



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL SOBRE LA RESERVA ECOLÓGICA DEL VALLE DE CUATRO CIÉNEGAS COAHUILA ANTE LA APERTURA DEL PROYECTO AGROPECUARIO DEL VALLE DEL HUNDIDO.

PROYECTO SEMARNAT CONACYT CLAVE CO1-0083

Elaborado por:

**Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez.
Responsable del Proyecto.**

Colaboradores

Dr. Vsevolod V. Yutsis. Fac. Ciencias de la Tierra. UANL.

**Dr. Brad D. Wolaver. Departamento de Ciencias Geológicas. Universidad de
Texas, Austin.**

Dr. Dean A. Hendrickson.

Jefe del Departamento de Biología Universidad de Texas, Austin.

Dr. Leticia Torres. Fac. Ciencias Químicas. UANL.

M. C. Biol. Javier E. Bermúdez. FIC. UANL.

M. C. Lilia E. Arriaga Díaz de León. UANL.

LMI. Santos Nohemí López Arriaga. UANL.

Monterrey, N. L. Noviembre De 2007



Capítulo I

1 Introducción.

- 1.1. Antecedentes.**
- 1.2. Objetivo del estudio**
- 1.3. Alcances del proyecto**
- 1.4. Estudios previos**
- 1.5. Área de estudio**
 - 1.5.1. Localización de la zona de estudio.**
 - 1.5.2 Extensión.**
 - 1.5.3. Vías de comunicación**
 - 1.5.4. Servicios**
 - 1.5.5. Área De Protección de Flora y Fauna.**

Capítulo II

2. METODOLOGÍA.

- 2.1. Actividades de campo.**
 - 2.1.1. Recopilación de información.**
 - 2.1.2. Recorridos de campo.**
 - 2.1.3. Interpretación fotogeológica**
 - 2.1.4. Levantamiento de secciones geológicas**
 - 2.1.5. Toma de niveles piezométricos**
 - 2.1.6. Análisis químicos, fisicoquímicos de muestras de agua.**
 - 2.1.7. Pruebas de bombeo**



CAPITULO III

3. FISOGRAFÍA

3.1. Fisiografía.

3.1.1 Geomorfología.

3.1.2. Sierra del Granizo

3.1.3. Sierra de los Alamitos 3.1.4. Sierra del Venado.

3.1.5 Sierra de la Fragua.

3.1.6. Valle del Hundido.

3.2 Climatología

3.2.1 Introducción

3.2.2. Clima que se presenta en el sitio de estudio

3.2.3. Temperaturas

3.2.4. Radiación Solar

3.2.5 Precipitaciones del sitio

3.3. Tipo de suelo.

3.4 Vegetación y fauna

Capitulo IV

4. GEOLOGÍA

4.1. Introducción

4.2. Geología Regional

4.3. Marco Tectónico

4.4. Marco Geológico

4.5. Modelo geodinámico

4.6. Estratigrafía

4.7. Estratigrafía



Capítulo V

5. GEOFÍSICA

5.1. Estudios geofísicos realizados en el Cañón de la Fragua

5.1.1. Métodos gravimétricos

5.1.1.1 Gravimetría

5.1.1.2 Perfiles Magnéticos realizados en campo

5.2. Sondeos Eléctricos Verticales

5.2.1. Generalidades del Método

5.3 Método Magnetométrico

5.3.1.- Objetivos Generales

5.3.2.-Ubicación

5.3.3.- Trabajo de campo

5.4.- Procesamiento de datos

5.4.1.- Perfiles magnéticos

Capítulo VI

6. HIDROGEOLOGÍA.

6.1. Introducción

6.1.1. Características hidrogeológicas de las formaciones acuíferas

6.1.2. Censo de aprovechamientos hidráulicos en el Valle del Hundido.

6.2. Configuración del nivel estático

6.2.1. Configuración de isoelevación del nivel estático Septiembre 2006

6.2.2. Configuración de isoprofundidad nivel estático.

6.3. Pruebas de bombeo.

6.3.1. Determinación de caudales.

6.3.2. Aforo de tubos horizontales método del orificio

6.3.3. Descripción de la prueba de bombeo en el Pozo CNA 24

6.3.4.1 Cálculo del radio de influencia mediante la aplicación de la ecuación de Cooper- Jacob

6.4 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 27

6.5 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 63

6.6 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 25

6.7 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 21

6.8 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 49

6.9 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 51

6.10 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 54



Capítulo VII

7- INVESTIGACIONES HIDROGEOQUÍMICAS.

7.1. Introducción

7.2. Metodología.

7.3. Determinaciones químicas de laboratorio

7.4. Caracterización química del agua subterránea

7.4.1. Clasificación de tipo, familia de agua mediante los diagramas.

7.4.2. Diagramas de Piper.

7.4.3. Diagramas de barras logarítmicas de Schoeller- Berkaloff.

7.4.4. Diagramas binarios y definición de grupos de agua subterránea en el Valle del Hundido.

7.4.5. Sólidos totales disueltos.

7.5. Clasificación del agua para uso agrícola mediante el diagramas de Wilcox (RAS) Relación absorción de sodio.

7.6. ISÓTOPOS AMBIENTALES

7.6.1. Introducción

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

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

7.6.4. Tritio

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

Capítulo VIII

8.- Aplicación del Método DRASTIC para determinar el grado de vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido.

8.1. Introducción

8.2 Objetivo general.

8.3 Objetivos técnicos.

8.4 Profundidad Nivel Estático. (D)

8.5 Recarga Neta del acuífero. (R).

8.6 TIPO DE ACUÍFERO (A).

8.9 Impacto de la zona no saturada (i)

8.10 Conductividad hidráulica (C).

8.11 Plano de vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido (Resultados del Método DRASTIC).



Capitulo VIX

9. MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO Y ESTRUCTURAL DEL ACUÍFERO.

9.1. Introducción.

9.1.2. Modelo conceptual hidrogeológico.

9.1.3. Modelo conceptual hidrogeoquímico

9.1.4. Modelo estructural

9.1.5. Modelo hidrodinámico del acuífero

9.1.6. Modelo geofísico.

Capitulo X

10 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

10.1 Ecuación de balance

10.2 Entradas por flujo subterráneo

10.3 Disponibilidad

10.4 Disponibilidad de aguas subterráneas

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

BIBIOGRAFIA

Índice de Figuras

Figura 1.1	Localización Del Desierto Chihuahuense	Página 22
Figura 1.2	Localización Del Municipio De Cuatro Ciénegas	Página 23
Figura 1.3	Localización De La Zona De Estudio	Página 35
Figura 1.4.	Extensión Del Área De Estudio	Página 36
Figura 1.5	Plano Carretero	Página 37
Figura 3.1.6	Subprovincia De Las Sierras Y Llanuras Coahuilenses	Página 45
Figura 3.1.7.	Geomorfología Del Área De Estudio	Página 46
Figura 3.1.8	Plano De Altimetría	Página 48
Figura 3.2.9	Mapa Climático Del Estado De Coahuila	Página 49
Figura 3.2.10.	Gráfica De Temperatura Media En Los Meses Del Año	Página 54
Figura 3.2.11	Temperaturas Correspondientes A Los Meses De Enero-Junio	Página 55
Figura 3.2.12	Temperaturas Correspondientes A Los Meses De Julio-Diciembre	Página 56
Figura 3.2.13	Gráfica De Radiación Neta En Los Meses Del Año	Página 61
Figura 3.2.14	Gráfica De Precipitación De Diferentes Años	Página 65
Figura 3.2.15	Gráfica De Precipitación	Página 66
Figura 3.3.16	Tipo De Suelos	Página 73
Figura 3.3.17	Plano Uso Del Suelo Y Vegetación Período 1980	Página 74
Figura 3.3.18	Se Muestra El Uso Del Suelo Para El Período 1993-1998	Página 74
Figura 4.2.19	Unidades Tectónicas	Página 77
Figura 4.2.20	Unidades Geológicas	Página 78
Figura 4.3.21	Sistema De Fallas En El Noreste De Coahuila	Página 79
Figuras 4.4.22	Secciones Geológicas	Página 80
Figuras 4.4.23	Secciones Geológicas	Página 81
Figura 4.4.24	Secciones Geológicas Este – Oeste	Página 81
Fig. 4.4.25	Sección Transversal De La Sierra La Fragua	Página 82
Figura 4.4.26.	Marco Geológico Estructural Del Sistema De Sierras	Página 84
Figura 4.4.27	Modelo De Cuña	Página 86
Figura 4.4.28	Plano Geológico Del Área De Estudio	Página 88
Figura 4.7.29	Modelo De Rampa	Página 97
Figura 4.7.30.	Modelo De Caja Para Las Estructuras Del Noreste De México	Página 99
Figura 5.1.31	Anomalía Gravimétrica De Bouguer	Página 102
Figura 5.1.32	Esquema Topográfico Y Posición De Los Puntos	Página 102
Figura 5.1.33	Campo Gravimétrico Regional	Página 103
Figura 5.1.34	Campo Gravimétrico Residual	Página 103
Figura 5.1.35	Mapa De La Primera Derivada Δg Vertical	Página 104
Figura 5.1.36	Mapa De La Primera Derivada Δg Horizontal	Página 104
Figura 5.1.37	Anomalía Del Perfil 1 ENG	Página 107
Figura 5.1.38	Anomalía Del Perfil 2 ENG	Página 108
Figura 5.1.39	Anomalía Del Perfil 3 ENG	Página 109
Figura 5.1.40	Anomalía Del Perfil 4 ENG	Página 110



Figura 5.1.41	Anomalía Del Perfil 5 ENG	Página 110
Figura 5.1.42	Topografía Del Área De Estudio	Página 111
Figura 5.1.43.	Dispositivo De Schlumberger	Página 113
Figura 5.2.44	Localización De SEV Entre El Cañón De La Fragua Y Valle El Tablero	Pagina 114
Figura 5.2.45	Sección Geoeléctrica “Valle Del Hundido	Pagina 116
Figura 5.2.46	Curva Correspondiente Al SEV-1	Pagina 117
Figura 5.2.47	Curva Correspondiente Al SEV-2	Pagina 117
Figura 5.2.48	Curva Correspondiente Al SEV-3	Pagina 118
Figura 5.2.49	Curva Correspondiente Al SEV-4	Pagina 118
Figura 5.2.50	Curva Correspondiente Al SEV-5	Pagina 119
Figura 5.2.51	Curva Correspondiente Al SEV-6	Pagina 119
Figura 5.2.52	Curva Correspondiente Al SEV-7	Pagina 120
Figura 5.2.53	Curva Correspondiente Al SEV-8	Pagina 120
Figura 5.2.54	Curva Correspondiente Al SEV-9	Pagina 121
Figura 5.2.55	Curva Correspondiente Al SEV-10	Pagina 121
Fig. 5.3.56	Primeros Perfiles Del Anticlinal La Fragua Y La Sierra San Marcos Pinos	Pagina 122
Fig.5.3.57	Ubicación De Los Perfiles Junio Del 2006	Pagina 123
Fig. 5.3.58	Distribución De Los Perfiles Secundarios Al Cañón La Fragua	Pagina 124
Fig. 5.3.59.	Satélite Que Muestra Las Trazas De Los Perfiles Obtenidos	Pagina 125
Fig. 5.3.60.	Muestra El Procedimiento Para Levantar Datos En Campo	Pagina 125
Fig. 5.4.61	Graficas Obtenidas De Los Valores Resultantes	Pagina 127
Fig. 5.4.62	Curvas Obtenidas De Los Datos Ya Calculados Y Procesados	Pagina 128
Figura 5.4.63	Resultados De Las Anomalías Magnéticas De Los Perfiles Procesados	Pagina 129
Figura 6.1.64	Censo De Aprovechamiento Hidráulicos	Pagina 131
Figura 6.2.65	Configuración Isoelevación Nivel Estático Sept. 2006	Pagina 132
Figura 6.2.66	Configuración Isoprofundidad Nivel Estático Sept. 2006	Pagina 133
Figura 6.3.67	Localización De Pozos Donde Se Realizaron Pruebas De Bombeo	Pagina 134
Figura 6.3.68.	Esquema De Orificio Calibrado	Pagina 136
Figura 6.3.69	Grafica Tiempo/ Abatimiento Pozo CNA-25	Pagina 140
Figura 6.4.70	Grafica Tiempo Abatimiento Pozo CNA- 27	Pagina 144
Figura 6.5.71	Grafica Tiempo Abatimiento Pozo CNA- 63	Pagina 146
Figura 6.5.72	Grafica Tiempo Abatimiento Pozo CNA- 25	Pagina 148
Fig. 6.7.73	Prueba De Bombeo Pozo CNA 21	Pagina 150
Fig. 6.8.74	Prueba De Bombeo Pozo CNA 49	Pagina 152
Figura 6.9.75	Prueba De Bombeo Pozo CNA 51	Pagina 154
Figura 6.10.76	Prueba De Bombeo Pozo CNA 54	Pagina 156
Figura 7.4.77	Plano De Localización De Muestreo Geoquímica	Página 159
Figura 7.4.78	Diagrama De Piper De Muestras De Agua En El Valle Del Hundido	Página 162
Figura 7.4.79	Distribución Porcentual De Las Principales Familias De Agua	Página 163



- Figura 7.4.80** Esquema Sobre La Formación De Salares **Pagina 164**
Figura 7.4.81 Diagramas De Schoeller-Berkalov **Pagina 165**
Figura 7.4.82 Diagramas De Schoeller-Berkalov **Pagina 166**
Figura 7.4.83 Diagramas De Schoeller-Berkalov **Pagina 167**
Figura 7.4.84 Diagramas De Schoeller-Berkalov **Pagina 168**
Figura.7.4.85 Comportamiento Del Ion Cl Versus Na **Pagina 170**
Figura 7.4.86 Comportamiento Del Ion Cl Versus Mg **Pagina 170**
Figura 7.4.87 Comportamiento Del Ion Cl Versus K **Pagina 171**
Figura 7.4.88 Comportamiento Del Ion Cl Versus Ca **Pagina 171**
Figura 7.4.89 Comportamiento Del Ion Cl Versus HCO₃ **Pagina 172**
Figura 7.4.90 Comportamiento Del Ion Cl Versus SO₄ **Pagina 172**
Figura 7.4.91. Formación De Los Depósitos Salinos En El Valle Del Hundido **Página 173**
Figura 7.4.92 Configuración De Sólidos Totales Disueltos **Página 174**
Figura 7.5.93. Configuración De Isoconductividades **Página 175**
Figura 7.5.94 Diagrama De Wilcox **Pagina 177**
Figura 7.6.95 Plano De Localización De Isotropía **Página 180**
Figura 7.6.96 Línea De Agua Meteórica Mundial **Página 183**
Figura 7.6.97. Se Muestra El Decaimiento Del Tritio **Pagina 184**
Figura 7.6.98. Análisis Comparativo De Unidades De Tritio **Página 185**
Figura 7.6.99. Datación De Muestras De Agua Subterránea **Página 185**
Figura 7.7.100 Modelo De Sedimentación En El Jurasico Cretácico **Pagina 186**
Figura 7.7.101. Esgurrimientos Del Río Nazas **Pagina 187**
Figura 7.7. 102. Modelo Hidrogeológico Del Valle Del Hundido **Página 188**
Figura 7.7.103. Marco Estructural Del Valle Del Hundido **Página 188**
Figura 7.7.104 Modelo Conceptual Hidrogeológico Del Cañón **Pagina 189**
Figura. 8.4.105. Profundidad Nivel Estático. (D) **Página 192**
Figura. 8.5.106. Recarga Neta Del Acuífero (R) **Pagina 194**
Figura. 8.6.107 Distribución De Los Diferentes Tipos De Acuíferos **Página 197**
Figura. 8.7.108. Tipos De Suelos **Pagina 200**
Figura 8.8.109. Distribución De La Pendiente En El Valle Del Hundido **Página 202**
Figura 8.9.110 Impacto De La Zona No Saturada (I) **Pagina 204**
Figura 8.10.111. Se Muestra La Localización De Los Pozos **Pagina 206**
Figura 8. 11.112. Plano De Vulnerabilidad Relativa En El Valle Del Hundido **Página 208**
Figura 9.1.113 Se Muestra La Dirección De Los Esgurrimientos Pluviales **Pagina 211**
Figura 9.1.114. Se Describe En Forma Gráfica El Comportamiento Hidráulico **Pagina 212**
Figura. 9.1.115. Formación De Depósitos Salinos En El Valle Del Hundido **Página 213**
Figura. 9.1.116 Esquema Que Muestra El Cabalgamiento En El Área De Estudios **Pagina 217**
Figura 9.1.117 Falla Normal San Marcos –Atalaya **Pagina 218**
Figura 9.1.118. Se Muestra La Localización De Los SEV **Pagina 218**
Figura 9.1.119. **Pagina 220**

Índice de Tablas

Tabla 3.1	Temperaturas De Cuatro Ciénegas En El Periodo De 1942 A 2001	Pagina 50
Tabla 3.2	Radiación Solar RA En El Tope De La Atmósfera, En <i>Langleys/día</i>	Pagina 57
Tabla 3.3	Duración Promedio Máxima Diaria De Horas De Insolación (N)	Pagina 58
Tabla 3.4	N Tiempo Observado De Luz Diaria En Promedio De Cada Mes	Pagina 59
Tabla 3.5	Radiación Incidente	Pagina 59
Tabla 3.6	Radiación Solar Reflejada	Pagina 60
Tabla 3.7	Radiación Neta De Onda Larga	Pagina 60
Tabla 3.8	Radiación Neta En La Zona De Estudio	Pagina 60
Tabla 3.9	Precipitaciones De Cuatro Ciénegas En El Periodo De 1942 A 2003	Pagina 62
Tabla 3.10	Desviación Estándar Y Media Aritmética	Pagina 67
Tabla 4.11	Tabla Estratigráfica Del Área De Estudio	Pagina 92
Tabla 5.12	Densidades Medias De Las Rocas Sedimentarias	Pagina 105
Tabla 5.13	Valores De Resistividad Específica	Pagina 137
Tabla 6.15	Resultados De Las Pruebas De Bombeo Valle Hundido	Pagina 142
Tabla 6.16	Pozos De Bombeo	Pagina 157

Índice De Planos Carpeta # 1

- Isopropfundidad Nivel Estático Septiembre Del 2006.
- Recarga Neta Del Acuífero.
- Medio Acuífero
- Medio Del Suelo.
- Pendiente Del Terreno.
- Impacto De La Zona No Saturada.
- Conductividad Hidráulica.

Índice De Planos Carpeta # 2

- Edafología
- Uso Del Suelo Y Vegetación Período 1980.
- Medio Del Suelo.
- Altimetría.
- Geología.
- Censo De Aprovechamientos Hidráulicos.

Índice Fotografías

Fotografías: 1 Y 2.	Transporte De Candelilla Desde Sitios De Recolección	Pagina 28
Fotografía 3 Y 4	Proceso De Elaboración De La Cera	Pagina 29
Fotografía 5	Ato De Ganado Caprino En El Ejido Sta Teresa De Sofía	Pagina 35
Fotografía. 6.	Poza Chiqueros En El Año De 1980	Pagina 39
Fotografía. 7.	Poza Chiqueros En El Año De 2002	Pagina 39
Fotografía 8	Poza Chiqueros En El Año De 1980	Pagina 40
Fotografía 9.	Poza Chiqueros En El Año De 2002	Pagina 40
Fotografía 10.	Poza El Garabatal En El Año De 1980	Pagina 41
Fotografía 11.	Poza El Garabatal En El Año De 2002	Pagina 41
Fotografía. 12.	Estructuras De Caja Producto Del Combamamiento Del Pliegue	Pagina 98
Fotografía. 5.13.	Muestra Al Equipo De Trabajo Humano	Pagina 120
Fotografías 14 Y 15	Pruebas De Bombeo De 72 Horas	Pagina 131
Fotografía 16	Descargas De Los Pozos Bombeo	Pagina 134
Fotografía 17.	Flujo Intermitente Del Pozo 24 A 1500 Rpm	Pagina 137

Anexos

Datos De Pruebas De Bombeo

RESUMEN DEL PROYECTO

La protección al medio ambiente representa uno de los mayores retos del presente trabajo. El objetivo primordial del proyecto de investigación (Clave CO-1-0083), fue el de comprobar mediante diferentes metodologías la conexión entre los valles del Hundido y el de Cuatro Ciénegas, Coahuila. A partir del análisis de la información geológica, geohidrológica, geoquímica, isotópica, métodos geofísicos, hidrología subterránea, hidráulica de pozos y la aplicación del Método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido, al ser sometido a un régimen de explotación intensa; esto nos permitió confirmar la conexión entre ambos valles al observar los efectos provocados en los descenso en los niveles de las pozas de: Churince, Chiqueros, San Marcos Atalaya, entre otras. La ecuación utilizada para determinar la vulnerabilidad del acuífero fue la siguiente:

$$IV: Dr Dw + Rr Rw + Ar Aw + Sr Sw + TrTw + Ir lw + Cr Cw.$$

El estudio tuvo su origen en la problemática suscitada en la Reserva Ecológica del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila; ante la apertura del proyecto agropecuario en el Valle del Hundido, proyecto que requiere de grandes volúmenes de agua para el cultivo de alfalfa en una zona donde la precipitación es casi nula. Los resultados obtenidos después de analizar la información climatológica de 61 años de observación en la estación climatológica de Cuatro Ciénegas, 30 años en la de Ocampo, Santa Teresa de Sofía y Antiguos Mineros; se logró establecer el balance hidrológico de la cuenca en el Valle del Hundido a partir de la siguiente ecuación: $V_p = -(V_e + E_e + E_{vt}) + V_{inf}$. Donde: V_p .- volumen de precipitación en $Mm^3/Año$, V_e .- escorrentía en millones de $M^3/Año$, E_{vt} .- Evapotranspiración $M m^3/año$ y V_{inf} . Volumen de infiltración $M m^3/Año$.

El balance hidrológico en la cuenca del Valle del Hundido fue determinado mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$E_s + V_{inf} = E_{ext} - A_s.$$

Donde:

$$E_s. \text{ Recarga subterráneo} = 17.28 \times 10^6 M^3/ \text{ Año}$$

$$V_{inf}. \text{ Infiltración en el valle} = 2.45 \times 10^6 M^3/ \text{ Año}$$

$$E_{ext}. \text{ Extracciones por bombeo} = 21.6 \times 10^6 M^3/Año.$$

A partir de este balance se demuestra que el acuífero en el Valle del Hundido en 5 años de iniciado el proyecto, muestra un déficit en su coeficiente de almacenamiento las extracciones son mayores que la recarga, el déficit es del orden de $1.87 \times 10^6 M^3/ Año$. A partir de este balance, se puede establecer que el acuífero en el área de estudio esta sobreexplotado.



Los resultados obtenidos mediante la aplicación de modelos estructurales, hidrogeoquímicos, hidrogeológicos, hidrodinámicos, isotópicos apoyados por estudios geofísicos nos permitieron concluir en el área de estudio lo siguiente:

El modelo geodinámico aplicado para explicar el comportamiento estructural del sistema de sierras que conforman el Valle del Hundido fue el de cuña; dicho modelo es válido para la cuenca de Sabinas como para la Sierra Madre Oriental. 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. 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.

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 concluye lo siguiente:

La Sierra de la Fragua se sobre pone 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.

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, Sierra del Granizo y en flanco sur occidental de la Sierra de 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). El mecanismo operador del modelo pliegue-caja requiere de estratos móviles y plásticos, tal es el caso de los yesos y anhidritas presentes en las formaciones Novillo y Acatita dentro del área de estudio.

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, dando lugar a cabalgamientos, además los resultados de geofísica nos demuestran un alto gravimétrico el cual está asociado con el basamento cristalino, está aflorando en el Valle del Jabalí. Los resultados obtenidos mediante métodos geofísicos nos muestra la presencia de una falla regional con fallas perpendiculares a su eje que conforma un sistema de fallas escalonadas.

Los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo de larga duración (72 horas) en los pozos: CNA 24, CNA 27, CNA 25 y CNA 63 ubicados en el Ejido Santa Teresa de Sofía y en el Rancho San Fernando (CNA 54, CNA 49, CNA 51 y CNA 21). Se logró definir la presencia de dos acuíferos uno en medios granulares y el otro en rocas consolidadas.

Acuífero en medios granulares.

Esta estrechamente relacionado con depósitos aluviales y de pie de monte, eólicos y evaporíticos, la recarga de este acuífero es a través de la Falla de San Marcos la cual tiene una longitud de 300 Km. En la parte sur poniente del Valle del Hundido se observa muy claramente el abanico aluvial, en contacto con la falla de San Marcos, se logró comprobar que el acuífero granular es recargado en forma ascendente por el acuífero profundo a través de fracturas, en algunos pozos se detectaron flujos ascendentes (Pozo CNA 125).

Los parámetros hidráulicos obtenidos de los datos de campo en cada una de las pruebas de bombeo en el Rancho San Fernando; a partir de los valores obtenidos del Coeficiente de Almacenamiento (S) en los pozos anteriormente mencionados se logró clasificarlo como un acuífero libre en medios granulares dichos valores oscilan desde: (CNA 49 1×10^{-1} , CNA 21 5.63×10^{-3} , CNA 51 7.07×10^{-3} , hasta CNA 54 8.74×10^{-3}).

Los datos sobre estos parámetros en el acuífero en medios granulares son los siguientes: Caudal específico varía desde 95 l/s en los pozos CNA 21 y 49, para el pozos CNA 51 su caudal es de 103.4 l/s y para el pozo CNA 54 su caudal específico es de 105.29 l/s. Sus abatimientos oscilan desde 27.98m en el sondeo CNA 51 hasta 40.08m en el pozo CNA 21.

Acuífero en rocas consolidadas.

Este acuífero está constituidos por dos formaciones geológicas: Cupido y Aurora, ambos son acuíferos; a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo en los pozos: CNA 24, CNA 27, CNA 25 y CNA 63 se logró definir que dicho acuífero se comporta como un acuífero libre en medios fracturados. El caudal específico en los pozos en el Ejido Santa Teresa de Sofía varía desde 64.17 l/s en el pozo CNA 25, hasta 90 l/s en el pozo CNA 24. El abatimiento de las pruebas de bombeo en la batería de pozos de Santa Sofía oscila desde 0.48 m. en el sondeo CNA 24 hasta 8.38 m. en el pozo CNA 63.

El estudio de la relación ^{18}O / Deuterio (2H) indican que las variaciones isotópicas están íntimamente ligadas con la cantidad de precipitación caída en la zona. Así, la composición isotópica de las precipitaciones de mayor intensidad presenta composiciones isotópicas más ligeras respecto a las precipitaciones más reducidas, que presentan en algunos casos fraccionamiento por evaporación. El efecto en la cantidad de precipitación en la composición isotópica de la misma estaría asociado al intercambio isotópico durante la precipitación, el cual se produce por la diferencia entre la composición isotópica de las gotas de lluvia y la humedad ambiental; en el caso de las lluvias de menor intensidad existe un gradiente con la humedad del ambiente capaz de producir evaporación en las gotas de lluvia. Las muestras de agua subterránea presentan una composición isotópica más negativa por lo que no se descarta la existencia de aguas connatas, las pequeñas concentraciones de Tritio determinadas en todas las muestras, hacen suponer que la recarga es anterior al año de 1960.

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. A partir de la información de los isótopos de Deuterio H^2 y ^{18}O se confirma que las aguas subterráneas en la zona de estudio, provienen exclusivamente de la precipitación, con poca o nulo efecto de la evaporación.

En base a los diagramas de Piper, Schoeller-Berkalov se logró determinar que el 70% de la muestra de agua analizada por iones dominantes corresponden a Sulfatadas-Mixtas, 15% Sódico-Sulfatadas, 10% de las muestras corresponden a la clasificación de Cálcico- Sulfatadas y el 5% Sódico Mixtas. El rango de sólidos totales disueltos 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. Las muestras correspondientes a los pozos CNA 138, CNA 139 y CNA 140 donde el ión dominante es el sodio (Na^+); el dominio de este elemento, probablemente se encuentre vinculado con depósitos de minerales de halita (Na Cl) y Silvinita (KCl). A partir de la ecuación del RAS, el 86.6% de las muestras de agua se clasificaron como tipo C4-S2 (conductividad eléctrica mayor de 2890 ($\mu\text{mhos/cm.}$), el 6.6% como tipo C4-S1 con conductividades de 2450($\mu\text{mhos/cm.}$) y el 6.6% restante como C3-S1 con una conductividades eléctricas de 2100($\mu\text{mhos/cm.}$).

La aplicación de diferentes métodos geofísicos (gravimétricos, magnetométrico y eléctricos) nos permitió definir la presencia de un sistema de fallas escalonadas a lo largo del Cañón de la Fragua, hasta el Valle del Tablero.

Mediante la aplicación de los sondeos eléctricos verticales se logró definir la presencia de 9 unidades estratigráficas ubicadas a diferentes niveles. La descripción de cada una de las unidades definidas en la sección Cañón de la Fragua- Valle el Tablero se muestran en la figura 5.2.

Mediante los SEV se determinan las resistividades de las distintas capas horizontales o sub-horizontales del subsuelo, midiendo diferencias de potencial. Durante la realización del trabajo de geoeléctrica, los resultados se integraron en tres perfiles:

Perfil 1.-Esta constituido por los SEV,s 1 y 2 dicho SEV se realizó en el Valle del Hundido.

Perfil 2.- Esta integrado por los SEV,s 3, 4, 5, 6,7 y 8. Esta ubicado sobre el Cañón de La Fragua.

Perfil 3.- Comprende los SEV,s 9 y 10 y se ubican en el Valle del Tablero.

Los resultados obtenidos después del análisis e interpretación de los datos de campo, nos permitió definir la presencia de 9 unidades estratigráficas las cuales en forma detallada se describen a continuación:

Unidad 1 (U1). Esta constituida por material arcilloso en espesores de 2 a 12 metros con una resistividad de 15-40 Ω -m.

Unidad 2 (U2). Se detectó en el Cañón de la Fragua, con una resistividad de 300-800 Ω -m los espesores reportados oscilan entre 8-12 m. de acuerdo a su resistividad se le clasificó como material calichoso, con alto grado de intemperismo, esta unidad al igual que la anterior está aflorando en el área de estudio.

Unidad 3 (U3). Presenta espesores de 6-12 m. con resistividades que oscilan entre 40-90 Ω -m, se correlaciona con material arcilloso-arenoso con un grado de compactación baja.

Unidad 4 (U4). Se detectó en los extremos del área de investigación, tanto en el Valle del Hundido como en el del Tablero está constituida por material arcilloso con espesores que varían de 6-21 m. con resistividades del orden de 4- 8 Ω -m, de acuerdo a su resistividad se le consideró un estrato impermeable. En el SEV 7 se detectó a una profundidad de 10m., con un espesor de 38 m.

Unidad 4' (U4') Se detectó en el Valle del Hundido a una profundidad de 32 metros, presenta un espesor de 35 m. presenta una resistividad de 1- 3 Ω -m. se asocia a material arcilloso con alto contenido de sales (evaporitas).

Unidad 5 (U5) Se detectó en el Valle del Hundido, presenta espesores que varían entre 5-11 metros. Presenta una resistividad de 350- 600 Ω -m. Se asocia con gravas y arenas, lo que le da una alta permeabilidad.

Unidad 6 (U6). Se detectó en el Cañón de la Fragua y en el Valle del Tablero, su resistividad varía de 35-100 Ω -m., posee un espesor que oscila entre 10-50 metros. Esta asociado con material de boleó con alto contenido de arcilla, lo que hace que sea impermeable.

Unidad 7 (U7) Se detectó en el Valle del Hundido y en el Cañón de la Fragua, su espesor varía de 17-40 metros. Presenta una resistividad de 250-300 Ω -m., esta asociado con material compuesto por gravas, arenas y arcillas, dándole características de semipermeable.

Unidad 8(U8). Se visualiza a lo largo de toda el área de investigación, con excepción de los SEV,s 3 y 4, a profundidades que oscilan entre 60-100 m., su resistividad es del orden de 120-200 Ω -m., está asociada con material granular (boleos) y conglomerados, arcillas y arenas, reuniendo las características para ser un estrato permeable, por lo tanto potencialmente explotable.

Unidad 9 (U9) Esta unidad se presenta con resistividades muy altas que oscilan entre 1500-15,000 Ω -m., se detecta en toda el área, su profundidad varía desde 20-90 m. Su espesor va desde 25-65 metros, está asociada con material que presenta intenso fracturamiento, detectándose un sistema de fallas escalonadas a lo largo del cañón, también se detectaron zonas cársticas (cavernas). Esto tipo de información como la obtenida por métodos gravimétricos y magnetometritos nos permitió confirmar la comunicación entre los valles del Hundido y de Cuatro Ciénegas a través de antiguos carstos los que funcionan como sifones.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del Método DRASTIC en el acuífero del Valle del Hundido, con aplicación de valores de datos ponderados, para cada una de las variables que intervienen en el modelo, considerando que, esta metodología trabaja bajo el supuesto de que los contaminantes presentan un proceso de dispersión desde la superficie hasta el interior del suelo, este no considera la naturaleza del contaminante; es decir el índice de vulnerabilidad establece solo condiciones físicas, químicas y topográficas de donde esta contenido el acuífero; a partir de estos criterios se logró concluir los siguiente:

Se establecieron clase con rangos similares para la clasificación de la vulnerabilidad relativa en intervalos de 9, 12, 5 y 14 unidades con frecuencias de aparición de 52, 36, 19 y 14 respectivamente.

El estudio permitió establecer la zonificación índice de vulnerabilidad dentro del Valle del Hundido.

El riego prolongado en los cultivos de alfalfa, influyen de manera directa en la percolación de contaminantes al acuífero al ser aplicados fertilizantes.

Los resultados muestran que el 50.99% de la zona se encuentra clasificada como vulnerabilidad Media Alta y el 15.50% como vulnerabilidad Alta.

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.

Los escurrimientos del Río Nazas en el Pleistoceno fluían a través de un sistema de lagos inter-montanos que comunicaban entre si los valles del Sobaco, Hundido, El Tablero y Cuatro Ciénegas, semejante a un sistema de tanques todos conectados entre sí mediante antiguos carstos los que se comportaban hidráulicamente como sifones.

La mezcla de dos ambientes de depósito causó la formación de diferentes tipos de agua, relictos de agua fósil (connota) de formación quedaron reemplazados por la intrusión secundaria de agua. Anteriormente al evento de infiltración, fracciones de agua marina fueron afectados por procesos de evaporación en un ambiente lacustre del tipo sabkha, causando la formación de aguas con altas concentraciones de sales. Dentro de estos minerales precipitados normalmente de esta manera se presenta la halita (cloruro de sodio, Na Cl), que es el componente principal de la sal gema y el yeso (sulfato cálcico hidratado, $\text{Ca SO}_4 \cdot \text{H}_2 \text{O}$). En el pasado geológico la zona de estudios eran cuencas, sumergidas bajo brazos someros de un mar que tenía conexión con el océano abierto; bajo estas condiciones, el agua de mar entraba continuamente en la bahía para sustituir el agua perdida por evaporación.

En la configuración de S. T. D se observó que los valores se van incrementando hacia la parte central del valle del Hundido del Noroeste hacia el Sur este del valle, en esta configuración se logró definir la dirección preferencial del flujo subterráneo, el cual coincide también con las configuraciones de isopropundidad nivel estático del acuífero como con la isoelevación nivel estático, su tendencia es hacia la salida al Cañón de la Fragua, este mismo comportamiento se muestra en el modelo geohidrológico conceptual del acuífero en el Valle del Hundido.

RECOMENDACIONES.

Es necesario llevar a cabo un monitoreo en el Valle del 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.

A fin de determinar la comunicación entre ambos valles se recomienda la perforación de tres barrenos exploratorios en diámetro de 3 ½" con corona de diamante; con recuperación de núcleos durante el proceso de perforación. Los sitios indicados para la realización de las perforaciones corresponden a los SEV 3, 4 y 5. Las muestras recuperadas, nos permitirán establecer los contactos formacionales de cada unidad estratigráfica correspondientes a la Formación Aurora, Peña y Cupido; a la vez los sondeos nos ayudarán a establecer la presencia de niveles piezométricos si existen en el tramo del Cañón de la Fragua con el Valle del Tablero.

Capítulo I

1 Introducción.

1.2. Antecedentes.

El Valle de Cuatro Ciénegas ha sido objeto de muchos estudios tanto de flora como de fauna, principalmente taxonómicos para comprender los diferentes procesos de evolución de las especies que habitan el valle, por tal motivo es considerado un laboratorio natural (Taylor Minckley, 1966), siendo el valle un área tan pequeña existe una gran biodiversidad de especies endémicas dentro de éstas podemos incluir peces, (Contreras- Balderas, S., 1990b; Minckley, 1969,1984; Williams et, al., 1985), moluscos (Branson,1970; Contreras-Arquieta, 1986,1998,2000); Hershler,(1984,1985); Taylor,(1966,1967),reptiles y anfibios (McCoy,1984) , crustáceos (Cole,1984), y plantas (Pinkava,1984; Vázquez-Aldape, et al., 2001). La biota en el Valle de Cuatro Ciénegas asciende a 1,274 especies con 74 endémicas. Debido a su riqueza de especies, es importante biológica y ecológicamente a nivel internacional (Contreras- Balderas, S., 1990^a; Minckley, 1969).El impacto antropogénico provocado en los últimos seis años por la empresa lechera LALA y SORIANA han provocado efectos nocivos a la reserva ecológica del Valle de Cuatro Ciénegas. En las fotografías (1, 2, 3 y 4) se pueden observar los efectos de la sobre explotación de los acuíferos tanto en el Valle del Hundido como en el de Calaveras y su repercusión sobre algunas de las pozas del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

Los nuevos proyectos agropecuarios en el Valle del Hundido, necesitarán de grandes volúmenes de agua; por lo tanto es necesario establecer las bases científicas y técnicas para una explotación racional y sostenida del recurso agua, buscando un desarrollo armónico entre las actividades productivas de la región y el medio ambiente, creando una mejor calidad de vida en la población y una cultura sobre el uso y conservación del agua, sin afectar los diferentes ecosistemas de la reserva ecológica del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

El constante desarrollo agrícola en el Valle del Hundido y la incorporación de nuevos pozos a los sistemas de irrigación han provocado abatimientos muy fuertes a corto plazo, siendo palpable los efectos sobre las pozas del Valle de Cuatro Ciénegas, como se muestran en las fotografías anexas en el informe.

Las conclusiones que se emiten en este estudio confirman la comunicación entre ambos valles, con base a información de hidráulica de pozos, análisis hidrogeoquímicos, isotópicos, geológicos, geofísicos y de impacto ambiental (análisis de vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido mediante la aplicación del Método DRASTIC).

Por este motivo la SEMARNAT- CONACYT mediante la convocatoria del 2003 apoyaron la realización de este proyecto para tener otra evaluación que pudiera confirmar o rebatir los resultados publicados por Lesser y Asociados y por el IMTA sobre la problemática que presenta el valle del Hundido.

1.2. Objetivo del estudio

El objetivo principal de este trabajo es el determinar el comportamiento hidráulico del acuífero del valle El Hundido y su conexión con el valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila. Mediante la determinación de las siguientes actividades:

Geológicas, estructurales, hidrogeoquímicas, isotópicas, hidráulicas, geofísicas y de impacto ambiental mediante la aplicación del Método DRASTIC.

Mediante dicha metodología se determinarán desde el punto de vista hidráulico se definirán los siguientes parámetros:

- Recarga
- Tiempo de residencia en el valle
- Descarga o salida.
- 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 a nivel regional, así como un análisis estadístico de las variables, climatológicas como:
 - Precipitación media anual
 - Luminosidad
 - Evaporación

Para la determinación de parámetros hidráulicos del acuífero y el tiempo de residencia se utilizaran análisis de isotopía; para definir el comportamiento hidráulico se realizaron 8 pruebas de bombeo, cuatro en el Rancho San Fernando, propiedad del Lic. Lázaro Villarreal Fernández, dichos aprovechamientos hidráulicos se localizan en la parte central del valle del Hundido, los otros cuatro pozos se localizan en el flanco norte de la Sierra de los Alamitos, en propiedad del Ejido Santa Teresa de Sofía. Municipio de Cuatro Ciénegas, de Carranza en el estado de Coahuila. Los parámetros a determinar son:

- Gasto (Q)
- Coeficiente de Almacenamiento(S)
- Transmisividad (T)
- Tiempo de Residencia

Al definir el comportamiento del acuífero que esta 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 Ciénegas, Coahuila.

1.3. Alcances del proyecto

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

El desierto Chihuahuense se localiza en:

- Cuenca del Río Conchos, incluyendo la Sierra Tarahumara, en Chihuahua.
- Zonas Protectoras Forestales del estado de Chihuahua.
- Zona transfronteriza del Río Bravo, en Chihuahua y Coahuila.
- Humedal de Cuatro Ciénegas, en Coahuila.
- Sierra de Zapalinamé, en Coahuila.
- Cuenca del Río Nazas, en Coahuila.
- Cuenca del Río Aguanaval, en Coahuila.
- Altiplano Occidental en los estados de Nuevo León, Coahuila y San Luís Potosí.
- Zona Wixárika en el estado de San Luís Potosí.
- Guadalcázar y Xilitla, en San Luís Potosí.

La figura 1.1 se muestra con claridad la ubicación y la extensión del desierto Chihuahuense. Dicho desierto se extiende donde el sur- oeste de Texas en la Unión Americana, internándose en nuestro país.

Cubriendo la mitad del estado de Chihuahua, la parte noreste y sureste de Coahuila, norte de Durango, Zacatecas, San Luís Potosí y algunas partes del estado de Nuevo León.

Cuatro Ciénegas esta 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 a oeste de la ciudad de Monclova, (figura 1.2), localizado entre los dos macizos montañosos de México, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental

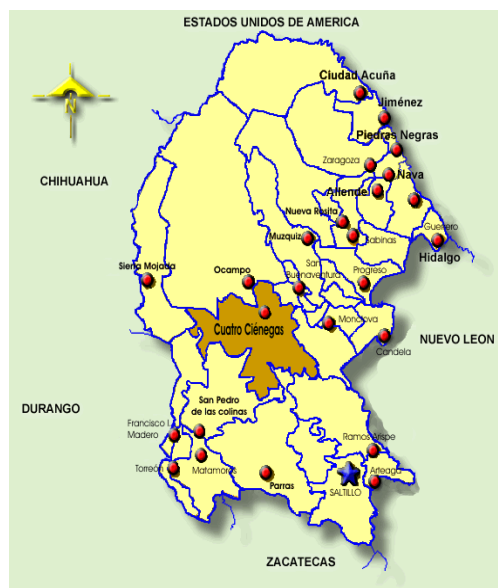


Figura 1.2 Localización del municipio de Cuatro Ciénegas

El valle esta 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, esta a su vez esta cortado en dos por la Sierra San Marcos y Pinos. Colindan con Cuatro Ciénegas dos valles los cuales son El Hundido y Calaveras, al este y al norte respectivamente. (Plano de Altimetría)

En este valle existen 77 especies endémicas, por lo cual el 7 de Noviembre de 1994 fue declara 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 lo Conferencia General de la UNESCO en su 29a reunión en la Declaración sobre la responsabilidad de las generaciones actuales para las generaciones futuras, se ratifica la importancia que se debe de 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 alimenticia de las diferentes especies que habitan en el valle.

Los estromatolitos, por definición son estructuras primarias órgano-sedimentarias, fósiles vivientes, de aguas salinas, salobre o dulceacuícolas.

Su estructura es laminar, compuesta principalmente de $CaCO_3$, estas estructuras se encuentran adheridas al sustrato; la razón es 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.

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 calcárea.

Las cualidades principales de estos seres son su participación en el ciclo del carbono, es fundamental en los procesos atmosféricos, las concentraciones de CO_2 , la conversión de ozono, al igual que la formación de carbonatos, etc.; los cambios climáticos tales como el efecto invernadero y 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, $CaCO_3$, esta es la función de los estrematolitos.

Son los primeros oxigenadores en la atmósfera de nuestro planeta, 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 hemos mencionado antes el crecimiento de los estromatolitos se da en el fondo de aguas someras o taludes en el valle de Cuatro Ciénegas se cuenta con 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 encontramos en las pozas del valle, tenemos una gran diversidad de formas y tipos de estromatolitos coexistiendo con animales vertebrados e invertebrados, dándonos a entender que dichos estromatolitos son la base principal de la cadena trófica de distintos ecosistemas que se tienen en el valle.

Se ha presentado una gran problemática en estos sistemas de pozas debido a que en los últimos años se ha visto un notorio descenso en las pozas y la desecación de otras, poniendo en riesgo los frágiles ecosistemas de muchas criaturas endémicas de la zona.

Este descenso en las pozas en la Reserva Ecológica del Valle de Cuatro Ciénegas se empezó a notar con la aparición de distintas agropecuarias que se asentaron en lo que es el valle El Hundido, al ser incorporados a los sistemas de riego 72 pozos sometiendo al acuífero a un régimen interno de explotación, lo que provoco que en 5 años se mostraran los efectos en algunos pozos como son: Chiqueros, San Marcos Atalaya, Churince, Los Caballos, etc.

1.4. Estudios previos.

IMTA, CNA, SEMARNAT, INE. Estudio hidrogeológico de los acuíferos El Hundido y Cuatro Ciénegas. Coahuila. 2004

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

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

Evaluación Geológica:

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

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

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

Los objetivos del estudio fueron:

- Determinar las condiciones geológicas, estructurales estratigráficas que gobiernan la ocurrencia del agua subterránea dentro de la zona de estudio.
- Definir los diferentes sistemas y subsistemas hidrogeológicos existentes en la región y posible conexión hidráulica subterránea entre ellos.
- Estimar el balance de aguas subterráneas, la condición actual de la explotación y las características hidráulicas subterráneas entre ellos.
- Estimar el balance de aguas subterráneas, la condición actual de explotación y las características hidráulicas del acuífero.
- 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 y Cuatro Ciénegas y Ocampo al igual que realización de impacto sobre manantiales de Cuatro Ciénegas por extracción en El Hundido.

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.

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 aflores de manantiales, 99 nivelaciones topográfica 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.

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

El Valle de Cuatro Ciénegas es un sistema cerrado de agua superficial, pero debido a las prácticas de irrigación del valle vecino, este 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 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 condición de frontera, 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.

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, 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.

En este documento se dice que Cuatro Ciénegas presenta una combinación de agua dulce y salada que podría ser muy similar a lo encontrado en Marte; 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 Nacional Aeronautics and Space Administrations (NASA), el agua de Cuatro Ciénegas podría ser muy similar a lo encontrado 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 identificación de genes marcadores de la patogénesis en eteropatógenos de diversas fuentes por medio de microarreglo. Para esta investigación se utilizó la técnica Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism (TRFLP) de la cual se obtiene 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 situado 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, mas 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 de oeste. Aunado a esto, entre la formación San Marcos y Acatita (estratos impermeables) se encuentran dos grandes estratos de yeso los cuales, ocasionaron el desplazamiento de la formación por arriba de esta.

- Existe evidencia de que entre la sierra de San Marcos y de La Fragua corre una falla. Esta falla comunicaría subterráneamente el valle de Cuatro Ciénegas con el valle el Hundido (Federico Mosser y Juan Manuel Rodríguez Mtz. Pers.)
- 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 (Federico Mosser y Juan Manuel Rodríguez Mtz. Pers.)

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 solo parte del agua cárstica de recarga. Sugiere que se haga una evaluación muy seria de cuanta agua se captura por recarga y que limite a solo el numero de hectáreas que utilizando riego por goteo y fertilización por goteo no sobre pasen 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. Buscar utilizar solo aquellos pozos que no muestren agua marina.
3. Utilizar otras fuentes de información como: datos de isótopos, paleomagnetismos, determinación cuidadosa de los estratos (geología clásica), geofísica y tipos de sales en el agua profunda. Los resultados existentes indican que el agua superficial es kárstica, sin embargo ignoramos cual es el origen y composición del manto profundo, concentraciones de oxígeno, niveles del manto freático. Esto es importa



para determinar no solo los límites del agua marina sino también el camino de esta agua (las conexiones), lo cual es tan importante como su origen.

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 localidades, pero una clara división entre 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 aguas 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 a 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 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 de debe de 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. Utilizar otras fuentes de información como refuerzo; isótopos. Paleomagnetismo, determinación cuidadosa de los estratos (geología clásica), geofísica y tipos de sales en el agua profunda.

Tectonic fame rock the Hundido Valley. Rodríguez Martínez, JM., Díaz de León L. E. Reunión de expertos Primer Congreso realizado en Cuatro Ciénegas, Coah. 2004.

En este artículo se hace una descripción detallada del marco geológico regional del área de estudio, analiza el mecanismo geodinámico que dio lugar a los plegamientos en el sistema de sierra que conforman el Valle del Hundido, mediante el modelo de cuña. Dicho modelo refleja un equilibrio entre la tensión del material de estas estructuras, necesarias para provocar el deslizamiento a lo largo del esfuerzo principal generando escarpes muy pronunciados, como se muestra en la sierra de San Marcos – El Pino, El Granizo y el flanco sur de la Fragua.

La sierra de la Fragua se sobrepone a cabalgamientos frontales con la Sierra de San Marcos, las escamas de despague como los contactos formacionales entre las unidades hidrogeológicas: Georgetown, Aurora y Cupido producen comunicación hidráulica entre los valles del Hundido y Cuatro Ciénegas. Los cabalgamientos observados en el área de estudio tienen una geometría lístrica y son el resultado de llanos y rampas alternantes como las que presentan las diferentes estructuras (La Fragua, El Granizo y San Marcos – El Pino).

Junto con las formaciones que se encuentran al igual que un perfil geológico del valle. Al igual que con una pequeña relación de las temperaturas que se encuentran con en la zona de protección en específico en las pozas con el agua que se tiene en el valle.

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 confirman la historia del Sureste de Norte-América antes del Cretácico. En la primera etapa del estudio se establecieron los siguientes objetivos:

- o Se definió la presencia de la Falla de San Marcos y la reactivación de ésta, a principios del Eoceno.
- o Estableció el marco geológico y estructural del Valle del Hundido y del modelo geodinámico.
- o Estableció el patrón de fallamiento y fracturamiento a nivel regional, y su importancia a la comunicación entre ambos valles.

The overexploitation on the aquifer of the Hundido valley and corresponding ecological impact on the reserves of 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.

En este trabajo se describen las condiciones de la sequía que prevalecen en la parte norteña del estado de Coahuila, las exigencias del uso racional del agua. Dicho recurso en la región debe de controlarse para evitar el daño de diversos ecosistemas, uno es la reserva ecológica única del valle de Cuatro Ciénegas de Coahuila México; en ella habitan 73 especies endémicas puestas en peligro. En los últimos dos años 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 es calculada 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 es relacionado 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.

1.5. Área de estudio.

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

En estos ejidos su principal sustento económico es la explotación 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 la candelilla puede encontrarse. 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.), las cuales son transportadas.

La hierba recolectada se concentra en centros de acopio, donde será sometida a un proceso de extracción de la cera. **Fotografía 1, 2**



Fotografías: 1 y 2. Transporte de candelilla desde sitios de recolección

Para la extracción de la cera, la planta de candelilla se coloca en calderos de hierro llamados “pailas” por los candelilleros; en una mezcla de 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 3 y 4.**



Fotografía 3 y 4 Proceso de elaboración de la cera.



La cera espumosa caliente se retira de la “paila” mediante utensilios con orificios ó “espumaderas”, para ser recogida en tanques de acero, cubetas, agujeros cónicos en el piso ó en moldes de barro, que se colocan al 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, la cual consiste de 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 trozos mediante golpes de martillo y los cuales se funden para que liberen las impurezas de tierra y materia orgánica, finalmente son 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.

Además de la explotación de la candelilla, en los ejidos anteriormente mencionados se desarrolla en menor escala la agricultura, siendo el cultivo principal la alfalfa, la cual se usa como forraje; siendo el ejido Santa Teresa de Sofía el único dedicado a este cultivo.

La problemática sobre la sobreexplotación del acuífero en el Valle del Hundido se presenta cuando se instalan en el valle 3 complejos agropecuarios dedicados al cultivo de la alfalfa, proveedores de pienzo para el monopolio de lácteos (Grupo LALA). Dichos consorcios son:

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

Otra de las actividades existentes en el área es ganado menor o caprino que se practica en la mayoría de los ejidos. En la **fotografía 5** se muestra el ato de ganado caprino en el Ejido Santa Teresa de Sofía, municipio de Cuatro Ciénegas, Coahuila.



Fotografía 5 Ato de ganado caprino en el ejido Sta Teresa de Sofía.

1.5.1. Localización de la zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra en la parte centro 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**

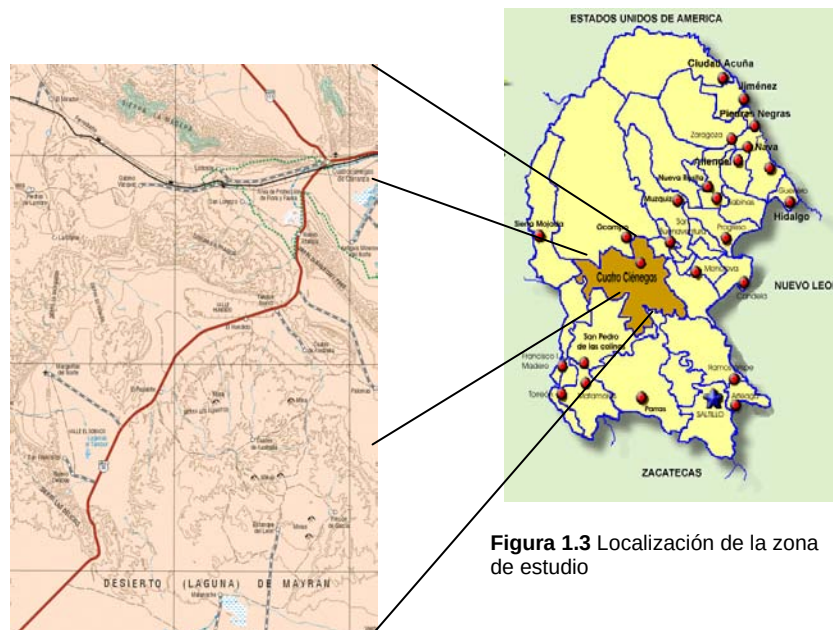


Figura 1.3 Localización de la zona de estudio

El valle El Hundido se encuentra delimitada al norte por la Sierra La Fragua, al sur y al oeste se encuentra por la Sierra Alamitos y al oeste con la Sierra El Venado.

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

1.5.2 Extensión.

El área se encuentra ubicada entre tres depresiones, siendo el primero y el de mayor preponderancia el correspondiente a la Reserva Ecológica del Valle de Cuatro Ciénegas, El Sobaco y el del Tablero. El Valle del Sobaco se encuentra limitado al Norte y al oeste por la Sierra del Venado al Sur por la Sierra de las Delicias, al este por la Sierra de Los Alamitos. El valle del Tablero se localiza al norte del Valle del Hundido, se encuentra flanqueado al Norte por la Sierra de San Marcos y El Pino, al Sur y al poniente por la Sierra de la Fragua y al este por la Sierra del Granizo su superficie es de aproximadamente 40 Km. 2. El valle del Hundido se encuentra ubicado entre las siguientes estructuras al Norte la Sierra de La Fragua, al Sur con la Sierra de Los Alamitos, al Este con la Sierra del Granizo y al oeste con la Sierra del Venado, su superficie es de 952 Km.2. El valle de mayor importancia por su biodiversidad es el Valle de Cuatro Ciénegas el cual está limitado al norte por la Sierra de La Madera, La Fragua al oeste y la de San Marcos el Pino y La Purísima al sur y al este por la Sierra de la Purísima; su superficie es de 1,426 Km2. Figura 1.4

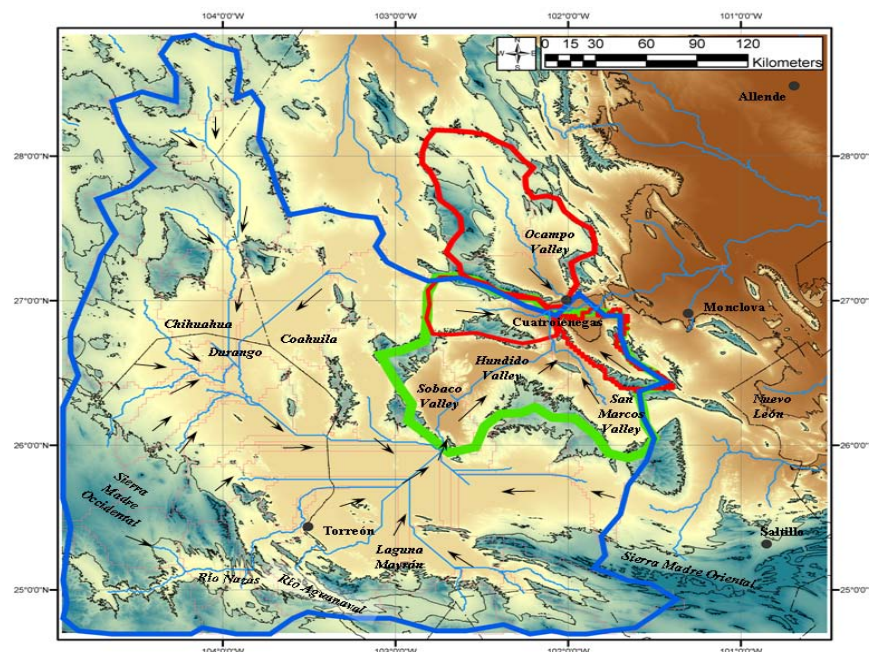


Figura 1.4. Extensión del área de estudio

1.5.3. Vías de comunicación.

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 Luís Potosí, Saltillo, Castaños, Monclova y llega hasta Piedras Negras, Coahuila.

Para llegar a la zona de estudio se debe de tomar en cuenta donde se encuentren; si uno sale de Torreón Coahuila debe de tomar la carretera N° 30 que lo llevara exactamente a la zona de estudio, si uno se encuentra en Saltillo debe de tomar la carretera N° 57 y en Monclova la carretera N° 30 que lo dejara también en la zona de estudio, al igual que si se esta en Monterrey debe de tomar la carretera N° 53 Monclova y luego la 30 que lo llevara a el valle El Hundido. **Figura 1.5**

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

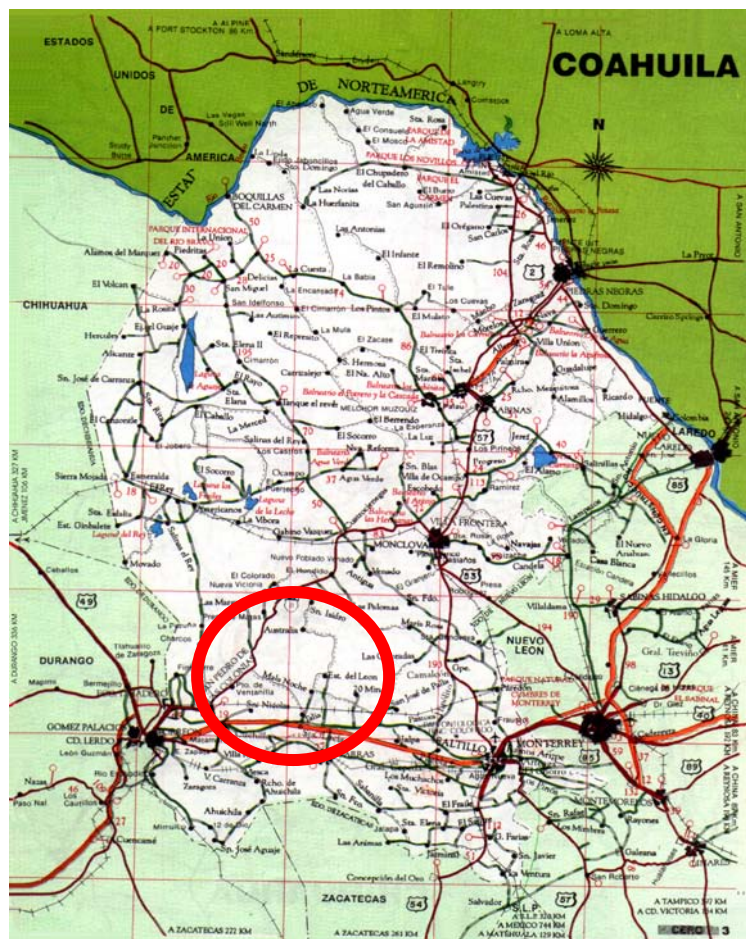


Figura 1.5 Plano Carretero

1.5.4. Servicios.

La ciudad de Cuatro Ciénegas de Carranza cuenta con servicios telefónicos, correo, asistencia social, centros de salud, de esparcimiento, ciber café, farmacias, centros comerciales, oficinas de turismo, hoteles de categoría turística y restaurantes (El DOC).

1.5.5. Área De Protección de Flora y Fauna.

El valle de Cuatro Ciénegas es uno de los desiertos más ricos en especies endémicas; así mismo, es uno de los desiertos que contiene más cantidad de agua, a pesar de localizarse en una zona donde la precipitación pluvial es muy errática. El 59% de las 84,347 hectáreas, son propiedad de particulares, la parte restante (41%) son propiedades ejidales.

El valle de Cuatro Ciénegas es uno de los ecosistemas más importantes de México, debido a su gran biodiversidad de especies endémicas, se sitúa en el centro del Estado de Coahuila, fue decretada área protegida en el año de 1994 (INE, 1999,2000). El Valle se ubica entre las coordenadas 26° 42' 10"- 27 ° 00' 03" de Latitud Norte y 101 ° 52' 01" y 102 ° 25' 12" de Longitud Oeste.

El valle de Cuatro Ciénegas ha sido objeto de muchos estudios tanto de plantas y animales, principalmente taxonómicos para comprender los diferentes procesos de evolución de las especies que habitan el valle, por tal motivo es considerado un laboratorio natural (Taylor Minckley, 1966), siendo el valle un área tan pequeña existe una gran biodiversidad de especies endémicas dentro de éstas podemos incluir peces, (Contreras- BALDERAS, s., 1990b; Minckley, 1969,1984; Williams et, al., 1985), moluscos (Branson,1970; Contreras-Arquieta, 1986,1998,2000; Hershler,1984,1985; Taylor,1966,1967, reptiles y anfibios (McCoy,1984) , crustáceos (Cole,1984), y plantas (Pinkava,1984; Vázquez-Aldape, et al., 2001). La biota en el Valle de Cuatro Ciénegas asciende a 1,274 especies con 74 endémicas. Debido a su riqueza de especies, es importante biológica y ecológicamente a nivel internacional (Contreras- Balderas, S., 1990^a; Minckley, 1969). El impacto antropogénico provocado en los últimos seis años por la empresa lechera LALA y SORIANA han provocado efectos nocivos a la reserva ecológica del Valle de Cuatro Ciénegas. En las **fotografías (6, 7, 8, 9, 10 y 11)** se puede observar los efectos de la sobre explotación de los acuíferos tanto en el Valle del Hundido como en el de Calaveras y su repercusión sobre algunas de las pozas del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila.



Fotografía. 6. Poza Chiqueros en el año de 1980



Fotografía. 7. Poza Chiqueros en el año de 2002



Fotografía 8 Poza Chiqueros en el año de 1980



Fotografía 9. Poza Chiqueros en el año de 2002



Fotografía 10. Poza El Garabatal en el año de 1980.



Fotografía 11. Poza El Garabatal en el año de 2002.

Capítulo II

2. METODOLOGÍA.

2.1. Actividades de campo.

Para conseguir los objetivos establecidos en la propuesta, se aplicó un análisis de matrices de acuerdo a la metodología establecida por Leopold et al (1971) la cual consiste en identificar todas las acciones que son parte del proyecto así como sus dimensiones e impactos significativos, para ello dicho proyecto fue dividido en tres etapas.

Durante los meses de enero a agosto del 2003, se realizaron las actividades de campo encauzadas a la recopilación, análisis y evaluación de la información del área de estudio, cuantificación de recursos hídricos, censo de aprovechamientos hidráulicos tales como pozos, norias, papalotes, manantiales y galerías filtrantes en el Valle del Hundido.

2.1.1. Recopilación de información.

Se recurrió a todas las fuentes posibles de información útiles para el proyecto y que nos permitieran definir la situación actual sobre el marco geológico, estructural, hidrogeológico, hidrogeoquímico, hidráulico sobre el área en cuestión.

Se realizaron resúmenes de cada uno de los trabajos previos, puntualizando sus: objetivos, actividades, alcances, resultados y conclusiones.

2.1.2. Recorridos de campo.

Se realizaron recorridos de campo necesarios para la toma de datos geológicos, localización y verificación en campo de pozos pilotos, establecimiento de la red de monitoreo para la toma de muestras para análisis físico químicos e isotópicos y piezométricos, toda esta información fue ubicada con el apoyo de GPS GARMIN 60 XS de última generación, todos los datos de campo se tomaron en coordenadas UTM, posteriormente fueron vaciadas en el plano base para la generación de planos relacionadas cada uno con el tópico a investigar.

2.1.3. Interpretación fotogeológica.

Por medio de un esteroscopio de espejos y un transferoscopio se procedió a la realizar la interpretación de las fotografías de vuelo bajo escala 1:50000 y 1:70000 en blanco y negro e imágenes de satélite Landsat con rayos infrarrojos editados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). En dichas fotos se marcaron el sistema de fallas y fracturas, tipo de drenaje, así como los principales rasgos estructurales como ejes de anticlinales y sinclinales. Toda esta información sirvió de base para crear el plano geológico del área de estudio. (Ver Plano Geológico)

2.1.4. Levantamiento de secciones geológicas.

El área correspondiente a las sierras de la Fragua, El Granizo, El Venado, Los Alamos y San Marcos El Pino, fueron estudiadas a semi-detalle y detalle a través de caminamientos y levantamientos geológicos de 3 secciones a detalle, tomando datos estructurales, echado, rumbo de fracturas, espesor de afloramientos, descripción de afloramientos, levantamiento de columnas estratigráficas tipo y fotografías de afloramiento.

2.1.5. Toma de niveles piezométricos.

Durante el recorrido de campo, tomaron datos de niveles piezométricos en época de estiaje y en temporada de lluvias a fin de observar el comportamiento de sus niveles a nivel regional después de cada evento. Para la realización del censo de aprovechamientos hidráulicos, se utilizó una tabla maestra para el vaciado de toda la información correspondiente a este rubro, dentro de los datos que se plasmaron en la tabla de campo se encuentran los siguientes: tipo de aprovechamiento, nombre del propietario, tipo de uso, coordenadas, altura del brocal, características mecánicas del pozo, diámetro del agujero, tipo de ademe, diámetro del ademe, tipo de bomba, características de la bomba, columna de bombeo, diámetro de la descarga, nivel dinámico, nivel estático y volumen de extracción en litros por segundo.

2.1.6. Análisis químicos, fisicoquímicos de muestras de agua.

Muestreo y análisis fisicoquímico e isotópico de muestras de agua subterránea. Se tomaron muestras de agua de diferentes aprovechamientos hidráulicos a partir de una red de monitoreo previamente establecida. Se tomaron 20 muestras para la realización de análisis fisicoquímicos y 10 para realizar análisis de isotopía. La cantidad de pozos seleccionados se realizó a partir de un plan propuesto con antelación con base en criterios geológicos, estructurales hidrológicos e hidrogeoquímicos.

Los análisis que se realizaron a las 20 muestras fueron por elementos mayores: aniones y cationes. Los cationes analizados fueron: Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio, los aniones fueron los siguientes: Bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos. Los parámetros físicos analizados fueron: pH temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, salinidad, todos estos datos fueron tomados insitu en los pozos donde fue posible introducir el HydroLab Sond 4^a hasta una profundidad de 200 metros.

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, Massachussets, USA.

Las muestras de agua subterránea obtenidas de pozos para análisis isotópico de Tritio se muestran en la **Tabla 7.6.9.4.**

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

2.1.7. Pruebas de bombeo.

Con el propósito de conocer las características hidrodinámicas del acuífero en el Valle del Hundido, se efectuaron 8 pruebas de bombeo, distribuidas de la manera siguiente: cuatro se localizan en el Rancho San Fernando en el acuífero en medios granulares, las otras cuatro restantes se realizaron el acuífero en rocas consolidadas en el Ejido Santa Teresa de Sofía, municipio de Cuatro Ciénegas, Coahuila; los tiempos de duración en las pruebas de bombeo escalonadas en los ocho pozos fueron de larga duración (72 horas), **Figura 6.1.65 (fotografías 15 y 16).**

En la **tabla 6.3.14** se muestra la localización de cada uno de los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo. Para definir el comportamiento hidráulico del acuífero en el Proyecto: “Valle del Hundido”, se realizaron pruebas de bombeo escalonadas de larga duración (72 horas), durante el desarrollo de la prueba, se contó con dos pozos de observación (25 y 46). El pozo No. 25 localizado a 281.20 metros y el No. 46 a 240.83 metros del pozo de bombeo No. CNA 24 es importante recalcar que los resultados obtenidos en los pozos de observación nos muestran el comportamiento hidráulico del acuífero, así como el radio de influencia provocado por el bombeo.

La verificación del caudal durante una prueba de bombeo, requiere de un dispositivo para medir la descarga de la bomba, una manera conveniente de ajustarla para mantener ésta lo más constante posible, es mediante un agujero calibrado con arandelas biseladas colocadas hacia la parte interior del tubo de descarga para reducir el flujo y aumentar la presión del fluido, el cual se podrá observar en la altura del piezómetro.

El dispositivo de orificio calibrado es el instrumento más comúnmente utilizado en este tipo de trabajos, específicamente en bombas centrífugas o de turbina.

CAPITULO III

3. FISOGRAFÍA

3.1. Fisiografía.

El área de estudio se localiza en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, Subprovincia de las Sierras y Llanuras Coahuilenses (INEGI, 1981). Figura 3.1.6

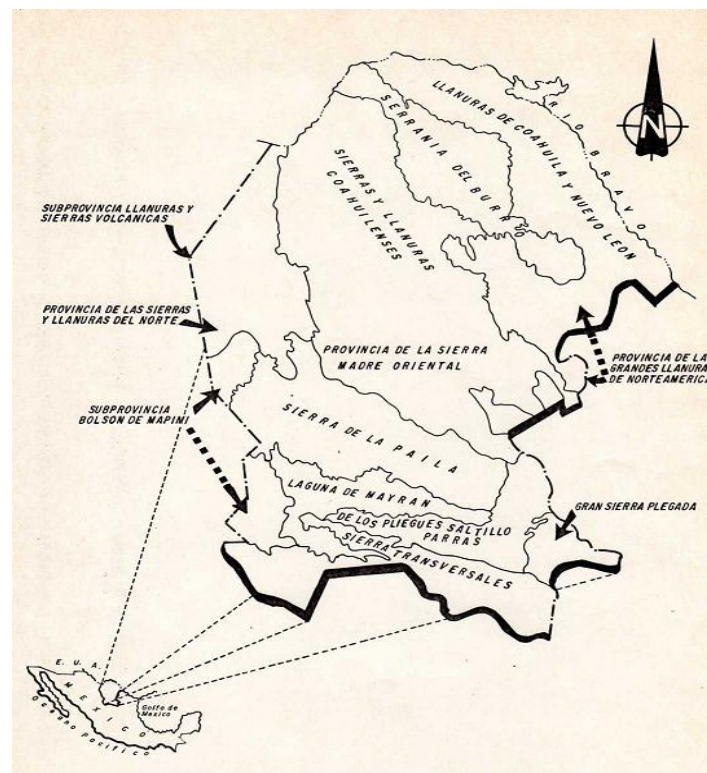


Figura 3.1.6 Subprovincia de las Sierras y Llanuras Coahuilenses.

La subprovincia está constituida por sierras de calizas plegadas, la mayoría orientadas de noroeste a sureste separadas entre sí por amplios valles planos que reflejan el carácter geomorfológico de las rocas constituyentes, así como el tipo de deformación. En forma general las sierras que circundan el Valle del Hundido están conformadas por anticlinales alargados como son las Sierra del Granizo, ubicada al sureste del valle, al oeste y suroeste la Sierra del Venado al sur franco la Sierra de Los Alamitos que presenta forma cómica; al norte franco la Sierra de la Fragua que posee igual morfología que la de los Alamitos.

3.1.1 Geomorfología.

La subprovincia de las Sierras y Llanuras Coahuilenses está constituida por calizas plegadas, la mayoría de ellas orientadas de noroeste a sureste. En el área de estudio se localizan 4 estructuras que delimitan la zona de investigación (figura 3.2)



Figura 3.1.7. Geomorfología del área de estudio

3.1.2. Sierra del Granizo

Corresponde a una estructura alargada que se extiende por espacio de 35 Km. de largo, en el extremo norte presenta una deflexión hacia el noroeste producto de una falla inversa, su parte central presenta un combamiento hacia el noreste producto del empuje del macizo rocoso de la Sierra de los Alamitos, dicha estructura corresponde a un pliegue anticlinal armado por rocas calizas del cretácico inferior.

Su elevación máxima es de 2625.45 msnm en su parte central, mientras que en la parte sur su altura es de 1,200.00 msnm.

3.1.3. Sierra de los Alamitos.

Esta estructura tiene forma de domo limita al valle del Hundido en su parte sur, dicha estructura presenta pendientes muy suaves hacia su parte norte en contacto con el valle, hacia la parte central presenta elevaciones de 2000.00 m. s. n. m.

3.1.4. Sierra del Venado.

La sierra del Venado delimita el valle del Hundido al oeste y suroeste corresponde a una estructura alargada en su parte norte, mientras que en su parte central es mucho mayor su amplitud, la altura máxima que presenta esta estructura se observa en la parte central alcanzando una elevación de 1700.25 m. s. n. m la parte más baja se muestra al norte alcanzando los 1250.00 m. s. n. m.

3.1.5 Sierra de la Fragua.

La sierra de la Fragua presenta una estructura cómica buzando hacia el noreste, presenta pendientes muy suaves en su limbo norte, limita al Valle del Hundido en su flanco sur también se ve bisectada por la Falla de San Marcos la cual se prolonga por una distancia de 300 Km. Su altura máxima es del orden de 1600.00 en su parte central de 1200 en su parte limítrofe con el Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

3.1.6. Valle del Hundido.

El valle El Hundido se encuentra rodeado por distintas serranías que pertenecen a la Sierra Madre Oriental, estas serranías son: La Fragua, la del Venado, la de los Alamitos y la de el Granizo. La altura máxima del valle del Hundido se reporta en el contacto con la Sierra de la Fragua siendo esta de 1100.00 m. s n. m. Figura 3.1.8 Ver plano de altimetria.

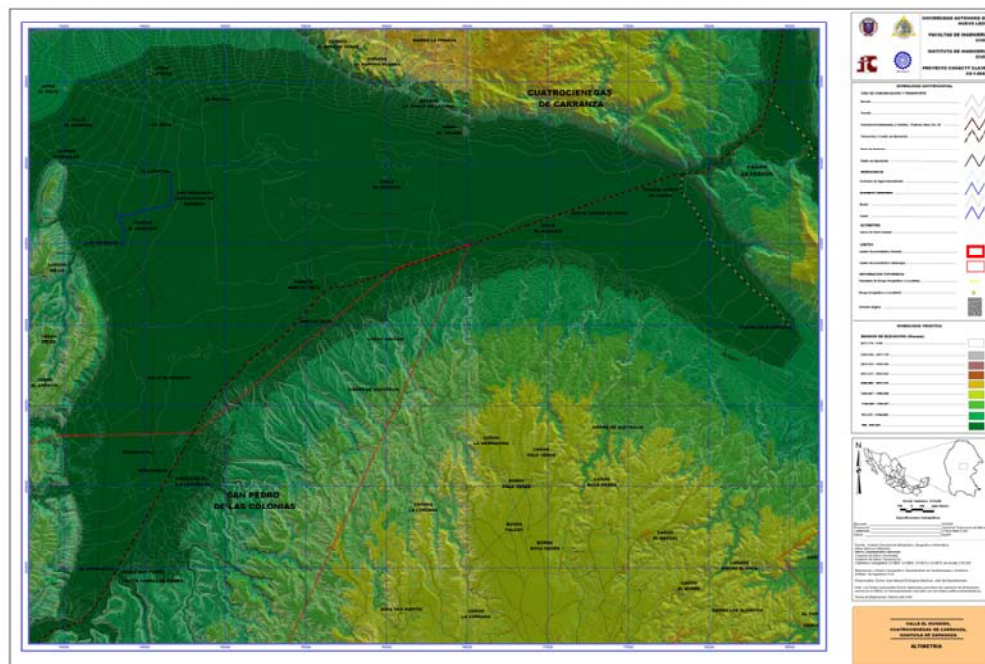


Figura 3.1.8 Plano de Altimetria.

3.2 Climatología

3.2.1 Introducción

El clima en una región es importante, ya que este dictamina el comportamiento de las precipitaciones que se suceden en la zona, así de esta forma ambas están íntimamente relacionadas, es importante mencionar que en el ciclo del agua la precipitación es una

parte fundamental del mismo, junto con la evaporación, transpiración, escurrimiento superficial, infiltración; escurrimiento subterráneo y almacenamiento.

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

El régimen intenso de explotación a que ha sido sometido el acuífero en el Valle del Hundido por las tres empresas afiliadas al Grupo LALA, han afectado las distintas maneras los ecosistemas del sitio investigado, impactando a en el suelo, flora y fauna de la reserva ecológico del Valle del Cuatro Ciénegas, el cual se muestra en los descensos de algunos pozos. (Chiqueros, Churince, San Marcos, Atalaya).

3.2.2. Clima que se presenta en el sitio de estudio

El estado de Coahuila esta 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 semi-cálido, con base a cartas climáticas del INEGI. Encontrándose en los bolsones coahuilenses hasta los templados de las partes altas y las más septentrionales. Figura 3.2.9

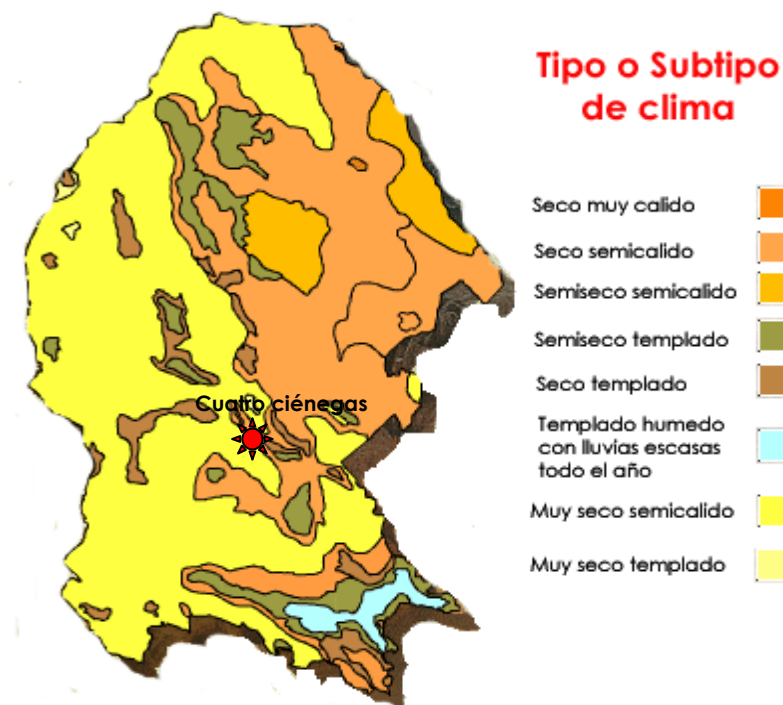


Figura 3.2.9 Mapa climático del estado de Coahuila

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

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

3.2.5. Temperaturas

Los datos de temperatura recabados en la zona fueron de la estación Meteorológica de Cuatro Ciénegas cuyas coordenadas son 102.07° longitud oeste y 26.98° latitud norte

Tabla 3.1 Temperaturas registradas en la estación de Cuatro Ciénegas en el periodo de 1942 a 2001

Cuatro ciénegas													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
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.	11.	12.	16.	21.9	23.	23.	21.8	21.	16.	8.5	4.7	16.1



SEP-CONACYT

Lampazos54e94



	5	1	0	9		4	7		4	7			
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
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
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
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



SEP-CONACYT

Lampazos54e94



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	18.1	22.3	24.1	23.1	24.3	20.1	17.1	9.8	10.3	17.0



SEP-CONACYT

Lampazos54e94



		1	1	9		2	1		5	7			
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	21.9	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 desde el año 1942. Los datos de temperatura se muestran en la **Figura 3.2.10**.

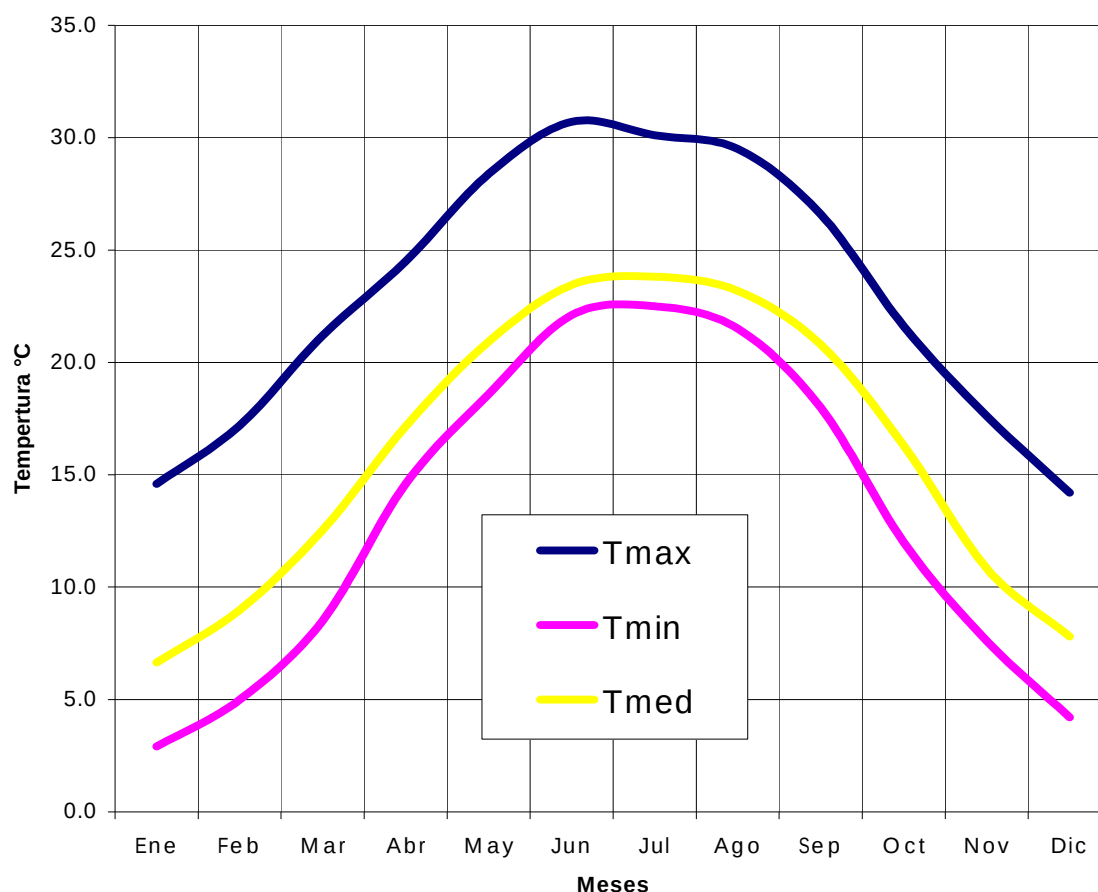


Figura 3.2.10. Gráfica de temperatura media en los meses del año

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 rango medio de estas temperaturas las más elevadas van de 20 a 25 ° C y con rango medio las temperaturas más bajas van de 5 a 10° C.

Con la información obtenida se logra definir el tipo de clima que se presenta en la zona de estudio, para así poder hacer un análisis más a fondo de las características de sitio para tener una visión más amplia es necesario ver las **Figuras 3.2.11 y 3.2.12**

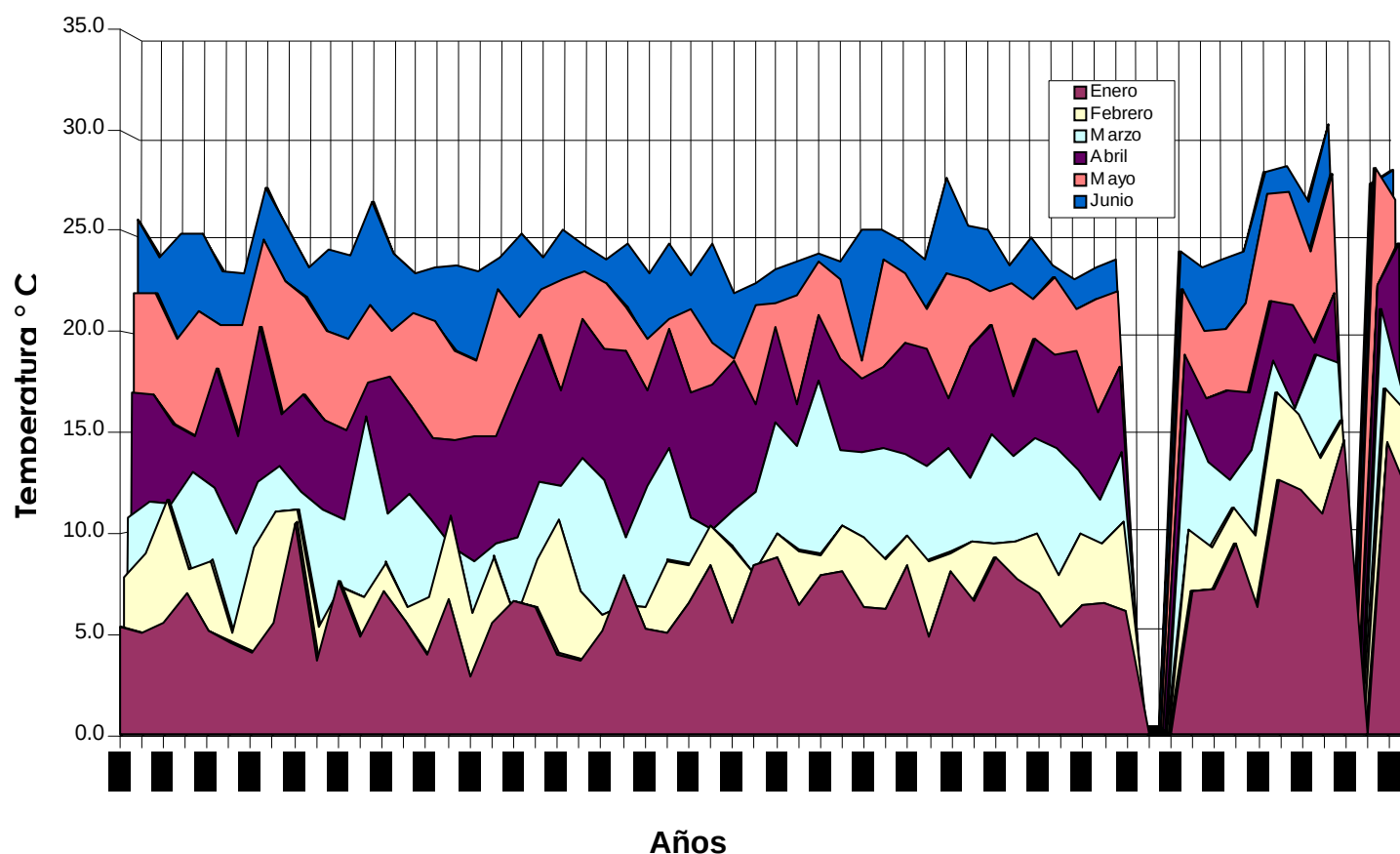


Figura 3.2.11 Temperaturas correspondientes a los meses de enero-junio.

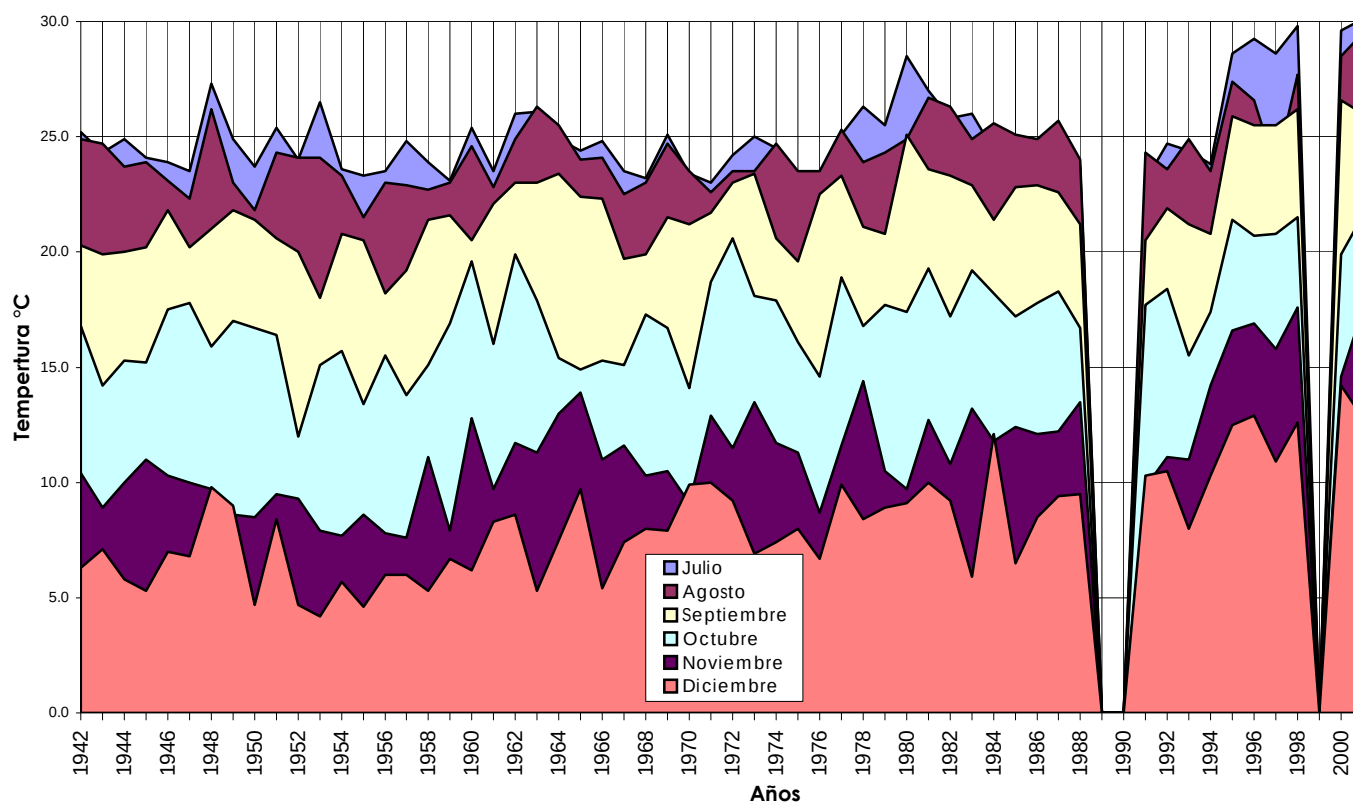


Figura 3.2.12 Temperaturas correspondientes a los meses de julio-diciembre.

La variación de las temperaturas en los meses en cada año registrado, se puede observar claramente los períodos de retorno que se presentaron en la zona a lo largo de los años. Observamos 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.

3.2.6. Radiación Solar

Basándonos 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 obtenemos el RA en la **tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Radiación solar RA 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	107 2	994	765	418								
80°	155	423	760	988 4	106 0	980	754	418	153	7						7
70°	307	525	749	939	101 2	934	742	519	303	129	24				24	131
60°	447	635	809	934	979	929	880 1	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	971 971	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	861 920	778 .6	682 .2	588 .4	493 .2	521 519	592 .8	689 .2	719 .6	749 .8
27°	794 .8	873 .7	927 .2	957 .4	963	951	864 .5	784 .4	692 .8	600 .1	532 .3	507 .5	534 .7	604 .8	699 .9	749 .7
26°	801 .4	876 .6	926 .6	954 .2	959	948	867 919	791 .2	701 .4	612 .8	546 .4	521 546	548 .6	617 .4	709 .2	749 .6
25°	808	879 .5	926	951	955	945	918 .5	870	798	711 .5	624 .5	559 .5	535 .5	562 .5	629 .5	719 .5
24°	814 .6	882 .4	925 .4	947 .8	951	942	872 918	804 .8	721 .6	636 .2	573 .6	549 573	575 .4	641 .6	729 .8	749 .4
23°	821 .2	885 .3	924 .8	944 .6	947	939	875 .5	811 .6	730 .2	648 .9	586 .7	563 .5	589 .3	654 .2	739 .1	749 .3
22°	827 .8	888 .2	924 .2	941 .4	943	936	878 917	817 .4	740 .8	660 .6	600 .8	577 600	602 .2	666 .8	749 .4	749 .2



21°	834	891	923	938			916	881	824	750	672	613	591	616	678	759
	.4	.1	.6	.2	939	933	.5	.2	.4	.3	.9	.5	.1	.4	.7	.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

$$R_i = R_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (3.1)$$

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

Tomando en que la zona de estudio esta a 29° latitud Norte, basándonos en el método simple para la interpolación obtenemos la **tabla 3.3** para obtener N y a su vez para establecer los valores propuestos por J. Glover y J. G. S. McCulloch (1958) se utiliza las formulas de Jáuregui para la Republica Mexicana donde $a = 0.2909 * \cos \phi$ (ϕ es la latitud en grados) (3.2)

$b = 0.550$ (constante)

Tabla 3.3 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

Y sacando los cálculos que corresponden para a y b tenemos

$$a = -0.21693668$$

$$b = 0.550$$

Y teniendo los valores para el tiempo de luz diaria como se muestra en la tabla 3.4

Tabla 3.4 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

Podemos ya calcular Ri teniendo los resultados en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Radiación incidente

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ri	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 uso la formula

$$R_r = r * (R_i) \quad (3.3)$$

Donde r lo sacamos del Apéndice 1 de este Capitulo. En la zona de estudio se tiene dos tipos de albedo una en los campos de cultivo por la alfalfa del cual se tiene un albedo que iría de 0.19 a 0.25 como la zona de estudio se presentan condiciones extremas se tomará las más alta y el valor del albedo para el resto de la zona estudio que se tomará como suelo desnudo seco fue de 0.18. Los resultados sobre el comportamiento de la radiación solar reflejada en la zona se mostraran en la **tabla 3.6**

Tabla 3.6 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)

$$R_l = \sigma T^4 \left(0.56 - 0.924 \sqrt{e_2} \right) \left(0.10 + 0.90 \frac{n}{N} \right) \quad (3.4)$$

Donde

RI = 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 3.7**

Tabla 3.7 Radiación neta de onda larga

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RI	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

$$R_n = R_l(1-r) - R_l \quad (3.5)$$

Teniendo la **tabla 3.8**

Tabla 3.8 Radiación neta en la zona de estudio

Rn	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 3.2.4**

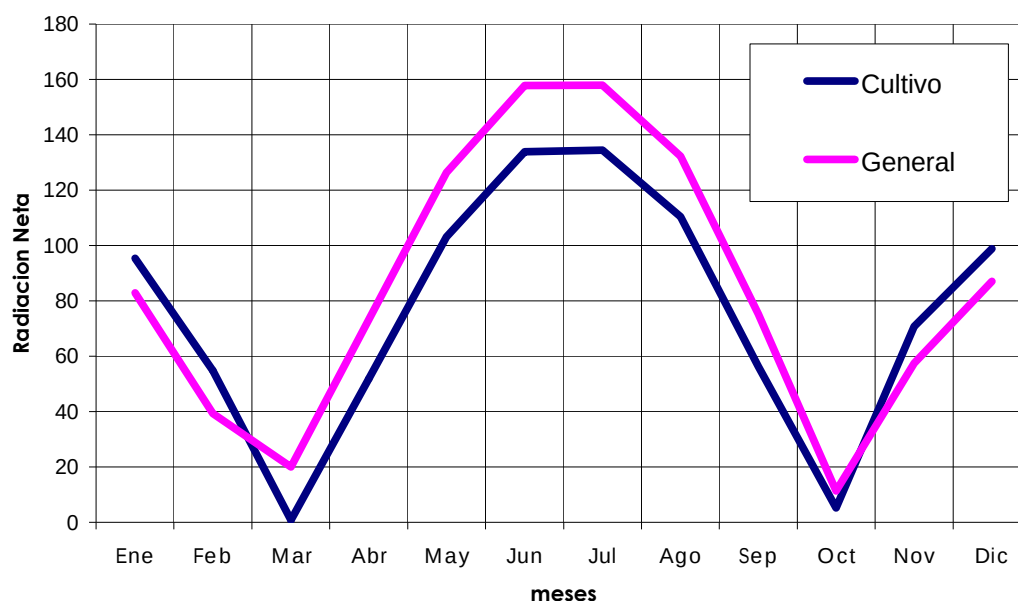


Figura 3.2.13 Gráfica de radiación neta en los meses del año

Como se puede apreciar en la figura 3.2.13 tenemos un incremento de la radiación solar en los meses de junio y julio al igual si recordamos 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.

3.2.5 Precipitaciones del sitio

Las precipitaciones que se dan en la zona de estudio se recopilieron 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 mencionado en la **Tabla 3.9**

Tabla 3.9 Precipitaciones registradas en la estación de Cuatro Ciénegas en el periodo de 1942 a 2003

Cuatro Ciénegas

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
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
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
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.	65	4.2	47.5	19	22.	0.5	271.3



						5					5		
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
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
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
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
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	146.4	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 3.2.14**

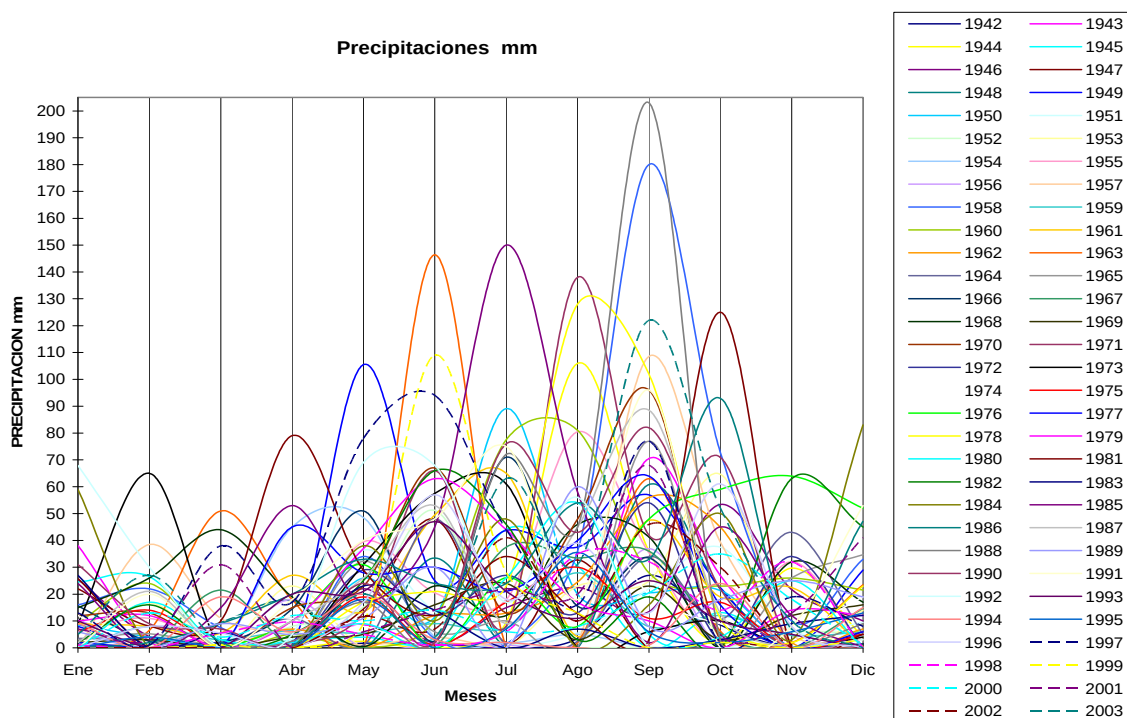


Figura 3.2.14 Gráfica de Precipitación de diferentes años

Para tener una perspectiva del comportamiento de las precipitaciones en el siguiente gráfico se muestra las precipitaciones media, máxima y mínima **Figura 3.2.15**.

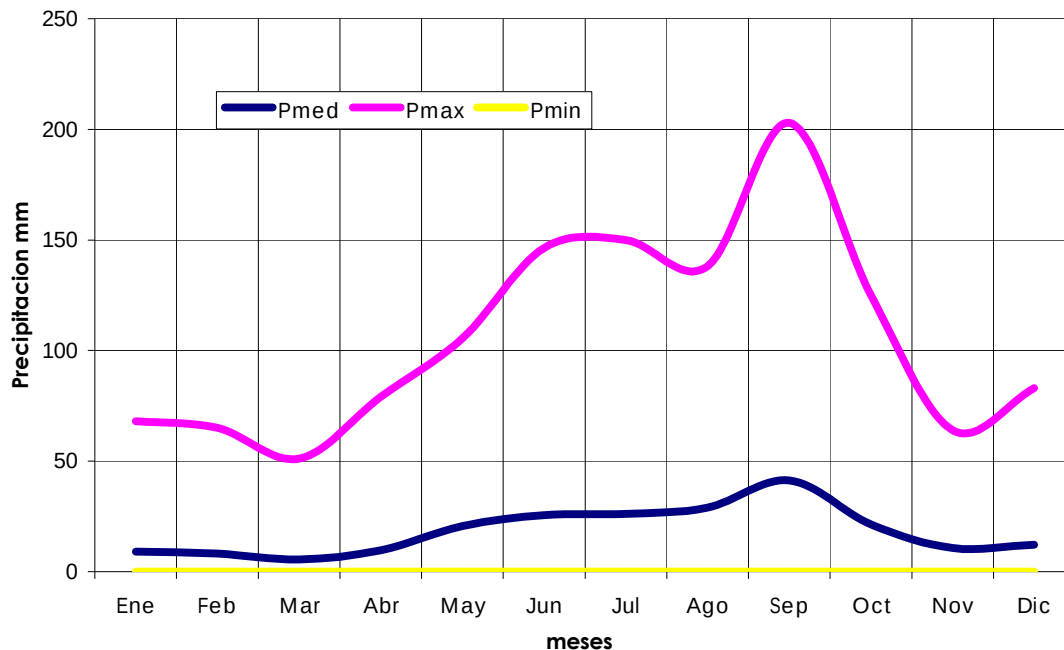


Figura 3.2.15 Gráfica de Precipitación

Para la determinación de la homogeneidad de los registros que tenemos, nos basaremos en pruebas estadísticas para su determinación debido a la gran diferencia que existe entre las precipitaciones anuales en distintos años, usaremos la prueba estadística de la t de Student, y para complementar los resultados usaremos la prueba estadística de Cramer.

La prueba de t de Student se llevará a cabo para un primer período de 1942 a 1970 y un segundo período de 1971 a 2003, basando en la tabla 3.9 obtenemos la media aritmética y la desviación estándar de dichos periodos que son **tabla 3.10**:

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

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

Tabla 3.10 Desviación estándar y media aritmética

	Periodo	N	$\bar{X}$	S	S2
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:

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.8)$$

Sustituyendo los valores de la tabla 3.10 en la formula 3.8 se obtiene

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

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 $\nu = n_1 + n_2 - 2$ (3.9) obteniendo $\nu = 29 + 33 - 2 = 60$ dando un valor de $t = 2.00$ 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 superyodo dos:

$$\bar{X} = 215.59 \text{ mm}$$

$$S = 95.31 \text{ mm}$$

$$n = 62 \text{ años}$$

$$n' = 33 \text{ años}$$

$$\bar{X}_k = 243.68 \text{ mm}$$

Se tiene en la prueba de Cramer definidas las ecuaciones:

$$\tau_k = \frac{(\bar{X}_k - \bar{X})}{S} \quad (3.10) \quad t_k = \left\{ \frac{n'(n-2)}{n - n' [1 + (\tau_k)^2]} \right\}^{\frac{1}{2}} (\tau_k) \quad (3.11)$$

Asiendo una sustitución de nuestros valores en las ecuaciones 3.10 y 3.11 obtenemos:

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

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

Tomando los grados de libertad que se tienen de la prueba de Cramer $\nu = n - 2$ (3.12) $\nu = 62 - 2 = 60$ se checa 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 es contundente ya que en ambas pruebas las diferencia que existe es mínima lo cual indica que los datos son confiables en cierto grado.

A partir del análisis climático de la región, se logró cuantificar la evaporación. Este valor es muy elevado si lo comparamos con las precipitaciones de la región la cual es del orden de 210 mm., esto permite constatar que la recarga del acuífero en el valle El Hundido es mínima.

Esto es porque se encuentra registrado en este período las mayores precipitaciones del año.

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 húmedo	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 bambú	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)
Césped Verde	0.26	Diversos
Césped 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

3.3. Tipo de suelo.

Se considera al suelo como un cuerpo natural, sintetizado en su perfil a partir de una mezcla variable de minerales desmenuzados y modificados atmosféricamente, con presencia de materia orgánica en desintegración, la cual forma parte de la cubierta vegetal y actúa como soporte de los ecosistemas que conforman el entorno en el Valle del Hundido infiltrando volúmenes de agua por capilaridad producto de los procesos de condensación debido a los descensos bruscos de temperatura típico de zonas desérticas como es el caso. Plano Tipo de suelos (Buckman y Brady, 1996).

Uno de los fenómenos que ocurren en el suelo es el movimiento de flujos descendente del agua libre por percolación perneando, tanto la cubierta superficial como la parte superior del estrato que conforma el subsuelo. Este proceso depende de las características del suelo como son: textura, porosidad, conductividad hidráulica, etc. Los suelos arcillosos y limosos presentan baja permeabilidad y alta capacidad de retención por lo tanto incrementan el tiempo de tránsito del agua por la zona no saturada (Fallas, 2000).

Los datos para la clasificación del tipo de suelo, fueron obtenidos a partir de la carta edafológica publicada por INEGI, serie I, impresa en medio analógico durante la década de los 80's. y aparece en medios digitales a finales de los 90's. La clave de INEGI clasifica los suelos en tres tipos: Primario, secundario y terciario. Además considera la clase textura como factor determinante para la asignación del valor DRASTIC, clasificándolos en tres tipos: Suelo de textura gruesa, media y fina. Figura 3.3.16

Los tipos de suelo encontrados en la zona de estudio:

- 1.- Litosol
- 2.- Regosol
- 3.- Xerosol
- 4.- Yermosol
- 5.- Solonchak

En el área de estudio, zona de montaña se presentan suelos de tipo **Litosol**, caracterizados por distribuirse en las sierras, laderas, barrancos y malpaís. Son suelos arenosos y/o arcillosos, presentan espesores menores de 10 centímetros de profundidad. El tipo textural para estas unidades está asociado con una textura media. La superficie ocupada por este tipo de suelo es de aproximadamente 102 Km².

El **Regosol** se presenta en zonas de dunas, playas, no presenta estratificación por lo general esta intercalado con horizontes de tepetate. La superficie representada por este tipo de suelos es de 210 Km².

Los suelos del tipo **Xerosol** son ricos en arcillas con aglomerados de cal, cristales de yesos o caliche. Se caracterizan por poseer baja susceptibilidad a la erosión, la superficie representada por este tipo de suelos en el área de estudio es de 65 Km².

Los suelos tipo **Yermosol** son suelos ricos en arcillas con agregados de cal o de yeso, en el sub-suelo, en ocasiones son salinos la superficie representada por este tipo de suelos es de 256 Km².

El **Solonchak** se caracteriza por su elevado contenido de sales, la erosión es leve en el área de estudio la superficie que cubre este tipo de suelo es de 227 Km².

En lo que respecta al uso del suelo en el área de estudio, aproximadamente 10095 hectáreas son utilizadas para uso agrícola. El principal cultivo que se explota en el Valle del Hundido es la alfalfa, cultivo que requiere demasiada agua, recurso que es escaso en el valle.

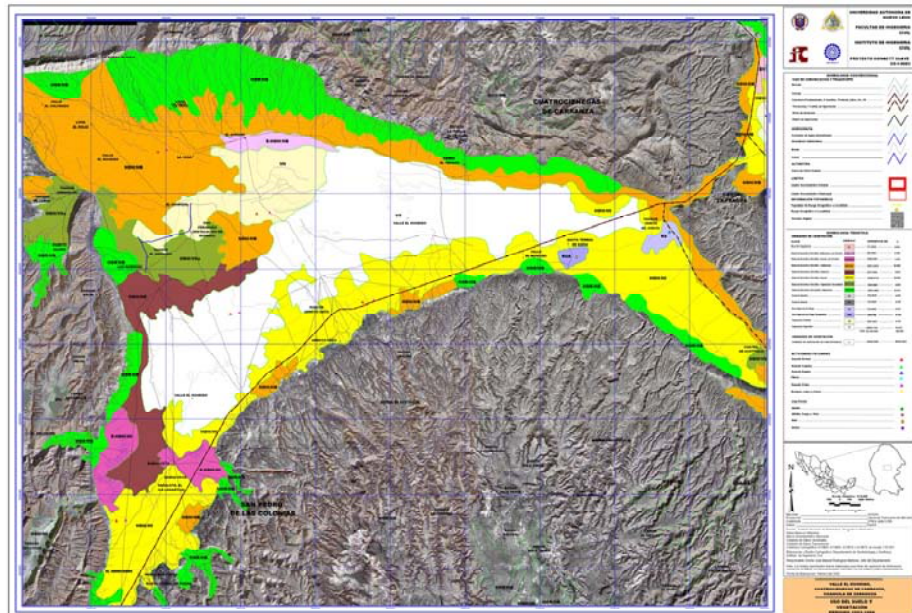


Figura 3.3.17 Plano uso del suelo y vegetación período 1980.

Para el período 1993-1998 el área de vegetación se vio reducida producto del desmonte despiadado realizado por el Sr. Florentino Rivero en su propiedad siendo eliminadas una gran cantidad de plantas endémicas de la zona, lo cual aceleró el proceso de erosión; en la figura 3.5.18, se muestra el nivel desmonte provocado por dicha acción.

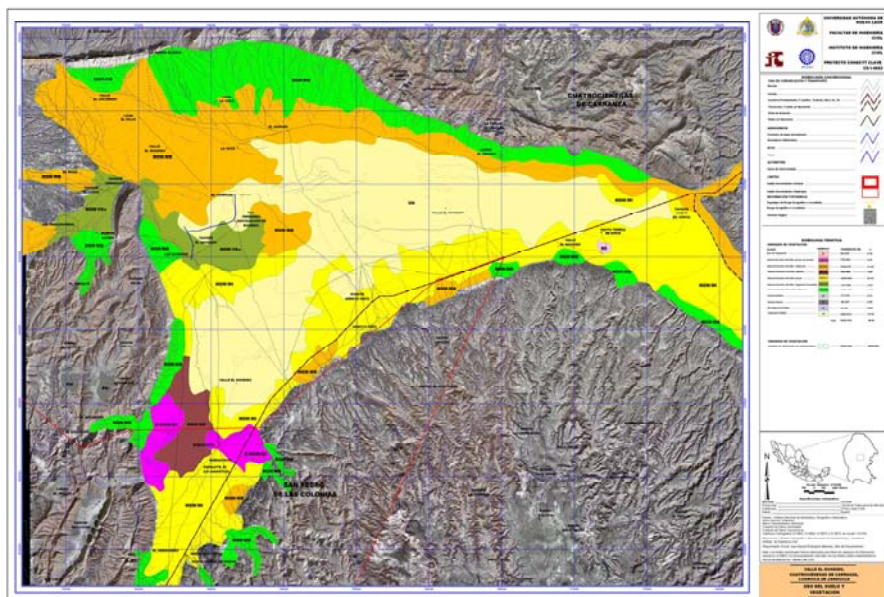


Figura 3.3.18 Se muestra el uso del suelo para el período 1993-1998

3.4 Vegetación y fauna.

La región presenta un sustrato calizo del Mesozoico con suelos evaporíticos, los cuales constituyen la singularidad del sitio de estudio, el tipo de vegetación desértica en el Valle del Hundido lo conforman pastizales halófitos, matorral halófito, matorral desértico, guayule, lechuguilla, gobernadora, candelilla, la yuca; en las partes altas de las sierras abundan especies de árboles como el pino, encino, madroño etc.

La fauna localizada en los humedales del valle de Cuatro Ciénegas está conformada por peces, tortugas, caracoles, reptiles y crustáceos, aislados durante millones de años, por lo que la evolución determinó su endemismo. Del total de las 120 especies registradas 73 son endémicas, también se han registrado 61 especies de aves las cuales la mayoría son migratorias, los mamíferos más comunes en la región son el puma, venado, gato rabón (gato montés), lince, coyote, zorros, tejones, liebres, conejos, codornices, correcaminos, jabalí, tlacuache, etc.

Capítulo IV

4. GEOLOGÍA

4.1. Introducción

El valle El Hundido se encuentra enclavado en 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 Alamitos y la de el Granizo.

Es importante mencionar que el valle es atravesado por la falla de San Marcos 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.

4.2. Geología Regional

La zona de estudio se encuentra en la parte central del estado de Coahuila. La cual está 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 presencia de la Sierra Madre Oriental atraviesa de sur a norte todo el estado de Coahuila, por la región central-oriental. Esta es la columna vertebral del sistema montañoso de esta 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 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 las subcuencas de Magiscantzin 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. Figura 4.2.19

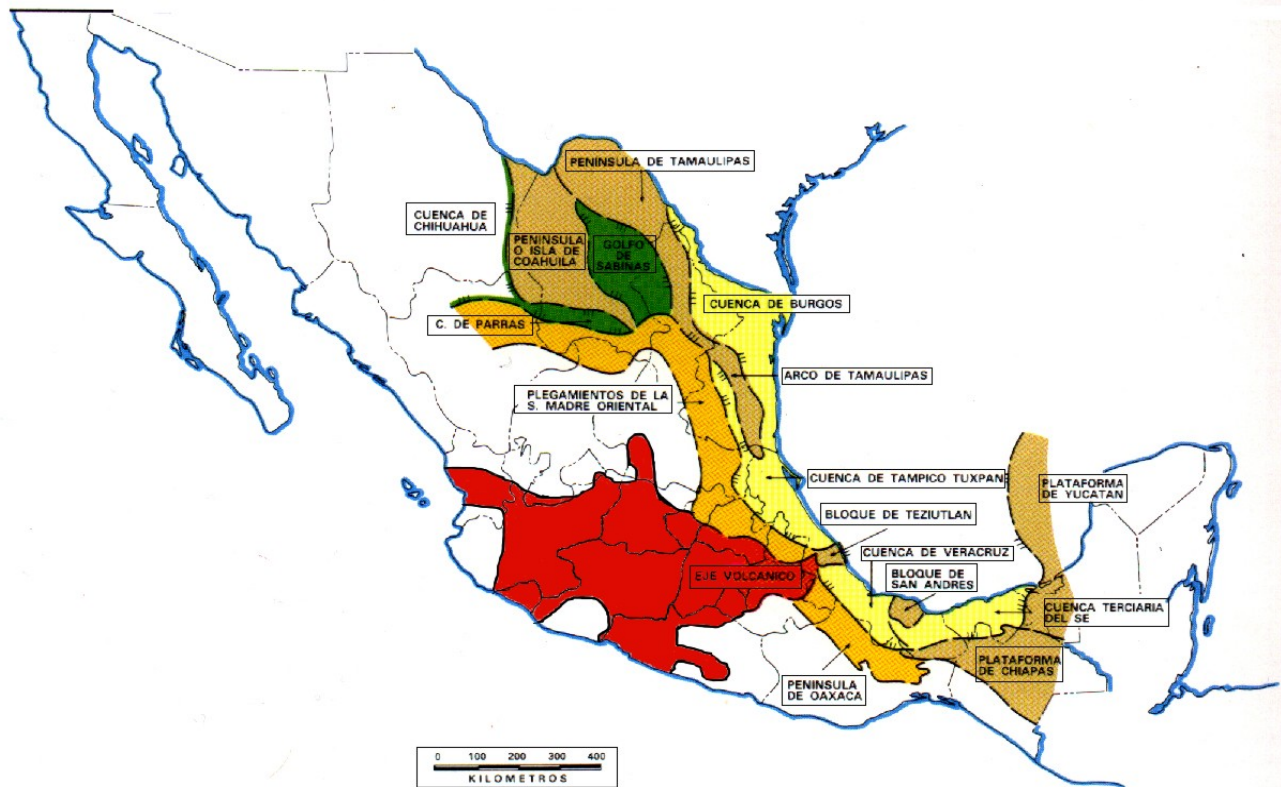


Figura 4.2.19 Unidades Tectónicas

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, EE.UU.

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

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, esta 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 4.2.20

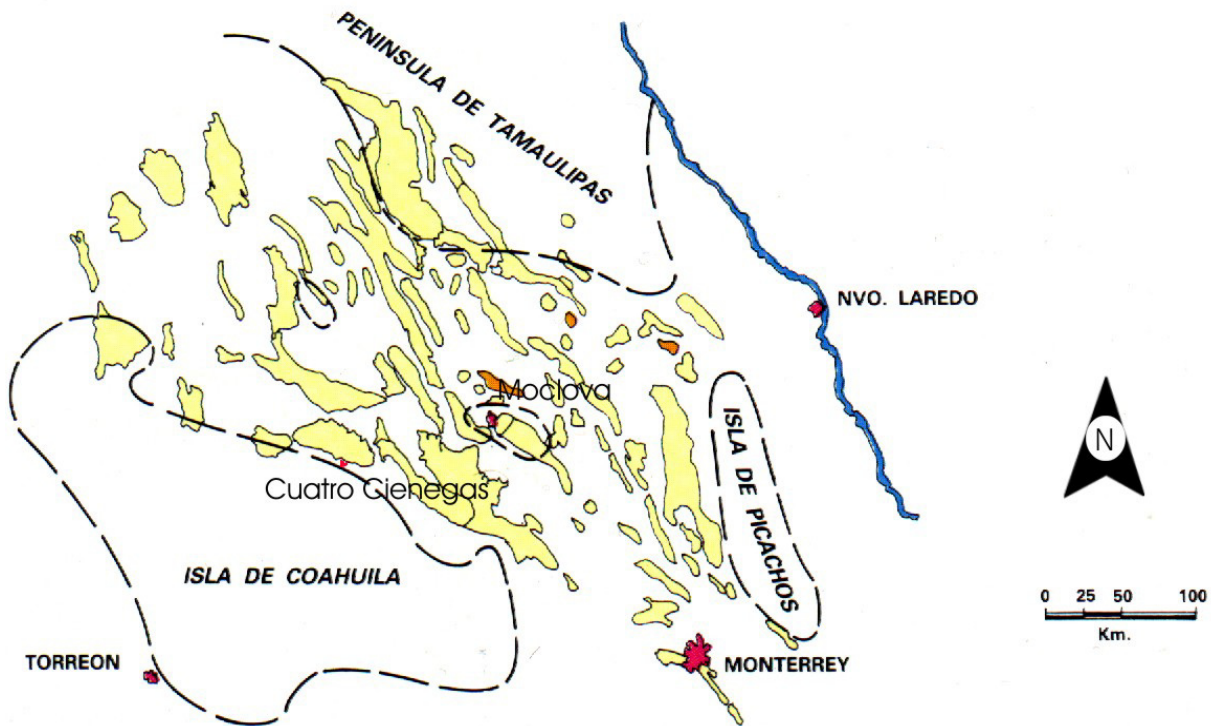


Figura 4.2.20 Unidades Geológicas

En esta región encontramos rocas calcáreas del Cretácico Inferior, dichas formaciones se encuentran en una serie de anticlinales, las cuales se están en sierras una orientación de 20° NW. Dichas sierras se levantan sobre plataformas de materiales aluviales de reciente formación, las rocas calcáreas de la zona como lo hemos marcado con anterioridad son del cretácico inferior de depósitos de ambiente de plataforma arrecifal de mar abierto.

En general la mitad del noreste de la región en la zona de estudio corresponden 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.

4.3. Marco Tectónico

En el Norte y Noreste de México se localiza un sistema de lineamientos de fallas las que se muestran en la figura 4.3. Dichas fallas son: al norte Falla La Babia, en la parte central se extiende la Falla San Marcos y al sur Megasher Mojave- Sonora. Este sistema de fallas cruza la parte noreste del estado de Coahuila. Figura 4.3.21

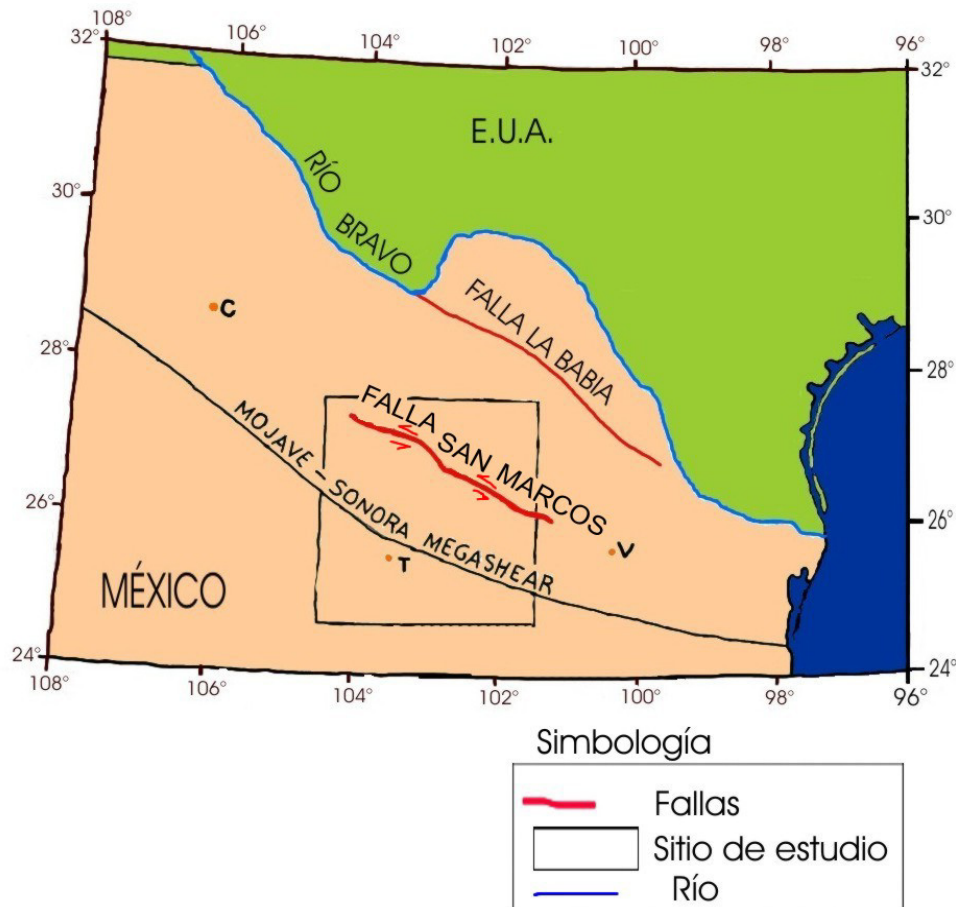
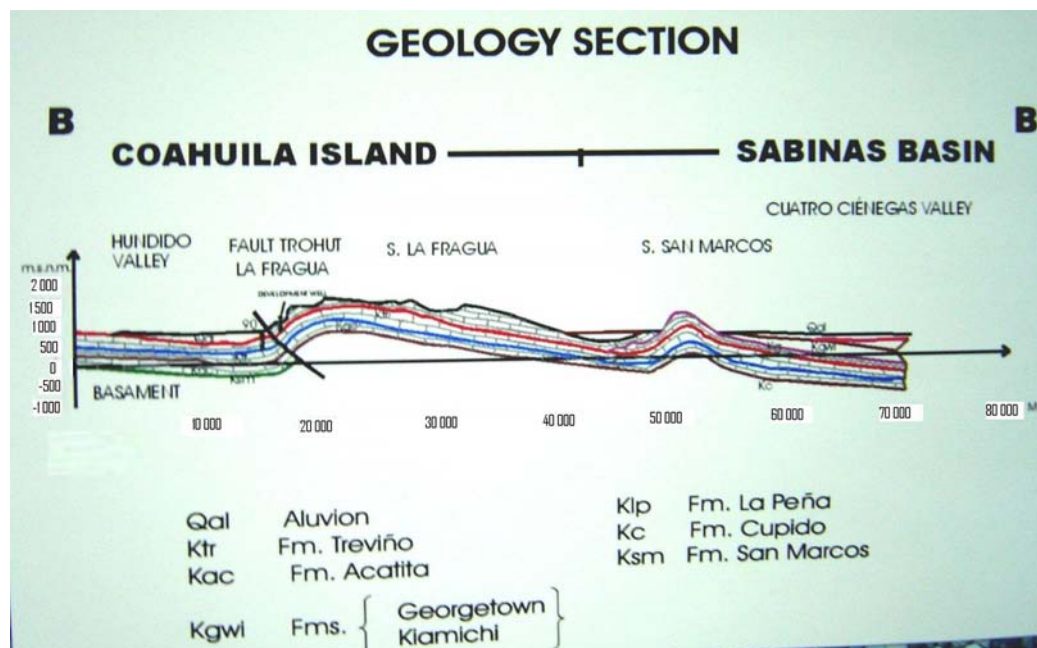


Figura 4.3.21 Sistema de Fallas en el Noreste de Coahuila

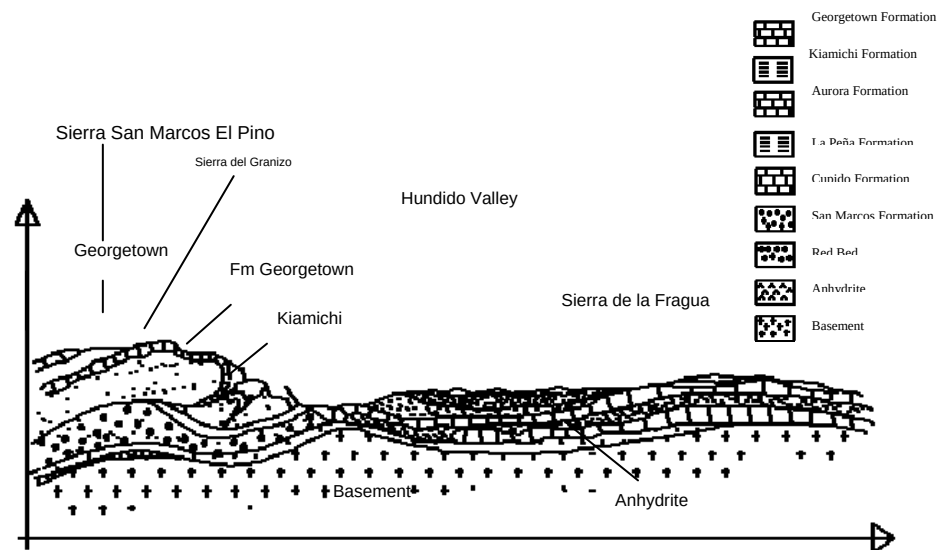
En la parte central del estado de Coahuila, al noreste entre el Jurásico tardío y el Cretácico temprano, la Isla de Coahuila estaba definida por la Falla de San Marcos (Mc Kee and Jones, 1997). El nombre de San Marcos fue tomado a partir de la exposición que presenta en el Valle de San Marcos. La Falla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

La Sierra de La Fragua esta 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 esta 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 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 como la contracción horizontal del material, separado del sustrato tiende a generar una cuña, la cual crece verticalmente provocado por la fuerza de gravedad. Secciones geológicas (figuras 4.4.22, 4.4.23 y 4.4.24)



Figuras 4.4.22 Secciones geológicas



Figuras 4.4.23 Secciones geológicas

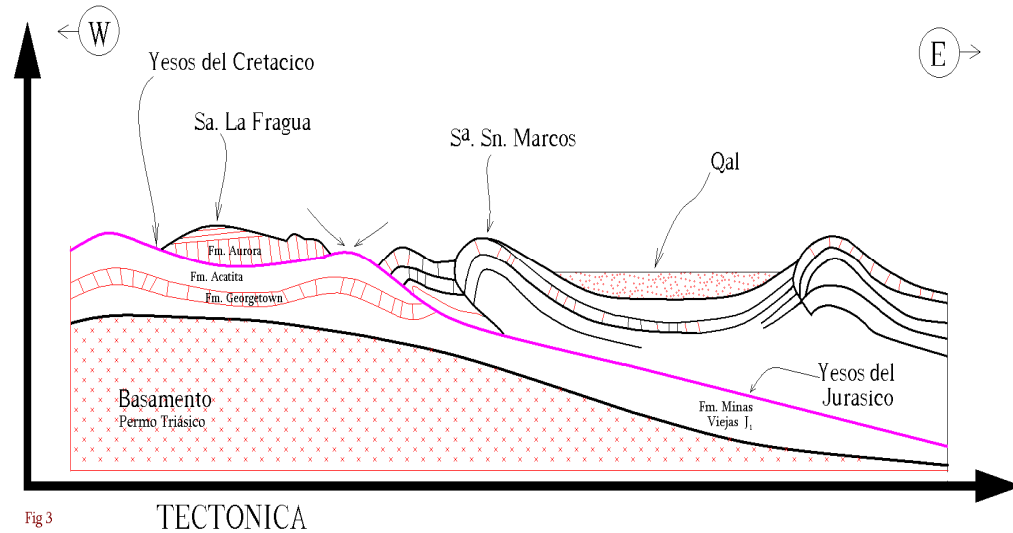


Figura 4.4.24 Secciones geológicas Este - Oeste

- 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

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, las cuales 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.

4.4. 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, al noroeste encontramos 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 franco se encuentra la Sierra del Venado dando lugar a una cuenca endorreica.

El NE de México tectónicamente representa la conjunción de dos provincias tectonoestratigráficas altamente contrastantes: a) la Provincia del Golfo de México que presenta una evolución tectónica dominada por el desarrollo de una margen pasiva asociada con la apertura del Golfo de México entre el Jurasico medio, Cretácico tardío, donde la estratigrafía es dominada principalmente por rocas sedimentarias marinas del Mesozoico, y b) La Provincia del Pacífico influenciada por la subducción Mesozoica a lo largo del margen Pacífico (Goldhammer, 1999)

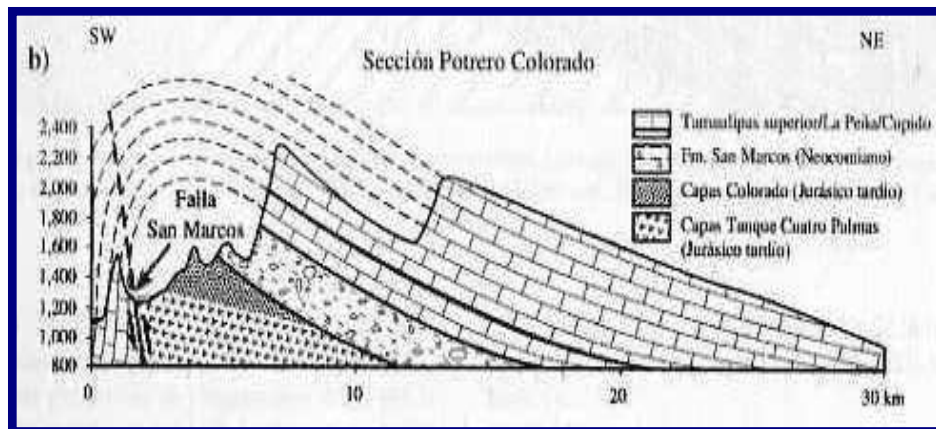


Fig. 4.4.25- Esta figura muestra una sección transversal localizada al NE de la Sierra la Fragua, donde se aprecian las diferentes capas sedimentarias que conforman la Sierra la Fragua, esta zona es conocida como **Potrero Colorado**. Esta figura también muestra un acunamiento causado por un deslizamiento de estratos causados por una falla tipo drape (falla de basamento), tomada de *McKee et al. (1990)*.

Posteriormente el evento mas importante dentro del marco tectónico es la orogenia Laramide (Cretácico tardío al Eoceno), que provoco la deformación de toda la secuencia depositada durante el desarrollo del rift y el margen pasivo (Triásico tardío al Cretácico) por medio de pliegues y cabalgamientos dando como resultado la formación de todas las estructuras anticlinales y sinclinales del NE de México, incluyendo la Sierra la Fragua, el Valle el Hundido, que son las estructuras geológicas que están en estudio en este reporte (López-Ramos, 1981; Charlestone, 1981; Goldhammer, 1999).

El Bloque de Coahuila o “Plataforma de Coahuila”, se caracteriza por pliegues dómicos amplios (anticlinales con doble inmersión), en los cuales sus ejes muestran una orientación NW-SE debido a que el bloque absorbió gran parte de la deformación Laramide sobre los carbonatos cretácicos. Presenta un basamento de intrusiones graníticas a granodioríticas que pertenecen al sistema de arcos insulares al sur del cinturón orogénico Oaxaca-Marathon, además de secuencias de calizas, lutitas, arenisca y flysch de edades Pérmicas. El Bloque de Coahuila permaneció emergido desde el Jurásico tardío hasta posiblemente el Aptiano tardío, limita en su parte norte con la Falla de San Marcos, **Fig.4.4.26** (Padilla y Sánchez, 1982).

De esta manera del lado norte de la Falla de San Marcos, se encuentra el Cinturón Plegado de Coahuila (CPC, **Fig. 4.4.25**), que esta al norte de Coahuila y Nuevo León, localizándose en su parte centro norte la Cuenca de Sabinas. El CPC fue definido por (Humphrey, 1956), y consiste de numerosos anticlinales aislados orientados NW-SE, elongados y apretados, con doble inmersión separados por amplios valles sinclinales. Algunos de los anticlinales están erosionados en su núcleo formando especies de potreros debido a la intrusión y erosión de rocas evaporíticas del Jurásico tardío de la Formación Olvido (Padilla y Sánchez, 1982).



Fig. 4.4.26.- Muestra las estructuras mas destacadas del área. La traza de la FSM divide dos provincias geológicas muy contrastantes, al norte el CPC, y al sur el BC. El área de estudio es la Sierra la Fragua y la Sierra San Marcos Pinos así como parte del valle el Hundido, los cuales están ubicados en este mapa.(www.googlemaps.com)

Figura 4.4.26. Marco geológico estructural del sistema de sierras que conforman el área de estudio.

4.5. Modelo geodinámico

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

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

Por lo cual se logró establecer la relación entre los epikarstos presentes en la Formación Aurora con los que se detectan en el subsuelo mediante técnicas geofísicas, las cuales nos conduce 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 modelo geodinámico que dio lugar al plegamiento de las estructuras en el Valle del Hundido., se basado en los siguientes elementos:

- Presencia de evaporitas en dos niveles:
 - o Formación Novillo del Jurásico Inferior.
 - o Formación Acatita del Cretácico Inferior.
- Rocas clásticas y carbonatadas, las cuales 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 modelo geodinámico que dio lugar al plegamiento de las estructuras en el área de investigación en el Valle del Hundido.

El levantamiento actúo en la deformación de las estructuras, generando una geometría de pliegues, producto de un anticlinal recumbente el cual 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 son desplegadas de su base, tiende a producir una cuña. (Davis et al, 1983. Dahlem et al, 1984). Dicho modelo es 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, su prolongación es mayor, siendo 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 obtiene lo siguiente:

La Sierra de la Fragua se sobre pone 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, 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. (Figura 4.4.27 Diagrama de cuñas)

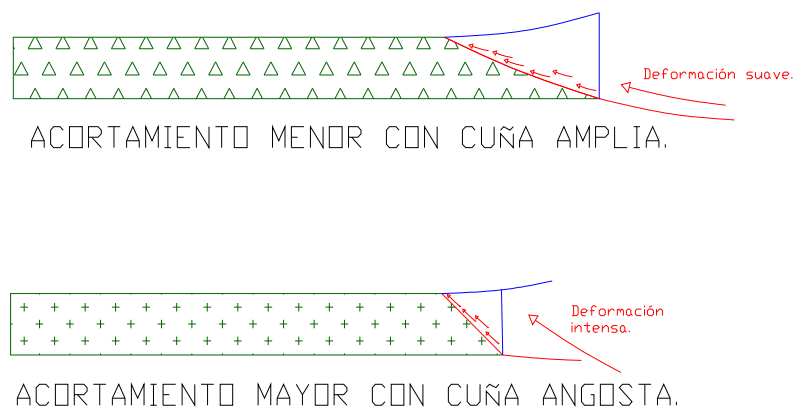


Figura 4.4.27 Modelo de Cuña

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 Novillo 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 del 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.

4.8.Estratigrafía

La secuencia sedimentaria que conforma el área de estudio esta constituida por depósitos de origen marino y continental, en edades que van desde el Permo-Triásico al resiente, descansando sobre un basamento cristalino de edad Pérmica. En la **tabla 4.6.11** Se describe en forma detallada la secuencia sedimentaria presente en el área de estudios.

El basamento del Golfo de Sabinas es poco conocido; sin embargo, por la información que se tiene, se infiere que esta formado principalmente por metasedimetos paleozoicos intrusionados por cuerpos ígneos intrusivos de composición ácida, en el área de estudio aflora en el valle de San Marcos (Plano Geológico). Figura 4.6.28

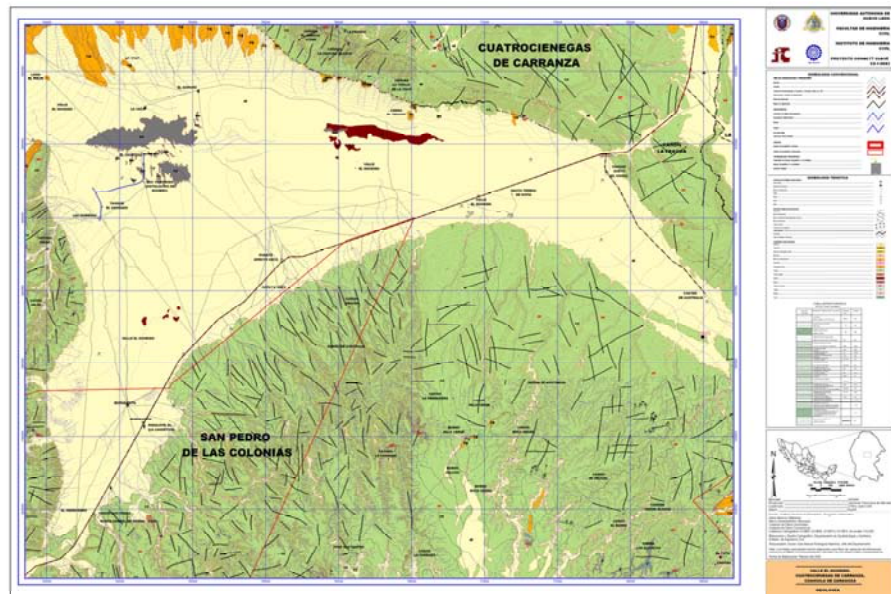


Figura 4.4.28 Plano Geológico del Área de Estudio

A principios de 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 de Oxfordiano, con oscilaciones menores, continuo la trasgresión marina, depositándose calizas de aguas someras de la formación Zuluaga 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 interdigital, echado abajo con rocas arcillo-carbonatadas.

La presencia de lechos rojos del Jurásico Inferior 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, permite suponer que a fines del Jurasico 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, 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 rodea las áreas emergidas peninsulares.

En el Aptiano Tardío el hundimiento fue mayor que la sedimentación, quizás debido a un basculamiento regional, lo que origina nuevamente condiciones de mar abierto y aguas relativamente profundas, depositándose las lutitas y 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 esta 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.

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 Jurasico Inferior. Hacia los valles se encuentra sedimentos aluviales del Cuaternario y esporádicas lavas basálticas también del Cuaternario.

Formación Lechos Rojos

Llamadas lechos rojos porque 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.

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 localizada en el Cañón de San Marcos de la Sierra del mismo Nombre a 30 o 40 Km. al suroeste de Cuatro Ciénegas Coahuila. Al igual se encuentra en los potreros de San Marcos (Valle Jabalí) y en el Potrero de La Virgen, esta formación subyace a la formación San Marcos.

Formación San Marcos

La Formación San Marcos fue propuesta por William G. Jane y citada por Imlay (1940 Pág. 121) (Humphery 1951 Pág. 171). La localidad tipo fue dada en el Cañón de San Marcos de la sierra con el 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 Jabalí) y en el Potrero de La Virgen.

La Formación San Marcos esta constituida esencialmente por sedimentos clásicos de ambiente mixto en el que predominan los conglomerados y areniscas congloméricas 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. En el Cañón de la Mina (flanco sur del anticlinal de la Madera), tiene 237 metros de espesor. No se reportan fósiles que determinen su edad, pero su posición estratigráfica representa una edad Neocomiano.

Formación La Virgen

El termino de esta Formación fue introducido por W. E. Humphrey (1956 Pág. 236) para designar a los yesos, anhidritas y calizas del Cretácico Inferior que afloran en la porción central de Coahuila. Esta 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.

Esta constituida por estratos de yesos de gran espesor que se alternan con calizas eólicas y escasas dolomitas en estratos de delgados a medios. Dentro de 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.

Formación Cupido

Fue dado este termino por Imlay (1937 Pág. 606) en Humphrey (1956 Pág. 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 Parra encajonada por las La Peña en la parte superior y 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 Pág. 1119) en (Humphrey 1956 Pág. 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 una ligera depresión entre las Formaciones Cupido y Aurora. Esta 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. Sus contactos inferior es la Formación Cupido y la 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.

TABLA ESTRATIGRÁFICA

VALLE DEL HUNDIDO Y SAN MARCOS

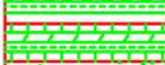
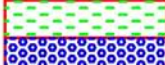
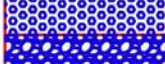
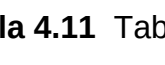
COLUMNA LITOLÓGICA	FORMACIÓN Y DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	ESPESOR (mts.)	SÍMBOLO
	ALUVIÓN: Gravas, arenas, limos y arcillas.	40-80	Qal
	DEPÓSITOS LACUSTRES Arcillas.	30?	Qla
	DEPÓSITOS EÓLICOS: Arenas y yesos.	20?	Qeo
	DEPÓSITOS DE PIE DE MONTE: Brechas medianamente cementadas.	40?	Op
	FORMACIÓN EAGLE FORD: Lutitas y calizas arcilla arenosa.	350?	Ksef
	FORMACIÓN BUDA: Calizas.	100	Ksb
	FORMACIÓN DEL RÍO: Lutitas y calizas.	40	Ksdr
	FORMACIÓN GEORGETOWN: Calizas.	120	Kag
	FORMACIÓN KIAMICHI: Lutitas y calizas.	70-120	Kik
	FORMACIÓN AURORA: Calizas de plataforma.	250-350	Kia
	FORMACIÓN ACATITA: Calizas, dolomitas y yesos.	50?	Kiac
	FORMACIÓN LA PEÑA: Lutitas y calizas.	50?	Kilp
	FORMACIÓN CUPIDO: Calizas.	40-70	Kic
	FORMACIÓN LA VIRGEN: Yesos y calizas dolomíticas.	200-350	Kilv
	FORMACIÓN LA MULA: Lutitas, limolitas y areniscas.	200	Kilm
	FORMACIÓN PADILLA: Calizas, dolomitas y lutitas calcáreas	200-220	Kip
	FORMACIÓN SAN MARCOS: Areniscas, calizas, lutitas y conglomerados.	50-125	Kism
	FORMACIÓN LA CASITA: Lutitas, calizas y areniscas.	>100	Jalc
	TANQUE CUATRO PALMAS: Sedimentos de mares someros.		J2 Tcp
	MIEMBRO EL GRANIZO: Deposito de origen marino no conformados por conglomerados y areniscas provenientes de la Isla de Coahuila.		JL mg
	MIEMBRO PALOMAS: Combinación de fragmentos producto de flujos submarinos derivados de rocas provenientes de la cuenca Las Delicias.		J1 p
	BASAMENTO CRISTALINO PERMO-TRIÁSICO	BASAMENTO	P-T

Tabla 4.11 Tabla Estratigráfica del área de estudio

Formación Aurora

La Formación Aurora su termino es utilizado en Humphrey (1956 Pág. 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 esta ampliamente distribuida en la zona de estudio. Forma la mayor parte de los “espinazos” de las sierras. Esta 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 de micropaleontológicos y posición estratigráfica se le da la edad de Albiano Inferior y medio.

Formación Kiamichi

La localización tipo esta 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 (valle de rumbo) entre calizas que la encajona. 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 (aminitas) determinadas como oxytropidiceras.

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 disección contra la Formación Aurora, la cual tuvo mayor desarrollo hacia esta zona, es decir, el crecimiento la Formación Aurora pudo llegar hasta la edad de la formación Kiamichi. El contacto de la Formación Kiamichi con el Sobreyacente “Washita Indiferenciado o sus equivalentes, es concordante y define donde se inician las calizas de estratificación delgada a media. Se le asigna una edad Albiano Medio y Superior.

Grupo Washita Indiferenciado

Este fue un término empleado por Humphrey (1956 Pág. 386) para designar a rocas del Albiano Superior, especialmente en secciones dentro de las Provincias Paleogeografías del Golfo de Sabinas y la península de Tamaulipas. Consiste principalmente de una alternancia de clásicos finos y rocas carbonatadas impuras, fases que fue perfectamente desarrollada sobre las áreas del antiguo Golfo de Sabinas y a lo largo de márgenes. Al sur y suroeste pasa a calizas extralitorales 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 foses depositada 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 Cenomaniano Inferior.

Formación Georgetown

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

Esta Formación aflora en las sierras de Menchaca y Purísima y esta 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 Albiano Superior – Cenomaniano Inferior.

Formación Del Río

Formación Del Río (Hill y Vaughan 1989 Pág. 236) en (Humphrey 1956) es la extensión en el suroeste de Texas, Transpecos Texas y norte de México de la Formación Grayson (Gracig 1984 Pág. 40, 43) en la porción norte central de Texas. En la 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, Georgetown en la parte inferior y buda en la parte superior, son transicionales y concordantes. Se le asigna edad Cenomaniano Inferior.

Formación Buda

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

Esta Formación tiene íntima relación con las formaciones Del Río y Georgetown, igual que estas afloran en las sierras de Menchaca y Purísima. Esta 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 esta 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 Pág. 422) la primera mención de los equivalentes Eagle Ford en la literatura geológica fue dada por Ferdinand Roemer quien en 1852 la incluyó en sus formaciones de la región de New Braunfels a las lutitas negras Eagle Ford con restos de peces. Hill en 1887 coloca dichos estratos en la base de las series del Golfo, encima de las arenas Wodbine y 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 esta 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 transiconal y concordante.

Conglomerado Terciario

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

Rocas Ígneas Extrusivas

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 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.

Rocas Ígneas Intrusivas

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

Material Aluvial

Rellenando los valles de El Hundido, Cuatro Ciénegas y Ocampo se encuentra materiales granulares producto de la erosión y transporte de las sierras hacia los flancos de los bolsones los clásticos son de mayor tamaño gravas, arenas y limos y se hacen mas finos hacia el centro de los valles, donde se interdigitan con sedimentos evaporíticos lacustres de lagunas intermitentes.

Geología Estructural del Sitio

En la zona de estudio se presenta un modelo geodinámico de cuña que es válido para la cuenca de Sabinas como para la Sierra Madre Oriental. 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. 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, su prolongación es mayor, siendo 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 concluye lo siguiente:

- La Sierra de la Fragua se sobre pone 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. Figura 4.7.29

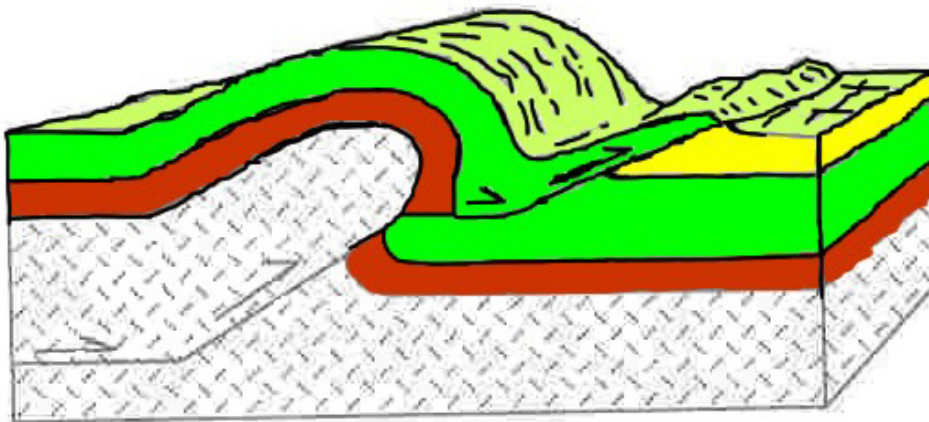


Figura 4.7.29 Modelo de rampa

Estos criterios confirman los resultados obtenidos por la Dra. Valeria de Souza, en su trabajo, investigadora del Instituto de Ecología de la UNAM (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 del 2005 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 Novillo y en la Formación Acatita dentro del área de estudio. Fotografía 12



Fotografía. 12. Se muestran las estructuras de caja producto del combamiento del pliegue

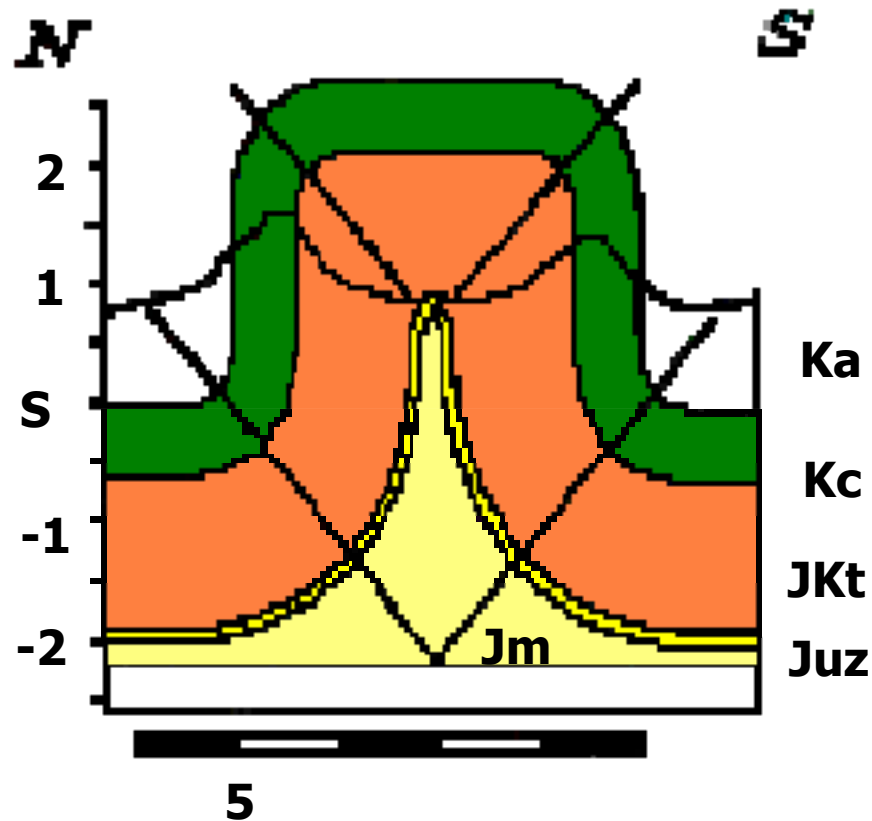


Figura 4.7.30. Modelo de caja para las estructuras del Noreste de México.

Partiendo de este modelo geodinámico se logró demostrar que el modelo conceptual hidrogeológico del Valle del 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.

En la parte central del estado de Coahuila, al noreste entre el 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 esta 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 esta 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 producto de dos eventos estratigráficos.

- o Las Sierras de San Marcos-El Pino, El Granizo y en la parte sur de La Fragua.
- o El desplazamiento débil tenderá a generar el acortamiento sobre una zona más amplia, y creará una cuña más suave sobre la rampa

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, las cuales 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.

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.

Capítulo V

5. GEOFÍSICA

5.1. Estudios geofísicos realizados en el Cañón de la Fragua.

El objetivo general del estudio es conocer la estructura interna del Cañón de La Fragua, y como objetivo particular es determinar si el valle de Cuatro Ciénegas tiene comunicación hidráulica con el valle de Hundido.

A fin de cumplir con los objetivos se están utilizando diversos métodos geofísicos tales como: Gravimetría, Magnetometría y SEV (Sondeos Eléctricos Verticales).

La metodología a seguir se compone de dos partes:

De campo: en la cual se sale a el área de estudios a realizar los perfiles de los métodos mencionados, los cuales cuentan con 6 perfiles un perfil longitudinal y 5 transversales, excepto para el SEV, que solo cuenta con un perfil longitudinal. Figuras 5.1.30, 31,32, 33, 34 y 35.

De escritorio: en la cual se realiza el procesamiento y correcciones correspondientes a los datos para poder llegar a una interpretación.

5.1.1. Métodos gravimétricos

5.1.1.1 Gravimetría:

El método gravimétrico hace uso de campos de potencial natural igual al método magnético y a algunos métodos eléctricos. El campo de potencial natural observado se compone de los contribuyentes de las formaciones geológicas, que construyen la corteza terrestre hasta cierta profundidad determinada por el alcance del método gravimétrico (o magnético respectivamente).

Se realizan mediciones relativas, es decir se mide las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar al otro puesto que en estas mediciones se pueden lograr una precisión satisfactoria más fácilmente en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto. Los datos reducidos apropiadamente entregan las variaciones en la gravedad, que solo dependen de variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación.

- Equipo gravimétrico: el gravímetro Scintrex “CG-3”; precisión de lectura – 5 microgales; duración de una medida – 30 sec.;
- Equipo para determinación posición: GPS portátil “Magellan”;
- Equipo magnetométrico: el magnetómetro precisión de protones Geometrics “G-856; precisión de lectura – 0.1 nT

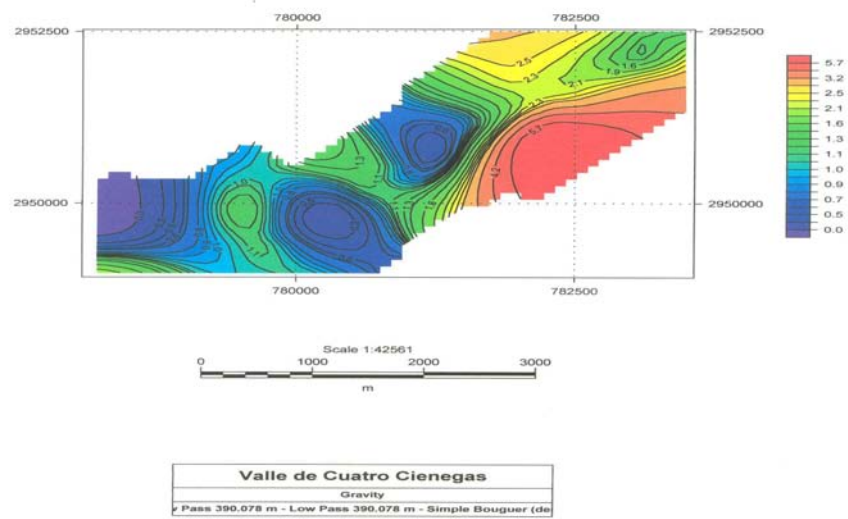


Figura 5.1.30 Anomalía gravimétrica de Bouguer

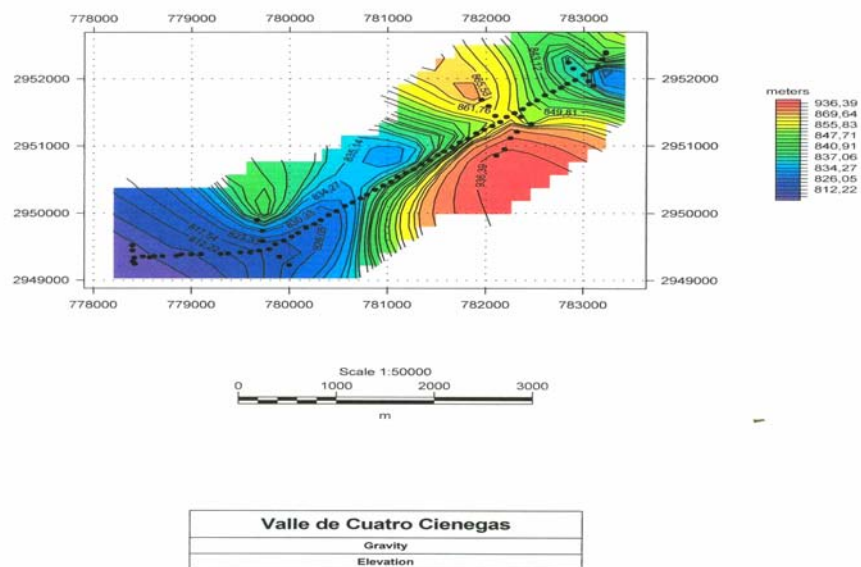


Figura 5.1.32 Esquema topográfico y posición de los puntos de medición gravimétrica.

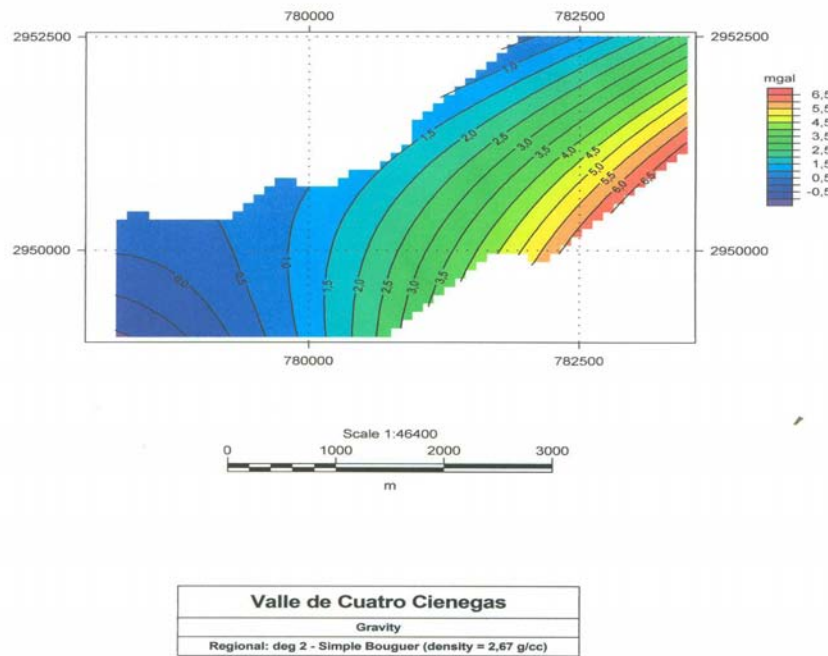


Figura 5.1.33 Campo Gravimétrico Regional

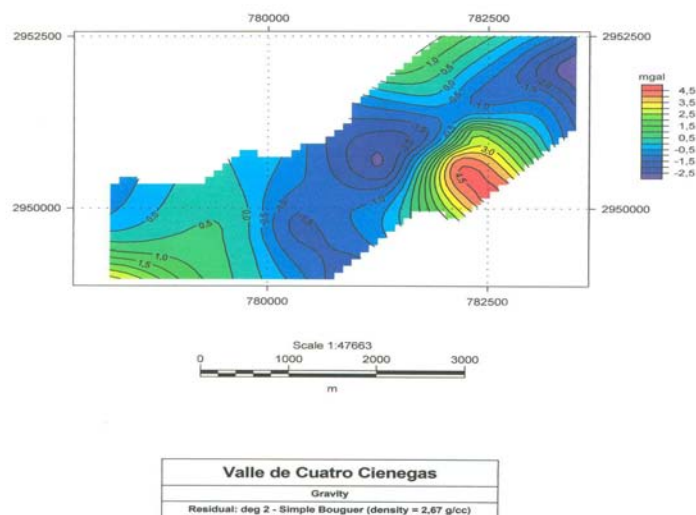


Figura 5.1.34 Campo Gravimétrico Residual

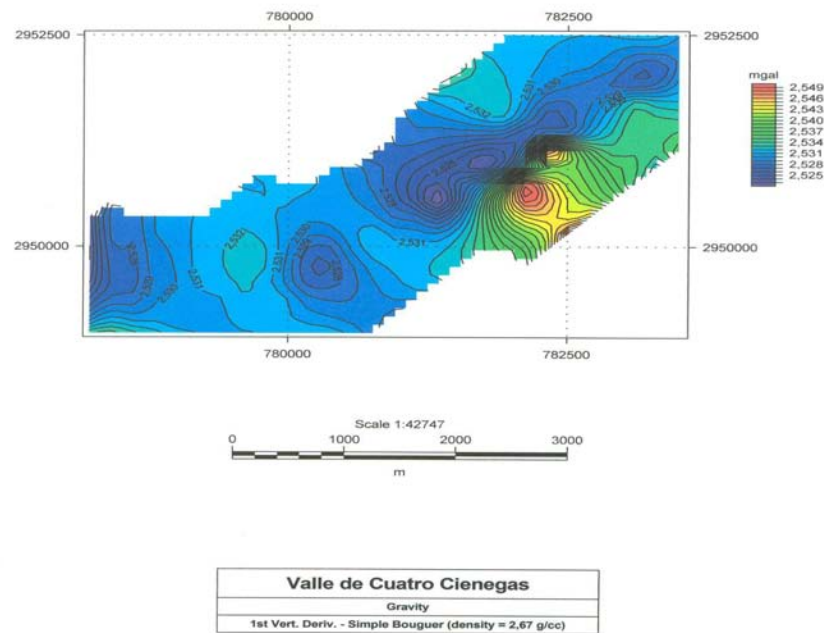


Figura 5.1.35 Mapa De La Primera Derivada Δg Vertical

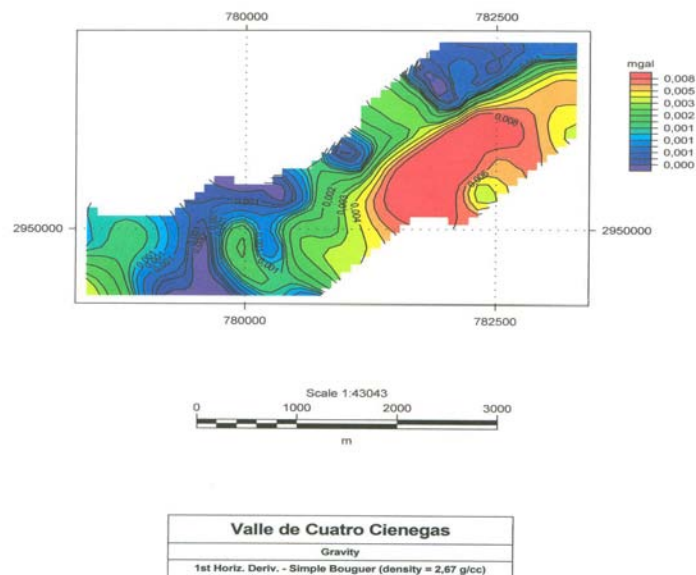


Figura 5.1.36 Mapa De La Primera Derivada Δg Horizontal

La magnetometría es como la gravimetría un método geofísico relativamente simple en su aplicación. El campo magnético de la tierra afecta también yacimientos que contienen magnetita (Fe). Estos yacimientos producen un campo magnético inducido, es decir su propio campo magnético. Un magnetómetro mide simplemente las anomalías magnéticas en la superficie terrestre, cuales podrían ser producto de un yacimiento.

5.1.1.2 Perfiles Magnéticos realizados en campo

Punto base inicio
Latitud N 26.67202

Propiedades físicas de las rocas

Tabla 5.12 Densidades medias de las rocas sedimentarias.

Densidades medias de rocas sedimentarias ³		
Arenisca	2,32	1,61 - 2,76
Pizarra arcillosa (shale)	2,42	1,77 - 2,45
Caliza	2,54	1,93 - 2,90
Dolomía	2,70	2,36 - 2,90

Tabla 5.13 Valores de resistividad específica en m para varios tipos de rocas saturadas con agua.

Edad geológica	Arena marina, pizarra, grauwaca	Arenas terrestres, argilita, arcosa	Rocas volcánicas como basaltos, riolitas, tobas	Granito, gabro	Caliza, dolomía, anhidrita, sal
Cuaternario, Terciario	1 - 10	15 - 50	10 – 200	500 - 2000	50 - 5000



Mesozoico	5 - 20	25 - 100	20 – 500	500 - 2000	100 - 10.000
Carbonífero	10 - 40	50 - 300	50 - 1000	1000 - 5000	200 - 100.000
Paleozoico, hasta el fin de carbonífero	40 - 200	100 - 500	100 - 2000	1000 - 5000	10.000 - 100.000
Precámbrico	100 - 2000	300 - 5000	200 - 5000	5000 - 20.000	10.000 - 100.000

Perfiles Magnéticos realizados

Punto base inicio

Latitud N 26.67202

Longitud 102.15103

Altitud 878 m

Lectura de campo 45682.4

Perfil 1

Punto 1

Latitud N 26.63725

Longitud W 102.203

Altitud 822

Lectura de campo 45660

Punto 26

Latitud N 26.67035

Longitud W 102.151

Altitud 877

Lectura de campo 45646.2

Longitud del perfil

6796.658 m

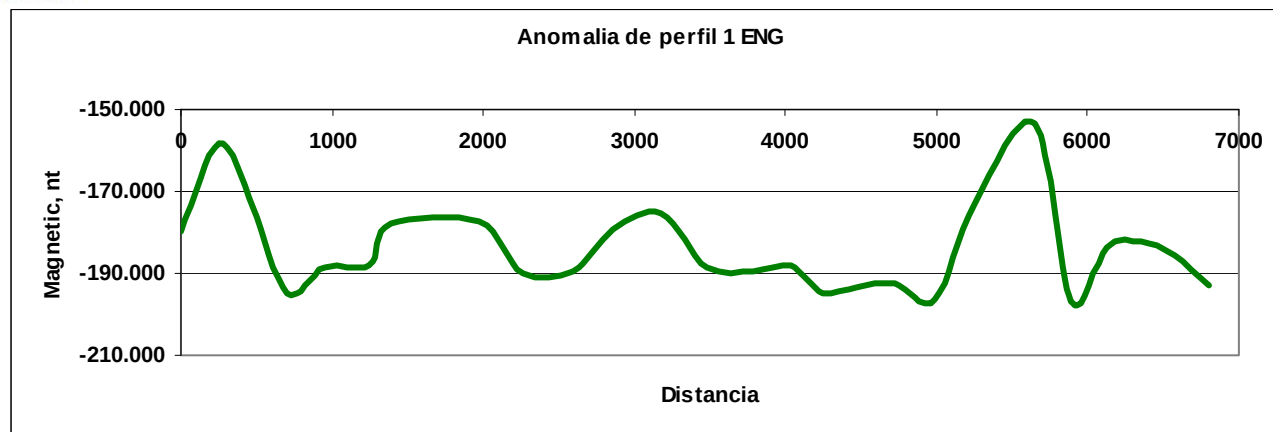


Figura 5.1.37 Anomalia del Perfil 1 ENG

Perfil 2

Punto 27

Latitud N 26.63586

Longitud W 102.203

Altitud 828

Lectura de campo 45701.1

Punto 30

Latitud N 26.63918

Longitud W 102.203

Altitud 835

Lectura de campo 45689.1

Longitud del perfil

404.96

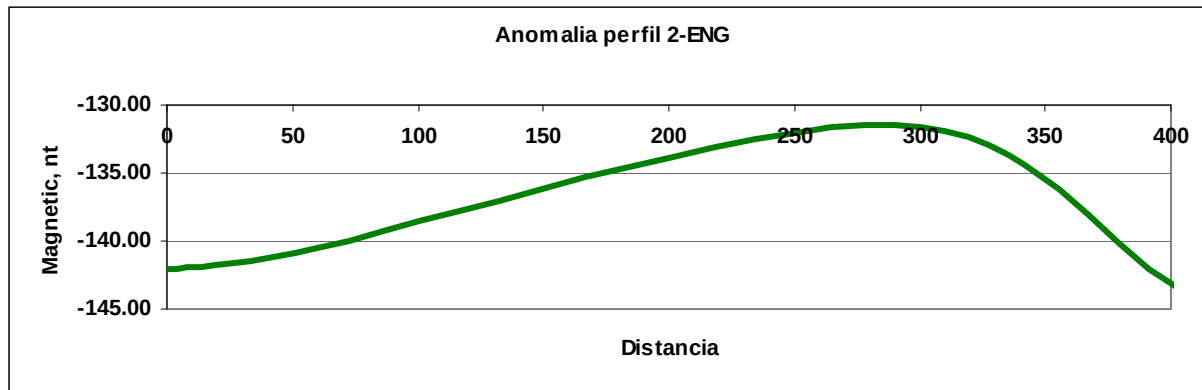


Figura 5.1.38 Anomalia del Perfil 2 ENG

Perfil 3

Punto 31

Latitud N 26.6339

Longitud W 102.186

Altitud 834

Lectura de campo 45649.3

Punto 36

Latitud N 26.64669

Longitud W 102.19

Altitud 898

Lectura de campo 45713.7

Longitud del perfil

1584.846

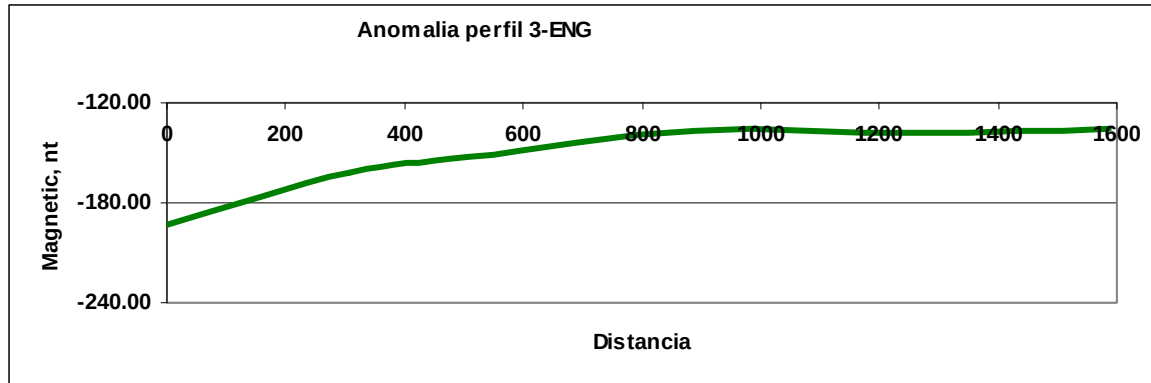


Figura 5.1.39 Anomalía del Perfil 3 ENG.

Perfil 4

Punto 37

Latitud N 26.65376

Longitud W 102.164

Altitud 891

Lectura de campo 45690.4

Punto 41

Latitud N 26.65876

Longitud W 102.167

Altitud 906

Lectura de campo 45689.5

Longitud del perfil

1245.772

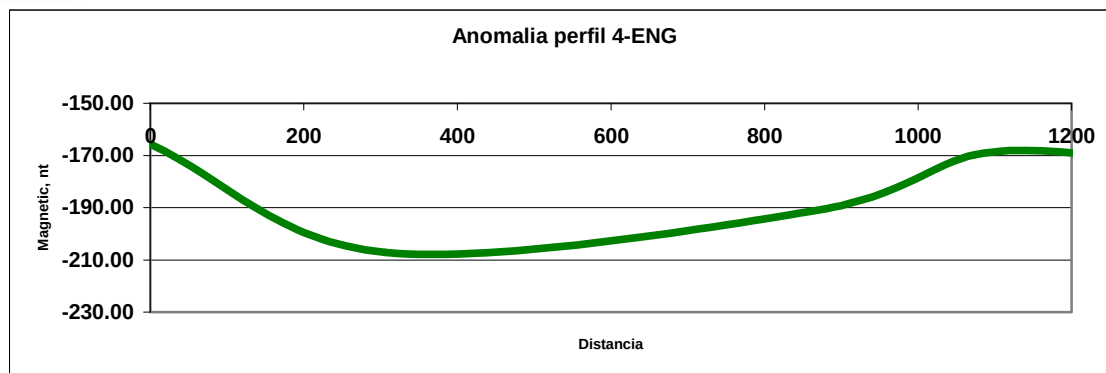


Figura 5.1.40 Anomalía del Perfil 4 ENG

Perfil 5

Punto 42

Latitud N 26.66026

Longitud W 102.149

Altitud 864

Lectura de campo 45693.3

Punto 45

Latitud N 26.66474

Longitud W 102.155

Altitud 866

Lectura de campo 45681

Longitud del perfil

751.05

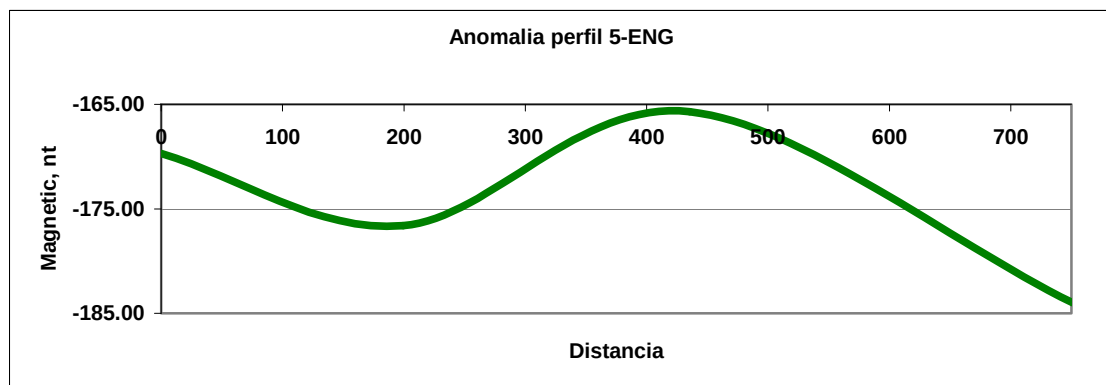


Figura 5.1.41 Anomalía del Perfil 5 ENG

Perfil 6

Punto 46

Latitud N 26.67198

Longitud W 102.15

Altitud 894

Lectura de campo 45640

Punto 47

Latitud N 26.67281

Longitud W 102.152

Altitud 887

Lectura de campo 45665.9

Longitud del perfil

271

Punto base final

Latitud N 26.67202

Longitud 102.15103

Altitud 878 m

Lectura de campo 45678.3

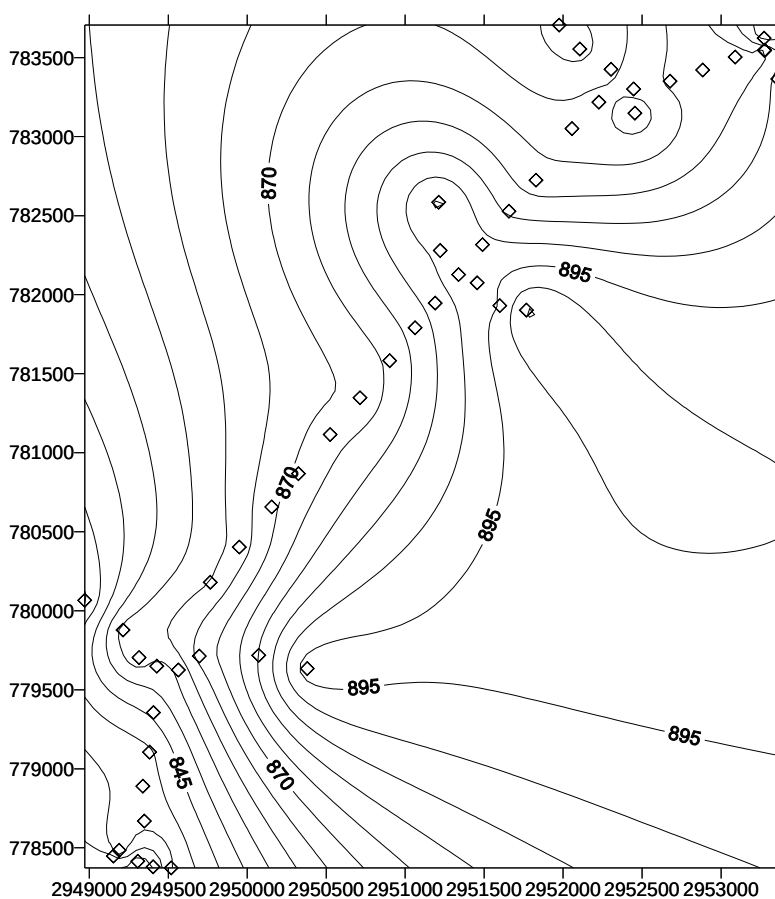


Figura 5.1.42 Topografía del área de estudio

5.2. Sondeos Eléctricos Verticales.

El objetivo de este estudio aplicando Sondeos Eléctricos Verticales fue con el propósito de determinar las características geoelectricas existentes entre los valles del Hundido y el Tablero a fin de demostrar la posible conexión entre ambos valles.

Objetivos.

- Determinar la estratigrafía del subsuelo en el área de estudio mediante la aplicación de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).
- Identificación de zonas saturadas.
- Determinar la posible conexión entre los valles del Hundido y el Tablero, a través del Cañón de La Fragua.

5.2.1. Generalidades del Método.

La aplicación del método de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) fue con el propósito de definir estructuras, formaciones, grado de saturación e identificación de unidades permeables e impermeables. Para el caso citado, el método que se utilizó fue el Método Schlumberger el cual se muestra en la figura (5.2.42). El dispositivo del Método Schlumberger esta compuesto de los siguientes dispositivos:

- a) Circuito de emisión.
- b) Circuito de recepción.
- c) Cuatro electrodos (2 de corriente AB y dos de potencial MN).

La ecuación utilizada para obtener la resistividad aparente en este dispositivo es la siguiente:

$$\rho_a = k (\Delta V/I).$$

Donde:

ρ_a = Resistividad aparente.

ΔV . Diferencia de potencial.

I. Corriente inyectada a través de AB.

k. Constante geométrica del dispositivo. $= (\pi/2) (L^2-12/I)$

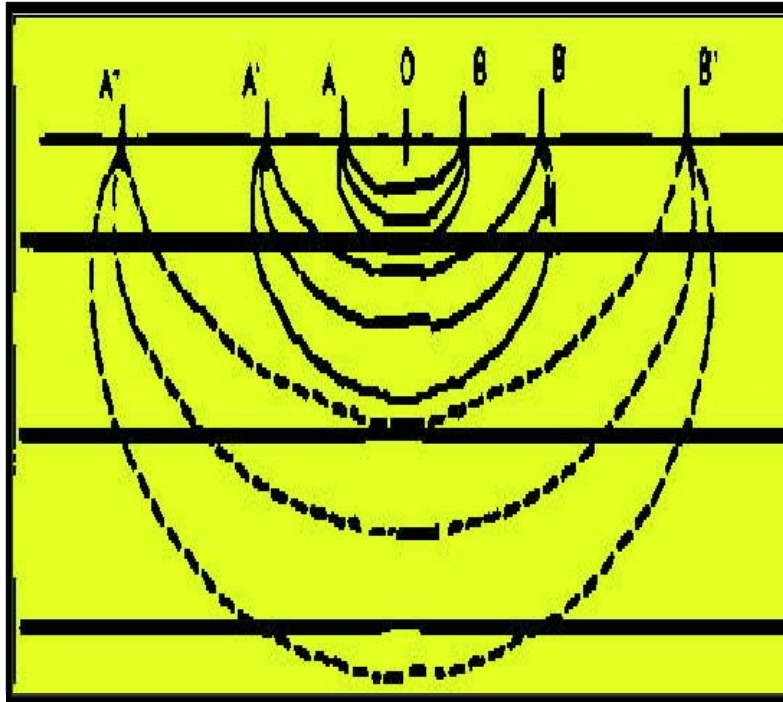


Figura 5.1.43. Dispositivo de Schlumberger.

En la sección Valle del Hundido- Valle del Tablero se muestra la localización y la distribución de la línea de SEV (figuras 5.2.43) a lo largo del Cañón de La Fragua que comunica los valles de Cuatro Ciénegas y el Hundido.

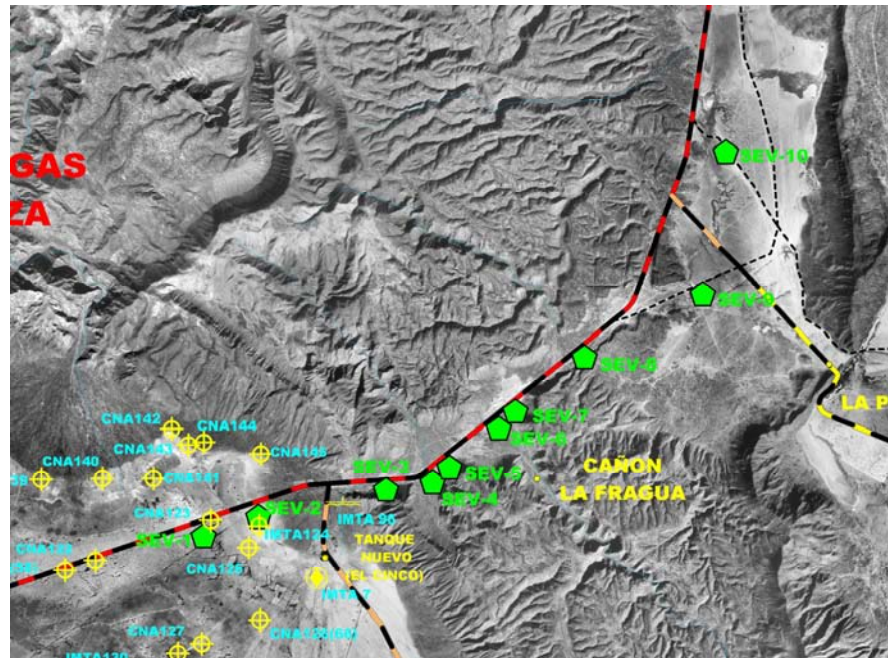


Figura 5.2.44 Localización de SEV entre el Cañón de la Fragua y Valle el Tablero.

Mediante los SEV se determinan las resistividades de las distintas capas horizontales o sub-horizontales del subsuelo, midiendo diferencias de potencial. Durante la realización del trabajo de geoelectrica, los resultados se integraron en tres perfiles:

Perfil 1.-Esta constituido por los SEV,s 1 y 2 dicho SEV se realizó en el Valle del Hundido.

Perfil 2.- Esta integrado por los SEV,s 3, 4, 5, 6,7 y 8. Esta ubicado sobre el Cañón de La Fragua.

Perfil 3.- Comprende los SEV,s 9 y 10 y se ubican en el Valle del Tablero.

Los resultados obtenidos después del análisis e interpretación de los datos de campo, nos permitió definir la presencia de 9 unidades estratigráficas las cuales en forma detallada se describen a continuación: Figura 5.2.44

Unidad 1 (U1). Esta constituida por material arcilloso en espesores de 2 a 12 metros con una resistividad de 15-40 Ω -m.

Unidad 2 (U2). Se detectó en el Cañón de la Fragua, con una resistividad de 300-800 Ω -m los espesores reportados oscilan entre 8-12 m. de acuerdo a su resistividad se le clasificó como material calichoso, con alto grado de intemperismo, esta unidad al igual que la anterior está aflorando en el área de estudio.

Unidad 3 (U3). Presenta espesores de 6-12 m. con resistividades que oscilan entre 40-90 Ω -m, se correlaciona con material arcilloso-arenoso con un grado de compactación bajo.

Unidad 4 (U4). Se detectó en los extremos del área de investigación, tanto en el Valle del Hundido como en el del Tablero está constituida por material arcilloso con espesores que varían de 6-21 m. con resistividades del orden de 4- 8 Ω -m, de acuerdo a su resistividad se le consideró un estrato impermeable. En el SEV 7 se detectó a una profundidad de 10m., con un espesor de 38 m.

Unidad 4' (U4') Se detectó en el Valle del Hundido a una profundidad de 32 metros, presenta un espesor de 35 m. presenta una resistividad de 1- 3 Ω -m. se asocia a material arcilloso con alto contenido de sales (evaporizas).

Unidad 5 (U5) Se detectó en el Valle del Hundido, presenta espesores que varían entre 5-11 metros. Presenta una resistividad de 350- 600 Ω -m. Se asocia con gravas y arenas, lo que le da una alta permeabilidad.

Unidad 6 (U6). Se detectó en el Cañón de la Fragua y en el Valle del Tablero, su resistividad varía de 35-100 Ω -m., posee un espesor que oscila entre 10-50 metros. Esta asociado con material de boleó con alto contenido de arcilla, lo que hace que sea impermeable.

Unidad 7 (U7) Se detectó en el Valle del Hundido y en el Cañón de la Fragua, su espesor varía de 17-40 metros. Presenta una resistividad de 250-300 Ω -m., esta asociado con material compuesto por gravas, arenas y arcillas, dándole características de semipermeable.

Unidad 8(U8). Se visualiza a lo largo de toda el área de investigación, con excepción de los SEV,s 3 y 4, a profundidades que oscilan entre 60-100 m., su resistividad es del orden de 120-200 Ω -m., está asociada con material granular (boleos) y conglomerados, arcillas y arenas, reuniendo las características para ser un estrato permeable, por lo tanto potencialmente explotable.

Unidad 9 (U9) Esta unidad se presenta con resistividades muy altas que oscilan entre 1500-15,000 Ω -m., se detecta en toda el área, su profundidad varía desde 20-90 m. Su espesor va desde 25-65 metros, está asociada con material que presenta intenso fracturamiento, detectándose un sistema de fallas escalonadas a lo largo del cañón, también se detectaron zonas cársticas (cavernas). Esto tipo de información como la obtenida por métodos gravimétricos y magnetométricos nos permitió confirmar la comunicación entre los valles del Hundido y de Cuatro Ciénegas a través de antiguos carstos los que funcionan como sifones.

Esta hipótesis reafirma los criterios establecidos por la Doctora Valeria de Souza en la similitud de las bacterias detectadas en el valle del Hundido y el de Cuatro Ciénegas como los peces calcificados por el Dr. Contreras en el Río Salado los cuales corresponden al mismo género y familia de los que habitan en el Río Nazas.

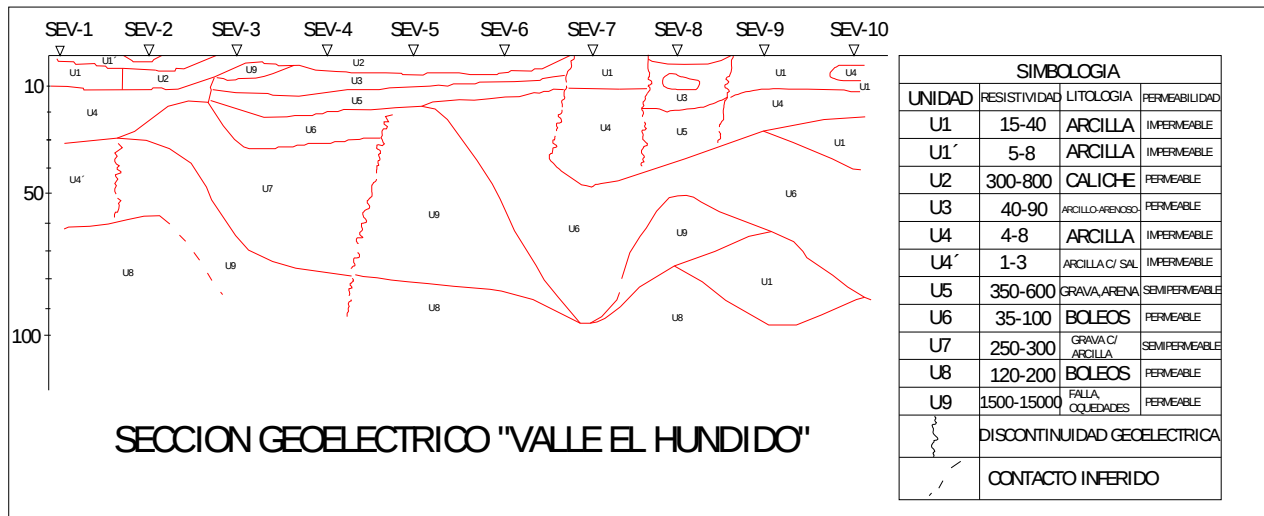


Figura 5.2.45 Sección Geoeléctrica "Valle del Hundido"

Curva de SEV 1: Anomalía observada (en negro), Anomalía teórica (en rojo).

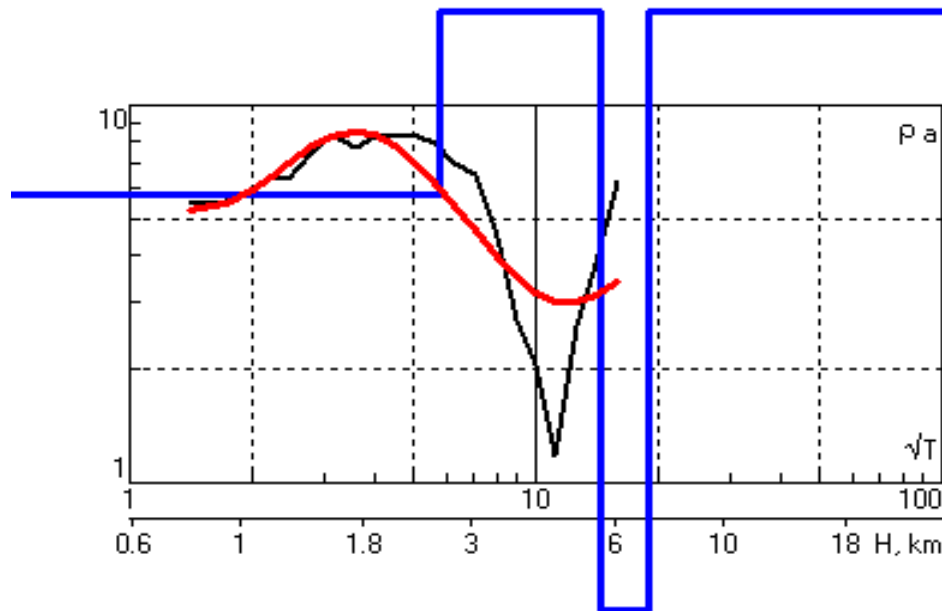


Figura 5.2.46 Curva correspondiente al SEV-1

Curvas de SEV 2

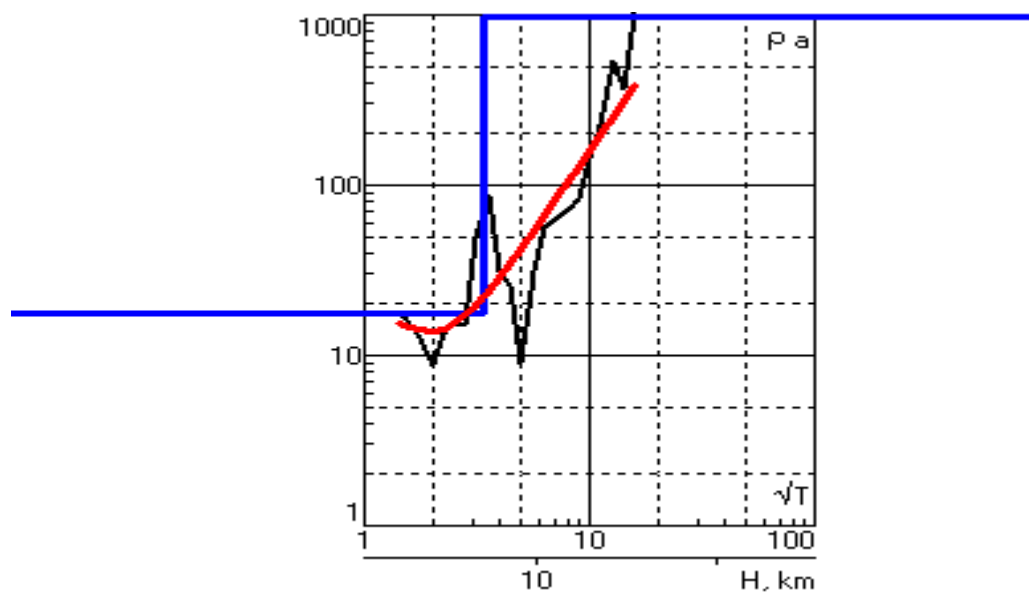


Figura 5.2.47 Curva correspondiente al SEV-2

Curvas de SEV 3

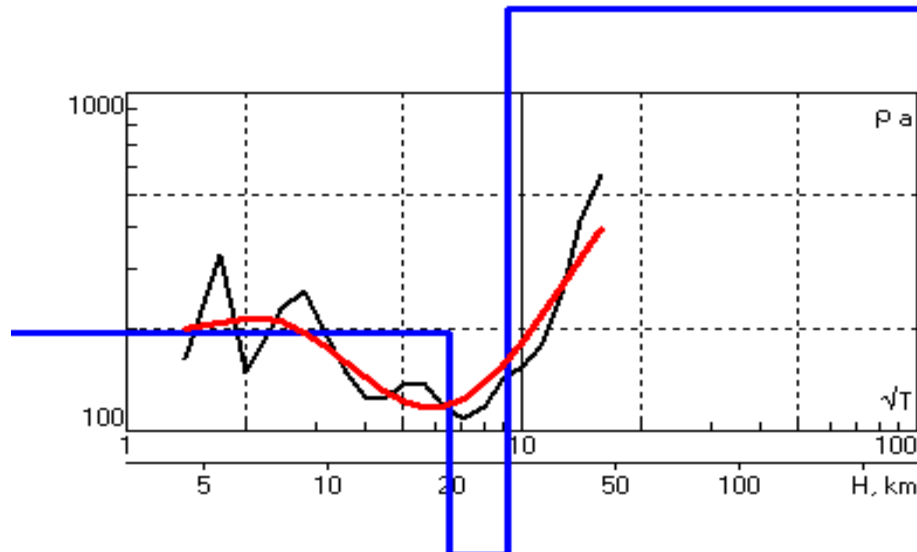


Figura 5.2.48 Curva correspondiente al SEV-3

Curvas de SEV 4

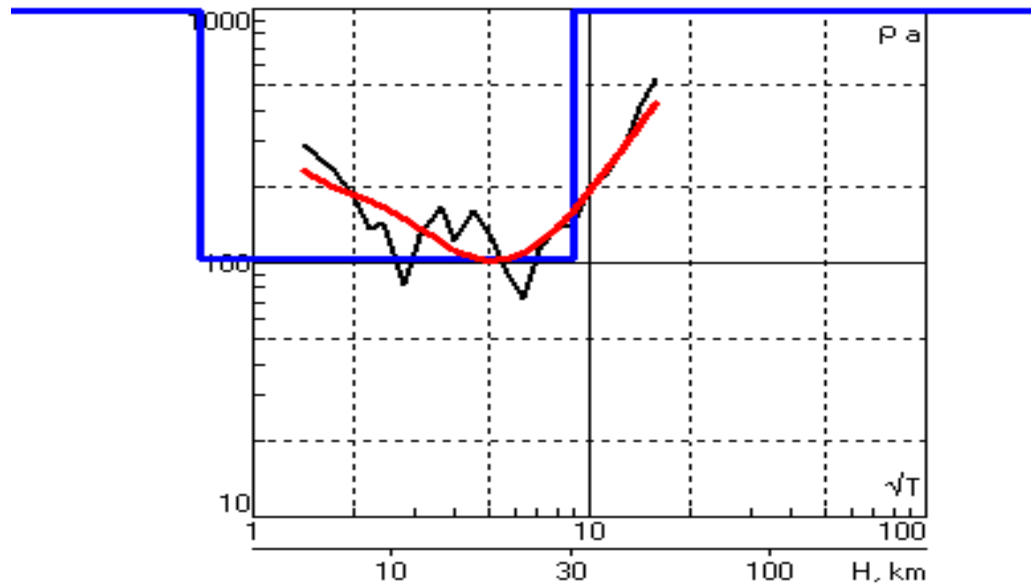


Figura 5.2.49 Curva correspondiente al SEV-4

Curvas de SEV 5

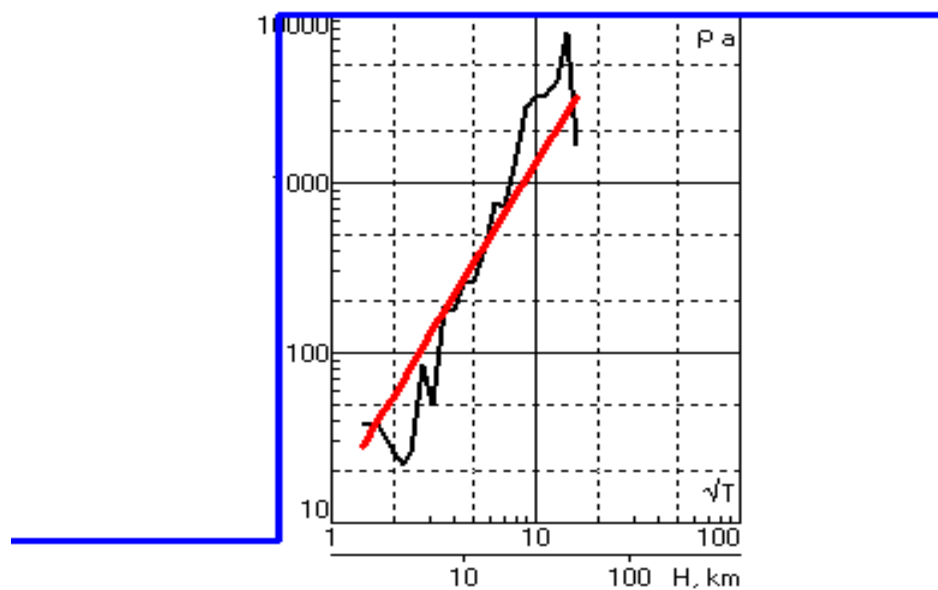


Figura 5.2.50 Curva correspondiente al SEV-5

Curvas de SEV 6

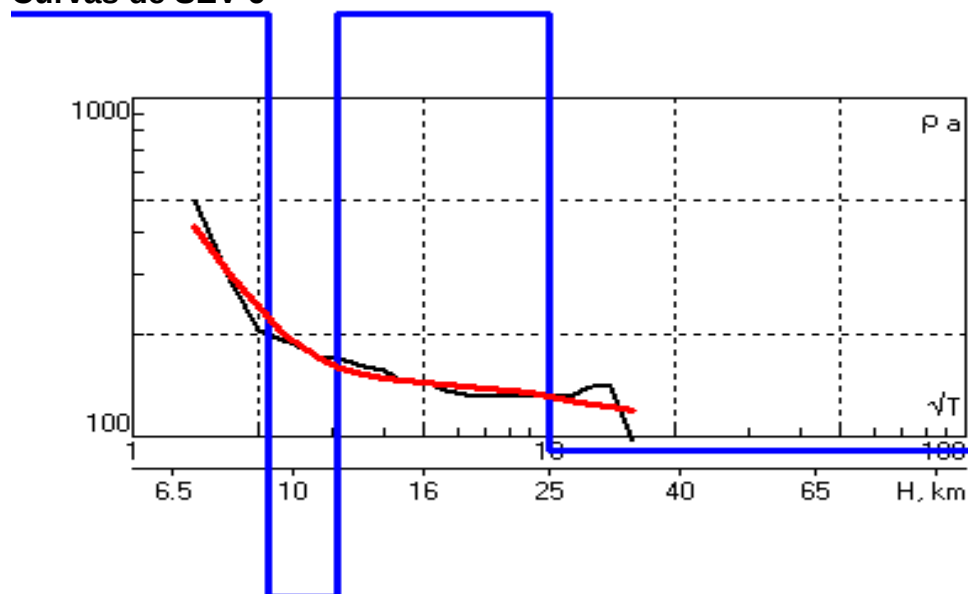


Figura 5.2. 51 Curva correspondiente al SEV-6

Curvas de SEV 7

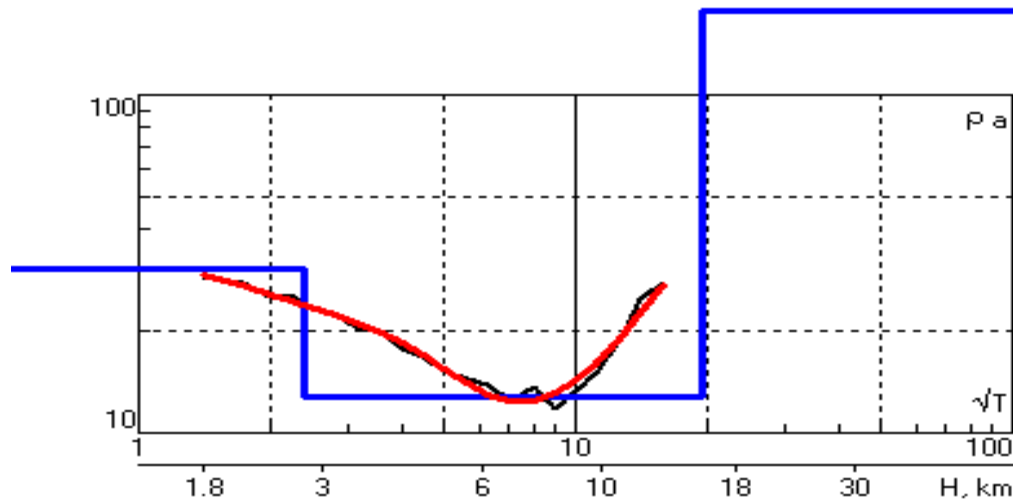


Figura 5.2. 52 Curva correspondiente al SEV-7

Curvas de SEV 8

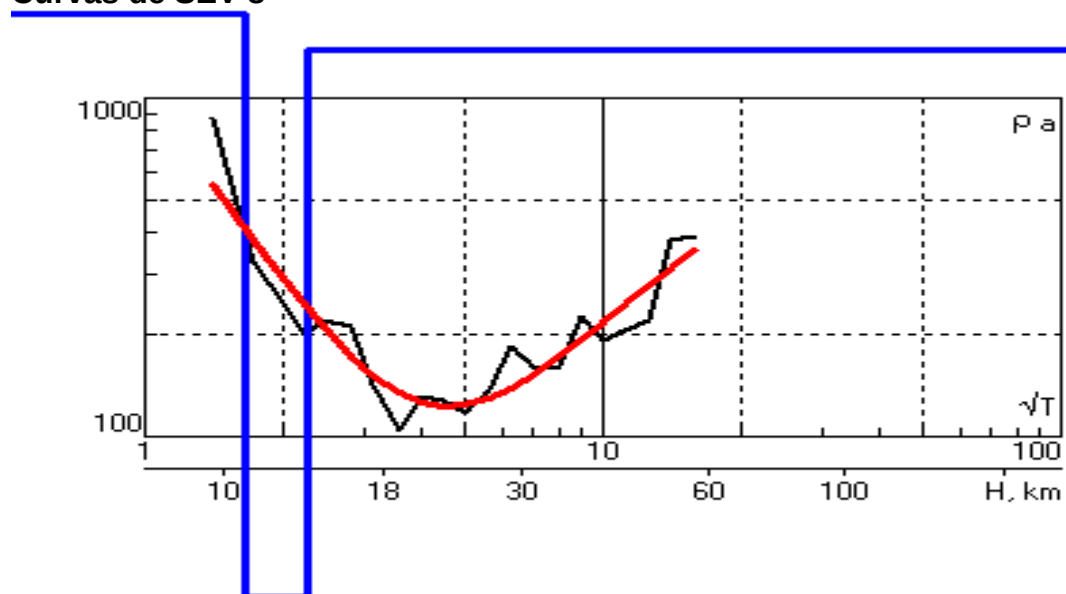


Figura 5.2.53 Curva correspondiente al SEV-8

Curvas de SEV 9

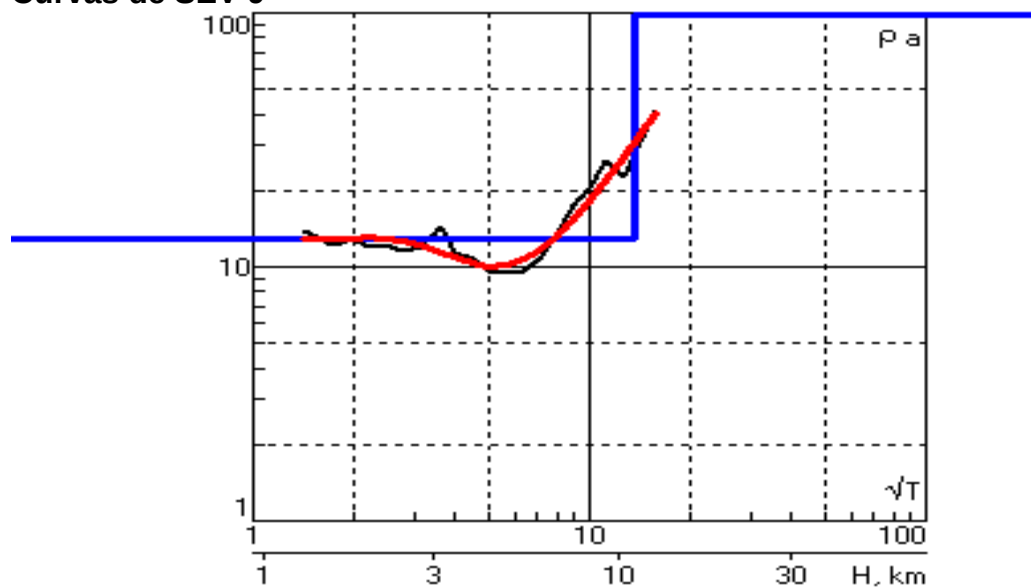


Figura 5.2. 54 Curva correspondiente al SEV-9

Curvas de SEV 10

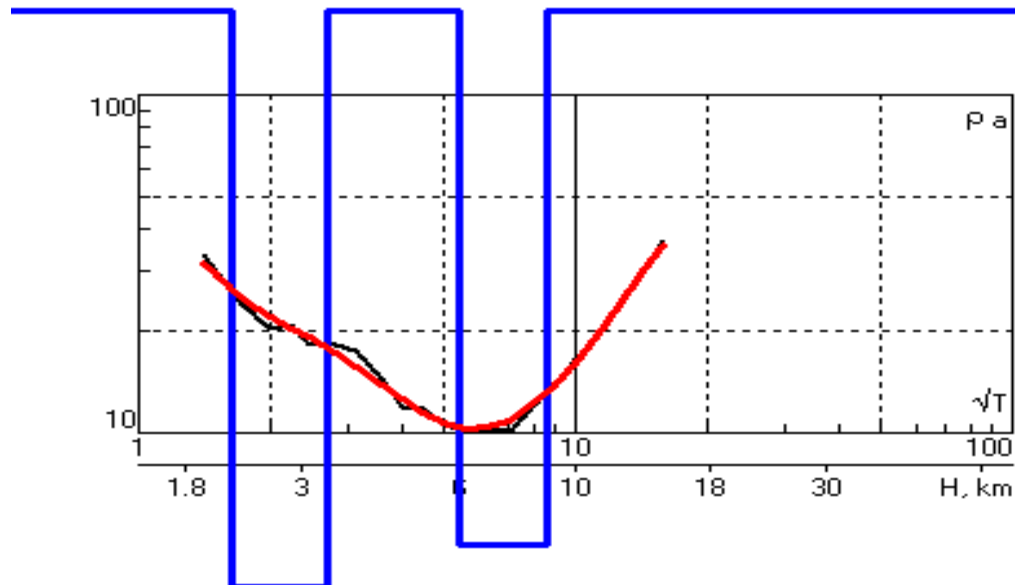


Figura 5.2.55 Curva correspondiente al SEV-10

5.3 Método Magnetométrico

5.3.1.- Objetivos Generales

El estudio geofísico con métodos potenciales (Magnetometría) en la ciudad de Cuatro Ciénegas tiene como objetivo estudiar la topografía del basamento cristalino y calcular el espesor de la interfase del basamento ígneo con la cuenca sedimentaria, también determinar posible zona de fallamiento (Falla San Marcos). Para este trabajo se organizó una brigada de campo, cuyo principal objetivo fue, la recopilación de datos los cuales se agruparon en secciones llamadas “perfiles”, estos perfiles se encuentran estratégicamente ubicados en el área de interés para una mejor resolución en un punto determinado a la hora de modelar e interpretar los datos. Con estos datos se realizó un modelo en 2D de las anomalías obtenidas, que es el contraste de magnetización o susceptibilidad magnética. En el presente trabajo se muestra los principios del método utilizado, información geológica del área, ubicación, estratigrafía dominante según varios autores, entre ellos, McKee et al. (1990), Chávez-Cabello, et al. (2005), entre otros. Los cuales definen estructuras internas de la región, el tipo de roca, su ambiente de depósito, evolución tectónica, etc., estos conceptos son de gran ayuda para comprender mejor la geología y así argumentar nuestro análisis geofísico e interpretación geológica.

5.3.2.-Ubicación

La Fig. 5.3.55. Muestra la ubicación de los perfiles que realizamos en estas fechas, estos se encuentran en una región a 1 hora de la ciudad de Cuatro Ciénegas, mejor conocida como el cañón La Fragua. El modo de acceso a esta área es por la carretera No.30, la cual cruza el valle de Cuatro Ciénegas y el valle el Hundido, en donde entre ellos se encuentra el lugar de interés. El objetivo como ya se ha mencionado con anterioridad es, evaluar la zona con métodos geofísicos para modelar la interfase que existe entre el basamento cristalino y la cuenca sedimentaria, delimitar espesores y evolución geológica, ya que en esta área se habla en muchos artículos de una extenuante zona de fallamiento, de aquí la famosa Falla de San Marcos. En total se obtuvieron 6 perfiles, en los capítulos siguientes se describen en forma más detallada.

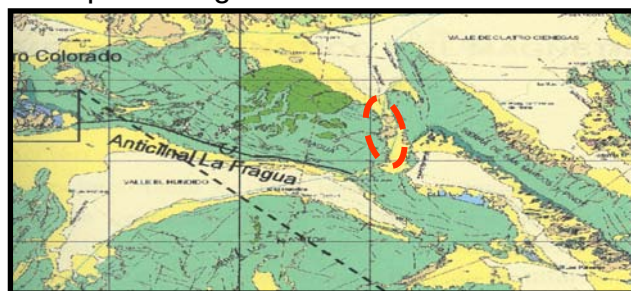


Fig. 5.3.56.- Esta figura muestra la ubicación de los primeros perfiles, indicados con el círculo rojo, se muestra el anticlinal La Fragua y la sierra San Marcos Pinos, donde el estudio geofísico tomó lugar (www.inegi.com).

En junio del mismo año, tuvo lugar otra excursión, solo que esta fue enfocada a recopilar información dentro del valle el Hundido, en las faldas del anticlinal la Fragua, como se muestra en la Fig.5.3.56. El objetivo de esta salida fue en principio el mismo, hacer una serie de perfiles de los cuales se plantea una distribución ordenada de estos, procesarlos en el trabajo de gabinete, y modelarlos, esto ultimo aun esta en proceso ya que se necesita un estudio geológico mas a detalle para llegar a comprender que es lo que puede estar pasando en el subsuelo. Al final se tendrá un modelo en 2D de la posible topografía del basamento y se relacionara con la distribución de los anticlinales que existe en esta región, los cuales se caracterizan por tener diferentes distribuciones de dirección, en sus rumbos y buzamientos, en proceso.

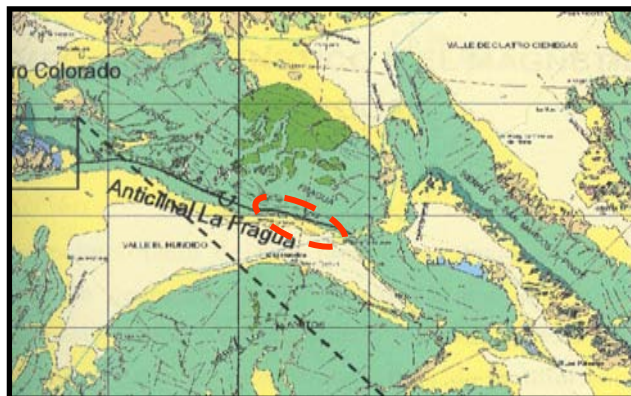


Fig.5.3.57- Muestra la ubicación de los perfiles realizados en la salida que tuvo lugar en junio del 2006. En total fueron 3 perfiles magnéticos, en el valle el Hundido.

Para realizar el estudio magnético en la sierra la Fragua y Valle el Hundido, a 1 hora de la ciudad de Cuatro Ciénegas, en Coahuila, se utilizo el magnetómetro G-856 marca Geometrics, también contamos con un GPS, el cual es indispensable para ubicar e ir marcando cada punto en el mapa (G-13-6, Tlaxiaco 1 – 250 000 (INEGI)). También contamos con un vehículo para recorrer distancias entre puntos y así ahorrar tiempo al hacer los levantamientos como se ve en la Fotografía 5.13.



Fotografía. 5.13. Muestra al equipo de trabajo humano, el cual es de tres personas (Dr. Yutsis (centro), Ivansito (derecha) y Osvaldo (izquierda) y las herramientas ya mencionadas: GPS, Magnetómetro, vehículo (UANL), etc.

5.3.3.- Trabajo de campo

En esta salida a campo se levantaron en total 6 perfiles, que en total suman 47 mediciones las cuales tienen una distancia aproximada uno del otro de entre 100 a 150 metros. Se realizó un perfil principal el cual cruza casi por completo el cañón la Fragua como se muestra en la Fig. 5.3.57., marcado de color **rojo**.

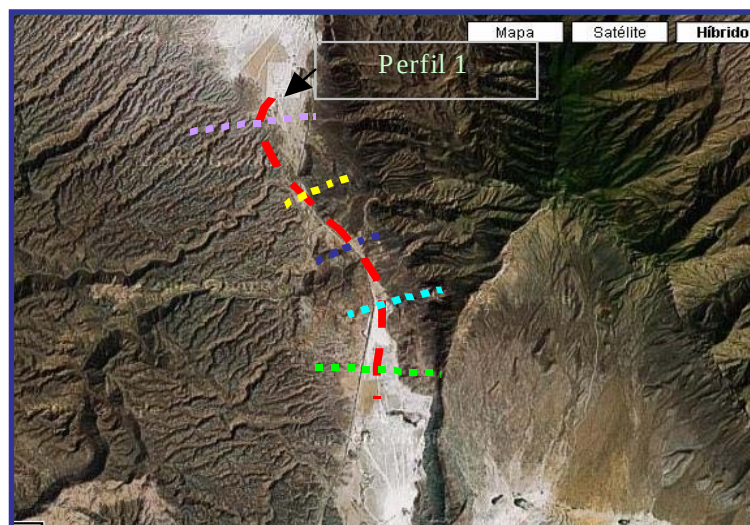


Fig. 5.3.58.- Esta imagen de satélite muestra la distribución de los perfiles secundarios al perfil principal el cual cruza, no por completo el cañón la Fragua. El perfil no. 2 esta marcado con color **verde**, el no. 3 con color **azul marino**, el 4 de **azul fuerte**, el 5 con **amarillo** y el perfil numero 6 de color **lila**, como se observa en la figura, ([www.google maps.com](http://www.google.com/maps.com)).

Realizamos 3 perfiles a las faldas del anticlinal la Fragua (Fig. 5.3.58, 59 y 60) de los cuales los perfiles numero 2 y 3 cruzan (no por completo) perpendicularmente a la sierra, el perfil 1, es paralelo a esta, en total se levantaron 45 puntos los cuales tienen un patrón de distribución de aproximadamente 100 a 150 metros de distancia uno de otro.

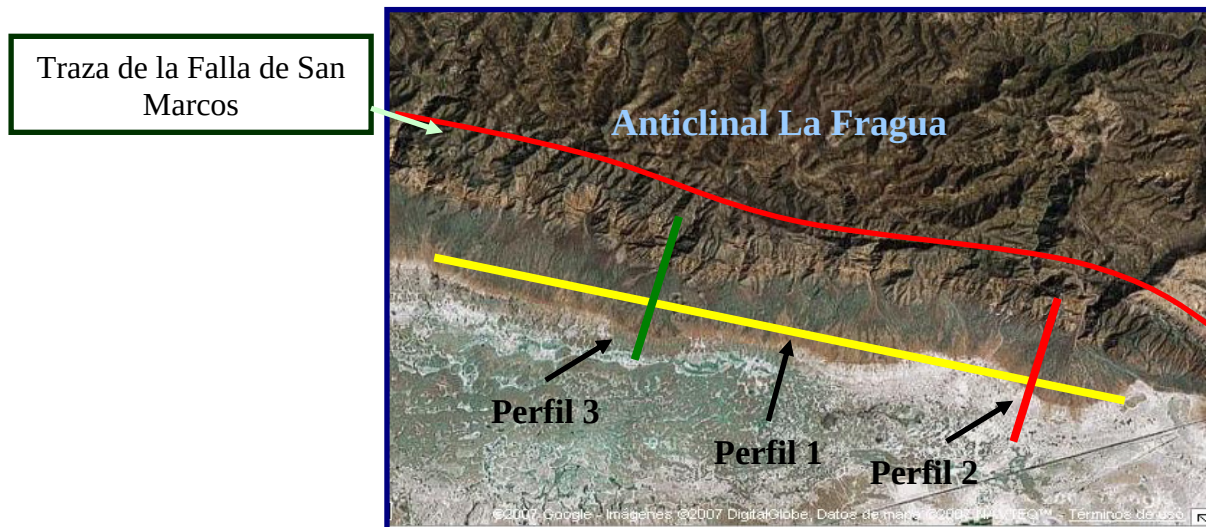


Fig. 5.3.59. Satélite que muestra las trazas de los perfiles obtenidos. Perfil 1(amarillo), perfil 2 (rojo), perfil 3 (verde). (www.google.com/maps).

En general hay que tener en cuenta el proceso para tomar las lecturas, el modo de operar del instrumento, ya que este tiene que estar orientado al norte, no tiene que haber ningún artefacto que altere el valor real de la lectura (no debe de haber materiales metálicos), los sensores tienen que estar separados del procesador amenos 2 metros, para que obtengamos mejor resolución en los datos al momento de procesarlos, como se muestra en la Fig. 5.3.59

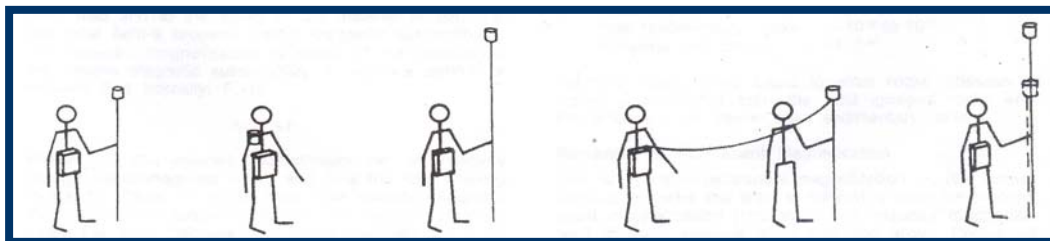


Fig. 5.3.59. Muestra el procedimiento para levantar datos en campo, la distancia de los operadores y la orientación del magnetómetro.

5.4.- Procesamiento de datos

Una vez que se recopiló la información necesaria, se procedió a realizar el trabajo de gabinete, hasta la fecha todavía no es posible finalizar ya que el modelado e interpretación siguen en análisis. Los datos procesados fueron sometidos a las correcciones que mas adelante se mencionan y se explican con brevedad:

- a) Variación secular: Es necesario realizar diferentes inspecciones, y observar la diferencia de tiempos, juntos y así comparar la respuesta magnética individual en diferentes áreas, esto tiene ventajas para el desarrollo de modelos, para estimar valores y el cambio anual del principal campo magnético terrestre. Un modelo tal es la International Geomagnetic Reference Field (IGRF).
- b) Variación Diurna: Esta es bastante variable y no puede fácilmente ser aproximada por un modelo matemático. La variación diurna esta sujeta a amplitudes y cambios de fase, dependiendo de la localización geográfica de la observación, y puede solo ser influenciada por condiciones geológicas, tales como la susceptibilidad de las rocas en el lugar de observación. Por lo que se procede en establecer una base-estación localizada en un punto cercana al área de estudio. Las mediciones del campo magnético en el área son entonces corregidas por los cambios diurnos de los dos datos colocados a través de una extracción manual de anomalías obtenidas, (S. Brainer).

5.4.1.- Perfiles magnéticos

Los datos procesados fueron almacenados en bases de datos en Excel, los cuales están siendo analizados para una interpretación y modelado con más precisión.

Las graficas que se muestran a continuación Fig. 5.4.60, son las anomalías representadas con los valores obtenidos en campo, ya procesados, en las correcciones del trabajo de gabinete, se utilizó como referencia el IGRF 2005 del observatorio del campo magnético ubicado en Japón, ([http://swdc.kugi.kyoto-u.ac.jp / index.html](http://swdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html)).

También se muestra la intensidad de los mapas magnéticos de: el campo magnético residual, el regional, el campo magnético total. Gracias a la ayuda de un sofisticado software llamado WingLink, con este programa también se puede modelar e interpretar, pero como ya se ha mencionado anteriormente eso esta en análisis, los mapas ya mencionados se verán en el capítulo siguiente que es el VI-Mapas.

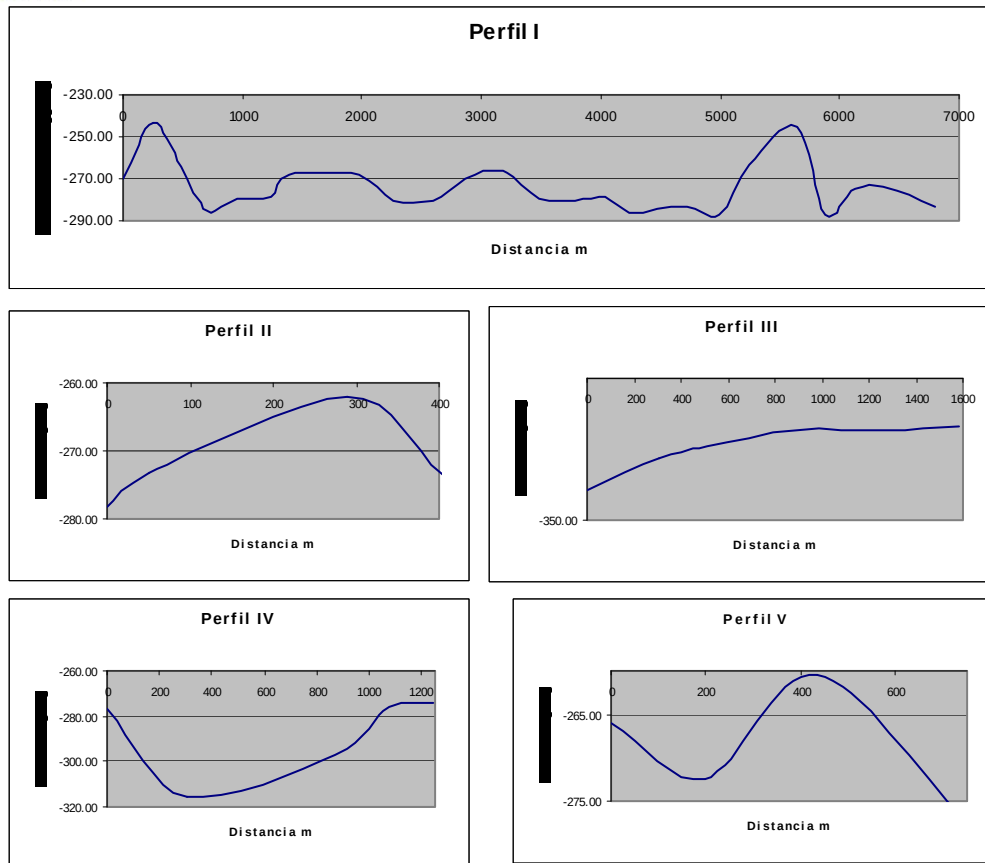


Fig. 5.4.61.- Esta figura muestra las graficas obtenidas de los valores resultantes de datos tomados en campo ya corregidos. Las graficas muestran las anomalías magnéticas ocasionadas por cambios en la morfología geológica y diferencias de susceptibilidades. **Nota:** solo se presentan 5 perfiles por que uno de ellos solo tenía 2 datos levantados y no fue necesario incluirlo en este trabajo.

Las graficas que se presentan a continuación (Fig. 5.4.61) son los datos procesados, esto quiere decir que han sido corregidos y comparados con el campo de referencia mundial japonés (IGRF, 2005), como ya mencioné atrás, estos datos están siendo modelados para una interpretación adecuada. Las curvas muestran las anomalías obtenidas de los datos en campo. Estos mismos datos serán interpretados y modelados con un software como lo es el Winglink, donde se aprecia con mas detalle la morfología del subsuelo, pero en eso se esta trabajando aun.

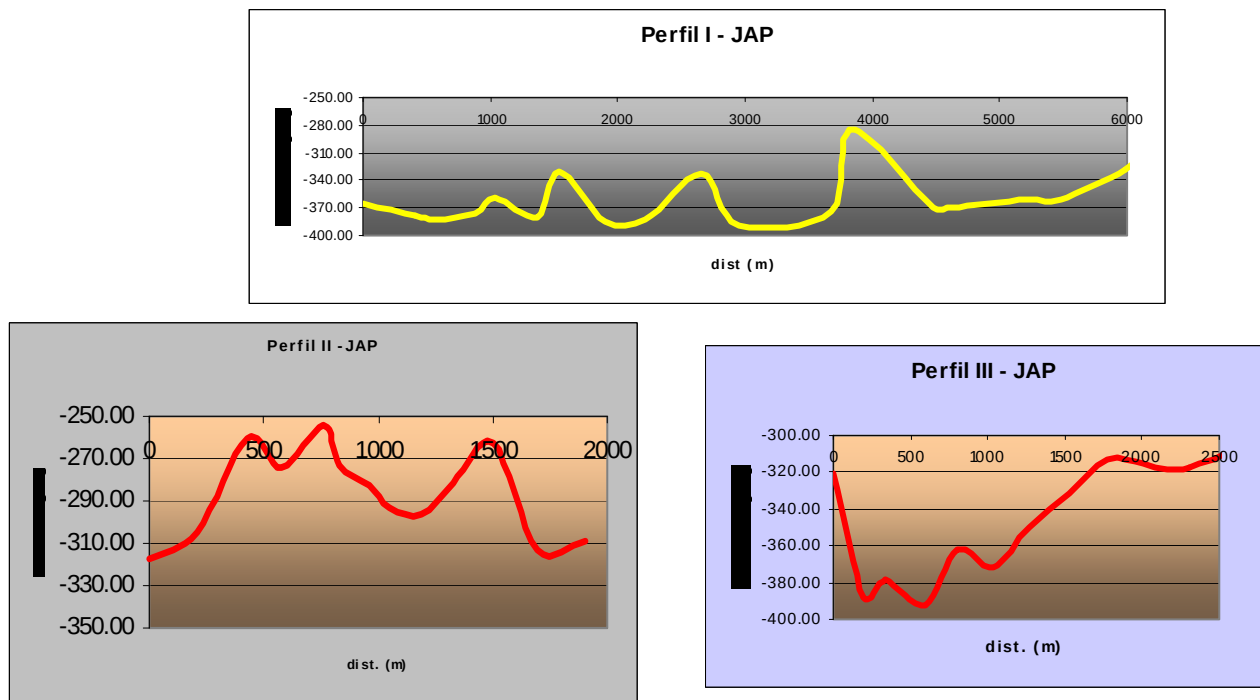
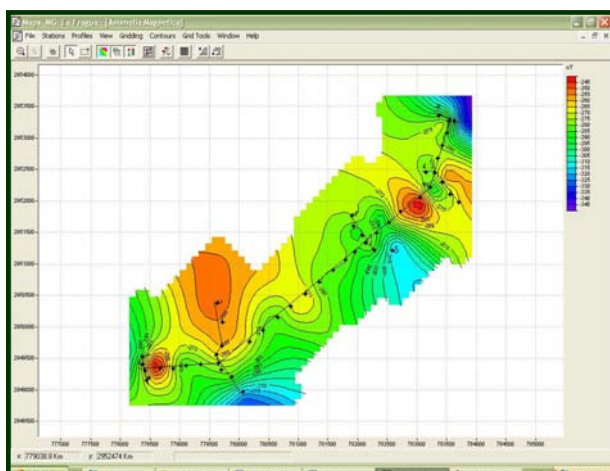


Fig. 5.4.62.- Muestran las curvas obtenidas de los datos ya calculados y procesados, llamados así anomalías. Estas nos servirán para crear un modelo basándonos en la forma de estas curvas. Se muestran los perfiles tomados en la Sierra la Fragua.

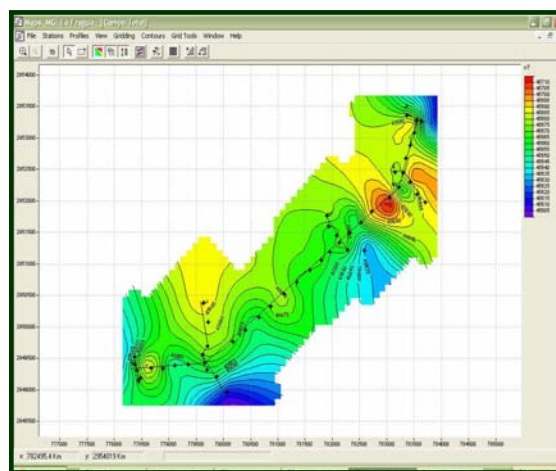
En las graficas se presentan los resultados de los mapas magnéticos de los diferentes anomalías de los perfiles tratados en este trabajo. Los mapas pertenecen a: el campo magnético total, la anomalía magnética residual, la regional, y la anomalía magnética.

Mapas de resultados generales de la primera salida que fue en el cañón la Fragua, muestran las intensidades magnéticas de datos corregidos de los perfiles obtenidos que se aprecian en cada uno de estos mapas.

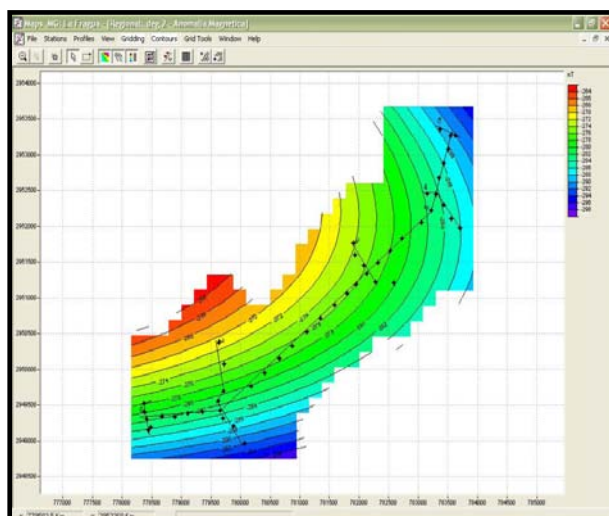
Anomalía total (IGRF)



Campo total



Anomalía regional



Anomalía residual

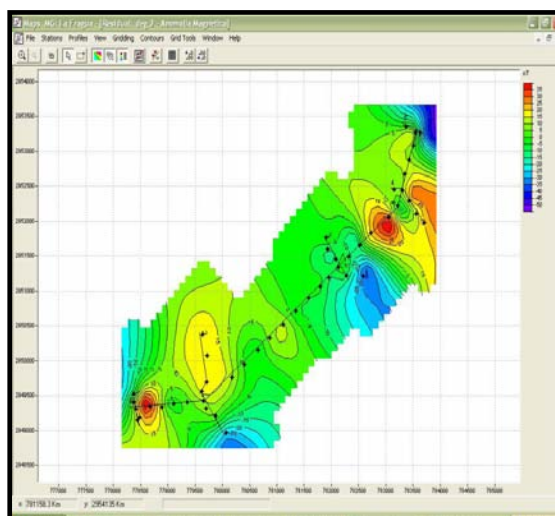


Figura 5.4.63 Resultados de las anomalías magnéticas de los perfiles procesados.

Capítulo VI

6. HIDROGEOLOGÍA.

6.1. Introducción

En este capítulo se describen antecedentes generales acerca de la hidrogeología del área de estudio. Se presenta un inventario actualizado de aprovechamientos hidráulicos, indicándose su localización, nombre del propietario, tipo de aprovechamiento, características de construcción, tipo de bomba, diámetro de descarga, profundidad nivel estático, nivel dinámico, caudal. A partir de la información geológica del subsuelo descrita en el capítulo anterior se define la geometría del acuífero, esto con el apoyo de métodos geofísicos. También se realizó una caracterización hidrogeológica de las formaciones acuíferas del área de estudio, que incluye la determinación de parámetros hidráulicos: Transmisividad (T M²/Día), Coeficiente de Almacenamiento (S) y Caudal ($Q = L/S$) mediante pruebas de bombeo escalonadas de larga duración (72 horas). Finalmente se analizó la evolución de la piezometría a partir de datos obtenidos de los diferentes recorridos realizados en tres años de observación.

6.1.1. Características hidrogeológicas de las formaciones acuíferas.

Debido a la diversidad de tipos litológicos y génesis de las formaciones sedimentarias presentes en el área de estudio, éstas presentan dos unidades acuíferas una en medios granulares asociadas a depósitos de abanicos aluviales y la otra vinculada con rocas consolidadas (calizas). Las unidades hidrogeológicas en rocas consolidadas forman acuíferos muy potentes a nivel regional en el noreste de México, dichas unidades de acuerdo a su posición estratigráfica que guardan en la zona son: Formación Cupido del Hauterviano y la Formación Aurora del Albiano; ambas del Cretácico Inferior.

La unidad correspondiente a rellenos aluviales está estrechamente relacionada con depósitos de Pie de Monte y Eólicos, de edad Reciente. La unidad en rocas consolidadas corresponde al acuífero profundo, mientras que la segunda esta forma el acuífero somero.

En la zona del Valle del Hundido la geometría de los acuíferos que yacen a diferente profundidad queda controlada principalmente por los contrastes de permeabilidad existente entre los diferentes tipos de sedimentos ínter estratificados, todos estos aspectos inciden en un mayor grado de anisotropía y heterogeneidad del medio y, por lo tanto, en la circulación del agua subterránea (Custodio, 1986).

6.2. Configuración del nivel estático.

Durante los meses de abril y mayo del 2004 se llevó acabo la primera campaña de piezometría en los pozos emplazados en el acuífero del Valle del Hundido, señalando que este primer recorrido corresponde al período de estiaje. Adicionalmente, se realizó una concentración de datos piezométricos para los años de 2003, 2004, 2005 y 2006 por el autor como parte del proyecto con Clave CO-1-0083. También se tomó en cuenta la información del estudio realizado por Lesser y Asocc (2001) de piezometría a fin de definir la evolución que ha sufrido el acuífero en el Valle del Hundido después de haber sido sometido a un régimen intenso de explotación.

6.2.1. Configuración de isoelevación del nivel estático Septiembre 2006.

Para el período correspondiente entre 2003- 2006, con los datos disponibles de los diferentes censos de aprovechamientos realizados en los años de 2003, 2004, 2005 y 2006; en forma general los niveles piezométricos oscilan desde 800 en el Pozo CNA 48 hasta 760 en el aprovechamiento CNA 124. En La Tabla 6.1 se presentan las elevaciones para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que corresponden a la red de monitoreo en el Valle del Hundido.

En la figura 6.2.63 se muestra la configuración de la isoelevación del nivel estático correspondiente al mes de septiembre de 2006, en dicha configuración se muestra la dirección preferencial del flujo subterráneo el cual tiene una dirección SW- NE. En el centro del valle se forma una depresión, dicha estructura morfológica está estrechamente relacionada con aquellos aprovechamientos cuyas concentraciones de sulfatos y cloruros son muy elevadas.

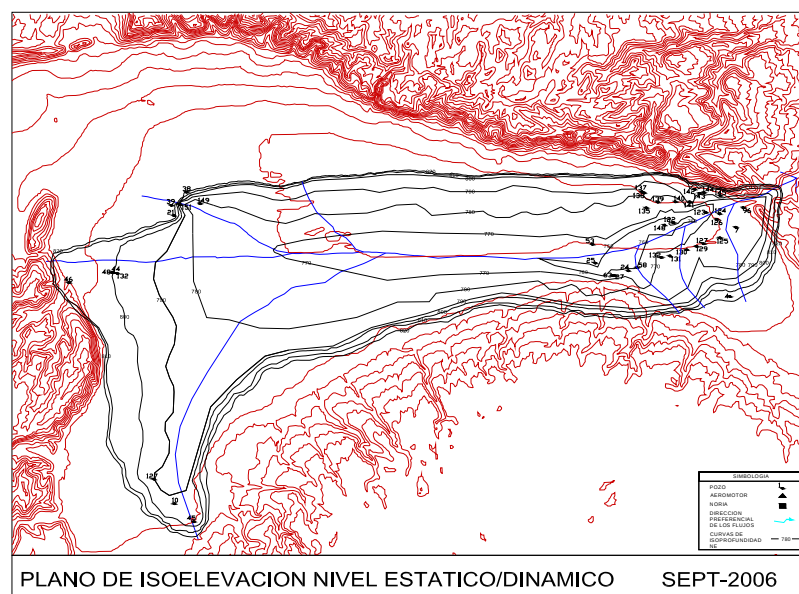


Figura 6.2.65 Configuración Isoelevación Nivel Estático Sept. 2006

6.2.2. Configuración de isopropundidad nivel estático.

Para el período correspondiente entre 2003- 2006, con los datos disponibles de los diferentes censos de aprovechamientos realizados en los años de 2003, 2004, 2005 y 2006; en forma general los niveles piezométricos oscilan desde 50 en el Pozo CNA 48 hasta 40 en el aprovechamiento CNA 124. En La tabla 6.3 se presentan las profundidades para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que corresponden a la red de monitoreo en el Valle del Hundido.

En la Figura 6.2.64 se muestra la configuración de la isopropundidad del nivel estático correspondiente al mes de septiembre de 2006, en dicha configuración se muestra la dirección preferencial del flujo subterráneo el cual tiene una dirección SW- NE, teniendo como única salida a través del Cañón de la Fragua. En el centro del valle se forma una depresión, dicha estructura morfológica está estrechamente relacionada con aquellos aprovechamientos cuyas concentraciones de sulfatos y cloruros son muy elevadas.

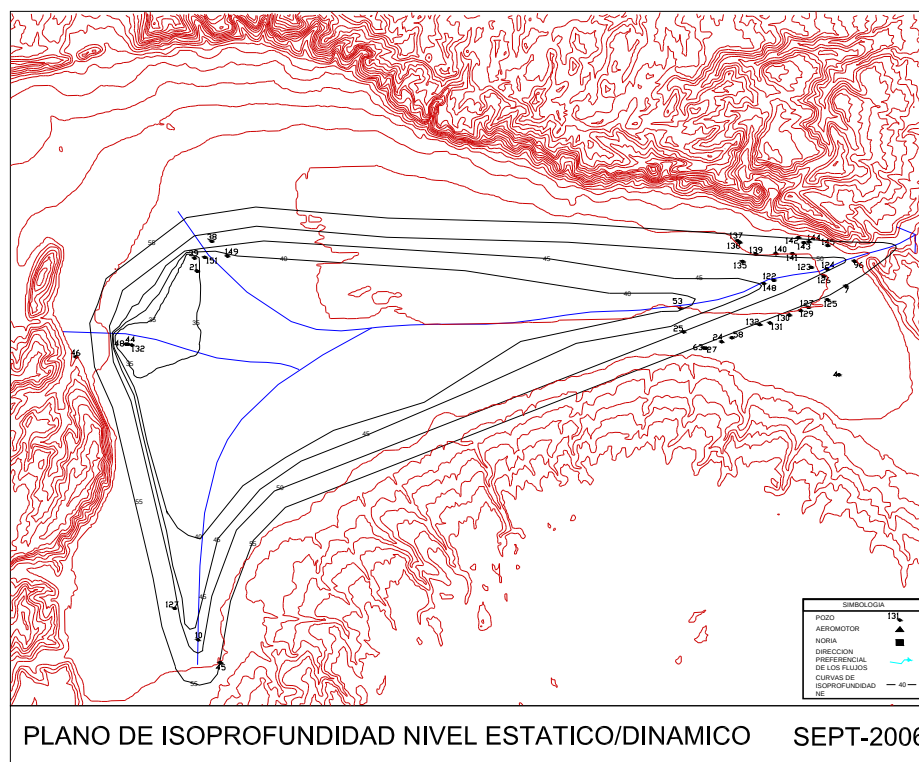


Figura 6.2.66 Configuración Isopropundidad Nivel Estático Sept. 2006

6.3. Pruebas de bombeo.

Con el propósito de conocer las características hidrodinámicas del acuífero en el Valle del Hundido, se efectuaron 8 pruebas de bombeo, distribuidas de la manera siguiente: cuatro se localizan en el Rancho San Fernando en el acuífero en medios granulares, las otras cuatro restantes se realizaron el acuífero en rocas consolidadas en el Ejido Santa Teresa de Sofía, municipio de Cuatro Ciénegas, Coahuila; los tiempos de duración en las pruebas de bombeo escalonadas en los ocho pozos fueron de larga duración (72 horas), Figura 6.3.65 (Fotografías 14 y 15)

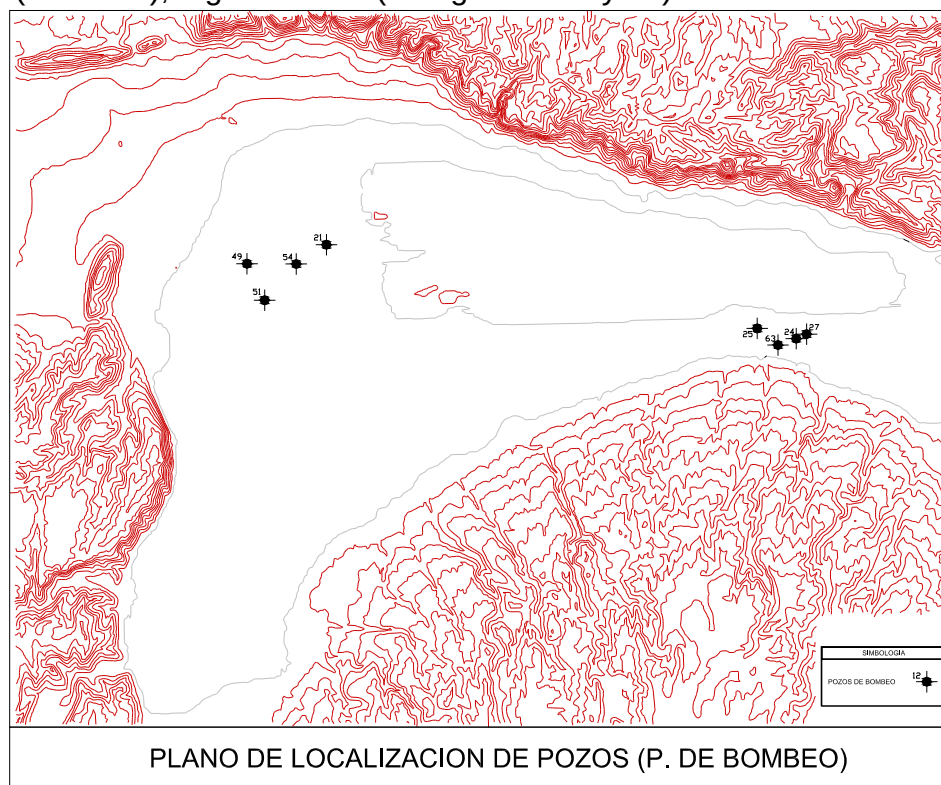
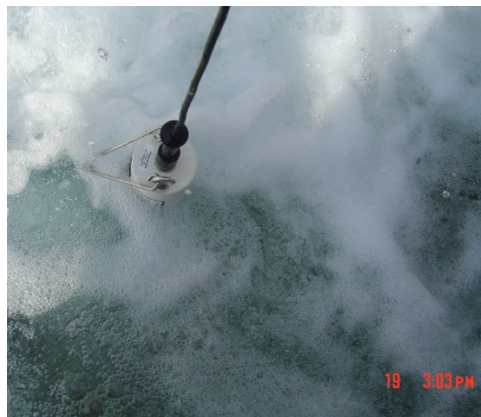


Figura 6.3.67 Localización de Pozos donde se realizaron pruebas de bombeo.



Fotografías 14 y 15 Pruebas de Bombeo de 72 horas

En la Tabla 6.15 se muestra la localización de cada uno de los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo. Para definir el comportamiento hidráulico del acuífero en el Proyecto: “Valle del Hundido”, se realizaron pruebas de bombeo escalonadas de larga duración (72 horas), durante el desarrollo de la prueba, se contó con dos pozos de observación (25 y 46). El pozo No 25 localizado a 281.20 metros y el No 46 a 240.83 metros del pozo de bombeo No CNA 24 es importante recalcar que los resultados obtenidos en los pozos de observación nos muestran el comportamiento hidráulico del acuífero, así como el radio de influencia provocado por el bombeo. Ver tabla 6.15

6.3.4. Determinación de caudales.

La verificación del caudal durante una prueba de bombeo, requiere de un dispositivo para medir la descarga de la bomba, una manera conveniente de ajustarla para mantener ésta lo más constante posible, es mediante un agujero calibrado con arandelas biseladas colocadas hacia la parte interior del tubo; de descarga para reducir el flujo y aumentar la presión del fluido, el cual se podrá observar en la altura del piezómetro.

El dispositivo de orificio calibrado es el instrumento más comúnmente utilizado en este tipo de trabajos, específicamente en bombas centrífugas o de turbina. Desde luego, no podría medir el flujo pulsante de una bomba de pistón. En la figura 6.3.66, se muestran los detalles esenciales de la construcción y armado del equipo.

Modelo de Orificio Calibrado

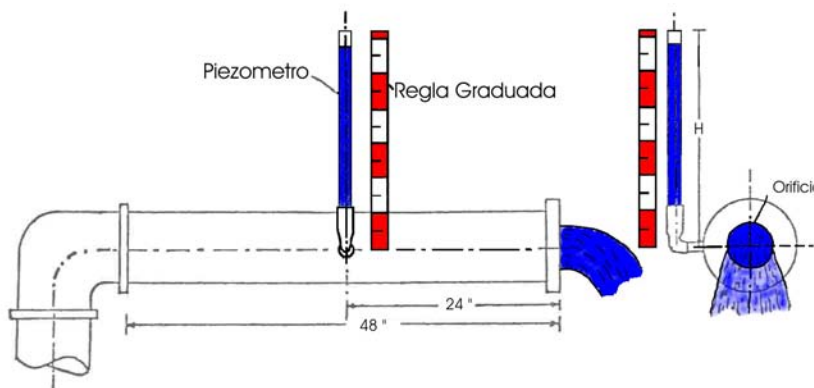


Figura 1

Figura 6.3.68. Esquema de Orificio Calibrado

6.3.5. Aforo de tubos horizontales método del orificio

El caudal a través del orificio calibrado se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$G = 0.25 K D^2 \sqrt{h}$$

G = Gasto en l/s.

K = Constante experimental. Altura del agua en el piezómetro en CMS.

D = Diámetro del orificio en pulgadas.

6.3.3 Descripción de la prueba de bombeo en el Pozo CNA 24

La prueba de bombeo realizadas en el pozo CNA 24 utilizando como pozo de observación (CNA 27) están ubicados en el flanco norte de la Sierra de Los

Alamitos Noroeste ; la ubicación de los pozos como toda la información relacionada con estos se muestra en el Plano 6.3.65 y en la tabla 6.16.

Pozos de bombeo. Tabla 6.16

NOMBRE DEL POZO	COORDENADAS UTM		
	ESTE	NORTE	ALTURA m.s.n.m.
Ejido Santa Teresa de Sofía, Cuatro Ciénegas, Coah.			
Pozo CNA 24	772603	2945313	804
Pozo CNA 25	772111	2945102	798
Pozo CNA 27	771350	2944797	806
Pozo CNA 63	771247	2944798	801
Rancho San Fernando			
Pozo CNA 54	748411	2948637	819
Pozo CNA 49	746076	2948650	827
Pozo CNA 51	746914	2946921	822
Pozo CNA 21	746648	2948553	826

La prueba de bombeo se realizó en el Pozo CNA 24. El arranque de la prueba en el Pozo CNA 24, se inició el día 16 de febrero de 2005 a las 07:03 AM (anexo 1) dicha prueba se prolongó por espacio de 72 horas en forma escalonada. En los diferentes gráficos elaborados (anexos 1, 2, 3, 4) se muestra el comportamiento del acuífero. En los resultados de la prueba de bombeo, se observa un comportamiento normal; lo cual demuestra que el acuífero en cuestión se comporta como un acuífero libre en medios fracturados. Los resultados graficados en papel logarítmico nos muestra que el abatimiento fue muy paulatino en los primeros 100 minutos de operación; el nivel dinámico descendió hasta una profundidad de 29.60 m a 1000 RPM en los primeros 46 minutos de bombeo, el pozo reportó un caudal (90 l/s). A medida que el tiempo siguió transcurriendo, el descenso se comportaba en forma normal, al incrementar el número de revoluciones por minuto (1200 rpm), el caudal aumentó hasta (13.20 l/s) en los 1126 minutos de observación. A partir de las 8.00 AM del 25 de mayo hasta las 15.00 PM del mismo día el caudal se mantuvo en (90l/s) a pesar de que fueron aumentadas las RPM a 1300 durante este período el nivel dinámico descendió hasta 12.20 m. El abatimiento durante las 72 horas de observación fue normal llegando a establecerse en

29.60 m. a 1300 RPM con un caudal de (90 l/s). Al incrementar las revoluciones a 1400 RPM el caudal se mantuvo constante (90 l/s) llegando su nivel dinámico a 29.60 metros, durante este intervalo de prueba, el pozo no mostró burbujas en la columna del piezómetro. Al forzar el pozo a 1500 RPM el pozo se mantuvo constante en su caudal, esto se puede observar en el gráfico de: Abatimiento/versus tiempo. Fotografía 16. En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medios fracturados; también es importante señalar que los objetivos que se tenían programados en la prueba fueron cumplidos totalmente.

Para los fines que fue programada la prueba de bombeo los objetivos establecidos sobre el comportamiento hidráulico del acuífero fueron definidos, en la foto se muestra la descarga del pozo.



Fotografía 16 Descargas de los pozos bombeo

Los cálculos se realizaron mediante la aplicación de la ecuación de Theis, el radio de influencia fue determinado mediante la ecuación de Cooper - Jacob y Jacob distancia; dicha información se presenta en los diferentes gráficos y en las Tabla 6.17 que acompañan este informe.

6.3.4 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 24

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

s_p = descenso medido (m)



$Q = \text{Caudal } m^3/día$

$T = \text{Transmisividad en } m^2/día$

Para determinar T se utilizo la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = \frac{0.366(7776)}{0.48} \log \frac{534.94}{0.18}$$

Donde $T = 20,574.32 \text{ } m^2/día$

A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 90 l/s se obtiene el valor de u:

$$Q = \frac{4\pi TS_p}{W(u)} \therefore W(u) = \frac{4\pi TS_p}{Q}$$

$$W(u) = (0.48)(4)(3.14)(20,574.32) / 7776 = 15.95$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de W (u) correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165., 1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 6.6 \times 10^{-8}$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \text{ Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

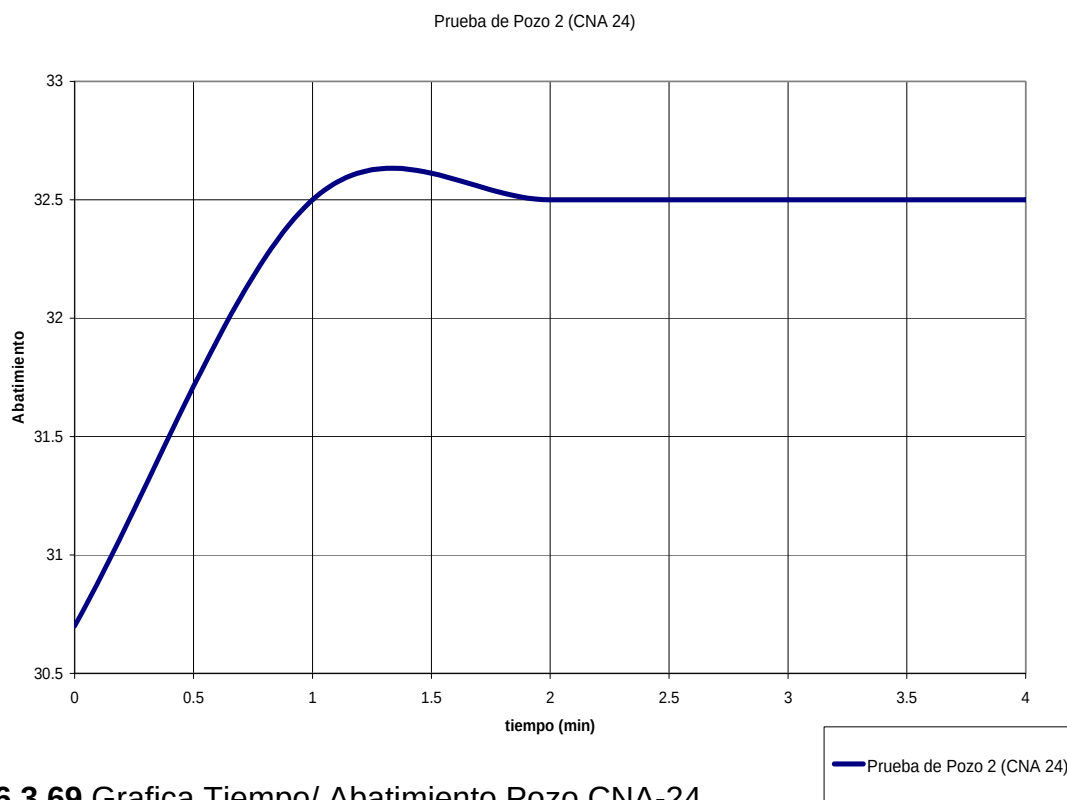
S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} = \frac{4 * (6.6 \times 10^{-8}) * (20,574.32) * (3)}{(3.24 \times 10^{-2})} = 5.09 \times 10^{-1}$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medios fracturados; también es importante señalar que los objetivos que se tenían programados en la prueba fueron cumplidos totalmente. (Figura 6.3.67)





Fotografía 17. Flujo intermitente del pozo 24 a 1500 rpm.

$$Q = \frac{4\pi TS_p}{W(u)} \therefore W(u) = \frac{4\pi TS_p}{Q}$$

6.3.4.1 Cálculo del radio de influencia mediante la aplicación de la ecuación de Cooper- Jacob

Su radio de influencia fue definido a partir del pozo de bombeo CNA 24 teniendo como pozo de observación el Pozo CNA 27. Para establecer el radio de influencia se utilizó la ecuación de Cooper- Jacob.

$$R_{24} = 1.5 \sqrt{t^* T / S} = 1.5 \sqrt{3(20,574.32/5.09 \times 10^{-1})} = 522.34 \text{ m.}$$

Utilizando la transmisividad obtenida a partir de la ecuación de Theis = 27,429.93 M2/día su radio de influencia es equivalente a:

$$R_{42} = 1.5 \sqrt{t^* T / S} = 1.5 \sqrt{3(27429.93/6.70 \times 10^{-1})} = 525.68 \text{ m.}$$

6.3.4.2 Cálculo del radio de influencia mediante la aplicación de la ecuación de Jacob-distancia



Utilizando la ecuación de Jacob sobre distancia: Pozo No. 24

$$r_{20} = \frac{2.25(T)(t)}{S} = \frac{2.25(20,574.32)(3)}{5.09 \times 10^{-1}} = 522.34 \text{ m}$$

La pendiente de la recta de acuerdo al gráfico descenso/distancia fue calculada aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta s_{24} = \frac{2.3Q}{2\pi T} = \frac{2.3(7776)}{2(3.14)(20,574.32)} = 0.13 \text{ m.}$$

Datos correspondientes al Pozo de bombeo CNA 24, utilizando como pozo de observación el CNA 27.

TABLA 6.3.17

Ecuaciones	Transmisividad (m ² /Día)	Coeficiente de Almacenamiento	Tiempo (Días)	Radio de influencia (m)
Cooper y Jacob	20,574.32	5.09 x10 ⁻¹	3	522.34 m.
Theis	27,429.93	6.70x10 ⁻¹	3	525.68 m
Jacob	20,574.32	5.09 x10 ⁻¹	3	522.34

6.4Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 27

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

sp = descenso medido (cm.)

Q = Caudal $\frac{\text{m}^3}{\text{día}}$

T = Transmisividad en $\frac{\text{m}^2}{\text{día}}$

Para determinar T se utilizo la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = \frac{0.366(6989.76)}{1} \log \frac{534.94}{0.18}$$

$$\text{Donde } T = 8877.13 \text{ } m^2/día$$

A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 80.9 l/s se obtiene el valor de u:

$$Q = \frac{4\pi TS_p}{W(u)} \therefore W(u) = \frac{4\pi TS_p}{Q}$$

$$W(u) = (1)(4)(3.14)(8877.13)/6989.76 = 15.96$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de W (u) correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165., 1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 6.6 \times 10^{-8}$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \text{ Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} = \frac{4 * (6.6 \times 10^{-8}) * (8877.13) * (3)}{(3.24 \times 10^{-2})} = 2.19 \times 10^{-1}.$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medio fracturado. Fig. 6.4.1 (Anexo 2) Datos de Campo Pozo CNA - 27

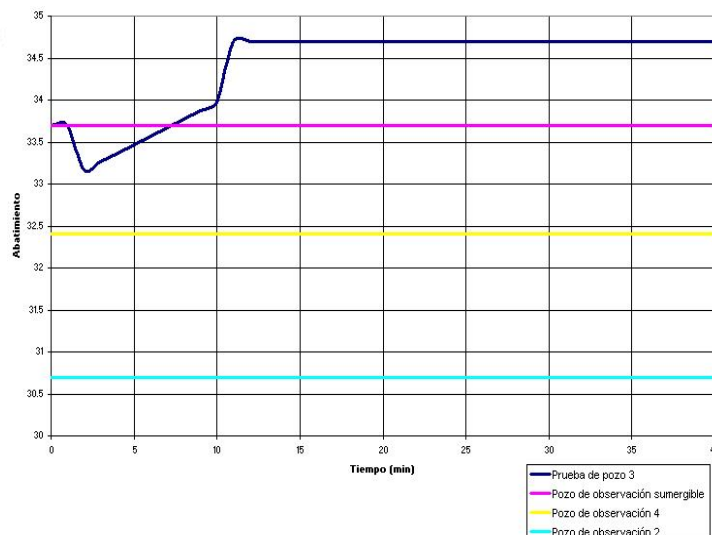


Figura 6.4.70 Grafica Tiempo / Abatimiento Pozo CNA- 27

6.5 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 63

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

s_p = descenso medido (cm.)

Q = Caudal $\frac{m^3}{día}$

T = Transmisividad en $\frac{m^2}{día}$

Para determinar T se utilizó la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = \frac{0.366(5544.28)}{8.38} \log \frac{916.25}{0.18}$$

Donde $T = 895.92 \frac{m^2}{día}$



A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 64.17 l/s se obtiene el valor de u:

$$Q = \frac{4\pi TS_p}{W(u)} \therefore W(u) = \frac{4\pi TS_p}{Q}$$

$$W(u) = (8.38)(4)(3.14)(895.92) / 5544.28 = 17.03$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de W (u) correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165., 1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 2.3 \times 10^{-8}$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \text{ Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} = \frac{4 * (2.3 \times 10^{-8}) * (895.92) * (3)}{(3.24 \times 10^{-2})} = 7.63 \times 10^{-3}.$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medio fracturado. Fig. 6.5.69 (Anexo 3) Datos de Campo Pozo CNA - 63

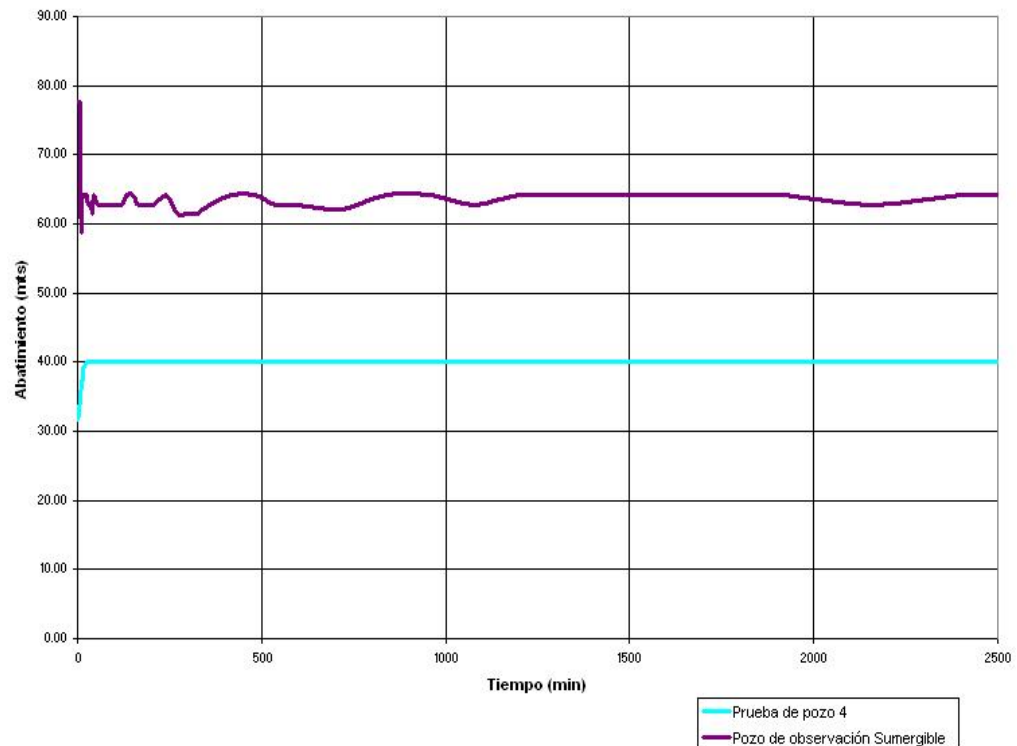


Figura 6.5.71 Grafica Tiempo Abatimiento Pozo CNA- 63

6.6 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 25

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

s_p = descenso medido (m.)

Q = Caudal $\frac{m^3}{día}$



T = Transmisividad en $\frac{m^2}{día}$

Para determinar T se utilizo la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = \frac{0.366(8726.41)}{1} \log \frac{1258.6}{0.18}$$

Donde T = 6813.58 $\frac{m^2}{día}$

A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 101 l/s se obtiene el valor de u:

$$Q = \frac{4\pi TS_p}{W(u)} \therefore W(u) = \frac{4\pi TS_p}{Q}$$

$$W(u) = (1.8)(4)(3.14)(6813.58)/8726.4 = 17.65$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de W (u) correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165., 1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 1.2 \times 10^{-8}$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \text{ Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} = \frac{4 * (1.2 \times 10^{-8}) * (6813.58) * (3)}{(3.24 \times 10^{-2})} = 3.02 \times 10^{-1}.$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medio fracturado. Fig. 6.6.70 (Anexo 4) Datos de Campo Pozo CNA - 25

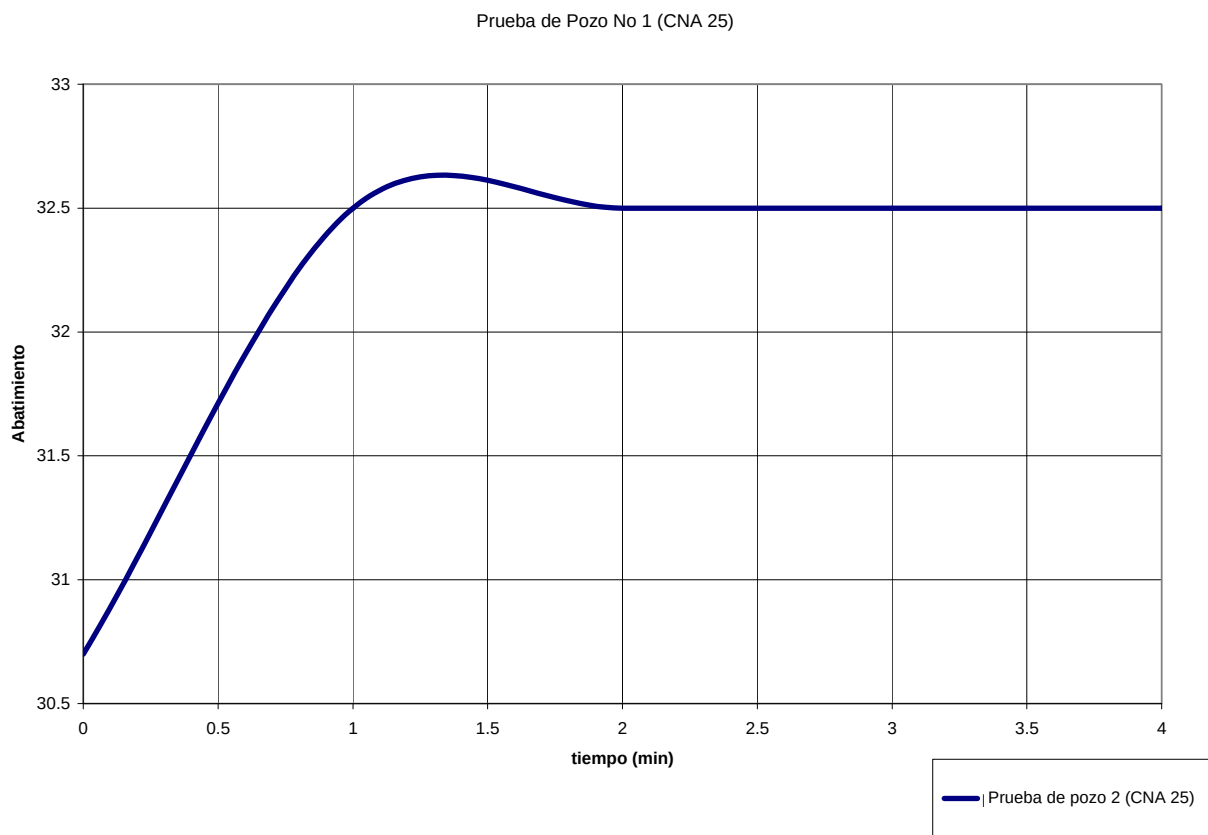


Figura 6.6.71 Grafica Tiempo Abatimiento Pozo CNA- 25

6.7 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 21

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido (Rancho San Fernando), propiedad del Lic. Lázaro Villarreal Fernández fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

s_p = descenso medido (cm.)

Q = Caudal $\frac{m^3}{día}$

T = Transmisividad en $\frac{m^2}{día}$

Para determinar T se utilizó la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = 0.366 \frac{8208}{40.08} \text{Log} \left(\frac{564.94}{0.18} \right) = 262.09 m^2 / día$$

Donde $T = 262.09 \frac{m^2}{día}$

A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 95 l/s se obtiene el valor de u :

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

$$W_u = \frac{(4)(\pi)(40.08)(262.09)}{8208} = 16.08$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de $W(u)$ correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165., 1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 5.8 \times 10^{-8}$



$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

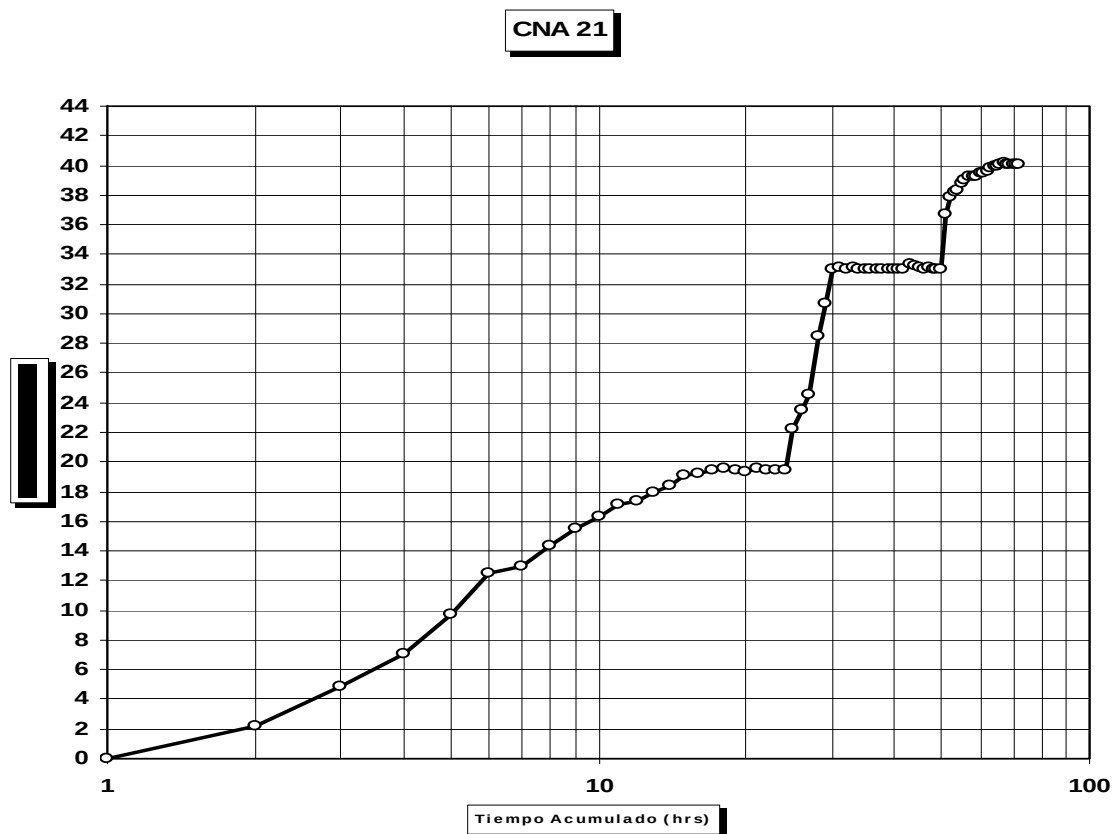
S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} \cdot S = \frac{(5.8 \cdot 10^{-8})(4)(262.09)(3)}{(0.18)^2} = 5.63 \cdot 10^{-3}$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medio granulares. Fig. 6.7.71 (Anexo 5) Datos de Campo Pozo CNA - 21





6.8 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 49

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido (Rancho San Fernando), propiedad del Lic. Lázaro Villarreal Fernández fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

s_p = descenso medido (cm.)

Q = Caudal $\frac{m^3}{\text{día}}$

T = Transmisividad en $\frac{m^2}{\text{día}}$

Para determinar T se utilizó la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = 0.366 \frac{8208}{18.37} \text{Log} \left(\frac{564.94}{0.18} \right) = 571.8 m^2 / \text{día}$$

Donde $T = 571.8 \frac{m^2}{\text{día}}$

A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 95 l/s se obtiene el valor de u :

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

$$W_u = \frac{(4)(\pi)(40.08)(262.09)}{8208} = 16.08$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de $W(u)$ correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165., 1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 5.8 \times 10^{-8}$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} \cdot S = \frac{(5.8 \cdot 10^{-8})(4)(571.8)(3)}{(0.18)^2} = 0.01$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medio granulares. Fig. 6.8.72 (Anexo 6) Datos de Campo Pozo CNA - 49

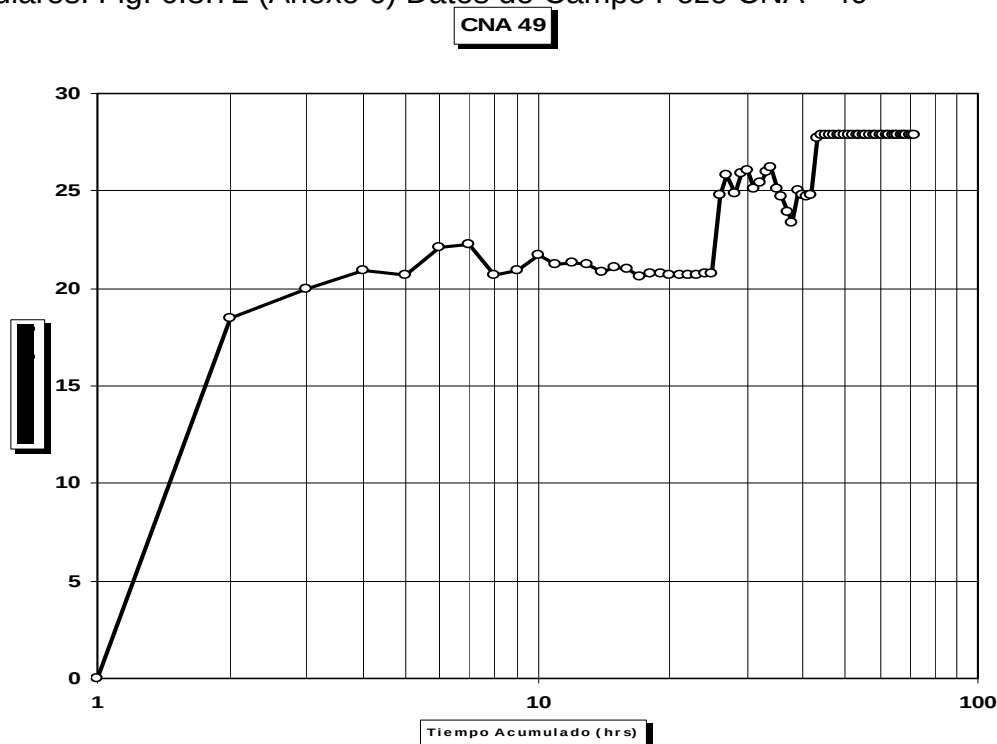


Figura 6.8.73 Grafica Tiempo / Abatimiento Pozo CNA - 49

6.9 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 51

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido (Rancho San Fernando), propiedad del Lic. Lázaro Villarreal Fernández fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

s_p = descenso medido (cm.)

Q = Caudal $\frac{m^3}{\text{día}}$

T = Transmisividad en $\frac{m^2}{\text{día}}$

Para determinar T se utilizó la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = 0.366 \frac{8902.65}{27.86} \text{Log} \left(\frac{640}{0.18} \right) = 415 m^2 / \text{día}$$

Donde $T = 571.8 \frac{m^2}{\text{día}}$

A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 95 l/s se obtiene el valor de u :

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

$$Wu = \frac{(4)(\pi)(27.86)(415)}{8902.65} = 16.32$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de $W(u)$ correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165.,

1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 4.6 \times 10^{-8}$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} \cdot S = \frac{(4.6 \times 10^{-8})(4)(415)(3)}{(0.18)^2} = 7.07 \times 10^{-3}$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medio granulares. Fig. 6.9.73 (Anexo 7) Datos de Campo Pozo CNA - 51

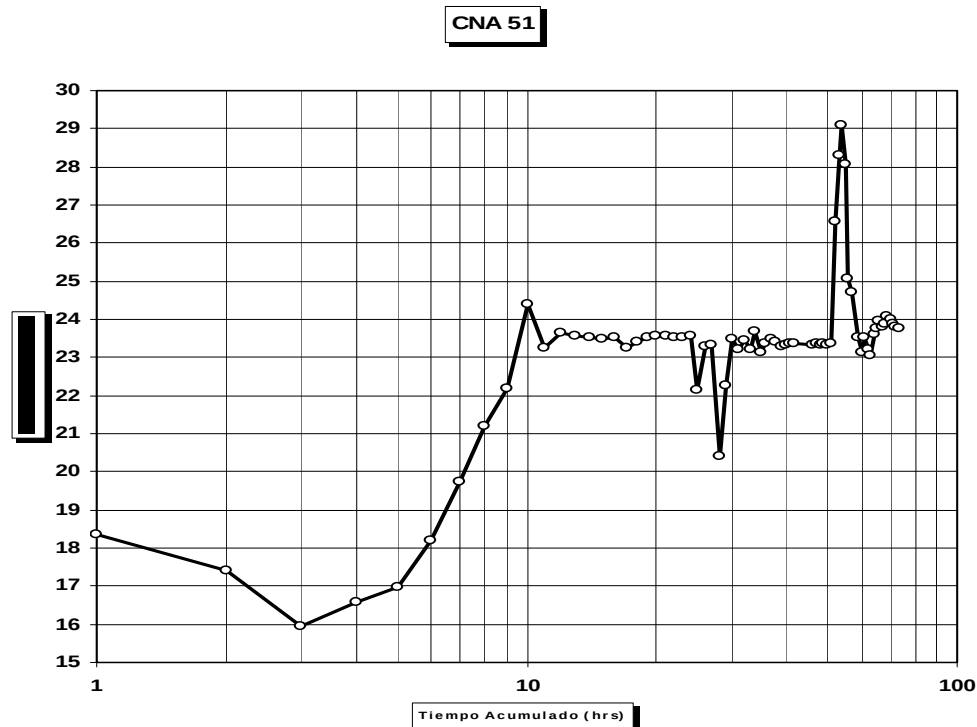


Figura 6.9.74 Grafica Tiempo / Abatimiento Pozo CNA - 51

6.10 Análisis de los resultados de la prueba de bombeo Pozo CNA 54

Para la obtención de los parámetros hidráulicos a partir de la información obtenida de la prueba de bombeo realizada en el pozo ubicado en el proyecto del Valle del Hundido (Rancho San Fernando) propiedad del Lic. Lucas Villarreal fue necesario realizar ciertos cálculos aplicando la ecuación de Theis la cual se describe en forma detallada a continuación:

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

Donde:

s_p = descenso medido (cm.)

Q = Caudal $\frac{m^3}{día}$

T = Transmisividad en $\frac{m^2}{día}$

Para determinar T se utilizó la ecuación de Jacob la cual es igual a:

$$T = 0.366 \frac{9097}{29.1} \text{Log} \left(\frac{564.94}{0.18} \right) = 400 m^2 / día$$

Donde $T = 571.8 \frac{m^2}{día}$

A partir de la ecuación de Theis con un gasto específico de 95 l/s se obtiene el valor de u :

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

$$Wu = \frac{(4)(\pi)(29.1)(400)}{9097} = 16.07$$

Basándonos en las tablas XIV Valores de $W(u)$ correspondientes a valores de u para ser utilizados en la Fórmula de NO Equilibrio de Theis. Página 498 y 499. El agua subterránea y los pozos (Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165.,



1975). Custodio y Llamas., 1975 Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España se obtuvo el siguiente valor de: $u = 5.9 \times 10^{-8}$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{Despejando del coeficiente de Almacenamiento } S = \frac{4uTt}{r^2}$$

r = radio del pozo.

S = Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo después de realizar los cálculos, mediante la ecuación de Theis.

t = tiempo.

T = Transmisividad.

$$S = \frac{4uTt}{r^2} \cdot S = \frac{(5.9 \times 10^{-8})(4)(400)(3)}{(0.18)^2} = 8.74 \times 10^{-3}$$

En el análisis Abatimiento- Tiempo el acuífero se comportó como un acuífero libre en medio granulares. Fig. 6.10.74 (Anexo 8) Datos de Campo Pozo CNA - 54

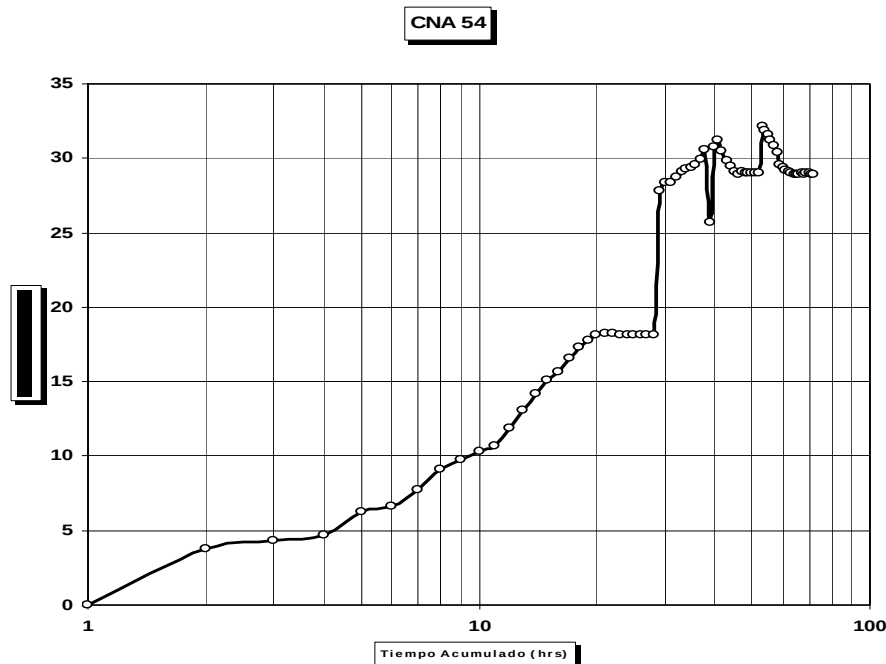


Figura 6.10.75 Grafica Tiempo / Abatimiento Pozo CNA - 54

Se representan los resultados finales de las pruebas de bombeo realizadas en cada uno de los pozos.

Tabla 6.15 Resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el Valle del Hundido.

UBICACIÓN	Coordenadas UTM			Nivel estático (m)	Nivel dinámico(m)	Parámetros Hidráulicos		
	X	Y	Z(msnm)			Q (l/s)	T (m ² /día)	S
Ejido Santa Teresa de Sofía.								
Pozo No 1.(CNA24)	772603	2945313	804	29.12	29.60	90	20,592.3	5.03X10 ⁻¹
Pozo No 2 (CNA25)	772111	2945102	798	30.7	32.5	101	6821.7	3.02X10 ⁻²
Pozo No 3 (CNA 27)	771350	2944797	806	33.7	34.70	80.9	8877.13	2.19 X10 ⁻¹
Pozo No 4 (CNA 63)	771247	2944798	801	31.62	40.00	64.17	895.92	7.63X10 ⁻³
SAN FERNANDO								
Pozo CNA 54	748411	2948637	819	36.50	65.60	105.29	571.8	8.74 x10 ⁻³
Pozo CNA 49	746076	2948650	827	25.15	43.52	95.00	571.8	1x 10 ⁻²
Pozo CNA 51	746914	2946921	822	36.50	64.36	103.04	571.8	7.07 x 10 ⁻³
Pozo CNA 21	746648	2948553	826	25.72	65.80	95.00	262.09	5.63 x 10 ⁻³

Capítulo VII

7- INVESTIGACIONES HIDROGEOQUÍMICAS.

7.1. Introducción

En este capítulo se presentan las características hidrogeoquímicas de 20 muestras de agua cruda en igual número de aprovechamientos hidráulicos en el Valle del Hundido, investigando las relaciones entre las distintas variables hidrogeoquímicas, su distribución espacial y la evolución hidrogeoquímica temporal, mediante diagramas triangulares de Piper, Schoeller-Berkalov y Wilcox.

7.2. Metodología.

Para la toma de muestras de agua de los pozos seleccionados en forma estratégica en el Valle del Hundido, se utilizaron botellas de doble tapón de un litro de capacidad, dichas muestras fueron conservadas en una hielera a fin de mantener los parámetros más inestables como son el pH, temperatura, salinidad, etc.

En el estudio hidrogeoquímico del agua subterránea se definió una red de muestreo periódica de puntos de agua (pozos, norias y papalotes). Se tomaron muestras en 20 pozos seleccionados de una forma aleatoria que estuvieran repartidos lo más homogéneamente posible en toda el área del proyecto en el Valle del Hundido. Para la selección se ha considerado la información previa existente de las distintas captaciones, características de los pozos, norias, papalotes, galerías filtrantes, tipo de aprovechamiento, nombre del propietario, uso, coordenadas, profundidad, tipo de ademe, diámetro del pozo, diámetro del ademe, etc.

La mayoría de las muestras fueron obtenidas directamente de las captaciones en funcionamiento, previo lavado de los recipientes con el agua del mismo aprovechamiento hidráulico.

En los sondeos del área que no estaban siendo explotados se realizaron registros con apoyo del Hydrolab- Sond 4a y 4b con apoyo de un cable coaxial de 200 metros de profundidad, con el apoyo de este equipo fue posible tomar insitu los siguientes parámetros: Nivel estático, Temperatura, Conductividad específica, Ph, Oxígeno disuelto, Sólidos totales disueltos, profundidad y salinidad. Se tomaron perfiles de temperatura y salinidad a diferentes profundidades en algunos sondeos.

Las muestras obtenidas se almacenaban en botellas de polietileno de doble tapón con capacidad de 1000 ml, sin burbujas de aire y al resguardo de la luz. Desde que las muestras fueron tomadas en campo hasta su llegada al laboratorio, fueron preservadas en refrigeración en hieleras especiales a fin de evitar modificaciones en sus características químicas.

7.3. Determinaciones químicas de laboratorio

Los análisis químicos en laboratorio incluyen los iones mayoritarios. La totalidad de estas determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Geoquímica de Aguas de la Comisión Federal de Electricidad, con sede en la ciudad de Piedras Negras, Coahuila, a excepción de los análisis de Tritio que fueron realizados en el **GEOCHRON LABORATORIES a division of KRUEGER ENTERPRISES, INC., Cambridge, Massachussets, USA**. Las técnicas analíticas utilizadas en los análisis del laboratorio de la CFE y Geochron Laboratorios en este trabajo se describen a continuación:

Para la determinación de iones mayoritarios (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, NO₂, CO₃, HCO₃) se utilizó la técnica de espectrofotometría de absorción, autoanizador de flujo continuo

7.4. Caracterización química del agua subterránea.

En la caracterización química del agua subterránea en el Valle del Hundido, se han estudiado junto con los datos obtenidos en esta investigación, los análisis de dos proyectos previos realizados en los años de 2001 y 2005. **Figura 7.4.**

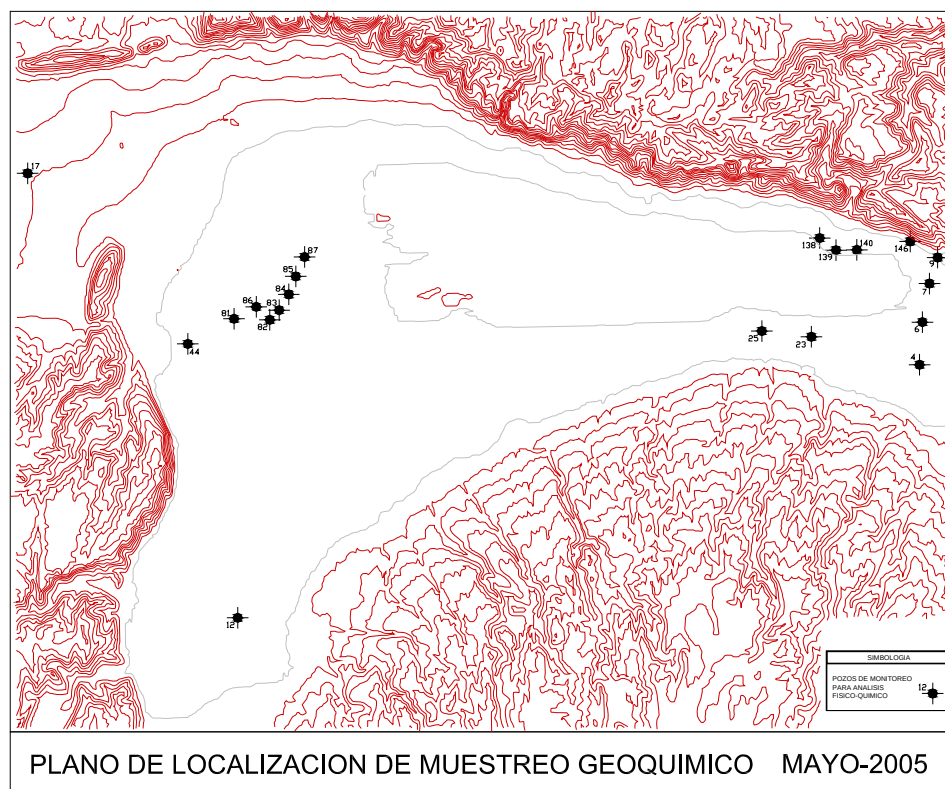


Figura 7.4.76 Plano de localización de Muestreo Geoquímico

Serie 2003 Lesser y Asociados: Los datos de este período forman parte del inventario de captaciones de aguas subterráneas realizadas en los valles de Cuatro Ciénegas, El Hundido y de Calaveras proyecto (Lesser y Asociados 2003) los análisis fueron desarrollados en el laboratorio del IMTA. La mayoría de las muestras fueron obtenidas en pozos, algunas de ellas corresponden a manantiales, los análisis realizados en este proyecto corresponden a iones mayoritarios con determinación en campo de pH, conductividad eléctrica, alcalinidad y temperatura, aunque en algunos resultados existe cierta discrepancia con los obtenidos por el autor.

Serie IMTA (2005). Los datos obtenidos en este año forman parte del proyecto realizado por el IMTA a fin de determinar si existe conexión entre los valles del Hundido y el de Cuatro Ciénegas, Coahuila a raíz del cuestionamiento por parte de la comunidad científica que ha trabajado por espacio de más de 50 años en el Valle de Cuatro Ciénegas siendo el iniciador de estas investigaciones el Dr. Minklay, posteriormente la Dra. de Souza del Instituto de Ecología de la UNAM. Encontró que el ADN de las bacterias es similar en los pozos de ambos acuíferos, lo cual sugiere una conexión hidráulica entre ambos valles. Los análisis fueron desarrollados en el laboratorio del IMTA. La mayoría de las muestras fueron obtenidas en pozos, algunas de ellas corresponden a manantiales, los análisis realizados en este proyecto corresponden a iones mayoritarios con determinación en campo de pH, conductividad eléctrica, alcalinidad y temperatura, isótopos estables (Duterio y Tritio, Carbono 13, 14) aunque en algunos resultados existe cierta discrepancia con los obtenidos por el autor.

Serie CO-1-0083. (2007) Investigaciones posterior realizadas por del Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez, mediante la aplicación de técnicas isotópicas, hidrogeoquímicas, geofísicas (gravimetría, magnetometría, geoelectrica, termometría e hidráulica de pozos y video en el sondeo CNA 4). Los análisis fueron desarrollados en el laboratorio del IMTA. La mayoría de las muestras fueron obtenidas en pozos, algunas de ellas corresponden a manantiales, los análisis realizados en este proyecto corresponden a iones mayoritarios con determinación en campo de pH, conductividad eléctrica, alcalinidad y temperatura, isótopos estables (Deuterio y Tritio). Se demostró que el régimen intenso de explotación a que es sometido el acuífero del Valle del Hundido afectó el nivel de las pozas en el Valle de Cuatro Ciénegas, esto se presentó en la Poza Churince, San Marcos- Atalaya entre otras.

Las reacciones naturales que ocurren en el agua subterránea al transitar ésta, a través de diferentes litologías en el Valle del Hundido, presentan diferentes concentraciones las cuales se muestran en la calidad química de este fluido, mostrándose una gran diversidad de concentraciones que dan lugar a efectos en su características fisicoquímicas, por ejemplo en la dureza total, salinidad, conductividad específica, estos cambios dan lugar a un intercambio catiónico en las aguas modificando sus propiedades, aunado a la acción antropogénica de las actividades agropecuarias que se desarrollan en el valle investigado, producto de la aplicación de fertilizantes y

pesticidas las que repercuten en su calidad e impactan sobre los diferentes ecosistemas del área protegida correspondiente al Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila declarada patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en noviembre del 1997.

En la tabla No 7.1 se muestran los resultados fisicoquímicos de las 20 muestras de agua cruda analizadas en el laboratorio de geoquímica de aguas de la Comisión Federal de Electricidad, en la Residencia de Estudios Geológicos Zona Norte, Piedras negras, Coahuila. En la figura 7.4.75 se presenta la ubicación de cada una de las muestras de agua subterránea monitoreadas para su posterior análisis físico- químico con su respectiva toponimia de cada pozo.

Tabla 7.17 Análisis Físico Químico de muestras de agua en el Valle del Hundido

Área	Muestra	Conductividad en micro-mhos / cm	pH	Cationes				Aniones				
				Ca (++)	Mg (++)	Na (+)	K (+)	HCO3 (-)	CO3 (=)	SO4 (=)	Cl (-)	NO3 (-)
VALLE DEL HUNDIDO	POZO IMTA 12	5772.00	7.31	583.20	264.48	446.20	16.38	102.48	0.00	2701.44	445.17	0.00
	POZO IMTA 17	2394.00	7.91	82.40	42.00	331.20	8.58	622.20	9.60	129.60	300.33	2.48
	POZO IMTA 81	4210.00	7.65	562.80	173.28	366.16	11.70	97.60	0.00	2415.36	198.09	27.28
	POZO IMTA 82	4922.00	7.49	542.40	202.80	461.38	14.04	112.24	0.00	2614.08	265.54	48.36
	POZO IMTA 83	4782.00	7.44	554.00	200.16	446.20	16.38	102.48	0.00	2701.44	445.17	0.00
	POZO IMTA 84	4733.00	7.36	552.00	190.32	433.78	11.70	102.48	0.00	2647.68	220.10	40.92
	POZO IMTA 85	4858.00	7.5	579.20	202.80	458.62	12.48	97.60	0.00	2688.00	230.04	68.20
	POZO IMTA 86	4800.00	7.57	565.20	197.76	393.76	11.70	87.84	0.00	2493.12	239.98	73.16
	POZO IMTA 87	4919.00	7.42	562.00	192.72	453.56	12.48	97.60	0.00	2563.20	255.60	71.92
	POZO CNA 4	4364.00	7.35	388.00	170.40	270.94	10.14	146.40	0.00	1614.72	295.36	14.88
	POZO CNA 6	2558.00	8.71	117.60	66.72	373.52	9.36	58.56	0.00	860.16	290.39	0.00
	POZO CNA 7	5394.00	7.11	535.20	150.72	553.84	7.80	200.08	0.00	2259.84	465.76	16.12
	POZO CNA 9	1671.00	7.11	235.20	69.12	90.16	3.90	234.24	0.00	771.84	771.84	2.48
	POZO CNA 23	2595.00	7.4	342.00	116.40	190.90	5.46	175.68	0.00	1250.88	164.01	74.40
	POZO CNA 25	3100.00	7.84	332.00	121.44	248.40	6.24	170.80	0.00	1366.08	195.96	0.00
	POZO CNA 44	4557.00	7.33	520.00	175.44	388.70	12.48	107.36	0.00	248.00	195.25	22.32
	POZO CNA 138	97520.00	7.43	3330.00	1208.88	19080.34	168.48	585.60	0.00	32349.12	15316.83	9.92
	POZO CNA 139	68040.00	7.6	2250.00	1045.68	11406.62	171.60	434.32	0.00	21903.36	8509.35	3.72
	POZO CNA 140	26560.00	7.2	2250.00	346.08	3208.96	90.48	297.68	0.00	7643.52	4204.62	7.44
	POZO CNA 146	1710.00	6.91	190.00	71.76	55.20	8.58	48.80	0.00	777.60	53.96	2.48

7.4.1. Clasificación de tipo, familia de agua mediante los diagramas.

La investigación planteada en este proyecto a está dirigida a evaluar en forma cuantitativa y cualitativa el comportamiento hidrogeoquímico del acuífero en el Valle del Hundido y su conexión con el Valle de Cuatro Ciénegas. Mediante los análisis físico químicos por elementos mayores se logró determinar que la calidad del agua presente en el Valle del Hundido de acuerdo a lo que establece la NOM -127-SSA-1-1994 no es apta para consumo humano, debido a las altas concentraciones de sulfatos y de cloruros en algunos sitios muestreados como son: **CNA-6, IMTA- 17 y IMTA-138.**

Con el propósito de interpretar los parámetros hidrogeoquímicos del acuífero en el Valle del Hundido, se tomaron en consideración los criterios de aguas de A.M Piper., Schoeller- Berkaloff y L. V. Wilcox (1955).

7.4.2. Diagramas de Piper.

Los diagramas de Piper consisten de un sistema de dos triángulos en uno de ellos se representan los cationes y en el otro los aniones, las unidades empleadas en este diagrama son en (% de mili -equivalentes), dicho diagrama se complementa con un rombo ubicado en la porción superior de los triángulos. Los tres ejes del triángulo de los cationes se utilizan para las concentraciones de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+ , representando las concentraciones en (% de mili equivalentes/ litro). El triángulo de los aniones se representa en forma similar con ejes para el Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- CO_2^{--} . De esta manera se obtiene el análisis de cada muestra de agua subterránea la cual se representa como un punto en cada uno de los triángulos. En el diagrama de Piper **figura 7.4.76.**, se presenta el tipo y familia de agua correspondiente a cada muestra.

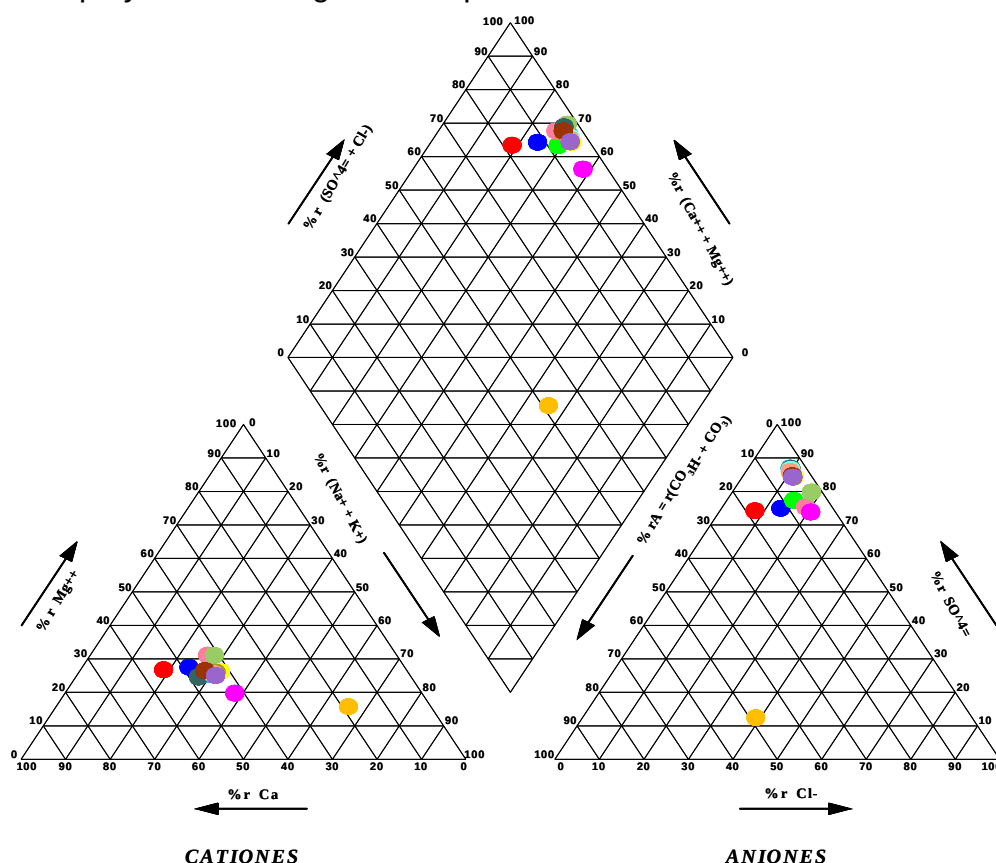


Figura 7.4.77Diagrama de Piper de muestras de agua en el Valle del Hundido.

En base a dichos diagramas se logró determinar que el 70% corresponden a Sulfatadas-Mixtas, 15% Sódico-Sulfatadas, 10% de las muestras corresponden a la clasificación de Cálculo- Sulfatadas y el 5% Sódico Mixtas. **figura 7.4.77**

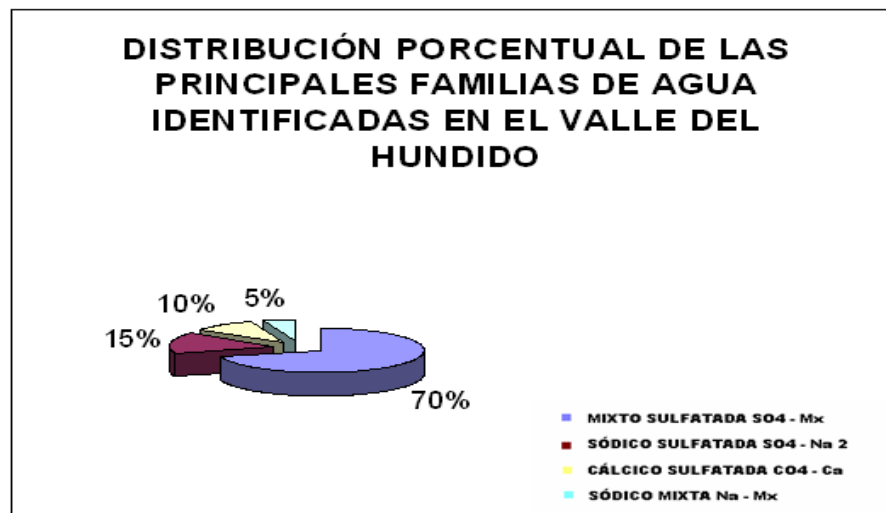


Figura 7.4.78 Distribución porcentual de las principales familias de agua identificadas en el Valle del Hundido.

Varios aspectos resaltan en dicho diagrama, en términos generales se observa un dominio del catión calcio (Ca^{++}), esto responde a que existe un dominio de rocas carbonatadas en la zona de estudio, sin embargo existen ciertas excepciones como las muestras correspondientes a los pozos CNA 138, CNA 139 y CNA 140 donde el ión dominante es el sodio (Na^+) el dominio de este elemento, probablemente se encuentre vinculado con depósitos de minerales de halita (Na Cl) y Silvinita (KCl). El mecanismo de que dieron origen a estos depósitos, frecuentemente está asociado con la evaporación, procesos que permiten la sedimentación de precipitados químicos. Dentro de estos minerales precipitados normalmente de esta manera se presenta la halita (cloruro de sodio, Na Cl), que es el componente principal de la sal gema y el yeso (sulfato cálcico hidratado, $\text{Ca SO}_4 \cdot \text{H}_2 \text{O}$). En el pasado geológico la zona de estudios eran cuencas, sumergidas bajo brazos someros de un mar que tenía conexión con el océano abierto; bajo estas condiciones, el agua de mar entraba continuamente en la bahía para sustituir el agua perdida por evaporación. Finalmente el agua de la bahía se saturaba y se iniciaba la deposición de sal; estos depósitos se les conoce con el nombre de evaporitas en el diagrama anexo se muestra este proceso. **Figura 7.4.78**

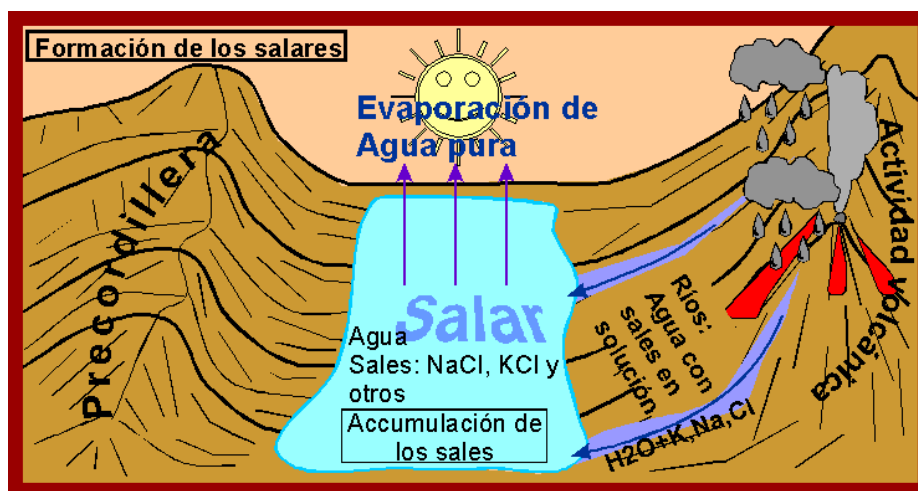


Figura 7.4.79 Esquema sobre la formación de salares.

Cuando se evapora un volumen de agua salada, los minerales que precipitan lo hacen en secuencia que viene determinada por su solubilidad, primeramente se precipitan los minerales menos solubles y al final, conforme aumenta la salinidad, se precipitan los más solubles. Ejemplo de ello es el yeso el cual se precipita cuando se ha evaporado alrededor de las dos terceras partes de agua del mar, mientras que la halita se precipita cuando se han evaporado nueve de cada diez partes de agua. Durante las etapas tardías de este proceso, precipitan las sales de potasio y de magnesio. Una de estas sales de formación tardía es el mineral de Silvinita (KCl).

Considerando la clasificación del diagrama de Piper a partir de iones dominantes las muestras de agua subterránea se logró identificar cuatro familias de agua: Bicarbonatada Calcio- Sulfatada (HCO_3^- , Ca^{++} - SO_4^{--}), Calcico-sulfatada (Ca^{++} SO_4^{--}), Mixta y Sódico-sulfatada ($\text{SO}_4 - \text{Na}$).

Desde el punto de vista de abundancia en la zona investigada, en el Valle del Hundido la familia dominante es Mixta Sulfatada como se muestra en el diagrama triangular Figura 7.4.75

7.4.3. Diagramas de barras logarítmicas de Schoeller- Berkaloff.

En los diagramas de escala logarítmica vertical de (Schoeller-Berkaloff) al igual que en los diagramas triangulares de Piper, el agua se clasificó desde una cálcico-bicarbonatada en la parte Noreste de la Sierra del Venado y en la parte sur del valle del Hundido en la Sierra de Los Alamitos a medida que el agua avanza hacia el valle los valores de sulfatos se van incrementando, producto de la disolución de los depósitos evaporíticos que se encuentran en la Formación Acatita, unidad que está aflorando tanto en la Sierra de la Fragua en su flanco norte como en la Sierra de los Alamitos. La presencia de yesos también está asociada a depósitos de sabkas, estos depósitos

están estrechamente relacionados con eventos transgresivos y regresivos del ancestral Golfo de México. Figuras 7.4.79, 80, 81 y 82.

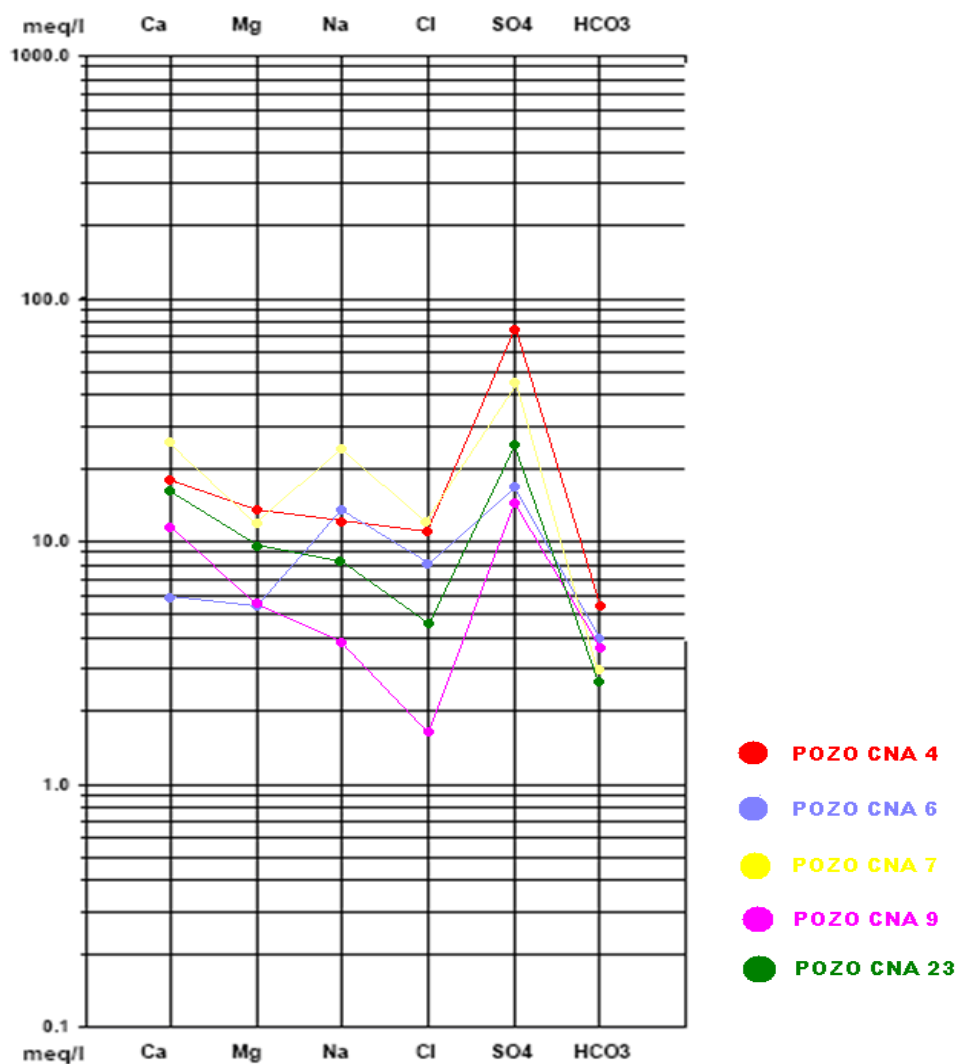


Figura 7.4.80 Diagramas de Schoeller-Berkalov

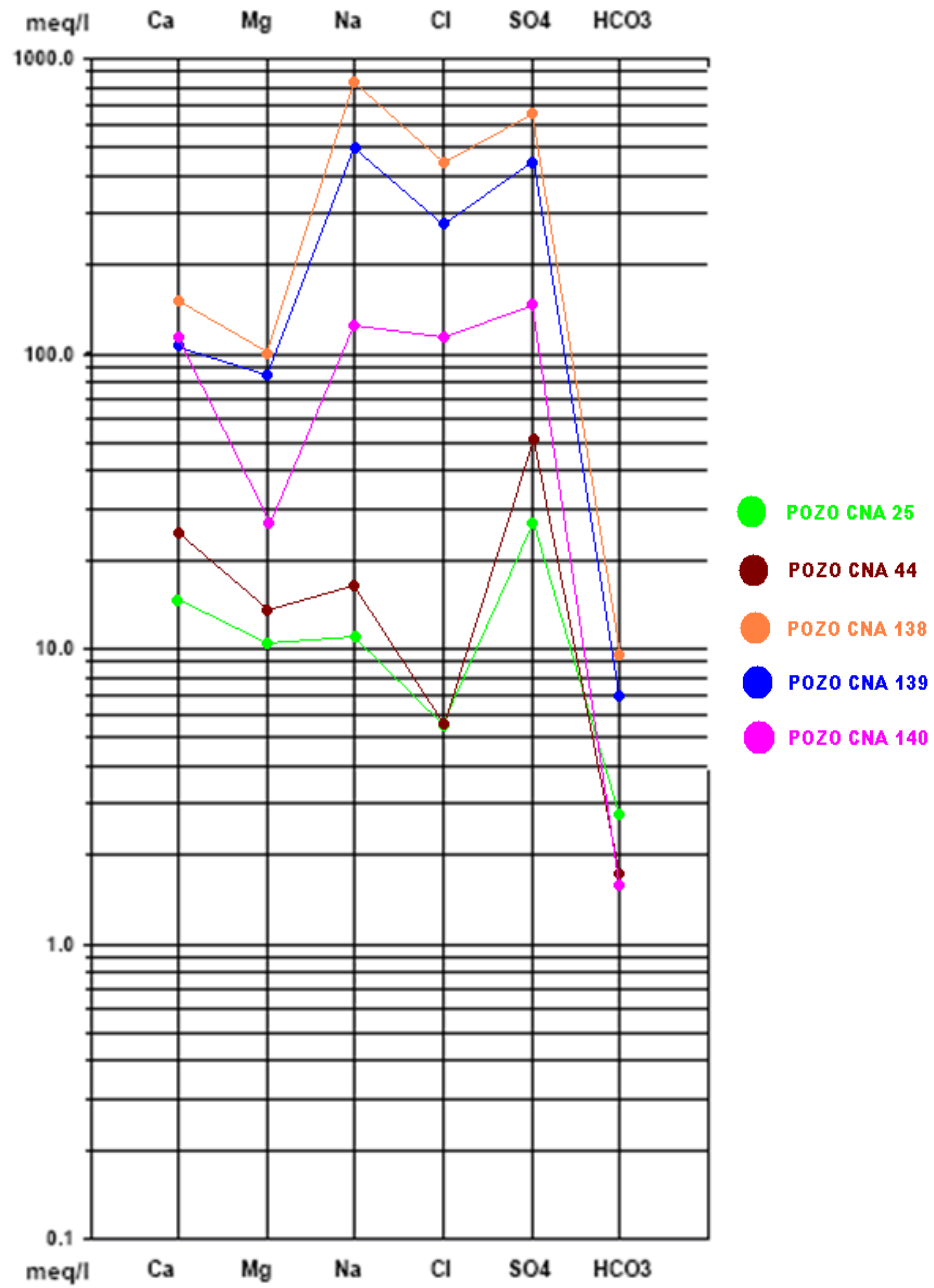


Figura 7.4.81 Diagramas de Schoeller-Berkalov

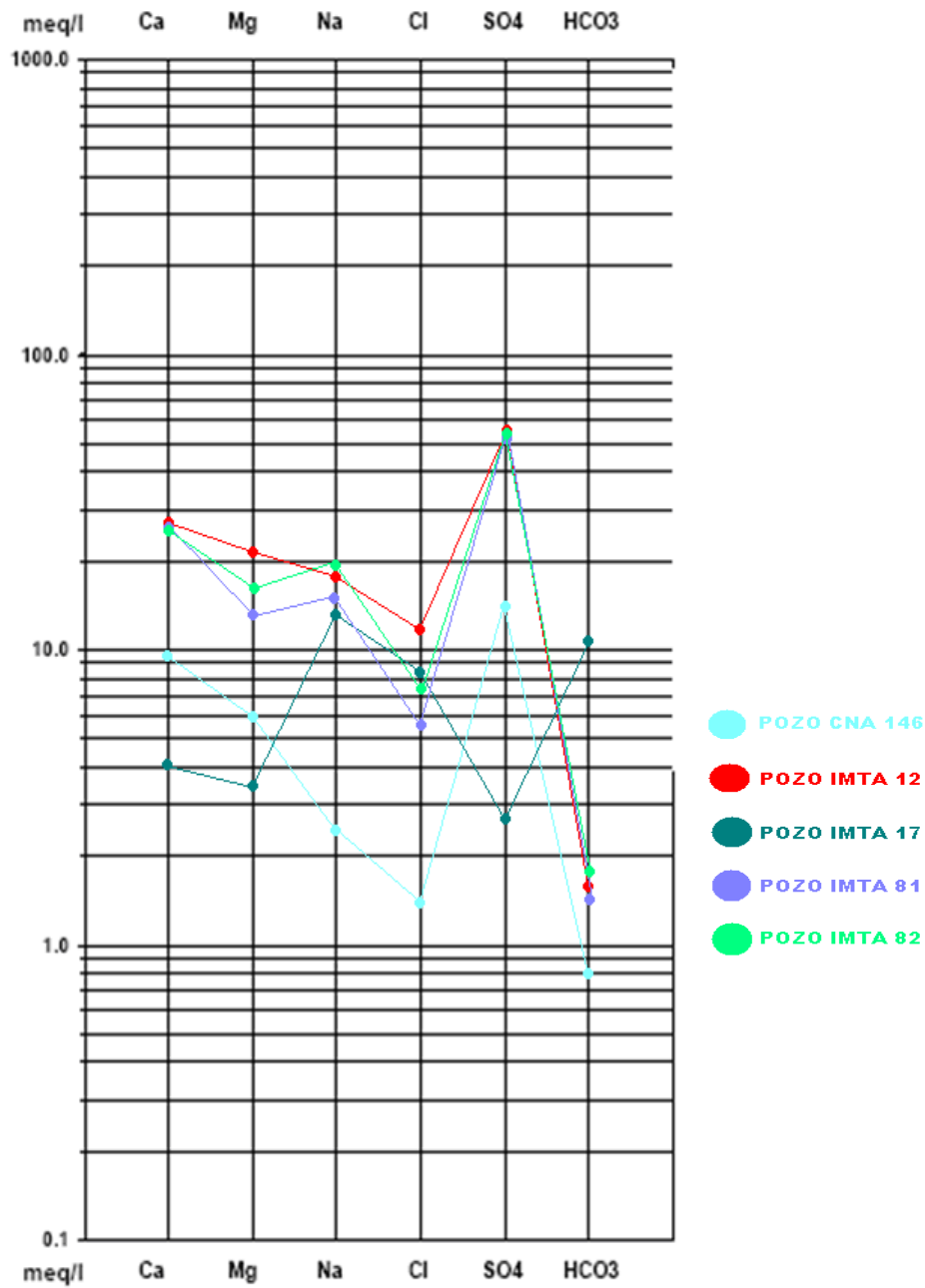


Figura 7.4.82 Diagramas de Schoeller-Berkalov

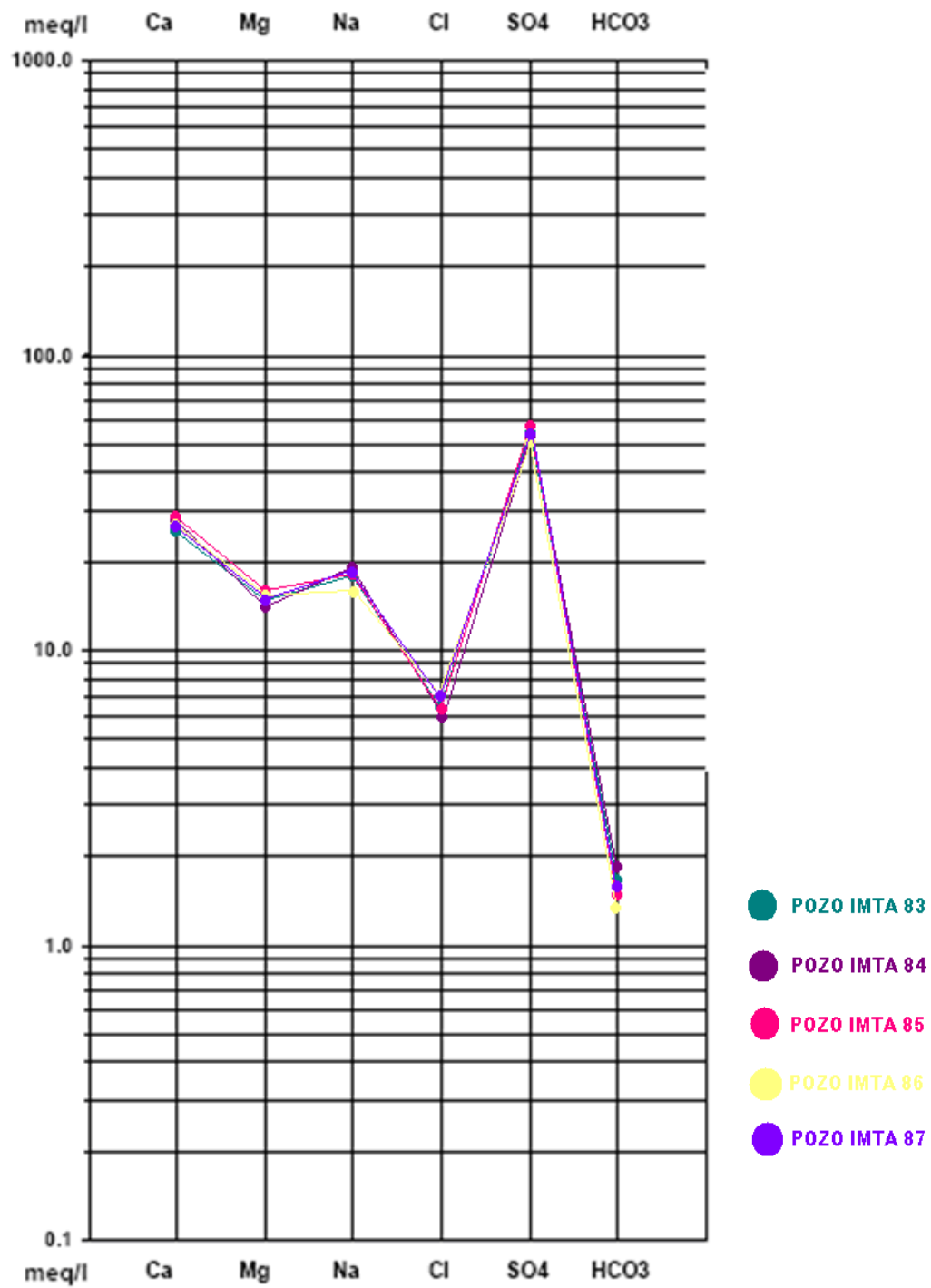


Figura 7.4.83 Diagramas de Schoeller-Berkalov

7.7.4. Diagramas binarios y definición de grupos de agua subterránea en el Valle del Hundido.

Las diferencias identificadas en la composición global de las muestras analizadas, se reflejan cuando se toman en cuenta elementos menores como el potasio (K) con respecto a un anión conservativo como es el cloro. A partir de los análisis físico-químicos presentados previamente en los diagramas triangulares, se observa muy claramente que el agua se mueve a través de diferentes litologías modificando su contenido químico al circular por rocas carbonatadas, sulfatadas y limos arcillosos presentes en el área de estudio.

En los diagramas binarios se muestra que no todas las relaciones responden a una ecuación lineal, existen en algunos diagramas tal es el caso del calcio/sulfatos, sodio/cloro, Sólidos Totales Disueltos/Conductividad eléctrica.

(Figuras 7.4.83, 7.4.84, 7.4.85, 7.4.86, 7.4.87, 7.4.88)

Las reacciones pueden analizarse relacionando las tendencias en las concentraciones con respecto al cloro, el cual no presenta controles de solubilidad, como tampoco es afectado por reacciones de absorción y de oxidación-reducción.

Relaciones Ion Cl con cationes (Ca, Mg, Na)

Las concentraciones (mg/l) de los cationes Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y de los aniones HCO_3^- y SO_4^{2-} fueron graficadas de acuerdo a las concentraciones ascendentes del ión Cl^- para poder ver la relación que existe entre estos iones. Las gráficas ilustran que las concentraciones de los cationes y aniones estudiados presentan una relación directa con las concentraciones del ión Cl^- .

En la gráfica 7.4.9 que muestra las relaciones entre Cl^- y Na^+ se puede observar que la concentración de Na^+ se eleva de alrededor de 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 ión 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 tienen una relación directa, ésta 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.

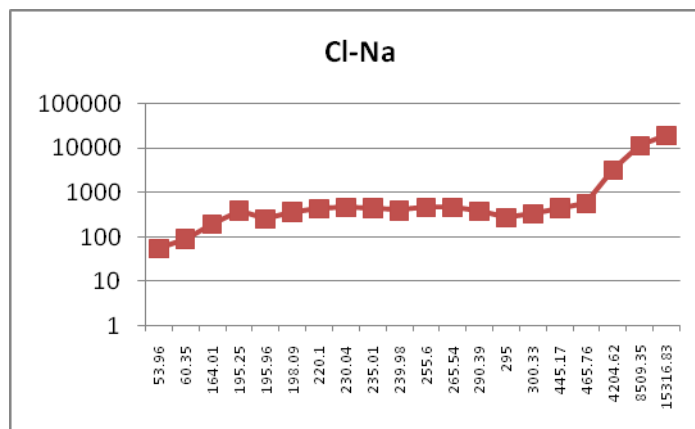


Figura.7.4.84. Comportamiento del ion Cl versus Na

Para el caso de la relación entre las concentraciones de los iones Cl^- y Mg^{2+} , se observa también un incremento en la concentración del Mg^{2+} a conforme la concentración del Cl^- va en aumento. La relación Mg/Cl indica que once valores caen dentro del rango 0.75-1.33 mientras que nueve valores cayeron en el rango de relación 0.08-0.62. Al 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.

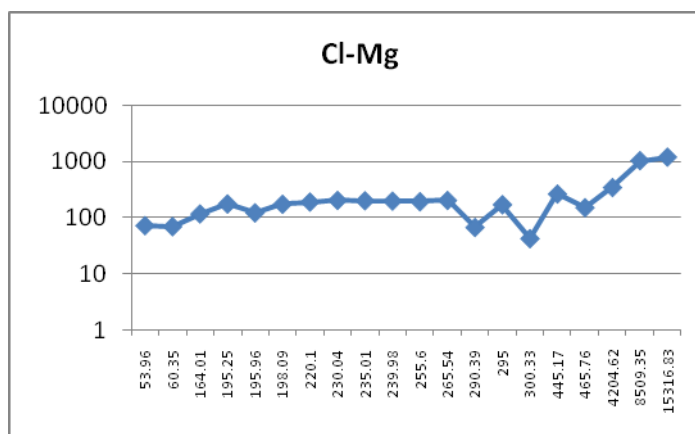


Figura 7.4.85. Comportamiento del ion Cl versus Mg

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 un valor que está fuera de la tendencia general, sin embargo dichos puntos no alteran las relaciones obtenidas entre las concentraciones de estos pares de iones.

La gráfica 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 rango 50-500 mg/l. La concentración de K^+ aumenta hasta alrededor de 100 mg/l cuando el ión Cl^- está en el rango de 4000-15000 mg/l.

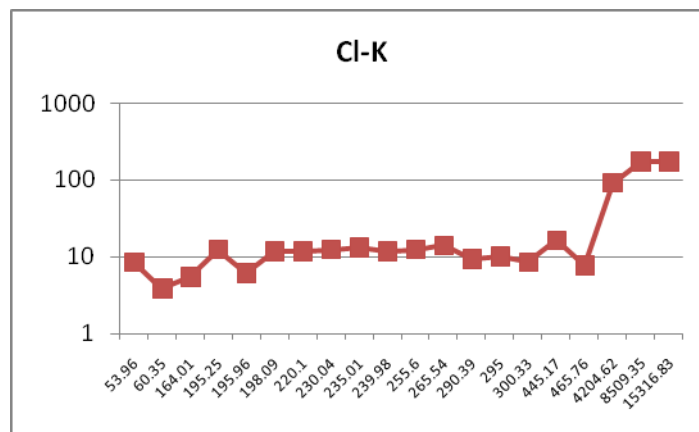


Figura 7.4.86. Comportamiento del ion Cl versus K.

Las concentraciones de Ca^{2+} se mantuvieron entre 100 y 1000 mg/l cuando el ión Cl^- estaba en el rango de 50-500 mg/l a pesar de que los puntos tomados de los pozos CNA6 e 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 rango 2000-3000 mg/l. Figura 7.4.12.

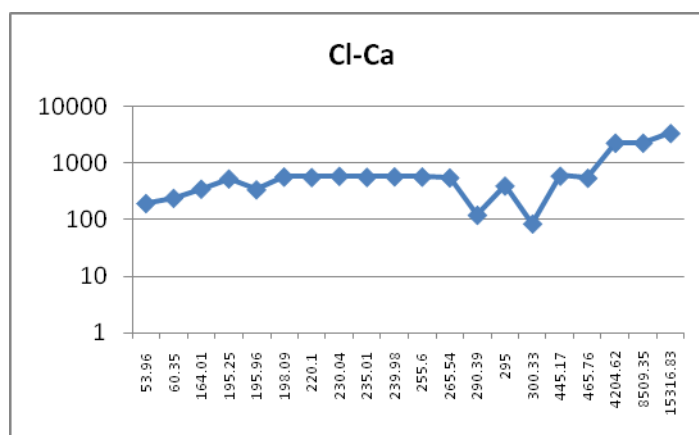


Figura 7.4.87. Comportamiento del ion Cl versus Ca.

Relaciones ión Cl^- con aniones

Las últimas dos gráficas muestran las relaciones entre las concentraciones del ión Cl^- y los aniones HCO_3^- y SO_4^{2-} . Para el caso del HCO_3^- , la concentración de éste anión se mantuvo alrededor de los 100 mg/l cuando el Cl^- estaba entre 50 y 500 mg/l salvo el caso del pozo IMTA17 cuyo valor es arriba de los 600 mg/l. Una vez más, una tendencia de incrementar la concentración del ión en estudio es observada cuando la concentración del ión Cl^- aumenta de 4000 a 15000 mg/l. Esta misma tendencia se puede observar en el caso del anión SO_4^{2-} , en donde la concentración del sulfato se dispara en el rango 4000-15000 mg/l del ión Cl^- .

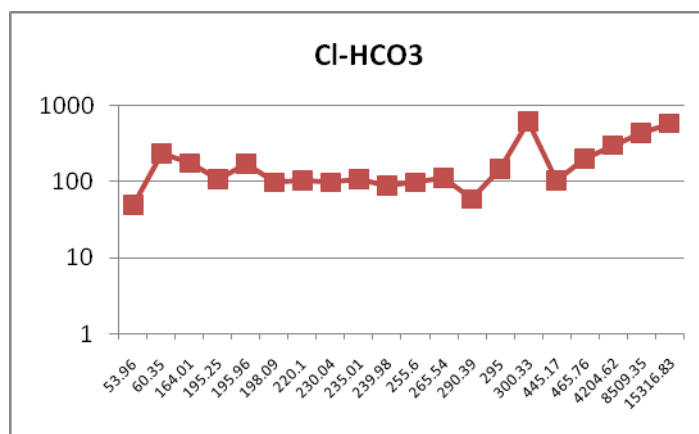


Figura 7.4.88. Comportamiento del ion Cl versus HCO_3^-

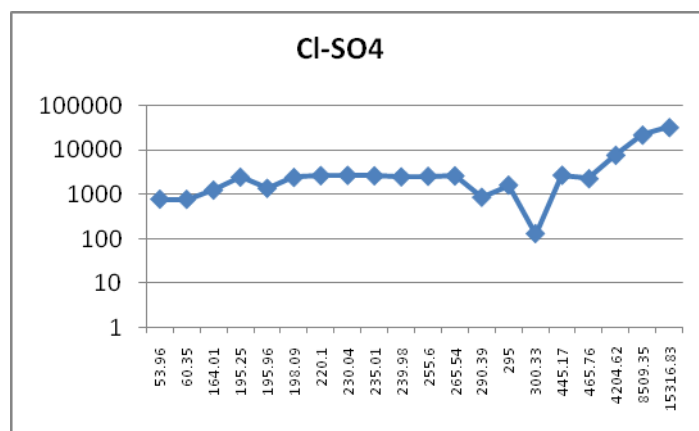


Figura 7.4.89. Comportamiento del ion Cl versus SO_4^{2-}

El ion potasio se comporta como un elemento intercambiable con los depósitos arcillosos que conforman la litología del valle de ahí que se detectaron tres muestras con altas concentraciones de cloro y sodio las que están estrechamente vinculadas con los ambientes de depósito que predominaron en la zona, (sabkas) dichos procesos de depositación se muestran en las figura 7.4.89

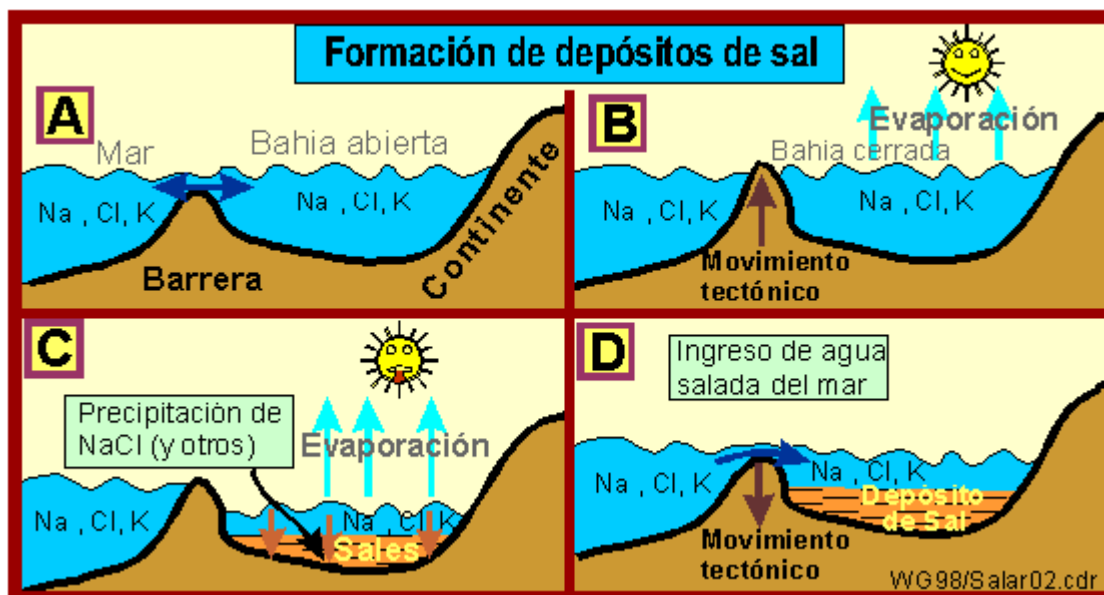


Figura 7.4.90. Modelo de formación de los depósitos salinos en el valle del Hundido.

Las aguas con mayor salinidad corresponden a los aprovechamientos hidráulicos **CNA-6, IMTA- 17 y IMTA-138.**

En Todas estas gráficas, las diferentes familias de agua, presentan una tendencia claramente lineal a partir de dichos diagramas se establecen grupos químicos homogéneos la familia $\text{SO}_4 - \text{Na}$ muestran mayores concentraciones de sales lo que nos confirma la presencia de cuencas cerradas durante la trasgresión marina inundando aquellas áreas, las que por procesos de evaporación dieron lugar a la formación de depósitos salinos (sabkas).

A medida que se incrementa la concentración de cloruros, la concentración de los otros iones tiende a permanecer constante, especialmente para aquellas muestras correspondientes a la familia $\text{SO}_4 - \text{Na}$, es similar al agua de mar la causa del incremento del cloruro de sodio en las muestras mencionadas en párrafos anteriores probablemente esté vinculada con aguas congénitas que se formaron durante la depositación de los sedimentos, así como a la falta de reposición de agua fresca como a la ausencia de circulación; fenómeno similar se presenta en las salinas de Jacos ubicada en los límites de los estados de Coahuila y Chihuahua, cercana al yacimiento de hierro en Hércules, Coahuila.

7.7.5. Sólidos totales disueltos.

En la configuración de S. T. D se observó que los valores se van incrementando hacia la parte central del valle del Hundido del Noroeste hacia el Sur este del valle, en esta configuración se logró definir la dirección preferencial del flujo subterráneo, el cual coincide también con las configuraciones de isopropundidad nivel estático del acuífero como con la isoelevación nivel estático, su tendencia es hacia la salida al Cañón de la Fragua, este mismo comportamiento se muestra en el modelo geohidrológico conceptual del acuífero en el Valle del Hundido. Plano de S. T. D. Los valores de sólidos totales disueltos 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.

En los diagramas triangulares de Piper y logarítmicos de Schoeller- Berkaloff, se deduce que el agua fluye a través de rocas de diferentes litologías, observándose una alta concentración de sulfatos en los aprovechamientos ubicados en el centro del valle producto de la presencia de depósitos evaporíticos (yesos y anhidritas). **Figura 7.4.90.**

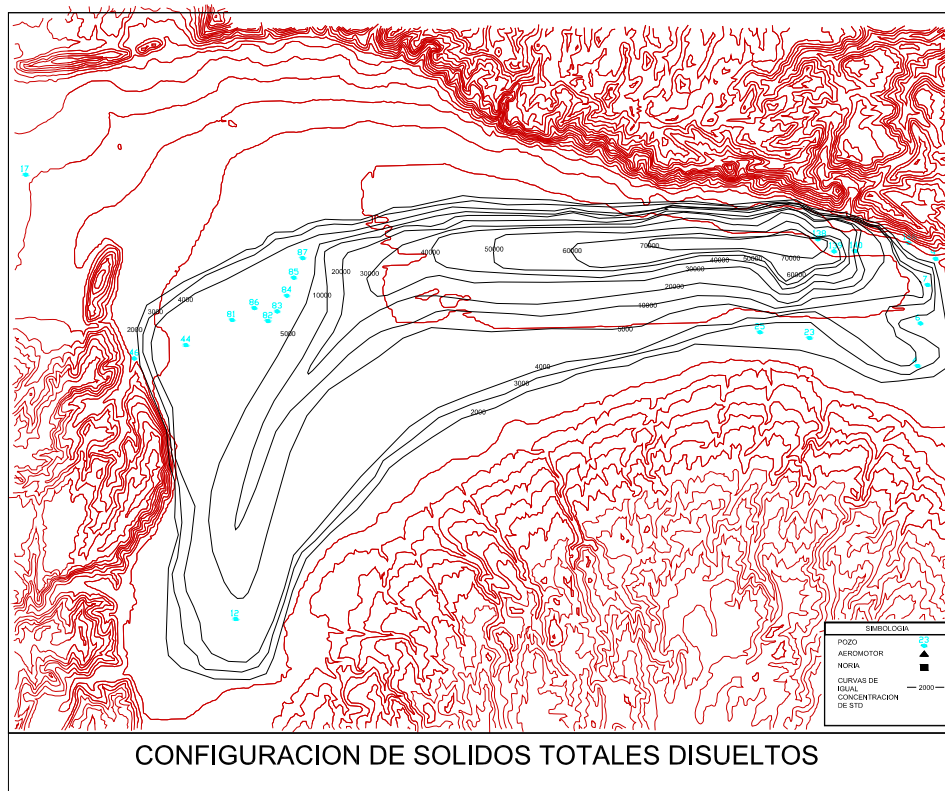


Figura 7.4.91 Configuración de sólidos totales disueltos

7.8. Clasificación del agua para uso agrícola mediante el diagramas de Wilcox (RAS) Relación absorción de sodio.

El área de estudio correspondiente al valle del Hundido los diferentes aprovechamientos hidráulicos son utilizados en irrigación de cultivos que toleran el grado de salinidad que presentan las agua de la región, siendo la alfalfa y el sorgo los cultivos que soportan este tipo de agua.

El laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de Norte América (US Salinity Laboratory) ha establecido una guía para clasificar el agua de acuerdo a su salinidad, la cual es definida a partir de la conductividad específica, la que considera cuatro clases de agua. De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la ecuación del RAS, el 86.6% de las muestras de agua se clasificaron como tipo C4-S2 (conductividad eléctrica mayor de 2890 ($\mu\text{mhos/cm.}$), el 6.6% como tipo C4-S1 con conductividades de 2450($\mu\text{mhos/cm.}$) y el 6.6% restante como C3-S1 con una conductividades eléctricas de 2100($\mu\text{mhos/cm.}$). Figura 7.5.91

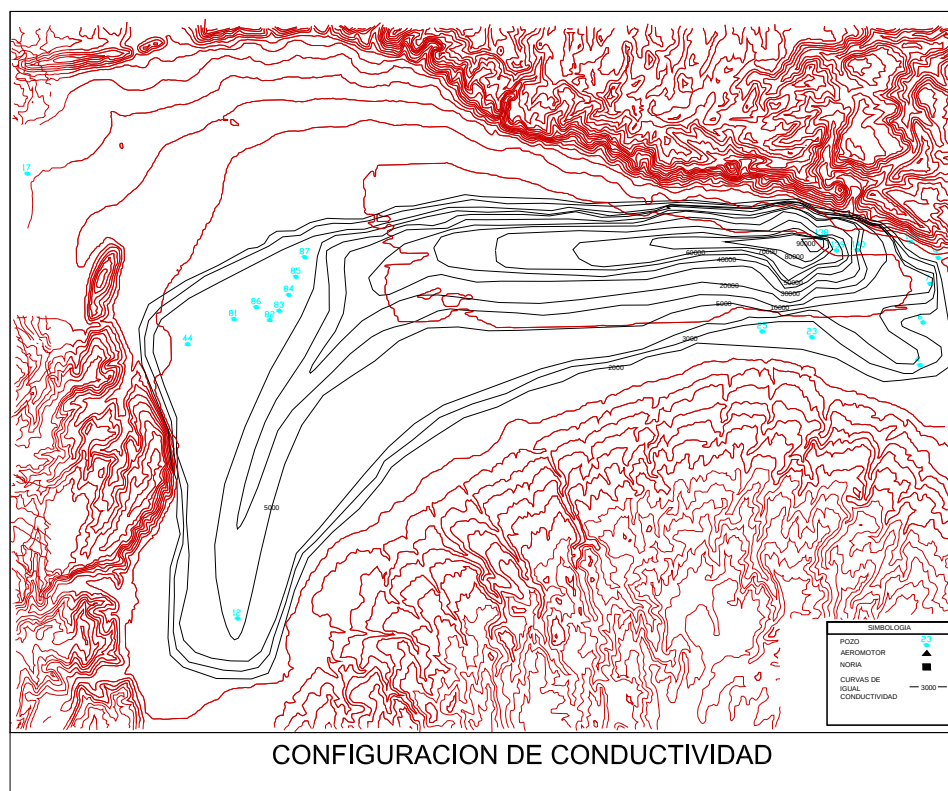


Figura 7.5.92. Configuración de Isoconductividades.

Además de la salinidad del agua subterránea otro factor importante que tiene que tomarse en cuenta para la irrigación, incluye el intercambio iónico del sodio y del calcio. El proceso de intercambio catiónico se presenta durante la irrigación e influye de manera directa en el suelo, especialmente cuando las concentraciones de los solutos son muy altos.

La presencia de suelos limo arcillosos en el Valle del Hundido facilitan el intercambio del sodio con las partículas arcillosas que conforman el suelo. Las partículas en el suelo que tienen la mayor capacidad de intercambio por unidad de peso son los limos arcillosos que predominan en el área de estudio.

La tendencia de un agua a remplazar el calcio y el magnesio absorbidos en las partículas arcillosas del suelo por el sodio disuelto, puede expresarse mediante la aplicación de la relación absorción de sodio (RAS) el cual se define de la manera siguiente:

$$RAS = \frac{Na}{\frac{Ca + Mg}{2}}$$

De acuerdo con la gran concentración de los valores de Ca y Mg que se presentan en el agua subterránea del Valle del Hundido, la totalidad de los valores de RAS que se calcularon para las muestras colectadas en el área de estudio van desde 2.00 en el Pozo **CNA 9** hasta 9.00 en el **Pozo IMTA 17**, la conductividad correspondiente al pozo **CNA 9** es de **2185(μmhos/cm.)** mientras que para el aprovechamiento hidráulico **IMTA 17** su conductivita eléctrica es de **2890(μmhos/cm.)**, el promedio resultante de las muestras analizadas en la zona son del orden de 6.5.

Haciendo uso del diagrama de clasificación de aguas para uso agrícola de L. V. Wilcox (1955) donde se vaciaron los datos de conductividad específica y relación absorción de sodio, se obtuvo que el 86.6% de las muestras indican un tipo de agua de salinidad muy alta y una alta concentración de sodio, 6.6% presenta una lata salinidad y bajo peligro de sodio, las restantes muestras presentan una concentración media de salinidad y bajo peligro de sodio; las muestras restantes presentan concentraciones media de salinidad y bajo peligro de sodio. Ver tabla 7.18 y figura 7.5.92. Intercalar tabla y pozos faltantes de acuerdo a su toponimia.

Tabla 7.18 Calidad del agua para uso agrícola.

Tabla No. CALIDAD DEL AGUA PARA USO AGRÍCOLA								
No. POZO	CONDUCTIVIDAD ESPECÍFICA (Micro-mhos/cm)	R. A. S. (Meq/l)	CLASIFICACIÓN	CONDICIONES DE SALINIDAD		COORDENADAS		
				PELIGRO DE SALINIDAD	PELIGRO DE SODIO	X	Y	Z
CNA 4	4364.00	2.87	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13777700	2943993	
CNA 6	2558.00	6.8	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13777837	2946003	
CNA 7	5394.00	5.43	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13778169	2947820	808
CNA 9	1671.00	1.32	C3-S1	ALTO	BAJO	13778554	2949048	825
CNA 23	2595.00	2.27	C4-S1	MUY ALTA	BAJO	13772603	2945313	804
CNA 25	3100.00	2.95	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	770264	2945584	803
CNA 44	4557.00	3.75	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13743196	2944977	843
CNA 138	97520.00	71.8	C4-S4	MUY ALTA	MUY ALTO	772993	2449965	799
CNA 139	68040.00	49.63	C4-S4	MUY ALTA	MUY ALTO	773769	2449394	798
CNA 140	26560.00	16.6	C4-S4	MUY ALTA	MUY ALTO	774743	2949409	798
CNA 146	1710.00	0.86	C3-S1	ALTO	BAJO			
IMTA 12	5772.00	3.83	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13745548	2932070	836
IMTA 17	2394.00	7.37	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13735644	2953015	954
IMTA 81	4210.00	3.45	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13745376	2946163	826
IMTA 82	4922.00	4.27	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13747063	2946112	828
IMTA 83	4782.00	4.12	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13747503	2946565	821
IMTA 84	4733.00	4.05	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13747958	2947311	821
IMTA 85	4858.00	4.16	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13748287	2948158	821
IMTA 86	4800.00	3.62	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13746423	2946726	828
IMTA 87	4919.00	4.2	C4-S2	MUY ALTA	MEDIO	13748703	2949076	818

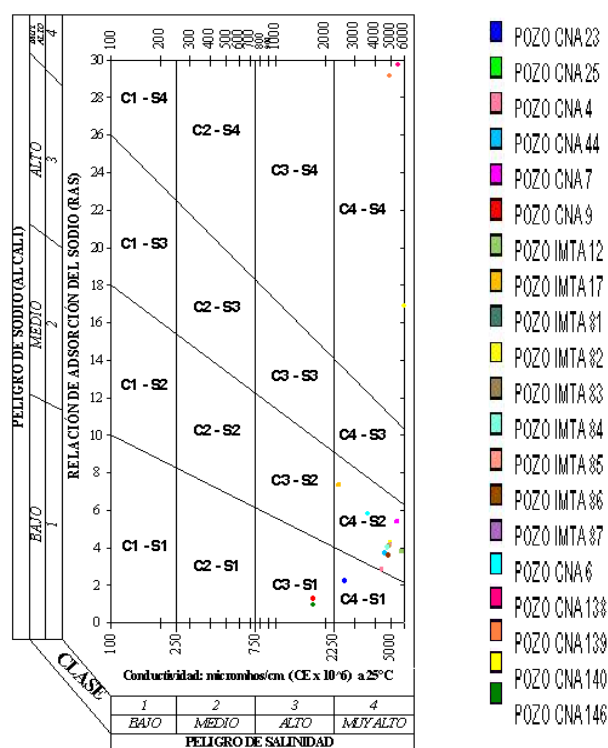


Figura 7.5.93 Diagrama de Wilcox para determinar la calidad del agua para uso agrícola en el Valle del Hundido.

La relación entre los factores: Salinidad y Relación Absorción de Sodio (RAS) descritos previamente nos permite establecer clasificaciones de calidad de agua con fines agrícolas, en el diagrama de Wilcox se muestra claramente la Relación Absorción de Sodio de cada muestra analizada la mayor parte de las 20 muestras analizadas el 86.6% corresponden al tipo C4-S2, 6.6% corresponden al tipo C4-S1 y el 6.6% fue clasificado como C3-S1.

A partir de los resultados obtenidos y que se plasman en los diferentes diagramas la mayoría de las muestras de agua se ubican en el tipo C4-S2 (86.6%) por lo tanto se recomienda el cultivo de plantas que toleren el alto grado de salinidad que poseen las aguas que se explotan en el Valle del Hundido (alfalfa y sorgo).

7.9. ISÓTOPOS AMBIENTALES

7.6.1. Introducción

El presente párrafo trata sobre el estudio de las aguas meteóricas y subterráneas del área de estudio, mediante la aplicación de técnicas isotópicas.

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 ante 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.

7.6.2. 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 7.6.19. y en el plano **Figura 7.6.93.**

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

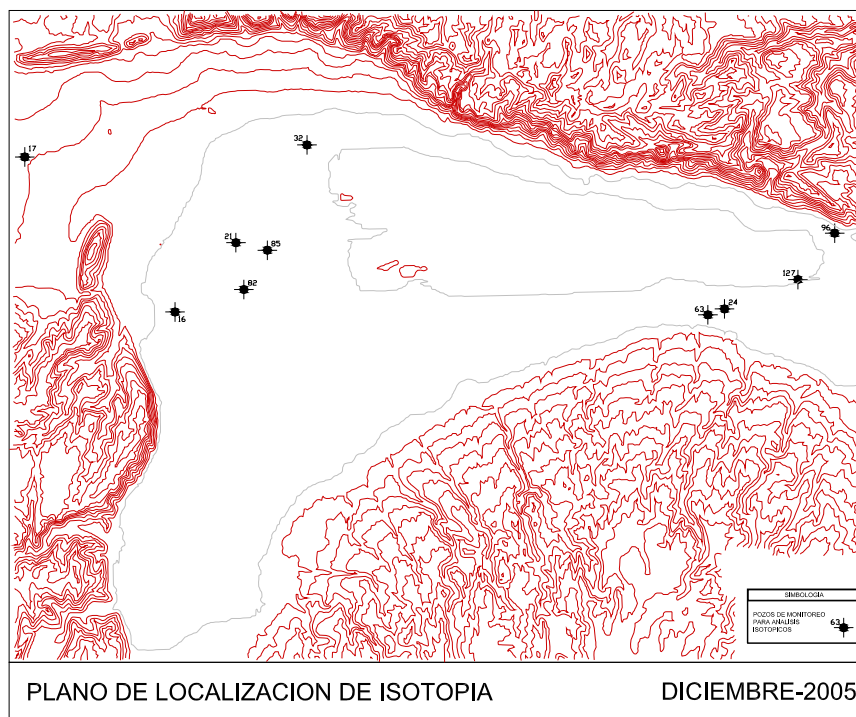


Figura 7.6.94 Plano de localización de Isotropía

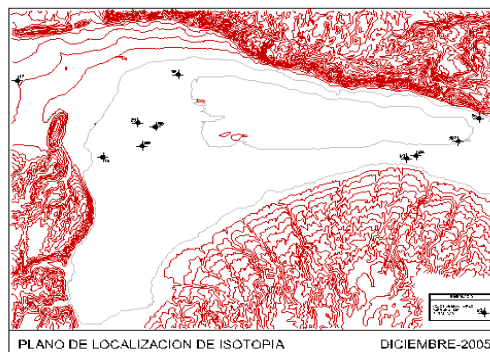


Tabla 7.19 Localización de muestras para análisis isotópicos

CLAVE	POZO	UNIDADES DE TRITIO	COORDENADAS		
			X	Y	Z
T-8046	CNA 127	11.7±2.0	776321	294678	799
T-8047	IMTA 17	5.2±1.9	13735644	295301	954
T-8048	CNA 32	5.8±1.9	750350	295364	811
T-8049	CNA 16	4.6±1.9	13074347	294494	828
T-8050	IMTA 82	7.6±1.9;6.4±2.0	13747063	294611	828
T-8051	CNA 85	3.6±1.9	748284	294814	816
T-8052	IMTA 63	4.9±1.9	13077124	294479	810
T-8053	IMTA 96	3.9±1.9	7778552	294904	824
T-8054	IMTA 21	3.9±1.9			
T-8055	CNA 24	4.3±1.9	772111	294510	798

7.6.3. 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:

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

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: $\delta D = \delta^{18}\text{O} + 10$ (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 7.6.94. se presentan los datos $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ en las muestras de aguas subterránea 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.

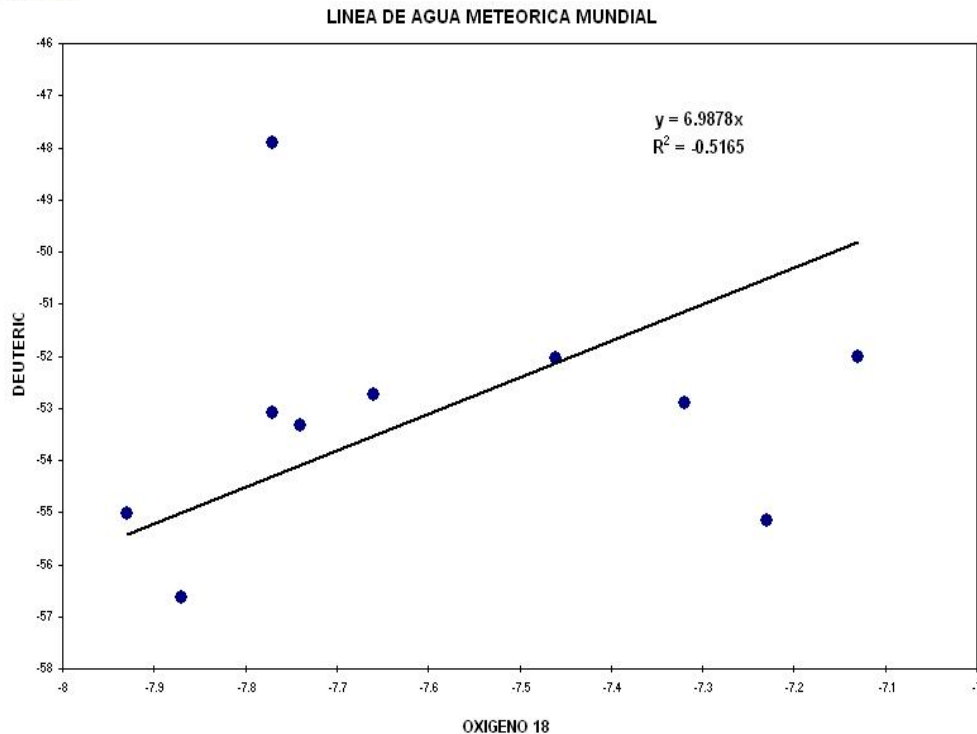


Figura 7.6.95 Línea de agua meteórica mundial

7.9.4. 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 7.19 se muestran los resultados de los análisis realizados por el **GEOCHRON LABORATORIES a division of KRUEGER ENTERPRISES, INC., Cambridge, Massachussets, USA.**

En el gráfico 7.6.95 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.

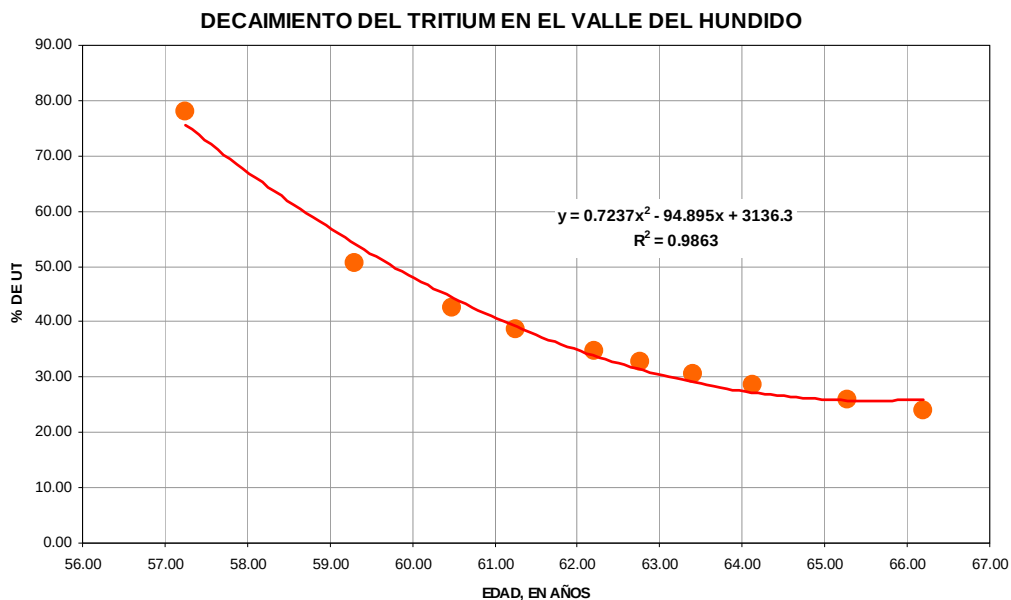


Figura 7.6.96. Se muestra el decaimiento del Tritio, el factor de correlación es bueno.

En las figuras 7.6.96 y 7.6.97 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.

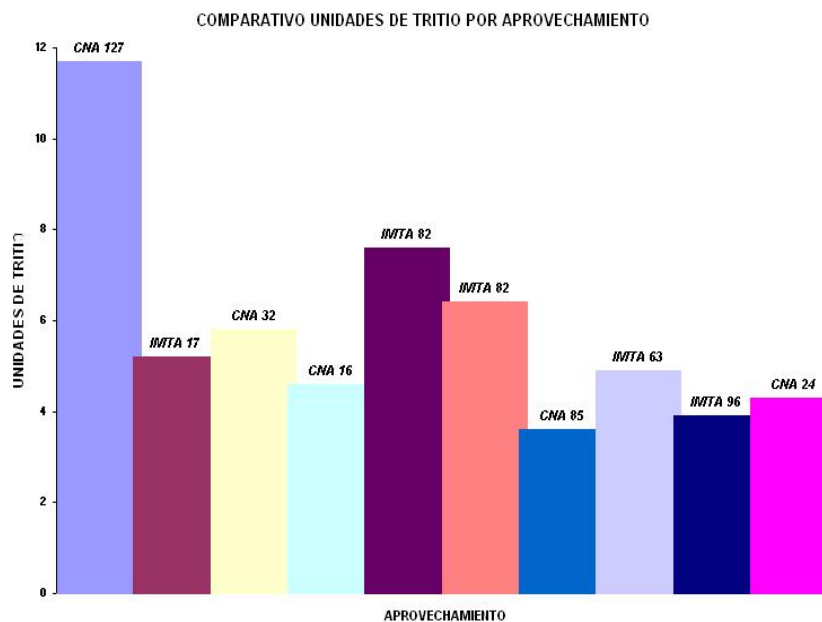


Figura 7.6.97. Análisis comparativo de Unidades de Tritio por aprovechamiento en el Valle del Hundido.

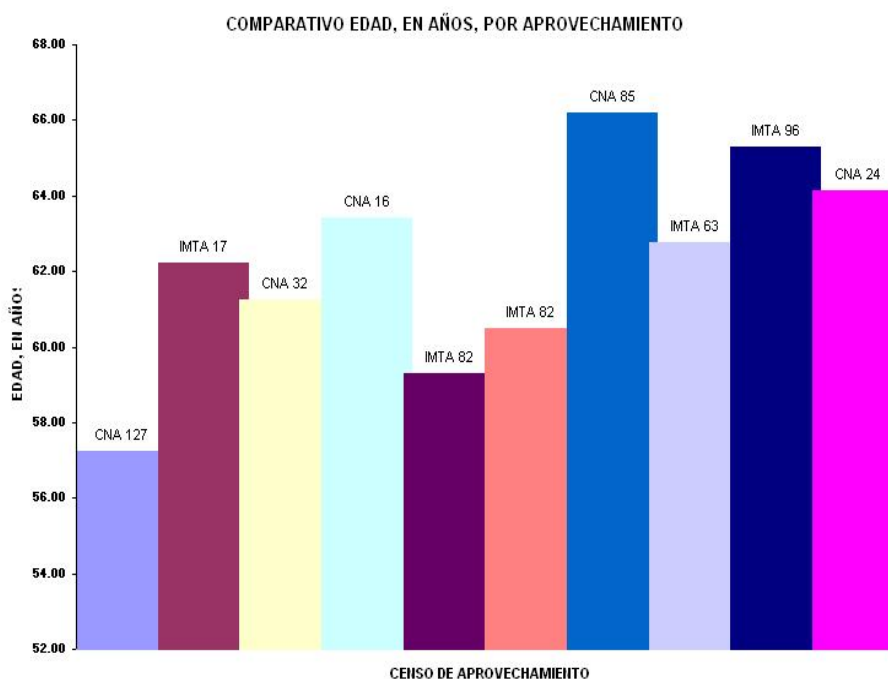


Figura 7.6.98. Datación de muestras de agua subterránea por aprovechamientos el pozo que representa mayor edad en relación a UT es CNA 85 y el de menor edad corresponde al Pozo CNA 127.

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

La aplicación de isótopos ambientales representa una herramienta complementaria de los estudios de hidrogequímica 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, determinado 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 geoelectrico) 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.

a). Jurásico Superior-Cretácico.

- Depósitos de carbonatos de plataforma y de cuenca profunda como parte del ambiente marino, es probable que el agua con alto contenido de cloruros, esté estrechamente vinculada con aguas de formación (connotas), las que quedaron atrapadas en los poros de la roca durante el proceso de diagénesis. Fig. 7.7.98

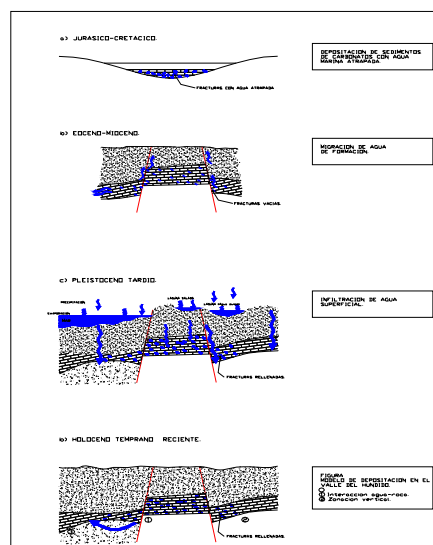


Figura 7.7.99 Modelo de Sedimentación en el Jurásico Cretácico Valle del Hundido

b).Eoceno- Mioceno.

- Reducción del espacio de los poros debido al soterramiento de la cuenca por sedimentos terciarios subyacentes.
- Plegamiento compresivo durante el Oligoceno producto del cabalgamiento frontal de la Sierra de la Fragua contra el macizo rocoso de la Sierra de los Alamitos.
- Formación de fallas inversas durante el Oligoceno y Mioceno, respectivamente, lo que favoreció a la formación de conductos para el ascenso vertical de fluidos.

c).Pleistoceno Tardío.

- Durante dos períodos glaciales hace aproximadamente 40,000 años el Río Nazas estaba conectado con el Río Salado, la presencia de peces del Río Nazas han sido detectados en el cauce del Salado (Contreras, 1988).
- Los análisis de DNA realizados por la Dra. Valeria de Souza en los valles del Hundido, Cuatro Ciénegas y Calaveras en bacterias el genotipo de éstas esta muy estrechamente ligado.
- Los escurrimientos del Río Nazas en el Pleistoceno fluían a través de un sistema de lagos inter-montanos que comunicaban entre si los valles del Sobaco, Hundido, El Tablero y Cuatro Ciénegas, semejante a un sistema de tanques todos conectados entre sí mediante antiguos carstos los que se comportaban hidráulicamente como sifones. Figuras 7.799, 100 ,101 y 102

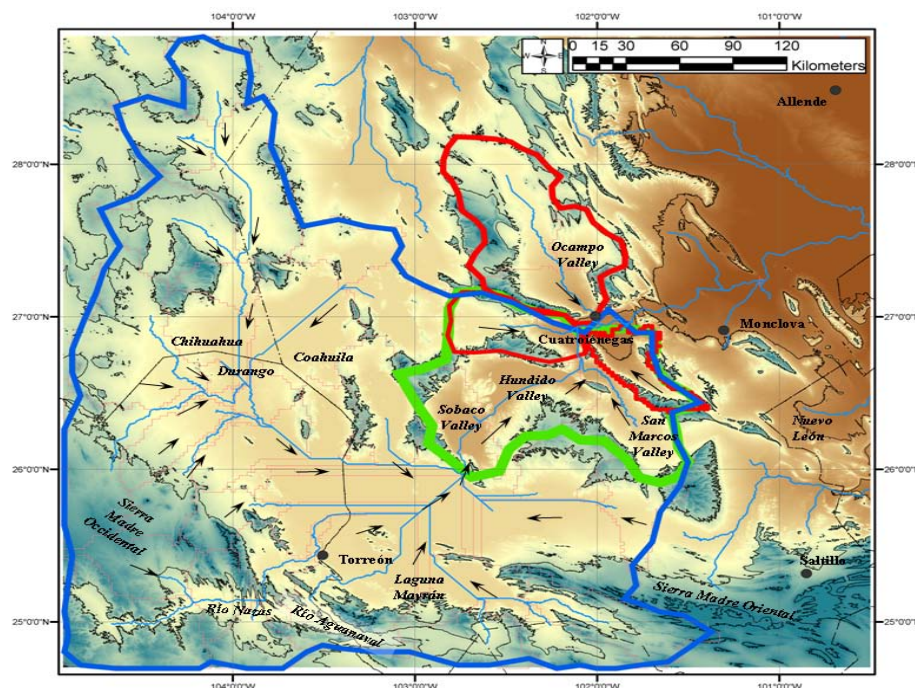


Figura 7.7.100. Escurrimientos del Río Nazas

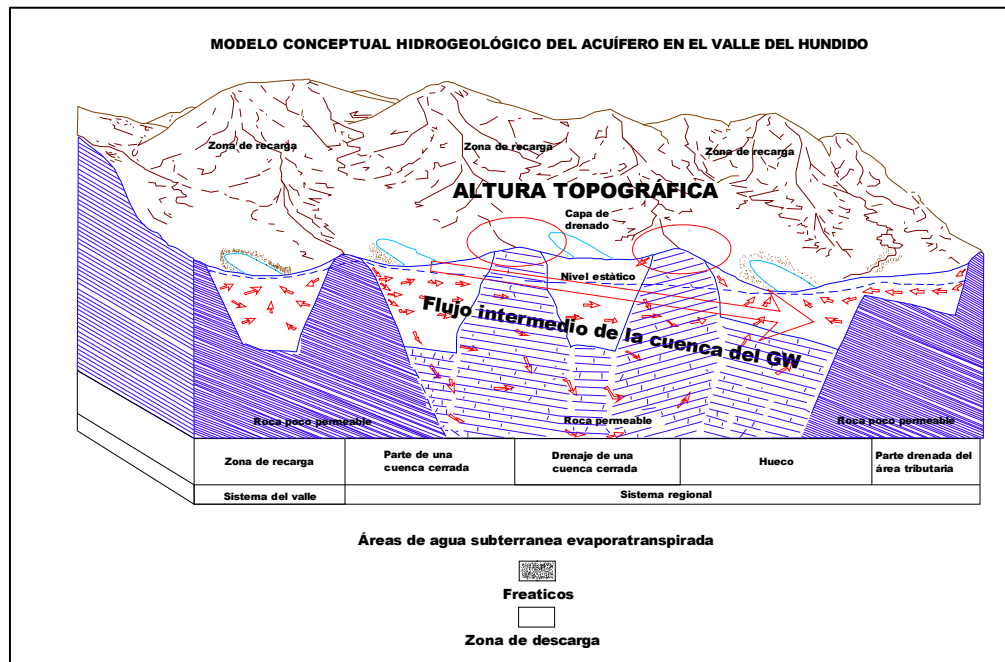


Figura 7.7. 101. Modelo hidrogeológico del Valle del Hundido.

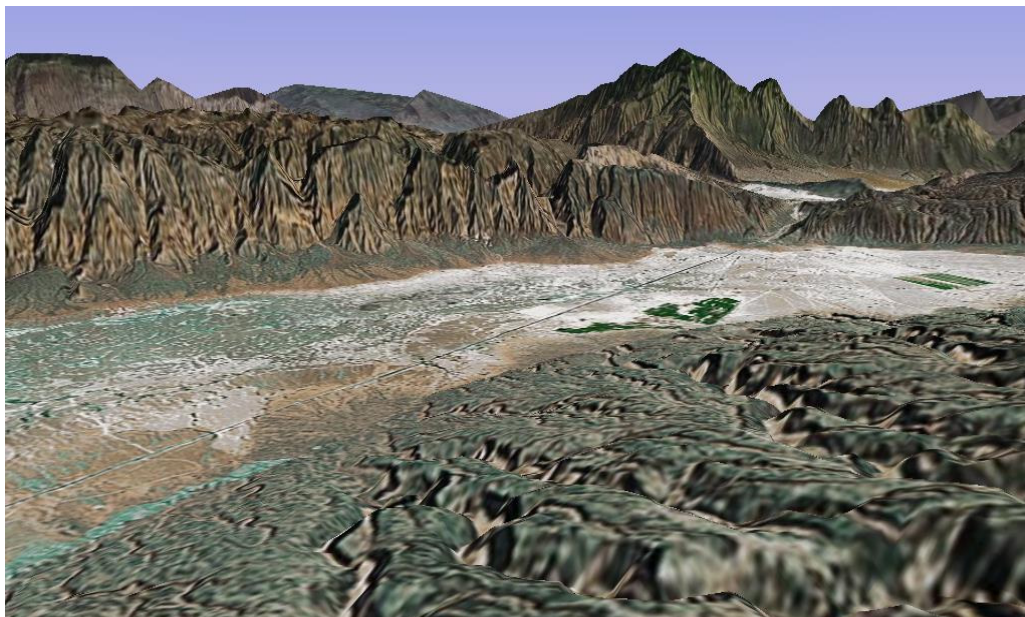


Figura 7.7.102.Marco estructural del Valle del Hundido

Leyenda

- Aluvión
- Areniscas
- Zona de Epicarstos
- Calizas
- Contacto entre Calizas y areniscas
- Calcáreas
- Areniscas con alta permeabilidad
- Afloramiento de Calizas
- Dolinas
- Nivel Piezométrico
- Movimiento del Flujo Subterráneo
- Conductividad de Calizas en Zonas Vadasas

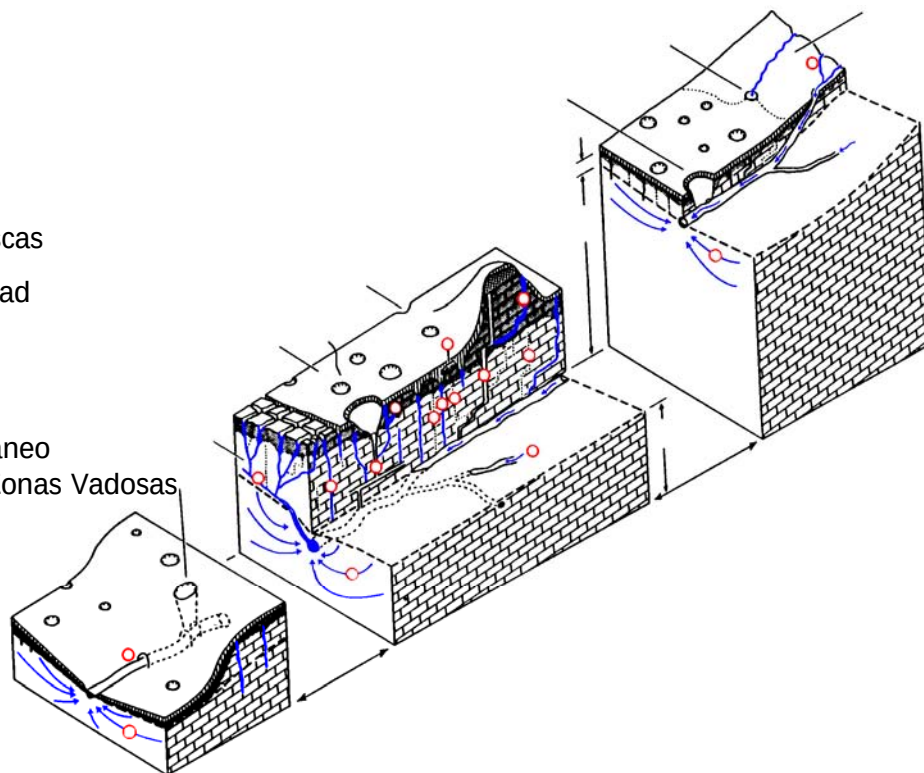


Figura 7.7.103 Modelo Conceptual Hidrogeológico a la salida del Cañón del Valle del Hundido

Capítulo VIII

8.- Aplicación del Método DRASTIC para determinar el grado de vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido.

8.1. Introducción

Determinación de la vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido mediante la aplicación del Método DRASTIC. Mediante este método fue posible determinar el grado de vulnerabilidad del acuífero a la sobre explotación y a la presencia de pesticidas, fertilizantes y herbicidas. La sobreexplotación de este recurso debido al uso excesivo, el desconocimiento del comportamiento hidráulico del acuífero en el valle, generaron conos de abatimientos muy pronunciados en algunas áreas del valle, tal es el caso del Ejido el Campizal donde los pozos empezaron a boquear, los caudales iniciales de producción disminuyeron en forma drástica en un período de cinco años.

8.2 Objetivo general.

Determinar el grado de vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido mediante el Método DRASTIC.

8.3 Objetivos técnicos.

- Definir el comportamiento de los niveles estáticos y dinámicos del acuífero.
- Crear base de datos geoespaciales para los parámetros que intervienen en el Método DRASTIC.
- Obtención de parámetros hidráulicos del acuífero mediante pruebas de bombeo.
- Determinar cada una de las constantes que intervienen en la ecuación:
- $IV: D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$

Los valores del índice de vulnerabilidad del Método DRASTIC, pueden alcanzar valores que van desde 23 hasta 226, estos valores que fueron obtenidos a partir de la evaluación de cada uno de los parámetros analizados y descritos anteriormente y que se muestran en la Tabla 8.20.

TABLA. 8.20. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO EN EL VALLE DEL HUNDIDO

DRASTIC. Índice de vulnerabilidad evaluada	Clasificación de la vulnerabilidad Relativa
0-115	Baja
116-121	Media
122- 134	Media Alta
135-165	Alta

8.4 Profundidad Nivel Estático. (D)

En la Tabla 1-A se muestran los resultados de la profundidad del Nivel Freático, esta variable se considera como la de mayor jerarquía al aplicar el Método DRASTIC, la información analizada proviene del censo de aprovechamientos hidráulicos realizado en diferentes años(2004, 2005, 2006 y 2007) de observación por parte del Departamento de Geohidrología y Geofísica. Los datos recabados en campo incluyen la siguiente información:

Tipo de aprovechamiento, nombre del propietario, coordenadas UTM, fecha del dato, altura del brocal, profundidad, diámetro de construcción, diámetro del ademe, diámetro de descarga, nivel estático, nivel dinámico, tipo de bomba, Caudal (l/seg.), etc.

En LA Tabla 1-A se representan los valores del DRASTIC asignados por parámetros (Dr) y (Dw) acordes con la profundidad del nivel estático y el tipo de contaminantes respectivos. Aproximadamente el 96% de los pozos de monitoreo presentan una profundidad del nivel estático cercano a los 30.00 m. El valor asignado de (Dw) de acuerdo a las características que muestra este parámetro se le asigno un valor de uno (1). La interpretación de este resultado relacionado con el nivel freático en el Valle del Hundido no impacta tanto en el Método DRASTIC como en la ecuación general. Figura. 8.4.103

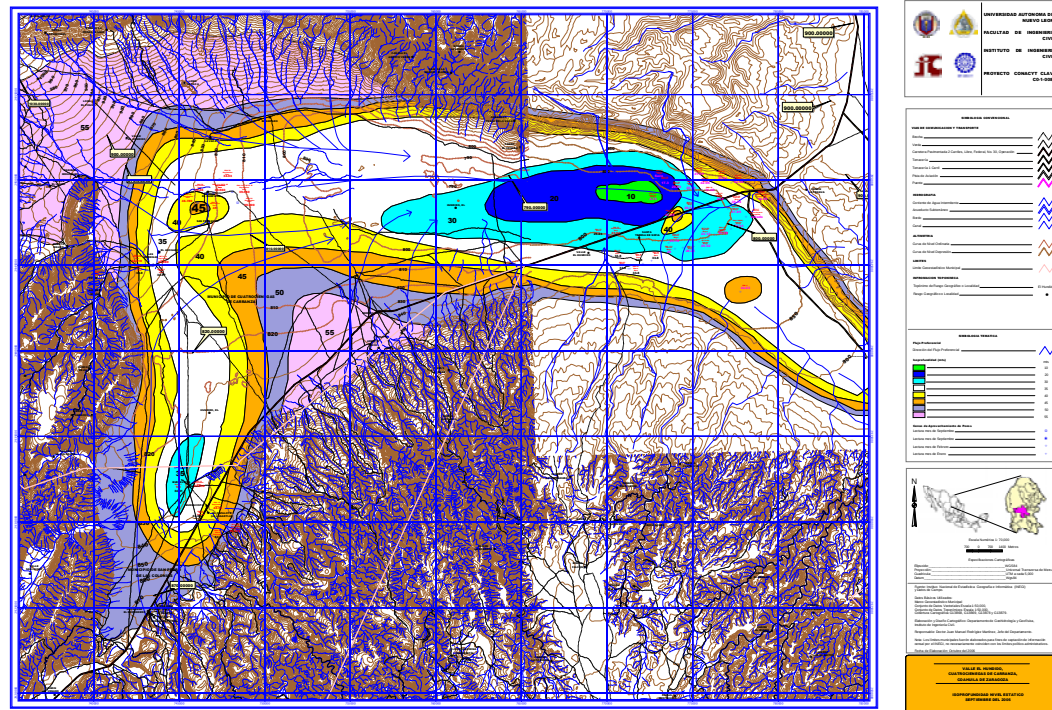


Figura. 8.4.104. Profundidad Nivel Estático. (D).

Tabla 8.20.A

Profundidad Nivel Freático (m)	Área superficial (Km ²)	Porcentaje total del área investigada (%)
10-19	4	0.5
20-29	27	3.5
30-34	60	7
35- 39	218	26
40- 44	118	14
45- 49	97	12
50- 54	128	15
> 55	183	22

TABLA 8.20-B. Valores asignados por el DRASTIC parámetro (D)

Profundidad (m)	Valor asignado (Dr)
0.00 - 1.5	10
1.5- 4.6	9
4.6- 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1
Tipo de contaminante	Valor asignado (Dw)
Pesticidas	5
No pesticidas	5

8.5 Recarga Neta del acuífero. (R).

Esta variable indica la cantidad de agua por unidad de área que ingresa al acuífero, mediante percolación profunda. En sentido estricto, este es el medio que moviliza los contaminantes hasta el acuífero. La posibilidad de que los contaminantes lleguen al acuífero es directamente proporcional al volumen de recarga y a la permeabilidad del terreno. (Fallas, 2000).

Para el Valle del Hundido la recarga neta estimada es de 10.95 mm/año, este valor nos muestra que el índice (Rr) por recarga es de 1. La información fue obtenida a partir del análisis estadístico de las diferentes estaciones climatológicas en el área del proyecto (Cuatro Ciénegas, Ocampo y Santa teresa de Sofía) como investigaciones desde 1943 hasta el 2003. Figura 8.5.104

Los valores asignados por el Método DRASTIC para esta variable (R) se muestran en la Tabla 8.21.

TABLA 8.21. VALORES ASIGNADOS POR EL MÉTODO DRASTIC RESPECTO A LA RECARGA NETA (R).

Recarga en (mm)	Valor asignado (R _r)
0.00 – 50.00	1
50.00 – 103.00	3
103.00 – 178.00	6
178.00 – 254.00	8
> 254.00	9
Tipo de contaminante.	Ponderación (R _r)
Pesticida	4
No pesticida	4

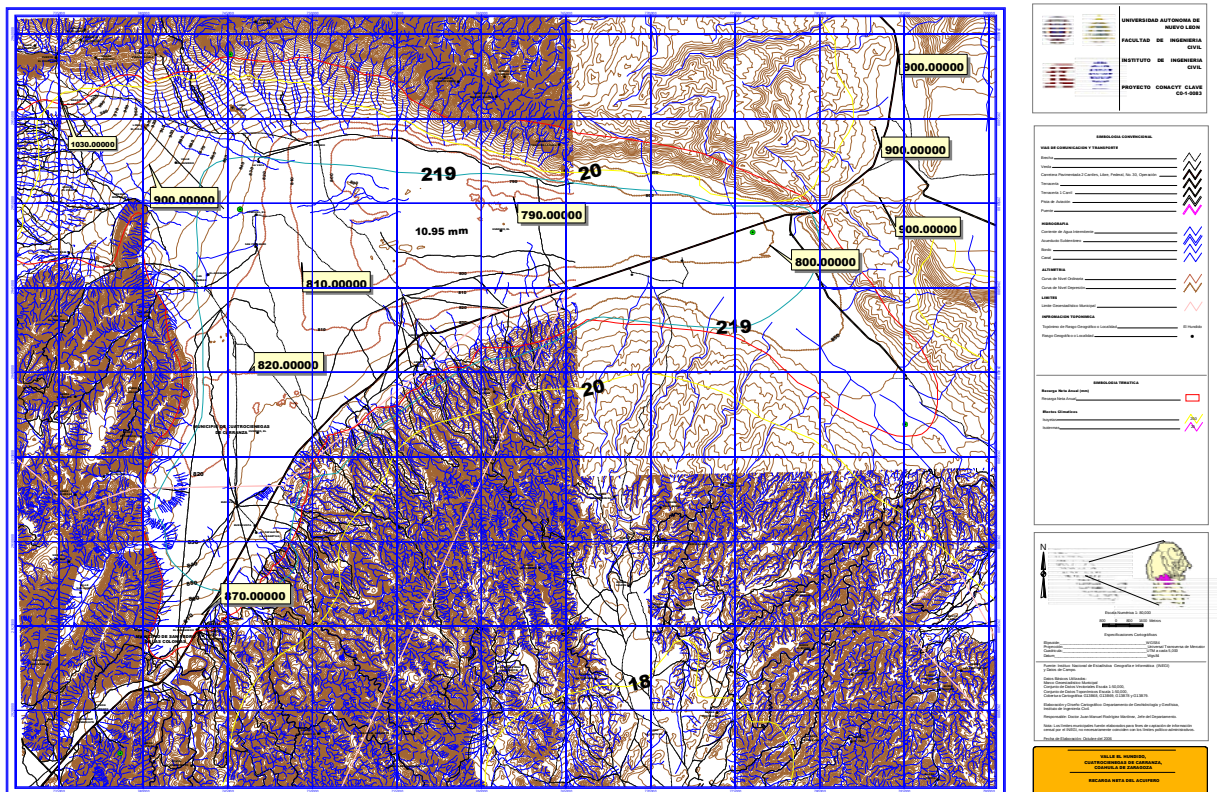


Figura. 8.5.105. Recarga neta del acuífero (R).

8.6 TIPO DE ACUÍFERO (A).

La velocidad con que se desplazan los contaminantes a través del acuífero, es determinada por la composición geológica de éstos. El tiempo que tarda el agua en transitar por el acuífero influye en el efecto del contaminante. Se considera que a mayor tiempo de tránsito del agua por el acuífero la posibilidad de que aminore el efecto de la contaminación es mayor. (Fallas, 2000).

El término acuífero se puede definir como un espacio tridimensional subterráneo que tiene la capacidad de transmitir y almacenar agua (Vargas, 2000), por lo tanto se infiere que no todas las formaciones geológicas presentan el mismo potencial para formar acuíferos.

La clasificación del tipo de acuíferos se basa principalmente la capacidad de permeabilidad o transmisividad de la roca o suelo. Los datos fueron obtenidos de los trabajos de campo realizados en el área de estudio así como de la carta de Hidrología Subterránea publicada por el INEGI. Las unidades geohidrológicas se definieron en base a las características físicas de las rocas, así como también a los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo realizados en los pozos, estos argumentos fueron



la base para estimar las posibilidades de clasificarlas. En la Tabla 8.22.A, B. se muestran los diferentes tipos de acuíferos así como el área de exposición. Figura 8.6.105

A partir de estos criterios las unidades geohidrológicas se clasificaron de la siguiente manera:

Materiales consolidados con baja permeabilidad. Dentro de esta clasificación se incluyen las lutitas,, rocas metamórficas, ígneas intemperizadas, estas unidades por sus características primarias y permeabilidad secundaria se reduce su posibilidad de ser acuíferos; dentro de esta unidad se encuentran rocas ígneas y sedimentarias ejemplo de ígneas en el área están las granodioritas que afloran en el Valle del Jabalí, tactitas y diques andesíticos que afloran en la Mina Reforma y los conglomerados poligmíticos que están expuestos en el Valle de la Gavia.

- Materiales no consolidados con baja permeabilidad, dentro de este grupo se incluyen aquellos depósitos asociados con los Hill Glacial, constituidos por una secuencia de areniscas, calizas lutitas, arcillas, etc. Estas unidades dan lugar a la formación de conglomerados cementados en un a matriz areno- arcillosa lo cual reduce la permeabilidad, presentan espesores delgados en la zona de estudio.
- Materiales no consolidados con alta permeabilidad, este tipo de sedimentos da lugar a la formación de acuíferos en medios granulares, su comportamiento hidráulico con base a los resultados de las pruebas de bombeo de larga duración realizados en la zona (72 hrs.) fueron clasificados como semi- confinados, los caudales reportados en los pozos oscilan desde 80- 100 l/s.
- Materiales consolidados con alta permeabilidad. Dentro de esta unidad se encuentran las calizas cársticas, los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo en los pozos en el Ejido Santa Sofía en el flanco norte de la Sierra de los Alamitos establecieron que el acuífero en las Formación Aurora se comporta como libre en medios fracturados, con caudales muy importantes que varían de 100-120 l/s con descensos muy pequeños.

Tabla 8.22 A. Tipo de acuíferos en el Valle del Hundido.

Tipo de acuífero	Área (Km²)	Porcentaje del área investigada
Calizas	88	11
Conglomerados	730	89

TABLA 8.22 B. Valores asignados por el Método DRASTIC sobre el parámetro (A) de acuerdo al tipo de acuífero.

Tipo de acuífero	Valor típico
Lutita	2
Metamórficas/ígneas	3
Metamórficas /ígneas alteradas	4
Till Glacial.	5
Secuencia de areniscas, calizas y lutitas	6
Areniscas masivas	6
Calizas masivas	6
Conglomerados	8
Basaltos	9
Calizas cársticas	10
Tipo de contaminante	Ponderación Aw
Pesticidas	3
No pesticidas	3

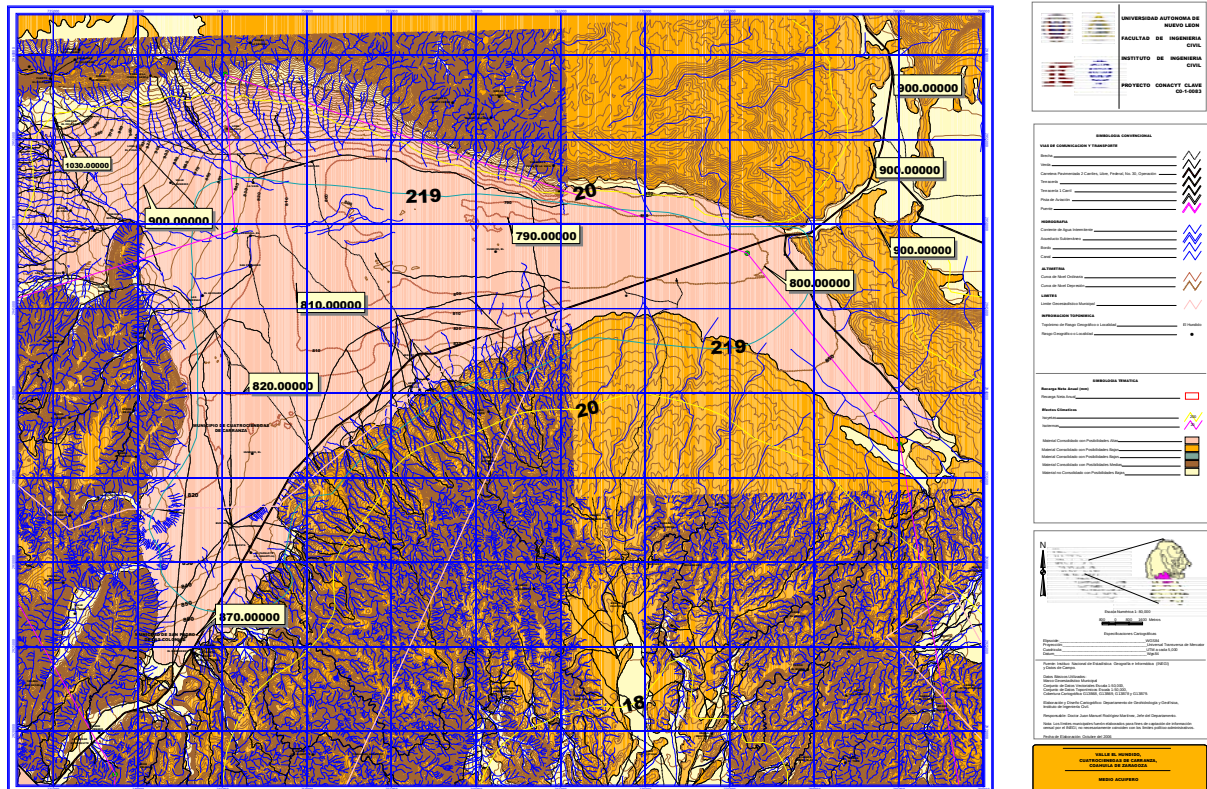


Figura. 8.6.106 Distribución de los diferentes tipos de acuíferos presentes en la zona de estudio.

8.7 TIPO DE SUELO (S).

Se considera al suelo como un cuerpo natural, sintetizado en su perfil a partir de una mezcla variable de minerales desmenuzados y modificados atmosféricamente, con presencia de materia orgánica en desintegración, la cual forma parte de la cubierta vegetal y actúa como soporte de los ecosistemas que conforman el entorno en el Valle del Hundido infiltrando volúmenes de agua por capilaridad producto de los procesos de condensación debido a los descensos bruscos de temperatura típico de zonas desérticas como es el caso. (Buckman y Brady, 1996).

Uno de los fenómenos que ocurren en el suelo es el movimiento de flujos descendente del agua libre por percolación perneando, tanto la cubierta superficial como la parte superior del estrato que conforma el subsuelo. Este proceso depende de las características del suelo como son: textura, porosidad, conductividad hidráulica, etc.



Los suelos arcillosos y limosos presentan baja permeabilidad y alta capacidad de retención por lo tanto incrementan el tiempo de tránsito del agua por la zona no saturada (Fallas, 2000).

Los valores establecidos por el Método DRASTIC, muestran muy claramente como las unidades edafológicas formadas por suelos de textura granular gruesa presentan valores muy elevados para la determinación del DRASTIC, ejemplo de ello son los suelos gravosos o arenosos donde su porosidad es muy alta lo cual permite con mayor libertad, el movimiento del agua al acuífero (gravas o/y arenas). Por el contrario suelos con una cementante arcillosa reducen el libre tránsito del agua en el subsuelo, presentan valores muy bajos para la determinación del índice (S).

Los datos para la clasificación del tipo de suelo, fueron obtenidos a partir de la carta edafológica publicada por INEGI, serie I, impresa en medio analógico durante la década de los 80's. y aparece en medios digitales a finales de los 90's. La clave de INEGI clasifica los suelos en tres tipos: Primario, secundario y terciario. Además considera la clase textura como factor determinante para la asignación del valor DRASTIC, clasificándolos en tres tipos: Suelo de textura gruesa, media y fina.

Los tipos de suelo encontrados en la zona de estudio: Figura 8.7.106

- 1.- Litosol
- 2.- Regosol
- 3.- Xerosol
- 4.- Yermosol
- 5.- Solonchak

En el área de estudio, zona de montaña se presentan suelos de tipo **Litosol**, caracterizados por distribuirse en las sierras, laderas, barrancos y malpaís. Son suelos arenosos o/y arcillosos, presentan espesores menores de 10 centímetros de profundidad. El tipo textural para estas unidades está asociado con una textura media. La superficie ocupada por este tipo de suelo es de aproximadamente 102 Km².

El **Regosol** se presenta en zonas de dunas, playas, no presenta estratificación por lo general esta intercalado con horizontes de tepetate. La superficie representada por este tipo de suelos es de 210 Km².

Los suelos del tipo **Xerosol** son ricos en arcillas con aglomerados de cal, cristales de yesos o caliche. Se caracterizan por poseer baja susceptibilidad a la erosión, la superficie representada por este tipo de suelos en el área de estudio es de 65 Km².

Los suelos tipo **Yermosol** son suelos ricos en arcillas con agregados de cal o de yeso, en el sub-suelo, en ocasiones son salinos la superficie representada por este tipo de suelos es de 256 Km².

El **Solonchak** se caracteriza por su elevado contenido de sales, la erosión es leve en el área de estudio la superficie que cubre este tipo de suelo es de 227 Km².

Los valores asignados en el DRASTIC para esta variable se muestran en la Tabla 8.4.

TABLA 8.23. Valores asignados por el Método DRASTIC al parámetro (S) de acuerdo al tipo de Suelo.

TIPO DE SUELO	CLASIFICACIÓN (Sr)
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arenas	9
Agregado arcilloso o compacto	7
Arenisca margosa	6
Margas	5
Limo margoso	4
Arcilla calcárea	3
Estiércol- fangosita	2
Arcilla no compactada sin agregados	1
Tipo de contaminante	Ponderación (Sw)
Pesticida	5
No pesticida	2

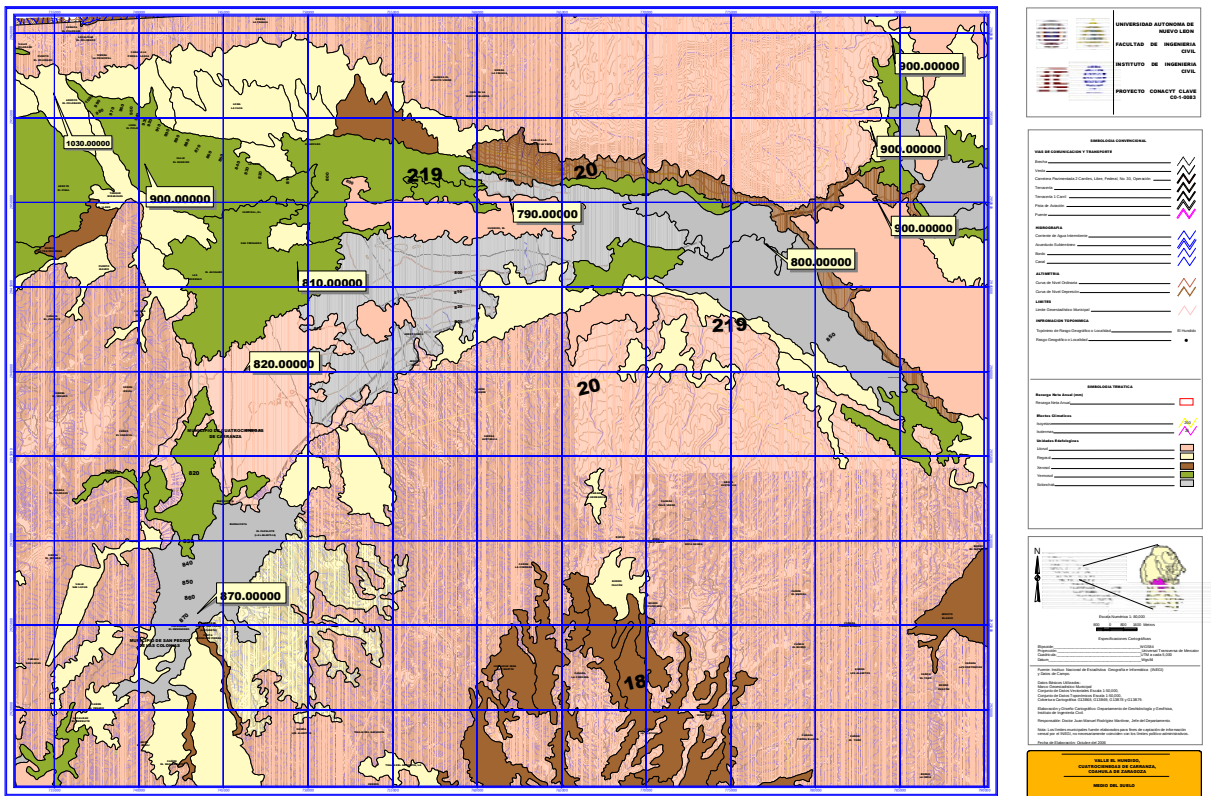


Figura. 8.7.107. Tipos de suelos

8.8 Pendiente (T).

El plano topográfico de la pendiente, se obtuvo a partir de la información vectorial digital de las cartas topográficas a escala 1: 50,000 (INEGI). Utilizando la capa de altimetría del terreno con una representación gráfica digital de curvas de nivel con una equidistancia de 10 metros, se elaboró el Modelo Digital de Elevación, el cual el cual sirvió de base para realizar el cálculo de la pendiente en porcentaje. Este modelo se elaboró con el software SIG, que presenta las herramientas necesarias para la transformación del formato vectorial a un formato Raster con valores de altura ortométrica (msnm) en cada una de las celdas. Figura 8.8.107

El fundamento del índice DRASTIC, se basa en la tendencia que presentan los escurrimientos a drenar hacia las partes bajas; es decir que a mayor pendiente el agua se desplazará a mayor velocidad y por ende producirá mayor erosión, dejando muy bien marcada el terreno a través de arrolladas muy bien definidas, por lo tanto debido a

la velocidad con que se desplazan los escurrimientos pluviales el tiempo de percolación es menor (Fallas, 2000).

La zona de estudio se caracteriza por presentar en su parte plana pendientes muy suaves del orden de 0 – 2 %, ocupando una superficie de 960 Km².

En las zonas al pie de la montaña las pendientes oscilan desde 6.1- 12% la superficie representada por esta pendiente es del orden de 37 Km².

Tabla 8.24A Valores de pendiente en por ciento en el Valle del Hundido.

PENDIENTE %	SUPERFICIE Km²
0- 2	960
6.1 - 12	37

TABLA 8.24B. Valores asignados por el Método DRASTIC de la variable (T).

Valor de la pendiente %	Clasificación (Tr)
0-2	10
2-6	10
6- 12	9
12- 18	7
> 18	6
Tipo de contaminante	Ponderación (Tw)
Pesticida	3
No pesticida	1

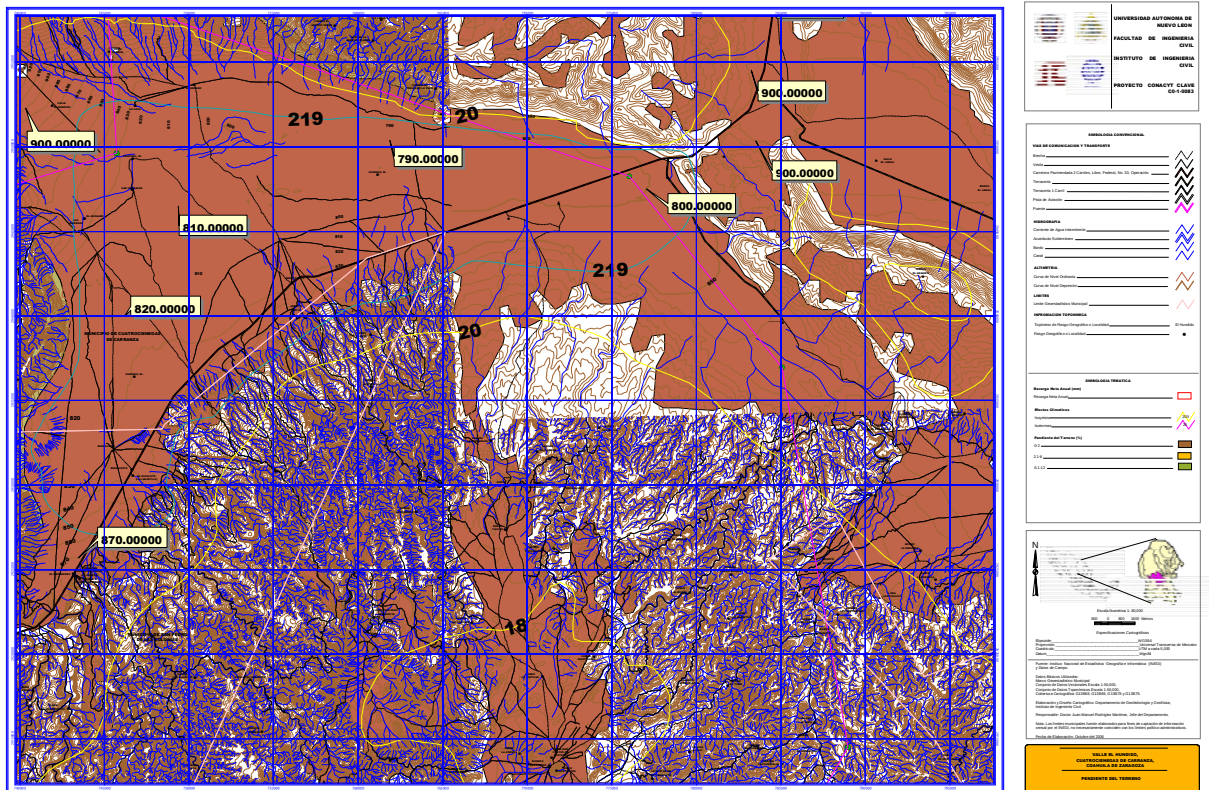


Figura 8.8.108. Distribución de la pendiente en el Valle del Hundido.

8.9 Impacto de la zona no saturada (i)

Esta variable considera la textura del suelo, la cual determina la velocidad con que el agua se mueve a través del perfil del terreno. Los suelos con textura arcillosa reducen el paso del agua, mientras que las arenas lo favorecen.

En la Tabla 6 A se muestra la textura de los suelos en el Valle del Hundido y los valores asignados en el DRASTIC a esta variable (I).

TABLA 8.25A. Tipo de suelo, textura y área superficial en el Valle del Hundido.

TIPO DE TEXTURA DEL SUELO	SUPERFICIE (Km)	PORCENTAJE TOTAL DEL ÁREA DE ESTUDIO (%)
Gravas y arenas	42.5	5
Gravas-arenas limos arcillosos	740	92
Arcillas limosas	13	2
Evaporitas (Solonchak	5	1

TABLA 8.25B. Valores asignados a la variable (I) en el Método DRASTIC.

Tipo de textura del suelo	Clasificación (I _r)
Roca confinante	1
Arcilla limosa	3
Lutita	3
Calizas	6
Areniscas	6
Secuencia calcárea	6
Arenas con gravas	6
Rocas metamórficas	4
Gravas y arenas	8
Basalto	9
Calizas cársticas	10
Tipo de contaminante	Ponderación (I _w)
Pesticida	4
No pesticida	5

TABLA 8.26. Resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el Valle del Hundido.

UBICACIÓN	Coordenadas UTM			Nivel estático (m)	Nivel dinámico(m)	Parámetros Hidráulicos		
	X	Y	Z(msnm)			Q (l/s)	T (m ² /día)	S
Ejido Santa Teresa de Sofía.								
Pozo No 1.(CNA24)	772603	2945313	804	29.12	29.60	90	20,592.3	5.03X10 ⁻¹
Pozo No 2 (CNA25)	772111	2945102	798	30.7	32.5	101	6821.7	3.02X10 ⁻²
Pozo No 3 (CNA 27)	771350	2944797	806	33.7	34.70	80.9	8877.13	2.19 X10 ⁻¹
Pozo No 4 (CNA 63)	771247	2944798	801	31.62	40.00	64.17	895.92	7.63X10 ⁻³
SAN FERNANDO								
Pozo CNA 54	748411	2948637	819	36.50	65.60	105.29	571.8	8.74 x10 ⁻³
Pozo CNA 49	746076	2948650	827	25.15	43.52	95.00	571.8	1x 10 ⁻²
Pozo CNA 51	746914	2946921	822	36.50	64.36	103.04	571.8	7.07 x 10 ⁻³
Pozo CNA 21	746648	2948553	826	25.72	65.80	95.00	262.09	5.63 x 10 ⁻³

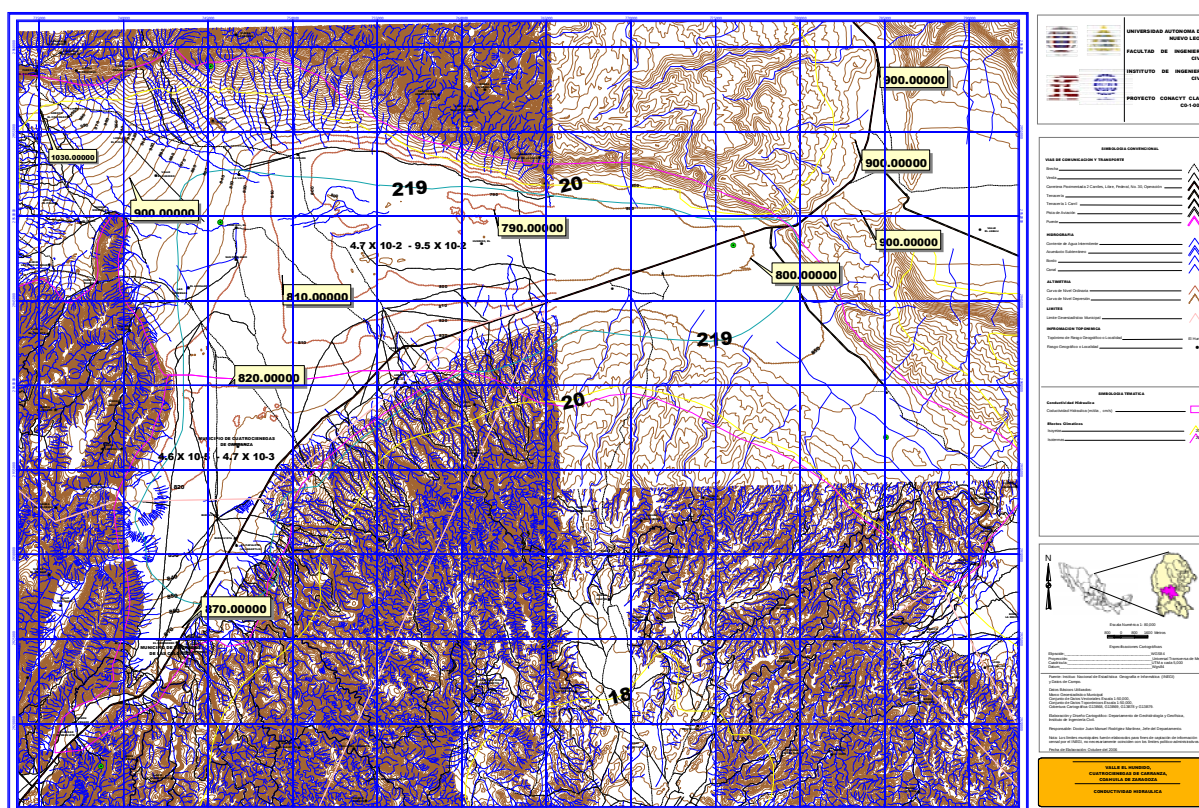
En la zona de estudio se encontraron valores de transmisibilidad muy altos, el comportamiento de los parámetros hidráulicos en las diferentes gráficas elaboradas, Abatimiento versus tiempo, Caudal versus tiempo, Caudal versus tiempo, rpm nos demuestra la presencia de dos acuíferos libres. Uno en medios granulares y el otro en rocas fracturadas (calizas).

- Medios granulares: Los valores de transmisibilidad en el acuífero en medios granulares oscilan desde 262.09 m/día en el pozo Pozo CNA 21 hasta 571.8 en el Pozos CNA 54 y 49
- Rocas fracturadas: El comportamiento en el acuífero en medios fracturados su transmisibilidad varía desde 6821.7 m/día en el Pozo CNA 25 hasta 20,592.3 m/día en el Pozo CNA 24.

En la tabla 8.27 se muestran los valores de conductividad hidráulica que se utilizó en el Método DRASTIC (Cr).

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/día)	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm./s)	CLASIFICACIÓN (Cr)
0.04- 4.08	$4.62 \times 10^{-5} - 4.7 \times 10^{-3}$	1
4.08- 12.12	$4.07 \times 10^{-3} - 1.4 \times 10^{-2}$	2
12.12- 28.55	$1.4 \times 10^{-2} - 3.4 \times 10^{-2}$	3
28.55- 40.75	$3.4 \times 10^{-2} - 4.7 \times 10^{-2}$	6

40.75- 81.49	$4.7 \times 10^{-2} - 9.5 \times 10^{-2}$	8
81.49- 101	$9.5 \times 10^{-3} - 1.16 \times 10^{-1}$	10
101.05- 177.5	$1.16 \times 10^{-1} - 2.04 \times 10^{-1}$	10
177.05- 242.00	$2.04 \times 10^{-1} - 2.80 \times 10^{-1}$	10
244.00- 255.9	$2.80 \times 10^{-1} - 2.96 \times 10^{-1}$	10
255.9- 593.00	$2.80 \times 10^{-1} - 6.86 \times 10^{-1}$	10
Tipo de contaminante	Ponderación (Cw)	
Pesticidas	2	
No pesticidas	3	



En la figura 8.10.110. Se muestra la localización de los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo.

8.11 Plano de vulnerabilidad del acuífero en el Valle del Hundido (Resultados del Método DRASTIC).

El análisis de la sobre posición de las diferentes variables que intervienen en el Método DRASTIC, utilizadas para determinar la evaluación de contaminantes en el área de estudio muestran lo siguientes resultados:

- Los resultados son válidos para la parte plana del valle, debido a que se consideró excluyente las zonas de montaña y sus alrededores (Sierra de La Fragua, Sierra de Los Alamos, Sierra del Granizo y la Sierra del Venado).
- Los valores límites, **inferior** y **superior** obtenidos para la zona de estudio, corresponden a valores que oscilan entre 40 y 143 respectivamente. A partir de estos valores se definieron los siguientes niveles de vulnerabilidad en el acuífero en el Valle del Hundido; dichos valores se muestran en la Tabla 8.

TABLA 8.28 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

Vulnerabilidad Relativa	Índice DRASTIC
Baja	0-115
Media	116-121
Media Alta	122- 134
Alta	135- 143

- La clasificación para cada una de las áreas de vulnerabilidad se muestra en la Tabla 8.28. y gráficamente en la figura 8.11.110. La distribución de superficie con índice de vulnerabilidad mayor se encuentra en la porción centro y noroeste del Valle del Hundido.



Vulnerabilidad Relativa	% Superficie	Superficie en Km²
Baja	19.59	156.31
Media	13.90	110.95
Media Alta	50.90	406.75
Alta	15.50	123.69

- Pagina 208



- Los parámetros (Acuífero y Suelo) son variables que influyen de manera determinante en los índices del Método DRASTIC aplicados al acuífero del Valle del Hundido.
- La variable relacionada con la profundidad del nivel estático se le asignó un valor de 8 para la parte baja del valle y de 6 para lo que corresponde a la zona de montaña.

Capítulo VIX

9. MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO Y ESTRUCTURAL DEL ACUÍFERO.

9.1. Introducción.

La geometría del acuífero en el Valle del Hundido se logró definir con el apoyo de métodos geológicos, geofísicos, hidráulicos e hidrogeoquímicos. La interpretación hidrogeológica fue representada por medio de un modelo en tres dimensiones sobre el comportamiento hidráulico del acuífero del Valle en estudio y su inter-relación con los con los valles contiguos, también mediante una modelo regional se demostró que la recarga en el Valle del Hundido no depende de la precipitación pluvial de la zona, su recarga está estrechamente ligada con los flujos provenientes del Río Nazas como del aporte proveniente a través de la falla de San Marcos la cual se extiende por aproximadamente 300 Km., así como de la Sierra de Los Alamitos y de la Sierra del Venado.

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 geoelectrico) toda esta información fue apoyada con trabajos de geología de campo.

9.1.2. Modelo conceptual hidrogeológico.

El conjunto de los resultados actuales de geología estructural, geofísica, hidrogeoquímica, hidráulica de pozos, isotopía y de hidrología subterránea nos permitió establecer un modelo hidrogeológico sobre el comportamiento hidráulico del acuífero y su conexión con el Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila. Figura 9.1.111. Se muestra la dirección de los escurrimientos pluviales provenientes de la Cuenca del Río Nazas, así como su conexión con el Río Salado a través del Cañón de la Fragua.

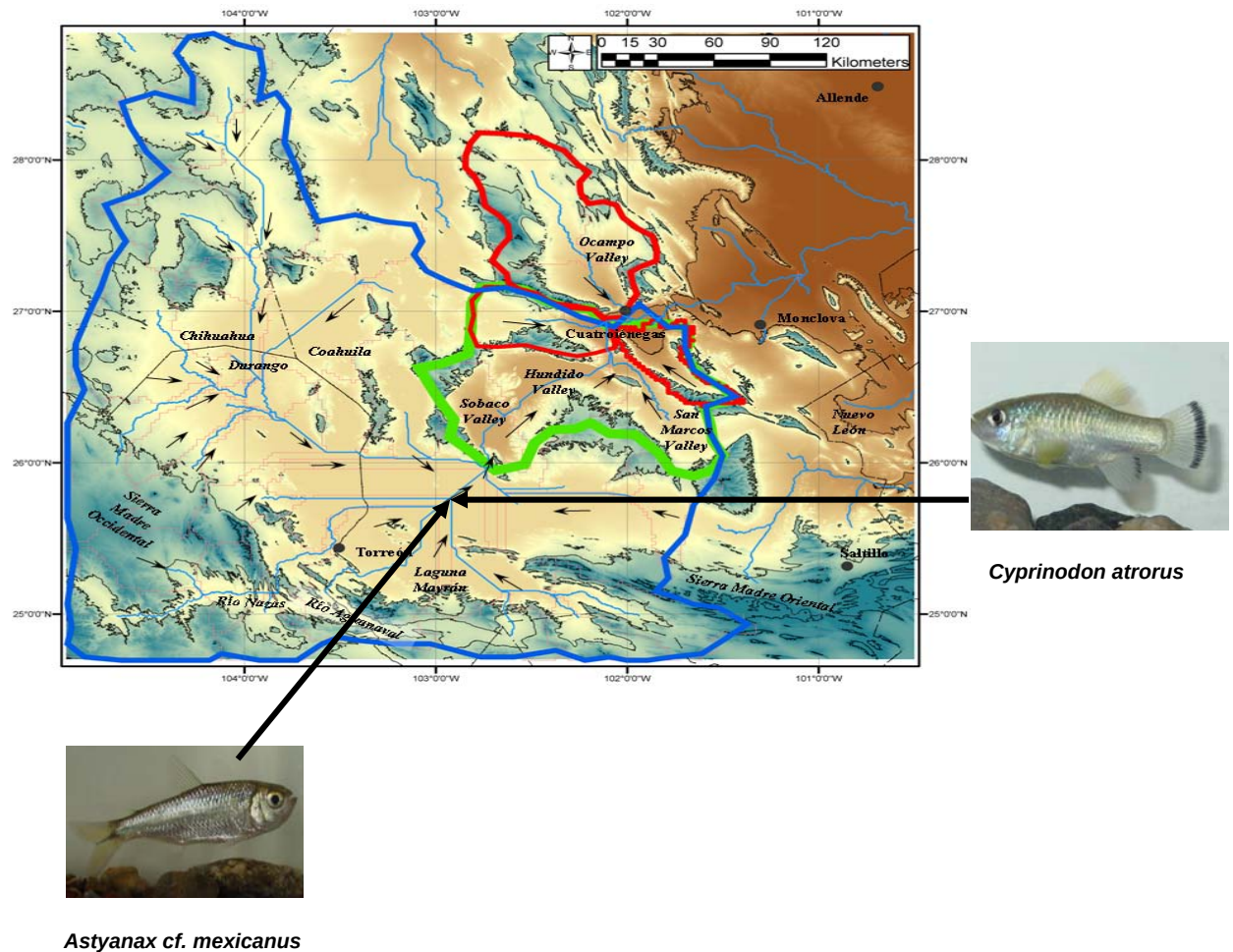


Figura 9.1.112 Se muestra la dirección de los escurrimientos pluviales provenientes de la Cuenca del Río Nazas, al Río Salado a través del Cañón de la Fragua; así como las Rutas de faunación de elementos selectos de la ictiofauna del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

Pleistoceno Tardío: Durante dos períodos glaciales hace aproximadamente 40,000 años el Río Nazas estaba conectado con el Río Salado, la presencia de peces del Río Nazas han sido detectados en el cauce del Salado (Contreras, 1988). Los análisis de DNA realizados por la Dra. Valeria de Souza en los valles del Hundido, Cuatro Ciénegas y Calaveras en bacterias el genotipo de éstas, esta muy estrechamente ligado. Los escurrimientos del Río Nazas en el Pleistoceno fluían a través de un sistema de lagos inter-montanos que comunicaban entre si los valles del Sobaco, Hundido, El Tablero y Cuatro Ciénegas, semejante a un sistema de tanques todos conectados entre sí mediante antiguos carstos los que se comportaban hidráulicamente

como sifones. En la figura 9.1.112 se muestra la secuencia sobre el funcionamiento hidráulico del sistema de lagos existentes en el Pleistoceno.

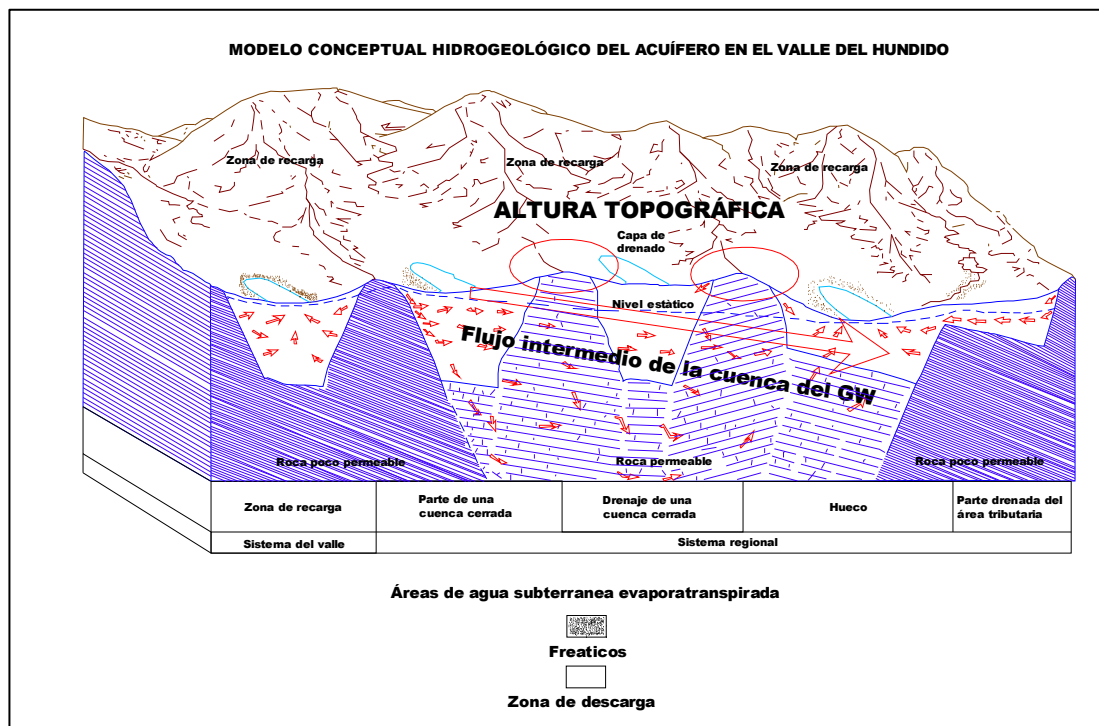


Figura 9.1.113. Se describe en forma gráfica el comportamiento hidráulico de los diferentes valles que forman parte de la Región Hidrológica RH- 35.

La mezcla de dos ambientes de depósito causó la formación de diferentes tipos de agua, relictos de agua fósil (connota) de formación quedaron reemplazados por la intrusión secundaria de agua. Anteriormente al evento de infiltración, fracciones de agua marina fueron afectados por procesos de evaporación en un ambiente lacustre del tipo sabkha, causando la formación de aguas con altas concentraciones de cloro. El mecanismo de que dieron origen a estos depósitos, frecuentemente está asociado con la evaporación, procesos que permiten la sedimentación de precipitados químicos. Dentro de estos minerales precipitados normalmente de esta manera se presenta la halita (cloruro de sodio, NaCl), que es el componente principal de la sal gema y el yeso (sulfato cálcico hidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). En el pasado geológico la zona de estudios eran cuencas, sumergidas bajo brazos someros de un mar que tenía conexión con el océano abierto; bajo estas condiciones, el agua de mar entraba continuamente en la bahía para sustituir el agua perdida por evaporación. Finalmente el agua de la bahía se saturaba y se iniciaba la deposición de sal; estos depósitos se les conoce con el

nombre de evaporitas en el diagrama anexo se muestra este proceso. Dicho proceso de sedimentación se muestra en la figura 9.1.113.

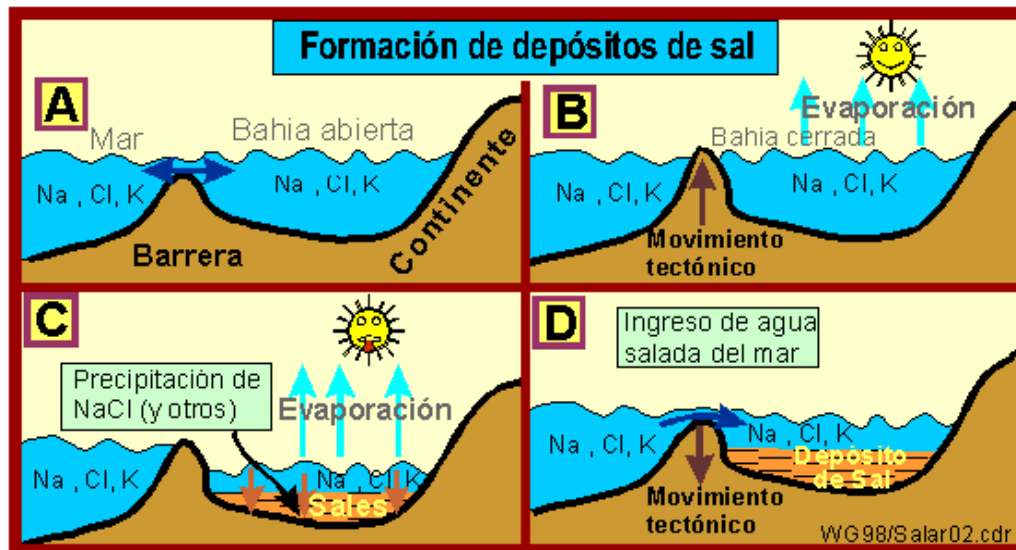


Figura. 9.1.114. Formación de depósitos salinos en el Valle del Hundido



Fotografía 9.1.114. Afloramientos correspondientes a la Formación Acatita dichos depósitos están asociados a cuencas cerradas (Sabkas).

9.1.3. Modelo conceptual hidrogeoquímico

Otra herramienta que se aplicó para definir la dirección del flujo subterráneo del agua fue la información geoquímica (figuras). Con éste propósito se elaboraron las configuraciones de STD y de conductividad, esto nos permitió definir la dirección preferencial de los flujos subterráneos desde su zona de recarga, lográndose zonificar áreas donde las concentraciones de sales son mayores, estas concentraciones de sales por encima de los esperado tienen una respuesta muy lógica la cual fue descrita anteriormente al definir el mecanismo de formación de los depósitos salinos en el Valle del Hundido.

En la configuración de S. T. D se observó que los valores se van incrementando hacia la parte central del valle del Hundido del Noroeste hacia el Sur este del valle, en esta configuración se logró definir la dirección preferencial del flujo subterráneo, el cual coincide también con las configuraciones de isopropundidad nivel estático del acuífero como con la isoelevación nivel estático, su tendencia es hacia la salida al Cañón de la Fragua, este mismo comportamiento se muestra en el modelo geohidrológico conceptual del acuífero en el Valle del Hundido. Plano de S. T. D. Los valores de sólidos totales disueltos 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.

9.1.4. Modelo estructural

En los trabajos de geología de campo nos permitieron establecer los siguientes criterios: 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 a nivel regional. Se logró establecer la relación entre los epicarstos presentes en la Formación Aurora con los que se detectaron en el subsuelo mediante técnicas geofísicas, lo cual nos conduce a suponer que a través de viejos carstos existentes en el subsuelo exista comunicación hidráulica entre ambos valles (El Hundido- Cuatro Ciénegas). 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, 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, producto del último evento orogénico ocurrido en el Eoceno. 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, dicho concepto está basado en los siguientes elementos:

- Presencia de evaporitas en dos niveles, Formación Minas Viejas del Jurásico Inferior y Formación Acatita del Cretácico Inferior.
- Rocas clásticas y carbonatadas, las cuales conforman la 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.
- El levantamiento actúo en la deformación de las estructuras, generando una geometría de pliegues, producto de un anticlinal recumbente el cual 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 son desplegadas de su base, tiende a producir una cuña. (Davis et al, 1983. Dahlem et al, 1984).
- El modelo geodinámico de cuña es válido para la cuenca de Sabinas como para la Sierra Madre Oriental. 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.
- 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. (Fotografías 2, 3).



Fotografía 9.18. Afloramiento correspondiente al basamento (Granodiorita) de edad Permo-Triásica, localizado en el Valle del Jabalí.



Fotografía 9.19. Afloramiento correspondiente a la Formación Aurora del Cretácico Inferior en el flanco Sur-Occidental de la Sierra de la Fragua mostrando la estructura de caja producto de los esfuerzos vergentes del Norte.

El levantamiento actuó en la deformación de las estructuras, generando una geometría de pliegues, producto de un anticlinal recumbente el cual 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 son desplegadas de su base, tiende a producir una cuña. (Davis et al, 1983. Dahlem et al, 1984).

El modelo geodinámico de cuña es válido para la cuenca de Sabinas como para la Sierra Madre Oriental. 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. 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. (Fotografías 9.18, 9.19).

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 concluye lo siguiente:

La Sierra de la Fragua se sobre pone 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.

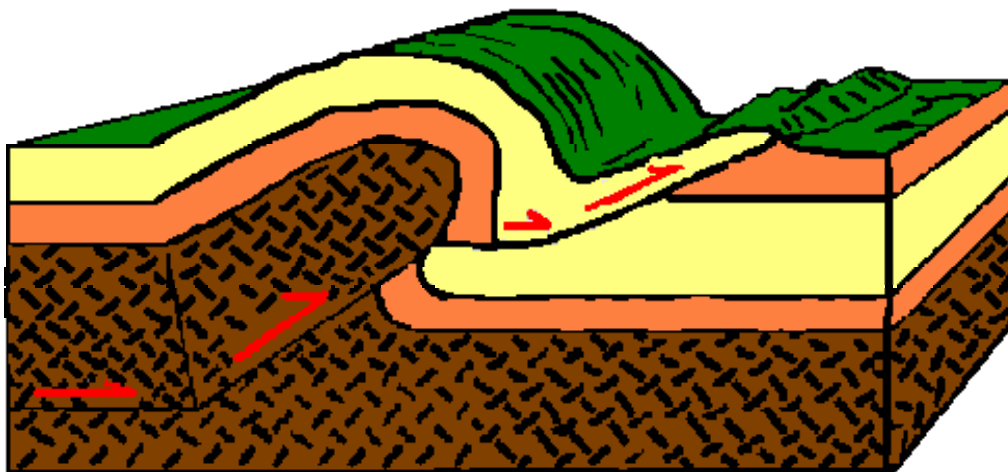


Figura. 9.1.116 Esquema que muestra el cabalgamiento en el área de estudios.

Estos criterios confirman los resultados obtenidos por la Dra. Valeria de Souza, en su trabajo, investigadora del Instituto de Ecología de la UNAM (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 modelo estructural se muestra el sistema de fallas que permiten la comunicación entre los valles del Hundido con el de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

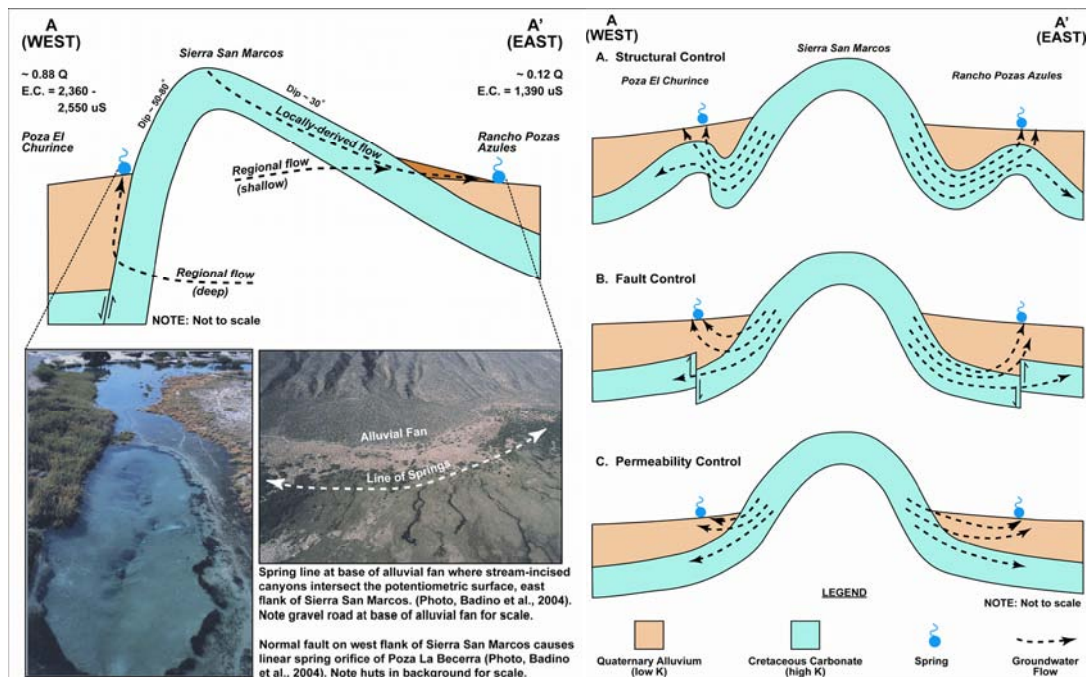


Figura 9.1.117 Falla Normal San Marcos –Atalaya.

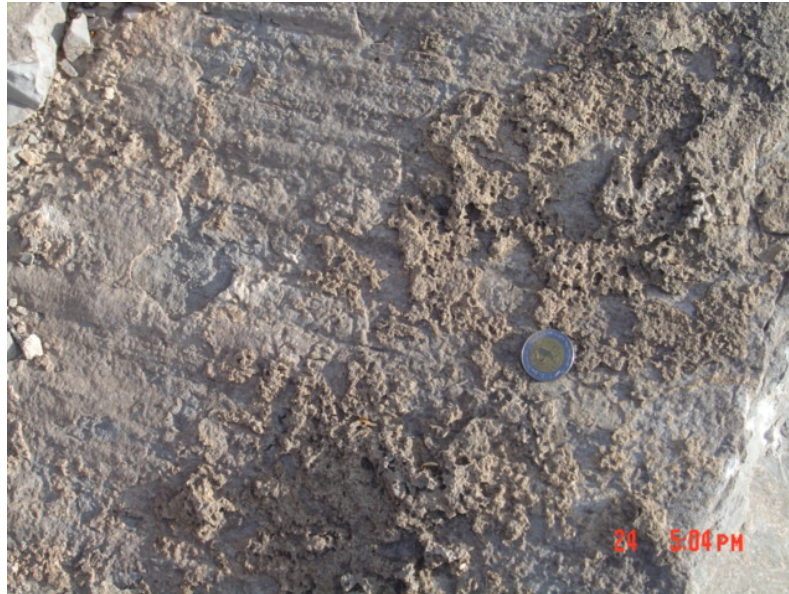


Figura 9.1.118 Espejo de Falla San Marcos- Atalaya

9.1.5. Modelo hidrodinámico del acuífero

Los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo de larga duración (72 horas) en los pozos: CNA 24, CNA 27, CNA 25 y CNA 63 ubicados en el Ejido Santa Teresa de Sofía y los localizados en el Rancho San Fernando (CNA 54, CNA 49, CNA 51 y CNA 21) los objetivos establecidos sobre el comportamiento hidráulico del acuífero fueron determinados totalmente, se logró definir la presencia de dos acuíferos uno en medios granulares y el otro en rocas consolidadas.

Acuífero en medios granulares

El acuífero en medios granulares esta estrechamente relacionado con depósitos aluviales y de pie de monte, eólicos y evaporíticos, la recarga de este acuífero es a través de la Falla de San Marcos la cual tiene una longitud de 300 Km. En la parte sur poniente del Valle del Hundido se observa muy claramente el abanico aluvial, en contacto con la falla de San Marcos, también se logró comprobar que el acuífero granular es recargado en forma ascendente por el acuífero profundo a través de fracturas, en algunos pozos se logró observar flujos ascendentes (Pozo CNA 125). Los parámetros hidráulicos obtenidos de los datos de campo en cada una de las pruebas de bombeo en el Rancho San Fernando; a partir de los valores obtenidos del Coeficiente de Almacenamiento (S) en los pozos anteriormente mencionados se logró clasificarlo como un acuífero libre en medios granulares dichos valores oscilan desde: (CNA 49 1×10^{-1} , CNA 21 5.63×10^{-3} , CNA 51 7.07×10^{-3} , hasta CNA 54 8.74×10^{-3}). La dirección preferencial del flujo subterráneo en el acuífero en medios granulares es del Suroeste a Noreste.

Acuífero en rocas consolidadas.

Este acuífero está constituido por dos formaciones geológicas: Cupido y Aurora, ambos son acuíferos muy importantes en el noreste de México, son la fuente de principal de abastecimiento de agua en las ciudades de Saltillo, Coahuila, la región de los cinco Manantiales (Zaragoza, Allende, Morelos, Nava y Villa Unión) en el estado de Coahuila hay que hacer hincapié de que las unidades hidrogeológicas que son acuíferos en esta región son equivalentes en edad y en ambientes de depósito a las formaciones Aurora y Cupido (Salmon Peak, Mc Knight y West Nueces).

En la ciudad de Monterrey, N. L. el 22% del abastecimiento de agua proviene de las calizas correspondientes a las formaciones: Aurora y Cupido. A partir de los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo en los pozos: CNA 24, CNA 27, CNA 25 y CNA 63 se logró definir que dicho acuífero se comporta como un acuífero libre en medios fracturados, y recarga en forma ascendente al acuífero en medios granulares. El caudal específico en los pozos en el Ejido Santa Teresa de Sofía varía desde 64.17 l/s en el pozo CNA 25, hasta 90 l/s en el pozo CNA 24. El

abatimiento de las pruebas de bombeo en la batería de pozos de Santa Sofía oscila desde 0.48 m. en el sondeo CNA 24 hasta 8.38 m. en el pozo CNA 63.

Los datos sobre estos parámetros en el acuífero en medios granulares son los siguientes: Caudal específico varía desde 95 l/s en los pozos CNA 21 y 49, para el pozos CNA 51 su caudal es de 103.4 l/s y para el pozo CNA 54 su caudal específico es de 105.29 l/s. Sus abatimientos oscilan desde 27.98m en el sondeo CNA 51 hasta 40.08m en el pozo CNA 21.

Los resultados obtenidos de cada una de las pruebas de bombeo realizadas en los sondeos mencionados se muestran en la tabla 6.15.

9.1.6. Modelo geofísico.

Mediante la aplicación de diferentes métodos geofísicos (gravimétricos, magnetométrico y eléctricos) se logró definir la presencia de un sistema de fallas escalonadas a lo largo del Cañón de la Fragua, hasta el Valle del Tablero, mediante la aplicación del método Schlumberger utilizando sondeos eléctricos verticales. La ubicación de éstos sondeos se muestra en la figura 9.1.118.

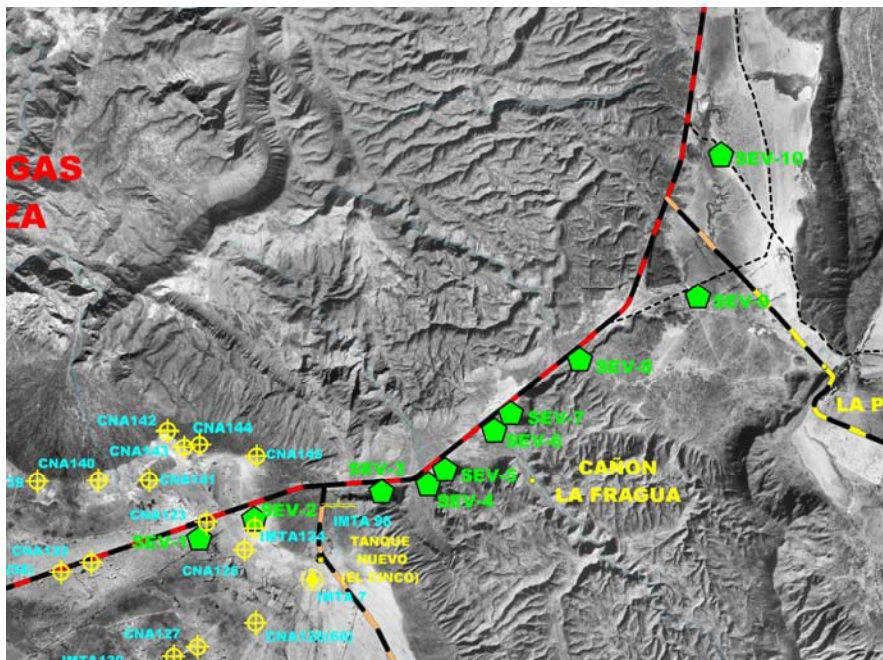


Figura 9.1.119. Se muestra la localización de los SEV en el transeco del valle del Hundido al valle del Tablero.

Mediante la aplicación de los sondeos eléctricos verticales se logró definir la presencia de 9 unidades estratigráficas ubicadas a diferentes niveles.

Los resultados obtenidos después del análisis e interpretación de los datos de campo, nos permitió definir la presencia de 9 unidades estratigráficas las cuales en forma detallada se describen a continuación:

Unidad 1 (U1). Esta constituida por material arcilloso en espesores de 2 a 12 metros con una resistividad de 15-40 Ω -m.

Unidad 2 (U2). Se detectó en el Cañón de la Fragua, con una resistividad de 300-800 Ω -m los espesores reportados oscilan entre 8-12 m. de acuerdo a su resistividad se le clasificó como material calichoso, con alto grado de intemperismo, esta unidad al igual que la anterior está aflorando en el área de estudio.

Unidad 3 (U3). Presenta espesores de 6-12 m. con resistividades que oscilan entre 40-90 Ω -m, se correlaciona con material arcilloso-arenoso con un grado de compactación bajo.

Unidad 4 (U4). Se detectó en los extremos del área de investigación, tanto en el Valle del Hundido como en el del Tablero está constituida por material arcilloso con espesores que varían de 6-21 m. con resistividades del orden de 4- 8 Ω -m, de acuerdo a su resistividad se le consideró un estrato impermeable. En el SEV 7 se detectó a una profundidad de 10m., con un espesor de 38 m.

Unidad 4' (U4') Se detectó en el Valle del Hundido a una profundidad de 32 metros, presenta un espesor de 35 m. presenta una resistividad de 1- 3 Ω -m. se asocia a material arcilloso con alto contenido de sales (evaporizas).

Unidad 5 (U5) Se detectó en el Valle del Hundido, presenta espesores que varían entre 5-11 metros. Presenta una resistividad de 350- 600 Ω -m. Se asocia con gravas y arenas, lo que le da una alta permeabilidad.

Unidad 6 (U6). Se detectó en el Cañón de la Fragua y en el Valle del Tablero, su resistividad varía de 35-100 Ω -m., posee un espesor que oscila entre 10-50 metros. Esta asociado con material de boleo con alto contenido de arcilla, lo que hace que sea impermeable.

Unidad 7 (U7) Se detectó en el Valle del Hundido y en el Cañón de la Fragua, su espesor varía de 17-40 metros. Presenta una resistividad de 250-300 Ω -m., esta asociado con material compuesto por gravas, arenas y arcillas, dándole características de semipermeable.

Unidad 8(U8). Se visualiza a lo largo de toda el área de investigación, con excepción de los SEV,s 3 y 4, a profundidades que oscilan entre 60-100 m., su resistividad es del



orden de 120-200 Ω -m., está asociada con material granular (boleos) y conglomerados, arcillas y arenas, reuniendo las características para ser un estrato permeable, por lo tanto potencialmente explotable.

Unidad 9 (U9) Esta unidad se presenta con resistividades muy altas que oscilan entre 1500-15,000 Ω -m., se detecta en toda el área, su profundidad varía desde 20-90 m. Su espesor va desde 25-65 metros, está asociada con material que presenta intenso fracturamiento, detectándose un sistema de fallas escalonadas a lo largo del cañón, también se detectaron zonas cársticas (cavernas).

Esto tipo de información como la obtenida por métodos gravimétricos y magnetométricos nos permitió confirmar la comunicación entre los valles del Hundido y de Cuatro Ciénegas a través de antiguos carstos los que funcionan como sifones. Esta hipótesis reafirma los criterios establecidos por la Doctora Valeria de Souza en la similitud de las bacterias detectadas en el valle del Hundido y el de Cuatro Ciénegas como los peces clasificados por el Dr. Contreras en el Río Salado los cuales corresponden al mismo género y familia de los que habitan en el Río Nazas.

CAPITULO X

10 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Con el objeto de tener una idea de la cantidad de agua subterránea existente en el valle, se llevó cabo un balance de agua subterránea, el cual tiene una precisión razonable. Para el balance se aplicaron las técnicas para flujo en medios porosos, aún y cuando parte del agua subterránea en la zona se encuentra en un medio cárstico, la mayor parte del acuífero corresponde a un medio granular. Con los datos obtenidos se dedujo que existe continuidad entre el acuífero cárstico y el acuífero granular del valle. El trazo de la configuración de la elevación del nivel estático permitió simular la presencia de un solo sistema acuífero en el valle, que en su mayoría corresponde al granular con recargas o aportes provenientes de las calizas.

10.1 Ecuación de balance

Para la cuantificación de agua subterránea se estableció la ecuación general de balance donde las entradas de agua al sistema son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

Entradas = Salidas + Cambio de almacenamiento..... ecuación (1)

Las entradas son: - Entrada por flujo subterráneo (Es)

Infiltración vertical (Inf)

Las salidas son: - Extracción por bombeo (Ext.)

Cambio de Almacenamiento: - Es el abatimiento del nivel estático (As)

Por lo tanto la ecuación (1) queda como sigue:

$Es + Inf = Ext + As$.

10.2 Entradas por flujo subterráneo

Las entradas de agua al sistema corresponden al aporte por flujo subterráneo o entrada subterránea (Es) proveniente de las infiltraciones que se generan en las estribaciones de las sierras. Hacia la parte plana del valle existe infiltración vertical de agua de lluvia (Inf).

El flujo subterráneo se calculó utilizando la Ley de Darcy, en donde se establece que el caudal "Q" que pasa a través de una sección de terreno es igual a la transmisividad "T" del material por la longitud "b" del área considerada, multiplicada a su vez por el gradiente hidráulico "i" ($Q = Tbi$).

Al pie de las sierras que limitan al valle, se trazaron celdas para el cálculo de la entrada de agua subterránea. Cada celda corresponde al área delimitada entre dos curvas equipotenciales y dos líneas de corriente.

Transmisividad.- "T" es la capacidad de un medio para permitir el flujo de agua bajo un gradiente unitario. Este dato se obtuvo de pruebas de bombeo y se caracteriza por presentar valores del orden de 0.001 a 0.0001 m²/s para el Valle del Hundido.

Ancho de las celdas.- El ancho "b" de cada una de las celdas utilizadas para el cálculo del flujo subterráneo se obtuvo directamente del plano de elevación del nivel estático, donde se delimitan las celdas.

Gradiente hidráulico.- El gradiente hidráulico “i” es igual a la diferencia entre las equipotenciales que limitan a cada celda dividida entre la longitud de la misma.

Caudal de entrada de agua subterránea.- El cálculo del agua que fluye en una celda se calcula por medio de la Ley de Darcy, que indica que el caudal de agua que pasa a través de ella es igual a la transmisividad por el largo de la celda y multiplicado por el gradiente hidráulico. La suma del flujo que pasa a través de las celdas que corresponden a la entrada por flujo subterráneo hacia el Valle del Hundido, asciende a 17.28 Mm3/año.

Salidas de agua (extracción por bombeo)

En el Valle del Hundido la única salida de agua subterránea es por bombeo y asciende a 21.6×10^6 M3/año.

Cambio de almacenamiento

El diferencial entre la entrada de agua subterránea a los acuíferos (Es) y su salida (Ext), se refleja en el cambio del nivel estático. Se calculó el cambio de almacenamiento $\Delta V(s)$ de la evolución anual, la cual se obtuvo multiplicando el área entre las curvas del plano de evolución, por el abatimiento registrado. La suma de ellas (áreas multiplicadas por evolución), dio un volumen anual de la variación del nivel estático.

Por otra parte, del volumen obtenido una parte corresponde a los sólidos que constituyen el medio y otra parte al agua que contenían los intersticios. El porcentaje que corresponde a intersticios y que equivale a la cantidad de agua, se denomina coeficiente de almacenamiento, el cual es deducido a partir de pruebas de bombeo, así como de los tipos de rocas y de las condiciones en que se encuentra el acuífero. En los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es del orden de 0.03 como fue el caso de Valle del Hundido.

La variación de almacenamiento se calculó multiplicando el volumen de la evolución del nivel estático, por el coeficiente de almacenamiento, el cual resultó para el Valle del Hundido -1.87×10^6 M3/año.

Infiltración

Para calcular la infiltración vertical sobre el valle, se planteo la ecuación de balance.

$$Es + Inf = Ext + As$$

Se sustituyeron los valores conocidos y se despejó la infiltración, la cual resultó de 2.45×10^6 M3/año.

Resumen de resultados

Los datos del balance de agua subterránea en el Valle El Hundido se presentan a continuación:

Entradas por flujo subterráneo = 17.28×10^6 M3/año

Infiltración en el Valle = 2.45×10^6 M3 (deducida)

Extracción por bombeo = 21.6×10^6 M3/año

Salidas subterráneas = 0

Cambio de almacenamiento = -1.87×10^6 M3/año

10.3 Disponibilidad

Para el cálculo de la disponibilidad del agua subterránea, se aplica el procedimiento indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas establece la expresión siguiente:

$$DPO = RTA - VEC - DNC.$$

Donde:

DPO. Disponibilidad oficial de agua.

RTA. Recarga total actual.

VEC. Volumen de extracción concesionado.

DNC. Descarga natural comprometida.

Recarga total media anual

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, que para el acuífero El Hundido es de 19.73 millones de metros cúbicos por año.

10.4 Disponibilidad de aguas subterráneas

La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología indicada en la norma referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA:

$$-1.870,000 = 19; 730,000 - 0 - 21,600, 000$$

La cifra -1; 870,000 indica que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada acuífero El Hundido en el Estado de Coahuila.

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

Debido a que la región se encuentra actualmente en condición geohidrológica de sobreexplotación, se convierte en una seria amenaza para el desarrollo sustentable si no se adoptan las medidas necesarias para su protección. Esta situación obliga a que la Comisión Nacional del Agua realice las gestiones necesarias para declarar "causa de utilidad pública", la conservación del agua subterránea del acuífero El Hundido, para prevenir o remediar la sobreexplotación y evitar que el recurso subterráneo se agote, lo que obliga, de conformidad con los artículos 19 y 38 de la LAN, a imponer el control de las extracciones de aguas subterráneas, de su utilización y a acatar las disposiciones que el Ejecutivo Federal dicte al respecto, en los términos de lo dispuesto en la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, esto es, la declaratoria de veda y posteriormente, su reglamentación.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del análisis de la información geológica, geohidrológica, geoquímica, isotópica, geofísica, hidrología subterránea, hidráulica de pozos y la aplicación del Método DRASTIC para determinar el grado de vulnerabilidad en el acuífero del Valle del Hundido, se establecieron las siguientes conclusiones las que se describen a continuación.

Estratigráficas.

- La Formación Cupido no aflora en el área del cañón, se encuentra coronando las partes altas de La Sierra de San Marcos el Pino y en la parte central de la Sierra el Granizo, presenta gran contenido de fósiles (caprínidos y rudistas).
- La Formación Aurora en campo se presenta como una caliza masiva de textura micrítica, fracturada con cavidades por disolución.
- La Formación Georgetown en campo presenta cavidades por disolución, el fracturamiento en las rocas es de dos tipos: primario y secundario el primero esta ligado a esfuerzos compresivos, el segundo esta vinculado a procesos de reemplazamiento secundario.

Estructurales

El modelo geodinámico de cuña es válido para la cuenca de Sabinas como para la Sierra Madre Oriental. 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. 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, su prolongación es mayor, siendo 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 concluye lo siguiente:

La Sierra de la Fragua se sobre pone 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.

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 del 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, dando lugar a cabalgamientos, además los resultados 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.

Presencia de evaporitas en dos niveles, Formación Minas Viejas del Jurásico Inferior y Formación Acatita del Cretácico Inferior.



Rocas clásticas y carbonatadas, las cuales conforman la 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.

Los resultados preliminares de geofísica nos 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 que conforma un sistema de fallas escalonadas.

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, 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, producto del último evento orogénico ocurrido en el Eoceno.

La Sierra de la Fragua se sobre pone 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.

Geohidrológicas.

Los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo de larga duración (72 horas) en los pozos: CNA 24, CNA 27, CNA 25 y CNA 63 ubicados en el Ejido Santa Teresa de Sofía y los localizados en el Rancho San Fernando (CNA 54, CNA 49, CNA 51 y CNA 21) los objetivos establecidos sobre el comportamiento hidráulico del acuífero fueron determinados totalmente, se logró definir la presencia de dos acuíferos uno en medios granulares y el otro en rocas consolidadas.

El acuífero en medios granulares esta estrechamente relacionado con depósitos aluviales y de pie de monte, eólicos y evaporíticos, la recarga de este acuífero es a través de la Falla de San Marcos la cual tiene una longitud de 300 Km. En la parte sur poniente del Valle del Hundido se observa muy claramente el abanico aluvial, en



contacto con la falla de San Marcos, también se logró comprobar que el acuífero granular es recargado en forma ascendente por el acuífero profundo a través de fracturas, en algunos pozos se logró observar flujos ascendentes (Pozo CNA 125). Los parámetros hidráulicos obtenidos de los datos de campo en cada una de las pruebas de bombeo en el Rancho San Fernando; a partir de los valores obtenidos del Coeficiente de Almacenamiento (S) en los pozos anteriormente mencionados se logró clasificarlo como un acuífero libre en medios granulares dichos valores oscilan desde: (CNA 49 1×10^{-1} , CNA 21 5.63×10^{-3} , CNA 51 7.07×10^{-3} , hasta CNA 54 8.74×10^{-3}). La dirección preferencial del flujo subterráneo en el acuífero en medios granulares es del Suroeste a Noreste.

Acuífero en rocas consolidadas.

Este acuífero está constituido por dos formaciones geológicas: Cupido y Aurora, ambos son acuíferos muy importantes en el noreste de México, son la fuente de principal de abastecimiento de agua en las ciudades de Saltillo, Coahuila, la región de los cinco Manantiales (Zaragoza, Allende, Morelos, Nava y Villa Unión) en el estado de Coahuila hay que hacer hincapié de que las unidades hidrogeológicas que son acuíferos en esta región son equivalentes en edad y en ambientes de depósito a las formaciones Aurora y Cupido/ (Salmon Peak, Mc Knight y West Nueces).

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo en los pozos: CNA 24, CNA 27, CNA 25 y CNA 63 se logró definir que dicho acuífero se comporta como un acuífero libre en medios fracturados, y recarga en forma ascendente al acuífero en medios granulares. El caudal específico en los pozos en el Ejido Santa Teresa de Sofía varía desde 64.17 l/s en el pozo CNA 25, hasta 90 l/s en el pozo CNA 24. El abatimiento de las pruebas de bombeo en la batería de pozos de Santa Sofía oscila desde 0.48 m. en el sondeo CNA 24 hasta 8.38 m. en el pozo CNA 63.

Los datos sobre estos parámetros en el acuífero en medios granulares son los siguientes: Caudal específico varía desde 95 l/s en los pozos CNA 21 y 49, para el pozo CNA 51 su caudal es de 103.4 l/s y para el pozo CNA 54 su caudal específico es de 105.29 l/s. Sus abatimientos oscilan desde 27.98 m en el sondeo CNA 51 hasta 40.08 m en el pozo CNA 21.

Los resultados obtenidos de cada una de las pruebas de bombeo realizadas en los sondeos mencionados se muestran en la tabla 6.15.

Hidrogeoquímicas.

El estudio de la relación 18O Oxígeno/ Deuterio (2H) indican que las variaciones isotópicas están íntimamente ligadas con la cantidad de precipitación caída en la zona. Así, la composición isotópica de las precipitaciones de mayor intensidad presenta composiciones isotópicas más ligeras respecto a las precipitaciones más reducidas, que presentan en algunos casos fraccionamiento por evaporación. El efecto en la cantidad de precipitación en la composición isotópica de la misma estaría asociado al



intercambio isotópico durante la precipitación, el cual se produce por la diferencia entre la composición isotópica de las gotas de lluvia y la humedad ambiental; en el caso de las lluvias de menor intensidad existe un gradiente con la humedad del ambiente capaz de producir evaporación en las gotas de lluvia.

Las muestras de agua subterránea presentan una composición isotópica más negativa por lo que no se descarta la existencia de aguas connatas, las pequeñas concentraciones de Tritio determinadas en todas las muestras, hacen suponer que la recarga es anterior al año de 1960.

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 18O se confirma que 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.

Modelo conceptual hidrogeológico.

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.

Pleistoceno Tardío: Durante dos períodos glaciales hace aproximadamente 40,000 años el Río Nazas estaba conectado con el Río Salado, la presencia de peces del Río Nazas han sido detectados en el cauce del Salado (Contreras, 1988). Los análisis de DNA realizados por la Dra. Valeria de Souza en los valles del Hundido, Cuatro Ciénegas y Calaveras en bacterias el genotipo de éstas esta muy estrechamente ligado. Los escurrimientos del Río Nazas en el Pleistoceno fluían a través de un sistema de lagos inter-montanos que comunicaban entre si los valles del Sobaco, Hundido, El Tablero y Cuatro Ciénegas, semejante a un sistema de tanques todos conectados entre sí mediante antiguos carstos los que se comportaban hidráulicamente como sifones.

La mezcla de dos ambientes de depósito causó la formación de diferentes tipos de agua, relíctos de agua fósil (connata) de formación quedaron reemplazados por la



intrusión secundaria de agua. Anteriormente al evento de infiltración, fracciones de agua marina fueron afectados por procesos de evaporación en un ambiente lacustre del tipo sabkha, causando la formación de aguas con altas concentraciones de cloro.

El mecanismo de que dieron origen a estos depósitos, frecuentemente está asociado con la evaporación, procesos que permiten la sedimentación de precipitados químicos. Dentro de estos minerales precipitados normalmente de esta manera se presenta la halita (cloruro de sodio, Na Cl), que es el componente principal de la sal gema y el yeso (sulfato cálcico hidratado, $\text{Ca SO}_4 \cdot \text{H}_2 \text{O}$). En el pasado geológico la zona de estudios eran cuencas, sumergidas bajo brazos someros de un mar que tenía conexión con el océano abierto; bajo estas condiciones, el agua de mar entraba continuamente en la bahía para sustituir el agua perdida por evaporación. Finalmente el agua de la bahía se saturaba y se iniciaba la deposición de sal; estos depósitos se les conoce con el nombre de evaporitas en el diagrama anexo se muestra este proceso. Dicho proceso de sedimentación se muestra en la figura 9.1.113.

Los escurrimientos del Río Nazas en el Pleistoceno fluían a través de un sistema de lagos inter-montanos que comunicaban entre si los valles del Sobaco, Hundido, El Tablero y Cuatro Ciénegas, semejante a un sistema de tanques todos conectados entre sí mediante antiguos carstos los que se comportaban hidráulicamente como sifones.

Otra herramienta que se que se aplicó para definir la dirección del flujo subterráneo del agua fue la información geoquímica (figuras). Con éste propósito se elaboraron las configuraciones de STD y de conductividad, esto nos permitió definir la dirección preferencial de los flujos subterráneos desde su zona de recarga, lográndose zonificar áreas donde las concentraciones de sales son mayores, estas concentraciones de sales por encima de los esperado tienen una respuesta muy lógica la cual fue descrita anteriormente al definir el mecanismo de formación de los depósitos salinos en el Valle del Hundido (figura 7.4.78.)

En la configuración de S. T. D se observó que los valores se van incrementando hacia la parte central del valle del Hundido del Noroeste hacia el Sur este del valle, en esta configuración se logró definir la dirección preferencial del flujo subterráneo, el cual coincide también con las configuraciones de isopropundidad nivel estático del acuífero como con la isoelevación nivel estático, su tendencia es hacia la salida al Cañón de la Fragua, este mismo comportamiento se muestra en el modelo geohidrológico conceptual del acuífero en el Valle del Hundido. Plano de S. T. D. Los valores de sólidos totales disueltos 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.

Modelo geofísico.

La aplicación de diferentes métodos geofísicos (gravimétricos, magnetométrico y eléctricos) nos permitió definir la presencia de un sistema de fallas escalonadas a lo largo del Cañón de la Fragua, hasta el Valle del Tablero.

Mediante la aplicación de los sondeos eléctricos verticales se logró definir la presencia de 9 unidades estratigráficas ubicadas a diferentes niveles.

Mediante los SEV se determinan las resistividades de las distintas capas horizontales o sub-horizontales del subsuelo, midiendo diferencias de potencial. Durante la realización del trabajo de geoelectrica, los resultados se integraron en tres perfiles:

Perfil 1.- Esta constituido por los SEV,s 1 y 2 dicho SEV se realizó en el Valle del Hundido.

Perfil 2.- Esta integrado por los SEV,s 3, 4, 5, 6,7 y 8. Esta ubicado sobre el Cañón de La Fragua.

Perfil 3.- Comprende los SEV,s 9 y 10 y se ubican en el Valle del Tablero.

Los resultados obtenidos después del análisis e interpretación de los datos de campo, nos permitió definir la presencia de 9 unidades estratigráficas las cuales en forma detallada se describen a continuación:

Unidad 1 (U1). Esta constituida por material arcilloso en espesores de 2 a 12 metros con una resistividad de 15-40 Ω -m.

Unidad 2 (U2). Se detectó en el Cañón de la Fragua, con una resistividad de 300-800 Ω -m los espesores reportados oscilan entre 8-12 m. de acuerdo a su resistividad se le clasificó como material calichoso, con alto grado de intemperismo, esta unidad al igual que la anterior está aflorando en el área de estudio.

Unidad 3 (U3). Presenta espesores de 6-12 m. con resistividades que oscilan entre 40-90 Ω -m, se correlaciona con material arcilloso-arenoso con un grado de compactación bajo.

Unidad 4 (U4). Se detectó en los extremos del área de investigación, tanto en el Valle del Hundido como en el del Tablero está constituida por material arcilloso con espesores que varían de 6-21 m. con resistividades del orden de 4- 8 Ω -m, de acuerdo a su resistividad se le consideró un estrato impermeable. En el SEV 7 se detectó a una profundidad de 10m., con un espesor de 38 m.

Unidad 4' (U4') Se detectó en el Valle del Hundido a una profundidad de 32 metros, presenta un espesor de 35 m. presenta una resistividad de 1- 3 Ω -m.



Se asocia a material arcilloso con alto contenido de sales (evaporizas).

Unidad 5 (U5) Se detectó en el Valle del Hundido, presenta espesores que varían entre 5-11 metros. Presenta una resistividad de 350- 600 Ω -m. Se asocia con gravas y arenas, lo que le da una alta permeabilidad.

Unidad 6 (U6). Se detectó en el Cañón de la Fragua y en el Valle del Tablero, su resistividad varía de 35-100 Ω -m., posee un espesor que oscila entre 10-50 metros. Esta asociado con material de boleó con alto contenido de arcilla, lo que hace que sea impermeable.

Unidad 7 (U7) Se detectó en el Valle del Hundido y en el Cañón de la Fragua, su espesor varía de 17-40 metros. Presenta una resistividad de 250-300 Ω -m., esta asociado con material compuesto por gravas, arenas y arcillas, dándole características de semipermeable.

Unidad 8(U8). Se visualiza a lo largo de toda el área de investigación, con excepción de los SEV,s 3 y 4, a profundidades que oscilan entre 60-100 m., su resistividad es del orden de 120-200 Ω -m., está asociada con material granular (boleos) y conglomerados, arcillas y arenas, reuniendo las características para ser un estrato permeable, por lo tanto potencialmente explotable.

Unidad 9 (U9) Esta unidad se presenta con resistividades muy altas que oscilan entre 1500-15,000 Ω -m., se detecta en toda el área, su profundidad varía desde 20-90 m. Su espesor va desde 25-65 metros, está asociada con material que presenta intenso fracturamiento, detectándose un sistema de fallas escalonadas a lo largo del cañón, también se detectaron zonas cársticas (cavernas). Esto tipo de información como la obtenida por métodos gravimétricos y magnetométricos nos permitió confirmar la comunicación entre los valles del Hundido y de Cuatro Ciénegas a través de antiguos carstos los que funcionan como sifones.

Esta hipótesis reafirma los criterios establecidos por la Doctora Valeria de Souza en la similitud de las bacterias detectadas en el valle del Hundido y el de Cuatro Ciénegas como los peces clasificados por el Dr. Contreras en el Río Salado los cuales corresponden al mismo género y familia de los que habitan en el Río Nazas.

Método DRASTIC.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del Método DRASTIC en el acuífero del Valle del Hundido, con aplicación de valores de datos ponderados, para cada una de las variables que intervienen en el modelo, considerando que, esta metodología trabaja bajo el supuesto de que los contaminantes presentan un proceso de dispersión desde la superficie hasta el interior del suelo, este no considera la naturaleza del contaminante; es decir el índice de vulnerabilidad establece solo



condiciones físicas, químicas y topográficas de donde esta contenido el acuífero; a partir de estos criterios se logró concluir los siguiente:

Se establecieron clase con rangos similares para la clasificación de la vulnerabilidad relativa en intervalos de 9, 12, 5 y 14 unidades con frecuencias de aparición de 52, 36, 19 y 14 respectivamente.

El estudio permitió establecer la zonificación índice de vulnerabilidad dentro del Valle del Hundido.

El riego prolongado en los cultivos de alfalfa, influyen de manera directa en la percolación de contaminantes al acuífero al ser aplicados fertilizantes.

Los resultados muestran que el **50.99%** de la zona se encuentra clasificada como **vulnerabilidad Media Alta** y el **15.50%** como **vulnerabilidad Alta**.

RECOMENDACIONES.

Es necesario llevar a cabo un monitoreo en el Valle del 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.

A fin de determinar la comunicación entre ambos valles se recomienda la perforación de tres barrenos exploratorios en diámetro de 3 ½" con corona de diamante; con recuperación de núcleos durante el proceso de perforación. Los sitios indicados para la realización de las perforaciones corresponden a los SEV 3, 4 y 5. Las muestras recuperadas, nos permitirán establecer los contactos formacionales de cada unidad estratigráfica correspondientes a la Formación Aurora, Peña y Cupido; a la vez los sondeos nos ayudarán a establecer la presencia de niveles piezométricos si existen en el tramo del Cañón de la Fragua con el Valle del Tablero.

BIBLIOGRAFÍA

- 1- Appelo, C.A.J. y Postma, D. (1993): Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema. Amsterdam.
- 2- Bartolini C, Richard T, Buffler, Cantu C A, 2001: The Western Gulf of Mexico Basin, Tectonic, Sedimentary Basin and Petroleum System., 473 pp.
- 3- Birkle P, 2001: Invasiones de aguas profundas en yacimientos petroleros del Golfo de México: un reto para la aplicación de isótopos ambientales, pp 172-179
- 4- Brouste, L., Marlin, C. y Dever, L. (1997). Geochemistry and residence time estimation of groundwater from the upper aquifer of the Chihuahua desert (Comarca Lagunera, Northern Mexico). Applied Geochemistry. 12: 775-786.
- 5- Clark, I. y Fritz, P. (1997): Environmental isotopes in hydrology. New York.
- 6- Craig, H. (1961): Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen- 18 in natural waters. Science, 133: 1833-1834.
- 7- Custodio, E. (1974a): Flujo de agua subterránea y existencia de un nivel de saturación en las formaciones volcánicas de la Isla de Lanzarote (Islas Canarias, España). En Simposio Internacional Sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos. Arrecife. Vol. 1: 185-215.
- 8- Custodio, E. (1991). La interpretación hidrogeoquímica como herramienta de estudio de valoración de sistemas acuíferos; aspectos metodológicos generales. En Hidrología, estado actual y perspectiva. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona: 121-162.
- 9- Custodio, E. (1997): Salinidad de la recarga: problemática, evaluación y efectos diferidos. En La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. Asoc. Intern. Hidrogeólogos-Grupo Español: 181-208.
- 10- Custodio, E.; Llamas, M. R. (1983): Hidrología Subterránea. Editorial Omega. Barcelona (2 Vols): 1-2350.



- 11-Chávez-Cabello, G. La Falla de San Marcos: una estructura jurásica de basamento multireactivada del noreste de México.
- 12-Davis, J. (1973): Statistics and data analysis in geology. John Wiley y Sons: 1-550.
- 13-Dincer, T. (1980): Use of environmental isotopes in arid-zone hydrology. In Arid-Zone Hydrology: Investigations with Isotope Techniques (Proc. Panel Vienna, 1978), IAEA, Vienna, 23-30.
- 14-Forti P, Giulivo I, Piccini L, Tedechis R, 2003: The karst aquifer feeding the Cuatro Ciénegas pools (Coahuila, Mexico) its vulnerability and safeguard. Aquifer Vulnerability and Risk 1st International Workshop. Vol. 2, p. 287-299
- 15-Gonfiantini, R. (1988). Los Isótopos Ambientales en el Estudio de la Intrusión Marina.
- 16-Johnson E E, 1975: El Agua Subterránea y los Pozos, 513 pp.
- 17-Kaymakci N, 2006: Kinematic development and paleostress of the Denizli Basin (Western Turkey): implications of spatial variation of relative paleostress magnitudes and orientations, 16 pp.
- 18-Lenhmann C, Osterger D A, Mantanez I P, Stiler W, Arnand Vannean A, Banner J, 1999: Evolution of Cupido and Coahuila carbonate platform, Early Cretaceous northeastern Mexico. Geol. Soc. of Am. Bull., Vol. 111, No 7, pp. 1010-1029
- 19-Lesser, J. M. y Asociados. Estudio Hidrogeológico en los Valles del Hundido, Cuatro Ciénegas y Ocampo, Coahuila.
- 20-Mazor E, 1991: Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, pp. 274.
- 21-McKee J W, Jones N W, Long L E, 1990: Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, Mexico. Geol. Soc. of Am. Bull., Vol. 102, pp. 593-614
- 22-Moral, S., Pulido, A. y Valenzuela, P. (1984): Aplicación de los análisis “cluster” al estudio de características físico-químicas de aguas subterráneas. Estudios Geológicos, 40: 193-200.



- 23-Piper, A. M. (1953): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. U. S. Geological Survey Groundwater, Note 12: 1-14.
- 24-Rodríguez M J M, Yutis V, Arriaga Díaz de León L E, 2004: The geologic framework and structure of Valle del Hundido and its communication with Cuatro Ciénegas. Área de Protección de Flora y Fauna Cuatro Ciénegas, Coahuila, Mexico. Memorias. Del Congreso, p.9
- 25-Souza V, Espinoza A L, Escalante A, Farmer J, Rodríguez M J M, Eguiarte L E, Soberón X, Elser J J, 2004: Marine Jurassic microbes in a continental karst setting and their implications for ecosystem conservation Congreso de Investigación Cuatro Ciénegas, Coahuila, Mexico. Memorias. Del Congreso, pp. 2
- 26-White B, 1988: Geomorphology and hydrology of karst terrains Ed. New York Oxford p. 459