGME (2008)http://aguas.igme.es/igme/publica/art_2linea_2.htm
- Imlay, R. W., (1937). Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, México. *Geological Society of American Bulletin*, v. 48, p. 587-630.
- Imlay, R.W., (1936). Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico, part IV, geology of the western part of the Sierra de Parras: *Geological Society of America Bulletin*, v. 47, p. 1091-1152.
- Imlay, R.W., (1940). Lower Cretaceous and Jurassic Formations of Southern Arkansas and Their Oil and Gas Possibilities. *Arkansas Geological Survey, Information Circular* 12.
- Imta, CNA, SEMARNAT, INE. (2004) *Estudio hidrogeológico de los acuíferos El Hundido y Cuatro Ciénegas. Coahuila. Ed. CONAGUA.*
- INEGI (2010) Base de datos de INEGI <http://www.inegi.gob.mx/geo/default.asp?c=322>
- Jebra, M., (1992). Les textures intra-filonniennes, marqueurs des conditions hydrauliques et tectoniques., *Chron. Rech. Min.*, n. 506, p. 25-35.
- Jensen ML (1962). Biogenic sulfur and sulfide deposits. In: Jensen ML (ed) *Biochemistry of sulfur deposits, International Symposium on the Biochemistry of Sulfur Isotopes, National Science Foundation Symposium*, p. 1-15
- Jones, N. W., McKee, J. W., Marquez, D. B., Tovar, J., Long, L. E., Laudon, T. S., (1984). The Mesozoic La Mula Island, Coahuila, México: *Geological Society of America Bulletin*, v. 95, p. 1226-1241.
- Jones, N.W., Lopez, R., and Cameron, K.L., (1995). Linda Vista pluton and latest Permian-Late Triassic orogeny, Las Delicias area, Coahuila, México, *Geological Society of America Abstract With Programs*, v. 27, no. 6.
- Keevil, N.B., (1942). Vapor pressures of aqueous solutions at high temperatures: *American Chemical Society Journal*, v. 64, p. 841-850.
- Kelly, W.A., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico, part 2, Geology of the mountains bordering the valleys of Acatita and Las Delicias: *Geological Society of America Bulletin*, v. 47, p. 1009-1038.
- Kennedy, G.C., Wasserburg, G.J., Heard, H.C., and Newton, R.C., in press, The upper three phase regions in the system SiO₂-H₂O: *Am. Jour. Sci.*
- Kesler SE, Jones LM (1981). Sulphur- and Strontium- isotopic geochemistry of celestite, barite and gypsum from the Mesozoic Basins of north eastern Mexico. *Chem. Geol.* 31, p. 211-24.

- Kesler Stephn E; Jones Lois M. (1981). Sulfur and strontium isotopic geochemistry of celestite, barite and gypsum from the Mesozoic basins of northeastern Mexico. *Chemical Geology* 31; p. 211-224.
- Kinsman, D.J.J. (1976). Evaporites: relative humidity control of primary mineral facies. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, p. 273-9.
- Koenig, J.W. (eds.), International Conference on MVT lead-zinc deposits. University of Missouri-Rolla, p: 61-76.
- Kusaaba, M. y Robinson B.W.; (1977). Oxigen and sulfur isotope equilibria in the BaSO₄- HSO₄-H₂O system from 110° a 350° C and applications. *Geochim. Cosmochim; Acta* 41, p. 1033-1041.
- Kushnir SV (1986). The epigenetic celestine formation mechanism for rocks containing CaSO₄ *Geochem. Int'l* 23, p. 1-9.
- Leet y judson(1980) Fundamentos de Geología Física, México Ed. Limusa
- Lehmann, C., Osleger, D.A., Montañez, I.P., Sliter, W., Arnaud-Vanneau, A., and Banner, J., (1999). Evolution of Cupido and Coahuila carbonate platforms, Early cretaceous, northeastern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, v. 111, no. 7, p. 1010-1029.
- Lesser . (2001) Estudio de la evaluación hidrogeológica e isotópica en el Valle el Hundido Coahuila. Gerencia de Aguas subterráneas, Comisión Nacional del Agua, contrato GAS-006-PRO01.
- López Ramos E., (1980). *Geología de México*. Tomo II, 2 Ed., p. 454.
- López-Ramos, E., (1981). Paleogeografía y tectónica del Mesozoico en México: Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista del Instituto de Geología*, v.5, p. 158-177.
- Machel HG (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings old and new insights. *Sedim Geol* 140, p.143-175
- Machel HG, Krouse HR, Sassen R (1995). Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Appl Geochem* 10, p. 373-389
- Machel, H.G., (1987). Saddle dolomite as a by-product of chemical compaction and thermochemical sulfate reduction. *Geology*, v. 15, p. 936-940.
- Marmissolle-Daguerre D. (1985) Evaluaciones de Formaciones en México 1984, México, Ed. Schumberger Cap1.
- Marroquín J. S., G. Borja, R. Velásquez R y J. A. de la Cruz. 1981. Estudio ecológicodasonómico de las azonas áridas del norte de México. Pub. Esp. del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México, D.F. México. 166 p.
- Martin JM, Ortega-Huertas M y Torres-Ruiz J (1984). Genesis and evolution of strontium deposits of the Granada basin (south-eastern Spain): evidence of diagenetic replacement of a stromatolite belt. *Sedimentary Geology*. v.39, p.281-298.
- McCaffrey, M.A., Lazar, B., and Holland, H.D., (1987). The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br and K with halite: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 57, p. 928-937.
- McKee, J. W., Jones, N. W. and Long, L. E., (1984). History of recurrent activity along a major fault in northeastern Mexico. *Geology*, v. 12, p. 103-107.
- McKee, J. W., Jones, N. W. and Long, L. E., (1990). Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, Mexico, *GSA Bulletin*, v. 102, p. 593-614.
- McKee, J. W., Jones, N. W., and Anderson, T. H., (1988). Las Delicias basin: A record of late Paleozoic arc volcanism in northeastern Mexico. *Geology*, v. 16, p. 37-40.
- McKee, J. W., Jones, N. W., Long, L. E., (1990), Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 102, 593-614

- McLimans RK (1977). Geological fluid inclusion and stable isotopes studies of the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin. PhD thesis, Pennsylvania State University, State College, p. 175.
- Mendoza, A.E., (1976). Estudio Geológico Económico de la Cuenca Carbonífera del Edo. de Coahuila. Tesis profesional, ESIA-IPN.
- Miller, M. M., (2004b). Fluorspar. USGS Mineral Information, U. S. Geological Survey, Commodity Statistics and Information, Publications, Mineral Yearbook, 2004. p. 27.1 - 27.6. On line.
- Milliman JD (1974). Marine Carbonates: New York, Springer-Verlag, p.370.
- Müller G (1962). Zur Geochemie des Strontiums in ozeanen evaporiten unter besonderer Berücksichtigung der sedimentären Celestin- Lagerstätten von Hemmelte West. Geologie, Beiheft 35, p. 90.
- Müller G y Puchelt H, (1961). Die Bildung von Celestin (SrSO₄) aus Meerwasser: Naturwissenschaften, v 48, p. 301-302.
- Murray R. Spiegel (1982) Estadística México Ed. Mc. Graw Hill
- Ober, J. A., (2004). Strontium. USGS Mineral Information, U. S. Geological Survey, Commodity Statistics and Information, Publications, Mineral Yearbook, 2004. p. 73.1 – 73.4. On line.
- Ohle, E.L., (1985). Breccias in Mississippi Valley-Type deposits. Economic Geology, v. 80, p. 1736-1752.
- Ohmoto H, Lasaga AC (1982). Kinetics of reactions between aqueous sulfates and sulfides in hydrothermal systems. Geochim Cosmochim Acta 46, p. 1727-1745.
- Ohmoto, H. y Rye, R.O. (1979). Isotope of sulfur and carbon, in Barnes, H.L. Ed. Geochemistry of Hydrothermal deposits, John Wiley y Sons, p. 509-567.
- Ohmoto H., (1972). Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Econ. Geol. V. 67; p. 551-578.
- Olaussen S (1981). Formation of celestite in the Wenloc, Oslo region, Norway evidence for evaporitic depositional environments: Journal of Sedimentary Petrology. v.51, p. 37-46.
- Ortega-Gutierrez, F., Mitre-Salazar, L.M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J.J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., (1992). Carta Geológica de la República Mexicana, Quinta Edición, Escala 1:2 000 000; universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales. 1 mapa con texto explicativo, p.74.
- Padilla Sánchez, R.J., (1986). Post Paleozoic tectonics of northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico: Geofísica Internacional, v.25. p.157-206.
- Padilla y Sánchez, R. J., (1982), Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, Mexico: Austin, Texas, University of Texas, Tesis doctoral, 217 p.
- Padilla y Sánchez, R. J., (1982). Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México. Austin, Texas, University of Texas [Ph D. Thesis], p. 217.
- Padilla y Sánchez, R. J., (1986), Post Paleozoic tectonics of northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico: Geofísica Internacional, 25, 157-206
- Peterman, Z.E., Hedge, C.E. and Tourtelot, H.A., (1970). Isotopic composition of Sr in sea-water throughout Phanerozoic time. Geochim. Cosmochim. Acta, 34, p. 105-120.
- Pierce Suzanne (2002) The formation and water resource management of the Cuatro Ciénegas de Carranza Valley, Coahuila, México.. University of Texas at Austin, EUA, webspace.utexas.edu/sawp33/www/index.html.

- Pindell, J. L., (1985). Alleghenian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and Proto-Caribbean: Tectonics, v. 4, p. 1-39.
- Pindell, J. L., (1993). Regional synopsis of the Gulf of Mexico and Caribbean evolution, in Pindell, J.L., and Perkins, B.F., eds., Mesozoic and early Cenozoic development of the Gulf of Mexico and Caribbean region: Gulf Coast Section, SEPM (Society for Sedimentary Geology), Foundation, 13th Annual Research Conference, p. 251-274.
- Pindell, J. L., and Barrett, S. F., (1990). Geological evolution of the Caribbean region; A plate-tectonic perspective, The Geology of North America, v. H, The Caribbean Region. The Geological Society of America, p. 405-432.
- Plachy, J., (2003). Zinc. USGS Mineral Information, U. S. Geological Survey, Commodity Statistics and Information, Publications, Mineral Yearbook, 2004. p. 84.1 – 84.5. On line.
- Pohl, W., Siegl, W., (1986). Sediment-hosted magnesite deposits. In Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, ed. Wolf, K.H. Regional studies and specific deposits, v. 14, p. 223-300.
- Prieto M. Fernández González A (1993). Crystallization of solid solutions from aqueous solutions in a porous medium: Zoning in (Ba, Sr)SO₄. Geol. Mag. 130: 289-299.
- Prieto M. Fernández González A, Plutnis A, Fernández Díaz (1997). Nucleation, growth, and zoning phenomena in crystallizing (Ba, Sr)CO₃, Ba(SO₄, CrO₄), (Ba,Sr)SO₄, y (Cd, Ca)CO₃ solid solutions from aqueous solutions. Geochim Cosmochim Acta 61: p. 3383-3397.
- Prieto, M., Fernández-González, A., Putnis, A., and Fernández-Díaz, L., (1997). Nucleation, growth, and zoning phenomena in crystallizing (Ba, Sr)CO₃, Ba(SO₄, CrO₄), Ba(SO₄, CrO₄), (Ba,Sr)SO₄, and (Cd,Ca)CO₃ solid solution from aqueous solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 61, p. 3383-3397.
- Puente-Solís, R., González-Partida, E., Tritlla, J., Levresse, G., (2005 a). Distribución de los depósitos estratoligados de Barita, Celestita, Fluorita y Pb-Zn en el noreste de México. Convención Internacional de la Asociación Nacional de ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Memorias No. XXVI, p. 95-98.
- Radke, B.M., Mathis, R.L., (1980). On the formation and occurrence of saddle dolomite. Journal of Sedimentary Petrology, v. 50, 4, p: 1149- 1168.
- Ramos-Rosique A, Villareal-Fuentes J, González-Partida E, Tritlla J, Levresse, G., (2005). Los Yacimientos estratoligados de celestita de El Venado y El Volcán en la Sierra de Los Alamitos, Coahuila, México. Conv Intern AIMMG, Mem 26. p. 95-98
- Reesman RH (1968). Strontium Isotopic composition of gangue minerals from hydrothermal veins. Economical Geology v. 63; p. 731-736.
- Robeck R.C., Pesquera V.R., Ulloa A.S., (1956). Geología y depósitos de carbón de la región Sabinas, estado de Coahuila. INIRM (CRM) en colaboración con el USGS, XX Congreso Geológico Internacional, p. 156.
- Rodriguez M. J. M (2007) Tectonic fame rock the Hundido valley Ed. Congreso de sismología Moscú
- Rodriguez. M. J. M., Souza S. V., Arriaga Díaz de León L. E (2007) The overexploitation on the aquifer of the Hundido valley and corresponding ecological impact on the reserves id Cuatro Ciénegas valley if Coahuila, México. Ed. SERBIA Water Resouerses & environmental problems in Karst.
- Roedder, E. (1976). Fluid inclusion evidence on the genesis of ores in sedimentary volcanic rocks En: K. H. Wolf (edit.), Handbook of strata-bound and stratf ore deposits 2, p. 69-110.
- Roedder, E. (1984). Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, 12, Miner. Soc. Amer., p. (1984).

- Roedder, E. (1962a). Ancien fluids in crystals. *Sc. Am.*, 207, p. 38-47.
- Roedder, E., (1981). Origin of fluid inclusions and changes that occur after trapping. In Hollister & Crawford (eds.). *Miner. Assoc. Canada. Short Course in fluid inclusions*, v. 6, p. 101-137.
- Rueda-Gaxiola J. (1998) El origen del Golfo de México y de sus subcuencas petroleras mexicanas, con base en la palineostratigrafía de Lechos Rojos. Ed. *Revista mexicana de ciencias geológicas*. Vol. 15 No 1. 1998 P 78-86.
- Salvador, A., (1987). Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of Gulf of Mexico basin: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 71, p. 419-451.
- Salvador, A., (1991a.). The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America. *Geology of North America*, p. 568.
- Salvador, A., (1991b). Triassic-Jurassic: in Salvador, A., ed., *The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado*. Geological Society of America, *Geology of North America*, v. J, p. 131-180.
- Salvador, A., (1991c). Origin and development of the Gulf of Mexico basin: in Salvador, A., ed., *The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado*, Geological Society of America. *Geology of North America*, p. 389-444.
- Salvador, A., Green, A. R., (1980). Opening of the caribbean Tethys, in J. Auboin et al., coordinators, *Geologie de Chaines Alpines Issues de la Tethys—Geology of the Alpine chains born of the Tethys: Bureau Recherche Geologique Minerieres*, memoir No. 115, p. 224- 229.
- Samson, I. & Walker, R. T. (2000). Cryogenic Raman spectroscopic studies in the system -NaCl-CaCl₂- H₂O and implications for low temperature phase behavior in aqueous fluid inclusions. *Can. Mineral*. 38, p. 35-43.
- Sangster, D.F., (1990). Mississippi Valley-type and sedex lead-zinc deposits: a comparative examination. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect B)*, p. 21-42.
- SARH, (1980) Estudio geohidrológico preliminar en la zona de Cuatro Ciénegas – Ocampo, Coahuila. Elaborado por la compañía ININSA, S.A. para la subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas.
- Scholle PA, Stemmerik L, Harpoth O (1990). Origin of major karst-associated Celestine mineralization in Karstrynggen, Central East Greenland. *J. Sed Pet* 60, p. 397-410.
- Schreiber BC, El-Tabakh M (2000). Deposition and early alteration of evaporites. *Sedimentology* v. 47, p. 215-238
- Schumbergerber (1984) *Evolución de Formaciones en México*. Ed. Schumbergerber.
- Searls JP (1997). Barite. *US Geol Survey Minerals Inf Circ*, p. 7.
- Secretaría de Economía, (2004). Minería, Informe de la minería mexicana 2004, Comportamiento de los Mercados Internacionales, *Minerales No Metálicos*, <http://www.economia.gob.mx>. (Consulta octubre del 2005)
- Shepperd, T. J. (1985). *A practical guide to fluid inclusion studies*. Ed. Blackie, p. 23.
- Sibson R.H., (1990). Faulting and fluid flow. In Nesbitt B.E. *Short Course on fluids in tectonically active regime of the continental crust*, *Min. Ass. Can.*, p.93-132.
- Silver, L.T. and Anderson, T.H., (1974). Possible left-lateral early to middle Mesozoic disruption of the southwestern North American Craton margin, *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 6, p. 955.
- Smith, C. I., (1981). Review of the geologic setting, stratigraphy and facies distribution of the Lower Cretaceous in northern Mexico, in *Lower Cretaceous stratigraphy and structure, northern Mexico*. West Texas Geological Society Field Trip Guidebook 81-74, p. 1- 27.
- Smith, J. R., (2003). Lead. *USGS Mineral Information*, U. S. Geological Survey, *Commodity Statistics and Information, Publications, Mineral Yearbook*, 2004. p. 43.1 – 43.8. On line.

- Smith. C.I., ed., Lower Cretaceous stratigraphy and structure, northern Mexico: West Texas Geological Society Publication 81-74, p. 1- 27.
- Soegaard, K., Giles, K. A., Vega-Vera, F. J., and Lawton, T. F., (1997). Structure, stratigraphy, and paleontology of Late Cretaceous-Early Tertiary Parras-La Popa foreland basin near Monterrey, northeast Mexico. American Association of Petroleum Geologists Guidebook to Fieldtrip 10, p. 136.
- Sorby, H. C.,(1858). On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. Geol. Soc. London Quart. Jour., 14, p. 453-500.
- Souza V.(2004) Cuatro Ciénegas: Oasis en el desierto de Coahuila. Escenario de una gran diversidad biológica. Revista Ciencia y Desarrollo Gutiérrez, G. Nueva Época, volumen 30, número 176. México
- Stevanovic Zoran & Milanovic Petar (2005) Water resources & environmental problems in Karts Belgrade –Kotor Serbia and Montenegro Ed. Nacional Committee of the international Association of Hydrogeologists (IAH) of Serbia and Montenegro
- Steven C. Chaparra/ Raymond p. Canale (1985) Métodos Numéricos para Ingenieros con Aplicaciones en computadoras personales México Ed. Mc. Graw Hill
- Taberner C., Marshall J.D., Hendry J.P., Pierre C., y Thirwall M.F.:(2002). Celestite formation, bacterial sulphate reduction and carbonate cementation of Eocene reefs and basinal sediments (Igalada, NE Spain); Sedimentology, v. 49; p. 171-90.
- Thode H.G., y Monster J.; (1965). Sulfur isotope geochemistry of petroleum, evaporates and ancient seas. In: A. Young and J.E. Galley (Editors), Fluids in subsurface environments, Am. Assoc. Pet. Geol.; Mem. 4, p. 367-377.
- Torres, R., Ruiz, J., Patchett, P.J., and Grajales, J.M., (1999). A Permo-Triassic continental arc in eastern Mexico: Tectonic implications for reconstruction of southern North America, in Bartolini, C., Wilson, J.L., and Lawton, T.F., eds., Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of North America Special Paper 340. p. 1-58.
- Touret Jacques L. R. (1994). Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic environments. In Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Short course of the working group (IMA) "inclusions in minerals" Benedetto De Vivo and Maria Luce Frezzotti eds. Pontignano-Siena p. 251-269.
- Tritlla, J., Canals, A., (1997). Mineralizaciones estratoligadas de metales base en carbonatos y rocas siliciclásticas; en J.C. Melgarejo (ed.): Atlas para el estudio de las asociaciones minerales en lámina delgada; p. 272-286. Ediciones de la Universitat de Barcelona, ISBN: 84-98824-1 Alt, J.C.
- Tritlla, J., González-Partida, E., Levresse, G. y Corona-Esquivel, R., (2005). Depósitos de Pb-Zn-Ba-F-(Cu-Sr) epigenéticos estratoligados en series sedimentarias en relación con salmueras de cuenca: depósitos del tipo "Mississippi Valley" (MVT) y similares: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- Tritlla, J., González-Partida, E., Levresse, G. y Corona-Esquivel, R., (2005a). Depósitos de Pb-Zn-Ba-F-(Cu-Sr) epigenéticos estratoligados en series sedimentarias en relación con salmueras de cuenca: depósitos del tipo "Mississippi Valley" (MVT) y similares: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- UNESCO (2012) From the United Nations World Water development report 4 (2012) Facts and Figures; Published by the United Nations World Water Assessment Programme © UNESCO-WWAP 2012 **Pag. 1**
- UNESCO <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002158/215884e.pdf>

- Veizer, J. and Compston, W., (1974). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of seawater during the Phanerozoic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, p. 1461-85 1484.
- Velasco, F., Pesqueira, A., Arce, A., Olmedo, F., (1987). A contribution to the ore genesis of the magnesite deposit of Eugui, Navarra (Spain): *Mineralium Deposita*, No. 22, p. 33-41.
- Weinritt DJ, Cowan JC (1967). Unique characteristics of barium sulfate scale deposition. *J Petroleum Tech* 30, p. 1381-1394.
- Wikipedia (2012) <http://es.wikipedia.org/wiki/Cyanobacteria>
- Wilfrod DJ, Kursch MJ, Solomon M (1992). Strontium isotope studies of barites, implications for the origin of base metal mineralization in Tasmania. *Economic Geology* 87, p. 953-959.
- Wilkinson, J. J., (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits: *Lithos*, v. 55, p. 229-272.
- Wilson, J. L., (1990). Basement structural controls on Mesozoic carbonate facies in Northeastern México, a review: in: *Contribuciones al Cretácico de México y América Central: Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México.* v. 4, p. 5-45.
- Wilson., J. R., Ward, W. C., and Finneran, J., (1984). A field guide to Upper Jurassic and Lower Cretaceous carbonate platform and basin systems, Monterrey-Salttilo area, northeast México: Gulf Coast Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p.76.
- Wilson., J.L., Ward, W.C. y Finneran, J. , (1984). A fiel guide to Upper Jurassic and Lower Cretaceous carbonate platform and basin systems, Monterrey-Salttilo area, northeast Mexico: Gulf Coast Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 76.
- Wuilson, J.L., Ward, W.C., (1993). Early Cretaceous carbonate platforms of northeastern and east-central Mexico, in Simo, J.A., Scott, R.W., and Masse, J.-P., eds., *Cretaceous carbonate platforms: American Association of Petroleum Geologist Memoir* 56, p. 35-50.
- Ye, H., (1997). The arcuate Sierra Madre Oriental orogenic belt, NE Mexico: Tectonic infilling of a recess along the Southwestern North America continental margin: in: *Structure, stratigraphy and paleontology of Late Cretaceous-Early Tertiary Parras-La Popa foreland basin near Monterrey, northeast Mexico.* AAPG Field Trip No. 10.
- Zherebtsova IK y Volkova NN (1966). Experimental study of behavior of trace elements in the process of natural solar evaporation of Black Sea water and Sasyk-Sivash brine. *Geochemistry International*. V. 7.
- Zwanzinger, J. A., (1979). Provincias Mesozoicas Productoras en el Noreste de México: *Ingeniería Petrolera*, v. 19. No. 3, p. 35-40.

Apéndice 1

Valores del Albedo (r) medio diario para diversas superficies evaporantes

Tipo de Superficie	Albedo r		Fuente
Agua a Temperatura < 30°C	0.02	0.06	Diversos
Agua a Temperatura > 30°C	0.06	0.4	Diversos
Suelo desnudo humedo	0.11		J. L. Monteith (1959)
Suelo desnudo seco	0.18		J. L. Monteith (1959)
Bosque de pino	0.1	0.12	G. Szeicz y Colab (1969)
Bosque de bambu	0.12		E.A.A.F.R.O
Bosque de árboles de hoja perene	0.14		E.A.A.F.R.O
Bosque tropical	0.18		E.A.A.F.R.O
Piña	0.05	0.08	J. H. Chang (1968)
Caña de Azucar	0.05	0.18	J. H. Chang (1968)
Té	0.16		E.A.A.F.R.O
Papa	0.15	0.27	Diversos
Trigo y cereales	0.1	0.25	J. L. Monteith (1959)
Maíz	0.12	0.24	J. H. Chang (1968)
Remolacha azucarera	0.14	0.25	J. L. Monteith (1959)
Cesped Verde	0.26		Diversos
Cesped seco	0.19		Diversos
Algodón	0.17	0.25	Diversos
Alfalfa	0.19	0.25	Diversos
Lechuga	0.22		Diversos
Vegetales Verdes	0.25		J. L. Monteith (1959)

E.A.A.F.R.O

East African Agriculture and Forestry Journal

Apéndice 2

Presión de vapor de saturación e_2 en mm de mercurio										
T	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
-5	3.16	3.14	3.11	3.09	3.06	3.04	3.01	2.99	2.97	2.95
-4	3.41	3.39	3.37	3.34	3.32	3.29	3.27	3.24	3.22	3.18
-3	3.67	3.64	3.62	3.59	3.57	3.54	3.52	3.49	3.46	3.44
-2	3.97	3.94	3.91	3.88	3.85	3.82	3.79	3.76	3.73	3.7
-1	4.26	4.23	4.2	4.17	4.14	4.11	4.08	4.05	4.03	4
0	4.58	4.55	4.52	4.49	4.46	4.43	4.4	4.36	4.33	4.29
0	4.58	4.62	4.65	4.69	4.71	4.75	4.78	4.82	4.86	4.89
1	4.92	4.96	5	5.03	5.07	5.11	5.14	5.16	5.21	5.25
2	5.29	5.33	5.37	5	5.44	5.48	5.53	5.57	5.6	5.64
3	5.68	5.72	5.76	5.8	5.84	5.89	5.93	5.97	6.01	6.06
4	6.1	6.14	6.18	6.23	6.27	6.31	6.36	6.4	6.45	6.49
5	6.54	6.58	6.54	6.68	6.72	6.77	6.82	6.86	6.91	6.96
6	7.01	7.06	7.11	7.16	7.2	7.25	7.31	7.36	7.41	7.46
7	7.51	7.56	7.61	7.67	7.72	7.77	7.82	7.88	7.93	7.98
8	8.04	8.1	8.15	8.21	8.26	8.32	8.37	8.43	8.48	8.54
9	8.61	8.67	8.73	8.78	8.84	8.9	8.98	9.02	9.08	9.14
10	9.2	9.26	9.33	9.39	9.46	9.52	9.58	9.65	9.71	9.77
11	9.84	9.9	9.97	10.03	10.1	10.17	10.24	10.31	10.38	10.45
12	10.52	10.58	10.66	10.72	10.79	10.86	10.93	11	11.08	11.15
13	11.23	11.3	11.38	11.75	11.53	11.6	11.68	11.76	11.83	11.91
14	11.98	12.06	12.14	12.22	12.96	12.38	12.46	12.54	12.62	12.7
15	12.78	12.86	12.95	13.03	13.11	13.2	13.28	13.37	13.45	13.54
16	13.63	13.71	13.8	13.9	13.99	14.08	14.17	14.26	14.33	14.44
17	14.53	14.62	14.71	14.8	14.9	14.99	15.09	15.17	15.27	15.38
18	15.46	15.56	15.66	15.76	15.96	15.96	16.06	16.16	16.22	16.36
19	16.46	16.57	16.66	16.79	16.9	17	17.1	17.21	17.32	17.43
20	17.53	17.64	17.75	17.86	17.94	18.08	18.2	18.31	18.43	18.54
21	18.65	18.77	18.88	19	19.11	19.23	19.35	19.46	19.58	19.7
22	19.82	19.94	20.06	20.19	20.31	20.43	20.58	20.69	20.8	20.93
23	21.05	21.19	21.32	21.45	21.58	21.71	21.64	21.97	22.1	22.23
24	22.27	22.5	22.63	22.76	22.91	23.05	23.19	23.31	23.45	23.6
25	23.75	23.9	24.03	24.2	24.35	24.49	24.64	24.79	24.94	25.08
26	25.31	25.45	25.6	25.74	25.89	26.03	26.18	26.32	26.46	26.7
27	26.74	26.9	27.05	27.21	27.37	27.53	27.69	27.85	28	28.16
28	28.32	28.49	28.66	28.83	29	29.17	29.34	29.51	29.68	29.85
29	30.03	30.2	30.38	30.56	30.74	30.92	31.1	31.28	31.48	31.64
30	31.82	32	32.19	32.38	32.57	32.76	32.95	33.14	33.33	33.52

Apéndice 3

Distribución t de Student

Grado de libertad	Nivel de significancia		Grado de libertad	Nivel de significancia	
	5 % *	5 % **		5 % *	5 % **
1	6.314	12.706	31	1.696	2.040
2	2.920	4.303	32	1.694	2.038
3	2.353	3.182	33	1.693	2.036
4	2.132	2.776	34	1.692	2.034
5	2.015	2.571	35	1.691	2.032
6	1.943	2.447	36	1.689	2.029
7	1.895	2.365	37	1.688	2.027
8	1.860	2.306	38	1.687	2.025
9	1.833	2.262	39	1.685	2.023
10	1.812	2.228	40	1.684	2.021
11	1.796	2.201	45	1.681	2.016
12	1.782	2.179	50	1.678	2.011
13	1.771	2.160	51	1.677	2.009
14	1.761	2.145	52	1.676	2.008
15	1.753	2.131	53	1.676	2.007
16	1.746	2.120	54	1.675	2.006
17	1.740	2.110	55	1.674	2.005
18	1.734	2.101	56	1.674	2.004
19	1.729	2.093	57	1.673	2.003
20	1.725	2.086	58	1.672	2.002
21	1.721	2.080	59	1.672	2.001
22	1.717	2.074	60	1.671	2.000
23	1.715	2.069	65	1.670	1.998
24	1.711	2.064	70	1.669	1.997
25	1.708	2.060	75	1.668	1.995
26	1.706	2.056	80	1.667	1.993
27	1.703	2.052	90	1.665	1.990
28	1.701	2.048	100	1.662	1.987
29	1.699	2.045	110	1.660	1.983
30	1.697	2.042	120	1.658	1.980

* Prueba de una cola

** Prueba de dos colas

Apéndice 4

Tipos de clima, según Köppen mod. por García

	(A)C(w0)	
	(A)C(w0)(w)	
	(A)C(w1)	Semicálidos
	(A)C(w1)(w)	
	(A)C(w2)(w)	
	Aw0	Cálidos
	Aw0(w)	
	BS0hw	Seco
	BS1(h')hw	
	BS1(h')hw(w)	Semisecos
	BS1hw	
	BS1hw(w)	
	BS1kw	
	BS1kw(w)	
	C(E)(w2)(w)	Templados
	C(w0)	
	C(w0)(w)	
	C(w1)	
	C(w1)(w)	
	C(w2)	
	C(w2)(w)	