

### LISTA DE PARTICIPANTE

Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez (Supervisión general y modelación matemática)

Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares (Coordinación e hidrología superficial)

M. C. Carlos Gutiérrez Ojeda (Hidrogeologia)

M. C. Manuel Martinez Morales (Geologia, geofísica y modelación matemática)

Fis. Luis González Hita (Hidrología isotópica e hidrogeoquímica)

Dra. Graciela Herrera Zamarró (Modelación matemática)

Fís. Ismael Mata Arellano (Hidrología isotópica e hidrogeoquímic

Dr. Miguel Ángel Mejía González (Modelación matemática)

Ing. Gerardo Ortiz Flores (Hidráulica superficial y subterránea)

Ing. Pablo Gallardo Almanza (Climatología)

Dr. René Lobato Sánchez (Climatología y meteorología)

Dr. José Luis Pérez López (Climatología y meteorología)

M. I. Guillermo Reza Arzate (Meteorología)

Asesores

Dr. Peter Fritz

Isotopia ambien<mark>tal e hidrogeoquímica)</mark> IFZ-Contro de Investigaciones Ambientale<mark>s Alemania</mark>

Dr. Joel Ramirez Espinoza Tectónica y geología estructural (Tocton Director de la Escuela de Ciencias de la Universidad Aut<mark>onoma de Guerrere</mark>

y geología estructural)

### CONTENIDO

### **RESUMEN EJECUTIVO**

1.	GEN	IERAL	IDADES	1
	1.1.	Antec	edentes	1
	1.2.	Objeti	ivos del estudio	1
	1.3.	Estud	lios previos	2
	1.4.	Área d	de estudio	17
		1.4.1	Localización de la zona de estudio	17
		1.4.2	Extensión	19
		1.4.3	Vías de comunicación	20
		1.4.4	Actividades económicas	21
		1.4.5	Servicios	21
		1.4.6	Área de Protección de Flora y Fauna	21
2.	MET	ODOL	OGÍA	24
	2.1.	Activi	dades de campo	24
		2.1.1	Recopilación de la información obtenida	24
		2.1.2	Recorridos de campo	24
		2.1.3	Sondeos exploratorios	24
		2.1.4	Mediciones de niveles piezométricos	25
		2.1.5	Análisis químico y fisicoquímico de muestras de agua	25
		2.1.6	Selección de pozos piloto para su instrumentación	26
3.	FISI	OGRA	FIA	27
	3.1.	Fisiog	prafía	27
		3.1.1	Provincias Fisiográficas	27
		3.1.2	Hidrología	29
			3.1.2.1 Hidrología del Valle de El Hundido	29
			3.1.2.2 Hidrología del Valle de Cuatrociénegas	32
			3.1.2.3 Ríos, pozas y lagunas	35
			3.1.2.4 Infraestructura Hidráulica	37
		3.1.3		38
			3.1.3.2 Analisis de sequias	41
				40
		0 4 4		48
		3.1.4		50
4	000	3.1.5	vegetación y fauna	51
4.	GEC			52
	4.1.	Geolo	ogia	52
		4.1.1		53
		4.1.2		.53
		4.1.3	Estratyralla	
		4.1.4	Paleogeografia	
		4.1.5		

		4.1.6	Geología estructural	64
	4.2.	Geofí	sica	68
		4.2.1	Métodos electromagnéticos	68
			4.2.1.1 Método TDĚM o TEM	68
			4.2.1.2 Ventajas del método TEM	70
	4.3.	Proce	esamiento de los datos	70
		4.3.1	Modelo suavizado	70
		4.3.2	Modelo unidimensional	71
		4.3.3	Localización de los TEM	71
	4.4.	Resu	ltados	73
		4.4.1	Perfiles geoeléctricos	74
			4.4.1.1 Perfiles geoeléctricos del Valle de El Hundido	74
			4.4.1.2 Perfiles geoeléctricos del Valle de Cuatrociénegas	77
		4.4.2	Mapas de resistividad	81
5.	HIDI	ROGE	OLOĠÍA	95
	5.1.	Cens	o de aprovechamientos, hidrometría y piezometría	95
		5.1.1	Censo de aprovechamientos	95
		5.1.2	Hidrometría de las captaciones de agua subterránea	98
	5.2.	Nivela	ación de brocales	98
	5.3.	Config	guración del nivel estático	100
		5.3.1	Configuración de la elevación del nivel estático	101
		5.3.2	Curvas de igual profundidad al nivel estático	106
		5.3.3	Curvas de igual evolución del nivel estático en m	108
		5.3.4	Red de flujo subterráneo	111
	5.4.	Carac	cterización hidráulica mediante pruebas de bombeo	113
		5.4.1	Desarrollo de las pruebas de bombeo	113
		5.4.2	Sitio de estudio, pozos de bombeo y pozos de observación	113
		5.4.3	Duración de las pruebas Inyección y bombeo e intervalos	
			de medición	114
		5.4.4	Requerimientos técnicos necesarios previos a la prueba de	
			bombeo	119
		5.4.5	Operación de aprovechamientos cercanos durante el	
			desarrollo de las pruebas de bombeo	119
		5.4.6	Revisión y calibración del equipo	119
		5.4.7	Descripción de las pruebas de bombeo	120
		5.4.8	Análisis de los datos de campo	122
		5.4.9	Interpretación de las pruebas de bombeo por métodos	
			tradicionales	127
		5.4.10	) Resultados de la interpretación	144
	5.5.	Selec	ción de pozos piloto para su interpretación	145
		5.5.1	Red de monitoreo El Hundido	145
		5.5.2	Red de monitoreo de Cuatrociénegas	147
	5.6.	Sond	eos exploratorios	148
		5.6.1	Localización	149
		5.6.2	Objetivo	149
		5.6.3	Perforación de los barrenos	149
		5.6.4	Limpieza de los barrenos	149

5.6.6       Terminado de los barrenos       14         5.6.7       Resultados de la exploración       15         6.       MODELO       CONCEPTUAL       DE       FUNCIONAMIENTO         HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO       15       15       6.1.       Definición de la red de muestreo en pozos activos e inactivos (perfiles)       15         6.1.       Definición de la red de muestreo en pozos activos e inactivos (perfiles)       15         6.2.1       Celda de aislamiento       15         6.2.2       Conductividad eléctrica y temperatura       16         6.2.3       Actividad de los iones hidrógeno (pH)       16         6.2.4       Registro del potencial redox       16         6.2.5       Registro del oxígeno disuelto       16         6.2.6       Registro de la alcalinidad       16         6.2.7       Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura       16         6.3.       Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico       17         6.4.       Análisis isotópicos de muestras de agua en laboratorio       17         6.5.1       Isótopos estables       18         6.5.2       Tritio ambiental       18         6.5.3       Carbono 14       18         6.6.	149 150 TO 152 vos 152 p155 160 160 161 161 161 163 les, 171 en 178 178 180 180 180 180 180 180 180 180 180 190 190 190
5.6.7 Resultados de la exploración       15         6. MODELO       CONCEPTUAL       DE       FUNCIONAMIENTO         HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO       15         6.1. Definición de la red de muestreo en pozos activos e inactivos (perfiles)       15         6.2. Mediciones in situ del comportamiento físico-químico del acuífero       15         6.2.1 Celda de aislamiento       15         6.2.2 Conductividad eléctrica y temperatura       16         6.2.3 Actividad de los iones hidrógeno (pH)       16         6.2.4 Registro del potencial redox       16         6.2.5 Registro del oxígeno disuelto       16         6.2.6 Registro de la alcalinidad       16         6.2.7 Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura       16         6.3. Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico       17         6.4. Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio       18         6.5.1 Isótopos estables       18         6.5.2 Tritio ambiental       18         6.5.3 Carbono 14       18         6.6.1 Geoguímica       18	150 TO 152 vos 152 0152 155 156 160 160 161 161 161 162 163 <i>les,</i> 171 <i>en</i> 180 180 180 183 185 189 189 189
6. MODELO       CONCEPTUAL       DE       FUNCIONAMIENTO         HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO       15         6.1. Definición de la red de muestreo en pozos activos e inactivos (perfiles)       15         6.2. Mediciones in situ del comportamiento físico-químico del acuífero       15         6.2.1 Celda de aislamiento       15         6.2.2 Conductividad eléctrica y temperatura       16         6.2.3 Actividad de los iones hidrógeno (pH)       16         6.2.4 Registro del potencial redox       16         6.2.5 Registro del oxígeno disuelto       16         6.2.6 Registro de la alcalinidad       16         6.2.7 Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura       16         6.3. Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico       17         6.4. Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio       17         6.5.1 Isótopos estables       18         6.5.2 Tritio ambiental       18         6.5.3 Carbono 14       18         6.6.1 Interpretación       18         6.6.1 Geoquímica       18	TO 152 vos 152 155 156 160 161 161 161 161 161 162 171 en 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 180 190 190 190
HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO.       15         6.1. Definición de la red de muestreo en pozos activos e inactivos (perfiles).       15         6.2. Mediciones in situ del comportamiento físico-químico del acuífero.       15         6.2.1 Celda de aislamiento.       15         6.2.2 Conductividad eléctrica y temperatura       16         6.2.3 Actividad de los iones hidrógeno (pH).       16         6.2.4 Registro del potencial redox.       16         6.2.5 Registro del oxígeno disuelto.       16         6.2.6 Registro de la alcalinidad.       16         6.2.7 Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura.       16         6.3. Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico.       17         6.4. Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio.       17         6.5.1 Isótopos estables       18         6.5.2 Tritio ambiental       18         6.5.3 Carbono 14       18         6.6. Interpretación.       18         6.6. I Geoquímica       18	152 vos 152 155 156 160 160 161 161 161 162 163 les, 171 en 178 180 180 180 183 185 189 189 190
6.1. Definición de la red de muestreo en pozos activos e inactivos (perfiles)	vos 152 p155 156 160 161 161 161 161 162 163 <i>les,</i> 171 <i>en</i> 178 180 180 180 185 189 189 190
(perfiles)	152 155 156 160 161 161 161 161 161 161 161 161 163 171 en 178 180 
6.2. Mediciones in situ del comportamiento físico-químico del acuífero	D155 156 160 161 161 161 162 163 <i>les,</i> 171 <i>en</i> 178 180 180 180 185 189 189 190
6.2.1       Celda de aislamiento	156 
6.2.2       Conductividad eléctrica y temperatura       16         6.2.3       Actividad de los iones hidrógeno (pH)       16         6.2.4       Registro del potencial redox       16         6.2.5       Registro del oxígeno disuelto       16         6.2.6       Registro de la alcalinidad       16         6.2.7       Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura       16         6.3.       Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico       17         6.4.       Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio       17         6.5.       Análisis isotópicos de muestras de agua en laboratorio       18         6.5.1       Isótopos estables       18         6.5.2       Tritio ambiental       18         6.5.3       Carbono 14       18         6.6.       Interpretación       18         6.6.1       Geoguímica       18	
6.2.3       Actividad de los iones hidrógeno (pH)	160 161 162 163 <i>les,</i> 171 <i>en</i> 178 178 180 180 180 185 189 189 189 190
6.2.4       Registro del potencial redox	161 161 162 163 <i>les,</i> 171 <i>en</i> 178 180 180 180 180 183 185 189 189 190
6.2.5       Registro del oxígeno disuelto       16         6.2.6       Registro de la alcalinidad       16         6.2.7       Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura       16         6.3.       Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico       17         6.4.       Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio       17         6.5.       Análisis isotópicos de muestras de agua en laboratorio       18         6.5.1       Isótopos estables       18         6.5.2       Tritio ambiental       18         6.5.3       Carbono 14       18         6.6       Interpretación       18         6.6       1       Geoguímica       18	161 
6.2.6       Registro de la alcalinidad       16         6.2.7       Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura       16         6.3.       Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico       17         6.4.       Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio.       17         6.5.       Análisis isotópicos de muestras de agua en laboratorio.       18         6.5.1       Isótopos estables       18         6.5.2       Tritio ambiental       18         6.5.3       Carbono 14       18         6.6       Interpretación       18         6.6       1       Geoguímica       18	162 
6.2.7       Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura	
<ul> <li>6.3. Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico</li></ul>	les, 171 en 178 178 180 183 185 189 189 189 190
<ul> <li>b.e. Indestree para er analisis químice (fones mayoritaries, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico</li></ul>	171 en 178 180 180 180 185 189 189 190
<ul> <li>6.4. Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio</li></ul>	en 178 180 180 183 185 189 189 190
0.4. Analisis quintees y histoquinices de muestras de agua en laboratorio	
6.5. Análisis isotópicos de muestras de agua en laboratorio	
6.5.1       Isótopos estables       18         6.5.2       Tritio ambiental       18         6.5.3       Carbono 14       18         6.6.       Interpretación       18         6.6.1       Geoguímica       18	
6.5.2 Tritio ambiental	
6.5.2 Thio ambiental	
6.6. Interpretación	
6.6.1 Geoguímica	
6.6.1.1. Calidad dal agua nara yaa y aanayma humana 10	
6.6.1.1 Calidad del agua para uso y consumo numano	<i>a i i i i i i i i i i</i>
6.6.1.2 Calidad del agua para uso agricola	
6.6.1.3 Analisis estadístico	
6.6.1.4 Familias de agua por ion dominante	
6.6.1.5 Diagramas binarios y definición de grupos de agua	jua
subterranea21	
6.6.2 Isotopia	
6.6.2.1 Isotopos estables y tritio ambiental	
6.6.2.2 Carbono 14	
6.6.2.3 Azutre 3423	
6.7. Determinación del modelo conceptual del funcionamiento	nto
hidrogeoquímico e isotópico24	240
6.7.1 Indices de saturación con relación a especies minerales	es
seleccionadas24	240
6.7.1.1 Geoquímica de carbonatos	241
6.7.1.2 Geoquímica de sulfatos24	244
6.7.1.3 Procesos de dolomitización	246
6.7.2 Condiciones redox25	
6.7.3 Modelo conceptual de funcionamiento isotópico25	250
7. MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO26	250 257
	250 257 262
7.1. Introducción	250 257 262 262

	7.3. Sistemas de flujo regional	264
	7.4. Sistemas de flujo intermedio	265
	7.5. Sistemas de flujo local	265
8.	MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA	
	8.1. Diseño	267
	8.1.1 Discretización Espacial	
	8.1.2 Discretización temporal	
	8.2. Condiciones iniciales y de frontera	270
	8.3. Parámetros hidráulicos	271
	8.4. Fuentes y/o sumideros.	272
	8.5. Calibración	273
	8.6. Presentación de resultados (predicciones)	275
	8.7. Análisis de sensibilidad	279
	8.7.1 Conductividad hidráulica	
	8.7.2 Coeficiente de almacenamiento	
	8.7.3 Retorno de riego	
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
10.	REFERENCIAS	

### **ANEXOS**

1	Anándica	fotográfico	d۵	eìnoloan
1.	Apenuice	lologranco	ue	yeologia

- 7. Apéndice lotografico de geología
   TEM's Cuatrociénegas y El Hundido
   Censo de aprovechamientos de los valles de El Hundido y Cuatrociénegas
   Registros de las pruebas de inyección y bombeo
   Apéndice fotográfico de selección de pozos piloto

- 6. Hidrogeoquímica
- 7. Resultados fisicoquímicos e isotópicos

### ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Localización de la zona de estudio	18
1.2	Extensión de la zona de estudio.	19
1.3	Vías de comunicación.	20
3 1	Fisiografía del Estado de Coabuila, provincias y subprovincias	20
3.2	Región Hidrológica 35	30
33	Cuenca El Hundido	31
34	Subcuenca El Hundido	31
35	Patrón de drenaje de la subcuenca El Hundido	32
3.6	Región Hidrológica 24	33
37	Cuenca P. Falcón – R. Salado	33
3.8	Subcuenca Río Salado–Nadadores	
39	Patrón de drenaie de la subcuenca Río Salado-Nadadores	
3 10	Río Mezquites (Grall 1995)	
3 11	Vista área de las nozas (Grall, 1995)	
3.12	Humedales	
3 13	Infraestructura hidráulica	38
3 14	Precipitación media mensual en la zona de estudio	41
3 15	Precipitación media anual en la estación Cuatrociénegas	42
3 16	Análisis de la seguía	43
3 17	Distribución de los índices de severidad de seguía meteorológica	45
3.18	Índice de severidad de la seguía meteorológica	
3 19	Evaporación media mensual (mm) en la estación Cuatrociénegas	48
3.20	Temperatura media mensual (°C) en la estación Cuatrociénegas	
4.1	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila.	61
4.1 4.2	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila Estructuras regionales del NE de México	61
4.1 4.2 4.3	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'.	61 64 65
4.1 4.2 4.3 4.4	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'.	61 64 65 66
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'.	61 64 65 66 67
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C' Sección D-D	
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C' Sección D-D'. Sección E-E'.	
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente.	61 64 65 66 67 67 67 68 68 69
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM.	
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM.	61 64 65 66 67 67 67 68 68 69 72 72
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 76
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12 4.13	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E' Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 76 76 77
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12 4.13 4.14	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 72 76 76 76 77
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12 4.13 4.14 4.15	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH7.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 76 76 76 77 78 79
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12 4.13 4.14 4.15 4.16	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C' Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH7. Perfil Geoeléctrico CCH7.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 76 76 76 77 78 79 80
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 4.12 \\ 4.13 \\ 4.14 \\ 4.15 \\ 4.16 \\ 4.17 \end{array}$	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH7. Perfil Geoeléctrico CCH5. Mapa de resistividad para la profundidad de 50m.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 72 76 76 76 77 78 79 80 82
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 4.12 \\ 4.13 \\ 4.14 \\ 4.15 \\ 4.16 \\ 4.17 \\ 4.18 \end{array}$	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH5. Mapa de resistividad para la profundidad de 50m. Mapa de resistividad para la profundidad de 100m.	61 64 65 66 67 67 68 69 72 72 72 72 76 76 76 76 77 78 80 80 82 83
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 4.12 \\ 4.13 \\ 4.14 \\ 4.15 \\ 4.16 \\ 4.17 \\ 4.18 \\ 4.19 \end{array}$	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH5. Mapa de resistividad para la profundidad de 50m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 100m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 200m.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 76 76 76 76 77 80 80 82 83 83
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 4.12 \\ 4.13 \\ 4.14 \\ 4.15 \\ 4.16 \\ 4.17 \\ 4.18 \\ 4.19 \\ 4.20 \end{array}$	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH5. Mapa de resistividad para la profundidad de 50m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 200m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 300m.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 72 76 76 76 77 78 78 79 80 80 82 83 84 85
$\begin{array}{c} 4.1\\ 4.2\\ 4.3\\ 4.4\\ 4.5\\ 4.6\\ 4.7\\ 4.8\\ 4.9\\ 4.10\\ 4.11\\ 4.12\\ 4.13\\ 4.14\\ 4.15\\ 4.16\\ 4.17\\ 4.18\\ 4.19\\ 4.20\\ 4.21\end{array}$	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C'. Sección D-D'. Sección E-E'. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH5. Mapa de resistividad para la profundidad de 50m. Mapa de resistividad para la profundidad de 100m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 300m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 300m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 400m.	61 64 65 66 67 67 67 68 69 72 72 72 76 76 76 76 76 77 78 80 80 82 83 84 85 86
$\begin{array}{c} 4.1\\ 4.2\\ 4.3\\ 4.4\\ 4.5\\ 4.6\\ 4.7\\ 4.8\\ 4.9\\ 4.10\\ 4.11\\ 4.12\\ 4.13\\ 4.14\\ 4.15\\ 4.16\\ 4.17\\ 4.18\\ 4.19\\ 4.20\\ 4.21\\ 4.21\\ 4.22\end{array}$	Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila. Estructuras regionales del NE de México. Sección A-A'. Sección B-B'. Sección C-C´. Sección D-D´. Sección E-E´. Arreglo de Loop coincidente. Localización de los perfiles de los TEM. Localización de los TEM. Perfil Geoeléctrico CCH3. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH4. Perfil Geoeléctrico CCH1. Perfil Geoeléctrico CCH2. Perfil Geoeléctrico CCH5. Mapa de resistividad para la profundidad de 50m. Mapa de resistividad para la profundidad de 100m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 300m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 400m. Mapa de Resistividad para la profundidad de 500m.	61 64 65 66 67 67 68 69 72 72 72 72 72 76 76 76 76 77 78 79 80 80 82 83 83 84 85 85 86 87

4.24	Mapa de Resistividad para la elevación de 680 msnm.	89
4.25	Mapa de Resistividad para la elevación de 650 msnm.	90
4.26	Mapa de Resistividad para la elevación de 600 msnm	91
4.27	Mapa de Resistividad para la elevación de 500 msnm	92
4.28	Mapa de Resistividad para la elevación de 400 msnm	93
4.29	Mapa de Resistividad para la elevación de 300 msnm.	94
5.1	Distribución de los aprovechamientos censados	97
5.2	Localización de los Pozos y norias nivelados	99
5.3	Elevación del nivel estático para enero de 2001	. 103
5.4	Elevación del nivel estático para enero de 2002	. 104
5.5	Elevación del nivel estático para enero de 2004	. 105
5.6	Profundidad del nivel estático para enero de 2004	. 108
5.7	Evolución del nivel estático para el periodo 2001 – 2002.	. 110
5.8	Evolución del nivel estático para el periodo 2002 – 2004.	. 111
5.9	Red de flujo subterráneo	. 112
5.10	Localización de las pruebas de bombeo	. 114
5.11	Esquema del diseño del tubo y orificio (Driscoll, 1986)	. 117
5.12	Valor del coeficiente K para tubo y orificio (Driscoll, 1986).	. 118
5.13	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-123	. 122
5.14	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-146	. 123
5.15	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo P-AM	. 123
5.16	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-196	. 124
5.17	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-239	. 124
5.18	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-117	. 125
5.19	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-116	. 125
5.20	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-114	. 126
5.21	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-4	. 126
5.22	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de bombeo pozo PB-180	. 127
5.23	Curva de Theis.	. 128
5.24	Esquema de flujo radial nacia un pozo para el analisis de la solución de Theis	129
5.25	Esquema del abatimiento residual	130
5.26	Esquema de fluio radial hacia un pozo para el análisis del método de	
0.20	recuperación de Theis.	. 131
5.27	Método de recuperación de Theis	132
5.28	Esquema de una infiltración rápida	. 134
5.29	Esquema de una prueba de infiltración v extracción	. 135
5.30	H/H₀ contra tiempo	. 136
5.31	Condiciones físicas apropiadas para el método	. 137
5.32	Esquema de una prueba de infiltración y extracción	. 139
5.33	H/H₀ contra tiempo	. 140
5.34	Diagrama que ilustra el mecanismo para el método de solución	. 142
5.35	Ejemplo del análisis gráfico del método	. 143
5.36	Red de monitoreo del Valle de El Hundido	. 146
5.37	Red de monitoreo del Valle de Cuatrociénegas	. 148
5.38	Esquema de los barrenos 1 y 2	. 150
5.39	Sección transversal de Cuatrociénegas a El Hundido en la poligonal	
	Pozo CNA 148-B1-B2-Poza Churice	. 151

6.1	Pozo en operación seleccionado para toma de muestras de agua subterránea	152
6.2	Red de monitoreo de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido	155
6.3	Aparatos portátiles utilizados durante la medición de parámetros de	156
6.4	Utilización de celda de aislamiento para evitar la interacción entre el	150
6.5	agua subterránea y la atmósfera Conexión a la descarga del pozo de la manguera que conduce el agua a	158
6.6	la celda de aislamiento Medición de parámetros de campo en las descargas de los manantiales	158
67	de la región de la región de Cuatrociénegas	159
0.7	Cuatrociénegas	159
6.8	Medición de la alcalinidad en campo (Método de Gran)	162
6.9	Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura en pozos inactivos de Cuatrociénegas y El Hundido	164
6.10	Pozo en operación seleccionado para toma de muestras de agua subterránea	173
6.11	Toma de muestras de agua subterránea en pozos inactivos sin equipo de bombeo instalado	173
6.12	Toma de muestras de agua subterránea en pozos inactivos sin equipo de	170
6 1 2	Eiltre utilizado para eliminar partículas en supponsión de la muestra de	174
0.15	agua subterránea, observar la presencia de bidróxidos de hierro en el	
	filtro	174
6 14	Tamaños de los solutos y de las partículas suspendidas en aguas	
0.11	subterráneas (adaptado de Edmunds, 1981)	175
6.15	Procedimiento de filtrado de la muestra de agua	176
6.16	Adición de ácido nítrico a la muestra de agua filtrada para metales	
	mayores y elementos traza	177
6.17	Muestras colectadas en cada uno de los sitios visitados	177
6.18	Técnica analítica para la determinación de los isótopos estables ${}^{2}H$ , ${}^{18}O$ y	400
C 10	U	183
0.19	ambiental	185
6.20	Procedimiento analítico empleado en el IMTA para la medición del	
0.04	carbono 14	189
6.21	Ubicación de los sitios donde se tomaron las muestras de agua subterránea	190
6.22	Distribución de los tipos de aprovechamientos visitados para la toma de	100
	muestras de agua subterránea	191
6.23	Diagrama para determinar la calidad del agua para uso agrícola	195
6.24	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona El Pilar	197
6.25	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona El Pilar	197
6.26	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona El Pilar	102
6.27	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la	190
	zona Beta Santa Mónica	198

6.28	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Beta Santa Mónica	199
6.29	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Beta Santa Mónica	199
6.30	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas. Manantiales	
6.31	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas. Manantiales	200
6.32	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, Manantiales	201
6.33	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, pozos	201
6.34	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, pozos	202
6.35	Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, pozos	202
6.36	Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea de la zona de interés	209
6.37	Distribución porcentual de las principales familias de agua identificadas en la zona de estudio	210
6.38	Distribución geográfica de las principales familias de agua identificadas en la zona de estudio	211
6.39	Relación entre la concentración de cloruro y la conductividad eléctrica	213
6 4 0	Relación entre las concentraciones de cloruro y potasio	213
6.41	Relación entre las concentraciones de cloruro y promuro	214
6 4 2	Relación entre las concentraciones de cloruro y bromaro	
0.42	Relación entre las concentraciones de cioruro y litto	214
6.43 6.44	Distribución de la concentración de cloruro y sodio	216
0.45	niolar Bi/Gi en el agua sublemanea	217
0.45	Relacion entre las concentraciones de cloruro y yoduro	218
6.46	Contenido de oxigeno-18 expresado como o °O vs. VSMOW (‰)	223
6.47	Contenido de deuterio expresado como 5 <sup>2</sup> H vs. VSMOW (‰)	224
6.48	Exceso de deuterio (ED) expresado en (‰)	225
6.49	Contenido de tritio ambiental (TU)	226
6.50	Elevación promedio de las sierras aledañas a los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. El promedio de elevaciones fue estimado mediante interpolación de curvas de nivel y la construcción de una malla	007
6.51	Composición isotópica de deuterio y oxígeno-18 de las aguas subterráneas de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. El agua de lluvia recolectada en la población de Cuatrociénegas, Coahuila; a 750 msnm, presenta una composición isotópica que coincide con la línea	221
6 50	Givivivi.	220
0.52	los pozos y pozas de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido	229
6.53	Efecto de altitud en la composición isotópica de la lluvia causado por la orografía del terreno en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. La δ <sup>18</sup> O decrece -0.48 ‰ por cada 100 m de altitud	230
6 54	Composición isotópica de los grupos de agua	231
6.55	sistemas de flujo que semejan a los pozos y pozas de los valles de	201
		∠3∣

6.56	Localización de sitios muestreados y analizados (+) de Carbono 14 en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, durante la primera y segunda campaña	235
6.57	Localización de sitios muestreados y analizados (o) de $\delta S^{34}$ ‰ en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, durante la primera y segunda	200
6 58	Histograma de los valores $\delta S^{34}$ de los valles de Cuatrociénegas y El	230
	Hundido	238
6.59	Composición isotópica S <sup>34</sup> y O <sup>18</sup> del sulfato marino a través del tiempo	239
6.60	Índice de saturación con relación a la calcita	
6.61	Índice de saturación con relación a la dolomita	242
6.62	Índice de saturación con relación a la magnesita	243
6.63	Índice de saturación con relación a la estroncianita	243
6.64	Índice de saturación con relación al yeso	244
6.65	Índice de saturación con relación a la celestita	245
6.66	Relación entre las concentraciones de calcio y sulfato	246
6.67	Comparación entre las concentraciones de sulfato y calcio	248
6.68	Comparación entre las concentraciones de sulfato y magnesio	249
6.69	Índice de saturación con relación a la barita	249
6.70	Distribución de oxígeno disuelto en el agua subterránea	250
6.71	Índice de saturación con relación a la ferrihidrita	251
6.72	Fertilizantes utilizados para los cultivos de alfalfa en el Valle de El Hundido.	252
6.73	Fertilizantes utilizados para los cultivos de alfalfa en el Valle de El Hundido.	
6 74	Relación entre las concentraciones de cloruro y nitrato	254
6.75	Distribución del nitrato en el agua subterránea	
6.76	Relación entre la salinidad v N-NO <sub>3</sub> /Cl	256
6.77	Esquema conceptual que relaciona dirección del flujo con la evolución de la composición del aqua subterránea	257
6 78	Secciones transversales utilizadas para mostrar la evolución isotópica e	
0.10	hidroquímica del aqua subterránea en dirección del fluio	259
6 79	Modelo conceptual de funcionamiento isotópico e hidroquímico del aqua	
0.10	subterránea en dirección S-N de la sierra Alamitos hasta la sierra Madera	
6.80	Modelo conceptual de funcionamiento isotópico e hidroquímico del aqua	
	subterránea en dirección SW-NE desde el Valle El Hundido hasta el Valle	
	de Cuatrociénegas	261
7.1	Configuración del basamento hidrogeológico de la zona de	
	Cuatrociénegas-El Hundido. Coahuila.	263
7.2	Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico de los valles El	
	Hundido y Cuatrociénegas.	264
8.1.	Malla de diferencias finitas.	268
8.2.	Discretización vertical	269
8.3.	Configuración de las condiciones iniciales.	270
8.4.	Pozos de extracción. Los pozos en rojo son activos, los pozos en azul	
	son inactivos)	273
8.5.	Curva de calibración del periodo 2004	275

8.6.	Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2004 (conservando la extracción actual).	276
8.7.	Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2104 (conservando la extracción actual).	277
8.8.	Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2204 (conservando la extracción actual).	277
8.9.	Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2004 (multiplicando por 10 la extracción actual del Valle de El Hundido)	278
8.10.	Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2104 (multiplicando por 10 la extracción actual del Valle de El Hundido).	278
8.11.	Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2204 (multiplicando por 10 la extracción actual del Valle de El Hundido)	279
8.12.	Análisis de sensibilidad	281

### ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Datos isotópicos de hidrógeno y oxígeno estables para el agua del bolsón de Cuatrociénegas	10
3.1	Fisiografía del municipio de Cuatrociénegas	
3.2	Registros de precipitación (mm) de la estación Cuatrociénegas	40
3.3	Cálculo del índice de severidad de seguía meteorológica promedio	
3.4	Clasificación del índice de severidad de la seguía meteorológica.	45
3.5	Registros de Evaporación (mm) en la estación Cuatrociénegas.	47
3.6	Registros de Temperatura (°C) en la estación Cuatrociénegas	49
4.1	Zonificación georresistiva	73
5.1.	Registro de aprovechamientos	96
5.2.	Resumen del censo de aprovechamientos	97
5.3.	Nivelación de brocales de pozos y pozas (Datum WGS84)	100
5.4.	Elevación del nivel estático en el valle de El Hundido para 1997, 2001, 2002 y 2004	102
5.5.	Elevación del nivel estático en el valle de Cuatrociénegas para 1997,	102
5.6.	Profundidad al nivel estático en el valle de El Hundido de 1997, 2001,	102
5.7.	Profundidad al nivel estático en el valle de Cuatrociénegas de 1998,	107
- 0	2001 y 2004	107
5.8.	Evolución del nivel estático en el valle de El Hundido de 1997 al 2004.	109
5.9.	2004.	110
5.10.	Pozos donde se desarrollaron las pruebas de inyección y bombeo	113
5.11.	Tiempos en la etapa de bombeo y recuperación de las pruebas de bombeo	115
5.12.	Tiempos de medición del nivel durante la etapa de bombeo	115
5.13.	Tiempos de medición del nivel durante la etapa de recuperación	115
5.14.	Fechas de realización de las pruebas de bombeo	116
5.15.	Valores de Conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de	144
5 16	Red de monitoreo Valle de El Hundido	145
5 17	Piezómetros a construir en el Valle de El Hundido	146
5 18	Red de monitoreo del Valle de Cuatrociéneras	147
5.19.	Piezómetros a construir en Cuatrociénegas	147
6.1	Sitios integrantes de la red de monitoreo de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido	153
6.2	Parámetros de campo medidos en los valles de Cuatrociénegas y El	167
63	Sitios donde se tomaron muestras a diferentes profundidades	107
6.4	Desglose de sitios donde se tomaron las muestras de aqua	172
6.5	Tipo y número de aprovechamientos visitados para toma de muestras	172
6.6	Límites de detección del Espectrómetro de Masas con Plasma de	
5.5	Acoplamiento Inductivo	180

6.7	Límites permisibles para calidad de agua de uso potable (NOM-127-	100
6.8	Categorías de agua establecidas en la calidad de agua para riego	192
6.9	Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio de las	150
	muestras de agua subterránea colectadas en la zona El Pilar	203
6.10	Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona Beta Santa	
	Mónica	204
6.11	Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona Cuatrociénegas,	
	Manantiales	205
6.12	Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona Cuatrociénegas,	206
6 1 2	pozos	200
0.15	laboratorio de las muestras de agua subterránea	207
6.14	Valores promedio de parámetros de campo y laboratorio de las muestras de agua subterránea de acuerdo con la familia de agua	
	identificada	212
6.15	Resultados de las muestras de carbono 14	232
6.16	Resultados de S 34/S 32 ‰	238

#### **RESUMEN EJECUTIVO**

El acuífero del Valle del Hundido, Coahuila ha experimentado una creciente demanda del agua subterránea en los últimos años para usos agrícolas principalmente. Diferentes organismos gubernamentales federales y estatales, instituciones académicas y organizaciones no gubernamentales han mostrado su preocupación por los posibles efectos de la explotación del agua subterránea en El Hundido sobre el acuífero adyacente de Cuatrociénegas. Este último abarca el Área de Protección de Flora y Fauna "Cuatrociénegas" el cual contiene una gran diversidad de especies endémicas.

Estudios hidrogeológicos realizados por la CNA y el Gobierno del Estado de Coahuila concluyen que existe independencia hidráulica entre ambos acuíferos. Sin embargo, investigadores del Instituto de Ecología de la UNAM, encontraron que las características genéticas de bacterias existentes en el agua de pozos de El Hundido y pozas de Cuatrociénegas son similares, de lo que concluyen que existe una conexión hidráulica. Para resolver la controversia, el Titular del Ramo instruyó al IMTA a realizar un estudio sobre el funcionamiento de los acuíferos con financiamiento de la CNA y el INE.

El objetivo del presente estudio fue el evaluar el comportamiento hidrodinámico del acuífero El Hundido y su conexión con el acuífero de Cuatrociénegas, Coahuila.

Para cumplir con objetivos del estudio se llevaron a cabo actividades de campo, gabinete y laboratorio. En primer lugar se llevó a cabo una revisión, análisis e interpretación de estudios previos.

Los trabajos de campo incluyeron el censo de aprovechamientos, identificándose 142 pozos, de los cuales 28 son activos y 114 inactivos para el acuífero del valle de El Hundido, mientras que para el valle de Cuatrociénegas se identificaron 71 pozos (34 activos y 37 inactivos) y 300 pozas

Asimismo se realizaron 9 pruebas de infiltración y 1 prueba de bombeo en ambos valles para caracterizar hidráulicamente los materiales geológicos. De la interpretación de dichas pruebas se obtuvieron valores de conductividad hidráulica que varían de 1.3E-08 a 9.3E-06 m/seg para materiales de relleno de los valles, que corresponden a limos y arenas. Para las calizas carstificadas se obtuvo un valor de 2.15 E-04.

Con la finalidad de conocer los volúmenes de agua subterránea que se extraen mediante pozos, norias y las salidas de las pozas se realizó la hidrometría de los aprovechamientos. Los resultados de esta actividad muestran que en El Hundido se extraen 28.3 Mm<sup>3</sup>/año mediante pozos exclusivamente. Para el Valle de Cuatrociénegas, la extracción asciende a 134.2 Mm<sup>3</sup>/año de los cuales el 82 % corresponde a las pozas y el resto a pozos agrícolas.

Se realizó la nivelación de los brocales en 40 aprovechamientos distribuidos en ambos valles, utilizando un sistema de GPS diferencial para referir todos niveles del agua subterránea con respecto al nivel del mar y así poder determinar las direcciones de flujo. De los recorridos piezométricos en 88 aprovechamientos del valle de El Hundido se obtuvo la configuración de la elevación del nivel estático para abril del 2004. Se observa que el flujo subterráneo ocurre de las partes topográficamente altas hacia el centro del valle y de manera concéntrica. Con respecto al valle de Cuatrociénegas el recorrido abarcó la medición de nivel en 38 aprovechamientos. La dirección principal de flujo subterráneo en este valle sigue una tendencia similar al del Hundido: de las sierras hacia la parte central del valle. El rango de valores de los niveles estáticos en el valle de El Hundido es de 760 a 780 msnm, mientras que en Cuatrociénegas es de 690 a 750 msnm, lo cual indica que no puede haber un flujo subterráneo de Cuatrociénegas a El Hundido. La profundidad al nivel estático en el valle de El Hundido varía de 10 m en el centro del valle, a más de 130 m en los límites del acuífero. Para Cuatrociénegas la profundidad oscila de 8 a 96 m con una tendencia similar.

La evaluación geológica consistió en un reconocimiento geológico de las unidades que conforman la columna estratigráfica de la zona (composición y estructuras) y en la elaboración de 5 secciones geológico-estructurales. De la interpretación se obtuvo la reconstrucción de la evolución geológica de la zona. Se determinó que en el área de estudio existe un basamento hidrogeológico que corresponde a la Formación San Marcos, cuyas características litológicas corresponden a areniscas prácticamente impermeables. Sobreyaciendo a esta secuencia se encuentran las calizas del Cretácico, depositadas en ambiente marino y que debido a su fracturamiento y carstificación, conforman los principales acuíferos de la zona.

Los resultados de la información hidrogeoquímica muestran la evolución de las aguas subterráneas. La composición y concentración de sales disueltas prueban claramente el carácter endorreico de ambos valles, en los cuales el incremento de sales disueltas en la dirección del flujo es muy significativo. En El Hundido las aguas subterráneas evolucionan de sulfatadas-cálcicas a sulfatadas mixtas y posteriormente a sulfatadas sódicas, éstas últimas con muy alto contenido en SDT. En Cuatrociénegas, evolucionan de bicarbonatadas-cálcicas a sulfatadas-cálcicas y posteriormente a sulfatadas mixtas, estas últimas con concentraciones elevadas de sales disueltas. En el Hundido hay evidencias de impacto antropogénico por la presencia de nitrato por arriba del valor de fondo geoquímico. La composición indica claramente que el agua no corresponde a aguas de tipo marino. Es importante mencionar que la calidad del agua subterránea no es apta para consumo humano.

Los resultados isotópicos indican que el origen del agua subterránea es de precipitación pluvial, infiltrada a diferentes altitudes y que no existe ningún tipo de agua con características de origen marino. Asimismo, indica que existen seis zonas principales de recarga que alimentan a los pozos y pozas de los valles, dependiendo de su localización geográfica.

Los pozos del valle de Calaveras se recargan en la sierra Madera a 1750 msnm; los pozos y pozas próximos a la vertiente sur de la sierra Madera se recargan en dicha sierra a 1585 msnm. Los pozos de El Hundido de los sistemas de riego de Beta Sta. Mónica, Sta. Teresa de Sofía y Florentino Rivera, se recargan en la sierra Alamitos a 1458 msnm. Los pozos del sistema de riego de El Pilar están captando los rellenos de la parte centro occidental de El Hundido y su recarga proviene de la sierra El Venado a 1473 msnm. Los manantiales y pozos localizados en el extremo oriental de Cuatrociénegas reciben su recarga en la sierra Purísima a 1388 msnm. Por último, las pozas de Cuatrociénegas que se localizan alrededor del extremo norte de la sierra San Marcos se recargan de manera efectiva en las sierras La Fragua y San Marcos.

Los resultados de carbono-14 indican que el flujo subterráneo en El Hundido tiene un tiempo de residencia, desde que se infiltra el agua de lluvia hasta el momento de su captación por los aprovechamientos existentes, del orden de las decenas de miles de años, y en Cuatrociénegas del orden de 1000 años.

Los análisis de laboratorio incluyeron las determinaciones de iones mayoritarios, elementos traza, y los isótopos tritio, deuterio, oxígeno 18, azufre 34, carbono 14 y carbono-13.

Para complementar la información hidrogeológica se realizaron dos perforaciones exploratorias a 200 y 250 m de profundidad en la Sierra La Fragua. Ambas perforaciones tuvieron como objetivo alcanzar el basamento hidrogeológico de la Formación San Marcos o encontrar el nivel estático. En ambos casos se perforó una columna de rocas carbonatadas con un alto grado de fracturamiento. No se detectó el basamento impermeable de areniscas pero se detectaron niveles estáticos en ambos pozos los cuales forman parte de un domo originado por el agua de recarga que ocurre en la Sierra La Fragua y que aporta entradas por flujo horizontal hacia ambos valles.

Finalmente se llevó a cabo una integración de la información para conformar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico. Los acuíferos en ambos valles son del tipo libre, alojados en material de tipo granular en la parte superior y en rocas calizas en la parte más profunda. Las zonas de recarga están localizadas en las sierras que circundan a ambos valles. Las distancias de recorrido y profundidades de circulación del agua le proporcionan a las aguas subterráneas sus características geoquímicas e isotópicas, así como el incremento en la temperatura.

El modelo de funcionamiento hidrodinámico se tradujo a un modelo matemático de tal manera que representara los diferentes mecanismos de recarga y descarga de ambos sistemas acuíferos. La simulación matemática permitió evaluar diferentes esquemas hipotéticos de explotación del Valle El Hundido, identificándose que aún un incremento de 10 veces en la extracción actual, los efectos en el acuífero de Cuatrociénegas no serían significativos para un periodo de hasta 500 años. Por

supuesto, los efectos en el abatimiento del Valle El Hundido serían no sólo significativos sino inmediatos.

Del análisis de la información se llegó a las siguientes conclusiones:

- La evolución geológica de ambos valles es similar. Los estratos superficiales están constituidos por rellenos aluviales, y rocas calizas permeables depositadas en un ambiente marino. Dichos estratos están subyacidos por areniscas y rocas metamórficas que constituyen el basamento impermeable. Existe un cabalgamiento en la sierra La Fragua, intermedia a los valles.
- Los niveles piezométricos medidos en la red de observación muestran que es imposible que haya flujo subterráneo de Cuatrociénegas a El Hundido.
- La salinidad del agua subterránea en ambos valles se debe a la disolución de rocas de origen marino y no a la aportación de componentes de agua marina provenientes de un mar fósil. La composición isotópica de las aguas de ambos valles confirma lo anterior.
- El contenido de sales disueltas en El Hundido es significativamente mayor que en Cuatrociénegas. Por tanto, las aguas de Cuatrociénegas no pueden ser recargadas por El Hundido.
- El agua subterránea de Cuatrociénegas es isotópicamente diferente a la de El Hundido. En particular, las pruebas de carbono-14 demuestran que las aguas de El Hundido son mucho más antiguas que las de Cuatrociénegas. Debido a que no existen fuentes subterráneas de radiocarbono, es imposible que haya flujo subterráneo de El Hundido a Cuatrociénegas, ya que esto implicaría un rejuvenecimiento de las aguas.
- La geoquímica y la isotopía permitieron concluir que el agua subterránea de ambos valles es de origen pluvial.
- La isotopía permitió identificar las zonas de recarga. En particular, el agua de las pozas de Cuatrociénegas proviene mayormente de la precipitación sobre la sierra La Fragua y, en menor medida, sobre la sierra San Marcos.
- El agua subterránea que alimenta a las pozas tiene tiempos de residencia de por lo menos mil años.
- La estructura de cabalgamiento de la sierra La Fragua favorece la conformación de un parteaguas hidrodinámico subterráneo (domo) entre los valles de El Hundido y Cuatrociénegas, confirmado por la perforación de los pozos exploratorios. Este parteaguas hidrodinámico constituye una barrera

al flujo hidráulico entre ambos acuíferos, ya que el agua subterránea no puede fluir de niveles piezométricos bajos a niveles piezométricos altos.

De los resultados se desprenden las siguientes recomendaciones:

- Incluir las zonas de recarga efectiva de las pozas en la zona natural protegida de Cuatrociénegas, especialmente la sierra La Fragua.
- Establecer un sistema de monitoreo de la contaminación antropogénica e investigar los ciclos del carbono, azufre y nitrógeno en el medio subterráneo de los dos valles.
- Instalar un sistema de medición de la precipitación pluvial con especial atención en las sierras donde se origina la recarga de los acuíferos de ambos valles.
- Instalar un sistema permanente de aforo de los caudales de descarga de las pozas.
- Desarrollar un sistema de monitoreo de los niveles y de la calidad del agua subterránea de ambos valles.

### 1. GENERALIDADES

#### 1.1. Antecedentes

El acuífero del Valle de El Hundido, Coahuila ha experimentado una creciente demanda del agua subterránea en los últimos años para usos agrícolas principalmente. Ante esta situación, la Comisión Nacional del Agua (CNA) encomendó en el año 2001 un estudio de actualización hidrogeológica de este acuífero a la Compañía Lesser y Asoc. Los resultados de dicho estudio fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación del 3 de Noviembre de 2003 a fin de sustentar la disponibilidad de dicho acuífero.

Por otro lado, ante la creciente explotación del agua subterránea el acuífero del Valle de El Hundido, diferentes organismos gubernamentales federales y estatales, mostraron su preocupación por los posibles efectos en el acuífero adyacente de Cuatrociénegas. En esta zona está ubicada el Área Natural Protegida de Cuatrociénegas donde existe una gran biodiversidad, principalmente soportada por las pozas. Ante ello la Gerencia Estatal de la CNA, encargó a Lesser y Asociados un estudio hidrogeológico del acuífero de Cuatrociénegas.

Una de las conclusiones que se emiten en dichos estudios es la independencia hidráulica de los acuíferos del Valle de El Hundido y Cuatrociénegas, lo cual generó una serie de cuestionamientos por parte de la comunidad ecológica. La Dra. Souza del Instituto de Ecología de la UNAM encontró que el ADN de las bacterias es similar en pozos de ambos acuíferos lo cual sugiere una conexión hidráulica.

Los resultados de los estudios realizados a la fecha no permiten a las autoridades involucradas en el manejo del agua y áreas naturales protegidas llegar a un acuerdo, por lo que a solicitud del titular de la Semarnat el IMTA propone la realización del presente proyecto.

### 1.2. Objetivos del estudio

El objetivo principal de este proyecto fue evaluar el comportamiento hidrodinámico del acuífero El Hundido y su conexión con el acuífero de Cuatrociénegas, Coahuila. Teniendo objetivos específicos como son, el conocer la condición actual de los niveles del agua subterránea, así como las tendencias que se presenten por causas naturales o antropogénicas, y determinar la evolución que presenten los niveles del agua subterránea como resultado de los cambios por las condiciones de recarga natural, ya sea inducida o por bombeo. Además de seleccionar pozos piloto de la red actual.

#### 1.3. Estudios previos

## Lesser y Asociados, S.A. de C.V., *Estudio de evaluación hidrogeológica e isotópica en el Valle del Hundido, Coahuila*, Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua, contrato GAS-006-PRO 01, diciembre 2001.

Las actividades realizadas en este estudio fueron geológicas, geohidrológicas, censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, análisis físico-químicos de muestras de agua, muestreo y análisis isotópico y pruebas de bombeo, con el objeto de determinar la conexión hidráulica entre los valles de El Hundido, Cuatrociénegas y Ocampo, así como para definir el origen del agua de las pozas de Cuatrociénegas y el posible impacto que pudieran recibir los manantiales de Cuatrociénegas ante la extracción de agua subterránea en el Valle de El Hundido.

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 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, oxigeno 18 y tritio, con el fin de identificar el sistema o sistemas acuíferos de la zona cárstica.

Las actividades de geología llevadas a cabo fueron de fotointerpretación, verificación de campo, elaboración de secciones y cartografía geológica.

El censo de aprovechamientos en el Valle de El Hundido fue un total de 81 de los cuales solamente 28 se encuentran activos, en su mayoría corresponden a pozos destinados a la agricultura.

En el Valle de Cuatrociénegas se censaron 71 aprovechamientos de los cuales 44 se encuentran activos y destinados en su mayoría para uso agrícola, además existe un gran número de cuerpos de agua conocidos como pozas, las cuales están ubicadas sobre una franja de 3 km de ancho al pie del flanco oriental de la Sierra de San Marcos, sobre una superficie de 70 km<sup>2</sup>. La Semarnat tiene actualmente censadas y controladas alrededor de 300 pozas.

En el Valle de Ocampo se censaron 192 aprovechamientos de los cuales 101 se encuentran activos y en su gran mayoría corresponden a pozos destinados a la agricultura.

Para el análisis físico-químico se seleccionaron 15 muestras para ser enviadas al laboratorio y practicarle los análisis que incluyeron la determinación de sólidos totales

disueltos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, alcalinidad total, nitratos, carbonatos, dureza total, dureza de calcio, sodio, potasio, calcio, magnesio, manganeso, conductividad eléctrica y potencial hidrogeno.

Se obtuvieron muestras de agua para el análisis isotópico de deuterio, oxigeno 18 y tritio, en todos los sitios donde fue posible. Se enviaron al laboratorio de la Universidad de Waterloo en Ontario, Canadá, para la determinación de los isótopos mencionados.

Se realizaron cinco pruebas de bombeo y se recopiló información de siete pruebas efectuadas por la SARH, las cuales se reinterpretaron nuevamente.

Como conclusión se menciona que la mitad noreste del área de estudio corresponde a rocas calizas depositadas en el Paleogolfo de Sabinas, cuyos plegamientos dan lugar a sierras de tipo alargado. La mitad suroeste corresponde también a sedimentos calcáreos depositados sobre la Paleopenínsula de Coahuila, sin embargo aquí los plegamientos dan lugar a sierras de forma dómica.

Las rocas más antiguas que afloran corresponden a las areniscas de la formación San Marcos, sobre las que destacan rocas calcáreas de las formaciones La Virgen, Cupido, La Peña, Aurora, Acatita, Kiamichi, Grupo Washita Indiferenciado, Georgetown, Del Río, Buda e Eagle Ford.

La conclusión en cuanto a la calidad del agua es que el Valle de Ocampo es de buena calidad con un contenido salino de menos de 1 500 mmhos/cm, y con bajo y medio contenido de sodio intercambiable. La mayor parte del agua del Valle de Cuatrociénegas se clasifica como de mediana calidad ya que su contenido de sales se encuentra entre 1 500 y 2 500 mmhos/cm, y con bajo y medio contenido de sodio intercambiable, y finalmente el Valle de El Hundido presenta un agua de mala calidad con valores muy altos del contenido salino y bajo contenido de sodio intercambiable, en algunos sitios alcanza más de 10 000 mmhos/cm.

En el Valle de El Hundido se encuentran dos materiales permeables, aluviones y calizas, a través de los cuales se infiltra, circula, y se almacena agua en el subsuelo, dando origen a zonas acuíferas. Los aluviones se presentan en una capa que cubre la planicie con espesores de entre 100 y 150 m. Las calizas corresponden a la Formación Aurora y al Grupo Washita Indiferenciado.

La recarga se lleva a cabo principalmente sobre los flancos de la sierras, en donde parte del agua de lluvias se infiltra y circula por el subsuelo. La salida de agua subterránea se lleva a cabo a través de los pozos existentes.

En la porción central del Valle de Cuatrociénegas se encuentra la Sierra de San Marcos, la cual prácticamente divide al valle en dos partes. Cubriendo la mayor parte del valle se encuentran materiales granulares del Cuaternario los cuales dan origen a un acuífero. Bajo los aluviones se encuentran rocas calizas de alta permeabilidad. Las calizas de la Sierra de San Marcos presentan características litológicas diferentes a sus equivalentes laterales en las sierras circunvecinas, en especial un denso fracturamiento que ha permitido la infiltración y circulación de agua subterránea, lo cual a su vez ha incrementando la permeabilidad de las rocas al disolverlas y formar cavernas y conductos de disolución. La recarga se lleva a cabo por infiltración de lluvia sobre las sierras.

Por lo que respecta al Valle de Ocampo este se encuentra constituido por materiales granulares en la superficie, con espesor de 80 a 100 m, en donde se aloja un acuífero. Bajo estos materiales se presentan rocas calcáreas las cuales tienen permeabilidad que es manifestada a través de manantiales ubicados en el Cañón al norte de Cuatrociénegas, así como en los afloramientos calizos al oeste del poblado de Ocampo.

De las pruebas de bombeo se concluye que existe un acuífero semiconfinado con valores de transmisividad que varía de 0.00021 a 0.0033 m<sup>2</sup>/s, mientras que para el acuífero confinado la transmisividad calculada presentó una variabilidad de 0.00023 a 0.0079 m<sup>2</sup>/s. El coeficiente de almacenamiento varía de 0.00023 a 0.0003 para el acuífero confinado.

Conjuntando los puntos de vista geológico, piezométrico y de calidad del agua, se concluye que no existe relación entre los acuíferos de los valles de El Hundido y Cuatrociénegas. Actualmente estos funcionan de manera independiente por lo que la recarga o extracción que sufra uno de ellos no repercutirá en el otro.

El agua de las pozas de Cuatrociénegas corresponde a un sistema cárstico local, el cual se restringe a la mitad norte de la Sierra de San Marcos y a una franja de 3 kilómetros de ancho sobre el flanco oriente de la sierra. Estas pozas son vertedores naturales del acuífero calizo de la Sierra de San Marcos. La cantidad de agua que aflora a través de ellas esta en relación a la infiltración por lluvia sobre las sierras. Existen años lluviosos y periodos prolongados de sequía que se reflejan en el nivel de pozas y lagunas.

# Lesser y Asociados, S.A. de C.V., *Estudio Geohidrológico en Cuatrociénegas, Coahuila*, Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento de Coahuila, Contrato CEAS IAI-18-02-AP, Noviembre 2002.

En este estudio se analizaron los isótopos ambientales deuterio y oxigeno 18 presentes en el agua subterránea de los valles de El Hundido y Cuatrociénegas. También se tomaron los datos geohidrológicos del estudio realizado para la CNA en el 2001, Se tomaron 44 determinaciones de deuterio y oxigeno 18 en el que se distinguen tres grupos de muestras: el primero se identifica como agua en calizas del Valle de El Hundido, el segundo corresponde a las pozas de Cuatrociénegas y el tercero a los pozos sobre los aluviones del Valle de El Hundido. Los objetivos del estudio fueron: complementar el conocimiento geohidrológico de los valles de El Hundido, Cuatrociénegas y Ocampo, en especial la interrelación entre los acuíferos existentes en cada valle.

Determinar si la explotación de agua subterránea en el Valle de El Hundido, podría afectar el caudal que fluye a través de las pozas de Cuatrociénegas.

Se realizaron actividades de recopilación de estudios previos para la reconstrucción del marco geológico de la zona basados principalmente en el estudio geohidrológico del Valle de El Hundido, Cuatrociénegas y Ocampo, realizado para la CNA en el 2001.

En la parte geohidrológica se hace una descripción del funcionamiento de los acuíferos de los valles. También se llevaron acabo actividades de hidrogeoquímica e isótopos ambientales.

En cuanto a la geología del subsuelo y de acuerdo a la forma y distribución de las rocas, se concluye que desde el punto de vista geológico no existe interconexión acuífera entre El Hundido y Cuatrociénegas. Los pliegues anticlinales y sinclinales ocasionan interrupciones de los horizontes acuíferos entre los valles. En general, las sierras constituidas por pliegues anticlinales provocan que funcionen como parteaguas. No se considera factible, desde el punto de vista geológico, que pueda existir comunicación hidráulica entre valles.

Por lo que respecta al horizonte acuífero en calizas del Grupo Washita y porción superficial de la Aurora, su distribución en un sinclinal para cada valle provoca direcciones de flujo hacia el centro de cada sinclinal. Por otra parte en las sierras formadas por anticlinales, las formaciones del Cretácico Inferior, que son de menor permeabilidad o bien impermeables, alcanzan gran altura en el eje de los anticlinales. Esto provoca que las rocas calizas permeables funciones como parteaguas en el eje del anticlinal. Por lo anterior se deduce que geohidrológicamente no existe conexión entre los valles.

En cuanto a piezometría, se trazaron curvas de la elevación del nivel estático que muestran la dirección del flujo para cada uno de los valles, siendo en todos los casos de tipo radial con dirección de circulación hacia el centro de los mismos. Desde el punto de vista piezométrico se asume que no existe comunicación entre valles.

La calidad del agua observada presenta diferencias para cada uno de los valles considerados, siendo de muy alta salinidad en el Valle de El Hundido, de salinidad media en Cuatrociénegas y de baja salinidad en Ocampo.

En caso de que el agua del Hundido (caracterizada por presentar alta salinidad), circulara hacia Cuatrociénegas, el agua de este último valle debería de presentar, mayor salinidad. Tomando en cuenta la salinidad del agua, se asume que no existe flujo de agua del Valle de El Hundido hacia el de Cuatrociénegas.

Conjuntando los puntos de vista geológico, geohidrológico, piezométrico y de calidad del agua, se concluye que no existe relación entre los acuíferos de los valles de El Hundido, Cuatrociénegas y Ocampo. Actualmente estos funcionan de manera independiente por lo que la recarga o extracción que sufra uno de ellos no repercutirá en los restantes.

También se concluye que el agua de las pozas de Cuatrociénegas corresponde a un sistema cárstico local, el cual se restringe a la mitad norte de la Sierra de San Marcos y a una franja de 3 kilómetros de ancho sobre el flanco oriente de la sierra.

En relación a los resultados isotópicos practicados en el agua de lluvia, se observa que el agua de lluvia de El Hundido es diferente a la de Cuatrociénegas, ratificando que corresponden a zonas cuyas aguas son independientes.

# SARH, *Estudio geohidrológico preliminar en la zona Cuatrociénegas-Ocampo, Coahuila*, Elaborado por la compañía ININSA, S.A. para la Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1980.

Este estudio fue enfocado para conocer las características de los acuíferos del área, las condiciones de explotación en que se encontraban, el orden de magnitud de la recarga y la calidad del agua. Con el fin de seleccionar las áreas más favorables para emplazar las captaciones de agua subterránea necesarias para sustentar los desarrollos agropecuarios.

Los objetivos del estudio fueron: a) obtener un conocimiento general de la geometría del acuífero, b) conocer en forma preliminar el volumen actual de explotación de agua subterránea, c) determinar la recarga del acuífero en explotación, d) delimitar áreas con agua de buena calidad, y e) recomendar un régimen de explotación racional y definir áreas favorables para el emplazamiento de nuevas captaciones.

Se realizaron actividades de campo como el censo de captaciones de agua subterránea, pruebas de bombeo, muestreo de agua, aforo de manantiales, nivelación topográfica de brocales y sondeo geofísicos. Interpretación y análisis de las actividades de campo como la interpretación geofísica, geología, hidrogeoquímica e hidrología subterránea.

Se censaron 210 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 121 fueron pozos, 56 norias, 31 manantiales y dos sondeos exploratorios. Los pozos tienen profundidades entre 10 y 200 m, en promedio su profundidad era de 70 m con caudales desde 4 a 130 lps, equipados con motores eléctricos o de combustión interna, en su mayoría operados para fines agrícolas o ganaderos. Estos datos fueron medidos en el mes de octubre de 1980.

Las pruebas de bombeo fueron realizadas en 10 aprovechamientos, cuya duración varió entre tres y ocho horas, dependiendo de la disponibilidad de los pozos. Las

pruebas fueron ejecutadas en la etapa de abatimiento y solamente en dos casos se efectuó la etapa de recuperación.

Para conocer las características físico-químicas del agua subterránea se muestrearon 41 captaciones y manantiales. De las muestras tomadas, 33 corresponden al Valle de Ocampo y ocho al Valle de Cuatrociénegas.

Se aforaron 14 manantiales, de los cuales, 11 pertenecen al Valle de Ocampo y tres al de Cuatrociénegas.

En cuanto a calidad del agua en relación con el uso agrícola, en la zona de Cuatrociénegas-Ocampo, se clasificó el agua, según el peligro de aumento de sodio, en aguas con bajo contenido de sodio, que pueden usarse para riego en la mayoría de los suelos con pocas posibilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable.

La nivelación topográfica se efectuó para 99 aprovechamientos convenientemente seleccionados y distribuidos en todo el área. Además se nivelaron los manantiales más importantes.

También se realizaron 30 sondeos geoeléctricos verticales de resistividad. Estos sondeos se distribuyeron en tres perfiles de investigación que en conjunto cubren una longitud aproximada de 33 km y la profundidad real explorada fue de aproximadamente 300 m.

Se concluye que existen dos unidades acuíferas en la zona de Cuatrociénegas-Ocampo, un acuífero granular y un acuífero calizo.

El acuífero granular está conformado por materiales aluviales y lacustres de baja permeabilidad, que ocupa prácticamente toda la superficie de los valles y tiene reducido espesor saturado (20 a 40 m). Se encuentra limitado inferior y lateralmente por rocas sedimentarias poco permeables de origen marino.

La transmisividad del acuífero granular es baja del orden de 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s, esta característica se refleja en el bajo rendimiento de los pozos.

La salinidad total del agua extraída por los pozos es de 500 a más de 2 000 ppm, en el Valle de Ocampo y de 1 000 a más de 2 500 ppm en el Valle de Cuatrociénegas, con tendencia creciente de sus bordes hacia sus partes bajas.

La recarga de los acuíferos granulares es originada principalmente por la infiltración de escurrimientos superficiales en los flancos de las montañas limítrofes y en los bordes de los valles.

El acuífero granular del Valle de Cuatrociénegas recibe recarga de 10 a 15 Mm<sup>3</sup>/año.

El acuífero calizo se caracteriza por la heterogeneidad propia de las rocas carbonatadas atacadas por disolución. Localmente su transmisividad es alta, como lo demuestran algunos manantiales caudalosos generados por su descarga.

La descarga de los acuíferos calizos origina manantiales en los flancos de las montañas y aún en áreas de los valles donde el relleno es muy delgado. El caudal que brota varía desde unos cuantos litros hasta varios metros cúbicos por segundo.

Se estima que la descarga global de los manantiales procedentes de acuíferos calizos es del orden de 4.8 Mm<sup>3</sup>/año.

La recarga natural de los acuíferos calizos tiene lugar en las sierras, donde la formación Aurora está ampliamente expuesta y fracturada.

En el Valle de Ocampo el agua del acuífero calizo tiene salinidad total menor de 500 ppm y es del tipo cálcica-bicarbonatada. En el Valle de Cuatrociénegas su salinidad varía de 1 000 a más de 2 500 ppm, es de tipo cálcica-sulfatada y poco apta para la agricultura.

Una de las recomendaciones es la de incrementar la explotación de los acuíferos del Valle de Cuatrociénegas en unos 15 Mm<sup>3</sup>/año, mediante pozos diseminados en sus áreas perimetrales, a fin de minimizar la evaporación de agua subterránea, captándola antes de que su calidad se deteriore.

Otra de las recomendaciones es la de investigar si existe interconexión hidráulica entre los acuíferos calizo y granular, aplicando las técnicas isotópicas como complemento del análisis geohidrológico.

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

El Valle de Cuatrociénegas 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 200 mm de precipitación anual y temperaturas desde los 44°C en verano hasta bajo 0°C en invierno (Minckley, 1969 y Pronatura, 1998).

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

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

## Johannesson, Karen H.; Cortés, Alejandra; Kilroy, Kathryn C., Reconnaissance isotopic and hydrochemichal study of Cuatrociénegas groundwater, Coahuila, México, *Journal of South American Earth Sciences*, USA, 2004, pp. 1-10.

Los manantiales de la cuenca endorreica de Cuatrociénegas, Coahuila, México, mantienen una biota de más de 70 especies endémicas. Sin embargo, las características del régimen del flujo subterráneo siguen siendo un misterio. Como un esfuerzo para iniciar un estudio sistemático de la hidrogeología de la región, se colectaron muestras de agua en una serie de manantiales y pozas, y en un canal en la cuenca de Cuatrociénegas, y se analizaron los parámetros de campo (temperatura, pH, conductividad y alcalinidad) y los isótopos estables de hidrógeno y oxígeno. Se encontró que de las muestras tomadas, las del agua subterránea que descarga directamente a lo largo de una línea de manantiales controlados por una falla en rocas carbonatadas del cretáceo del acuífero Cupido-Aurora son las más diluidas (tienen las conductividades más bajas) y las que tienen temperaturas más altas. Las aguas de Cuatrociénegas se caracterizan por un pH circunneutral (6.9-7.7) y una alcalinidad razonablemente baja (160-215 mg/kg como HCO<sub>3</sub>). Los valores de  $\delta^{18}$ O de las aguas de Cuatrociénegas están en el rango de -8.2 a -5.7‰, con una media de -6.5 ±0.82‰, mientras que  $\delta D$  tiene rangos de -52 a -43‰, con una media de -46.6 ±3.2‰. Al graficar oxígeno 18 contra deuterio, la mayoría de los valores de las muestras de agua se ubican bajo la línea meteórica local y de manera subparalela a ésta. Las muestras colectadas lo más alejado de la línea de manantiales muestran los valores de  $\delta^{18}$ O y  $\delta D$ más enriquecidos. Los datos de isótopos estables indican que el enriquecimiento isotópico de las aguas subterráneas por evaporación siguiendo la descarga v subsecuente flujo en la superficie es un proceso importante dentro de la cuenca de Cuatrociénegas. Los datos isotópicos también sugieren que una fracción del agua subterránea de Cuatrociénegas proviene de una recarga local en las montañas alrededor del valle. Los manantiales que brotan de la base oeste de la Sierra de San Marcos son recargados en parte por estas montañas, mientras que las descargas de aguas subterráneas de la Laguna Anteojo en la parte norte del bolsón es más probable que sean recargadas en la parte alta de la Sierra de La Madera. Una estimación del balance de aguas sugiere que el flujo intercuencas quizás contribuye de manera considerable en la descarga subterránea.

La cuenca endorreica de Cuatrociénegas tiene una superficie de 1200 km<sup>2</sup>, está localizada en el desierto Chihuahuense al noreste del estado mexicano de Coahuila y es una de las zonas de descarga del acuífero Cupido-Aurora más importantes en términos del número de manantiales que hay en la cuenca y la gran cantidad de especies endémicas que mantiene (Minckley, 1969a, 1984). Cuatrociénegas está situado en la margen este del Bolsón de Mapimí, este bolsón tiene un área aproximada de drenaje de 26 000 km<sup>2</sup>. Geológicamente, el bolsón de Cuatrociénegas está localizado dentro del margen plegado de Coahuila (Laramide), en el flanco este de la Sierra Madre Oriental (Murray, 1961; Baker, 1970; Lehmann *et al.*, 1999).

Los principales acuíferos en la región de estudio, son sistemas someros formados en cuencas con relleno aluvial y el acuífero carbonatado regional de Cupido-Aurora (Lesser Jones, 1965).

La precipitación media anual a ras de suelo en el bolsón es menor de 200 mm, mientras que la evapotranspiración potencial excedente es de 2000 mm/año (García *et al.*, 1975; Caran y Winsborough, 1986). El nivel topográfico promedio en el bolsón es de 740 msnm, y en las montañas circundantes la elevación más alta es de 3000 m (Minckley y Cole, 1968; Rodríguez-Almaraz *et al.*, 1997; Contreras-Arquieta, 1998). La mayoría de los manantiales del bolsón de Cuatrociénegas consiste en pozas, algunas de las que contienen más de 1000 m<sup>3</sup> de agua. Sin embargo, lagunas más grandes, alimentadas por manantiales o lagos poco profundos también son comunes.

La metodología llevada a cabo se realizó de la siguiente manera, se colectaron muestras de agua subterránea en una serie de manantiales en el bolsón de Cuatrociénegas en enero de 1999 para hacer análisis de isótopos estables de hidrógeno y oxígeno. Las muestras de isótopos estables fueron colectadas en seis manantiales (Laguna de Garabatal, Laguna del Juan Santos, Poza de la Becerra, Pozos bonitos, Poza Caballo Cojo, y Laguna Anteojo), un lago poco profundo (Laguna de los Burros), y el canal Saca del Fuente. Para cada sitio muestreado se tomó, pH, conductividad, y alcalinidad los cuales fueron medidos *in situ* mediante procedimientos estándar.

Los resultados obtenidos de datos de isótopos estables de hidrógeno y oxígeno para las aguas del bolsón de Cuatrociénegas se muestran en la tabla 1.1. Se hicieron tablas de oxígeno 18 contra deuterio y se compararon con la línea de agua meteórica mundial de Craig y una línea de agua meteórica local. Ésta última se determinó por medio de una regresión lineal de datos de más de 20 años de la estación de la Agencia de Energía Atómica Internacional ubicada en Chihuahua, México.

				5011 u	e cualiocierie	yas.	
Muestra	δ <sup>18</sup> Ο	δD	pН	Т	Conductividad	Alcalinidad	Elevación
	(%)			(°C)	(µmhos)	como HCO <sub>3</sub>	de la
		(%)				(mg/kg)	recarga
							(m)
Laguna del Garabatal	-6.4	-46	7.5	18.6	4810	180.4	1500
Laguna del Juan	-6.4	-46	7.21	26.7	5820	185.3	1500
Santos							
Pozo de la Becerra	-6.7	-48	6.92	32.4	2420	200	1600
Pozos Bonitos	-7.1	-50	7.03	26.2	2250	170.7	1800
Pozo Caballo Cojo	-5.7	-43	7.22	16.8	3830	214.6	1170
Laguna de los Burros	-6	-44	7.69	13.2	3110	160.9	1300
Saca del Fuente	-5.8	-44	7.58	17.1	3120	190.2	1200
Laguna Anteojo	-8.2	-52	6.94	26.2	1620	190.2	2350

Tabla 1.1	Datos isotópicos de hidrógeno y oxígeno estables para el agua del								
	bolsón de Cuatrociénegas.								

La alcalinidad es reportada como mg HCO<sub>3</sub>/kg.  $\delta^{18}$ O y  $\delta$ D son reportados (como %) con respecto al estándar VSMOW. La elevación de la recarga fue estimada usando la relación, desarrollada para la cuenca de México,  $\delta^{18}$ O=-2.37 (Z)-3.2, donde Z es la elevación en kilómetros (Cortés y Durazo, 2001).

Todas las muestras tienen un pH circunneutral. El agua subterránea que descarga directamente del subsuelo a lo largo de la base de las sierras montañosas locales

(Poza la Becerra, Pozos Bonitos y Laguna Anteojo) tienen los valores de pH menores y tienen las menores conductividades. Más aún, a excepción de la Laguna de Juan Santos, el agua que brota de estos tres manantiales es más caliente que la muestreada en el resto de la cuenca de Cuatrociénegas. Consecuentemente, de las muestras de agua colectadas, estos tres manantiales descargan agua que refleja en forma más cercana la composición del agua subterránea en el acuífero Cupido-Aurora, ya que las otras muestras probablemente fueron modificadas por evapotranspiración, interacción con depósitos superficiales, y/o enfriamiento después de haber brotado del acuífero Cupido-Aurora.

#### Isótopos estables

Sobre la base únicamente de los datos de isótopos estables, las estimaciones de las elevaciones de la recarga sugieren que la mayor parte del aguas subterráneas de Cuatrociénegas pudiera representar recarga en las montañas circundantes (por ejemplo de la Sierra de San Marcos, Sierra de la Madera y Sierra de Menchaca).

#### Solutos mayores

Aunque es preferible comparar muestras tomadas aproximadamente al mismo tiempo y analizadas en el mismo laboratorio, la investigación muestra que una comparación de datos hidroquímicos de décadas diferentes indica que no ha habido esencialmente ningún cambio en la química de aguas subterráneas.

Aunque reconocen que los datos de aniones son pruebas insuficientes para concluir que el agua subterránea de Cuatrociénegas hidrogeológicamente está conectado a aquellas de la Comarca Lagunera o que representa paleoagua, es claro que existen diferencias en la composición entre las aguas subterráneas de Cuatrociénegas, y estas diferencias químicas corresponden a la ubicación de descarga de las aguas en el bolsón. Sin embargo, no es claro lo que estas diferencias en la composición significan en términos de la hidrogeología del acuífero, aunque para entenderlas ciertamente se requiere de un muestreo, tanto espacial como temporal, más completo del bolsón y regiones circundantes.

Concluyendo que el bolsón de Cuatrociénegas es uno de los dos únicos oasis desérticos dentro de América Central y del suroeste de los Estados Unidos de América (el otro está en Nevada, EUA) el cual mantiene a numerosas especies endémicas, principalmente como resultado de una descarga subterránea significativa. A pesar de la importancia de estas descargas subterráneas, actualmente es poco conocido el régimen de flujo subterráneo de Cuatrociénegas. Los datos preliminares de isótopos ambientales presentados en este trabajo sugieren que hay una componente importante de las aguas subterráneas de Cuatrociénegas que se recarga en las cadenas montañosas que rodean al bolsón.

Además, estos datos son consistentes con los del agua que descarga en manantiales a lo largo de la base oeste de la Sierra de San Marcos, esta agua proviene de infiltración de agua de lluvia en la Sierra de San Marcos. Mientras que los datos de  $\delta^{18}$ O y  $\delta D$  para la Laguna Anteojo, en la parte norte del bolsón, son consistentes con la infiltración de agua de lluvia en la parte más alta de la Sierra La Madera. Sin embargo, una estimación gruesa del balance de aguas para el bolsón de Cuatrociénegas indica que agua subterránea que se origina fuera de la cuenca probablemente contribuye a la abundante descarga de los manantiales dentro de ella. La existencia de un flujo regional del agua subterránea también es apoyado por las temperaturas relativamente calientes de algunas de las aguas subterráneas emitidas por el acuífero Cupido-Aurora dentro del bolsón de Cuatrociénegas. Los datos de solutos principales existentes, indican que existen diferencias entre la composición de aguas subterráneas que descargan dentro del bolsón de Cuatrociénegas, aunque estas diferencias no han sido interpretadas hidrogeológicamente aún. Una investigación adicional podría caracterizar mejor la hidrogeología del acuífero Cupido-Aurora en Cuatrociénegas.

### Investigaciones desarrolladas por la Dra. Valeria Souza, investigadora del Instituto de Ecología de la UNAM.

La Dra. Valeria Souza y su equipo de trabajo han llevado a cabo una investigación amplia en la zona. Se publicó información sobre ésta en dos artículos de divulgación que, para dar un panorama de la misma, se resumen a continuación. Por otro lado, la Dra. Souza nos proporcionó tres reportes de su trabajo que están ligados entre sí, y cuyo contenido no ha sido publicado aún en revistas arbitradas. Éstos también se resumen en esta sección.

### Cuatrociénegas un laboratorio natural de astrobiología. Revista de difusión de la facultad de ciencias de la UNAM. Núm. 75 pp. 4-12. Julio-Septiembre 2004, México.

En este artículo la Dra. Valeria Souza afirma que el objetivo de su investigación es estudiar con cuidado la actual ecología microbiana para predecir dónde se pueden buscar los organismos y cómo descifrar las señales de vida, ya sea analizando ambientes que emulen lo esperado en determinados planetas o condiciones que reflejen la vida antigua en la Tierra, especialmente las que llamamos extremas, como temperaturas muy altas o bajas, salinidades o pH extremos, etc.

La astrobiología es una nueva disciplina que tiene como objetivo estudiar la vida fuera de la Tierra. Su primera meta es entender cómo empezó y evolucionó la vida aquí, para así buscar vida o sus señales en otros planetas de manera más eficiente.

La Dra. Valeria Souza cuenta con un equipo de trabajo interdisciplinario (limnólogos, paleontólogos, genetistas de poblaciones, biólogos moleculares, especialistas en invertebrados), el cual ha laborado durante varios años estudiando las bacterias en el Valle de Cuatrociénegas. Este valle es uno de los pocos lugares donde coexisten los estromatolitos (una combinación de algas unicelulares y bacterias que existen desde hace tres mil 600 millones de años), con una heterogénea comunidad de animales, y también es uno de los sistemas acuáticos continentales con mayor diversidad y endemismos en México y el mundo. Aguas pobres en nutrimentos, particularmente en

fósforo, junto con sus condiciones específicas, impiden que las algas dominen los cuerpos de agua. Esto permite mantener las comunidades de estromatolitos y todos sus organismos asociados casi sin cambios.

Actualmente se sabe que los organismos que han evolucionado en nuestra Tierra pertenecen a tres grandes linajes, llamados "dominios". Dos de ellos corresponden a organismos que no tienen núcleo o procariontes, los dominios Archaea y Bacteria, mientras que el tercero está formado por los organismos que tienen núcleo en sus células, los Eukarya.

En el estudio les interesa mucho la resistencia a la salinidad, ya que los ambientes hipersalinos son comunes en Cuatrociénegas y es el tipo de ambiente donde se considera que existió o podría existir vida en Marte. Estos ambientes son caracterizados por alta composición iónica total, temperaturas generalmente estables, luz intensa y pH alcalino.

Los arqueas halófilos aparecieron después de que las cianobacterias contaminaran con oxígeno el planeta.

El principal resultado de estos estudios es el descubrimiento de que las comunidades bacterianas en Cuatrociénegas son muy diferentes unas de otras: si bien hay algunas especies que se encuentran en varios ambientes, la composición de especies es contrastante en los distintos sitios. Este grupo de trabajo ha detectado numerosos géneros de Bacteria y Arqueas que se consideran fundamentalmente marinos.

Cuatrociénegas: 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 Cuatrociénegas presenta una combinación de agua dulce y salada que podría ser un símil de la encontrada en Marte. Y que en Cuatrociénegas 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; la segunda, ubicada en un lecho más profundo, consiste en un mar conservado desde el Cretácico. Además, según la *Nacional Aeronautics and Space Administration (NASA)*, el agua de Cuatrociénegas podría ser un símil de la encontrada en Marte, profunda y salada.

El área protegida está en el límite entre dos provincias geológicas, el golfo de Sabinas y la plataforma de Coahuila e incluye ambientes acuáticos representados por manantiales conocidos como pozas, donde hay arroyos permanentes, lagunas y áreas inundadas.

Este grupo de trabajo realizó un estudio bacteriológico entre los valles de El Hundido, Calaveras y Cuatrociénegas, 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 reobtiene la radiografía de la comunidad, mediante picos gráficos indicadores de lo que se encuentra en cada lugar y en qué cantidades, además de la *librería de clonas*, usadas para comparar rápidamente la diversidad de secuencias de ADN bacteriano de las muy particulares bacterias de Cuatrociénegas, claramente marinas y de composición distinta en cada sitio, lo que explica la diversidad ecológica. Encontraron que el agua subterránea de los tres valles situados en triángulo (El Hundido, Calaveras y Cuatrociénegas) tienen la misma temperatura y comparten el agua de este mar.

En lo que respecta a la contaminación del agua, estudios realizados por la UNAM, señalan que, al aumentar las concentraciones de fosfatos desaparecerían los estromatolitos y todas las especies asociadas, más aún, un exceso de fertilizantes traería consigo problemas de *eutrofización* (enriquecimiento artificial del agua en materias nutritivas) y favorecería el ingreso de especies invasoras acuáticas.

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

Desde el punto de vista geológico los Valles de Cuatrociénegas 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 fuerzas laterales, las formaciones han sufrido grandes plegamientos en distintas orientaciones. El resultado de estas fuerzas es la aparición de cabalgaduras, así como de fallas inversas. En la Sierra de San Marcos, así como en la Sierra de La Fragua se observan formaciones en posición casi horizontal orientadas al oeste. Aunado a esto, entre la formación San Marcos y Acatita (estratos impermeables) se encuentran dos grandes estratos de yeso los cuales, ocasionaron el desplazamiento de la formación por arriba de estas.

- Existe evidencia de que entre la sierra de San Marcos y el de La Fragua corre una falla. Esta falla comunicaría subterráneamente el Valle de Cuatrociénegas con el Valle de El Hundido (Federico Mosser y J. Manuel Rodríguez, com. 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 Cuatrociénegas (Federico Mosser y J. Manuel Rodríguez, com. pers.)

La Dra. Souza hace algunas recomendaciones:

 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. Sugerimos que se haga una evaluación muy seria de cuánta agua se captura por recarga y que se limite a solo el número de hectáreas que utilizando riego por goteo y fertilización por goteo no sobre pasen la cuota mínima supuesta de recarga.
- 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 refuerzo: datos de isótopos, paleomagnetismo, 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 cárstica, sin embargo ignoramos cuál es el origen y composición del manto profundo, concentración de oxígeno, niveles del manto freático. Esto es importante 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 del análisis de las comunidades bacterianas de Cuatrociénegas y su posible relación con el Valle de El Hundido, Coahuila. Informe A.

En este reporte se presenta un primer análisis de las comunidades bacterianas de Cuatrociénegas 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 de El Hundido cerca de las muestras de agua salada de Cuatrociénegas. Los métodos usados son promisorios y se concluye que se necesita obtener más muestras y llevar a cabo análisis detallados.

# Reporte del análisis de las comunidades bacterianas de Cuatrociénegas y su posible relación con el Valle de 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 de El Hundido, Cuatrociénegas y Calaveras. Los resultados indican conexión entre estos valles.

Con los datos se realizó un análisis de *clusters* que agrupa a cada sitio de acuerdo a la semejanza o deferencia entre los genotipos y la abundancia de cada uno. Estos análisis indican sin ninguna duda que los dos manantiales principales del Valle de Cuatrociénegas (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 si en el pasado estos tres valles hubieran estado aislados uno del otro, las comunidades bacterianas hubieran divergido con el tiempo (50 millones de años) generando patrones diferentes. Hay que agregar además que las bacterias que se encontraron de manera común en estos tres valles son microorganismos sumamente raros, de origen principalmente marino y que no migran por el aire.

Como recomendación se debe regular de manera muy cuidadosa el uso del 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.

#### Información sobre el grupo "La Venta" concerniente a Cuatrociénegas

La asociación geográfica "La Venta", es un equipo italiano que ha realizado muchas expediciones a regiones remotas de la Tierra. Son siete los miembros fundadores, con diversas profesiones como son: físico, periodista, fotógrafo, profesor de educación física, geólogo, técnico electrónico y cirujano. Los proyectos son del tipo exploratorios.

El trabajo realizado en Cuatrociénegas consistió primero, en una cuidadosa investigación bibliográfica sobre las exploraciones realizadas anteriormente en el área de estudio. Encontrándose que muchos estudios habían sido realizados en el campo biológico, sobre todo con relación al endemismo animal que el ecosistema de las pozas ha producido, pero poco o nada respecto al campo hidrogeológico y espeleológico.

Se realizaron cinco expediciones, la primera en mayo de 1998, la última en octubre de 2002, se le unen al grupo La Venta biólogos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO), realizan investigaciones sobre los ecosistemas de las bacterias en las aguas de las pozas.

En cinco años de expediciones se involucraron 70 investigadores, 65 nuevas grutas exploradas, 8 km de topografía subterránea, entre otros. Recibieron apoyo del gobierno del Estado de Coahuila, colaboración de la reserva de Semarnat y de Pronatura.

Algunos de los trabajos realizados por el grupo La Venta, compilados en el libro **Bajo el** *desierto* (Badino *et al.*, 2004), son los siguientes:

- 1. El proyecto Cuatrociénegas, Tullio Bernabei, Italo Giulivo
- 2. Las aguas de Cuatrociénegas, Paolo Forti, Italo Giulivo, Marco Mecchia, Leonardo Piccini
- 3. Condensaciones ocultas, Giovanni Badino
- 4. Fosfatos y ambiente cárstico, Paolo Forti
- 5. El misterio de las aguas del desierto: una hipótesis para pasado y futuro, *Tullio Bernabei, Antonio De Vivo, Italo Giulivo*
- 6. Gente del desierto, Davide Domenici

Otro documento escrito por un miembro de esta asociación, es el que a continuación se presenta, **The Karst aquifer feending the Cuatrociénegas pools (Coahuila,** *México): Its vulnerability and safeguard.* Paolo Forti, et al. Aquifer Vulnerability and Risk, First International Workshop, may 2003.

Las pozas de Cuatrociénegas en el mundo son conocidas por su único ecosistema y son estudiadas a detalle desde el punto de vista de su fauna, flora e hidrogeoquímica. Estas pozas representan también un recurso de agua muy importante en una región caracterizada porque las lluvias son escasas.

La asociación geográfica denominada "La Venta" ha organizado en los últimos tres años varias expediciones, durante las cuales, todas las pozas fueron localizados y estudiadas desde el punto de vista hidrogeológico. Basándose en estos estudios, ha sido posible avanzar la hipótesis de que el agua meteórica del acuífero cárstico, encontrado en la Sierra de San Marcos y Pinos, representa con diferencia la surgente más importante para la alimentación de las pozas. Alimentación que viene a través de un circuito bastante profundo.

Se recomiendan nuevas investigaciones para entender mejor el sistema hidrodinámico de las pozas e implementar una política de salvaguardia ambiental debido a una marcada vulnerabilidad a la contaminación del acuífero cárstico.

# 1.4. Área de estudio

El área es extremadamente desértica; incluye montañas, cañones, abanicos aluviales. El valle es salitroso y plano, con algunas colinas bajas y una importante área de dunas de yeso. Además, el área presenta montañas hasta de 1900 msnm. El complejo hidrológico está interconectado y constituido por alrededor de 200 manantiales, formando lagunas, pozas, ríos, riachuelos y pantanos de diferentes extensiones, hasta 600 metros de diámetro.

Dentro de la zona de estudio se encuentra el municipio de Cuatrociénegas con una población de 12 154 habitantes (INEGI, 2004). También se encuentra el Área de Protección de Flora y Fauna denominada "Cuatrociénegas" la cual fue decretada el 7 de noviembre de 1994 y cuenta con una superficie de 84 347 hectáreas.

## 1.4.1 Localización de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza 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 9 185 km<sup>2</sup> (figura 1.1).



Figura 1.1 Localización de la zona de estudio.

#### 1.4.2 Extensión

En el área se encuentran tres valles, el primero y el de mayor interés es Cuatrociénegas, el segundo El Hundido y un tercero Ocampo o Calaveras. En los dos primeros valles es donde se basa este estudio. El Valle de Cuatrociénegas se encuentra limitado por las Sierras La Madera al norte, La Fragua al oeste, San Marcos y La Purísima al sur y al este por la Sierra La Purísima, con una superficie aproximada de 1 426 km<sup>2</sup>. El Valle de El Hundido sus límites son al norte Sierra La Fragua, al sur y este por la Sierra Alamitos y al oeste con la Sierra El Venado, con una superficie aproximada de 952 km<sup>2</sup> (figura 1.2).

El acuífero Cuatrociénegas se encuentra dentro de la Región Hidrológica 24, denominada Río Bravo-Conchos, y el acuífero El Hundido pertenece a la Región Hidrológica 35, Bolsón de Mapimí.



Figura 1.2 Extensión de la zona de estudio.

#### 1.4.3 Vías de comunicación

Las principales vías de comunicación son: la carretera federal No. 57 que comunica a la ciudad de México con la parte norte del país, pasando por Saltillo, Monclova y llega hasta Piedras Negras; la carretera federal No. 30 que va de Monclova a Cuatrociénegas de Carranza hasta la ciudad de Torreón; el ferrocarril que une la Ciudad de Saltillo, Monclova, Cuatrociénegas y Torreón.

Coahuila posee cinco aeropuertos, que se localizan en Torreón, Saltillo, Piedras Negras, Monclova y Ciudad Acuña; pero sólo el primero proporciona servicio internacional, los cuatro restantes únicamente dan servicio nacional y local. Los aeropuertos más cercanos a la zona de estudio son los que se encuentran en las ciudades de Monclova, Torreón y Saltillo (figura 1.3).



Figura 1.3 Vías de comunicación.

# 1.4.4 Actividades económicas

#### Agricultura

De los cultivos destaca la producción de maíz, forrajes, algodón y vid.

### Ganadería

Se cría ganado bovino para carne, caprino y porcino.

#### Industria

Se localizan pequeñas empresas dedicadas a la elaboración de alimentos y bebidas, así como dos plantas yeseras, una de yeso cerámico y otra de yeso industrial, una maquiladora, asimismo una planta de sales.

#### Minería

Existen yacimientos de oro, plata, plomo, cobre y fluorita.

#### Comercio

Esta actividad se desarrolla principalmente en las ramas de compraventa de alimentos, bebidas y productos de tabaco, prendas de vestir, artículos de uso personal, artículos para el hogar, vinos y materias primas: materiales y auxiliares y equipo de transporte, refacciones y accesorios.

#### 1.4.5 Servicios

La ciudad de Cuatrociénegas cuenta con servicios telefónico, telegráfico, correo, asistencia social y centros de salud. También cuenta con restaurantes y hoteles de categoría turística.

## 1.4.6 Área de Protección de Flora y Fauna

La historia de conservación en el valle Cuatrociénegas está estrechamente relacionada con la historia de investigación científica, que comenzó con la revisión biológica del valle en 1939 y su reconocimiento como un centro de endemismo acuático y semiacuático en 1940 (Taylor y Minckley 1966, pág. 18; Contreras-Balderas 1994, pág. 39). Para muchos científicos, la declaración del valle como un Área Natural Protegida en 1994 marcó el éxito de muchos años de cabildeo. Desde 1959, W. L. Minckley jugó un papel principal en la publicación de la importancia biológica y la importancia evolutiva de Cuatrociénegas. Algunos simposios - incluyendo uno en 1983 y otro en 1993 patrocinado por el *Desert Fishes Council* (DFC), un grupo de biólogos que estudian los pescados de desierto de Norteamérica y sus ecosistemas asociados - han sido dedicados a la discusión de la importancia de la biota del valle. Los resultados de estas reuniones fueron publicados para demostrar la importancia de la región a dependencias federales, estatales, y locales (Johnson, 1984, pág. 89). En 1983, Delgadillo y colegas propusieron un plan de dirección para uno de los fondos más grandes y más amenazados en la cuenca, Poza La Becerra, que fue adoptado por el

gobierno federal (SEDUE 1983a; Contreras-Balderas 1994:39). En 1984, Contreras-Balderas y Almada-Villela propusieron que el valle fuera declarado un parque nacional, y en 1985 y 1986, presentaron su oferta a la antigua Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). Contreras-Balderas ha publicado extensivamente sobre la biota y los habitats del valle y ha jugado un papel principal en atraer la atención del gobierno mexicano al valle.

Se realizaron estudios técnicos en la región de Cuatrociénegas previos a la fecha del decreto de 1994, por parte de la Secretaría de Desarrollo Social en coordinación con el Gobierno del Estado de Coahuila y con la colaboración de la Universidad Autónoma Metropolitana, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y la Asociación Civil Protección de la Fauna Mexicana, de los que se desprendió la necesidad de establecer el área natural protegida con carácter de Área de Protección de Flora y Fauna denominada "Cuatrociénegas" a fin de preservar los hábitat naturales de la región y los ecosistemas más frágiles; asegurar el equilibrio y la continuidad de sus procesos evolutivos ecológicos; aprovechar racional y sostenidamente sus recursos naturales; salvaguardar la diversidad genética de las especies, particularmente de las endémicas, amenazadas y en peligro de extinción; y proporcionar un campo propicio para la investigación científica y el estudio del ecosistema y su equilibrio.

"Cuatrociénegas" se decretó el 7 de noviembre de 1994, con una superficie de 84 347 hectáreas. La superficie está integrada por terrenos ejidales, de propiedad particular, así como nacionales. Aquí se encuentran distintos tipos de vegetación como: bosque de yuca, bosque espinoso, dunas de yeso, entre otros. Las especies faunísticas presentes en el valle, son en su mayoría endémicas, presentándose los valores más altos de endemismo entre los moluscos, crustáceos y peces.

Las obras y actividades que se realicen en el Área Protegida, deben sujetarse a los lineamientos establecidos en el programa de manejo del área y a las disposiciones jurídicas aplicables.

Todo proyecto de obra pública o privada que se pretenda realizar dentro del Área de Protección, debe contar previamente a su ejecución, con la autorización de impacto ambiental correspondiente. También se prohibió la fundación de nuevos centros de población. Se prohibió modificar las condiciones naturales de los acuíferos, cuencas hidrológicas, cauces naturales de corrientes, manantiales, riberas y vasos existentes, verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y en cualquier clase de corriente o depósitos de agua, y desarrollar actividades contaminantes.

Los ejidatarios, propietarios y poseedores de predios ubicados en el Área de Protección, están obligados a la conservación del área.

La administración, conservación, desarrollo y vigilancia del Área de Protección de Flora y Fauna "Cuatrociénegas", está a cargo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la Semarnat, con la participación que corresponda a otras dependencias del Ejecutivo Federal.

Por parte de la comunidad científica hay un enorme interés, y se han desarrollado investigaciones y estudios ha nivel de tesis de posgrado, entre otros. De los cuales se puede mencionar el documento de Winsborough (1993); documento publicado en un simposio en Monterrey, Nuevo León, en el cual afirma que en el Valle de Cuatrociénegas se distinguen cuatro tipos de estromatolitos dulceacuícolas y estructuras carbonatadas asociadas: *i*) estromatolitos laminados y oncoidos profundos por Homoeothrix balearica y Schyzothrix lacustris con un patrón superficial de pequeños bordes lobulados horizontales o microterrazas; ii) duros, estromatolitos intrincados y oncoidos construidos por Gongrosira calcifera, cianobacterias y diatomeas; iii) grandes estromatolitos globosos no laminados con un patrón superficial sinuosamente corrugado, resultando del crecimiento de Dichothrix bonetiana, Schyzothrix lacustris, Cyanostylon sp., y diatomeas; iv) laminados estromatolitos cupulados construidos por el crecimiento secuencial de Scytonema mirabile, Schyzothrix affinis, y diatomeas. Estos estromatolitos y depósitos microbianos relacionados, tales como capas microbianas y travertines asociados con ellos, son los principales sustratos y fuentes de productividad béntica en cuatro habitats, que incluyen un arroyo, un lago somero, un lago profundo y un lago estacional.

Otro trabajo es el realizado por Calegari (1997), en éste se hace énfasis en que el incremento de la extracción de agua ha afectado la biota en las pozas. La poza La Becerra, es una de las pozas más grandes en el valle alimentada por manantiales, está fue canalizada por primera vez en 1964 y el resultado es una disminución de niveles de agua, provocando una disminución de la población de la fauna, como son caracoles, camarones, peces y poblaciones de tortugas, debido al aumento de la temperatura, y a la pérdida de pantano (Contreras-Balderas, 1984, pág. 85).

# 2. METODOLOGÍA

## 2.1. Actividades de campo

Durante los meses de abril y mayo de 2004, se llevaron a cabo las actividades de campo encaminadas a obtener la información necesaria para la cuantificación del recurso hídrico de la zona de estudio como es el censo de aprovechamientos consistente en el registro de pozos y norias en los Valles de El Hundido y Cuatrociénegas.

# 2.1.1 Recopilación de la información obtenida

Se recopiló toda la información útil y necesaria que defina la situación actual de conocimiento geológico, hidrogeológico, geoquímico, entre otros, del área de estudio.

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

## 2.1.2 Recorridos de campo

Se realizaron recorridos de campo necesarios para la localización y verificación física de los pozos piloto preferentemente inactivos y piezómetros susceptibles de ser incorporados como vértices (Nodos) en la red piezométrica definitiva de cada acuífero propuesto para su instrumentación. Al tener éstos definidos; la ubicación de dichos los pozos se realizó mediante posicionador geográfico (GPS) manual, identificándolos con sus coordenadas geográficas expresadas en grados, minutos y segundos. En caso de no existir pozos piloto o piezómetros en la zona correspondiente a un vértice, se localizó el sitio para el o los piezómetros propuestos que formarán parte de la nueva red de medición, con objeto de definir que el sitio elegido reunirá con los requisitos geohidrológicos (continuidad, profundidad del acuífero) para llevar a cabo la medición.

## 2.1.3 Sondeos exploratorios

Se realizaron dos sondeos exploratorios a 7.46 cm (2 15/16") de diámetro "NQ", con barril muestreador para cortar núcleo cada 5 m o en los cambios de formación hasta las profundidades del orden de 200 m y 250 m respectivamente, ademados con tubería de PVC de 1.5" de diámetro de cedula 80, liso hasta el nivel estático y ranurado hasta la profundidad total, los cuales tienen cada uno, un brocal que sobresale del terreno natural 0.50 m. y se le construyó un acabado rectangular de concreto, con tapa metálica y candado.

El equipo utilizado fue tipo rotatorio (Longyear 44) con capacidad para alcanzar las profundidades señaladas y está provisto de las herramientas, aditamentos y equipo auxiliar necesario para realizar los trabajos requeridos.

Se instaló un conductor o contrapozo para los sondeos exploratorios, utilizando tubería de acero o tambores de 200 litros o tubería PVC, debidamente fijado, cementando el

espacio anular entre ésta y la exploración. Para la exploración de estos sondeos, se utilizó el Método de Circulación Directa, utilizando para ello como fluido de perforación lodos bentoníticos con viscosidad de 38 seg, en viscosímetro de "marsh-funell".

En cada sondeo se obtuvo:

- 1. Recuperación de núcleos de un 60 a 70% por cada metro cortado.
- 2. Corte litológico a partir del núcleo obtenido.

#### 2.1.4 Mediciones de niveles piezométricos

Durante el recorrido de campo, en cada pozo definido como vértice (nodo) de cada acuífero, se llevó a cabo la medición del nivel del agua subterránea con sonda eléctrica, con señal acústica para ello; para ello se coordinaron las visitas de campo con las autoridades correspondientes. En los casos de pozos de uso agrícola, si la obra estaba operando, se acudió con las autoridades ejidales o bien con los propietarios, según el caso, a fin de solicitar que el bombeo fuera suspendido por lo menos 24 horas antes de la medición, de tal manera que al realizar la medición no este afectada por el bombeo cercanos. Después se recabó la información existente en la forma del censo de pozos piloto.

#### 2.1.5 Análisis químico y fisicoquímico de muestras de agua

Muestreo y análisis físico, químico e isotópico de aguas subterráneas. Se tomaron muestras de agua subterránea en 100 sitios para análisis físico-químicos y en 50 sitios para análisis isotópicos, en la descarga de los pozos y en intervalos discretos en pozos con tubería ranurada que atraviesen distintos horizontes geológicos, esto último, en función del análisis de la conductividad eléctrica respecto de la profundidad. El número final de éstos últimos se determinó, a partir del análisis geológico y el número de sitios donde sea posible llevar a cabo dicho muestreo. La selección de estos sitios se hizo con base en criterios geológicos e hidrogeológicos que nos permitan definir los sistemas de flujo de los acuíferos.

En 18 pozos sin equipo de los valles de El Hundido (9) y Cuatrociénegas (9), se realizaron perfiles de salinidad y temperatura con el fin de caracterizar la calidad del agua subterránea a distintas profundidades.

Los análisis físico-químicos de pH, temperatura, conductividad eléctrica y potencial redox se realizo *in situ*. Los elementos que se analizaron en laboratorio son: calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sílice, nitratos, arsénico, flúor, boro, cadmio, sólidos totales disueltos, dureza, alcalinidad totales, uranio, vanadio, níquel, bario, litio, estroncio, plomo, zinc, manganeso, plata, fierro, selenio, molibdeno, renio, wulframio, fósforo y especies nitrogenadas. Los análisis isotópicos comprendieron el deuterio, oxígeno 18, tritio ambiental y carbono 14, carbono 13 y azufre 34.

Con los resultados físicos, químicos e isotópicos obtenidos se realizaron: *i*) el análisis de calidad del agua; *ii*) el cálculo de los índices de saturación para especies minerales seleccionadas utilizando el criterio de  $\pm$  5% Log K<sub>eq</sub> para la región de equilibrio; *iii*) la construcción de diagramas binarios que relacionen pares de componentes y su comparación con las líneas de disolución del agua de mar y especies minerales; *iv*) la modelación hidrogeoquímica inversa con apoyo de datos isotópicos para determinar la evolución de la calidad del agua subterránea en la dirección del flujo subterráneo así como la identificación de mezclas de aguas a partir de miembros extremos; *v*) el balance de sales en el Valle de El Hundido; y *vi*) la caracterización isotópica para determinar el origen y sitio de la recarga, estimación de los tiempos de residencia y la vulnerabilidad a la actividad antropogénica.

# 2.1.6 Selección de pozos piloto para su instrumentación

Fue necesario que cada pozo piloto y/o piezómetro considerado para ser instrumentado contará con los datos siguientes: *i*) coordenadas geográficas obtenidas con GPS, *ii*) corte litológico, *iii*) registro eléctrico, *iv*) croquis de diseño constructivo de terminación, (diámetro de perforación, ampliaciones, ademe, descripción de los tramos de tubería lisa y ranurada, engravado, cementado, etc.). Después de haber realizado las visitas necesarias a pozos con/sin equipo de bombeo y/o piezómetros, se seleccionó el número de pozos para ser instrumentados.

# 3. FISIOGRAFÍA

# 3.1. Fisiografía

El municipio de Cuatrociénegas comprende áreas que corresponden a dos provincias fisiográficas de México, las cuales son: Sierras y Llanuras del Norte y Sierra Madre Oriental. Dentro de la primera provincia, se tiene incluida la Subprovincia de las Llanuras y Sierras Volcánicas. Y de la segunda provincia incluye dos subprovincias la de Sierras y Llanuras Coahuilenses y la Subprovincia de Sierra de la Paila, como se aprecia en la tabla 3.1, y en la figura 3.1.

Tabla 3.1	Fisiografía del municipio de Cuatrociénegas.
-----------	--

Provincia	Subprovincia	% de la superficie municipal								
Sierras y Llanuras del Norte 2% aprox.	Llanuras y Sierras Volcánicas	2% aprox.								
Sierra Madre Oriental 98% aprox.	Sierras y llanuras Coahuilenses	38% aprox.								
	Sierra de la Paila	60% aprox.								
FUENTE: INEGI. Carta Fisiográfica, 1:1 000 000.										

# 3.1.1 Provincias Fisiográficas

# Sierras y Llanuras del Norte

Esta provincia árida y semiárida se extiende también profundamente hacia el territorio de Estados Unidos de América. Con variantes, sus sierras, más bien bajas y abruptas, se orientan burdamente nornoroeste-sursureste y quedan separadas entre sí por grandes bajadas y llanuras con relleno aluvial, a las que tradicionalmente se ha llamado "bolsones". Una parte de la cuenca del río Conchos, afluente del Bravo, se integran a la cuenca de éste último en la región de la ciudad de Chihuahua, pero al noroeste de la misma y al sureste del Conchos, (Bolsón de Mapimí), el drenaje es interno. Al sur de Ciudad Juárez se encuentra uno de los campos de dunas más extensos del país, el de Samalayuca, en el sur de la provincia se extiende hacia el oriente una saliente, que es la Laguna de Mayrán (o Bolsón de Coahuila), lecho seco en la actualidad, de lo que fuera en tiempos pasados un enorme lago. Hoy es una de las zonas más áridas del país, con salinidad en su eje central, pero aún con áreas inundables por chubascos esporádicos.

La Subprovincia de Llanuras y Sierras Volcánicas, tienen dos salientes que penetran en territorio coahuilense y ocupan 14 002.66 km<sup>2</sup>, lo que significa un 9.23% de la superficie total estatal. Una inmediatamente al sur del Bolsón de Mapimí, muy llano y árido, y la región plana al este de la ciudad de Torreón. Los suelos que se encuentran en abundancia son Xerosoles y Yermosoles, dominan los suelos someros de colores

claros -Litosol y Regosol calcárico-, con baja capacidad de retención de nutrientes y muy pobres en materia orgánica.

### Sierra Madre Oriental

Esta provincia corre, en sentido paralelo a la Costa del Golfo de México desde la frontera norte del país hasta sus límites con el Eje Neovolcánico en la cercanía de Teziutlán, Puebla. A la altura de Monterrey, Nuevo León, una de sus ramas tuercen abruptamente al oeste para extenderse hasta la Sierra Madre Occidental al norte de Cuencamé, Durango, la otra continúa hacia el norte para terminar en la región de Big Bend, Texas. Colinda al norte y noroeste con la Provincia de las Sierras y Bolsones; al oeste con la Mesa Central y, en una pequeña franja del extremo noroeste, con la Sierra Madre Occidental; al sur con la Provincia del Eje Neovolcánico y al este con la Llanura Costera del Golfo Norte y la Gran Llanura Norteamericana. Abarca partes de los estados de Durango, Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Veracruz, Hidalgo y Puebla. La Sierra Madre Oriental es, fundamentalmente, un conjunto de sierras menores de estratos plegados. Estos estratos son de antiguas rocas sedimentarias marinas (con edades que van del Cretácico y del Jurásico Superior), entre las que predominan las calizas y, en segundo término, las areniscas y las lutitas.

La Subprovincia de las Sierras y Llanuras Coahuilenses incluyen una parte del municipio de Cuatrociénegas, entre otros. En superficie, la subprovincia ocupa, dentro del Estado de Coahuila, 43 937.56 km<sup>2</sup>. En esta región dominan los Litosoles, Rendzinas. También se encuentran Regosoles calcáricos, Xerosoles lúvicos, háplicos y cálcicos, Planosol mólico, Feozem háplico, Castañozem háplicos, Solonchak órtico, así como Vertisol crómico.

La Subprovincia de la Sierra de la Paila consta de un conjunto de sierras y bolsones amplios, de drenaje interno, con bajadas y abarca dentro del estado de Coahuila 19 229.68 km<sup>2</sup>, que representan el 12.68% de la superficie total estatal.

En su parte occidental se tiene el bolsón conocido como Valle Buenavista, limitado al oeste por la Sierra de Tlahualilo y al este con las elevaciones llamadas de Albardienta, que alcanza 1 800 msnm. En el oriente se tiene la Sierra de la Paila propiamente, de estructura dómica y flancos suaves, excepto en el noroeste, donde es afectado por un afallamiento. Tres bolsones, con pisos a menos de 1 000 msnm, llamados valles El Sobaco, El Hundido y el de San Marcos y Los Pinos ocupen el norte de la subprovincia. La dominancia de las calizas es casi completa en la sierra, excepto en el Valle de San Marcos y Los Pinos, donde afloran rocas volcánicas basálticas sobre un área de consideración.

Los suelos que abundan en esta región son los Litosoles y Regosoles calcáricos, también se encuentran Rendzinas, Xerosoles cálcicos y háplicos, Castañozems, Feozems y Yermosoles háplicos y cálcicos.



# Figura 3.1 Fisiografía del Estado de Coahuila, provincias y subprovincias.

# 3.1.2 Hidrología

## 3.1.2.1 Hidrología del Valle de El Hundido

El acuífero El Hundido se encuentra en la Región Hidrológica del Bolsón de Mapimí (RH-35, figura 3.2), cuenca Valle de El Hundido (figura 3.3) y subcuenca El Hundido (figura 3.4).

El Valle de El Hundido es una cuenca endorreica con un patrón de drenaje caracterizado por numerosos pequeños tributarios, que se unen a corrientes de orden mayor y en algunas áreas es de tipo radial (figura 3.5). Las corrientes son de régimen transitorio, con escurrimientos torrenciales de unas cuantas horas de duración. Los arroyos se originan en las sierras que circundan al valle y en las márgenes de éste desaparece al infiltrarse a través de depósitos aluviales permeables, constituyendo de esta manera una fuente de recarga al acuífero (CNA, 2001).



Figura 3.2 Región Hidrológica 35.







Figura 3.4 Subcuenca El Hundido.



Figura 3.5 Patrón de drenaje de la subcuenca El Hundido.

# 3.1.2.2 Hidrología del Valle de Cuatrociénegas

El acuífero de Cuatrociénegas se encuentra en la región Hidrológica Río Bravo-Conchos (RH-24, figura 3.6), cuenca P. Falcón-R. Salado (figura 3.7) y Subcuenca Río Salado -Nadadores (figura 3.8).

El Valle de Cuatrociénegas es una cuenca endorreica, en general los arroyos que se originan en las sierras que lo circundan desaparecen al infiltrarse en las márgenes del valle a través de los depósitos aluviales permeables que rellenan al valle.

El patrón de drenaje regional es predominantemente del tipo dendrítico, aunque en algunas áreas es de tipo paralelo y radial. Las corrientes son de régimen transitorio, con escurrimientos torrenciales de unas cuantas horas de duración (figura 3.9).



Figura 3.6 Región Hidrológica 24.



Figura 3.7 Cuenca P. Falcón – R. Salado.



Figura 3.8 Subcuenca Río Salado-Nadadores.



Figura 3.9 Patrón de drenaje de la subcuenca Río Salado-Nadadores.

## 3.1.2.3 Ríos, pozas y lagunas

Aunque las lluvias en el Valle de Cuatrociénegas son escasas, tiene abundante agua subterránea la cual emerge a la superficie a través de innumerables manantiales. El agua que fluye de estos manantiales forma un intricado sistema hidrológico compuesto por ríos (figura 3.10), pozas (figura 3.11) y humedales (figura 3.12).

La elevación del valle es de alrededor de 740 msnm y esta rodeado por la Sierra de la Madera al norte, la cual tiene una elevación superior a los 3 000 msnm, al sureste por la Sierra San Marcos la cual tiene una elevación de 2 500 msnm. La Sierra de La Fragua franquea el valle en el lado Oeste, con elevaciones que van de 1 000 a 1 800 msnm (Minckley y Gerald, 1969). Estas montañas que rodean al Valle de Cuatrociénegas originalmente formaban una cuenca cerrada, por lo que es posible que en aquel tiempo se formaran en la parte más baja pantanos y áreas inundadas someras.

Las pozas tienen profundidades de menos de un metro hasta 10 metros, y diámetros de unos pocos centímetros hasta 200 metros. La mayoría de las pozas se localizan en las faldas de la Sierra San Marcos y Pinos.

El río más importante del valle es el Río Mezquites (figura 3.10). Este nace cerca del rancho Tierra Blanca. Cerca de su nacimiento tiene de 2 a 8 metros de ancho, 2 metros de profundidad y la corriente es lenta. Al Noreste de la Sierra San Marcos pasa a través de un humedal grande y en este punto se le unen aguas del sistema Mojarral. En este lugar tiene un ancho que va de 2 m hasta 20 m y una profundidad de 2.5 m. La descarga de este río es muy estable. En tiempos anteriores, el río drenaba hacia una depresión cerrada que se encontraba en la parte Este. En la actualidad descarga hacia canales que fluyen fuera del vaso de Cuatrociénegas.

Existen dos lagunas de dimensión considerable dentro del valle llamadas Playitas y Churince, la primera representa un sistema alterado al que llega agua procedente de un canal artificial y la segunda un sistema relativamente intacto dentro del valle.



Figura 3.10 Río Mezquites (Grall, 1995).



Figura 3.11 Vista área de las pozas (Grall, 1995).



Figura 3.12 Humedales.

# 3.1.2.4 Infraestructura Hidráulica

La infraestructura hidráulica más relevante del Valle de Cuatrociénegas son un conjunto de canales que conducen el agua de los manantiales a los centros de riego dentro y fuera del valle (figura 3.13).

Estos canales se empezaron a construir desde el siglo XVI cuando los españoles llegaron a la zona (Alessio Robles, 1938). Los canales más antiguos son: canal del Anteojo en 1950, la Escobeda en 1906, la Angostura en 1895, canal Nuevo de 1958-1962, Orozco 1906, Saca del Fuente 1906 y Becerra 1964. Además de estos canales, se han construido canales nuevos.

Algunos datos concernientes a los canales son:

El canal de Santa Tecla que tiene una longitud de 54.6 km, de los cuales 52.3 km son revestidos y 2.3 km sin revestimiento. Su caudal varía entre 220 y 320 lps y su agua se canaliza al valle del Ejido Sacramento para el riego de 3 000 has.

El canal Saca Salada tiene 65 km sin revestimiento y un rango de caudal de 800 a 1 300 lps, y se aprovecha fuera del valle en el Ejido La Madrid para el riego de 673 has.

El canal de la Becerra tiene entubado 1 200 m y 56 km sin revestimiento. Su caudal va de 580 a 645 lps y sus aguas son utilizadas en el riego de 772 has dentro del valle en el Ejido de Cuatrociénegas.

El canal El Venado tiene ocho km revestidos y 1.9 km sin revestimiento. Su caudal varía de 66 a 98 lps e irriga los campos de cultivo del Ejido El Venado dentro del valle.

El canal de Antiguos Mineros del Norte tiene un caudal entre 30 a 80 lps y el agua se utiliza en el riego de los campos de cultivo del Ejido Antiguos Mineros del Norte. Se encuentran sin revestir sus dos primeras partes y después el canal está revestido hasta llegar a los campos de cultivo.

El canal de El Agua Grande es utilizado por los ejidatarios del Venado y por algunos pequeños propietarios.

El canal de Julio Arredondo tiene una descarga entre 40 y 60 lps y es utilizado por pequeños propietarios del Valle de Cuatrociénegas. Este canal no cuenta con revestimiento.



Figura 3.13 Infraestructura hidráulica.

## 3.1.3 Clima

El Estado de Coahuila está situado, en su mayor parte, en el oriente de una gran área climática denominada como Desierto de Chihuahua, o Desierto del Norte de México. Se caracteriza por poseer climas continentales, secos y muy secos, que van desde los semicálidos, predominantes en los bolsones coahuilenses, hasta los templados de las partes más altas y las más septentrionales (INEGI, 2004).

Los climas muy secos se encuentran sobre las extensas llanuras del poniente de Coahuila y en el centro de la entidad se presentan climas muy secos semicálidos, con lluvias en verano que coinciden con las temperaturas más altas e inviernos frescos. La influencia de estos climas abarca grandes áreas del estado, en el Bolsón de Mapimí, las lagunas de Mayrán y Viesca, la Comarca Lagunera, y además en el norte de la entidad, y su parte central, como en el gran llano de Ocampo, y los de San Marcos, Cuatrociénegas, El Sobaco y El Hundido.

Las escasas precipitaciones pluviales, que promedian anualmente entre unos 100 a 400 mm y se presentan en su gran mayoría en el verano, en forma de unos cuantos aguaceros y es relativamente común la condición de canícula o sequía interestival, que se presenta, entre otras zonas, en Ocampo y Mayrán.

La estación Cuatrociénegas se utilizó para el análisis de la precipitación, evaporación y temperatura, el periodo de análisis comprende desde 1942 hasta 2003, los datos se extrajeron de la base electrónica de datos Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II, 1999). También se recabo la información de precipitación de los años de 1999 a 2003 de las oficinas de la CNA en Coahuila. Además los datos faltantes se complementaron con los promedios mensuales, dejando solamente fuera del análisis los años sin registros.

La estación se localiza en el municipio del mismo nombre con las siguientes coordenadas: 102.07° de longitud oeste y 26.98° de latitud norte.

#### 3.1.3.1 Precipitación

La precipitación promedio anual en la zona de estudio es de 219 y 137 mm para las estaciones Cuatrociénegas y Santa Teresa de Sofía, respectivamente. La primera se ubica dentro del poblado del mismo nombre, mientras que la segunda en el Valle El Hundido. El registro de datos de la estación Santa Teresa de Sofía es de 1991al 2004 mientras que para la estación Cuatrociéngas el periodo es de 1942 a 2003 (tabla 3.2). El período de lluvias corresponde a los meses de mayo a octubre y el período de estiaje se presenta de noviembre a abril. El mes más lluvioso es septiembre con 41.3 mm y el menos lluvioso marzo con precipitación de 5.5 mm (figura 3.14). La precipitación máxima promedio que se presentó durante el periodo de registro de la estación fue de 421 mm en el año de 1985.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JÜL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1942	0	0	0	0	1.7	1.5	0	3.5	27	8.6	0	0.5	42.8
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	192.0
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	201.0
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	10.8	0	23	0 49 E	0	17	23 E	24.8	04.7	0	14	100.3
1954	0	11	0	45	40.0	4 20 5	1.7	0 0 5	25.5	0	22	4.5	245.0
1955	10.5	0	0	10	39.5	20.5	10	00.5	27	2	0.2	0	245.0
1950	10.5	38.5	11	5.5	1	1.5	0	2	108.5	30.5	0.2	3	217.8
1958	16	22	75	0.5	3/	35	1.5	36	100.5	73	4.0	33	416.5
1950	0	8	7.5	6.5	55	0.0 Q	7.5	28	8	12	4.6	6	98.1
1960	95	24	0	5	0.0	10.5	77.5	81	28	23	26	21.5	306.0
1961	9.0	81	55	27	13.5	49.5	65	42	47.5	19	22.5	0.5	271.3
1962	Ő	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	199.0
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	111.0
1970	12	13	0	15	23	67	13	48	96	3	0	0	290.0
1971	1	0	0	1	13	66	8	138	42	71	0	6	346.0
1972	0	0	2	0	29	12	27	13	54	3	34	0	174.0
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	149.0
1975	6	14	0	0	19	1	17	30	11	17	0	5	120.0
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	252.0
1978	0	0	0	0	17	21	23	128	102	11	2	23	327.0
19/9	10	12	0	10	3/	63	44	17	10	0	14	12	229.0
1900	22	17 	3 10	Z 70	9 20	12	20.1	04 12.8	3	4	25	5	330.0
1982	22	16	0	5	25	66	- 0 <del>4</del> - 16	3	10	0	63	45	200.0
1983	27	0	55	0	23	14	-0	7	0	3	9 9	12.1	100.6
1984	59	0	0.0	0	38	10	48	0	16	50	3	83	307.0
1985	24	0	15	53	17	45	150	58	2	45	12	0	421.0
1986	0	2	9	20	33	24	24	54	33	93	7	47	346.0
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	191.0
1990	31	9	7	0	24	2	76	43	82	22	0	0	296.0
1991	0	20	0	18	40	48	75	18	96	0	8	53	376.0
1992	68	30	0	5	69	68	17	56	0	0	0	3	316.0
1993	10	0	0	20	21	47	21	11	25	10	5	0	170.0
1994	9	0	19	6	20	3	2	0	1	24	0	15	99.0
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	1/	/8	94	44	16	//	1	19	8	406.0
1998	1	0	5.5	9.6	5	1	6	35	32	14	32	0	141.1
1999	0	0	1	U 10	9	109	28	13	0	2	U 10	3	165.0
2000	0	13	4	12	10	14	0 22	8	20.5	35 F	18	1	141.5
2001	/	3	0	0	0	14	<u> </u>	<u>∠</u> 0	00	2 30	13	41	230.0
2002	5	27	2	1	20	1	63	31	40 122	52	10	0	337.0
2003	5	21	2		20	4	03	JI	122	JZ	10	U	557.0
DMED	0.0	Q 1	55	0.6	20.7	25.6	26.1	20.0	11 2	21.4	10.7	10.1	210.1
PMAX	68.0	65.0	51.0	70.0	105.5	146.4	150.0	138.0	203.0	125.0	64.0	83.0	421.0
PMIN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42.8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

 Tabla 3.2
 Registros de precipitación (mm) de la estación Cuatrociénegas.





## 3.1.3.2 Análisis de sequías

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (<u>NOAA</u>, por sus siglas en inglés, 2004) de Estados Unidos explica que la sequía puede ser clasificada de cuatro maneras: *metereológica* cuando la precipitación es inferior a lo normal para un lugar específico, *agrícola* cuando la humedad de los suelos no satisface los requerimientos para lograr un cultivo, *hidrológica* cuando las reservas superficiales y subterráneas están por debajo de lo normal, y *socioeconómicas* cuando la escasez de agua afecta a las personas.

El Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS, 2004), define la sequía como un periodo considerado como anormalmente seco, el cual persiste a través del tiempo y puede producir graves desbalances hidrológicos en una determinada región. La severidad de una sequía, depende en gran medida del grado de deficiencia de humedad, de la duración y de la superficie afectada.

En resumen este fenómeno puede conceptualizarse desde diferentes perspectivas como es la *sequía agrícola*, se presenta cuando la cantidad de humedad en el suelo no es superior a la necesaria para el desarrollo de cultivos de una región; *sequía meteorológica*, se define como una marcada reducción en la cantidad de precipitación

que normalmente se presenta en una región y una escala de tiempo definida; *sequía hidrológica*, ocurre cuando las reservas superficiales y subterráneas se encuentran por debajo de lo normal; y *sequía socioeconómica*, se refiere a la medida en la que la carencia del recurso agua impacta las necesidades del hombre (Barakat, 1998).

La estación de Cuatrociénegas cuenta con registros de lluvia desde el año de 1942 hasta el 2003 con una precipitación media anual de 219 mm. Para el análisis de sequías se graficó la tendencia de la precipitación histórica en la zona de la estación (figura 3.15)

Además se analizó el déficit de precipitación anual acumulado durante los periodos en el que la precipitación se presentó por debajo del promedio de todo el periodo de registros de la estación. Estos periodos pueden ser considerados como sequía y son presentados por su magnitud y duración. En todo este tiempo de registro se han presentado varios periodos de sequía, pero solamente son bien marcados cinco por su periodo y magnitud, el primero se presentó de 1942 a 1948 con un déficit acumulado de -537 mm, el segundo de 1951 a 1954 con déficit acumulado de -388 mm, el tercero tiene presencia de 1964 a 1967 con un déficit de -153 mm, siendo este el menos severo, en la década de los 90's se presentan dos periodos más de 1993 a 1995 con déficit de -297 mm y de 1998 a 2000 con un déficit de -210 mm, como lo ilustra claramente la figura 3.16.



Figura 3.15 Precipitación media anual en la estación Cuatrociénegas.



Figura 3.16 Análisis de la sequía.

México, por su localización, es sumamente vulnerable a la acción desastrosa de las sequías (Castorena, *et al.*, 1980). Para analizar el estado actual de las sequías en la zona de estudio es necesario estimar los índices de severidad de la sequía meteorológica para el periodo de análisis que es de 1942 a 2003 para la estación Cuatrociénegas.

Se calculó del índice de severidad (I.S.) para cada año en el periodo de registro de la estación Cuatrociénegas y en 20 estaciones más, todas estas ubicadas en las cercanías del Valle de Cuatrociénegas y El Hundido. En la tabla 3.3 se presenta solamente el índice de severidad de sequía meteorológica promedio para cada estación.

NO	ESTACION	NOMBRE	LONGITUD	LATITUD	UTM LONGITUD	UTM LATITUD	PRECIPITACION	ELEVACIÓN	I.S.
1	5004	BAJIO AHUICHILA, VIESCA	102.65	25.62	735980	2835534	232.89	1300	-0.64
2	5009	CUATRO CIENEGAS (DGE)	102.07	26.97	790858	2986320	219.07	750	-0.69
3	5011	EJIDO REATA,R. ARIZPE	101.08	26.13	892067	2895830	233.74	936	-0.64
4	5020	MUZQUIZ, MUZQUIZ (DGE)	101.52	27.88	842667	3088608	596.65	402	-0.54
5	5022	OCAMPO, OCAMPO	102.37	27.30	760298	3022236	277.16	1050	-0.57
6	5027	PRESA CUIJE, MATAMOROS	103.30	25.70	670581	2843397	177.62	1116	-0.71
7	5031	PROGRESO, PROGRESO	101.00	27.08	896777	3001440	380.92	370	-0.62
8	5147	EJIDO PRIMERO DE MAYO	101.22	27.22	874467	3016290	303.70	400	-0.65
9	5149	CIENEGA LA PURISIMA	101.47	26.38	852272	2922428	815.14	743	-0.40
10	5151	ALTO DE NORIAS	101.23	25.98	877533	2878752	203.91	930	-0.65
11	5152	BAJAN, CATAÑOS	101.22	26.52	876785	2938662	282.73	800	-0.67
12	5153	CASTAÑOS, C. (DGE)	101.43	26.78	855029	2966890	380.24	743	-0.59
13	5155	MADRID, MADRID	101.80	27.07	817395	2998057	362.36	1093	-0.55
14	5157	SAN FRANCISCO DEL VALLE	102.78	26.22	721795	2901783	192.56	496	
15	5163	EL GATO, BUENAVENTURA	101.70	27.20	826941	3012726	369.12	640	-0.56
16	5166	LAS ESPERANZAS, MUZQUIZ	101.35	27.73	859914	3072462	487.23	450	-0.54
17	5169	RODRIGUEZ, ESCOBEDO	101.35	27.18	861707	3011471	261.31	415	-0.65
18	5170	LA ROSA, GRAL. CEPEDA	101.38	25.52	863900	2827325	472.78	1240	-0.63
19	10085	TLAHUALILLO, TLAHUA.	103.48	26.17	651912	2895235	254.04	1096	-0.62
20	10108	CIUDAD LERDO (DGE)	103.37	25.50	663828	2821157	275.38	1139	-0.62
21	STSofía	SANTA TERESA DE SOFIA	102.27	26.61	771853	2945977	136.77		-0.83

 Tabla 3.3
 Cálculo del índice de severidad de sequía meteorológica promedio.

Como lo muestran la tabla anterior los valores del índice de severidad para la estación Cuatrociénegas es de -0.69 y el promedio general de la región de estudio es de -0.62, lo cual queda dentro del grado de clasificación como una zona muy severa en cuanto a la sequía meteorológica, se muestra en la tabla 3.4. La distribución espacial de las estaciones y el índice de severidad se muestra en la figura 3.17.

En términos generales, puede mencionarse que un evento de sequía se inicia cuando se observa a través del tiempo, una tendencia marcada de valores negativos continuos del índice de severidad. De esta manera, el evento de sequía termina cuando el valor del índice de severidad alcanza valores positivos. La duración de un evento de sequía, puede definirse en función de la detección desde sus etapas iniciales hasta su etapa final a través del tiempo.





# Tabla 3.4 Clasificación del índice de severidad de la sequía meteorológica.

Grados de clasificación	Valor del índice
Ausente	> -0.20
Leve	-0.200.35
Fuerte	-0.35 – -0.40
Muy fuerte	-0.400.50
Severo	-0.500.60
Muy severo	-0.600.80
Extremadamente severo	< -0.80
Fuente: Sancho y Cervera, et al., 1980.	

La dificultad para reconocer el comienzo o el final de una sequía radica en la falta de una definición clara de la misma y a la falta de datos de precipitación, evaporación y humedad del suelo.

Los valores del índice de severidad estimado para las estaciones coinciden con los valores de las zonas afectadas por las sequías en un documento presentado por el Instituto de Geografía y la Facultad de Ciencias de la UNAM. La figura 3.18 muestra las diferentes zonas que son vulnerables a la sequía de acuerdo a su grado de severidad.



Figura 3.18 Índice de severidad de la sequía meteorológica.

El severo impacto de la sequía se ve claramente en la creciente demanda de agua y el agotamiento de las reservas de agua subterránea en muchas áreas, lo que puede convertir la futura extracción del agua restante en antieconómico. No obstante que la tecnificación de la irrigación ha permitido el cultivo en tierras que alguna vez fueron consideradas incultivables, esta práctica ha creado una enorme dependencia del agua subterránea y de la almacenada en reservorios en la superficie.

Por lo tanto es necesario desarrollar una mejor comprensión de las interacciones entre los elementos naturales como es el clima, plantas y suelo; y las actividades humanas, prácticas agrícolas, economía y condiciones sociales.

## 3.1.3.3 Evaporación

El periodo con registros para el análisis de la evaporación media mensual es de 1964 a 1988 presentando máximos de mayo a agosto con valores mayores a los 200 mm, en enero y diciembre se presentan los valores mínimos inferiores a los 100 mm. La evaporación media anual es de 1 960 mm (tabla 3.5). El mes que presenta la mayor

evaporación es junio con un valor de 231 mm y enero es el mes con menor evaporación con valor de 92 mm (figura 3.19). La evaporación máxima anual registrada en el periodo fue de 2 222 mm en el año de 1974.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ОСТ	NOV	DIC	ANUAL
1964	92.2	116.3	166.4	199.0	222.7	322.0	306.0	291.0	205.0	130.0	84.0	74.0	2208.6
1965	106.0	97.0	168.0	220.0	237.0	276.0	316.0	276.0	209.0	152.0	92.0	67.0	2216.0
1966	52.0	92.0	185.0	205.0	214.0	251.0	287.0	251.0	227.0	145.0	101.0	77.0	2087.0
1967	104.0	128.0	185.0	219.0	254.0	291.0	283.0	219.0	127.0	129.0	68.0	69.0	2076.0
1968	92.2	75.0	107.0	179.0	214.0	146.0	210.0	193.0	156.1	162.0	119.0	102.0	1755.3
1969	92.2	116.3	166.4	199.0	184.0	303.0	290.0	216.0	156.1	134.4	47.0	84.0	1988.4
1970	74.0	53.0	166.0	210.0	182.0	129.0	248.0	272.0	181.0	165.0	166.0	137.0	1983.0
1971													
1972	89.0	106.0	149.0	180.0	222.7	205.0	209.0	215.0	157.0	122.0	67.0	52.0	1773.7
1973	92.2	45.0	123.0	199.0	222.7	182.0	229.8	221.2	156.1	170.0	132.0	119.0	1891.9
1974	119.0	171.0	208.0	275.0	286.0	269.0	278.0	221.2	136.0	103.0	80.0	76.0	2222.2
1975	115.0	126.0	215.0	218.0	227.0	253.0	224.0	219.0	162.0	159.0	129.0	109.0	2156.0
1976	116.0	160.0	234.0	214.0	236.0	283.0	155.0	252.0	173.0	155.0	132.0	54.0	2164.0
1977	69.0	119.0	203.0	217.0	228.0	240.0	205.0	219.0	156.0	127.0	129.0	140.0	2052.0
1978	79.0	137.0	206.0	240.0	272.0	267.0	227.0	178.0	92.0	96.0	84.0	87.0	1965.0
1979	96.0	138.0	191.0	182.0	199.0	193.0	209.0	173.0	168.0	154.0	133.0	97.0	1933.0
1980	98.0	120.0	140.0	208.0	228.0	274.0	237.0	365.0	156.1	134.4	104.7	92.8	2158.0
1981	92.2	116.3	148.0	161.0	171.0	163.0	158.0	172.0	116.0	131.0	96.0	76.0	1600.5
1982	97.0	99.0	134.0	152.0	152.0	181.0	243.0	142.0	156.1	134.4	104.7	92.8	1688.0
1983	92.2	116.3	166.4	199.0	222.7	230.9	229.8	147.0	140.0	113.0	105.0	154.0	1916.3
1984	61.0	93.0	138.0	201.0	245.0	265.0	221.0	210.0	153.0	156.0	113.0	116.0	1972.0
1985	81.0	61.0	122.0	136.0	233.0	195.0	160.0	203.0	151.0	118.0	114.0	91.0	1665.0
1986	78.0	108.0	130.0	155.0	190.0	179.0	232.0	217.0	136.0	81.0	44.0	42.0	1592.0
1987	99.0	105.0	161.0	182.0	197.0	194.0	207.0	215.0	121.0	120.0	163.0	126.0	1890.0
1988	126.0	143.0	181.0	226.0	305.0	250.0	150.0	221.2	156.1	134.4	104.7	92.8	2090.2
EMED	92.2	110.1	166.4	199.0	222.7	230.9	229.8	221.2	156.1	134.4	104.7	92.8	1960.2
EMAX	126.0	171.0	234.0	275.0	305.0	322.0	316.0	365.0	227.0	170.0	166.0	154.0	2222.2
EMIN	52.0	45.0	107.0	136.0	152.0	129.0	150.0	142.0	92.0	81.0	44.0	42.0	1592.0

 Tabla 3.5
 Registros de Evaporación (mm) en la estación Cuatrociénegas.





## 3.1.3.4 Temperatura

La temperatura media anual observada en el periodo de 1942 a 1998 es de 16.3°C (tabla 3.6). El período más caluroso se presenta de mayo a septiembre con temperaturas por arriba de los 21°C. El período menos caluroso se presenta de enero a diciembre con temperaturas inferiores a los 8°C (figura 3.20). Puntualmente junio y julio son los meses más caluroso donde se han alcanzado temperaturas superiores a 28 °C y el mes más frío es enero con 2.9 °C.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	P.A.
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	16.0
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	15.8
1946	5.1	8.6	12.2	18.2	20.4	23.2	23.9	23.1	21.8	17.5	10.3	7.0	15.9
1947	4.6	5.0	9.9	14.8	20.4	23.1	23.5	22.3	20.2	17.8	10.0	6.8	14.9
1948	4.1	9.3	12.5	20.3	24.8	27.5	27.3	26.2	21.0	15.9	9.7	9.8	17.4
1949	5.5	11.0	13.3	15.9	22.7	25.4	24.9	23.0	21.8	17.0	8.6	9.0	16.5
1950	10.5	11.1	12.0	16.9	21.9	23.4	23.7	21.8	21.4	16.7	8.5	4.7	16.1
1951	3.7	5.3	11.1	15.6	20.1	24.3	25.4	24.3	20.6	16.4	9.5	8.4	15.4
1952	7.6	7.3	10.6	15.1	19.7	24.0	24.0	24.1	20.0	12.0	9.3	4.7	14.9
1953	4.8	6.8	15.8	17.5	21.5	26.8	26.5	24.1	18.0	15.1	7.9	4.2	15.7
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	14.8
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	/.1	13.7	20.7	23.2	24.5	26.1	26.3	23.0	17.9	11.3	5.3	16.9
1964	5.1	5.9	12.6	19.2	22.6	23.8	24.9	25.5	23.4	15.4	13.0	7.5	16.6
1965	7.9	6.4	9.7	19.1	21.4	24.6	24.4	24.0	22.4	14.9	13.9	9.7	16.5
1966	5.2	6.3	12.3	17.1	19.7	23.1	24.8	24.1	22.3	15.3	11.0	5.4	15.6
1967	5.0	8.0	14.2	20.2	20.7	24.0	23.5	22.5	19.7	15.1	11.0	7.4	10.1
1968	0.5	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 5.5	10.3	10.1	17.4	19.5	24.0	25.1	24.7	21.5	10.7	10.5	7.9	10.4
1970	0.0	9.3	11.1	10.0	10.7	22.1	23.4	23.5	21.2	14.1	9.1	9.9	15.5
1971	0.4	0.0	12.0	10.4	21.0	22.0	23.0	22.0	21.7	10.7	12.9	10.0	10.0
1972	0.0	9.9	10.0	20.3	21.0	23.3	24.2	23.5	23.0	20.0	12.5	9.2	17.0
1973	7.0	9.1 8.0	14.5	20.0	22.0	20.7	24.5	23.3	20.4	17.0	11.7	0.9	17.5
1974	7.9 Q 1	10.3	1/.0	20.9	23.7	24.1	24.0	24.7	10.6	16.1	11.7	8.0	16.6
1975	63	0.7	14.1	17.7	18.6	25.7	23.0	23.5	22.5	14.6	87	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	9.7	17.5
1978	8.4	9.8	13.0	19.5	23.1	20.0	26.3	23.0	20.0	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	25.0	17.4	97	9.0	17.8
1981	6.6	9.5	12.7	19.3	22.8	25.5	27.0	26.7	23.6	19.3	12.7	10.0	18.0
1982	8.8	9.4	14.9	20.4	22.2	25.3	25.8	26.3	23.3	17.2	10.8	9.2	17.8
1983	7.7	9.5	13.8	16.8	22.6	23.5	26.0	24.9	22.9	19.2	13.2	5.9	17.2
1984	7.0	9.9	14.7	19.7	21.8	24.9	24.4	25.6	21.4	18.2	11.8	12.1	17.6
1985	5.3	7.9	14.2	18.9	22.9	23.5	23.4	25.1	22.8	17.2	12.4	6.5	16.7
1986	6.4	9.9	13.1	19.1	21.2	22.8	23.9	24.9	22.9	17.8	12.1	8.5	16.9
1987	6.5	9.4	11.6	16.0	21.8	23.4	24.8	25.7	22.6	18.3	12.2	9.4	16.8
1988	6.1	10.5	14.0	18.3	22.2	23.8	23.7	24.0	21.2	16.7	13.5	9.5	17.0
1989													
1990													
1991	7.1	10.1	16.1	18.9	22.3	24.2	23.1	24.3	20.5	17.7	9.8	10.3	17.0
1992	7.2	9.3	13.5	16.7	20.1	23.4	24.7	23.6	21.9	18.4	11.1	10.5	16.7
1993	9.5	11.2	12.6	17.1	20.2	23.8	24.4	24.9	21.2	15.5	11.0	8.0	16.6
1994	6.3	9.8	14.1	17.0	21.6	24.2	23.8	23.5	20.8	17.4	14.2	10.3	16.9
1995	7.2	11.1	12.1	15.9	22.6	24.0	24.5	23.9	21.5	15.7	11.7	7.5	16.5
1996	5.9	9.4	10.3	15.7	22.2	23.6	24.0	22.6	21.0	15.9	11.3	6.8	15.7
1997	5.5	8.6	13.5	14.1	18.6	21.9	23.8	23.9	20.2	16.0	10.7	5.6	15.2
1998	7.4	8.1	11.4	16.3	21.8	25.7	25.1	23.3	22.0	17.4	12.6	1.2	16.5
-		<u> </u>	46 -	4 =	<u> </u>	0.1.5	0.1.5	0.1.2	<u> </u>	16 -	10.5		10.0
TMED	6.3	8.7	12.5	17.4	21.4	24.2	24.6	24.0	21.4	16.7	10.8	7.6	16.3
IMAX	10.5	11.6	17.6	20.9	24.8	28.0	28.5	26.7	25.1	20.6	14.4	12.1	18.0
TMIN	2.9	5.0	8.5	14.1	18.6	21.9	22.5	21.5	18.0	12.0	7.6	4.2	14.5

Tabla 3.6Registros de Temperatura (°C) en la estación Cuatrociénegas.





#### 3.1.4 Suelo

Se pueden distinguir seis tipos de suelo en el municipio: *Xerosol*, suelo de color claro y pobre en materia orgánica y el subsuelo es rico en arcilla o carbonatos, con baja susceptibilidad a la erosión; *Regosol*, no presenta capas distintas, es claro y se parece a la roca que le dio origen. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende del terreno en el que se encuentre; *Litosol*, suelos sin desarrollo con profundidad menor de 10 centímetros, tiene características muy variables según el material que lo forma, su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentre, pudiendo ser desde moderada a alta; *Yermosol*, tiene una capa superficial de color claro y muy pobre en materia orgánica, el subsuelo puede ser rico en arcilla y carbonatos, la susceptibilidad a la erosión es baja, salvo en pendientes y en terrenos con características irregulares; *Solonchak*, presenta un alto contenido de sales en algunas partes de su suelo y es poco susceptible a la erosión; *Vertisol*, presenta grietas anchas y profundas en la época de sequía, es un suelo muy duro, arcilloso, masivo, negro, gris y rojizo; su susceptibilidad a la erosión es baja.

En lo que respecta al uso del suelo, 10 095 hectáreas son utilizadas para la producción agrícola. De ellas 4 039 hectáreas con posibilidad de riego y el resto son de temporal.
725 519 hectáreas son utilizadas para el desarrollo pecuario y a la forestal 50 000 hectáreas. La superficie urbana ocupa 800 hectáreas (Gobierno del Estado, 2001).

## 3.1.5 Vegetación y fauna

La región presenta un sustrato calizo del Mesozoico, con evaporitas yesosas que constituyen la singularidad del área y asociaciones vegetales del Desierto Chihuahuense, como el pastizal halófito, matorral halófito, matorral desértico, vegetación gipsófila, candelilla, guayule, lechuguilla, gobernadora y palma; en la parte alta de las sierras abundan especies de árboles maderables como el bosque de pino encino.

La fauna localizada en los humedales se conforma por peces, tortugas, caracoles, reptiles y crustáceos, aislados durante millones de años, por lo que la evolución determinó su endemismo. De un total de 120 registradas, 32 son endémicas. La herpetofauna presenta 66 especies nativas, 8 anfibios anuros, 4 tortugas, 23 lagartijas, 31 culebras. Se han registrado 61 especies de aves de las cuales una gran mayoría son migratorias, las especies de mamíferos que más destacan son puma, venado, lince, gato montés, coyote, zorro, tlacuache, liebre, conejo, jabalí, comadreja, tejón, oso negro, hasta pequeños roedores y lagomorfos.

Cabe señalar que en el municipio se encuentran especies animales y vegetales únicos en el mundo como cactus, nifies, peces luquinia y terrafine de Coahuila, coacoo microscópico lugo I y tortuga de bisagra.

## 4. GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA

## 4.1. Geología

La estratigrafía de la zona está representada por rocas que van del Jurásico hasta depósitos del reciente. El basamento, conformado por rocas plegadas e inclusive metamorfizadas se han identificado en algunas zonas en la Sierra de San Marcos y son las más antiguas. Sobre este basamento, se encuentran unas areniscas de la Formación San Marcos de edad Cretácico Inferior. Sobreyaciendo a estas rocas se encuentra una secuencia de rocas marinas cuyas características están influenciadas por el ambiente de depósito de las mismas. Así, en la zona del Valle de El Hundido, las rocas tienen influencia de plataforma (calizas puras de aguas someras), ya que éstas se depositaron en lo que se conoce paleo-geográficamente como la Isla de Coahuila; mientras que hacia las zonas de Cuatrociénegas las rocas presentan condiciones de talud (calizas arrecifales, calizas arenosas y arcillosas) e inclusive de cuenca más profunda, depositadas en lo que se conoce como la Cuenca de Sabinas.

Una sección geológica que va del Valle de El Hundido hasta el extremo sur del Valle de Cuatrociénegas, pasando por el Potrero de San Marcos muestra que las rocas calizas que conforman la Sierra de San Marcos han sido erosionadas en el centro de este plegamiento, y con ello exponiendo rocas más antiguas del Cretácico Inferior de la Formación San Marcos constituidas por una arenisca de baja permeabilidad, asimismo, se infiere la presencia del basamento conformado por un complejo de rocas previamente plegadas, las cuales presentan una baja permeabilidad, lo cual disminuye la posible conexión hidráulica entre los acuíferos El Hundido y Cuatrociénegas, al menos en esta zona.

El cinturón de plegamiento de edad Laramídica del NE de México proporciona un ejemplo muy importante de la interpretación de las fracturas relacionadas con la orogenia. Estratos carbonatados de 2 a 4 km de espesor de edad Jurásica-Cretácica constituyen los principales afloramientos de la Sierra Madre Oriental. La parte de la columna estratigráfica que corresponde al Barremiano-Aptiano está muy bien expuesta y contienen numerosos ejemplos de transiciones laterales en ambientes de depósito que van de plataformas de aguas someras (Valle de El Hundido) hasta cuencas de aguas profundas (Cuatrociénegas). Las facies de cuenca corresponden a calizas de estratos medios a delgados, con presencia de pedernal. Por otro lado, las facies de plataforma están representadas por ciclos de calizas de plataforma con zonas dolomitizadas debido a la exposición subaérea durante la culminación de cada ciclo (Goldhammer et al., 1991). Durante el Paleoceno, la Orogenia Laramide deformó estos estratos a escala regional en el saliente de Monterrey, donde un intervalo de yesoanhidrita del Jurásico Superior sirvió como zona de deslizamiento regional (Padilla y Sánchez, 1985), lo cual dio origen a las cabalgaduras que se presentan en la parte sur de la Sierra de La Fragua y en el frente sur de la Sierra La Madera.

Las fracturas tectónicas están restringidas principalmente a las rocas de cuenca, aunque sin lugar a dudas también se presentan en rocas de plataforma. Observaciones de campo en la zona de la Sierra de San Marcos, muestran que las fracturas predominantes están rellenas de dolomita y las vetas rellenas de calcita, las cuales son perpendiculares a la estratificación y conforman ángulos pronunciados y ligeramente oblicuas a los ejes de plegamiento. Las estilolitas (fracturas formadas durante la litificación de las calizas) perpendiculares a los estratos forman ángulos pequeños con los ejes de plegamientos, mostrando contracción durante su desarrollo, lo cual coincide con el plegamiento.

## 4.1.1 Geología general

La zona estudiada se ubica en la porción central del Estado de Coahuila. Corresponde a sierras alargadas con una orientación general noroeste-sureste las cuales se encuentran separadas por extensos bolsones. En toda la zona impera el clima árido. En general, la mitad noreste del área en estudio corresponde a sedimentos calcáreos depositados en el Golfo de Sabinas y los plegamientos dan lugar a sierras de tipo alargado, mientras que la mitad suroeste corresponde a sedimentos depositados sobre la Península de Coahuila, donde los plegamientos dan lugar a sierras de forma dómica.

Las rocas más antiguas que afloran corresponden a las areniscas de la Formación San Marcos sobre las que descansan rocas calcáreas de las Formaciones La Virgen, Cupido, La Peña, Acatita, Aurora, Kiamichi. Grupo Washita en una zona indiferenciado y en otra, dividido en las formaciones Georgetown, Del Río y Buda. Continúa la columna estratigráfica con las Formaciones Eagle Ford, y el Grupo Difunta.

## 4.1.2 Geomorfología

La zona estudiada se ubica en la Provincia Fisiográfica de la Región Montañosa de Coahuila, la cual hacia el suroeste pasa a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental. Dentro de la zona se encuentran dos rasgos geomorfológicos principales que son: sierras y bolsones.

Las sierras presentan formas tanto alargadas como dómicas y corresponden a plegamientos de rocas calcáreas cretácicas que se elevan a más de 2 500 msnm y a 1 500 metros sobre los valles. Tienen una orientación NW -SE y en algunos sitios como en la Sierra de La Madera que divide a los Valles de Ocampo y Cuatrociénegas, el eje de la sierra presenta una orientación este a oeste. Alrededor del Valle de El Hundido, las sierras presentan forma dómica, mientras que en el resto del área las sierras son alargadas. Dentro de las sierras se encuentran un gran número de cañones con acantilados espectaculares, lo cual, aunado a la poca vegetación permite la clara identificación de las formaciones geológicas. En la parte central o núcleo de algunas sierras-anticlinales, la erosión ha desarrollado valles internos conocidos como "potreros", siendo el más típico de ellos el potrero de la Sierra de San Marcos, también conocido como Valle del Jabalí. Al noroeste de Cuatrociénegas se encuentra otro potrero llamado Potrero de La Virgen.

El Valle de Ocampo se encuentra limitado al Oeste y Sur por la Sierra de La Madera y al Oriente la Sierra de Menchaca. El Valle de Cuatrociénegas esta limitado al suroeste por la Sierra de La Fragua, al noroeste par la Sierra de La Madera, al norte y noreste par la Sierra de Menchaca, al oriente par las Sierras Chiquita y Purísima y en la parte central y Sur por la Sierra de San Marcos. El Valle de El Hundido se encuentra limitado al norte por la Sierra de la Fragua y al Sur por la Sierra de Alamitos, también conocida como Sierra de Australia.

Por lo que respecta a las partes bajas o valles clasificados geohidrológicamente como "bolsones", estos se encuentran a entre 1 000 y 1 200 msnm. Están limitados por sierras escapadas y frecuentemente presentan abanicos aluviales entre la sierra y el bolsón. Hacia el centro de los bolsones, se encuentran lagunas intermitentes y sedimentos evaporíticos.

## 4.1.3 Estratigrafía

Dentro de la zona en estudio afloran las Formaciones San Marcos, La Virgen, Cupido, La Peña, Aurora, Acatita, Kiamichi, Grupo Washita Indiferenciado, Georgetown, Del Río, Buda y Eagle Ford, todas ellas representantes del Cretácico. Hacia los valles o bolsones, se encuentran sedimentos aluviales del Cuaternario y esporádicas lavas basálticas también del Cuaternario.

A la fecha existen una serie de trabajos geológicos realizados en la zona de estudio, entre ellos destacan los de INEGI, PEMEX y Consejo de Recursos Minerales. El INEGI publicó cartas escala 1:50,000 que presentan la litología de manera general, la geología estructural es limitada y ha sido corregida y reinterpretada en trabajos posteriores. PEMEX elaboró dos proyectos geológicos en 1970, uno denominado Área Villa Ocampo, hoja Atlas 45-12 el segundo denominado Prospecto Lamadrid, hoja Atlas 47-12. Recientemente, el Consejo de Recursos Minerales publicó una carta geológicaminera. Este trabajo se considera el más completo, incluye la geología de detalle de PEMEX, así también incluye información referente a los posibles minerales asociados a las unidades geológicas.

La estratigrafía de la zona de estudio fue adaptada del plano geológico-minero del CRM, del informe geológico del área Villa Ocampo, Coahuila, elaborado por la Superintendencia General de Exploración de Petróleos Mexicanos (NE-M-1174) y por los diferentes artículos sobre la geología de la zona.

#### Formación San Marcos

La Formación San Marcos fue propuesta por William G. Kane y citada por Imlay (1940, pág. 121) (Humphrey 1956, pág. 171). La localidad tipo fue dada en el Cañón de San Marcos de la sierra del mismo nombre a 30 - 40 km al suroeste de Cuatrociénegas, Coahuila. En la localidad, esta formación descansa sobre sedimentos arenosos marinos del Jurásico Superior y subyace a las calizas y dolomitas de la Formación Cupido. Aflora dentro de los potreros de San Marcos (Valle El Jabalí) y en el Potrero de La Virgen.

La Formación San Marcos esta constituida esencialmente por sedimentos clásticos de ambiente mixto en el que predominan los conglomerados y areniscas conglomeráticas de color rojizo en su porción basal; areniscas cuarcificadas de grano grueso a medio en su sección media y; dolomitas arenosas y areniscas de estratificación 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 por su posición estratigráfica representan una Edad Neocomiano.

### Formación La Virgen

El término Formación La Virgen 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. Está limitada en su parte superior por la Formación Cupido y en la inferior por la Formación La Mula. Su localidad tipo fue asignada en el Potrero de La Virgen, a aproximadamente 10 km al noreste de Cuatrociénegas, Coahuila.

Esta constituida por potentes espesores de yesos que alternan con calizas oolíticas y escasas dolomitas en estratos delgados a medios. Dentro de los cuerpos yesíferos existen delgadas capas de limonitas de color gris claro.

Tiene un espesor de 304 m en la porción sur del Potrero de La Mula, Coah. Por su posición estratégica se le asigna al Hauteriviano.

#### Formación Cupido

Término definido por Imlay (1937, pág. 606) en Humphrey (1956, pág. 191) para una unidad de calizas de color gris y estratificación gruesa, delgada y media, que se presenta en la porción media de la Sierra de Parra encajonada por las Formaciones La Peña (arriba) y Taraises (abajo).

En la zona de estudio la Formación Cupido (anexo 1) 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. Por Hauteriviano. Presenta numerosos miliolidos.

#### Formación La Peña

El nombre de Formación La Peña, 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 a 4.8 km. al este sureste de la Hacienda La Peña, en el extremo sur del Estado de Coahuila.

En el área trabajada aflora en las Sierras de San Marcos y La Virgen. Morfológicamente se expresa en una ligera depresión entre las potentes calizas de la Formación Cupido y Aurora. Esta constituida por calizas delgadas impuras y margas rosas con intervalos de lutitas entre los planos de estratificación. Tiene 42 m de espesor en la Sierra de La Madera. Sus contactos inferior con la Formación Cupido y superior con la Formación Aurora 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, Tamps., donde tiene como equivalente a la Formación Otates. Se asigna al Aptiano Superior (anexo 1).

#### Formación Aurora

El término Formación Aurora en Humphrey (1956, pág. 305), fue primeramente aplicado por Burrows, para una secuencia dominante de estratos de calizas en el área de Cuchillo Parada 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, espesor que aumenta hacia el este.

La formación Aurora esta ampliamente distribuida en la región estudiada. Constituye la Mayor parte de los "espinazos" de las sierras. Esta formada por capas de gruesas a masivas, Densas, de color gris a gris café al intemperismo y gris claro a oscuro en muestras frescas. Presenta nódulos y bandas de pedernal gris claro y líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación. Tiene un espesor de 534 m 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 (arriba) y la Formación La Peña (abajo) brusco y concordante. Por estudios micropaleontológicos y posición estratigráfica se le asigna edad Albiano Inferior y Medio (anexo 1).

### Formación Kiamichi

La localización tipo esta en la planicie del Río Kiamichi cerca de Fort Towson al oriente del Condado de Choctaw, Oklahoma.

Dentro del área de trabajo aflora en las Sierras La Virgen, La Madera y Purísima. Al igual que la Formación La Peña, manifiesta una ligera depresión (valle de rumbo) entre las potentes calizas que la encajonan. Consiste de una alternancia de calizas impuras con margas y lutitas de color crema, rosas y amarillentas al intemperismo. Es común encontrar fósiles (amonitas) determinadas como *oxytropidoceras*. Manifiesta una disminución en su espesor y en 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 de la Aurora pudo llegar hasta la edad de la formación Kiamichi (anexo 1). El contacto de la Formación Kiamichi con el sobreyacente "Washita Indiferenciado o sus equivalentes, es concordante y se 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 Paleogeografiítas del Golfo de Sabinas y la Península de Tamaulipas. Consiste principalmente de una alternancia de clásicos finos y rocas carbonatadas impuras, facies que fue perfectamente desarrollada sobre las áreas del antiguo Golfo de Sabinas y a lo largo de sus márgenes. Al sur y suroeste pausa 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 facies y se definen perfectamente las tres formaciones de este grupo, integradas por las unidades Georgetown, Del Río y Buda.

La facies depositada sobre el borde del 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 (anexo 1).

#### Formación Georgetown

La Formación Georgetown (Humphrey 1956, pág. 400) es una unidad de calizas equivalentes 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 1898, pág. 236) en (Humphrey 1956) es la extensión en el suroeste de Texas, Transpecos Texas y norte de México de la Formación Grayson, (Gracig, 1894, pág. 40, 43) de la porción norte central de Texas.

En la zona de trabajo, aflora en las Sierras de Menchaca y Purísima. Consiste de una alternancia casi constante de calizas arcillosas delgadas y laminares, predominando las lutitas hacia la base. Su espesor varía de 15 a 31 m. Los contactos que la limitan, Georgetown abajo y Buda arriba, son transicionales y concordantes. Se le asigna edad Cenomaniano Inferior.

#### Formación Buda

Término primeramente usado por Vaughan (1900, pág. 18) para reemplazar 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 de lechos medianos de calizas compactas impuras, nodulares, de color amarillento.

Esta formación tiene intima relación con las formaciones Del Río y Georgetown. Al igual que ellas afloran en las sierras de Menchaca y Purísima. Esta constituida por calizas que varían de delgada a medias, con escasas alternancias de lutitas. El color al fresco es gris al fresco gris claro y al intemperismo es gris y ocasionalmente amarillento. Su espesor es de 77 m. Aunque por lo general no se expone su cima. Su contacto inferior con la Formación Del Río es concordante y transicional, el Superior con la Formación Eagle Ford es brusco y probablemente discordante.

### Formación Eagle Ford

Según Sellard (1932, pág. 422) la primera mención de los equivalentes Eagle Ford en la literatura geológica, Texas 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 fue el primero que aplicó el nombre de lutitas Eagle Ford. La localidad tipo está en Eagle Ford, Condado de Dallas, alrededor de 9 km al Oeste de Dallas, Texas, donde la porción más superior esta 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 pelecipodos. Alternan con lutitas de color gris, en ocasiones carbonosas. Se le estima un espesor de 300 m. presenta su contacto inferior con la formación Buda, nítido y probablemente discordante; su contacto superior con la Formación Austin es claramente transicional y concordante.

### Grupo Difunta

El nombre de Formación Difunta fue aplicado por primera vez en (1936, pág. 1133) por Ralph W. Imlay para una sección ubicada al norte del extremo poniente de la Sierra de Parras. Este nombre fue tomado del Cerro Difunta.

En el área de trabajo aflora en una pequeña porción al sur de la Sierra de La Madera. Litológicamente esta unidad se compone de capas medianas de areniscas de color gris, de grano fino, calcáreas, con alternancia de lutitas y limolitas, predominando estas últimas, las primeras son gris y, las segundas rojizas y café. Por su posición estratigráfica probablemente sólo representa una parte del grupo. Tiene una edad Maestrichtiano.

## Conglomerado Terciaro

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

#### Rocas ígneas extrusivas

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

#### Rocas ígneas extrusivas

Hacia el extremo suroeste del Valle de Cuatrociénegas, se encuentran reducidos afloramientos de un cuerpo intrusito, de textura granítica y composición ácida.

#### **Material Aluvial**

Rellenando los extensos bolsones que constituyen los valles de El Hundido, Cuatrociénegas y Ocampo se encuentran 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 (arcillas) hacia el centro de los valles, donde se interdigitan con sedimentos evaporíticos lacustres de lagunas intermitentes, características de los bolsones de la zona áridas del norte de México.



Figura 4.1 Plano geológico de la zona de Cuatrociénegas, Coahuila.

## 4.1.4 Paleogeografía

Las plataformas de Cupido y Coahuila del NE de México forman parte de una plataforma carbonatada muy extensiva que rodeaba al Golfo de México ancestral durante el Barremiano hasta el Albiano. Los afloramientos de litofacies de Cupido y Coahuila en varias montanas, las cuales se extienden hasta 80,000 km<sup>2</sup> revelan información sobre la morfología y composición de la plataforma, relaciones paleoambientales, y la cronología de la evolución de la plataforma.

La orientación del margen de plataforma de Cupido (Barremiano-Aptiano) estaba controlado por el bloque del basamento emergente de Coahuila en la porción NW. El margen sur esta compuesto de caliza (grainstone) de alta energía, mientras que el margen que apuntaba hacia el Golfo de México ancestral hacia el Este esta conformado por un arrecife discontinuo de rudistas. Una amplia laguna de plataforma se desarrollo en las márgenes de Cupido, donde se han identificado hasta 660 m de depósitos de márgenes de inundación. Durante el Aptiano medio al tardío, una fase mayor de inundación forzó al retroceso de la plataforma Cupido,

cambiando el locus de la sedimentación marina somera hacia el NW del bloque de Coahuila.

La rampa de Coahuila (Aptiano-Albiano) consistió de un margen somero que separaba una laguna evaporítica interior de una rampa profunda de baja energía. Más de 500 m de carbonatos cíclicos y evaporitas se acumularon en esa laguna evaporítica del Albiano Temprano al Medio. La restricción de la plataforma interior disipada del Albiano Medio al Tardío con el depósito de calizas (packstones) peloidales ricas en miliólidos y graistones de la Formación Aurora. La plataforma de Coahuila fue sumergida durante el Albiano Tardío-Cenomaniano Tardío, evidenciado por el depósito de las calizas laminares de aguas profundas de la Formación Cuesta del Cura.

## 4.1.5 Evolución paleotectónica

La distribución de las plataformas carbonatadas del Cretácico Inferior del NE de México esta muy ligada a la apertura del Golfo de México (Anderson y Schmidt, 1983). Del Jurasico Tardío al Jurasico Medio se produjo un fallamiento extensional (*rift*) y de transformación (*strike-slip*) resultando un mosaico de bloques (Coahuila, Picachos, Tamaulipas), y en consecuencia se formaron una serie de grabens donde se depositaron lechos rojos lacustres y aluviales, así como evaporitas y depósitos clásticos.

El basamento del Bloque de Coahuila esta compuesto de granitos y granodioritas de edad Permo-Triásica, que intrusionaron sedimentos orogénicos del Pérmico y que aparentemente conformaban la extensión peninsular del Cratón Mesozoico de Norteamérica (Wilson *et al.*, 1984; Wilson, 1990). El bloque está limitado al norte por la falla lateral izquierda de San Marcos (McKee *et al.*, 1990), y al sur por el lineamiento lateral izquierdo Torreón-Monterrey (paralelo con la tendencia del mega-desplazamiento Sonora-Mojave) (Anderson y Schmidt, 1983).

#### Fracturas relacionadas con el plegamiento (Orogenia Laramide)

El cinturón de plegamiento de edad Laramídica del NE de México proporciona un ejemplo muy importante de la interpretación de las fracturas relacionadas con la orogenia. Estratos carbonatados de 2 a 4 km de espesor de edad Jurásica-Cretácica constituyen los principales afloramientos de la Sierra Madre Oriental. La parte de la columna estratigráfica que corresponde al Barremiano-Aptiano está muy bien expuesta y contienen numerosos ejemplos de transiciones laterales en ambientes de depósito que van de plataformas de aguas someras hasta cuencas de aguas profundas. Las facies de cuenca corresponden a calizas de estratos medios a delgados, con presencia de pedernal. Por otro lado, las facies de plataforma están representadas por ciclos de calizas de plataforma (peritidal) con zonas dolomitizadas debido a la exposición subaérea durante la culminación de cada ciclo (Goldhammer *et al.*, 1991). Durante el Paleoceno, la Orogenia Laramide deformó estos estratos a escala regional en el saliente de Monterrey, donde un

intervalo de yeso-anhidrita (Formación La Virgen) del Jurásico Superior sirvió como decollement (zona de deslizamiento) regional (Padilla y Sánchez, 1985).

Las fracturas tectónicas están restringidas principalmente a las rocas de cuenca, aunque sin lugar a dudas también se presentan en rocas de plataforma. Las fracturas predominantes están rellenas de dolomita, venas rellenas de calcita, las cuales son perpendiculares a la estratificación y conforman ángulos pronunciados y ligeramente oblicuas a los ejes de plegamiento. Tomando el marco geográfico de referencia actual, las venas en los costados no son paralelas a aquellas en el backlimbs sino que se presentan rotados una vez que se hace la restauración horizontal de la estratificación, sugiriendo que las venas ya existían antes del plegamiento.

Las estilolitas perpendiculares a los estratos forman ángulos pequeños con los ejes de plegamientos, mostrando contracción durante el desarrollo de las estilolitas que lo cual coincide con el plegamiento.

Las relaciones combinadas sugieren que las venas y las estilolitas probablemente sean contemporáneas, desarrollándose durante las etapas tempranas del plegamiento, siendo razonablemente interpretadas como relacionadas al plegamiento.

4.1.6 Geología estructural



Figura 4.2 Estructuras regionales del NE de México.

Para representar la geología estructural se elaboraron cinco secciones estructurales que permitirán identificar las relaciones geológico-estructurales entre los valles de El Hundido y Cuatrociénegas, así como las implicaciones hidrogeológicas.

El método de campo consistió principalmente en medir los rumbos y echados en las unidades que afloran en la zona de tal manera que se tuviese una representación tridimensional de las rocas y las estructuras. Asimismo, se procedió a mediar las diferentes familias de fracturas en las unidades geológicas presentes.

Posteriormente se procedió a elaborar las secciones geológico-estructurales. Asimismo se elaboraron estereogramas y rosetas de deformación para cada una de las sierras que conforman los límites de los acuíferos de El Hundido y Cuatrociénegas. Estas herramientas permitieron establecer los planos de sedimentación y de las estructuras geológicas, así como las direcciones preferenciales tanto de las mega-estructuras como de las microestructuras, lo cual permitió inferir zonas de debilidad geológica y en consecuencia zonas de flujo preferencial del agua subterránea.

#### A' A S. ALAMITOS V. EL HUNDIDO S. LA FRAGUA V. CUATROCIÉNEGAS S. LA MADERA m.s.n.m 3000 2000 1000 0 2 Kem Ksn 10 000 20 000 30 000 40 000 50 000 60 000 70 000 80 000 m SIMBOLOGÍA Qal Aluvión La Peña Klp Ktr Treviño Cupido Kc Kac Acatita San Marcos Ksm Ka Aurora

#### **Secciones estructurales**

Figura 4.3 Sección A-A'.

La sección A-A' (figura 4.3) con una dirección prácticamente N-S va desde la Sierra de Alamitos, cruzando el Valle de El Hundido , La Sierra La Fragua, el Valle de Cuatrociénegas, terminando en la Sierra La Madera. En esta sección se puede observar que la las rocas calizas que conforman la tanto la zona de recarga como el acuífero de El Hundido tienen una inclinación muy suave en la Sierra Alamitos, con echados del orden de los 10°, al llegar a la porción del valle el buzamiento se incremento ligeramente. El espesor del relleno aluvial es del orden de los 150 m en la porción central del valle. La parte frontal de la Sierra La Fragua limita al norte el Valle de El Hundido como consecuencia de un cabalgamiento, rasgo que aún en vistas aéreas (fotografía o imágenes de satélite) puede observarse. Hacia la parte posterior de la cabalgadura, los buzamientos de las capas de las rocas expuestas se vuelven suaves llegando a ser prácticamente horizontales. En la parte que corresponde al valle de Cuatrociénegas las calizas se inclinan en 9° aproximadamente.

La sección B-B' muestra las relaciones entre el Valle de El Hundido y Cuatrociénegas, el cual similar al de la Sección A-A' en la Sierra de La Fragua. En esta sección se muestra la porción de la nariz del anticlinal de San Marcos. En esta zona el basamento de la Formación San Marcos está a una profundidad de aproximadamente 50 msnm en la sierra del mismo nombre, mientras que en La Fragua se localiza a una profundidad de 700 msnm.



Figura 4.4 Sección B-B'.

La sección C-C' (figura 4.5) tiene una dirección E-W va de la Sierra Alamitos, pasa una porción del Valle El Hundido, Valle El Jabalí, Sierra San Marcos y termina en el Valle de Cuatrociénegas. Un punto interesante de esta sección es el hecho que el Valle El Jabalí esta contenido en el núcleo de un anticlinal ya erosionado. Hacia las partes bajas del Valle El Jabalí se tiene tanto las rocas del Cretácico Inferior San Marcos como el basamento del complejo metamórfico del Paleozoico que conformaba la Isla de Coahuila y que es material prácticamente impermeable.



Figura 4.5 Sección C-C'.

La sección D-D´ (figura 4.6) va de la Sierra Alamitos hacia el Valle de Cuatrociénegas con una dirección SW-NE va de Sierra Alamitos hasta el flanco oriental de la Sierra San Marcos. En esta sección se pueden apreciar la serie de fallas inversas que posiblemente se formaron como consecuencia del contacto entre material de la Cuenca de Sabinas y el basamento de la Isla de Coahuila.



Figura 4.6 Sección D-D'.

Finalmente, la sección E-E' con una orientación SW-NE muestra la relación estructural entre ambos valles a través de las sierras La Fragua y San Marcos. Loas relaciones estructurales son similares a las presentados en la sección B-B',

pero a diferencia de ella en esta sección el basamento hidrogeológico representado por la formación San Marcos se encuentra en elevaciones de hasta 1300 msnm en la Sierra de San Marcos. Por otro lado, en esta sección se proyecto el pozo exploratorio B2 que corto material calizo de la Formación Aurora o Treviño, sin llegar hasta el material de areniscas de la Formación San Marcos.



## 4.2. Geofísica

## 4.2.1 Métodos electromagnéticos

En el campo de la geohidrología, la Técnica del Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM), es una de las técnicas geofísicas más modernas para la exploración del agua subterránea, tanto en equipos de medición como en el soporte técnico-científico para la interpretación de los datos medidos.

## 4.2.1.1 Método TDEM o TEM

Con el método electromagnético (TEM) se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo. En las secciones del subsuelo es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad que es el parámetro experimental de campo que se mide.

La técnica del TEM (sondeo transitorio electromagnético), consistió en utilizar una espiral o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro con dimensiones de 50x50m (área de la bobina 2 500 m<sup>2</sup>), con el arreglo denominado "Loop coincidente" (figura 4.8).



Figura 4.8 Arreglo de Loop coincidente.

Con este arreglo se realizaron una serie de pruebas que consistieron en variar parámetros tales como:

- 1. Pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción
- 2. Análisis de la intensidad de corriente circulante
- 3. Análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias
- 4. Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación)
- 5. Análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo
- 6. Apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras

Las pruebas y análisis anteriores se hicieron en dos sitios, de tal manera que fueran representativos de las condiciones generales esperadas.

El procesado de los registros se efectúo en las siguientes etapas, para cada sondeo y fueron:

- 1. Transferencia de los registros a la computadora.
- 2. Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nV/AMP contra tiempo (curva de decaimiento).
- 3. Conversión de la curva de decaimiento a Resistividad Aparente contra tiempo.
- 4. Cálculo del modelo estratificado.
- 5. Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam).
- 6. Transferencia de las curvas y los modelos generados, formación de la base de datos.
- 7. Elaboración de plantas y secciones de isorresistividad.

Todas las etapas del proceso anterior se realizaron en gabinete, y los datos de campo fueron analizados el mismo día que fueron levantados. Para la ubicación de los sitios de medición, se utilizó un GPS, mientras que la elevación fue tomada de las cartas topográficas editadas por el INEGI.

## 4.2.1.2 Ventajas del método TEM

- 1. Desde el punto de vista logístico es evidente la ventaja sobre el SEV para profundidades mayores a 200 m.
- 2. En presencia de capas resistivas superficiales donde la resistencia de contacto es muy alta (contacto galvánico) no afecta, ya que el fenómeno que se registra es de inducción.
- 3. También se salvan los problemas locales por contacto galvánico (SEV).
- 4. Alta resolución lateral
- 5. Capacidad de penetración en capas conductoras

## 4.3. Procesamiento de los datos

El proceso de los datos, para cada sondeo, consistió en obtener un modelo unidimensional, partiendo de la curva de resistividad aparente la cual es procesada en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones.

Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar una regresión tipo Occam con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (19 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección. A continuación se describe cada proceso.

## 4.3.1 Modelo suavizado

El procesado de los datos consistió en obtener los modelos suavizados mediante una regresión tipo Occam, en la que se propone una resistividad inicial y una final, basada en los datos de campo.

El algoritmo requiere de un número de capas inicial, un valor de ajuste al que se quiere llegar y un número máximo de iteraciones, estos tres últimos parámetros no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que este sólo depende de los valores de resistividad de campo. Entonces la técnica se basa en el precepto filosófico dictado por William de Occam en los albores del siglo XIV que dice: "Es en vano hacer con lo más lo que puede ser hecho con lo menos", y en el uso de la regresión Ridge, para encontrar un modelo que cumpla con el error marcado en el ajuste o con el mínimo error posible.

## 4.3.2 Modelo unidimensional

También los datos fueron procesados por el modelado por capas o unidimensional se hizo siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva de campo, las pendientes de la curva y los tiempos a los que ocurren las inflexiones.

Este proceso posibilita que el intérprete modifique los parámetros del modelo y presenta el cálculo de las curvas teóricas de las modificaciones realizadas, esta característica hace que el ajuste del modelo sea rápido.

Una vez que se ha obtenido un ajuste aceptable, el modelo generado se somete a una regresión automática con las técnicas de Ridge y de Marquardt con algoritmos de aproximación de tipo Anderson para obtener, por inversión, el mejor ajuste bajo el criterio del error cuadrático medio mínimo.

Los modelos obtenidos, son sometidos a un nuevo proceso para obtener una serie de modelos equivalentes que cumplan con el mismo error de ajuste (anexo 2). Los modelos equivalentes posibilitan establecer el intervalo de variación de los espesores y resistividades en cada capa del modelo original con fines de correlación electroestratigráfica.

## 4.3.3 Localización de los TEM

La campaña de exploración geofísica consistió en realizar 20 sondeos por TEM (color azul), adicionales a los 24 sondeos TEM (color morado) realizados en la primera etapa de exploración, en la figura 4.9 se muestran la ubicación de los perfiles y, en la figura 4.10 su ubicación. Estos sitios de estudio se distribuyeron de tal manera de cubrir lo mejor posible el área de interés, con los cuales se formaron seis perfiles que integran esta información.



Figura 4.10 Localización de los TEM.

#### 4.4. Resultados

La resistividad real o verdadera definida, con la técnica de interpretación para los sondeos por transitorio electromagnético, puede diferir del valor que se obtiene con las otras técnicas existentes para su determinación. Esto se debe a múltiples factores que van desde el tipo de señal producida y forma de registro, hasta las suposiciones y simplificaciones empleadas en la formulación físico-matemática que define a la resistividad real.

Las secciones de resistividad, que se obtuvieron de los modelos suavizados, son de gran utilidad pues conjunta las variaciones de la resistividad en el plano vertical y permite observar las diferentes características de los materiales.

En el perfil que integra los sondeos por transitorio electromagnético o TEM, se observan básicamente tres unidades geoeléctricas o intervalos con algunas subdivisiones, que se agrupan en la tabla 4.1 y se analizan más adelante. En la tabla se presenta la unidad georresistiva, su rango de valores y los materiales con que se asocia a la unidad geoeléctrica.

Unidad Geoeléctrica	Intervalo Resistivo [ohm-m]	Posible Correlación
U1	4 a 20	Capa de cobertura, constituido por material granular y/o roca alterada
U2a	Menor de 10	Material Arcilloso (poco permeable a permeable)
U2b	10 a 30	Material Arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material Arenoso y/o Roca Fracturada
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10,000	Roca Compacta menos permeable (Fm Cupido)

Tabla 4.1	Zonificación	georresistiva.
-----------	--------------	----------------

La unidad geoeléctrica U1, agrupa principalmente al paquete de cobertura constituido por material granular y/o roca alterada.

La unidad geoeléctrica U2, representa al estrato de mayor conductividad con valores de 3 a 100 ohm-m, y para su análisis se subdividió en tres; U2a, U2b y U2c. Se relaciona principalmente con materiales granulares de características variables, así tenemos para el caso de la subunidad U2a con valores de 3 a 10 ohm-m, ésta se correlaciona con los materiales granulares de características arcillosas predominantemente, en cuanto a la subunidad U2b se presenta un incremento en la resistividad registrando valores de 10 a 30 ohm-m, que sugieren una correlación con materiales granulares de consistencia arcillo-arenosa; el espesor máximo que llega alcanzar en algunos sitios es del orden de los 200 a 250m, pero en el sitio CC13-3 es donde alcanza del orden de los 500m de materiales granulares para el Valle de El Hundido, mientras que en el Valle de Cuatrociénegas el espesor promedio que alcanza es del orden de los 230m (TEM CC09), pero existen dos sitios (CN10 y CN18), donde se registran espesores

mayores de los 500m. Subyace en la base la subunidad U2c, la cual agrupa valores de 30 a 100 ohm-m, correlacionándose con un material arenoso o una roca de características arcillosas, las cuales presentan poca o nula permeabilidad, y únicamente por fracturamiento pudieran presentar zonas saturadas.

La unidad geoeléctrica U3, subyace al paquete de mayor conductividad con valores de resistividad entre 100 a 10,000 ohm-m, lo que manifiesta un cambio litológico a materiales de composición más carbonatada, y se asocia con Rocas Calizas principalmente. Debido al amplio intervalo resistivo que presenta este paquete se subdividido en dos, denominadas U3a y U3b. El estrato U3a representa la transición entre la roca lutita y las areniscas, lo que resulta interesante de acuerdo con el modelo geológico, ya que puede corresponder con una caliza con cierto contenido arcilloso. La unidad U3b representa el mayor rango resistivo registrado en los modelos geoeléctricos y se correlaciona con la roca caliza de escaso contenido arcilloso, y que formacionalmente puede corresponder con la Cupido.

## 4.4.1 Perfiles geoeléctricos

Para mostrar el comportamiento de la resistividad eléctrica en perfil para los primeros 600m, se construyeron siete secciones, que integran la información de los Valles de Cuatrociénegas y El Hundido.

Los perfiles geofísicos construidos se presentan en las figuras de la 4.11 a la 4.16, a través de estas imágenes de resistividad podemos conocer el comportamiento del subsuelo y asociarlo con características físico-químicas que presentan estos materiales, resultando una manera practica de inferir la presencia de Zonas Conductoras asociadas con posibilidades de alojar acuíferos, o con cambios litológicos, ya que la presencia del agua y materiales con características arcillosas provocan cambios en la resistividad, en un orden menor.

A continuación se describen algunas secciones que muestran la distribución de las unidades geoeléctricas identificadas.

## 4.4.1.1 Perfiles geoeléctricos del Valle de El Hundido

En el Valle de El Hundido se tienen dos Perfiles Geoeléctricos representativos marcados con los nombres CCH3 y CCH4 (figuras 4.11 y 4.12).

El primer Perfil CCH3, lo integran nueve sitios de TEM, y presenta un rumbo general E-W, cruzando el valle casi en esa misma dirección, en la figura 4.11 se presenta este perfil. Los extremos del perfil presentan un ascenso en la topografía, respecto al centro del perfil que corresponde propiamente con el Valle de El Hundido.

Entre los sitios de TEM CC12, CC13, CN05 y CN06, evidencian una clara presencia de materiales granulares integrados en la unidad U2a con valores de

resistividad de 4 a 10 ohm-m, asociados con materiales arcillosos. Conjuntamente el paquete de materiales aluviales o areno-arcillosos, que integran la unidad U2a y U2b, presentan una potencia del orden de los 250m en promedio, a excepción del sitio CC13, que de acuerdo al modelo georresistivo corresponde con un mayor espesor para estos materiales granulares alcanzando espesores de hasta los 600m, lo que sugiere la presencia de una fosa tectónica o depresión en la zona.

Hacia ambos extremos del perfil los espesores de materiales granulares disminuyen considerablemente, ya que seguramente muy cerca de este sitio aflora la roca compacta, por debajo de de la unidad U3a, se denota un cambio resistivo importante a la baja, que se asocia con la roca fracturada y saturada (U2c), para después nuevamente aparecer un incremento importante en la resistividad con valores superiores a los 600 ohm-m (unidad U3b), que se asocian con una roca compacta poco permeable.

Es importante resaltar que por debajo de material granular (U2a y U2b), aparece la unidad U2c, la cual por las características resistivas y posición electroestratigráfica sugieren una correlación con una roca fracturada con posibilidad de encontrarse saturada, o bien con una caliza arcillosa de baja permeabilidad.

El perfil CCH4 lo integran siete sitios y es casi paralelo al anterior, con un comportamiento similar al CCH3. Los espesores de material arcillo-arenoso alcanzan también los 250m en promedio, denotando materiales más resistivos en el sector oriental del perfil, donde se identifica la unidad U3b, asociada con la roca caliza de la Formación El Cupido.







Figura 4.12 Perfil Geoeléctrico CCH4.

#### 4.4.1.2 Perfiles geoeléctricos del Valle de Cuatrociénegas

En el Valle de Cuatrociénegas se integraron tres perfiles geoeléctricos, denominados CCH1, CCH2 y CCH7, figuras 4.13, 4.14 y 4.15 respectivamente.

Los perfiles CCH1 y CCH2 cruzan el valle en dirección E-W, mientras que el CCH7 es transversal a los anteriores con dirección N-S. El primero de estos denota cambios laterales en los primeros 300m de profundidad, asociados principalmente con materiales arcillo-arenosos (CN08, CC09 y CN17) y roca compacta (CC21, CC20 y CN20), en la figura 4.13 se ilustra este comportamiento georresistivo. En los sitios CC09 y CN17 los materiales granulares presentan espesores del orden de los 200m, mientras que en el sitio CN08, estos materiales granulares se presentan intercalados con materiales más arenosos o roca fracturada, donde se registra un espesor del orden de los 300m. Se presenta una amplia distribución para la unidad U2c, la cual puede estar asociada con una caliza de características arcillosas, y que a la vez conforma el basamento rocoso sobre el cual descansan los materiales granulares



Figura 4.13 Perfil Geoeléctrico CCH1.

El perfil CCH2, también localizado en el Valle de Cuatrociénegas, lo integran cinco sitios de TEM. Este perfil ilustra para los materiales granulares una menor distribución en el sector sur del valle con espesores del orden de los 100m, como se ilustra en los sitios CN14, CC08 y CC07, mientras que el sitio con mayor espesor se tiene en el TEM CN09 que alcanza del orden de los 250m. El basamento de roca se representa por la unidad U2c de características arcillosas, mientras que las unidades U3a y U3b se asocian con la roca caliza de plataforma.



Figura 4.14 Perfil Geoeléctrico CCH2.

El perfil CCH7 cruza el Valle de Cuatrociénegas casi en dirección N-S, lo conforman cinco sitios de TEM, y denota para los materiales arcillo-arenosos un comportamiento sobresaliente en el punto CN18, donde se registran espesores del orden de los 500m para los materiales granulares, y que corresponde con el punto de mayor espesor registrado para los materiales granulares en el Valle de Cuatrociénegas. Mientras que en los sitios CN17, CC08 y CN16, los espesores para el material granular alcanza entre los 100 y 150m.



Figura 4.15 Perfil Geoeléctrico CCH7.

Con la finalidad de ilustrar el comportamiento georresistivo entre los Valles de Cuatrociénegas y El Hundido, se construyó el perfil geoeléctrico CCH5, figura 4.16. Para el Valle de El Hundido se registran espesores del orden de los 250m para el material arcillo-arenoso, que se muestra en los sitios CN02, CN03 y CN05, mientras que para el Valle de Cuatrociénegas se presentan espesores también de ese mismo orden, a excepción del punto CN10 donde se registran espesores para estos materiales granulares del orden de los 500m. El basamento rocoso lo conforma principalmente la unidad U2c, que se asocia con una roca caliza de características arcillosas o una arenisca.



Figura 4.16 Perfil Geoeléctrico CCH5.

## 4.4.2 Mapas de resistividad

## Mapas de resistividad a profundidad.

Para ilustrar el comportamiento integral de los 44 sitios de TEM; 24 de la primera campaña y 20 de la etapa complementaria, para diferentes cortes horizontales, se elaboraron seis mapas de resistividad, para diferentes profundidades bajo el nivel terreno y son: 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 600m.

Los mapas de resistividad para la parte más somera, corresponde a los de 50 y 100m de profundidad (figuras 4.17 y 4.18, respectivamente), en éstos se observa la distribución de los materiales arcillo-arenosos en color azul, y que se integran en un intervalo resistivo menor de 25 ohm-m (unidades U2a y U2b), estas zonas están rodeadas por materiales de mayor resistividad que representan las rocas, ilustrando de esta manera la distribución lateral que conforman los materiales granulares, y mostrándose de manera ilustrativa una barrera resistiva que divide ambos valles conformado por una roca compacta de características arcillosas, que puede estar asociada con la estructura de la Sierra de San Marcos y Pinos.



# Clasificación geofísica

Unidad geoeléctrica	Intervalo resistivo Ohm-m	Posible correlación
U1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.17 Mapa de resistividad para la profundidad de 50m.



## Clasificación geofísica

Unidad geoeléctrica	Intervalo resistivo Ohm-m	Posible correlación
U1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.18 Mapa de resistividad para la profundidad de 100m.

Para las profundidades de 200 y 300m (figuras 4.19 y 4.20, respectivamente), se muestra una importante disminución en la presencia de los materiales arcilloarenosos (U2a y U2b), de tal manera que las zonas de color azul se reducen, y mostrando un incremento en la distribución para las zonas de color amarillo y rojo (U3a y U3b), asociados con las rocas calizas más puras o de plataforma.



Clasificación geofísica			
Unidad	Intervalo resistivo	Posible correlación	
geoeléctrica	Ohm-m		
Ū1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada	
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)	
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)	
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)	
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)	
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero	

Figura 4.19 Mapa de Resistividad para la profundidad de 200m.



## Clasificación geofísica

Unidad geoeléctrica	Intervalo resistivo Ohm-m	Posible correlación
U1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.20 Mapa de Resistividad para la profundidad de 300m.



#### Clasificación geofísica

Unidad geoeléctrica	Intervalo resistivo Ohm-m	Posible correlación
Ũ1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.21 Mapa de Resistividad para la profundidad de 400m.

Para la profundidad de 400, 500 y 600 m (figuras 4.21 a 4.23), los materiales arcillo-arenosos muestran una importante reducción en su distribución, identificándose únicamente en un sitio de cada uno de los valles, que corresponden con los sitios de TEM CC13 localizado en el Valle de El Hundido, y el sitio CN18 localizado en el Valle de Cuatrociénegas. Al incrementarse la profundidad, prácticamente se tienen materiales con pocas posibilidades de contener agua.


# Clasificación geofísica

Unidad geoeléctrica	Intervalo resistivo Ohm-m	Posible correlación
U1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.22 Mapa de Resistividad para la profundidad de 500m.



# Clasificación geofísica

Unidad	Intervalo resistivo	Posible correlación
geoeléctrica	Ohm-m	
U1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.23 Mapa de Resistividad para la profundidad de 600m.

#### Mapas de resistividad de elevación.

A comparación de los mapas presentados en la sección anterior, se elaboraron mapas con respecto a la elevación del nivel del mar, es decir la resistividad corresponde a una misma elevación.

Los mapas de resistividad para las elevaciones de 680 y 650 msnm son muy similares (figuras 4.24 y 4.25). La resistividad muestra que en las porciones centrales de ambos valles el material predominante es arcilloso, presentando condiciones más favorables para la circulación del agua hacia la porción de Santa Mónica en el valle El Hundido y en las zonas de Churince y Pozas Azules en Cuatrociénegas.



#### Clasificación geofísica

Unidad	Intervalo resistivo	Posible correlación
geoeléctrica	Ohm-m	
Ū1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.24 Mapa de Resistividad para la elevación de 680 msnm.



Figura 4.25 Mapa de Resistividad para la elevación de 650 msnm.

Para el mapa de resistividad de 600 msnm (figura 4.26) se observa que la unidad con mejores posibilidades de contener agua están en la zona de Churince en Cuatrociénegas y hacia la zona de Tanque Nuevo en El Hundido.



# Clasificación geofísica

Intervalo resistivo	Posible correlación
Ohm-m	
4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero
	Intervalo resistivo Ohm-m 4 a 20 Menor de 10 10 a 30 30 a 100 100 a 600 600 a 10 000

Figura 4.26 Mapa de Resistividad para la elevación de 600 msnm.

A 500 msnm se encuentran zonas con muy buenas posibilidades de contener agua en ambos valles. Por ejemplo, en el Valle de El Hundido, la unidad U2c se encuentra en la porción oeste del valle, extendiéndose hasta la parte central. En el Valle de Cuatrociénegas la misma unidad se localiza hacia la zona occidental, desde la zona de pozos Churince y La Becerra hasta el frente de la Sierra Madera.



Clasificación geofísica							
Unidad	Intervalo resistivo	Posible correlación					
geoeléctrica	Ohm-m						
Ŭ1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada					
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)					
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)					
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)					
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)					
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero					

Figura 4.27 Mapa de Resistividad para la elevación de 500 msnm.

En cuanto los mapas de resistividades para las elevaciones de 400 y 300 msnm (figuras 4.28 y 4.29) se puede observar que las unidades de materiales poco permeables están ampliamente distribuidas en ambos valles.



Clasificación geofísica							
Unidad geoeléctrica	Intervalo resistivo Ohm-m	Posible correlación					
U1 U2a	4 a 20 Menor de 10	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada Material arcilloso (poco permeable a impermeable)					
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)					
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)					
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)					
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero					

Figura 4.28 Mapa de Resistividad para la elevación de 400 msnm.



# Clasificación geofísica

Unidad	Intervalo resistivo	Posible correlación
geoeléctrica	Ohm-m	
Ŭ1	4 a 20	Capa de cobertura; material aluvial y roca alterada
U2a	Menor de 10	Material arcilloso (poco permeable a impermeable)
U2b	10 a 30	Material arcillo-arenoso (poco permeable a permeable)
U2c	30 a 100	Material arenoso y/o roca fracturada (posiblemente permeable)
U3a	100 a 600	Roca poco fracturada (poco permeable)
U3b	600 a 10 000	Roca caliza con potencial acuífero

Figura 4.29 Mapa de Resistividad para la elevación de 300 msnm.

# 5. HIDROGEOLOGÍA

# 5.1. Censo de aprovechamientos, hidrometría y piezometría.

De acuerdo con lo estipulado en la propuesta de servicios, se debe determinar el número, localización, uso y demás características de los aprovechamientos hidráulicos de la zona de estudio. Asimismo evaluar los volúmenes de extracción de dichos aprovechamientos, los que ingresan a las pozas y los que circulan en distintas secciones de la red de canales.

Cabe señalar que como un resultado de la recopilación de información, se obtuvo a través de la Comisión Nacional del Agua un censo de aprovechamientos correspondiente al Valle de El Hundido realizado en el último trimestre del 2003. Con respecto al Valle de Cuatrociénegas, se obtuvo un catálogo de aprovechamientos realizado por la Compañía Lesser y Asociados (2002), y por medio de la Comisión Nacional de Zonas Naturales Protegidas en Cuatrociénegas se obtuvo un censo de las pozas contabilizando 175 pozas.

# 5.1.1 Censo de aprovechamientos

El censo de aprovechamientos se realizó en el periodo comprendido entre el 12 de abril y 13 de mayo del 2004, por medio de una brigada que registro los aprovechamientos en el Valle de El Hundido y Cuatrociénegas, apoyándose con cartas topográficas y geológicas escala 1:50 000 del INEGI.

Durante el censo se utilizó el formato mostrado en la tabla 5.1, en donde se registró la localización del pozo, nombre, dirección del propietario, profundidad total, referencia de donde se tomaron las medidas, método de perforación, uso del agua, características constructivas del aprovechamiento, nivel estático o dinámico, datos de la bomba y equipo de bombeo, etc.

En el Valle de El Hundido se registraron 142 aprovechamientos, de los cuales 28 se encontraron operando y 114 corresponden a agujeros que se encuentran sin equipo, otros aprovechamientos están fuera de servicio y de operación.

En el Valle de Cuatrociénegas se registraron 71 aprovechamientos y 299 manantiales (pozas). En este valle se encontraron 34 pozos operando y 37 corresponden a agujeros sin equipo, aprovechamientos fuera de servicio y operación. En la tabla 5.2 se resumen estos datos y la relación de los aprovechamientos en ambos valles se pueden observar en el anexo 3. La distribución de los aprovechamientos corresponde a mismo número que el censo de la CNA para el Valle de El Hundido y en el Valle de Cuatrociénegas al reportado por la Cía. Lesser y Asociados.

DATOS DEL P	OZO Y E	BOMB	4					
Localización del poz	20:				Nombre del propietario y dirección			
Municipio					<b>Profundidad</b> Referencia donde se toman las medidas			
Ciudad					Método de perforación Percusión () Rotaria () Rotaria-aire () Otro ()			
Dirección o distancia	a de la interc	epción de	el camir	0	Uso Doméstico () Suministro publico () Industrial () Irrigación: () Municipal () Comercial () Pozo prueba () Enfriamiento () Monitoreo () Otro ()			
					Tipo de ademe     Diámetro del agujero       Acero ()     ( )       P.V.C. ()     ( )			
Datos de la perforac	ión				Información de la rejilla			
Registro de la formación	color	dureza	De	а	Información del filtro			
					Información del cementado			
					<b>Desarrollo</b> Método: Duración: Químicos utilizados:			
					Nivel estático Fecha:			
					Nivel dinámico			
					Caudal: Estimado por medio de:			
Observaciones: Coor	denadas de	l pozo			Bomba:         Fecha instalación       Tipo         Manufactura       Modelo         HP       Volts       Capacidad         Profundidad succión       No. Pasos         Enfriamiento por       Fuente potencia			
					Terminado del cabezal Sello sanitario () Brocal () Dispositivo monitoreo ()			
					Distancia de posible fuente de contaminación			
					Registros geofísicos			
					<b>Calidad del agua</b> Se tomaron muestras: Donde fueron analizadas:			

# Tabla 5.1. Registro de aprovechamientos

Condiciones de operación	ELF	Hundido	Cuatrociénegas
Activos		28	34
Inactivos		114	37
Pozas	Total	142	<b>300</b> 371

# Tabla 5.2. Resumen del censo de aprovechamientos.



Figura 5.1 Distribución de los aprovechamientos censados.

# 5.1.2 Hidrometría de las captaciones de agua subterránea

Con respecto a los caudales de operación de los aprovechamientos censados en los valles de El Hundido y Cuatrociénegas se registraron las lecturas de los medidores instalados en sólo algunos aprovechamientos que cuentan con los dispositivos, y por medio de métodos directos o indirectos se cuantifico el caudal de los pozos en operación. Los caudales determinados se pueden observar en el anexo 3.

Cabe señalar que los tiempos de operación de los equipos de bombeo fueron proporcionados por los dueños o representantes de las zonas en producción. Adicionalmente se realizó la medición de las superficies cultivadas.

#### 5.2. Nivelación de brocales

El levantamiento topográfico por medio del sistema de GPS diferencial se aplico para la nivelación de los brocales de pozos y norias. La estación BASE CUATROCIÉNEGAS utilizada como fija durante la nivelación de brocales, se ligo con el Banco de Nivel conocido como **ITRF92** y con el Banco de Nivel del INEGI denominado BN107.

El levantamiento incluyó la adquisición de la señal de los satélites para determinar la ubicación horizontal y elevación en MSNM en los brocales de los pozos en modo estático. En el modo estático los tiempos de grabación de la señal son de por lo menos 40 minutos para obtener ciclos completos de la señal trasmitida y poder determinar la ubicación del sitio al milímetro.

Las coordenadas presentadas fueron calculadas tanto en datum WGS84 y en el Datum NAD 27, elipsoide CLARKE 1866 y proyección UNIVERSAL TRANVERSA DE MARCATOR UTM, por ser las mas utilizadas comúnmente. La elevación SNMM esta referida al Banco de Nivel V1030 de MICARE. La Tabla 5.3 presentan las coordenadas y elevaciones de los brocales de pozos de agua nivelados y en la Figura 4.1 se presenta una localización de estos.



Figura 5.2 Localización de los Pozos y norias nivelados

			Datum ITRF92				
REFERENCIA	REFERENCIA POZO		NORTE	Elevación del Brocal [SNMM]	Altura del Brocal [m]	Punto Nivelado	Elevación Superficie Terreno [SNMM]
Banco de Nivel _INEGI ITRF92	BN107	778502.22	2946242.73	788.59	0.00	PLACA	788.59
Estación Base_CCIENEGAS	CCIENEGAS	790586.45	2988517.22	728.63	0.00	Antena GPS	728.63
Punto de Control	HUNDIDO	768495.60	2946215.26	781.60	0.00	Antena GPS	781.60
Punto de Control	LIGUE	783048.03	2968278.24	760.08	0.00	Antena GPS	
1	189	792469.176	2987726.43	714.177	0.00	terreno natural	714.18
2	196	790116.687	2988754.36	726.191	0.00	terreno natural	726.19
3	228	215087.72	2981448.43	684.406	0.40	sobre brocal	684.01
4	229	214613.42	2984361	667.733	0.00	terreno natural	667.73
5	230	212241.73	2990523.87	693.67	0.12	sobre brocal	693.55
6	257	794776.695	2986287.15	696.926	0.12	sobre brocal	696.81
7	167D	789150.645	2991485.99	758.232	0.00	terreno natural	758.23
8	216	797251.216	2965708.53	728.264	0.20	sobre brocal	728.06
9	238	786615.223	2986582.42	720.116	0.30	sobre brocal	719.82
10	246B	209971.92	2965933.36	696.834	0.30	sobre brocal	696.53
11	247	211363.47	2968127.13	695.08	0.25	sobre brocal	694.83
12	IMTALABOR	204694.93	2970253.63	683.561	0.00	terreno natural	683.56
13	176	790417.287	2990205.13	739.72	0.00	terreno natural	739.72
14	CERO6	779439.405	2942304.36	819.062	0.00	terreno natural	819.06
15	CNA148	774150.393	2947952	771.58	0.40	sobre brocal	771.18
16	CNA248	781931.944	2964689.55	788.285	0.05	sobre brocal	788.24
17	CNA6	777840.593	2945998.5	785.497	0.29	sobre brocal	785.21
18	CNA98	778198.889	2948551.83	787.303	0.20	sobre brocal	787.10
19	CNA204a	766180.871	2975818.79	852.686	0.31	sobre brocal	852.38
20	CNA203	775343.532	2982658.07	761.101	0.00	terreno natural	761.10
21	CNA205	770297.761	2980400.65	789.894	0.00	terreno natural	789.89
22	CNA14	756149.635	2942011.07	807.177	0.00	terreno natural	807.18
23	CNA15	749346.996	2935537.59	817.829	0.12	sobre brocal	817.71
24	CNA16	743473.91	2944940.66	814.056	0.00	terreno natural	814.06
25	CNA51	746915.175	2946919.06	801.534	0.65	sobre brocal	800.88
26	CNA58A	739217.783	2950005.84	874.175	0.00	terreno natural	874.18
27	CNA93	745389.978	2942504.07	796.325	0.00	terreno natural	796.33
28	CNA120	770100.307	2946752.74	778.13	0.00	terreno natural	778.13
29	CNA17	735640.557	2953009.35	930.957	0.00	terreno natural	930.96
30	CNA32	750348.692	2953642.33	789.776	0.00	terreno natural	789.78
31	CNA47	748157.338	2951607.12	797.033	0.06	terreno natural	796.97
32	CNA9	744335.3	2926443.5	841.72	0.06	sobre brocal	841.66
33	CNA94	750011.878	2949083.78	790.292	0.40	sobre brocal	789.89
34	CNA90	778547.612	2949045.39	805.399	0.30	sobre brocal	805.10
	POZAS						
1	EL HUNDIDO	794951.923	2975217.48	689.685	0.00	nivel del agua	689.69
2	ESCOBEDO	789408.871	2977731.07	702.966	0.00	nivel del agua	702.97
3	MEZQUITE	787641.582	2980387.32	704.822	0.01	sobre nivel del agua	704.81
4	TIERRA BLANCA	783935.63	2980674.99	719.086	0.10	sobre nivel del agua	718.99
5	CHURINCE	784802.186	2971971.02	747.198	0.40	sobre nivel del agua	746.80

# Tabla 5.3. Nivelación de brocales de pozos y pozas (Datum WGS84).

# 5.3. Configuración del nivel estático

Durante los meses de abril y mayo del 2004 se llevó a cabo la primera campaña de piezometría en los pozos emplazados en los acuíferos de Valle de El Hundido y Cuatrociénegas, señalando que este primer recorrido corresponde al periodo de estiaje.

Adicionalmente, se realizó una concentración de datos piezométricos para los años 1997, 1998 y 2001, a partir del estudio de Lesser y Asoc. (2001), piezometría de El Valle de El Hundido de la Comisión Nacional del Agua (Diciembre de 2002) y de los levantamientos piezométricos realizados por el IMTA en el 2004

# 5.3.1 Configuración de la elevación del nivel estático

#### Valle de El Hundido

Para el periodo comprendido entre 1997 al 2004 y con los datos disponibles, en general se observa que los niveles piezométricos fluctúan entre 756.41-744.90 a 904.15-904.54 m.

A continuación se presenta en la tabla 5.4, las elevaciones para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que componen la red de pozos de observación establecida en el valle.

En las figuras 5.3 a 5.5 se muestran las configuraciones de elevación al nivel estático para los años 2001, 2002 y 2004.

#### Valle de Cuatrociénegas

Para el año de 1998, solo se cuenta con dos datos. Para el periodo comprendido entre 2001 al 2004, en general se observa que los niveles piezométricos fluctúan 657.03-681.27 a 753.83-753.81 m.

A continuación se presenta en la tabla 5.5, la historia piezométrica disponible para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que componen la red de pozos de observación establecida en el valle.

En las figuras 5.3 y 5.5 se muestran las configuraciones de elevación del nivel estático para los años 2001 y 2004.

No. Pozo	Х	Y	1997	SEP-01	Dic-02	ABR-04
CNA-06	779467.41	2942103.36				755.43
CNA-6	777868.59	2945797.5	756.41	754.91	756.39	756.51
CNA-9	744363.3	2926242.5	773.82	774.09	773.37	774.06
CNA-14	756177.64	2941810.07	775.16	775.22		775.99
CNA-15	749375	2935336.59	773.74	773.75	773.68	773.77
CNA-16	743501.91	2944739.66	783.25	773.26		782.59
CNA-17	735668.56	2952808.35	904.16	902.98	904.24	904.54
CNA-32	750376.69	2953441.33	777.43	772.43	772.34	772.58
CNA-47	748185.34	2951406.12	769.26	773.11	771.97	772.22
CNA-51	746943.18	2946718.06	773.29	779.72	764.17	764.33
CNA-58A	739245.78	2949804.84			784.46	783.40
CNA-90	778575.61	2948844.39		760.99		
CNA-93	745417.98	2942303.07		781.13	783.11	778.46
CNA-94	750039.88	2948882.78		760.32		764.09
CNA-98	778226.89	2948350.83		754.81	755.35	756.03
CNA-120	770128.31	2946551.74			755.68	755.83
CNA-148	774178.39	2947751			752.58	753.66
CNA-203	775371.53	2982457.07				744.90
CNA-204A	766208.87	2975617.79				756.30
CNA-205	770325.76	2980199.65				749.39
CNA-248	781959.94	2964488.55				751.92

Tabla 5.4.Elevación del nivel estático en el valle de El Hundido para 1997,<br/>2001, 2002 y 2004.

# Tabla 5.5.Elevación del nivel estático en el valle de Cuatrociénegas para1997, 2001, 2002 y 2004.

No. Pozo	X	Y	1998	Sep-01	Abr-04
CNA-167D	789178.65	2991284.99		753.83	753.81
CNA-176	790445.29	2990004.13	718.16	717.62	717.84
CNA-189	792497.18	2987525.43		699.38	700.75
CNA-196	790144.69	2988553.36		699.54	701.36
CNA-216	797279.22	2965507.53	695.17		700.14
CNA-228	215115.72	2981247.43			
CNA-229	214641.42	2984160		657.03	
CNA-230	212269.73	2990322.87			
CNA-238	786643.22	2986381.42		712.39	712.47
CNA-246B	209999.92	2965732.36		681.53	681.27
CNA-247	211391.47	2967926.13		680.18	683.16
CNA-257	794804.7	2986086.15		692.33	694.21



Figura 5.3 Elevación del nivel estático para enero de 2001



Figura 5.4 Elevación del nivel estático para enero de 2002



Figura 5.5 Elevación del nivel estático para enero de 2004

# 5.3.2 Curvas de igual profundidad al nivel estático

#### Valle de El Hundido

Para el periodo comprendido entre 1997 al 2004 y con los datos disponibles, en general se observa que los niveles piezométricos fluctúan entre 12.35 - 17.20 a 67.57 - 68.29 m.

A continuación se presenta en la tabla 5.6, las profundidades para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que componen la red de pozos de observación establecida en el valle.

En la figura 5.6 se muestra la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2004.

#### Valle de Cuatrociénegas

Para el año de 1998, solo se cuenta con dos datos. Para el periodo comprendido entre 2001 al 2004, en general se observa que los niveles piezométricos fluctúan entre 4.4 a 26.65 - 27.92 m.

A continuación se presenta en la tabla 5.7, las profundidades para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que componen la red de pozos de observación establecida en el valle.

En la figura 5.6 se muestra la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2004.

No.	No. Pozo	Х	Y	Brocal	1997	Sep-01	Dic-02	Abr-04	Oct-04
1	CNA-06	779467.4	2942103.3	819.06	Sin dato	Sin dato	Sin dato	63.63	63.85
2	CNA-6	777868.59	2945797.5	785.21	28.8	30.3	28.82	28.70	28.71
3	CNA-9	744363.3	2926242.5	841.66	67.84	67.57	68.29	67.60	Sin dato
4	CNA-14	756177.64	2941810.07	807.18	32.02	31.96	Sin dato	31.19	31.44
5	CNA-15	749375	2935336.59	817.71	43.97	43.96	44.03	43.94	43.94
6	CNA-16	743501.91	2944739.66	814.06	30.81	40.8	Sin dato	31.47	31.55
7	CNA-17	735668.56	2952808.35	930.96	26.8	27.98	26.72	26.42	26.41
8	CNA-32	750376.69	2953441.33	789.78	12.35	17.35	17.44	17.20	17.29
9	CNA-47	748185.34	2951406.12	796.97	27.71	23.86	25.00	24.75	Sin dato
10	CNA-51	746943.18	2946718.06	800.88	27.59	21.16	36.71	36.55	Sin dato
11	CNA-58A	739245.78	2949804.84	874.18	Sin dato	Sin dato	89.72	90.78	Sin dato
12	CNA-90	778575.61	2948844.39	805.10	Sin dato	44.11	Sin dato	Sin dato	Sin dato
13	CNA-93	745417.98	2942303.07	796.33	Sin dato	15.2	13.22	17.87	Azolvado
14	CNA-94	750039.88	2948882.78	789.89	Sin dato	29.57	Sin dato	25.8	Sin dato
15	CNA-98	778226.89	2948350.83	787.10	Sin dato	32.29	31.75	31.07	31.07
16	CNA-120	770128.31	2946551.74	778.13	Sin dato	Sin dato	22.45	22.3	22.38
17	CNA-148	774178.39	2947751	771.18		S/D	18.6	17.52	16.18
18	CNA-203	775371.53	2982457.07	761.1		S/D	S/D	16.2	16.21
19	CNA-204A	766208.87	2975617.79	852.38		S/D	S/D	96.08	
20	CNA-205	770325.76	2980199.65	789.89		S/D	S/D	40.5	41.46
21	CNA-248	781959.94	2964488.55	788.24		S/D	S/D	36.32	

Tabla 5.6.Profundidad al nivel estático en el valle de El Hundido de 1997,<br/>2001, 2002 y 2004.

# Tabla 5.7.Profundidad al nivel estático en el valle de Cuatrociénegas de<br/>1998, 2001 y 2004.

					(000	0 04	
NO.	No. Pozo	Х	Y	Brocal	1998	Sep-01	Abr-04
1	CNA-167D	789178.65	2991284.99	758.23	Sin dato	4.4	4.42
2	CNA-176	790445.29	2990004.13	739.72	21.56	22.1	21.88
3	CNA-189	792497.18	2987525.43	714.18	Sin dato	14.8	13.43
4	CNA-196	790144.69	2988553.36	726.19	Sin dato	26.65	24.83
5	CNA-216	797279.22	2965507.53	728.06	32.89	Sin dato	27.92
6	CNA-228	215115.72	2981247.43	684.01	Sin dato	Operando	Sin dato
7	CNA-229	214641.42	2984160	667.73	Sin dato	10.7	Sin dato
8	CNA-230	212269.73	2990322.87	693.55	Sin dato	Sin dato	Sin dato
9	CNA-238	786643.22	2986381.42	719.82	Sin dato	7.43	7.35
10	CNA-246B	209999.92	2965732.36	696.53	Sin dato	15	15.26
11	CNA-247	211391.47	2967926.13	694.83	Sin dato	14.65	11.67
12	CNA-257	794804.7	2986086.15	695.51	Sin dato	3.18	1.3





# 5.3.3 Curvas de igual evolución del nivel estático en m

#### Valle de El Hundido

Para el periodo comprendido entre 1997 al 2001, las evoluciones muestran abatimientos entre -0.01 — 6.43 y recuperaciones entre +1.5-+9.99.

Para el periodo comprendido entre 2001 al 2002, las evoluciones muestran abatimientos entre -0.54 — 1.98 y recuperaciones entre +0.07-+15.55.

Para el periodo comprendido entre 2002 al 2004, las evoluciones muestran abatimientos entre -0.09 — 1.08 y recuperaciones entre +1.06-4.65.

A continuación se presenta en la tabla 5.8, las evoluciones disponibles para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que componen la red de pozos de observación establecida en el valle.

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran las configuraciones de las evoluciones para los periodos 2001 - 2002 y 2002 - 2004.

#### Valle de Cuatrociénegas

Para el año de 1998, solo se cuenta con dos datos. Para el periodo comprendido entre 2001 al 2004, en general se observa que las evoluciones muestran abatimientos entre -0.08 y -2.98, así como recuperaciones entre +0.02 y +0.26 m.

A continuación se presenta en la tabla 5.9, la evolución disponible para los pozos que se encuentran referenciados con respecto al nivel del mar y que componen la red de pozos de observación establecida en el valle.

No. Pozo	Х	Y	1997-01	2001-02	2002-04
CNA-06	779467.41	2942103.36			
CNA-6	777868.59	2945797.5	1.5	-1.48	-0.12
CNA-9	744363.3	2926242.5	-0.27	0.72	-0.69
CNA-14	756177.64	2941810.07	-0.06		
CNA-15	749375	2935336.59	-0.01	0.07	-0.09
CNA-16	743501.91	2944739.66	9.99		
CNA-17	735668.56	2952808.35	1.18	-1.26	-0.3
CNA-32	750376.69	2953441.33	5	0.09	-0.24
CNA-47	748185.34	2951406.12	-3.85	1.14	-0.25
CNA-51	746943.18	2946718.06	-6.43	15.55	-0.16
CNA-58A	739245.78	2949804.84			1.06
CNA-90	778575.61	2948844.39			
CNA-93	745417.98	2942303.07		-1.98	4.65
CNA-94	750039.88	2948882.78			
CNA-98	778226.89	2948350.83		-0.54	-0.68
CNA-120	770128.31	2946551.74			-0.15
CNA-148	774178.39	2947751			-1.08
CNA-203	775371.53	2982457.07			
CNA-204A	766208.87	2975617.79			
CNA-205	770325.76	2980199.65			
CNA-248	781959.94	2964488.55			

# Tabla 5.8.Evolución del nivel estático en el valle de El Hundido de 1997 al2004.

No. Pozo	Х	Y	1998-01	2001-04
CNA-167D	789178.65	2991284.99		0.02
CNA-176	790445.29	2990004.13	0.54	-0.22
CNA-189	792497.18	2987525.43		-1.37
CNA-196	790144.69	2988553.36		-1.82
CNA-216	797279.22	2965507.53		
CNA-228	215115.72	2981247.43		
CNA-229	214641.42	2984160		
CNA-230	212269.73	2990322.87		
CNA-238	786643.22	2986381.42		-0.08
CNA-246B	209999.92	2965732.36		0.26
CNA-247	211391.47	2967926.13		-2.98
CNA-257	794804.7	2986086.15		-1.88

Tabla 5.9.Evolución del nivel estático en el valle de Cuatrociénegas de<br/>1998 y 2004.



Figura 5.7 Evolución del nivel estático para el periodo 2001 – 2002.



Figura 5.8 Evolución del nivel estático para el periodo 2002 – 2004.

# 5.3.4 Red de flujo subterráneo

La red de flujo consiste de dos series de líneas. La primera serie, referida como líneas equipotenciales unen puntos de igual carga y representan la altura de la superficie piezométrica. La segunda serie, referida como líneas de flujo, describe los patrones idealizados seguidos por las partículas de agua, en su movimiento a través del acuífero. De acuerdo con la red de flujo (figura 5.9) construida a partir de la configuración de la elevación del nivel estático tenemos que:

En el Valle de El Hundido, se observa una equipotencial máxima en el Ejido el Papalote de 850 msnm y otra de 790 msnm por las Morenas y Ejido El Hundido, por lo que la dirección del flujo es de suroeste hacia norte-noreste (centro del Valle de El Hundido). Otra componente del flujo es de la equipotencial 760 msnm de

Santa Teresa de Sofía hacia la línea equipotencial 760 msnm de Cerros prietos, con una dirección hacia el sureste.

En el Valle de Cuatrociénegas, tenemos líneas equipotenciales desde 800 a 700 msnm, presentando una dirección de flujo del oeste del valle hacia las pozas la Becerra y Churince. Otras líneas de flujo cruzan Cuatrociénegas hacia el oeste del valle donde se tienen los poblados del Venado, San Vicente y otros.



Figura 5.9 Red de flujo subterráneo

# 5.4. Caracterización hidráulica mediante pruebas de bombeo

Se determinaron los parámetros hidráulicos tales como la transmisividad y conductividad hidráulica mediante nueve pruebas de inyección y una de bombeo. Estos parámetros permiten cuantificar las propiedades del subsuelo en relación con la dinámica del flujo subterráneo. A continuación se describe el desarrollo de cada una de las pruebas así como su interpretación correspondiente.

# 5.4.1 Desarrollo de las pruebas de bombeo

A continuación se describe el procedimiento empleado y algunas particularidades importantes que se presentaron durante el desarrollo de cada una de las pruebas de inyección y bombeo.

El programa de las pruebas de inyección y bombeo fue realizado metódicamente, registrando el tiempo, volumen inyectado y descarga, así como el registro de las evoluciones del nivel dinámico.

# 5.4.2 Sitio de estudio, pozos de bombeo y pozos de observación

Todos los pozos seleccionados se encuentran emplazados dentro de la zona de estudio, su ubicación espacial puede observarse en la figura 5.10. La relación de los 10 pozos se muestra en la siguiente tabla.

No. Pozo	Nombre del Predio	Municipio	Profundidad (m)	Coord geog (L	denadas gráficas JTM)
CNA-123	Rancho Torre Barrio	Cuatrociénegas	>200	776513	2948543
CNA-146	Rancho Torre Barrio	Cuatrociénegas	>200	773244	2947881
P-AM	Antiguos Mineros del Norte	Cuatrociénegas	58	204732	2970051
CNA-196	El Baluarte	Cuatrociénegas	65	790164	2988560
CNA-239	San José del Anteojo	Cuatrociénegas	46	786394	2986275
CNA-117	Agrícola El Pilar	Cuatrociénegas	120	750148	2952684
CNA-116	Agrícola El Pilar	Cuatrociénegas	146	749816	2951858
CNA-114	Agrícola El Pilar	Cuatrociénegas	75	749096	2949934
CNA-4	Tanque Nuevo	Cuatrociénegas	50	777847	2943786
CNA-180*	Agrícola Ferriño	Cuatrociénegas	150	790254	2989494

# Tabla 5.10. Pozos donde se desarrollaron las pruebas de inyección y<br/>bombeo.

\* Prueba de bombeo



Figura 5.10 Localización de las pruebas de bombeo

# 5.4.3 Duración de las pruebas Inyección y bombeo e intervalos de medición

El tiempo de duración de la prueba de bombeo fue de 48 horas, debido a que se cubrió la zona de riego y no había donde disponer el agua. El tiempo de inyección de volúmenes conocidos de agua varió, dependiendo de las condiciones de cada sitio (tabla 5.11), así como el registro de la evolución del nivel del agua hasta igualar o aproximarse al nivel estático.

Tabla 5.11.	Tiempos en la etapa de bombeo y recuperación de las pruebas
	de bombeo.

No. Pozo IMTA	Tiempo de inyección -bombeo (minutos)	Registro de la evolución del nivel - recuperación (minutos)
CNA-123	10	3117
CNA-146	4	120
P-AM	5	70
CNA-196	4	15
CNA-239	29	60
CAN-117	18	195
CNA-116	12	131
CNA-114	17	25
CAN-4	9	5
CNA-180*	2880	860

#### Prueba de bombeo

Una vez iniciada la prueba de inyección y bombeo, se procedió a medir en forma simultánea la profundidad al nivel del agua en el pozo bombeado y si existe en el de observación, con la secuencia de tiempos que se indican en las siguientes tablas:

#### Tabla 5.12. Tiempos de medición del nivel durante la etapa de bombeo

Lectura	Tiempo
1	Inmediatamente antes del bombeo
2	15 segundos, luego de iniciado el
3	bombeo
4	30 segundos
5	un minuto
6	dos minutos
7	cuatro minutos
8	ocho minutos
9	quince minutos
10	30 minutos
	1 hora

Tabla 5.13. Tiempos de medición del nivel durante la etapa de recuper	ación
---	-------

Lectura	Tiempo
1	Inmediatamente antes de finalizar el bombeo
2	15 segundos, después de haber finalizado el
3	bombeo
4	30 segundos
5	un minuto
6	dos minutos
7	cuatro minutos
8	ocho minutos
9	quince minutos
10	30 minutos
	1 hora

#### Programa de bombeo

El programa para la ejecución de las pruebas de inyección y bombeo fue presentado y definido en común acuerdo con el personal a cargo de la supervisión de los trabajos. El número de pozo, así como las fechas de realización de las pruebas se muestra en la tabla 5.14.

#### Tabla 5.14. Fechas de realización de las pruebas de bombeo

No. de pozo	Fecha de realización
CNA-123	20 de junio del 2004
CNA-146	21 de junio del 2004
P-AM	22 de junio del 2004
CNA-196	12 de junio del 2004
CNA-239	13 de julio del 2004
CNA-117	14 de julio del 2004
CNA-116	15 de julio del 2004
CNA-114	16 de julio del 2004
CNA-4	23 de junio del 2004
CNA-180	11 de junio del 2004

#### Determinación de los caudales

La verificación del caudal durante una prueba de bombeo, necesita de un dispositivo preciso para medir la descarga de la bomba y una manera conveniente de ajustarla para mantener ésta lo más constante posible. El mejor control se obtiene mediante una válvula instalada en la descarga de la bomba (Driscoll, 1986).

El tamaño de la tubería de descarga y el de la válvula, deberá ser tal que esta última permanezca abierta la mitad o las tres cuartas partes, cuando se este bombeando a la descarga deseada.

Los cambios no percibidos de velocidad que son el resultado de variaciones de voltaje en motores eléctricos, temperatura, humedad y mezcla del combustible en los motores de gasolina, causarán menores fluctuaciones de la descarga cuando la bomba actúa contra la presión que se desarrolla al estar la válvula parcialmente cerrada.

Al tratar de regular la descarga de la bomba mediante el recurso de cambiar su velocidad, no siempre resulta satisfactorio. Esto es todavía más inconveniente cuando la bomba trabaja a descarga abierta y entrega el agua a baja presión.

El dispositivo de orificio circular es el instrumento más comúnmente usado para medir la descarga de una bomba centrífuga o de turbina. Desde luego, no podría medir el flujo pulsante de una bomba de pistón. La figura 5.11 muestra los detalles esenciales de la construcción y armado del aparato.



Figura 5.11 Esquema del diseño del tubo y orificio (Driscoll, 1986).

El orificio consiste de una abertura perfectamente redonda situada en el centro de una placa circular de acero, con bordes a escuadra bien definidos y espesor de 1.6 mm. Esta placa deberá fijarse contra el extremo final de la tubería de descarga a nivel, de modo que el orificio quede centrado en esta, previamente el extremo del tubo debe cortarse a escuadra de modo que la placa quede en posición vertical. El interior de la tubería deberá ser liso y encontrarse libre de cualquier obstrucción que pudiera causar turbulencia anormal. La tubería de descarga debe ser recta y a nivel en una distancia de por lo menos 1.80 m hacia atrás de la placa del orificio, que de ser posible esta conducción deberá ser más larga. Aproximadamente a 60 cm de la placa del orificio, deberá realizarse una perforación en el tubo de descarga con un agujero de 3.2 o 6.4 mm de diámetro, situado en un plano coincidente con el diámetro horizontal. Para medir la carga de agua o presión dentro de la tubería de descarga, se fija a este agujero, un tubo piezométrico, el cual consiste en un tubo transparente de 1.20 a 1.50 m de longitud, en donde el nivel que el agua alcanza en el tubo representa la presión existente en el tubo de descarga cuando el agua fluye a través del orifico de salida. Fijando a un soporte una escala graduada, se puede registrar la altura piezométrica alcanzada, desde el centro de la tubería de descarga hasta el nivel alcanzado.

Para cualquier tamaño de orificio, el caudal que fluye a través de esté varia con la carga de presión medida. Se han publicado tablas estándar que proporcionan los valores de la descarga para varias combinaciones de diámetros de tubo y orificio.

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

$$Q = A V C$$

donde Q es el caudal por unidad de tiempo, A es el área del orificio, V es la velocidad de flujo a través del orificio, C es el coeficiente de descarga para el orificio.

La velocidad del agua conforme ésta pasa a través del orificio, es la velocidad en el tubo de aproximación más la velocidad adicional creada por la caída de la presión entre el punto en donde se mide la carga piezométrica y el punto el agua descarga por el orificio. Puesto que el chorro descarga a presión atmosférica, toda la carga indicada en el tubo piezométrico se convierte en velocidad, haciendo caso omiso de la fricción en la tubería.

La velocidad de salida de un orificio, es:

$$v = \sqrt{2 g h} .$$

donde v es la velocidad en m/seg, g es la aceleración de la gravedad, en m/seg<sup>2</sup>, h es la caída de presión en metros de agua.

Para obtener el valor correcto de V, la velocidad real a través del orificio, el valor de v dado por la relación anterior, debe sumarse a la velocidad en el tubo de aproximación y a su vez, la suma debe corregirse mediante dos factores. Una corrección es debida a la contracción del chorro que tiene lugar justamente afuera del orificio, y la otra se debe al súbito cambio de sección transversal del área de flujo y que esta representado por el tamaño del orificio con relación al tamaño del tubo de aproximación.

Por conveniencia, la velocidad de aproximación y los dos factores de corrección pueden combinarse en un solo factor cuyo valor varia con la relación existente entre el diámetro del orificio y tubo, tal como se muestra en la figura 5.12.



Figura 5.12 Valor del coeficiente K para tubo y orificio (Driscoll, 1986).

Combinando las relaciones anteriores y llamando K al factor de descarga, tendremos la relación para la descarga a través del orificio:

$$Q = KA_{\sqrt{2 g h}}.$$

La que se puede escribir como:

$$Q=4.43 \ K \ A \ \sqrt{h} \ .$$

Los valores de K pueden obtenerse de la grafica de la figura 5.7 y la relación anterior puede utilizarse para calcular la descarga en cualquier combinación de diámetro de orificio, tubería de aproximación y altura de agua en el tubo piezométrico.

# 5.4.4 Requerimientos técnicos necesarios previos a la prueba de bombeo

Los requerimientos técnicos para el desarrollo e interpretación adecuados de las pruebas de inyección y bombeo son el conocimiento de: *i*) la columna litológica del pozo, *ii*) las características constructivas del pozo y *iii*) el equipo de bombeo instalado.

Los propietarios de los pozos donde se realizaron las pruebas proporcionaron algunos datos constructivos, en todos los casos se midió la profundidad total de los pozos con sonda.

# 5.4.5 Operación de aprovechamientos cercanos durante el desarrollo de las pruebas de bombeo.

Durante el desarrollo de las pruebas de inyección y bombeo, se verifico que los aprovechamientos cercanos al pozo de prueba no fueran operados, antes y durante el ensayo.

Al respecto, se menciona que previo al inicio de la prueba, el IMTA realizó un recorrido en los pozos aledaños al área de influencia del pozo de prueba, y reconociendo los pozos y pidiendo autorización a sus dueños o representantes para medir la profundidad del nivel estático y se verificó que la mayoría de los pozos estarían fuera de operación durante los meses de desarrollo de las pruebas.

# 5.4.6 Revisión y calibración del equipo.

El equipo de medición que se utilizó durante las pruebas consiste principalmente de: *i*) sondas eléctricas y transductores de presión, *ii*) cintas métricas y *iii*) cronómetros. Las cuatro sondas eléctricas utilizadas, se describen a continuación: se utilizó una sonda de marca SEBA de fabricación alemana, marcada a cada centímetro y longitud de 250 metros; una segunda sonda marca SOLINST de

fabricación americana, marcada a cada metro y además dos sondas marca HGE de fabricación nacional, con cable eléctrico bipolar del número 16 y 18, el cual fue marcado cada dos metros.

# 5.4.7 Descripción de las pruebas de bombeo

El desarrollo de cada una de las pruebas consistió en el registro cuidadoso del tiempo, de la evolución del nivel, del volumen inyectado y del caudal de descarga durante la única prueba de bombeo. Para las pruebas de inyección rápida y de bombeo se utilizaron formatos de registro con las profundidades al nivel estático y nivel dinámico, registradas en los pozos como se muestran en el anexo 4.

# Descripción de la prueba núm. 1

La prueba núm. 1, correspondió al pozo CNA-236, ubicado en el predio de la Agrícola Ferriño. La prueba inició el día 11 de junio de 2004, aproximadamente a las 6:19 horas, registrando en el pozo de bombeo el caudal de descarga y en el pozo de observación (CNA-180) los descensos.

# Descripción de la prueba núm. 2

La prueba núm. 2, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-196, ubicado en el predio de la agrícola El Baluarte, en Cuatrociénegas. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 12 de junio del 2004, aproximadamente a las 11:06 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 1 230 litros en 14 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 0.60 m, posteriormente se registro la evolución de los descensos.

# Descripción de la prueba núm. 3

La prueba núm. 3, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-123, ubicado en el rancho Torre Barrio, en Tanque Nuevo. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 20 de junio del 2004, aproximadamente a las 9:03 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 1 230 litros en 6 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 2.18 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### Descripción de la prueba núm. 4

La prueba núm. 4, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-146, ubicado en el rancho Torre Barrio, en Tanque Nuevo. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 21 de junio del 2004, aproximadamente a las 10:21 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 1 230 litros en 6 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 2.18 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### Descripción de la prueba núm. 5

La prueba núm. 5, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-4, ubicado en Tanque Nuevo. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 22 de junio del 2004, aproximadamente a las 13:11 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 1 847 litros en 9 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 0.94 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### Descripción de la prueba núm. 6

La prueba núm. 6, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo identificado como P-AM, ya que se encuentra en los terrenos del ejido del mismo nombre, no esta censado por la CNA, ya que esta recién perforado. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 23 de junio del 2004, aproximadamente a las 12:50 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 1 230 litros en 5 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 3.07 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### Descripción de la prueba núm. 7

La prueba núm. 7, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-239, ubicado en San José del Anteojo. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 13 de julio del 2004, aproximadamente a las 11:12 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 5 000 litros en 30 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 0.94 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### Descripción de la prueba núm. 8

La prueba núm. 8, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-117, ubicado en la Agrícola El Pilar. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 14 de julio del 2004, aproximadamente a las 10:32 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 5 000 litros en 18 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 2.16 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### Descripción de la prueba núm. 9

La prueba núm. 9, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-116, ubicado en la Agrícola El Pilar. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 15 de julio del 2004, aproximadamente a las 11:50 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 3 600 litros en 12 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 6.60 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### Descripción de la prueba núm. 10

La prueba núm. 10, correspondió a un ensayo de inyección en el pozo CNA-114, ubicado en la Agrícola El Pilar. El inicio de la inyección del agua al interior del pozo inició el día 16 de julio del 2004, aproximadamente a las 13:10 horas, inyectando un volumen al interior del pozo de 5 100 litros en 17 minutos, midiendo en el pozo una elevación del nivel de 2.62 m, posteriormente se registró la evolución de los descensos.

#### 5.4.8 Análisis de los datos de campo

#### Análisis de las curvas abatimiento - tiempo

Los datos recopilados durante las pruebas de bombeo (abatimiento y tiempos), fueron graficados sobre escalas logarítmicas para realizar un análisis y decidir la estrategia de interpretación de las pruebas. En dichas gráficas se analiza el comportamiento observado en campo, para posteriormente compararlo con las curvas tipo, para diferentes acuíferos (Freeze y Cherry, 1979).

#### Gráficos de abatimiento vs. Tiempo de los pozos analizados

La forma de los datos de abatimiento vs tiempo graficados sobre escalas logarítmicas se muestran en las figuras 5.13 a la 5.22, algunas de ellas presentan la forma de la curva tipo de Theis, otras presentan sólo segmentos debido a la corta duración de las pruebas.



Figura 5.13 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-123


Figura 5.14 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-146



Figura 5.15 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo P-AM.



Figura 5.16 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-196.



Figura 5.17 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-239.



Figura 5.18 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-117.



Figura 5.19 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-116.



Figura 5.20 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-114.



Figura 5.21 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de infiltración pozo CNA-4.



Figura 5.22 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba de bombeo pozo PB-180.

## 5.4.9 Interpretación de las pruebas de bombeo por métodos tradicionales

De acuerdo con el modelo conceptual planteado y el comportamiento observado de las pruebas de bombeo, se decidió interpretar las pruebas utilizando la metodología propuesta por Theis (1935), recuperación de Theis y Neuman (1975).

#### Método de Theis

#### Método de Theis

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

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1\partial h}{r \partial r} = \frac{S \partial h}{T \partial t}$$

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

$$h(r, o) = h_o$$
 para todo r

donde  $h_o$  es la carga hidráulica inicial (i.e. la superficie piezométrica es inicialmente horizontal).

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

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

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

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

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

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

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

Cuando se grafica en escala log-log, W(*u*) en el eje Y y 1/*u* en el eje X, resulta lo que se conoce como la *curva de Theis*. Los datos de campo se grafican como *t o*  $t/t^2$  en el eje X y el abatimiento (s) en el eje Y. El análisis de los datos se hace ajustando la línea que resulta de graficar los datos observados, a la curva propuesta por Theis (figura 5.23).



Figura 5.23 Curva de Theis.

Esta solución es apropiada para las condiciones que se muestran en la figura 5.24.



Figura 5.24 Esquema de flujo radial hacia un pozo para el análisis de la solución de Theis.

La solución de Theis supone lo siguiente:

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

Los datos que se requieren son:

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

#### Método de recuperación de Theis

Cuando el bombeo se suspende, el nivel del agua en los pozos de observación y de bombeo comienza a recuperarse. Esta recuperación en los niveles del aguas se conoce como abatimiento residual (s') (figura 5.25). Las mediciones del nivel dinámico en la etapa de recuperación permiten calcular la transmisividad el acuífero.



Figura 5.25 Esquema del abatimiento residual

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

Esta solución es apropiada para las condiciones que es muestran en la figura 5.26. Sin embargo, este método también se puede usar para acuíferos no confinados (Kruseman y de Ridder, 1990), utilizando solamente los datos de recuperación finales. En los tiempos finales, el efecto del almacenamiento elástico ya ha desaparecido, por lo que, los datos de la recuperación se ajustan a una línea recta, en una gráfica semi-log de s' contra t/ť (figura 5.27).



Figura 5.26 Esquema de flujo radial hacia un pozo para el análisis del método de recuperación de Theis.

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

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

donde

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \qquad u' = \frac{r^2 S'}{4Tt'}$$

- s' abatimiento residual
- r distancia del pozo al piezómetro
- T transmisividad del acuífero
- S y S' valores del almacenamiento durante el bombeo y la recuperación
- t y t' tiempo de inicio y de cese del bombeo, respectivamente.

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

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

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

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

Para analizar los datos, s' se grafica en el eje Y logarítmico y el tiempo en el eje X lineal (figura 5.27) como la relación de t/t' (tiempo total desde el comienzo del bombeo dividido entre el tiempo desde que cesó el bombeo).



Figura 5.27 Método de recuperación de Theis.

Este método supone lo siguiente:

- El acuífero es confinado y tiene una extensión radial infinita
- El acuífero es homogéneo, isotrópico y de espesor uniforme en toda el área de bombeo
- La superficie piezométrica es horizontal antes del bombeo
- El pozo penetra completamente y bombea a una tasa constante

- El agua que se remueve del almacenamiento se descarga instantáneamente, con la reducción en la carga
- El diámetro del pozo es pequeño, por lo que el almacenamiento del pozo es despreciable.

Los datos que se requieren en este método son:

- Datos de tiempo contra recuperación, en el pozo de bombeo o de observación
- Distancia del pozo de bombeo al pozo de recuperación
- Duración y tasa de bombeo

#### Método de Hvorslev

La metodología propuesta por Hvorslev (1951), que consiste en pruebas de infiltración rápida (*slug test*), esta diseñada para estimar la conductividad hidráulica de un acuífero confinado o libre, parcial o totalmente penetrante. Con las pruebas de infiltración rápida, la porción del acuífero probado para estimar la conductividad hidráulica es pequeño comparado a una prueba de bombeo y esta limitado a un área cilíndrica de radio pequeño, inmediatamente alrededor de la rejilla del pozo.

En una prueba de infiltración rápida, un volumen sólido es introducido al piezómetro, elevando instantáneamente el nivel del agua dentro del piezómetro. La elevación del nivel del agua dentro del pozo, también se consigue inyectando un volumen conocido de agua lo más rápido posible, auxiliándose de una bomba.

La tasa de entrada o salida, q, para el filtro del piezómetro para cualquier tiempo t es proporcional a la conductividad hidráulica (K) del suelo y la irrecuperable diferencias de cargas:

$$q(t) = \pi r^2 \frac{dh}{dt} = FK(H-h).$$

La siguiente figura ilustra el mecanismo de una prueba de infiltración rápida:



Figura 5.28 Esquema de una infiltración rápida

Hvorslev definió el intervalo de tiempo, TL (el tiempo requerido para el cambio de presión inicial inducido por la inyección/extracción inicial para disiparla, suponiendo una tasa de flujo constante) como:

$$T_L = \frac{\pi r^2}{FK} \, .$$

donde r es el radio efectivo del piezómetro, F es un factor de forma que depende de las dimensiones de la entrada del piezómetro (Hvorslev, 1951) para una explicación del factor de forma, K es la conductividad hidráulica dentro del radio de influencia.

Sustituyendo el intervalo de tiempo dentro de la ecuación inicial resulta la siguiente solución:

$$K = \frac{\pi r^2 \left( \ln \frac{h_t}{h_0} \right)}{F T_t}.$$

donde  $H_t$  es el desplazamiento como una función de tiempo y  $H_0$  es el desplazamiento inicial.

Los datos de campo son graficados con el  $log h_1/h_2$  sobre el eje *Y* y el tiempo sobre el eje *X*. El valor de  $T_L$  es considerado como el tiempo que corresponde a  $h_t/h_0$ = 0.37, y *K* es determinada de la ecuación inmediata anterior. Hvorslev evalúa F para los piezómetros más comunes, donde la longitud de la entrada es mayor que 8 veces el radio de la rejilla, y conduce a la siguiente solución general para *K*:

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_I}$$

donde *L* es la longitud de la rejilla, *R* es el radio del pozo incluyendo el empaque de grava y  $T_L$  es el intervalo de tiempo cuando  $h_t/h_0$  es igual a 0.37.

El radio efectivo del piezómetro, *r*, debería ser especificado como el radio del piezómetro.

A continuación se muestra el esquema de una prueba de infiltración y extracción de agua para este método (figura 5.29).



Figura 5.29 Esquema de una prueba de infiltración y extracción

En casos donde el nivel del agua desciende dentro del intervalo del ademe rasurado, el grafico de  $h_i/h_0$  vs. *T* frecuentemente tendrá una pendiente inicial y una pequeña pendiente para tiempos posteriores (conocido en la literatura como línea recta con efecto doble). En este caso.

Un ejemplo del análisis grafico mediante la metodología propuesta por Hvorslev, se muestra a continuación:



Figura 5.30 H/H<sub>0</sub> contra tiempo

La solución de Hvorslev, supone lo siguiente:

- 1. El acuífero confinado tiene una extensión infinita.
- 2. El acuífero es homogéneo, isotropito y de espesor uniforme.
- 3. El espejo del agua es horizontal antes de la prueba.
- 4. La inyección /extracción instantánea de un volumen de agua resulta en un cambio instantáneo en el nivel del agua.
- 5. El pozo es parcial o totalmente penetrante.
- 6. El pozo se considera tiene un ancho infinitesimal.
- 7. El flujo es horizontal hacia o alejándose del pozo.

Los datos requeridos para la metodología de Hvorslev son:

1. Los datos de abatimiento/recuperación vs. tiempo para un pozo de prueba.

2. Las observaciones comienzan desde el tiempo igual a cero hacia delante (la observación para t = 0 es tomada como el valor de desplazamiento inicial,  $H_0$ , y debe ser un valor distinto de cero).

## Método de Bouwer – Rice

El método de Bouwer-Rice (1976) de pruebas de infiltración rápida esta diseñado para estimar la conductividad hidráulica de un acuífero libre o confinado, total o parcialmente penetrante. Con la prueba de infiltración rápida, la porción del acuífero probado para determinar su conductividad hidráulica es pequeña comparada con una prueba de bombeo, y esta limitada a un área cilíndrica de radio pequeño inmediatamente alrededor de la rejilla del pozo.

En la prueba de infiltración rápida, un volumen sólido es bajado dentro del piezómetro, elevándose instantáneamente el nivel del agua dentro del pozo. La prueba puede también ser conducida en la manera opuesta removiendo instantáneamente un volumen de agua (*bail test*).

La metodología es apropiada para las condiciones mostradas en la siguiente figura:



Figura 5.31 Condiciones físicas apropiadas para el método

Bouwer-Rice (1976) desarrollo una ecuación para determinar la conductividad hidráulica como sigue:

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{R_{CONST}}{R}\right)}{2L} - \frac{1}{t} - \ln\left(\frac{h_0}{h_t}\right)$$

donde *r* es el radio del piezómetro (o el radio efectivo si el cambio del nivel del agua es dentro del intervalo rasurado), *R* es el radio medido del centro del pozo para el material del acuífero no perturbado,  $R_{cont}$  es la distancia radial contribuyente sobre la cual la diferencia en carga, h<sub>0</sub>, es disipado dentro del acuífero, *L* es la longitud de la rejilla, *Ht* es el desplazamiento como una función del tiempo (*ht/h*<sub>0</sub> debe ser siempre menor que cero, i.e., el nivel del agua debe siempre aproximarse al nivel estático del agua como se incrementa el tiempo), *H*<sub>0</sub> es el desplazamiento inicial.

Dado que la contribución del radio ( $R_{cont}$ ) del acuífero es conocido, Bouwer-Rice desarrollo curvas empíricas para relacionar este radio por tres coeficientes (A,B,C) que son todas funciones de la relación de L/R. Los coeficientes A y B son usados para pozos parcialmente penetrantes y el coeficiente C es usado únicamente para pozos totalmente penetrantes.

Los datos son graficados con el tiempo sobre un eje *X* lineal y  $ht/h_0$  sobre un eje *Y* logarítmico.

El radio efectivo del piezómetro, *r*, debería ser especificado como el radio del piezómetro, a menos que el nivel del agua caiga dentro de la porción ranurada del ademe dentro del acuífero durante la prueba de infiltración rápida.

Si el nivel del agua esta dentro de la rejilla del pozo, el radio efectivo puede ser calculado como sigue:

$$r_{eff} = \left[r^2(1-n) + nR^2\right]^{1/2}$$

donde n es la porosidad del filtro de grava alrededor de la rejilla del pozo.

A continuación se muestra el esquema de una prueba de infiltración y extracción de agua para este método (figura 5.27).



Figura 5.32 Esquema de una prueba de infiltración y extracción

En casos donde el nivel del agua desciende dentro del intervalo rasurado, el grafico de  $h/h_0$  vs. *t* frecuentemente tendrá una pendiente inicial y una pendiente menos pronunciada para tiempos posteriores. En este caso, el ajuste debería ser obtenido para la segunda porción de la línea recta (Bouwer, 1989).

Un ejemplo del análisis grafico mediante el método de Bouwer-Rice se muestra a continuación:



Figura 5.33 H/H<sub>0</sub> contra tiempo

La solución propuesta por Bouwer-Rice supone lo siguiente:

- 1. El acuífero es de extensión infinita.
- 2. El acuífero es homogéneo, isotrópico y de espesor uniforme.
- 3. la superficie piezométrica es horizontal antes de la prueba.
- 4. El cambio de la carga es instantánea al inicio de la prueba.
- 5. El pozo es parcial o totalmente penetrante.
- 6. El almacenamiento del pozo no es despreciable, por lo que es tomado en cuenta.
- 7. El flujo hacia el pozo es en estado establecido.
- 8. No existe flujo arriba de la superficie piezométrica.

Los datos requeridos para la solución de Bouwer-Rice son:

- 1. Datos de abatimiento/recuperación vs. tiempo para un pozo de prueba.
- 2. Las observaciones comienzan desde el tiempo igual a cero hacia delante (la observación para t = 0 es tomada como el valor de desplazamiento inicial,  $H_0$ , y debe ser un valor distinto de cero).

## Método de Cooper-Bredehoeft-Papadopulus

La metodología propuesta por Cooper-Bredehoeft-Papadopulus se aplica a la inyección instantánea o extracción de un volumen de agua para un pozo de diámetro grande y ademado dentro de un acuífero confinado. Si el agua es inyectada dentro del pozo, entonces la carga inicial esta arriba del nivel de

equilibrio y la solución del método predice el aumento. Por otro lado, si el agua es extraída del pozo, entonces la carga inicial esta abajo del nivel de equilibrio y el método calcula el abatimiento. El aumento o abatimiento s esta dado por la siguiente ecuación:

$$s = \frac{2H_0}{\pi} \int_0^\infty \exp\left(\frac{\beta u^2}{\alpha}\right) \left(J_0\left(\frac{u r}{r_c}\right) \left[u Y_0(u) - 2\alpha Y_1(u)\right] - Y_0\left(\frac{u r}{r_c}\right) \left[u J_0(u) - 2\alpha J_1(u)\right]\right) \left(\frac{1}{\Delta(u)}\right) du$$

Donde :

$$\Delta(u) = [u J_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [u Y_0(u) - 2\alpha Y_1(u)]^2$$
$$\alpha = (r^2_{W'}S) / r_{C^2}^2$$
$$\beta = (T_1) / r_c^2$$

y donde  $H_0$  Es el cambio inicial en carga dentro del ademe del pozo debido a la inyección o extracción, *r* es la distancia del pozo de inyección a el punto sobre el cono de depresión radial,  $r_c$  es el radio efectivo del ademe del pozo,  $R_w$  es el radio efectivo del intervalo abierto del pozo, *T* es la transmisividad del acuífero, *S* es el almacenamiento del acuífero, *T* es el tiempo desde la inyección o extracción,  $J_0$  es la función de Bessel de orden cero de primera clase,  $J_1$  es la función de Bessel de orden uno de primera clase,  $Y_0$  Función de Bessel de orden cero de segunda clase,  $Y_1$  Función de Bessel de orden uno de segunda clase.

La siguiente figura ilustra las condiciones ideales para utilizar el método de solución propuesto por Cooper-Bredehoeft-Papadopulus:



Figura 5.34 Diagrama que ilustra el mecanismo para el método de solución

Un ejemplo del análisis grafico de Cooper-Bredehoeft-Papadopulus se muestra a continuación:



Figura 5.35 Ejemplo del análisis gráfico del método

La metodología de Cooper-Bredehoeft-Papadopulus supone lo siguiente:

- 1. El acuífero es isotrópico, homogéneo, compresible y elástico.
- 2. Las capas son horizontales y se extienden infinitamente en la dirección radial.
- 3. La superficie piezométrica inicial (antes de la inyección) es horizontal y se extiende infinitamente en la dirección radial.
- 4. El acuífero esta emplazado entre acuicludos.
- 5. La ley de Darcy es valida para el flujo dominante.
- 6. El pozo de inyección tiene ademe rasurado en todo el espesor saturado del acuífero.
- 7. El volumen de agua es inyectado o extraído instantáneamente para el tiempo t = 0.

Los datos requeridos para la solución propuesta por Cooper-Bredehoeft-Papadopulus son:

- 1. Datos de profundidad al nivel estático vs. tiempo para un pozo de prueba.
- 2. Datos constructivos del pozo de prueba.

# 5.4.10 Resultados de la interpretación

El análisis e interpretación de resultados de las pruebas de inyección y bombeo se realizó con el software Aquifer Test 3.5. Para las nueve pruebas de inyección se estimaron los parámetros de conductividad hidráulica utilizando la metodología de Hvorslev (1951) y Bouwer & Rice (1976) y la transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento mediante la metodología de Cooper-Bredehoeft-Papadopulus (1967). La prueba de bombeo realizada en el pozo CNA-180 se interpretó por el método propuesto de Theis, Newman y de Recuperación de Theis.

En la tabla 5.15 se reportan los valores obtenidos de conductividad hidráulica calculados. En el Valle de El Hundido fluctúan entre 1.3 E-08 m/seg y 2.1 E-04m/seg, y que según la literatura especializada (Freeze & Cherry, 1979), corresponden a limos, loess y arena limosa.

Para el Valle de Cuatrociénegas, los valores de conductividad hidráulica varían entre 9.0 E-08 y 1.3 E-04, que de acuerdo con la literatura corresponden a limos, loess y arena limosa.

Para ambos valles, los resultados de la conductividad hidráulica son representativos, ya que estos son rellenos aluviales.

Pozo	Pozo K (m/seg) Método Hvorslev		T (m2/seg) K (m/seg) S
			Metodología
			Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
CNIA 422	4 205 0	4 075 0	1.08E-4
CNA-123	1.30E-8	1.07E-8	4.39E-/ 3.2E-5
			5.2E-5 5.05E-5
CNA-146	5.47E-7	4.38E-7	2.02E-7
			3.2E-5
			1.24E-3
P-AM	2.38E-6	1.87E-6	1.24E-5
			3.2E-5
			4.0E-1
CNA-196	1.29E-5	9,99E-6	4.0E-3
			3.2E-0 5.27E 5
CNA-239	9 01F-8	5 34F-8	5.27E-5 5.27E-7
0114-200	5.01E-0	0.042-0	3.2E-5
			4.79E-4
CNA-117	1.84E-6	1.46E-6	3.19E-7
			3.2E-5
			1.88E-4
CNA-116	1.72E-6	1.68E-6	1.26E-7
			3.2E-5
CNIA 444	0.005.0	7 05 0	4.5E-1
CNA-114	9.262-6	7.2E-6	4.UE-4 2.2E 5
			5.2E-5 2 58E-3
CNA-4	2.15E-4	1.62E-4	2.88E-5
			3.2E-5
PB-CNA-180	Theis	Newman	Recuperación de Theis
PO-CNA-	T=1.3E-2 m²/seg	T=8.97E-3 m²/seg	T=1.37E-2
	K=1.3E-4 m/seg	K=8.97E-5 m/seg	K=1.37E-4
	S=8.69E-4	S=9.4E-4	

# Tabla 5.15. Valores de Conductividad hidráulica, transmisividad y<br/>coeficiente de almacenamiento.

#### 5.5. Selección de pozos piloto para su interpretación

#### 5.5.1 Red de monitoreo El Hundido

De acuerdo al censo realizado por el IMTA en el Valle de El Hundido, el número de pozos en la zona es de 143. De estos, se seleccionaron 29 pozos para integrarlos a la red de monitoreo. Del total de pozos, primero se descartaron aquellos que están secos, colapsados o que no tienen ademe. Enseguida se trazó una malla rectangular con dimensiones de 2 000 m x 2 000 m. Por cada bloque de la malla, se seleccionó un pozo para integrarlo a la red de monitoreo. En el anexo 5 se muestra el apéndice fotográfico de la selección de pozos piloto.

No.	Х	Y	Lugar	Propietario
CNA	(UTM)	(UTM)		
102	//5436	2942751		Beta Santa Monica
105	777869	2941113	Tanque Nuevo	Beta Santa Mónica
109	780703	2938970	Tanque Nuevo	Beta Santa Mónica
112	783350	2937557	Tanque Nuevo	Beta Santa Mónica
23	772652	2945045	Ejido Santa Teresa de Sofía	Ejido Santa Teresa de Sofía
120	770146	2946594	Ejido Santa Teresa de Sofía	J.G. Esquivel García
147	773576	2947583	Rancho Torre Barrio	Florentino Rivero Alonso
131	774501	2945826	Rancho Torre Barrio	Florentino Rivero Alonso
141	775600	2949712	Rancho Torre Barrio	Florentino Rivero Alonso
114	749096	2949934	Agrícola El Pilar	Rafael Tricio
118	749145	2947360	Agrícola El Pilar	Rafael Tricio
120	748175	2945591	Agrícola El Pilar	Rafael Tricio
9	744385	2926241	El Papalote	Luis Díaz de León
12	745595	2931873	Buenavista	Luis Díaz de León
92-A	745014	2942116	Maloso Segundo	Mario Lozoya Sotomayor
17	735690	2952813	Las Morenas	Ejido Las Morenas
56	738878	2950014	La Bavia	Ejido La Bavia
76	744726	2945266	Las Morenas	Jorge Cárdenas
75	749014	2952986	Asunto de la Cuestión	Arturo Cantú
55	746691	2948353	San Fernando	Lázaro Villarreal
97	756431	2942853	Santa Teresa de Sofía	
96	752328	2938688	Sin Nombre	Raúl Anaya Rojo
64	755431	2938736	Arroyo Seco	Familia Villarreal
37	764093	2946213	Providencia	Gabino Vázquez
6-B	779484	2942102	La Víbora	Beta Santa Mónica
6	777887	2945798	Tanque Nuevo	Ejido Tanque Nuevo
90	778596	2948846	Tanque Nuevo	Ejido Tanque Nuevo
45	747820	2929201	El Papalote	Luis Díaz de León
15	749396	2935337	Derecho de vía	SCT

 Tabla 5.16.
 Red de monitoreo Valle de El Hundido

Debido a que no existen pozos en el centro del Valle de El Hundido se propone que se construyan siete piezómetros, con el fin de poder realizar un adecuado monitoreo de los niveles piezométricos de la zona. Los piezómetros que se proponen son los siguientes,

Piezómetros propuestos	Х	Y
	(UTM)	(UTM)
PP1	768012	2949984
PP2	762033	2949984
PP3	75604	2949933
PP4	753976	2953987
PP5	753976	2945981
PP6	750024	2941978
PP7	746021	2937975

Tabla 5.17. Piezómetros a construir en el Valle de El Hundido

En la figura 5.36, se muestran los pozos que se proponen para integrar la red de monitoreo. Los de color azul, son pozos que ya existen. Los de color rojo, son los pozos que se proponen para construir.



Figura 5.36 Red de monitoreo del Valle de El Hundido

# 5.5.2 Red de monitoreo de Cuatrociénegas

En el Valle de Cuatrociénegas se proponen como piezómetros de monitoreo los siguientes 26 pozos,

No. CNA	Х	Y	Lugar	Propietario
	(UTM)	(UTM)	-	•
216	797250	2965550	Antiguos Mineros	Ejido Antiguos Mineros
167-D	789193	2991285	El Cañón	Oscar Garza
205	770341	2980199	Ejido 6 de Enero	Ejido 6 de Enero
204-A	766227	2975621	Ejido San Lorenzo	Ejido San Lorenzo
250	769051	2976749	Ejido San Lorenzo	Ejido San Lorenzo
203	775391	2982458	Ejido 6 de Enero	Ejido 6 de Enero
238	786657	2986381	Los Vaqueros	Mario Flores
201	789203	2987553	Cuatrociénegas	Héctor Arocha
185	791125	2989236	Rancho La Cuchilla	Berta Laura de la Garza
191	791319	2987788	Escuela ETA	ETA
258	795106	2985246	Antigua Hda. San Juan	Ramón García González
192	792697	2985785	al SE de Cuatrociénegas	Familia Carielo
PC	784851	2971779	Cuatrociénegas	
ΡE	789439	2977554	Cuatrociénegas	
ΡB	784368	2975942	Cuatrociénegas	
P Me	787171	2980965	Cuatrociénegas	
РТ	785574	2981880	Cuatrociénegas	
P H1	794995	2975018	102°01'52"	
228	810970	2981867	Las Carpas	Ramiro Asís
229	810357	2984754	Ejido San Vicente	Ejido San Vicente
230	807695	2990798	San Juan Boquillas	San Juan Boquillas
246B	806593	2966124	El Vergel	Ejido Mendoza Berrueto
247	807880	2968382	El Venado	Ejido El Venado
IMTALABOR	801117	2970191		
241	780463	2965449	San Marcos	Ejido Nueva Atalaya
233	783003	2968102	San Marcos	

 Tabla 5.18.
 Red de monitoreo del Valle de Cuatrociénegas

Debido a que no existen pozos en el centro del Valle de Cuatrociénegas, se propone que se construyan cinco piezómetros, con el fin de poder realizar un adecuado monitoreo de los niveles piezométricos de la zona. Los pozos que se proponen son los siguientes,

## Tabla 5.19. Piezómetros a construir en Cuatrociénegas

Piezómetros propuestos	Х	Y
	(UTM)	(UTM)
PP1	774871	2976751
PP2	778999	2972558
PP3	779064	2978879
PP4	802865	2976751
PP5	802994	2982943

En la figura 5.37, se muestran los pozos que se proponen para integrar la red de monitoreo de Cuatrociénegas. Los de color azul, son pozos que ya existen. Los de color rojo, son los pozos que se proponen para construir



Figura 5.37 Red de monitoreo del Valle de Cuatrociénegas

# 5.6. Sondeos exploratorios

Con la finalidad de determinar la calibración de los transductores de presión, aunado a obtener información de la columna litológica, la variación vertical de los niveles del agua subterránea y el contacto entre las calizas y las areniscas de la formación San Marcos para completar la red de monitoreo, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua realizó la perforación, instalación y terminado de dos barrenos a 200 y 250 m (ver figura 5.38).

# 5.6.1 Localización

Las perforaciones exploratorias se realizaron en las inmediaciones del cañón de La Fragua, entre los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. Los pozos exploratorios tienen las siguientes coordenadas: para el barreno 1; Latitud norte 26°39'44" y longitud oeste 102°10'06", para el barreno 2; Latitud norte 26°43'31" y longitud oeste 102°10'30".

# 5.6.2 Objetivo

Investigar la profundidad del basamento hidrogeológico impermeable que subyace a las formaciones de caliza que conforman a la Sierra de la Fragua, así como la profundidad del nivel estático en la zona divisoria de los acuíferos de El Hundido y Cuatrociénegas.

# 5.6.3 Perforación de los barrenos

La perforación de los barrenos se realizó con una máquina *LONG YEAR 44*, y con un diámetro "NQ" de 7.46 cm (2 15/16), con barril muestreador para cortar y recuperar núcleos de manera contínua hasta la profundidad proyectada. Las muestras de roca fueron colocadas en cajas de material sintético indicando con números legibles, permanentes y en el sitio apropiado la profundidad que corresponde a cada tramo. Cabe señalar que la recuperación de los núcleos fue de un 60 a 70 % por cada metro cortado.

El fluido de perforación utilizado fue un espumante denominado "INSTA-VIS-plus".

# 5.6.4 Limpieza de los barrenos

La limpieza de los agujeros se realizó mediante la extracción de agua con una "Cuchara" de aproximadamente 2" de diámetro y 3 m de largo. En cada barreno se extrajo aproximadamente 3000 y 1800 litros.

# 5.6.5 Tubería de ademe

Los barrenos fueron ademados con tubería de PVC de 1.5" de diámetro de cedula 80. Se colocó un tapón punta de lápiz, tubería ranurada y lisa de acuerdo con las especificaciones del diseño del pozo emitidos por la CNA. Cabe señalar que la tubería antes descrita fue colocada holgadamente en los agujeros, pudiendo girar libremente cuando se encontraba suspendida durante su instalación. Esta tubería se logro bajar e instalar hasta la profundidad total de cada barreno.

# 5.6.6 Terminado de los barrenos

En cada barreno se coloco una losa sanitaria de 1  $m^2$  y 20 cm de altura, sobreyaciendo a la losa se construyo un brocal de 40 x 40 cm en cuyo interior contiene una cubierta con tapa de registro de 6 x 12 (MANHOLE) al cual se le

inserto una argolla para sujetar a los instrumentos de medición automáticos, así mismo el "manhole" en su parte superior tiene una tapa circular atornillable para protección del pozo y dispositivos.





#### 5.6.7 Resultados de la exploración

De acuerdo con la propuesta de servicios, inicialmente se planteo la perforación exploratoria de barrenos en las inmediaciones de la Sierra La Fragua, con el objeto de determinar el nivel freático entre los valles de El Hundido y Cuatrociénegas o detectar por medio de la recuperación de núcleos la cima del basamento hidrogeológico impermeable (Formación San Marcos). Al respecto, como un resultado de las exploraciones se puede afirmar que no se detecto el basamento impermeable, pero se registró un nivel freático en ambos pozos, tal

como se muestra en el esquema de la figura 5.39, donde se observa que los niveles detectados forman parte de un domo de recarga que se origina en esta sierra y que aporta entradas por flujo horizontal hacia ambos valles.

Se recomienda continuar con más exploraciones para poder determinar los gradientes hidráulicos y los volúmenes que transitan como flujo horizontal subterráneo hacia ambos valles.



Figura 5.39 Sección transversal de Cuatrociénegas a El Hundido en la poligonal Pozo CNA 148-B1-B2-Poza Churice

# 6. MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO

## 6.1. Definición de la red de muestreo en pozos activos e inactivos (perfiles)

Cuando se realizó el recorrido de campo para la identificación y verificación de las instalaciones de los aprovechamientos de agua subterránea seleccionados para la toma de muestras de agua; se prefirieron los que presentaron las mayores facilidades para adaptar correctamente el equipo de medición de parámetros de campo. La selección definitiva de los aprovechamientos donde se tomaron las muestras de agua subterránea consideró aquellos puntos donde los propietarios dieron las facilidades de acceso permitiendo la entrada a sus ranchos y que además en el momento de la visita se encontraban en condiciones normales de operación (equipo de bombeo instalado y en condiciones de operación, figura 6.1).



# Figura 6.1 Pozo en operación seleccionado para toma de muestras de agua subterránea

En la tabla 6.1 se presentan los sitios que integran la red de monitoreo de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. Así como en la figura 6.2, se muestra la ubicación de la red de monitoreo.

# Tabla 6.1Sitios integrantes de la red de monitoreo de los valles de<br/>Cuatrociénegas y El Hundido

No. Muestra	Clave CNA	Localidad	Tipo Aprov.	Fecha de muestreo	Latitud	Longitud	x	Y
1	CNA-82	El Pilar	Pozo	21/04/2004	26,614	-102,519	747018	2946120
2	CNA-84	El Pilar	Pozo	22/04/2004	26,625	-102,509	747962	2947324
3	CNA-83	El Pilar	Pozo	20/04/2004	26,618	-102,514	747506	2946566
4	CNA-85	El Pilar	Pozo	20/04/2004	26,632	-102,506	748281	2948150
5	CNA-87	El Pilar	Pozo	20/04/2004	26,641	-102,502	748706	2949076
6	CNA-103	Beta Santa Mónica 5	Pozo	22/04/2004	26,579	-102,230	775907	2942809
7	CNA-86	El Pilar	Pozo	23/04/2004	26,620	-102,525	746423	2946726
8	CNA-81	El Pilar	Pozo	23/04/2004	26,615	-102,536	745381	2946168
9	CNA104	Beta Santa Mónica No. 6	Pozo	16/04/2004	26,574	-102,224	776563	2942260
10	CNA-102	Beta Santa Mónica 4	Pozo	23/04/2004	26,581	-102,235	775393	2942968
11	CNA-44	Las Morenas	Pozo	24/04/2004	26,604	-102,558	743173	2944948
12	CNA-12	Buenavista	Pozo	24/04/2004	26,488	-102,537	745546	2932078
13	CNA-108	Beta Santa Mónica 10	Pozo	24/04/2004	26,558	-102,197	779263	2940484
14	CNA-90	Tanque Nuevo	Pozo	25/04/2004	26,635	-102,202	778555	2949037
15	CNA-107	Beta Santa Mónica 9	Pozo	26/04/2004	26,560	-102,203	778634	2940781
16	CNA-106	Beta Santa Mónica 8	Pozo	17/04/2004	26,564	-102,208	778184	2941185
17	CNA-105	Beta Santa Mónica 7	Pozo	16/04/2004	26,565	-102,211	777821	2941313
18	CNA-23	Ei. Santa Teresa de Sofía	Pozo	28/04/2004	26.602	-102.263	772607	2945283
19	CNA-24	Ej. Santa Teresa de Sofía	Pozo	17/04/2004	26,601	-102,268	772102	2945118
20	CNA-27	Ei. Santa Teresa de Sofía	Pozo	17/04/2004	26.598	-102.275	771338	2944792
21	CNA-25	Ej. Santa Teresa de Sofía	Pozo	17/04/2004	26,605	-102,286	770250	2945600
22	CNA-133	Santa Teresa de Sofía	Pozo	19/04/2004	26,611	-102,252	773609	2946315
23	CNA-125	Santa Teresa de Sofía	Pozo	28/04/2004	26,629	-102,217	777099	2948309
24	CNA-124	Santa Teresa de Sofía	Pozo	28/04/2004	26,632	-102,215	777231	2948663
25	CNA-003	Beta Santa Mónica 2	Pozo	16/04/2004	26,586	-102,258	773131	2943503
26	CNA-143	Santa Teresa de Sofía	Pozo	19/04/2004	26,643	-102,226	776102	2949946
27	CNA-41	El Campizal	Pozo	30/04/2004	26,649	-102,515	747347	2950019
28	CNA-43	El Campizal	Pozo	30/04/2004	26,643	-102,508	748114	2949294
29	CNA-39	El Campizal	Pozo	30/04/2004	26,642	-102,524	746510	2949191
30	P-01	Poza Churince	Manantial	30/04/2004	26,840	-102,134	784805	2971985
31	CNA-144	Santa Teresa de Sofía	Pozo	19/04/2004	26,644	-102,224	776347	2949987
	CNA-145	Florentino Rivero			26,643	-102,215	777267	2949796
32	CNA-142	Santa Teresa de Sofía	Pozo	19/04/2004	26,646	-102,229	775840	2950197
33	CNA-100	Beta Santa Mónica 1	Pozo	16/04/2004	26,591	-102,260	772867	2944046
34	CNA-121	Canoas	Noria	02/05/2004	26,739	-102,623	736368	2959757
35	CNA-101	Beta Santa Mónica 3	Pozo	16/04/2004	26,585	-102,245	774355	2943375
36	CNA-233	A.P. Nueva Atalaya	Pozo	04/05/2004	26,807	-102,153	783062	2968245
37	CNA-241	Papalote Nueva Atalaya	Pozo	04/05/2004	26,784	-102,180	780421	2965660
38	P-02	Poza La Becerra	Manantial	04/05/2004	26,880	-102,138	784315	2976331
39	P-03	Poza Escobedo	Manantial	05/05/2004	26,891	-102,087	789403	2977747
40	P-04	Poza Azul I	Manantial	05/05/2004	26,827	-102,024	795757	2970776
41	CNA-216	Antiguos Mineros del Norte	Pozo	05/05/2004	26,781	-102,010	797263	2965718
42	CNA-178	El Nogalito	Pozo	06/05/2004	26,997	-102,073	790457	2989436
43	P-05	Poza Santa Tecla	Manantial	06/05/2004	26,788	-102,002	798132	2966427
44	P-06	Poza Orozco	Manantial	06/05/2004	26,872	-102,088	789316	2975578
45	P-07	Poza Azul	Manantial	06/05/2004	26,923	-102,123	785720	2981125
46	P-08	Poza Las Tortugas	Manantial	06/05/2004	26,931	-102,125	785500	2982074
47	CNA-186	Rancho Los Alamos	Pozo	07/05/2004	26,989	-102,056	792227	2988630
48	CNA-199	EL Jonuco	Pozo	08/05/2004	26,984	-102,079	789886	2987992
49	CNA-250	Papalote San Lorenzo	Pozo	08/05/2004	26,888	-102,292	769007	2976953
50	CNA-227	Las Carpas	Pozo	08/05/2004	26,918	-101,867	215269	2980562
51	CNA-252	La Vega	Manantial	08/05/2004	26,861	-101,889	212946	2974327
52	CNA-243	El Venado	Manantial	09/05/2004	26,823	-101,913	210451	2970179
53	P-09	Río Mezquites	Río	09/05/2004	26,919	-102,107	787319	2980714

# Continuación de la Tabla 6.1

# Tabla 6.1 Sitios integrantes de la red de monitoreo de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido

No. Muestra	Clave CNA	Localidad	Tipo Aprov.	Fecha de muestreo	Latitud	Longitud	x	Y
54	CNA-191	ETA 8	Pozo	10/05/2004	26,983	-102,065	791287	2987976
55	P-10	San José del Anteojo	Manantial	10/05/2004	26,970	-102,121	785812	2986319
56	P-11	Las Playitas	Manantial	10/05/2004	26,910	-102,014	796577	2979946
	CNA-131	Florentino Rivero			26,609	-102,244	774449	2946028
57	P-12	Poza Ramón Manriquez	Manantial	28/07/2004	26,872	-102,020	796080	2975573
58	P- 13	Posa Los Hundidos	Manantial	28/07/2004	26,868	-102,032	794898	2975102
59	P-14	Poza Azul 11	Manantial	28/07/2004	26,828	-102,022	795996	2970692
60	P-15	Los Riachuelos	Manantial	28/07/2004	26,890	-101,997	798319	2977623
61	P-16	Tierra Blanca	Manantial	29/07/2004	26,922	-102,140	784026	2980840
62	P-17	El Mojarral	Manantial	29/07/2004	26,924	-102,120	786008	2981107
63	P-18	Poza XYZ	Manantial	29/07/2004	26,911	-102,035	794488	2979861
64	CNA-161	Ampuero 6	Pozo	29/07/2004	27,029	-102,114	786338	2992758
65	P-19	Poza Los Güeros	Manantial	30/07/2004	26,911	-102,035	794488	2979861
66	P-20	Laguna Churince	Manantial	30/07/2004	26,849	-102,143	783911	2972742
67	CNA-112	Beta Santa Mónica 14	Pozo	30/07/2004	26,534	-102,157	783298	2937799
68	CNA-119-B	Rancho La Ximena	Manantial	31/07/2004	27,044	-102,179	779849	2994275
69	CNA-162	Ampuero 5	Pozo	31/07/2004	27,022	-102,110	786753	2991992
70	CNA-115 (25 m)	El Pilar	Pozo	02/08/2004	26,661	-102,494	749427	2951171
71	CNA-115 (39 m)	El Pilar	Pozo	02/08/2004	26,661	-102,494	749427	2951171
72	CNA-115 (64 m)	El Pilar	Pozo	02/08/2004	26,661	-102,494	749427	2951171
73	CNA-115 (95 m)	El Pilar	Pozo	02/08/2004	26,661	-102,494	749427	2951171
74	CNA-129 (24 m)	Florentino Rivero	Pozo	03/08/2004	26,615	-102,229	775925	2946619
75	CNA-129 (30 m)	Florentino Rivero	Pozo	03/08/2004	26,615	-102,229	775925	2946619
76	CNA-129 (40 m)	Florentino Rivero	Pozo	03/08/2004	26,615	-102,229	775925	2946619
77	CNA-129 (60 m)	Florentino Rivero	Pozo	03/08/2004	26,615	-102,229	775925	2946619
78	CNA-129 (70 m)	Florentino Rivero	Pozo	03/08/2004	26,615	-102,229	775925	2946619
79	CNA-129 (85m)	Florentino Rivero	Pozo	03/08/2004	26,615	-102,229	775925	2946619
80	CNA-129 (100 m)	Florentino Rivero	Pozo	03/08/2004	26,615	-102,229	775925	2946619
81	P-21	La Teclita	Manantial	04/08/2004	26,781	-101,993	799003	2965550
82	CNA-227	Las Carpas	Pozo	04/08/2004	26,919	-101,867	811162	2981151
83	CNA-225	Las Carpas	Pozo	04/08/2004	26,913	-101,869	810979	2980481
84	CNA-228	Las Carpas	Pozo	04/08/2004	26,927	-101,869	810941	2982032
85	CNA-229	San Vicente	Pozo	04/08/2004	26,953	-101,874	810373	2984902
86	CNA-252	Las Vegas	Manantial	08/05/2004	26,863	-101,889	809128	2974889
87	Manantial	Cueva del Venado	Manantial	04/08/2004	26,823	-101,908	807347	2970409
88	CNA -243	El Venado	Manantial	09/05/2004	26,825	-101,913	806844	2970618
89	CNA - 37	El Hundido	Pozo	05/08/2004	26,616	-102,348	764068	2946478
90	CNA - 37	El Hundido	Pozo	05/08/2004	26,616	-102,348	764068	2946478
91	CNA - 37	El Hundido	Pozo	05/08/2004	26,616	-102,348	764068	2946478
92	CNA - 37	El Hundido	Pozo	05/08/2004	26,616	-102,348	764068	2946478
93	CNA - 37	El Hundido	Pozo	05/08/2004	26,616	-102,348	764068	2946478
94	CNA -139 (21 m)	Florentino Rivero	Pozo	05/08/2004	26,640	-102,250	773774	2949344
95	CNA -139 (26 m)	Florentino Rivero	Pozo	05/08/2004	26,640	-102,250	773774	2949344
96	CNA - 139(36 m)	Florentino Rivero	Pozo	05/08/2004	26,640	-102,250	773774	2949344
97	CNA - 139 (50 m)	Florentino Rivero	Pozo	05/08/2004	26,640	-102,250	773774	2949344
98	CNA - 139 (66 m)	Florentino Rivero	Pozo	05/08/2004	26,640	-102,250	773774	2949344
99	CNA - 139 (69 m)	Florentino Rivero	Pozo	05/08/2004	26,640	-102,250	773774	2949344
100	Poza El Anteojo (10m)	San José del Anteojo	Noria	08/08/2004	26,974	-102,111	786776	2986669
101	Poza El Anteojo (17m)	San José del Anteojo	Noria	08/08/2004	26,974	-102,111	786776	2986669
102	CNA -170 B-1 (50m)	Rancho la Ximena	Pozo	08/08/2004	27,082	-102,174	780251	2998498
103	CNA -170 B-2 (80m)	Rancho la Ximena	Pozo	08/08/2004	27,082	-102,174	780251	2998498
104	Trevertino	Nueva Atalaya	Caliza	19/09/2004	26,807	-102,153	783062	2968245



Figura 6.2 Red de monitoreo de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido

# 6.2. Mediciones in situ del comportamiento físico-químico del acuífero

Una parte importante del protocolo implementado durante el trabajo de campo, consistió en la medición de determinados parámetros de campo entre los que se cuentan: i) temperatura del agua subterránea, ii) conductividad eléctrica, iii) salinidad, iv) pH, v) potencial redox, vi) oxígeno disuelto y vii) alcalinidad. Además de que estas mediciones permiten establecer las condiciones originales del agua subterránea en el momento de su extracción del subsuelo, el registro en campo de estos parámetros es básico para la implementación de modelos geoquímicos que permitan el cálculo de índices de saturación, por lo que se tuvo especial cuidado en su medición. A continuación se describe en forma detallada como se llevaron a cabo dichas mediciones. Una panorámica de los aparatos utilizados para la medición es los parámetros de campo se presenta en la figura 6.3.



# Figura 6.3 Aparatos portátiles utilizados durante la medición de parámetros de campo, obsérvese la celda de aislamiento utilizada

# 6.2.1 Celda de aislamiento

Cuando el agua subterránea es extraída por medio de los equipos de bombeo instalados en los pozos, una vez en la superficie se expone a diferentes condiciones físicas y químicas a las que prevalecen en el subsuelo. Estas condiciones son especialmente válidas para el caso del oxígeno y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) disueltos. Efectivamente, normalmente la presión parcial de oxígeno disuelto en el agua subterránea, es mucho menor que su presión parcial en la atmósfera, por lo que aunque el coeficiente de difusión de este gas en agua es relativamente bajo ( $10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s), una vez que el agua subterránea es expuesta a la atmósfera existe la tendencia de oxigenación.

Esta situación ocasiona que algunas especies químicas se oxiden ocasionado cambios en el pH y potencial redox. Por otro lado, la presión parcial de  $CO_2$  en el agua subterránea normalmente es mayor que la correspondiente a la atmósfera, de este modo cuando el agua subterránea es extraída del acuífero, se presenta la tendencia en el  $CO_2$  de escapar modificando diversos parámetros como pueden ser la alcalinidad, pH, carbono inorgánico disuelto, entre otros.

Con base en las condiciones descritas previamente, se reconoce que al realizarse la interacción del agua subterránea con la atmósfera, algunos parámetros como el pH, potencial de óxido-reducción y conductividad eléctrica se modificarán y por lo tanto no serán representativas de las condiciones (originales) que se presentan a

profundidad en el subsuelo (Lloyd y Heathcote, 1985; Claassen, 1982; entre otros).

Por lo tanto, es necesario evitar y/o limitar estos cambios por medio de la utilización de una celda de aislamiento, ya que este dispositivo permite limitar en gran medida, la interacción del agua subterránea extraída por el pozo con la atmósfera, evitando que el agua disuelva oxígeno adicional al que contiene y que se libere CO<sub>2</sub> previamente a la medición de los parámetros. Las soluciones buffer se colocan en el recipiente rectangular.

Por lo tanto, con la finalidad de limitar al máximo la modificación de los parámetros señalados, el procedimiento utilizado en esta ocasión para la medición de los parámetros de campo incluyó la utilización de una celda de aislamiento (figuras 6.4 y 6.5). Este sencillo aparato se conecta por medio de mangueras de diámetro pequeño a válvulas ubicadas en la descarga del pozo (ya sea a alguna válvula que tenga en la tubería de descarga o en la descarga directa si es que la presenta por ejemplo en el caso de pozos que tienen descarga libre). De este modo, el agua extraída fluye en forma continua lo que permite que, por medio de la introducción de los electrodos respectivos en la celda de aislamiento, llevar a cabo las mediciones señaladas previamente. Este dispositivo permite además una mayor facilidad para la estabilización de las lecturas, sobre todo en las mediciones de pH y potencial redox.

Para el caso de algunas de los manantiales en la zona de Cuatrociénegas, la medición de los parámetros de campo (así como la toma de las muestras de agua subterránea) se realizó lo más cercano posible a la ubicación del sitio donde por inspección visual, era posible determinar que existía una descarga de agua del subsuelo en el interior del manantial. Por esta razón, fue necesario que una persona se adentrara en el aprovechamiento, llevando consigo los aparatos de medición y de esta manera tratar de realizar las mediciones en el punto más cercano posible a la descarga (figuras 6.6 y 6.7).



Figura 6.4 Utilización de celda de aislamiento para evitar la interacción entre el agua subterránea y la atmósfera



Figura 6.5 Conexión a la descarga del pozo de la manguera que conduce el agua a la celda de aislamiento


Figura 6.6 Medición de parámetros de campo en las descargas de los manantiales de la región de la región de Cuatrociénegas



Figura 6.7 Medición de los parámetros de campo "in situ" en los manantiales de Cuatrociénegas

### 6.2.2 Conductividad eléctrica y temperatura

La conductividad eléctrica es la propiedad que mide la facilidad de transmisión de una corriente eléctrica, proceso que en el caso de una solución acuosa es función de la concentración de electrolitos presentes. De este modo, el registro de este parámetro en una solución permite identificar de manera indirecta su salinidad. La conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos se registraron por medio de un conductivímetro portátil que utiliza ajuste por temperatura, parámetro que se registró con un termómetro digital incorporado en el potenciómetro y que presenta una aproximación de 0.1° C. Los sólidos totales disueltos se estimaron con el mismo aparato en el que se registró la conductividad eléctrica, por lo que en realidad corresponden a una aproximación lograda a partir de la segunda multiplicándola por un factor de aproximadamente 0.70.

### 6.2.3 Actividad de los iones hidrógeno (pH)

La medición de la actividad de los iones hidrógeno en el agua subterránea se efectuó por medio de un potenciómetro utilizando la técnica de calibración en dos puntos, en este caso especificados a partir de soluciones *buffer* de pH conocido. En esta técnica, el pH a registrar debe de ubicarse entre dichos extremos. Para ello se utilizaron soluciones de 4.0, 7.0 y 9.0 unidades de pH, colocadas en frascos inmersos en un recipiente en el que, al igual que en la celda de aislamiento, circulaba continuamente el agua subterránea. Este procedimiento permitió que la temperatura de las soluciones *buffer* fuera la misma que la del agua subterránea extraída del pozo, limitando la posibilidad de error en la medición (el valor del pH es dependiente de la temperatura) al mantener todo el equipo a la temperatura de interés (la que tiene el agua en la que se realizan las mediciones).

Una vez que todo el sistema se estabilizaba con la temperatura del agua (subterránea o superficial), la calibración consistió en colocar el electrodo sin calibrar en la solución para tener idea aproximada del pH del agua; posteriormente sumergirlo en la solución (*buffer*) de pH 7.0 realizando los ajustes necesarios para calibrar el aparato y posteriormente, dependiendo el pH aproximado determinado previamente en la solución, introducirlo en la solución guía de pH 4.0 ó 9.0, ajustando la pendiente del potenciómetro para obtener el valor correspondiente. Una vez calibrado el equipo, se sumergía el electrodo en la celda de aislamiento, registrando las lecturas del pH en forma continua hasta que, aproximadamente después de 10-15 minutos, se estabilizaban. Posteriormente se colocaba el electrodo nuevamente en la solución buffer de pH 7.0; si la medición era diferente en ±0.05 unidades de pH, se repetía el procedimiento de calibración y el de medición del pH del agua subterránea.

### 6.2.4 Registro del potencial redox

El potencial redox del agua subterránea se midió con un electrodo de tipo combinado, que consiste de filamento de platino y un electrodo de referencia (de plata-cloruro de plata). El elemento sensible donde se realiza la transferencia de electrones es el filamento de platino, por lo que se mantuvo limpio y pulido para evitar mediciones erróneas. Se reconoce en la literatura internacional que la obtención en campo de lecturas válidas y reales de potencial redox es sobre todo en medios oxidantes donde las relativamente complicada, concentraciones de hierro disuelto son bajas. Esto se debe, entre otras cosas a: i) fallas del electrodo utilizado, ii) cinética lenta en algunas de las especies que se presentan en estado de oxidación y reducción, lo que provoca deseguilibrio entre las diferentes parejas redox presentes en la solución y iii) presencia de potenciales naturales mezclados. El primer inconveniente se superó utilizando electrodos nuevos recién verificados en su funcionamiento y que se pulieron periódicamente. Los siguientes dos aspectos están relacionados con la naturaleza del sistema natural en investigación, por lo que no es posible realizar adecuaciones.

Este electrodo no requiere de calibración, por lo que al igual que para los parámetros restantes, las mediciones de verificación de su correcto funcionamiento se llevaron a cabo una vez al día, sumergiendo el electrodo en soluciones buffer de 7.0 y 4.0 unidades de pH. Si el electrodo funciona adecuadamente, la diferencia entre las lecturas de potencial registradas en cada solución debe ser del orden de 30 a 35 mV. La medición del potencial redox al igual que para el pH y los restantes parámetros de campo, se realizó cada dos minutos hasta que de acuerdo con la secuencia de mediciones lecturas consecutivas se mantenían relativamente constantes.

### 6.2.5 Registro del oxígeno disuelto

La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua subterránea se llevó a cabo sumergiendo un electrodo especial en la celda de aislamiento por donde circulaba un flujo controlado de agua subterránea. En este caso específico, el sensor de oxígeno disuelto incorporado en el electrodo utilizado es polarográfico de tipo "Clark" con sensor y compensación integrada por temperatura. Una vez polarizado el electrodo, el procedimiento de calibración del aparato incluyó sumergirlo en una solución libre de oxígeno (preparada mezclando 2 gramos de sulfito de sodio en 100 ml de agua destilada) ajustando la lectura a cero mg/l de oxígeno disuelto. Posteriormente y una vez seco el electrodo, se calibró al aire manteniendo el sensor 1 centímetro arriba de una superficie de agua limpia (evitando el contacto de la membrana con el agua) ajustando la lectura (calibración al aire) al valor correspondiente de acuerdo con la elevación sobre el nivel mar del sitio. Esta calibración se llevó a cabo diariamente al inicio de las operaciones durante la toma de la primera muestra del día, calibraciones subsiguientes se llevaron a cabo con calibración al aire únicamente. Una vez calibrado el sensor se introdujo en la celda de aislamiento realizando diversas

lecturas hasta que se identificó que los valores se estabilizaron en mediciones continuas realizadas cada dos minutos.

#### 6.2.6 Registro de la alcalinidad

Una vez tomada la muestra de agua, es factible que con paso del tiempo su alcalinidad se modifique, por lo que se midió directamente en campo. Para ello se utilizó la técnica estándar de titulación con ácido sulfúrico, con alícuotas de 15 ml, aplicando el método potenciométrico (de Gran). Este método consiste en agregar a la alícuota, un volumen determinado de ácido (en este caso mediante un titulador digital), midiendo inmediatamente el pH de la muestra con el potenciómetro calibrado, repitiendo este proceso en varias ocasiones hasta lograr varias mediciones (al menos 3) a un pH menor a 4.3 (figura 6.8).



Figura 6.8 Medición de la alcalinidad en campo (Método de Gran)

El principio del método potenciométrico de Gran (Appelo y Postma, 1993) es que una vez rebasado el punto donde la totalidad del HCO<sub>3</sub> ha sido convertido en  $H_2CO_3$  por efecto de la adición del ácido (punto de equivalencia), la concentración de H<sup>+</sup> se incrementa en forma lineal con la cantidad de H<sup>+</sup> añadido, representado por el volumen de HCI adicionado a la alícuota. Posteriormente se calcula la Función de Gran (F=(V+Vo)x10<sup>-pH</sup>) en la que V es el volumen de ácido añadido y Vo es el volumen inicial y se construye una gráfica de ese valor con relación al

ácido añadido (valor acumulado). El volumen de ácido añadido para el punto de equivalencia se obtiene interpolando hacia atrás en la parte lineal de la curva. Sin embargo, en algunas ocasiones fue posible, durante la adición del ácido a la muestra de agua, llegar al pH de 4.3 que marca el punto de equivalencia. En estos casos, la alcalinidad se determinó directamente sin necesidad de realizar el procedimiento descrito para la determinación de alcalinidad por el método de Gran.

En el anexo 6 se presenta en forma detallada el procedimiento realizado para la obtención del volumen de ácido añadido correspondiente con el punto de equivalencia. Una vez conocido el volumen de ácido correspondiente con el punto de equivalencia, la alcalinidad total se calculó por medio de la siguiente fórmula:

Alcalinidad (mg/lCaCO<sub>3</sub>) =  $\frac{ml \text{ totales de ácido} \times \text{N} \text{ ácido} \times 50,000}{\text{volumen alícuota}}$ 

#### 6.2.7 Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura

Con el fin de caracterizar el comportamiento del flujo subterráneo y la calidad fisicoquímica del agua en el medio saturado, se realizaron perfiles de conductividad eléctrica y temperatura, y se obtuvieron muestras de agua en varios niveles de profundidad en pozos inactivos o desmantelados existentes en la zona.

Los perfiles de conductividad eléctrica y temperatura se realizaron en pozos cuyos equipos de bobeo habían sido removidos y que permitieron la introducción de los dispositivos de medición y muestreo.

Estos aprovechamientos habían sido desmantelados por los usuarios debido a la alta concentración de sales disueltas en el agua y por no ser apropiados para el riego agrícola.

Las variaciones de temperatura y conductividad eléctrica del agua a lo largo de toda la columna del pozo para los diferentes perfiles realizados se muestran en la figura 6.9.



Figura 6.9 Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura en pozos inactivos de Cuatrociénegas y El Hundido



Figura 6.9 Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura en pozos inactivos de Cuatrociénegas y El Hundido



6.9 Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura en pozos inactivos de Cuatrociénegas y El Hundido

No. Muestra	Clave CNA	Localidad	TEMP. °C	рН	E (mV)	Eh (mV)	SDT (mg/l)
1	CNA-82	El Pilar	28,0	8,11	95,0	291	3136
2	CNA-84	El Pilar	28,5	7,10	120,0	315	2947
3	CNA-83	El Pilar	28,8	7,18	124,0	319	2975
4	CNA-85	El Pilar	30,1	7,16	107,0	301	3066
5	CNA-87	El Pilar	29,1	7,20	71,0	266	3241
6	CNA-103	Beta Santa Mónica 5	31,0	7,01	186,0	379	1059
7	CNA-86	El Pilar	27,4	7,27	62,0	258	2863
8	CNA-81	El Pilar	26,9	7,26	-11,0	186	2828
9	CNA104	Beta Santa Mónica No. 6	31,8	7,01	151,0	343	1035
10	CNA-102	Beta Santa Mónica 4	31,2	7,65	85,0	278	1098
11	CNA-44	Las Morenas	27,1	7,19	20,0	217	2772
12	CNA-12	Buenavista	27,4	7,23	178,0	374	3479
13	CNA-108	Beta Santa Mónica 10	27,4	7,70	76,0	272	983
14	CNA-90	Tanque Nuevo	32,1	6,99	108,0	300	1138
15	CNA-107	Beta Santa Mónica 9	31,3	7,21	121,0	314	1109
16	CNA-106	Beta Santa Mónica 8	29,5	7,93	68,0	262	1030
17	CNA-105	Beta Santa Mónica 7	28,9	7,92	123,0	318	1014
18	CNA-23	Ej. Santa Teresa de Sofía	29,1	7,24	118,0	313	1722
19	CNA-24	Ej. Santa Teresa de Sofía	29,6	7,28	116,0	310	1603
20	CNA-27	Ej. Santa Teresa de Sofía	29,4	7,21	114,0	309	1582
21	CNA-25	Ej. Santa Teresa de Sofía	28,7	7,18	209,0	404	1925
22	CNA-133	Santa Teresa de Sofía	29,7	7,28	-75,0	119	2569
23	CNA-125	Santa Teresa de Sofía	33,5	7,19	-12,0	179	1155
24	CNA-124	Santa Teresa de Sofía	33,4	7,16	10,0	201	1225
25	CNA-003	Beta Santa Mónica 2	31,1	7,28	136,0	329	1062
26	CNA-143	Santa Teresa de Sofía	32,0	7,16	52,0	244	1778
27	CNA-41	El Campizal	28,2	7,57	202,0	398	3157
28	CNA-43	El Campizal	29,0	7,48	185,0	380	3570
29	CNA-39	El Campizal	28,5	7,38	147,0	342	3080
30	P-01	Poza Churince	31,3	7,57	90,0	283	1834
31	CNA-144	Santa Teresa de Sofía	31,1	7,02	27,0	220	1757
	CNA-145	Florentino Rivero					
32	CNA-142	Santa Teresa de Sofía	31,5	7,01	10,0	203	1637
33	CNA-100	Beta Santa Mónica 1	30,4	7,11	127,0	321	1215
34	CNA-121	Canoas	22,9	7,37	150,0	351	440
35	CNA-101	Beta Santa Mónica 3	30,1	7,09	99,0	293	1128
36	CNA-233	A.P. Nueva Atalaya	32,5	7,06	146,0	338	1722
37	CNA-241	Papalote Nueva Atalaya	29,7	7,76	-84,0	110	1820
38	P-02	Poza La Becerra	32,1	7,24	270,0	462	1827
39	P-03	Poza Escobedo	34,5	7,42	212,0	402	1876
40	P-04	Poza Azul I	27,8	7,90	165,0	361	1897
41	CNA-216	Antiguos Mineros del Norte	32,6	6,96	-160,0	32	1108
42	CNA-178	El Nogalito	24,3	6,79	146,0	345	1172
43	P-05	Poza Santa Tecla	31,7	7,24	137,0	329	866
44	P-06	Poza Orozco	31,2	7,63	102,0	295	1750
45	P-07	Poza Azul	31,2	7,15	133,0	326	1848
46	P-08	Poza Las Tortugas	26,8	7,75	149,0	346	2282
47	CNA-186	Rancho Los Alamos	28,7	6,48	107,0	302	1082
48	CNA-199	EL Jonuco	26,6	6,75	119,0	316	1428
49	CNA-250	Papalote San Lorenzo	30,3	7,20	-116,0	78	1771
50	CNA-227	Las Carpas	27,0	7,07	132,0	329	455
51	CNA-252	La Vega	25,7	7,22	265,0	463	403
52	CNA-243	El Venado	29,7	7,23	225,0	419	481
53	P-09	Río Mezquites	31,3	7,82	180,0	373	1848

# Tabla 6.2Parámetros de campo medidos en los valles de<br/>Cuatrociénegas y El Hundido

No. Muestra	Clave CNA	Localidad	TEMP. °C	рН	E (mV)	Eh (mV)	SDT (mg/l)
54	CNA-191	ETA 8	24,2	6,73	131,0	330	1295
55	P-10	San José del Anteojo	30,4	7,22	206,0	400	1173
56	P-11	Las Playitas	26,8	8,32	169,0	366	3164
	CNA-131	Florentino Rivero					
57	P-12	Poza Ramón Manriquez	30,3	8,17	-41,0	153	3101
58	P- 13	Posa Los Hundidos	30,1	7,35	185,0	379	3080
59	P-14	Poza Azul 11	32,1	7,48	195,0	387	1736
60	P-15	Los Riachuelos	32,8	8,09	60,0	251	5362
61	P-16	Tierra Blanca	31,6	7,18	190,0	251	1827
62	P-17	El Mojarral	33,2	7,30	170,0	361	1771
63	P-18	Poza XYZ	29,5	7,99	137,0	387	2303
64	CNA-161	Ampuero 6	23,7	6,83	156,0	356	2940
65	P-19	Poza Los Güeros	24,9	8,07	183,0	387	1834
66	P-20	Laguna Churince	28,9	7,70	204,0	387	1981
67	CNA-112	Beta Santa Mónica 14	32,6	6,86	88,0	387	966
68	CNA-119-B	Rancho La Ximena	27,4	7,23	51,0	247	423
69	CNA-162	Ampuero 5	24,7	7,02	130,0	329	1098
70	CNA-115 (25 m)	El Pilar	30,2	8,85	67,0	261	2625
71	CNA-115 (39 m)	El Pilar	28,7	8,23	-70,0	125	2814
72	CNA-115 (64 m)	El Pilar	28,8	7,48	112,0	307	2898
73	CNA-115 (95 m)	El Pilar	28,9	7,54	108,0	303	2877
74	CNA-129 (24 m)	Florentino Rivero	26,5	8,21	79,0	276	33726
75	CNA-129 (30 m)	Florentino Rivero	28,8	8,51	-64,0	131	33810
76	CNA-129 (40 m)	Florentino Rivero	27,2	7,90	-250,0	-53	39165
77	CNA-129 (60 m)	Florentino Rivero	27,7	8,01	-11,0	185	40796
78	CNA-129 (70 m)	Florentino Rivero	27,7	7,97	118,0	314	40208
79	CNA-129 (85m)	Florentino Rivero	26,6	8,31	104,0	301	38192
80	CNA-129 (100 m)	Florentino Rivero	26,1	8,41	160,0	358	37296
81	P-21	La Teclita	31,3	7,23	145,0	387	737
82	CNA-227	Las Carpas	27,6	7,23	207,0	403	455
83	CNA-225	Las Carpas	24,9	7,46	222,0	421	429
84	CNA-228	Las Carpas	26,4	7,26	245,0	442	449
85	CNA-229	San Vicente	26,2	7,23	233,0	430	543
86	CNA-252	Las Vegas	26,1	7,21	230,0	428	416
87	Manantial	Cueva del Venado	29,3	7,17	227,0	422	454
88	CNA -243	El Venado	30,0	6,87	181,0	375	463
89	CNA - 37	El Hundido	26,9	7,33	-397,0	-200	34587
90	CNA - 37	El Hundido	26,5	7,37	-320,0	-123	40026
91	CNA - 37	El Hundido	28,0	7,55	-107,0	89	23870
92	CNA - 37	El Hundido	27,2	7,24	-276,0	-79	57680
93	CNA - 37	El Hundido	27,4	7,06	-262,0	-66	100044
94	CNA -139 (21 m)	Florentino Rivero	28,0	7,82	122,0	318	4655
95	CNA -139 (26 m)	Florentino Rivero	27,4	7,82	102,0	298	16296
96	CNA - 139(36 m)	Florentino Rivero	27,9	7,71	118,0	314	28959
97	CNA - 139 (50 m)	Florentino Rivero	27,2	7,63	21,0	218	34790
98	CNA - 139 (66 m)	Florentino Rivero	26,3	7,61	-36,0	161	34496
99	CNA - 139 (69 m)	Florentino Rivero	26,6	7,64	-62,0	135	32928
100	Poza El Anteojo (10m)	San José del Anteojo	27,3	7,05	94,0	290	1004
101	Poza El Anteojo (17m)	San José del Anteojo	26,5	7,07	36,0	233	983
102	CNA -170 B-1 (50m)	Rancho la Ximena	24,3	7,36	182,0	381	388
103	CNA -170 B-2 (80m)	Rancho la Ximena	24,3	7,52	94,0	293	384
104	Trevertino	Nueva Atalaya					

### Continuación Tabla 6.2 Parámetros de campo medidos en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido

Continuación Tabla 6.2	Parámetros de campo medidos en los valles de
	Cuatrociénegas y El Hundido

No. Muestra	Clave CNA	Localidad	CE µS/cm	OD (%)	OD (mg/l)	Alcalinidad total (mg/l CaCO3)
1	CNA-82	El Pilar	4480	129	10,3	85,76
2	CNA-84	El Pilar	4210	66	5,3	96,48
3	CNA-83	El Pilar	4250	78	6,2	107,20
4	CNA-85	El Pilar	4380	15	1,1	105,86
5	CNA-87	El Pilar	4630	23	1,8	104,39
6	CNA-103	Beta Santa Mónica 5	1513	23	1,8	195,54
7	CNA-86	El Pilar	4090	110	9,1	96,48
8	CNA-81	El Pilar	4040	49	4,0	116,58
9	CNA104	Beta Santa Mónica No. 6	1478	26	1,9	200,33
10	CNA-102	Beta Santa Mónica 4	1569	69	5,2	213,73
11	CNA-44	Las Morenas	3960	21	1,7	103,85
12	CNA-12	Buenavista	4970	23	1,8	99,83
13	CNA-108	Beta Santa Mónica 10	1404	78	6,0	224,45
14	CNA-90	Tanque Nuevo	1626	18	1,3	230,48
15	CNA-107	Beta Santa Mónica 9	1584	93	7,0	184,92
16	CNA-106	Beta Santa Mónica 8	1471	68	5,2	204,75
17	CNA-105	Beta Santa Mónica 7	1449	53	4,2	209,04
18	CNA-23	Ej. Santa Teresa de Sofía	2460	54	4,1	172,86
19	CNA-24	Ej. Santa Teresa de Sofía	2290	58	4,4	187,60
20	CNA-27	Ej. Santa Teresa de Sofía	2260	38	2,8	176,21
21	CNA-25	Ej. Santa Teresa de Sofía	2750	67	5,3	178,49
22	CNA-133	Santa Teresa de Sofía	3670	43	3,3	133,46
23	CNA-125	Santa Teresa de Sofía	1650	-	-	192,96
24	CNA-124	Santa Teresa de Sofía	1750	36	2,4	217,08
25	CNA-003	Beta Santa Mónica 2	1517	46	3,4	169,91
26	CNA-143	Santa Teresa de Sofía	2540	19	1,3	189,74
27	CNA-41	El Campizal	4510	-	-	80,40
28	CNA-43	El Campizal	5100	-	-	89,11
29	CNA-39	El Campizal	4400	113	9,0	81,07
30	P-01	Poza Churince	2620	67	5,1	169,51
31	CNA-144	Santa Teresa de Sofía	2510	14	1,0	184,92
	CNA-145	Florentino Rivero				
32	CNA-142	Santa Teresa de Sofía	2338	20	1,4	190,82
33	CNA-100	Beta Santa Mónica 1	1736	32	2,4	167,77
34	CNA-121	Canoas	628	88	7,7	292,66
35	CNA-101	Beta Santa Mónica 3	1611	67	5,1	168,84
36	CNA-233	A.P. Nueva Atalaya	2460	-	-	180,23
37	CNA-241	Papalote Nueva Atalaya	2600	-	-	194,30
38	P-02	Poza La Becerra	2610	-	-	183,58
39	P-03	Poza Escobedo	2680	49	3,5	182,24
40	P-04	Poza Azul I	2710	67	5,2	163,48
41	CNA-216	Antiguos Mineros del Norte	1583	23	1,7	183,31
42	CNA-178	El Nogalito	1674	67	5,8	222,98
43	P-05	Poza Santa Tecla	1237	37	2,8	187,60
44	P-06	Poza Orozco	2500	66	5,2	181,57
45	P-07	Poza Azul	2640	38	2,9	178,49
46	P-08	Poza Las Tortugas	3260	58	4,9	188,67
47	CNA-186	Rancho Los Alamos	1546	61	4,8	207,03
48	CNA-199	EL Jonuco	2040	40	3,4	174,20
49	CNA-250	Papalote San Lorenzo	2530	27	2,0	216,08
50	CNA-227	Las Carpas	650	66	5,3	200,00
51	CNA-252	La Vega	575	61	5,0	219,43
52	CNA-243	El Venado	687	66	5,0	221,10
53	P-09	Rio Mezquites	2640	78	6,1	181,57

No. Muestra	Clave CNA	Localidad	CE µS/cm	OD (%)	OD (mg/l)	Alcalinidad total (mg/l CaCO3)
54	CNA-191	ETA 8	1850	77	6,6	250,92
55	P-10	San José del Anteojo	1676	77	5,6	164,82
56	P-11	Las Playitas	4520	93	7,7	95,94
	CNA-131	Florentino Rivero				
57	P-12	Poza Ramón Manriquez	4430	50	3,9	237,33
58	P- 13	Posa Los Hundidos	4400	62	4,3	262,00
59	P-14	Poza Azul 11	2480	53	3,9	169,00
60	P-15	Los Riachuelos	7660	57	4,2	148,00
61	P-16	Tierra Blanca	2610	57	2,8	189,50
62	P-17	El Mojarral	2530	52	3,8	171,50
63	P-18	Poza XYZ	3290	86	6,7	142,00
64	CNA-161	Ampuero 6	4200	79	6,8	259,00
65	P-19	Poza Los Güeros	2620	59	4,9	151,00
66	P-20	Laguna Churince	2830	72	5,6	137,50
67	CNA-112	Beta Santa Mónica 14	1380	33	2,5	236,67
68	CNA-119-B	Rancho La Ximena	604	16	1,2	224,00
69	CNA-162	Ampuero 5	1569	58	4,8	228,50
70	CNA-115 (25 m)	El Pilar	3750	30	2,1	30,50
71	CNA-115 (39 m)	El Pilar	4020	34	2,5	56,50
72	CNA-115 (64 m)	El Pilar	4140	32	2,5	80,00
73	CNA-115 (95 m)	El Pilar	4110	29	2,1	80,00
74	CNA-129 (24 m)	Florentino Rivero	48180	38	2,7	87,33
75	CNA-129 (30 m)	Florentino Rivero	48300	29	2,3	83,33
76	CNA-129 (40 m)	Florentino Rivero	55950	75	5,1	113,33
77	CNA-129 (60 m)	Florentino Rivero	58280	25	1,8	175,33
78	CNA-129 (70 m)	Florentino Rivero	57440	25	2,0	178,67
79	CNA-129 (85m)	Florentino Rivero	54560	21	1,7	184,67
80	CNA-129 (100 m)	Florentino Rivero	53280	42	3,4	170,00
81	P-21	La Teclita	1053	59	4,4	198,00
82	CNA-227	Las Carpas	650	61	61,0	208,67
83	CNA-225	Las Carpas	613	75	5,9	212,67
84	CNA-228	Las Carpas	641	65	5,4	213,33
85	CNA-229	San Vicente	775	68	5,5	205,33
86	CNA-252	Las Vegas	594	57	4,7	216,67
87	Manantial	Cueva del Venado	648	70	5,6	201,33
88	CNA -243	El Venado	661	57	4,4	213,33
89	CNA - 37	El Hundido	49410	57	0,5	1705,28
90	CNA - 37	El Hundido	57180	13	1,0	938,10
91	CNA - 37	El Hundido	34100	30	2,2	240,49
92	CNA - 37	El Hundido	82400	16	1,1	502,84
93	CNA - 37	El Hundido	142920	19	1,2	693,64
94	CNA -139 (21 m)	Florentino Rivero	6650	36	26,0	88,44
95	CNA -139 (26 m)	Florentino Rivero	23280	38	2,8	111,80
96	CNA - 139(36 m)	Florentino Rivero	41370	40	2,9	160,24
97	CNA - 139 (50 m)	Florentino Rivero	49700	31	2,2	169,93
98	CNA - 139 (66 m)	Florentino Rivero	49280	32	2,4	182,60
99	CNA - 139 (69 m)	Florentino Rivero	47040	31	2,3	190,05
100	Poza El Anteojo (10m)	San José del Anteojo	1434	55	4,1	178,88
101	Poza El Anteojo (17m)	San José del Anteojo	1404	53	4,0	173,66
102	CNA -170 B-1 (50m)	Rancho la Ximena	554	73	5,6	250,43
103	CNA -170 B-2 (80m)	Rancho la Ximena	548	60	4,5	257,38
104	Trevertino	Nueva Atalaya				

### Continuación Tabla 6.2 Parámetros de campo medidos en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido

# 6.3. Muestreo para el análisis químico (iones mayoritarios, metales, parámetros traza, etc.) e isotópico

La composición química del agua subterránea dentro del área de estudio se investigó por medio de dos etapas de muestreo. La primera de ellas se llevó a cabo durante los meses de abril y mayo del 2004 e incluyó la colecta de 56 muestras, que incluyeron agua subterránea extraída a partir de pozos y norias, además de descargas naturales (pozas).

La segunda etapa consistió en la toma de 47 muestras de agua subterránea de los cuales tres fueron de verificación en sitios visitados durante la primera etapa, (CNA-243, CNA-227, CNA-252). Esta se realizó durante la última semana de julio y el mes de agosto del 2004 e incluyó al igual que en la primera etapa agua subterránea extraída de pozos, norias y manantiales, además de muestras de agua colectadas a diferentes profundidades en pozos inactivos y en un manantial (poza anteojo); en la tabla 6.3 se presentan los sitios y número de muestras que se tomaron en cada uno de los aprovechamientos inactivos.

Sitio	Número de muestras
CNA-115	4
CNA-129	6
CNA-139	6
CNA-37	5
Poza Anteojo	2
CNA-170B	2
CNA-4	
CNA-100	
CNA-102	
CNA-110	
Total	25

## Tabla 6.3Sitios donde se tomaron muestras a diferentes<br/>profundidades

Con fines de clasificación en lo que a hidrogeoquímica se refiere, el área de interés se ha dividido desde el punto de vista geográfico en tres regiones: i) El Pilar, ii) El Hundido y iii) Cuatrociénegas. En la tabla 6.4 se presenta el número de muestras colectada en cada una de estas regiones y la cantidad y tipo de aprovechamientos visitados. Finalmente en la tabla 6.5 se presenta una sinopsis general con el número y tipo de aprovechamientos visitados para toma de muestras.

Cuando se realizó el recorrido de campo para la identificación y verificación de las instalaciones de los aprovechamientos de agua subterránea seleccionados para la toma de muestras de agua; se prefirieron los que presentaron las mayores facilidades para adaptar correctamente el equipo de medición de parámetros de

campo. La selección definitiva de los aprovechamientos donde se tomaron las muestras de agua subterránea consideró aquellos puntos donde los propietarios dieron las facilidades de acceso permitiendo la entrada a sus ranchos y que además en el momento de la visita se encontraban en condiciones normales de operación (equipo de bombeo instalado y en condiciones de operación, figura 6.10).

Tabla 6.4	Desglose de sitios donde se tomaron las muestras de agua
-----------	--

Región	Muestras	Sitios donde se tomaron las muestras
El Pilar	17	13 pozos activos, 1 inactivo, 1 noria
Hundido	40	26 pozos activos, 3 inactivos
Cuatrociénegas	46	25 manantiales, 1 río, 15 pozos 1 noria, 1 inactivo
Total	103	

Tabla 6.5	Tipo y número de aprovechamientos visitados para toma de
	muestras

Sitio	Cantidad
Pozo	53
Norias	2
Nonas	-
Pozas y manantiales	24
Ríos	1
Total de sitios diferentes muestreados	80

Cuando en el momento de la visita, por alguna razón el aprovechamiento no se encontraba extrayendo agua, se procedió a encender el dispositivo que transmitía energía a la bomba para la extracción del agua. En algunos casos éste consistió de un motor eléctrico, pero en otras se trataba de bombas de desplazamiento positivo accionadas por la fuerza del viento, por lo que en ausencia de corrientes de aire fue necesario impulsarlos manualmente. Para el caso de los pozos que se encuentran inactivos y sin equipo de bombeo instalado se procedió a introducir una botella muestreadora a la profundidad seleccionada para tomar la muestra de agua subterránea (figuras 6.11 y 6.12).

Durante el período de tiempo que transcurre entre la colecta de la muestra de agua subterránea y la realización del análisis físico y químico respectivo, en ocasiones se pueden presentar modificaciones en las concentraciones originales, por lo que es indispensable aplicar técnicas de conservación y/o estabilización de la muestra. En este caso particular, para el caso de aniones y metales en solución la porción de interés en la muestra de agua subterránea consistió en algunos solutos presentes como iones libres, complejos y coloides, y para el caso de isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio) y radiactivos (tritio) interesaba la molécula de agua, por lo que otros tipos de substancias (partículas en suspensión, bacterias) debieron eliminarse del agua.



Figura 6.10 Pozo en operación seleccionado para toma de muestras de agua subterránea



Figura 6.11 Toma de muestras de agua subterránea en pozos inactivos sin equipo de bombeo instalado



Figura 6.12 Toma de muestras de agua subterránea en pozos inactivos sin equipo de bombeo instalado

De este modo, la preservación de la muestra que se tomó para metales (mayores y traza), algunos elementos no metálicos de transición y de tierras raras incluyó filtrarla, haciéndola pasar por una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0.45  $\mu$ micras (figura 6.13).



Figura 6.13 Filtro utilizado para eliminar partículas en suspensión de la muestra de agua subterránea, observar la presencia de hidróxidos de hierro en el filtro

Con este proceso es posible remover la mayoría de las bacterias, las partículas suspendidas, y una buena porción de hidróxidos de hierro y manganeso coloidales (figuras 6.13 y 6.14). La remoción de los materiales señalados es importante por que se encuentran en suspensión y la porción que interesa investigar es la disuelta. Si se incorporan en la muestra dichas partículas en suspensión, se propician reacciones con la muestra, situación que puede ocasionar cambios en la concentración original de algunas de las especies disueltas. Además, muchos de estos materiales en suspensión probablemente son incorporados durante la entrada de agua al pozo, por lo que se deben de eliminar de la muestra. En la figura 6.15 se presenta el procedimiento de filtrado de la muestra. Adicionalmente, se agregó ácido nítrico (ultra puro) para disminuir el pH a menos de 2 unidades y mantener en solución los solutos de interés hasta el momento de análisis en laboratorio (figura 6.16).



### Figura 6.14 Tamaños de los solutos y de las partículas suspendidas en aguas subterráneas (adaptado de Edmunds, 1981)

Adicionalmente, para evitar totalmente la contaminación de la muestra que pudiera presentarse a partir de substancias pre-existentes en el frasco donde se colectaría, se utilizaron frascos de polietileno (prelavados en laboratorio con una solución de ácido clorhídrico y agua destilada) con tapa y contratapa. En una botella de medio litro de capacidad, se tomó la muestra sin filtrar y con ningún conservador para análisis de bicarbonato, carbonato, cloruro, sulfato, turbidez y color. Se evitó la permanencia de burbujas en el seno del líquido para limitar modificaciones en las concentraciones originales de la muestra. Una vez filtrada y acidificada, la muestra para metales (mayores y traza), coloides (sílice), algunos

elementos no metálicos, de transición y de tierras raras se colectó en una botella de 60 ml de capacidad. La muestra para la determinación de nitrato se tomó en un frasco de 100 ml añadiendo ácido sulfúrico como agente para limitar que la acción bacteriana en el frasco pudiera modificar las concentraciones de nitrato.

En el anexo 6 de Hidrogeoquímica se presentan en forma detallada, además de la totalidad de información recabada en campo, las capacidades, tipos de envase, preservadores utilizados, para cada una de los tipos de muestras que se colectaron en cada uno de los sitios visitados (figura 6.17). Además de estos frascos que incluyen muestras para química e isótopos estables (oxígeno-18, deuterio, azufre 34, carbono 13) e isótopos radiactivos (tritio), se realizó en campo la precipitación del carbono inorgánico para la medición de la concentración de carbono 14 en muestras seleccionadas.



Figura 6.15 Procedimiento de filtrado de la muestra de agua

Inmediatamente después de la colecta, todos los frascos utilizados para la colecta de la muestra de agua, se colocaron en recipientes aislantes especiales con hielo en su interior, manteniendo su temperatura alrededor de los 4°C hasta el momento de su análisis en laboratorio.



Figura 6.16 Adición de ácido nítrico a la muestra de agua filtrada para metales mayores y elementos traza



Figura 6.17 Muestras colectadas en cada uno de los sitios visitados

#### 6.4. Análisis químicos y fisicoquímicos de muestras de agua en laboratorio

Una vez empacadas las muestras del sitio de campo, se enviaron del sitio de trabajo a las oficinas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Una vez verificada la integridad de los diferentes frascos y que se definía que el número de muestras enviadas coincidía con el reportado en la hoja de custodia, se procedía a iniciar los análisis correspondientes que se iban a realizar en los laboratorios del IMTA y a enviar a los laboratorios correspondientes las muestras restantes.

Para el caso del primer muestreo, los metales mayoritarios (Na, Ca, K, Mg) se analizaron en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Universidad Autónoma de muestras filtradas y acidificadas por San Luis Potosí. el método espectrofotométrico de absorción atómica (NOM-AA-51-1981). El equipo utilizado consistió de una fuente de luz que emite el espectro de línea de un elemento (lámparas de cátodo hueco para cada uno de los elementos a cuantificar) y una flama para atomizar la muestra, un monocromador para aislar la línea de resonancia a una longitud de onda determinada y un detector fotoeléctrico con equipo de amplificación y medición electrónica. Este método se basa en la medición de la cantidad de luz monocromática absorbida por el elemento atomizado a determinarse en una flama, por medio de un detector, siendo dicha energía absorbida proporcional a la concentración del elemento. De acuerdo con el metal a analizar se utiliza una lámpara específica, además de ligeras modificaciones y tratamiento específico.

Los aniones mayoritarios se analizaron también en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Por ejemplo, en muestras a las que no se añadió ningún conservador, se llevó a cabo la determinación de la concentración de sulfato que se realizó mediante el método turbidimétrico, método que se basa en la precipitación de los sulfatos con base en la adición de cloruro de bario a la muestra.

La absorbancia de la suspensión de sulfato de bario se mide con un turbidímetro y la concentración de sulfato se determina por comparación con una curva estándar (Armienta *et al.* 1987). El cloruro se analizó por medio del método argentométrico con titulación con nitrato de plata. La determinación del nitrato se realizó con el método espectrofotométrico utilizando ácido fenoldisulfónico, como la muestra se preservó con ácido sulfúrico, previo a la determinación se llevó su pH a neutralidad. La alcalinidad de laboratorio se registró mediante titulación colorimétrica utilizando anaranjado de metilo y verde de bromocresol como indicadores de los puntos de equivalencia.

La determinación elementos traza (metales, no metales, de elementos de transición y tierras raras) además del sílice se llevó a cabo por medio de un Espectrómetro de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS, por sus siglas en inglés). Estas determinaciones se realizaron en una empresa

denominada Activation Laboratories Ltd. especializada en la realización de este tipo análisis químicos con sede en Ontario, Canadá; (ACTLABS).

Este método de análisis se basa en dos principios fundamentales: *i*) ionización, en donde por la temperatura alcanzada por el plasma (argón parcialmente ionizado sobre una antorcha de cuarzo, llegando a 6000-10000°K) se logra la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo, produciéndose un ion con carga positiva mas un electrón, *ii*) detección, en el Espectrómetro de Masas los iones positivos son separados por un filtro de masas (diferencias de la trayectoria de los iones en un campo eléctrico), produciéndose una señal eléctrica, que es proporcional a la cantidad de iones que salen del filtro de masas.

Los límites de detección logrados con este equipo para muchos elementos minoritarios (traza) son muy bajos (menores a 0.001 mg/l), por lo que es muy recomendado para determinaciones de especies disueltas en agua. En la Tabla 6.6 se presenta para cada una los elementos de interés, los límites de detección que se obtienen con esta metodología. Cuando por la salinidad que presentan las muestras es necesario diluirlas, el límite de detección se incrementa en un factor relacionado con el factor de dilución. Para el caso del Na, Mg y Ca especialmente, los valores determinados por este método y que se reportan en las diferentes tablas dentro de este estudio son básicamente cualitativos, ya que cuando sobrepasan una cierta concentración (25 mg/l aproximadamente), el método de ICP-MS disminuye notablemente su precisión y exactitud. Como se estableció previamente, esto se solucionó analizado estos elementos en la Universidad de San Luis Potosí por medio del método espectrofotométrico de absorción atómica.

Para el segundo muestreo, la totalidad de las muestras se enviaron Activation Laboratories Ltd., para el caso de aniones mayoritarios (CI, SO<sub>4</sub>) y algunos menores (NO<sub>3</sub>) y traza (F, PO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, Br) el análisis se llevó a cabo en muestras filtradas a las que no se añadió preservador, utilizando el método de cromatografía de iones. Para cationes mayores (Na, Ca, Mg) y menores (K, Sr) cuya concentración no fue posible determinarla mediante el método con ICP-MS, se utilizó un espectrómetro óptico de emisión con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES, por sus siglas en inglés). Finalmente, la determinación elementos traza (metales, no metales, de elementos de transición y tierras raras) además del sílice se llevó a cabo por el mismo método utilizado en el primer muestreo.

El control de calidad de los resultados analíticos se llevó a cabo analizando muestras por duplicado y analizando al mismo tiempo que las muestras estándares internacionales como el SLRS-4, NIST 1640.

	Límite de		Límite de
Elemento	detección	Elemento	detección
	μ <b>g</b> /l		μg/l
Li	1	In	0.001
Be	0.1	Sn	0.1
В	3	Sb	0.01
Na	5	Те	0.1
Mg	2	I	1
AI	2	Cs	0.001
Si	200	Ва	0.1
K	30	La	0.001
Ca	700	Ce	0.001
Sc	1	Pr	0.001
Ti	0.1	Nd	0.001
V	0.1	Sm	0.001
Cr	0.5	Eu	0.001
Mn	0.1	Gd	0.001
Fe	10	Tb	0.001
Co	0.005	Dy	0.001
Ni	0.3	Ho	0.001
Cu	0.2	Er	0.001
Zn	0.5	Tm	0.001
Ga	0.01	Yb	0.001
Ge	0.01	Lu	0.001
As	0.03	Hf	0.001
Se	0.2	Та	0.001
Br	3	W	0.02
Rb	0.005	Re	0.001
Sr	0.04	Os	0.002
Y	0.003	Pt	0.3
Zr	0.01	Au	0.002
Nb	0.005	Hg	0.2
Мо	0.1	TI	0.001
Ru	0.01	Pb	0.01
Pd	0.01	Bi	0.3
Ag	0.2	Th	0.001
Cd	0.01	U	0.002

# Tabla 6.6Límites de detección del Espectrómetro de Masas con<br/>Plasma de Acoplamiento Inductivo

#### 6.5. Análisis isotópicos de muestras de agua en laboratorio

#### 6.5.1 Isótopos estables

Como es sabido, el hidrógeno natural está formado por mezclas de sus isótopos  ${}^{1}\text{H}_{2}$  (protio),  ${}^{2}\text{H}$  (deuterio) y  ${}^{3}\text{H}$  (tritio) y el oxígeno por  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$  y  ${}^{18}\text{O}$ . En la naturaleza el  ${}^{1}\text{H}_{2}$  y  ${}^{16}\text{O}$  son los componentes mayoritarios, de forma que la especie molecular más abundante del agua es la que corresponde a la combinación de  ${}^{1}\text{H}_{2}$   ${}^{16}\text{O}$ . Pero, además de esta especie molecular existen otras más pesadas que incorporan un átomo de  ${}^{2}\text{H}$  (también se denota con la letra D), de  ${}^{18}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$ , u otras

combinaciones de estos isótopos. Las moléculas con <sup>17</sup>O ó las que incorporan dos componentes minoritarios no son de interés para la hidrología por encontrarse en proporción despreciable en comparación con las moléculas <sup>2</sup>H<sup>1</sup>H<sup>16</sup>O y <sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>18</sup>O.

Las proporciones medias de las tres especies moleculares de interés hidrológico, en el agua del mar son:

 ${}^{1}\text{H}_{2} \, {}^{16}\text{O}: \qquad 997 \, 680 \text{ partes por millón} \\ {}^{1}\text{H} \, {}^{2}\text{H}^{16}\text{O}: \qquad 320 \text{ partes por millón} \\ {}^{1}\text{H}_{2} \, {}^{18}\text{O}: \qquad 2 \, 000 \text{ partes por millón} \\ \end{array}$ 

Con el fin de expresar en forma precisa la composición isotópica de cualquier muestra de agua, fue preciso definir un patrón de agua que sirviera de referencia para los distintos laboratorios dedicados a la medición del contenido isotópico de muestras de agua natural. Para ello, se preparó el llamado "patrón medio de agua de mar" conocido como *SMOW* (por sus siglas en inglés, correspondientes a *Standard Mean Ocean Water*). La primera versión fue originalmente preparada por H. Craig a partir de muestras de diferentes océanos, tomadas a profundidades comprendidas entre 500 y 2000 m (Craig, 1961).

Este patrón de referencia ha sido reproducido posteriormente, de manera regular, por el Organismo Internacional de Energía Atómica. El patrón actual utilizado se denomina VSMW (por sus siglas en inglés de *Vienna Standard Mean Ocean Water*).

Las variaciones isotópicas para oxígeno o deuterio, con respecto al patrón VSMOW, se expresan como desviaciones en por mil (‰), mediante la expresión:

$$\delta \quad (\%) = \frac{\mathsf{R}_{\mathsf{muestra}} - \mathsf{R}_{\mathsf{VSMOW}}}{\mathsf{R}_{\mathsf{VSMOW}}} \mathbf{x} \quad \mathbf{10}^3$$

En donde R está definida por la expresión

$$R = \frac{N\acute{u}m. \text{ de moléculas del tipo } ^{1}H ^{2}H ^{16}O(\acute{o} ^{1}H_{2} ^{18}O)}{N\acute{u}m. \text{ de moléculas del tipo } ^{1}H_{2} ^{16}O}$$

El valor de  $\delta$  puede ser positivo o negativo, dependiendo de si la muestra está más enriquecida o empobrecida que el VSMOW. Una  $\delta$  positiva indica, por tanto, mayor concentración que el VSMOW en el isótopo pesado correspondiente (<sup>18</sup>O ó <sup>2</sup>H).

La desviación  $\delta$  en las aguas meteóricas varía entre límites amplios debido a diferentes causas. Una es el fraccionamiento producido durante los cambios de fase, el cual es motivado por la diferencia de presión de vapor de las tres especies moleculares. Si designamos por p a esta presión de vapor, se cumple:

$$P(^{1}H_{2}^{16}O) > P(^{1}H_{2}^{18}O) > P(^{1}H^{2}H^{16}O)$$

La presión de vapor determina la velocidad de evaporación o de condensación del agua. Por tanto las moléculas ligeras (<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>16</sup>O), que tienen mayor presión de vapor, se evaporan más rápido y se condensan más lentamente que las moléculas pesadas, es decir, presentan una tendencia mayor a permanecer en la fase de vapor durante el cambio de fase.

Durante la lluvia, las precipitaciones producidas tienen una composición isotópica lineal, que sigue cuya ecuación es:

$$\delta^2 H = 8\delta^{18} O + 10$$

Esta ecuación es válida para todas las aguas meteóricas que se precipitan sobre la superficie de la tierra a nivel global. La ordenada en el origen de valor 10 en la ecuación anterior se denomina exceso de deuterio.

La composición isotópica de las precipitaciones que ocurren sobre los continentes depende de la historia del agua, que se inicia en el momento de salir del mar y termina cuando se colecta la muestra. A medida que la nube avanza, va perdiendo agua por condensaciones sucesivas hasta que el frente nuboso pierde su actividad. Puesto que las moléculas pesadas <sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>16</sup>O y <sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>18</sup>O condensan de forma preferente, la nube se va empobreciendo en estas dos especies moleculares. Esto hace que las precipitaciones tengan valores más negativos a medida que se alejan de la fuente de producción de vapor.

Los océanos son las fuentes de producción de humedad, por lo cual, la precipitación pluvial en las planicies costeras no difiere sustancialmente de la precipitación oceánica, pero a medida que la humedad es transportada hacia los continentes, se produce un empobrecimiento de los isótopos pesados.

Otro factor muy importante que influye en la composición isotópica de las precipitaciones de áreas montañosas, es el llamado efecto de altitud, derivado de la mayor velocidad de difusión de las moléculas ligeras en la atmósfera durante el desarrollo vertical de las nubes y del aumento de la condensación del vapor de agua a medida que disminuye la temperatura. El resultado es que las precipitaciones de cotas más elevadas son más negativas o están más empobrecidas en isótopos pesados. Para la  $\delta^{18}$ O el empobrecimiento varía entre - 0.15 y -0.5 ‰ y para la  $\delta^{2}$ H entre -1 y -4 ‰ por cada 100 m de diferencia de altitud.

A pesar de los factores indicados, las precipitaciones de cualquier punto del globo tienen una composición anual media característica, que se repite año tras año con variaciones muy pequeñas. La determinación analítica del contenido isotópico de deuterio y oxígeno-18 en una muestra de agua, se realiza mediante espectrometría de masas. Este método instrumental permite determinar las abundancias relativas de las especies isotópicas constitutivas del agua: hidrógeno (<sup>1</sup>H, <sup>2</sup>H) y oxígeno (<sup>16</sup>O, <sup>18</sup>O). En un procedimiento típico de análisis, la muestra bajo investigación es ionizada y los iones, después de ser acelerados en un campo eléctrico, penetran en un campo magnético normal describiendo trayectorias circulares, cuyos radios dependen de la masa de los iones. Los núclidos de masas diferentes emergen del campo magnético e inciden en colectores especiales que permiten su medición separada, con lo cual es posible medir su abundancia relativa en función de un estándar de referencia (SMOW, PDB, VSMOW, etc.,). El error experimental de medición es menor de 0.1 ‰ para el oxígeno y de 1 ‰ para el hidrógeno (figura 6.18).



Figura 6.18 Técnica analítica para la determinación de los isótopos estables  $^2H$ ,  $^{18}Oy^{13}C$ 

#### 6.5.2 Tritio ambiental

El tritio (<sup>3</sup>H) es un isótopo radioactivo del hidrógeno con número de masa 3 (dos protones y un neutrón en el núcleo) que se desintegra por emisión de partículas beta de una energía máxima de 18 KeV, con un período de semidesintegración de 12.33 años.

La presencia del tritio en las precipitaciones se debe a las siguientes causas:

- Emisión directa por el sol a razón de 0.12 átomos/s/cm de superficie solar.
- Reacciones nucleares producidas en la afta atmósfera por interacción de los rayos cósmicos con el nitrógeno y otros gases, variando la velocidad de producción entre 1 y 1 .5 átomos/s/cm de superficie terrestre.
- Explosiones termonucleares (reacciones de fusión de bombas de hidrógeno) producidas en la atmósfera entre 1952 y 1963.

Las dos primeras fuentes de producción de este isótopo han actuado permanentemente (origen cosmogénico), produciendo concentraciones medias en las precipitaciones comprendidas entre 2 y 10 unidades de tritio, dependiendo del lugar. La unidad de tritio (TU por sus siglas en inglés de *Tritium Unity*) corresponde a un átomo de tritio por cada  $10^{18}$  átomos de hidrógeno presentes (<sup>3</sup>H/<sup>1</sup>H =  $10^{-18}$ ) y equivale a  $3.2 \times 10^{-3}$  microcurios/m<sup>3</sup> de agua.

El tritio liberado en la atmósfera en forma de hidrógeno da lugar a la formación de moléculas de agua del tipo <sup>3</sup>H<sup>1</sup>H<sup>16</sup>O, y se incorpora como tal al ciclo hidrológico. Cuando una masa de agua queda aislada en el subsuelo, después de su infiltración, su concentración de tritio disminuye de acuerdo con el período de semidesintegración de este isótopo. Debido a este proceso de desintegración natural, las concentraciones de tritio en aguas infiltradas con anterioridad a 1952 son difícilmente detectables en la actualidad y, de forma inversa, la presencia de tritio indica infiltración o recarga reciente.

Durante el período 1952-1981, la concentración de tritio en las precipitaciones de cualquier punto del globo ha variado dentro de límites muy amplios. Esta variación ha sido motivada, principal mente, por las causas siguientes:

- Frecuencia e intensidad de las explosiones termonucleares, representadas por el número de megatones detonados durante cada año. Estos factores determinaron la aparición de picos de concentración en 1954, 1959, y sobre todo, en 1963, siendo este último derivado del elevado número de ensayos realizados en 1961 y 1962.
- Lugar de realización de los ensayos, que en su mayor parte, corresponden al hemisferio norte. Por esta razón las concentraciones producidas en este hemisferio fueron muy superiores a las del hemisferio sur.
- Oscilaciones estacionales como consecuencia de los flujos existentes en la estratósfera, donde se almacena la mayor parte del tritio liberado, mezclado en la tropósfera, de donde es arrastrado por las precipitaciones. En el hemisferio norte estos fenómenos se traducen en la aparición de un pico de mayor concentración durante los meses de mayo o junio y otro de menor concentración en diciembre o enero; el primero es 1.4 veces mayor que la concentración media anual y el segundo, unas 0.4 veces inferior a dicha concentración.

Aparte de los efectos indicados, hay otros factores que influyen en la concentración de tritio en las precipitaciones, tales como la latitud (la concentración aumenta con ésta) y el grado de continentalidad (mayor concentración al aumentar la distancia al mar). En las zonas costeras se produce un intercambio entre el vapor de agua local procedente del mar y agua de los frentes nubosos haciendo que la concentración disminuya. Esto es consecuencia de que la concentración en el agua de mar es muy baja (10 o más veces menor que en las precipitaciones locales).

En la actualidad el hemisferio norte tiene concentraciones de tritio mucho mayores que los valores correspondientes al hemisferio sur.

La técnica de medición de tritio ambiental en muestras de agua subterránea en el laboratorio de hidrología isotópica del IMTA es mediante enriquecimiento electrolítico y conteo por centelleo líquido. La técnica se ilustra en forma resumida en la figura 6.19.



# Figura 6.19 Procedimiento analítico empleado en el IMTA para la medición de tritio ambiental

#### 6.5.3 Carbono 14

El carbono-14 es un isótopo radiactivo del carbono que tiene una vida media de 5 730 años y se desintegra por radiación beta con una energía máxima de 156 keV. Las concentraciones de carbono-14 ambiental se expresan como el porcentaje de carbono-14 moderno, cuyo valor es referido a 1950 y es igual al 95% de la concentración de carbono radiactivo del ácido oxálico del estándar de la Oficina Nacional de Pesas y Medidas de USA (NBS).

El carbono-14 se genera de forma continua en la alta atmósfera debido a la interacción de neutrones, liberados por la radiación cósmica, con átomos de nitrógeno, de acuerdo con la reacción:

 $^{14}N + n \rightarrow ^{14}C + p$ 

$$n = neutrón; p = protón$$

La mayor parte del <sup>14</sup> *C* se produce a una altura media de 1 600 metros sobre el nivel del mar y llega a la superficie terrestre en forma de  $CO_2$ . Entrando a formar parte del ciclo biológico del carbono, distribuyéndose entre la atmósfera y todos los seres vivos. El carbono-14 también ha sido añadido a la atmósfera, desde 1952, como un resultado de las pruebas nucleares.

El tiempo medio de permanencia del <sup>14</sup>*C* en la atmósfera es inferior a 5 años y su intercambio con el de los seres vivos es muy rápido. Debido a esta renovación tan rápida del <sup>14</sup>*C* en comparación con su vida promedio (5 730/ln2 = 8 267 años), la actividad especifica del mismo en la atmósfera y en todos los seres vivos que participan en el ciclo biológico, se mantiene constante para cualquier lugar de la Tierra. (Olson, 1968). Dicha actividad tiene un valor medio de 13.56±0.07 desintegraciones por minuto por gramo de carbono.

Cuando el carbono queda aislado del ciclo biológico por la muerte del ser vivo, en el caso del agua, por infiltración de ésta, su actividad específica disminuye en función del tiempo, de acuerdo con la ley exponencial de desintegración radiactiva dada por la ecuación siguiente:

$$A_t = A_o e^{-\lambda t}$$
, o bien  $A_t = A_o e^{-t^* \ln 2/t_{1/2}}$ 

Donde:

$$A_t$$
 = actividad al cabo del tiempo t

$$A_a$$
 = actividad inicial

 $\lambda$  = constante de desintegración

 $t_{1/2}$  = vida media

Teniendo en cuenta el valor de la vida media indicado anteriormente para el carbono, la edad t de una determinada muestra se calcula por la siguiente expresión:

$$t = 8267 * \ln A_o / A_t \tag{6.1}$$

La actividad inicial  $A_o$  se obtiene a través del patrón universal de ácido oxálico preparado con carbono de 1950, exento de *C* de origen termonuclear. La actividad  $A_i$  se expresa como el tanto por ciento de la correspondiente al patrón  $A_o$  y la expresión anterior queda de la forma:

$$t = 8267 \ln 100 / pcm$$

donde *pcm* corresponde al tanto por ciento de actividad de la muestra respecto al patrón de carbono moderno.

Cuando el carbono de la muestra permanece inalterado durante el período transcurrido desde su aislamiento del ciclo biológico, hasta el momento de realizar la toma de la muestra, la ecuación (6.1) conduce a buenos resultados. Esto ocurre con frecuencia en el caso seres vivos, sobre todo cuando se trata de carbono orgánico. Por lo que toca al agua, la datación se realiza a partir del carbono-14 asociado con las especies carbonatadas del agua ( $CO_2$  e ión bicarbonato).

Inicialmente el <sup>14</sup>*C* llega al agua por disolución del  $CO_2$  moderno durante la precipitación y sobre todo durante el proceso de infiltración. La presión parcial de  $CO_2$  en la atmósfera es del orden de  $10^{-3.5}$  atm, mientras que en la capa superficial del suelo es de 10 a 100 veces mayor, ( $10^{-2}$  atm). Esto se debe al  $CO_2$  aportado por las plantas en su proceso respiratorio y la descomposición de sus restos. Por tanto, la mayor parte del  $CO_2$  arrastrado por el agua durante su infiltración procede de esta capa superficial (carbono biogénico).

En el agua subterránea el carbono se encuentra presente en forma de bióxido de carbono disuelto, bicarbonato e ión carbonato. De acuerdo con el valor de pH más usual de las aguas subterráneas la forma de ión carbonato rara vez se encuentra de manera natural; por lo cual la atención se centra en el ión bicarbonato y el bióxido de carbono.

Cuando el agua se precipita sobre la superficie del terreno, contiene bióxido de carbono disuelto, el cual a su vez forma ácido carbónico. Sin embargo, el agua en contacto directo con la atmósfera no puede disolver más de 1.2 mmoles de  $HCO_3/l$ . No obstante, es común encontrar valores superiores en el agua subterránea. Esto se debe al hecho de que durante el proceso de percolación, el agua de lluvia al atravesar la zona de aereación, absorbe el bióxido de carbono de origen biogénico hidrolizado en forma de iones carbonato y bicarbonato.

Como se sabe, el agua con exceso de  $CO_2$  disuelto es químicamente activa y reacciona con los carbonatos existentes en el medio sólido de acuerdo con el proceso:

$$CO_3Ca + {}^{14}CO_2 + H_2O = ({}^{14}CO_3H^- + CO^3H^-) + Ca^{++}$$
 (6.2)

Los carbonatos del medio son de formación muy antigua y, salvo casos excepcionales, están exentos de <sup>14</sup>*C*. Por tanto, al producirse esta aportación de carbono antiguo, disminuye la actividad específica del carbono total. De acuerdo con el proceso anterior, todo el carbono existente en forma de  $CO_2$  y la mitad del que está en forma de bicarbonato serían del tipo biogénico, es decir, aportado por el agua durante su infiltración.

Por tanto, con un análisis químico simple del agua bastaría para determinar un factor de corrección de la edad, por efecto del aporte de carbono antiguo procedente del medio. Pero el proceso es todavía más complicado. Una vez que se alcanza el equilibrio definido por la ecuación (6.2) dentro de la zona no

saturada, se tiene un sistema, formado por agua que contiene  $CO_2$  y  $CO_3H$  en equilibrio, en contacto con una fase gaseosa que contiene  $CO_2$  moderno. En tales condiciones, se produce un intercambio isotópico entre dicho  $CO_2$  y las especies carbonatadas del agua, del tipo siguiente:

$$CO_{3}H^{-} + {}^{14}CO_{2} - {}^{14}CO_{3}H^{-} + CO_{2}$$

La constante de equilibrio de este intercambio depende de la presión parcial de  $CO_2$  en la zona no saturada y de la temperatura. Su resultado es un aumento de la actividad específica del <sup>14</sup>C en el carbono total del agua.

Aparte de los procesos anteriores, hay otras reacciones químicas que pueden producirse en el subsuelo y que pueden alterar la actividad específica del carbono-14 del agua. Estas son las siguientes: Meteorización de silicatos, reducción de sulfatos por metano, oxidación de restos de plantas intercambio isotópico, precipitación de carbonatos y aporte de  $CO_2$  de origen volcánico. Una descripción exhaustiva de estos procesos se puede encontrar en: González, H. L, 1992; Fritz, P. J.Ch, Fontes, 1980; Clark, I, 1997.

La determinación del contenido de  ${}^{14}C$  en muestras de agua natural requiere previamente de la precipitación en campo de las especies carbonatadas disueltas en el agua. Para ello es indispensable realizar una estimación *in situ* del contenido de carbonatos y bicarbonatos de la muestra en cuestión, lo cual permite estimar el volumen de agua necesario para la recolección de cuando menos 2.5 gramos de carbono para la datación de la muestra.

El método utilizado en el laboratorio de hidrología isotópica del IMTA para la obtención del carbono es el de la síntesis del benceno. Esta técnica permite obtener, a través de diversas reacciones químicas, a alta temperatura y vacío, carbono en forma de benceno líquido, el cual, mezclado con un centelleador y estandarizado con benceno muerto, permite medir por centelleo líquido el porcentaje de carbono moderno presente en la muestra de agua. Los detalles del método se muestran en la figura 6.20.



# Figura 6.20 Procedimiento analítico empleado en el IMTA para la medición del carbono 14

#### 6.6. Interpretación

#### 6.6.1 Geoquímica

Las reacciones naturales de interacción entre el agua subterránea y los minerales que componen el medio geológico por donde circula el agua subterránea en la región Hundido-Cuatrociénegas producen, a lo largo de la dirección de flujo subterráneo, una gran diversidad de concentraciones que originan efectos en la calidad del agua; por ejemplo en propiedades como la dureza total y la salinidad. Como se mencionó previamente, en ocasiones estas reacciones naturales producen agua de mala calidad natural. Adicionalmente a estas reacciones naturales y de concentración por efectos de la evaporación en esta árida región, en algunas ocasiones se presentan efectos (impactos) relacionados con las actividades antropogénicas. Existen diversas fuentes potenciales de contaminación en la región interés, que en mayor o menor medida pueden producir modificaciones en la calidad original (fondo geoquímico) del agua subterránea.

En el anexo 7 de resultados fisicoquímicos se reportan los resultados de los análisis físicos y químicos de las muestras de agua subterránea colectadas en la región de El Hundido-Cuatrociénegas. En la figura 6.21 se presenta la distribución de los puntos donde se tomaron las muestras de agua subterránea de acuerdo con esta clasificación. Adicionalmente, en la figura 6.22 se reporta la misma distribución de muestras, pero ahora clasificada por tipo de aprovechamiento.

#### 6.6.1.1 Calidad del agua para uso y consumo humano

Se admite que la investigación planteada en este trabajo está dirigida a evaluar en forma cuantitativa el comportamiento hidrogeológico del acuífero El Hundido y su conexión con el acuífero de Cuatrociénegas. Adicionalmente, se reconoce que la gran mayoría de las muestras colectadas representan agua que no es utilizada para consumo humano; sin embargo, para tener un parámetro de referencia físico, y químico del agua caracterizada, en esta ocasión se compararan en forma genérica los resultados analíticos de las muestras colectadas, con la NOM-127-SSA1-1994 que controla la calidad del agua para el consumo y uso humano. Adicionalmente, como en la región de Beta Santa Mónica y El Pilar predomina el uso agrícola a partir de fuentes del subsuelo, se realiza un breve análisis de calidad del agua que considera su utilidad para la irrigación de cultivos.



## Figura 6.21 Ubicación de los sitios donde se tomaron las muestras de agua subterránea

La interpretación de la calidad del agua con fines de abastecimiento públicourbano se basa en la comparación de los resultados de campo y laboratorio (anexo 7 de resultados fisicoquímicos) con relación a estándares o límites permisibles generados por diversas instituciones. Para el caso de nuestro país, los límites permisibles fueron establecidos por la Secretaría de Salud y publicados en la NOM-127-SSA1-1994 (tabla 6.7). Como se reporta en dicha tabla, la NOM-127-SSA1-1994 incluye diversos tipos de características con la finalidad de establecer si es apta para consumo humano. Además de que el agua debe tener una composición química que sea segura para el consumo humano, es necesario que esté libre de propiedades no deseadas desde el punto de vista estético (como el color, sabor o turbidez), además de no incluir microorganismos patógenos.

De este modo, entre las características que incluidas en la NOM-127-SSA1-1994 se mencionan: i) biológicas, ii) físicas y organolépticas, iii) químicas y iv) radiactivas. Durante el transcurso del presente trabajo, se analizaron únicamente características químicas. En el anexo 6 de Hidrogeoquímica se presentan, para cada una de las muestras, los parámetros químicos que rebasan la NOM-127-SSA1-1994.



Figura 6.22 Distribución de los tipos de aprovechamientos visitados para la toma de muestras de agua subterránea

Considerando los parámetros químicos integrados en la NOM-127-SSA1-1994, los resultados de las muestras colectadas en la zona de estudio, las características químicas que más frecuentemente son rebasadas por la composición química del agua subterránea son: i) dureza total, ii) sulfato, iii) sólidos totales disueltos, iv) cloruro, iv) sodio, v) hierro y vi) fluoruro, principalmente. El nitrato también presenta valores por arriba de la NOM-127-SSA1-1994 sobre todo en la región agrícola del Valle de El Hundido.

# Tabla 6.7Límites permisibles para calidad de agua de uso potable<br/>(NOM-127-SSA1-1994)

LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS								
CARACTERÍSTICA		LIMITE PERMISIBLE						
Organismos coliformes tot	ales	2 NMP/100 ml; 2 UFC/100 ml						
Organismos coliformes feo	ales	No ml	detectable NMP/100 ml; (	Cero UFC/100				
Los resultados de los exámeno	es bacterioló	gicos	se deben reportar en unidades	de NMP/100 ml				
(número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml								
	LÍMITES PERMISIRIES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y							
ORGANOLÉPTICAS	_0 DL							
Color		20 ı de p	unidades de color verdader platino-cobalto	o en la escala				
Olor y sabor		Agr	adable					
Turbiadad		<u>5</u> ι	unidades de turbiedad	nefelométricas				
lurbiedad		(UT	N) o su equivalente en otro	método				
LÍMITES PERMISIBLES	DE CARA	<b>ACTE</b>	ERÍSTICAS QUÍMICAS (L	os límites se				
expresan en mg/l, excepto	cuando se	e indi	ique otra unidad)					
CARACTERÍSTICA	LIMITE PERMISIE	BLE	CARACTERÍSTICA	LIMITE PERMISIBLE				
Aluminio	0.20		pH (unidades de pH)	6.5-8.5				
Arsénico*	0.05*		Aldrín y dieldrín	0.03 (µg/l)				
Bario	0.70		Clordano (total de isómeros)	0.30 (μg/l)				
Cadmio	0.005		DDT (total de isómeros)	1.00 (μg/l)				
Cianuros (como CN-)	0.07		Gamma-HCH (lindano)	2.00 (µg/l)				
Cloro residual libre	0.2-1.50		Hexaclorobenceno	0.01 (μg/l)				
Cloruros (como Cl-)	250.00		Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03 (μg/l)				
Cobre	2.00		Metoxicloro	20.00 (µg/l)				
Cromo total	0.05		2,4 – D	50.00 (μg/l)				
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00		Plomo	0.025				
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001		Sodio	200.00				
Fierro	0.30		Sólidos disueltos totales	1000.00				
Fluoruros (como F-)	1.50		Sulfatos (como SO4=)	400.00				
Manganeso	0.15		Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50				
Mercurio	0.001		Trihalometanos totales	0.20				
Nitratos (como N)	10.00		Zinc	5.00				
Nitritos (como N)	0.05		Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50				

\* Por modificaciones a la Norma, para el 2004 el límite permisible es 0.03 mg/l

#### 6.6.1.2 Calidad del agua para uso agrícola

En la región de interés que incluye las cuencas de Cuatrociénegas y el Valle de El Hundido, para el uso del agua predomina el uso agrícola, ya sea directamente en la región del Valle de El Hundido o en el valle al oriente de la cuenca de Cuatrociénegas, ya que en esta región si bien existen algunos ranchos agrícolas, prácticamente la totalidad del agua que descarga en la zona de Cuatrociénegas se utiliza para uso agrícola en la cuenca vecina con la que colinda hacia el oriente y que se denomina Lamadrid.

El principal uso del agua subterránea en la zona del Valle de El Hundido y el Valle de Cuatrociénegas, en el estado de Coahuila, consiste en la irrigación de cultivos, por lo que es importante realizar la evaluación del tipo de agua de acuerdo con su composición química. De acuerdo con lo establecido en la bibliografía, además de la calidad del agua utilizada para la irrigación de cultivos, es necesario considerar factores como el tipo de suelo, los cultivos irrigados, el clima local y la estrategia utilizada en la irrigación y drenaje. Sin embargo, debido a que la información relacionada con esos factores no está disponible para su estudio, el análisis que a continuación se describe se sustentará únicamente en criterios que consideran la calidad del agua únicamente. Las características químicas que consideran elementos mayores y que requieren ser evaluadas incluyen: i) salinidad, ii) las proporciones relativas de algunos de los constituyentes presentes (relación de adsorción de sodio).

La porción del agua utilizada para la irrigación que es consumida por las plantas o que se evapora, prácticamente está libre de sólidos totales disueltos. Las plantas selectivamente retienen algunos nutrientes y una parte de las sales disueltas en el agua, pero la mayoría de los cationes y aniones disueltos no son retenidos por la planta. De este modo, la mayor parte de los elementos originalmente disueltos en el agua permanecen en el suelo en la medida de que el agua es consumida por la planta o evaporada. Por otro lado, no es conveniente que la concentración de los solutos en la humedad del suelo se eleve demasiado, ya que cuando sucede interfiere con los procesos osmóticos que se desarrollan en las raíces y que permiten a la planta la asimilación de agua y nutrientes.

Con base en lo anterior, el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América (*US Salinity Laboratory*) ha establecido una guía para clasificar el agua de acuerdo con la salinidad (definida a partir de la conductividad eléctrica) que considera 4 clases de agua. De acuerdo con estos resultados, el 62% de las muestras se clasificaron como tipo C4 (conductividad eléctrica mayor de 2250  $\mu$ mhos/cm), el 25% como tipo C3 (conductividad eléctrica 750 y 2250  $\mu$ mhos/cm) y finalmente el 12% como C2 (conductividad eléctrica menor de 750  $\mu$ mhos/cm).

Además de la salinidad del agua subterránea otro factor importante que tiene que tomarse en cuenta para la irrigación, incluye el intercambio de iones como el sodio y calcio. El proceso de intercambio catiónico se presenta durante la irrigación y

tiene influencia directa en las propiedades del suelo, especialmente cuando las concentraciones de los solutos son elevadas.

Cuando el agua que se utiliza para la irrigación de cultivos presenta una elevada proporción de sodio con relación al total de cationes, tiene a intercambiar el sodio en las partículas arcillosas que componen el suelo. Las partículas en el suelo que tienen la mayor capacidad de intercambio por unidad de peso son las arcillas, que tienen a adsorber cationes divalentes; cuando todos los sitios de intercambio están llenos de calcio y magnesio las condiciones físicas del suelo son las óptimas para el cultivo y crecimiento de las plantas. Sin embargo, si las posiciones de intercambio se saturan con sodio, las propiedades físicas del suelo se tornan no aptas para el cultivo y crecimiento de las plantas.

La tendencia de un agua a reemplazar el calcio y magnesio adsorbidos en las partículas arcillosas del suelo por sodio disuelto, puede expresarse por medio de varios índices para evaluar el efecto del sodio en dicho equilibrio. Uno de los índices principales es el denominado *Relación de Adsorción de Sodio* (RAS) definido de la siguiente manera (concentraciones en miliequivalentes):

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

De acuerdo con la gran concentración de valores de Ca y Mg que se presenta en el agua subterránea de la región, la totalidad de los valores de RAS que se calcularon para las muestras colectadas en general son bajos; tomando en cuenta estrictamente el agua subterránea que se utiliza para el cultivo (en este caso representadas por las muestras que tienen una conductividad eléctrica menor a 10,000  $\mu$ mhos/cm) el promedio del RAS es de 2.0. Los valores mayores de RAS se identificaron en la región de El Pilar, donde el promedio resultó de 3.7, en el Hundido y el agua de los manantiales de Cuatrociénegas presentan valores muy similares (1.8) y finalmente el agua subterránea de los pozos de la zona de Cuatrociénegas con un valor promedio de SAR de 0.8.

La relación entre los factores salinidad y Relación de Adsorción de Sodio descritos previamente y que permite establecer clasificación de calidad de agua con fines de irrigación de cultivos, se presenta en un diagrama propuesto por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Este diagrama permite establecer una clasificación útil para interpretación de análisis de agua que se utiliza en la irrigación.

En la figura 6.23 se presenta la distribución de las muestras en los diferentes campos de dicho diagrama; al igual que en el análisis anterior, únicamente se consideran las muestras del agua que se utiliza efectivamente para el riego. De acuerdo con estos resultados, para el primer muestreo el 15% de las muestras se
clasificaron como tipo C2-S1, el 30% como tipo C2-S1; el 28% se clasificó como C4-S1, el 24% como C4-S2, el 1% como C4-S3 y 1% como C4-S4.

De acuerdo con la información disponible y que se plasma en la tabla 6.8 y tomando en cuenta de que la gran mayoría (85%) del agua subterránea que se utiliza para uso agrícola son de tipo C3 y C4, puede establecerse que es recomendable que en los Valles de El Hundido y Cuatrociénegas, así como en la zona agrícola Lamadrid en el estado de Coahuila, se cultiven plantas tolerantes y muy tolerantes a la salinidad.



Figura 6.23 Diagrama para determinar la calidad del agua para uso agrícola

Los suelos donde se realicen las acciones de irrigación, deberán de seleccionarse de tal modo que presenten una proporción adecuada de arena de tal modo que permitan el drenaje suficiente como para no desarrollar salinidad en el mediano plazo. Con relación al desarrollo de suelos sódicos, la información disponible señala que al presentarse en la región suelos calcáreos con elevado contenido de yeso, en general no se anticipa mayor problema en los suelos por efecto de la sodificación.

Tabla 6.8Categorías de agua establecidas en la calidad de agua para<br/>riego

C-1	Agua de baja salinidad. Puede utilizarse para la mayor parte de los cultivos en casi todos los tipos de suelos con muy poco riesgo de que desarrolle salinidad. Es preciso algún lavado, que se logra normalmente con el riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.
C-2	Agua de salinidad media. Puede utilizarse con un grado moderado de lavado. Sin excesivo control de la salinidad se pueden cultivar, en la mayoría de los casos, las plantas moderadamente tolerantes a la sales.
C-3	Agua altamente salina. No puede utilizarse en suelos con drenaje deficiente. Selección de plantas muy tolerantes a las sales y posibilidad del control de la salinidad del suelo, aún con drenaje adecuado
C-4	Agua muy altamente salina. No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Puede utilizarso con una selección de cultivos en suelos permeables, ed buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.
S-1	Agua baja en sodio. Puede utilizarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable
S-2	Agua de contenido moderado de sodio. Presentará peligro importante por sodio en suelos con textura fina que tienen elevada capacidad de intercambio catiónico, especialmente bajo condiciones pobres de lixiviación, situación que se atenúa con presencia de yeso en el suelo.
S-3	Agua con alto contenido de sodio. Puede producir niveles peligrosos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos por lo que requerirán manejo y tratamiento especiales (elevada lixiviacion, buen drenaje, adición de materia orgánica). Los suelos yesíferos pueden no desarrollar problemas peligrosos de sodio intercambiable.
S-4	Agua con muy elevado contenido de sodio. Este tipo de agua generalmente no es apropiada para irrigación, excepto cuando tiene niveles muy bajos de salinidad. La utilización de yeso puede hacer factible la utilización de esta agua para la irrigación
	Cultivos poco tolerantes a la salinidad: pera, manzana, naranja, almendra, ciruela, melocotón, limón, mora, apio, rábano
	Cultivos tolerantes a la salinidad: uva, aceituna, granada, tomate, colifior, lechuga, maíz, zanahoria, cebolla, chícharos, alfalfa, trigo, centeno, avena, arroz, girasol, higo, papas
	Cultivos muy tolerantes a la salinidad: dátil, remolacha, espárrago, espinaca, césped, algodón, cebada.

Adaptada de Lloyd y Heatcotte (1985)

### 6.6.1.3 Análisis estadístico

Las muestras de agua subterránea colectadas en el Valle de El Hundido y el Valle de Cuatrociénegas, fueron obtenidas preferentemente de aprovechamientos subterráneos utilizados para la irrigación de cultivos y en los diversos manantiales existentes en la región. Dichos aprovechamientos presentaron además de caudales y tiempos de operación diversos, profundidades máximas del orden de 200 m. En general, las muestras colectadas provienen del acuífero alojado en las rocas calcáreas que afloran ampliamente en la región y en el material granular contenido en el centro de los valles.

Estas condiciones aunadas a la natural variación espacial de la calidad del agua subterránea en la región de interés, determinaron una gran diversidad en la magnitud de los resultados de campo y laboratorio. En las figuras 6.24 a 6.35 se presentan los valores máximos, mínimos y los percentiles 75 y 25 de los diversos parámetros de campo y laboratorio determinados para las muestras de agua subterránea colectadas en cada una de las regiones geográficas establecidas en la región de interés. Asimismo, en las tablas 6.9 a 6.12 se presenta el resumen estadístico correspondiente.



Figura 6.24 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona El Pilar



Figura 6.25 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona El Pilar



Figura 6.26 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona El Pilar



Figura 6.27 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Beta Santa Mónica



Figura 6.28 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Beta Santa Mónica



Figura 6.29 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Beta Santa Mónica



Figura 6.30 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, Manantiales



Figura 6.31 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, Manantiales



Figura 6.32 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, Manantiales



Figura 6.33 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, pozos



Figura 6.34 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, pozos



Figura 6.35 Parámetros estadísticos de diversos parámetros físicos y químicos en la zona Cuatrociénegas, pozos

### Tabla 6.9Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio<br/>de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona<br/>El Pilar

Unidades	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Percentil	Percentil	Percentil	Coef. Asimetría	n
TEMPERATURA (°C)	28.1	16	30.2	22.9	28.9	28.5	27.4	-2 09	17
pH	7 51	0.47	8 85	7 10	7 54	7 37	7 20	1.91	17
Eh Mv	294	71	398	125	342	303	261	-0.79	17
STD mg/l	2869	672	3570	440	3136	2947	2828	-3.18	17
Cond. Elec. (µmhos/cm)	4098	961	5100	628	4480	4210	4040	-3.18	17
O.D. (mg/l) mg/l	4.5	3.2	10.3	1.1	7.0	2.5	2.0	0.73	17
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>2</sub> )	100 /	53 7	202.7	30.5	104.4	96.5	80.4	3.04	17
Dureza Total (mg/l CaCO <sub>2</sub> )	2193 5	550.0	2886.4	300.2	2398.3	2355.4	2155.6	-2 78	17
HCO <sub>2</sub> mg/l	131.5	67.5	342.2	37.2	126.3	126.3	113.5	2.10	17
Cl mg/l	213.2	77.2	408.4	12.1	237.5	201.0	187.0	0.01	17
SQ mg/l	2379.5	664.4	3100.0	33.0	2640.0	2544.0	2280.0	-3.00	17
N-NO <sub>2</sub> mg/l	11.8	10.1	38.5	1.6	20 <del>4</del> 0.0	73	53	1 60	17
Na mg/l	100 3	123.0	613.0	10.0	467.0	/30 0	370.0	-2.04	17
K mg/l	10.8	1 8	12.5	10.0	11.6	11.2	10.8	-2.04	17
Ca mg/l	589.9	157.7	763.0	74.0	655.0	6/8 0	535.0	-2.44	17
Ma ma/l	174.6	/1 8	238.0	28.0	188.0	181.8	168.0	-2.44	17
Si ug/l	8873	4714	18600	1000	9920	9550	8050	_0.11	17
	114 163	5/ 13/	271 742	7 847	124 355	111 111	84 466	1 25	17
	20 / 67	15 906	54 073	3 3 26	40.060	20 244	10 650	0.04	17
	1 769	2 073	5 728	0.500	3 3 3 9	0 500	0.500	1 13	17
Ti ug/l	2 683	1 517	6 350	0.500	3 4 1 7	3 208	1 609	0.43	17
V ug/l	2.000	6 203	20 307	0.500	12 011	7 375	5 248	0.40	17
Mn ug/l	50 291	31 087	134 052	3 112	63 815	38 276	33 788	1 12	17
	522 74	283.25	1024 16	113.81	756 48	103.08	252 59	0.11	17
	л 71л	1 513	13 075	0 100	6 217	3 360	1 000	0.06	17
	13 36	41.08	168 30	2 50	46.65	30.95	18 36	1 99	17
Ge ug/l	0 150	0.085	0 300	0.036	-10.00 0 106	0 155	0 111	0.18	17
	1 940	6 776	26 693	0.050	0.190 / 18/	2 / 28	2 027	2.60	17
Se uo/l	7 658	6 240	20.035	0.130	9.610	5 788	4 376	1 /0	17
Br ug/l	1328 78	721.03	2968 55	37 34	1572 12	1067.04	9.570	1.40	17
Bb ug/l	7 372	/ 710	18 305	0.025	7 035	7 / 81	5 475	0.76	17
Sr ug/l	8504 12	2185 71	10500.00	630.00	0300 00	8300 00	8340.00	-3.16	17
Υ μα/Ι	0.007.12	0.055	0 103	0.015	0 116	0.088	0.070	-0.10	17
Zr ug/l	0.032	0.000	0.133	0.015	0.110	0.000	0.070	1 70	17
	37 678	23 208	96 547	0.000	41 018	38 226	28 408	0.91	17
	41 357	20.200 Q0 /33	200.706	0.000	0 202	2 605	1 557	2/3	17
Sb ug/l	0 124	0.075	0 285	0.022	0.125	0 102	0.072	1.40	17
	302 586	185 792	764 260	15 017	315 645	278.300	185 497	1.00	17
Cs ug/l	0.216	0 313	1 300	0.005	0 209	0 146	0.056	2 94	17
Ba ug/l	64 268	58 327	100 066	0.000	110 072	38 016	23 303	1.01	17
	04.200	0.035	0 128	0.000	0.068	0.048	0.025	0.65	17
	0.045	0.064	0.120	0.000	0.000	0.040	0.020	-0.01	17
Pr un/l	0.033	0.004	0.033	0.000	0.015	0.012	0.004	1 07	17
Nd ug/l	0.044	0.038	0.134	0.005	0.061	0.047	0.000	0.44	17
Re ug/l	0.427	0.896	3 872	0.000	0.263	0.047	0.000	4 00	17
	10 151	5 532	22 442	0.010	11 999	10 747	9 141	 0.22	17
B µg/l	643.622	320.021	1491.340	55.688	853.578	568.588	452.860	0.94	17

## Tabla 6.10Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio<br/>de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona<br/>Beta Santa Mónica

	Unidades	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Percentil 75	Percentil 50	Percentil 25	Coef. Asimetría	n
TEMPERATURA	(°C)	29.1	2.1	33.5	26.1	31.1	28.9	27.4	0.40	40
pН		7.49	0.44	8.51	6.86	7.82	7.31	7.16	0.69	40
Eh	Mv	222	147	404	-200	314	277	174	-1.40	40
STD	mg/l	17533	22076	100044	966	34519	1852	1136	1.56	40
Cond. Elec.	(µmhos/cm)	25047	31538	142920	1380	49313	2645	1622	1.56	40
O.D. (mg/l)	mg/l	2.9	1.6	7.0	0.5	3.8	2.4	1.8	0.83	40
Alcalinidad total	(mg/l CaCO <sub>3</sub> )	255.2	281.9	1705.3	83.3	210.2	184.9	169.9	4.14	40
Dureza Total	(mg/l CaCO <sub>3</sub> )	6974.0	13684.1	75861.0	722.2	9634.5	1356.1	861.5	4.03	40
HCO <sub>3</sub>	mg/l	308.4	344.4	2080.4	101.7	240.3	226.1	212.3	4.15	40
CI	mg/l	3258.8	4165.1	14100.0	30.5	6395.0	185.8	54.6	0.93	40
SO <sub>4</sub>	mg/l	10485.7	18632.8	100200.0	528.0	16490.4	1133.0	674.3	3.50	40
N-NO <sub>3</sub>	mg/l	20.5	32.5	139.5	0.3	23.0	3.4	2.2	2.17	40
Na	mg/l	4532.1	5913.1	22644.4	41.0	9719.5	252.0	56.5	1.14	40
К	mg/l	229.1	317.3	1323.0	3.5	426.3	9.2	4.3	1.58	40
Са	mg/l	434.2	220.3	1057.5	188.4	591.0	370.5	232.0	0.67	40
Mg	mg/l	1425.3	3256.2	18000.0	60.8	1933.5	108.0	68.8	4.17	40
Si	μg/l	9358	8641	33233	100	9165	8816	4204	1.29	40
Li	μg/l	627.113	758.956	2539.057	26.834	1339.756	90.982	42.656	0.91	40
AI	μg/l	308.361	424.991	1632.551	1.000	537.481	62.265	16.885	1.58	40
Sc	μg/l	2.175	2.088	9.399	0.500	3.801	0.500	0.500	1.24	40
Ti	μg/l	17.328	23.497	111.039	1.494	31.218	5.055	2.164	2.29	40
V	μg/l	8.124	7.713	31.430	0.050	10.582	5.210	2.950	1.65	40
Mn	μg/l	289.055	379.286	1366.743	3.221	496.622	40.114	13.895	1.35	40
Fe	μg/l	1600.16	2074.75	10431.60	78.37	2411.06	473.31	262.97	2.43	40
Cu	μg/l	79.720	103.629	384.435	0.100	171.170	1.821	0.991	1.03	40
Zn	μg/l	161.37	180.52	539.17	7.14	278.95	55.97	14.67	0.89	40
Ge	μg/l	0.583	0.624	2.849	0.005	0.847	0.373	0.164	1.89	40
As	μg/l	68.223	142.965	720.158	4.013	43.228	17.488	6.553	3.27	40
Se	μg/l	42.228	51.968	217.838	0.868	65.709	24.284	2.332	1.55	40
Br	μg/l	13293.63	17606.62	63099.58	169.14	23192.84	904.43	268.21	1.14	40
Rb	μg/l	69.259	116.543	526.260	4.031	64.665	8.088	4.640	2.58	40
Sr	μg/l	11647.70	2127.47	18125.00	7501.68	12640.00	11110.00	10735.34	1.07	40
Y	μg/l	0.529	0.676	2.982	0.064	0.811	0.158	0.087	2.02	40
Zr	μg/l	0.425	0.746	3.406	0.005	0.704	0.050	0.033	2.46	40
Мо	μg/l	415.619	520.440	2364.111	53.485	682.424	104.965	67.190	1.93	40
Cd	μg/l	340.358	528.426	1624.507	0.354	543.832	2.801	0.719	1.29	40
Sb	μg/l	0.171	0.420	2.543	0.005	0.101	0.078	0.005	4.94	40
I	μg/l	1883.606	2803.369	13242.386	34.139	3120.806	142.177	73.326	2.14	40
Cs	μg/l	8.441	16.839	82.273	0.823	3.686	2.591	2.292	3.24	40
Ва	μg/l	147.510	239.839	1406.630	29.596	129.789	76.454	49.793	4.30	40
La	μg/l	0.360	0.518	2.072	0.011	0.529	0.065	0.021	1.92	40
Ce	μg/l	0.795	1.093	4.067	0.025	1.314	0.157	0.057	1.62	40
Pr	μg/l	0.093	0.146	0.563	0.001	0.136	0.016	0.004	2.02	40
Nd	μg/l	0.389	0.565	2.063	0.004	0.620	0.080	0.027	1.85	40
Re	μg/l	3.229	5.205	20.693	0.127	4.231	0.656	0.159	2.19	40
U	μg/l	14.193	20.674	84.470	0.490	11.041	5.710	5.084	2.42	40
В	μg/l	2159.709	2614.657	9309.892	85.548	4885.091	341.051	151.019	0.98	40

# Tabla 6.11Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio<br/>de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona<br/>Cuatrociénegas, Manantiales

	Unidades Media Des		Desv. Est.	Max.	Min.	Percentil 75	Percentil 50	Percentil 25	Coef. Asimetría	n
TEMPERATURA	(°C)	29.9	2.4	34.5	24.9	31.5	30.3	28.4	-0.43	27
pН		7.51	0.38	8.32	6.87	7.79	7.35	7.23	0.62	27
Eh	Mv	357	71	463	153	393	375	328	-1.05	27
STD	mg/l	1731	1106	5362	403	1939	1827	802	1.27	27
Cond. Elec.	(µmhos/cm)	2473	1580	7660	575	2770	2610	1145	1.27	27
O.D. (mg/l)	mg/l	4.6	1.3	7.7	1.2	5.2	4.8	3.9	-0.20	27
Alcalinidad total	(mg/I CaCO <sub>3</sub> )	184.4	34.6	262.0	95.9	207.3	182.2	166.9	-0.15	27
Dureza Total	(mg/I CaCO <sub>3</sub> )	1326.7	924.6	3924.6	275.7	1494.7	1351.5	530.5	1.21	27
HCO₃	mg/l	228.1	43.5	319.6	114.1	256.7	231.2	204.4	-0.41	27
Cl	mg/l	109.1	114.8	545.0	3.0	114.3	91.5	27.9	2.44	27
SO <sub>4</sub>	mg/l	1227.4	1053.8	4520.0	59.5	1427.5	1240.0	330.7	1.36	27
N-NO <sub>3</sub>	mg/l	1.5	0.8	3.0	0.3	2.2	1.4	1.1	-0.03	27
Na	mg/l	178.7	188.9	844.0	2.0	194.0	160.0	31.9	2.02	27
К	mg/l	9.6	10.9	52.8	0.6	10.1	7.8	2.2	2.72	27
Са	mg/l	334.1	190.3	798.0	73.6	397.0	362.0	142.9	0.47	27
Mg	mg/l	119.1	115.8	539.0	11.1	126.5	107.9	42.0	2.26	27
Si	μg/l	14153	11136	50300	5755	13808	9900	8181	2.13	27
Li	μg/l	86.704	81.784	346.553	1.099	97.885	84.723	15.093	1.56	27
Al	μg/l	21.606	27.843	91.622	1.000	30.935	10.000	2.647	1.48	27
Sc	μg/l	3.999	3.575	15.909	0.500	5.000	3.638	1.891	2.13	27
Ti	μg/l	1.933	2.225	8.728	-0.100	2.498	1.238	0.500	1.89	27
V	μg/l	3.472	2.023	6.807	0.050	5.102	3.613	2.103	-0.16	27
Cr	μg/l	0.385	5.251	23.747	-5.000	0.607	-0.500	-0.500	3.54	27
Mn	μg/l	15.852	17.250	70.961	0.149	27.171	8.541	1.769	1.38	27
Fe	μg/l	407.25	413.69	1755.40	-100.00	585.84	254.83	115.91	1.69	27
Cu	μg/l	1.383	1.632	6.734	0.100	1.948	0.903	0.289	1.93	27
Zn	μg/l	19.70	15.29	62.13	2.50	30.95	17.10	6.59	0.91	27
Ge	μg/l	0.301	0.299	1.173	0.008	0.372	0.279	0.046	1.35	27
As	μg/l	10.580	8.009	32.438	0.418	15.086	13.198	1.525	0.38	27
Se	μg/l	2.341	1.473	4.705	0.552	3.696	1.939	1.000	0.34	27
Br	μg/l	583.16	610.75	2967.65	28.07	597.63	518.62	196.36	2.55	27
Rb	μg/l	13.284	14.980	73.441	0.367	16.114	13.165	2.313	2.64	27
Sr	μg/l	8963.39	6016.91	20400.00	380.00	13416.67	10030.00	2575.71	-0.07	27
Y	μg/l	0.066	0.075	0.302	-0.030	0.107	0.062	0.014	1.13	27
Zr	μg/l	0.025	0.057	0.293	-0.010	0.019	0.005	0.005	4.41	27
Мо	μg/l	38.370	29.809	108.162	0.955	59.788	41.523	5.217	0.25	27
Pd	μg/l	-0.023	0.033	0.012	-0.100	-0.010	-0.010	-0.010	-2.02	27
Cd	μg/l	26.968	89.296	461.766	0.016	9.031	1.191	0.737	4.79	27
Sn	μg/l	-0.233	0.326	-0.100	-1.000	-0.100	-0.100	-0.100	-2.10	27
Sb	μg/l	0.082	0.093	0.497	0.005	0.095	0.060	0.048	3.69	27
I	μg/l	308.189	494.251	2118.247	7.665	282.472	96.033	38.800	2.47	27
Cs	μg/l	4.007	3.647	16.218	0.022	5.083	4.211	0.389	1.41	27
Ва	μg/l	64.968	47.819	230.351	0.050	84.234	63.102	32.971	1.54	27
La	μg/l	0.033	0.066	0.345	0.001	0.034	0.010	0.005	4.42	27
Се	μg/l	0.044	0.054	0.154	0.001	0.066	0.017	0.005	1.11	27
Pr	μg/l	0.010	0.028	0.147	-0.001	0.009	0.005	0.001	4.96	27
Nd	μg/l	0.040	0.112	0.583	-0.010	0.036	0.011	0.001	4.77	27
Re	μg/l	0.114	0.076	0.265	0.012	0.171	0.126	0.030	-0.11	27
U	μg/l	7.174	4.383	14.936	0.714	10.180	7.720	3.172	-0.19	27
В	μg/l	263.831	218.545	988.406	10.191	327.626	271.775	88.676	1.48	27

# Tabla 6.12Resumen estadístico de parámetros de campo y laboratorio<br/>de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona<br/>Cuatrociénegas, pozos

	Unidades	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Percentil 75	Percentil 50	Percentil 25	Coef. Asimetría	n
TEMPERATURA	(°C)	26.9	2.7	32.6	23.7	28.2	26.5	24.5	0.88	19
pН		7.10	0.31	7.76	6.48	7.25	7.07	6.90	0.15	19
Eh	Mv	303	116	442	32	369	329	292	-1.24	19
STD	mg/l	1080	664	2940	384	1362	1082	455	1.19	19
Cond. Elec.	(µmhos/cm)	1543	949	4200	548	1945	1546	650	1.19	19
O.D. (mg/l)	mg/l	4.8	1.4	6.8	1.7	5.8	5.3	4.1	-0.93	19
Alcalinidad total	(mg/I CaCO <sub>3</sub> )	211.4	27.9	259.0	173.7	225.7	208.7	188.8	0.38	19
Dureza Total	(mg/I CaCO <sub>3</sub> )	862.5	531.5	2225.0	285.4	1232.7	839.9	342.3	0.84	19
HCO <sub>3</sub>	mg/l	275.1	34.7	342.2	211.9	304.6	278.8	253.9	0.04	19
Cl	mg/l	68.4	118.5	532.0	5.4	79.1	36.5	10.2	3.66	19
SO <sub>4</sub>	mg/l	585.0	499.1	1613.3	30.2	888.0	560.0	103.0	0.56	19
N-NO <sub>3</sub>	mg/l	4.6	5.3	20.5	1.6	3.8	2.6	2.2	2.55	19
Na	mg/l	62.0	76.5	292.7	6.4	70.8	34.0	9.1	1.87	19
К	mg/l	3.2	3.0	10.8	0.9	3.4	2.1	1.2	1.60	19
Са	mg/l	227.8	115.5	414.0	80.1	324.1	229.0	107.5	0.15	19
Mg	mg/l	74.1	65.5	288.0	12.8	102.9	61.5	20.7	2.12	19
Si	μg/l	10495	3452	18095	5871	11908	8950	8028	1.07	19
Li	μg/l	28.920	37.908	122.723	2.791	33.552	14.131	3.116	1.64	19
AI	μg/l	19.110	23.744	95.364	10.000	24.668	16.292	5.463	1.75	19
Sc	μg/l	2.950	1.537	5.785	0.500	4.066	2.611	2.263	0.01	19
Ti	μg/l	2.400	1.486	5.702	0.050	2.832	1.861	1.661	0.90	19
V	μg/l	3.145	1.946	8.207	0.050	3.962	3.236	1.749	0.71	19
Mn	μg/l	28.398	36.255	108.900	0.255	34.322	13.139	1.293	1.45	19
Fe	μg/l	501.21	947.74	4191.00	96.14	297.08	191.25	130.16	3.66	19
Cu	μg/l	1.770	1.670	6.511	0.100	2.081	1.180	0.956	1.78	19
Zn	μg/l	69.39	135.98	561.55	4.60	53.58	19.26	11.91	3.20	19
Ge	μg/l	0.098	0.078	0.297	0.018	0.123	0.086	0.032	1.17	19
As	μg/l	2.057	3.305	15.134	0.504	1.559	1.008	0.779	3.82	19
Se	μg/l	2.907	4.529	20.712	0.100	3.338	1.466	0.811	3.71	19
Br	μg/l	492.86	826.23	3723.19	46.10	542.48	303.29	92.02	3.65	19
Rb	μg/l	4.432	7.613	25.811	0.025	2.014	1.240	0.698	2.25	19
Sr	μg/l	4002.50	3390.24	10600.00	450.00	5570.00	3540.00	875.00	0.65	19
Y	μg/l	0.039	0.034	0.106	0.015	0.059	0.032	0.017	0.35	19
Zr	μg/l	0.047	0.077	0.328	0.005	0.041	0.022	0.005	3.11	19
Мо	μg/l	8.773	14.979	48.762	0.500	3.677	2.232	1.061	1.98	19
Cd	μg/l	40.089	101.707	413.925	0.012	5.227	1.744	0.659	3.23	19
Sb	μg/l	0.057	0.061	0.259	0.005	0.065	0.052	0.005	2.22	19
I	μg/l	78.470	105.825	478.664	9.730	80.896	47.117	25.727	3.35	19
Cs	μg/l	0.913	1.867	5.743	0.004	0.096	0.055	0.010	1.94	19
Ва	μg/l	53.299	23.285	98.073	7.780	63.951	53.929	41.056	0.14	19
La	μg/l	0.020	0.014	0.051	0.001	0.027	0.018	0.011	0.77	19
Ce	μg/l	0.042	0.035	0.131	0.001	0.052	0.037	0.019	1.24	19
Pr	μg/l	0.005	0.003	0.012	0.001	0.006	0.005	0.003	0.75	19
Nd	μg/l	0.019	0.016	0.054	-0.010	0.026	0.020	0.008	0.49	19
Re	μg/l	0.075	0.078	0.326	0.011	0.108	0.052	0.017	1.94	19
U	μg/l	3.383	3.317	9.532	0.730	4.433	2.418	0.807	1.10	19
В	μg/l	125.165	100.151	359.579	22.768	174.861	104.359	50.440	0.98	19

Adicionalmente, en la tabla 6.13 se presenta una comparación entre los valores promedio definidos en el análisis estadístico de los resultados de campo y laboratorio de las muestras de agua subterránea colectadas en la zona de estudio.

La temperatura del agua subterránea generalmente puede visualizarse como un indicador de su profundidad de circulación, en este caso se identifica que el agua subterránea extraída por los pozos en la zona de Cuatrociénegas es la que probablemente presenta menor profundidad de circulación, ya que su promedio es 3° C menos que aquella detectada en los manantiales. Además se establece que el Valle de El Hundido, la temperatura del agua subterránea es ligeramente menor que en los manantiales de Cuatrociénegas. La salinidad expresada como sólidos totales disueltos es muy variable, y en general es menor en el Valle de Cuatrociénegas que en el Valle de El Hundido; en el primero se detectan valores del orden 1000-2000 mg/l con máximos del orden de 5000 mg/l, mientras que en el Hundido son comunes los valores mayores a 2500 mg/l, con máximos del orden de 100000 mg/l.

Tabla 6.13	Comparación de valores promedio de parámetros de campo
	y laboratorio de las muestras de agua subterránea

	т	рН	Eh	STD	C.E.	0.D.	Alcalinidad total	Dureza Total	HCO <sub>3</sub>	CI	SO₄	N-NO <sub>3</sub>	Na	к	Ca	Mg
Unidades	(oC)		Mv	mg/l	(µmhos/cm)	mg/l	(mg/I CaCO <sub>3</sub> )	(mg/I CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
ZONA EL PILAR	28.1	7.51	294	2869	4098	4.5	100.4	2193.5	131.5	213.2	2379.5	11.8	409.3	10.8	589.9	174.6
ZONA BETA SANTA MÓNICA	29.1	7.49	222	17533	25047	2.9	255.2	6974.0	308.4	3258.8	10485.7	20.5	4532.1	229.1	434.2	1425.3
ZONA CUATRO CIÉNEGAS, MANANTIALES	29.9	7.51	357	1731	2473	4.6	184.4	1326.7	228.1	109.1	1227.4	1.5	178.7	9.6	334.1	119.1
ZONA CUATRO CIÉNEGAS, POZOS	26.9	7.10	303	1080	1543	4.8	211.4	862.5	275.1	68.4	585.0	4.6	62.0	3.2	227.8	74.1
	Si	Li	в	AI	Sc	Ti	v	Mn	Fe	Cu	Zn	Ge	As	Se	Br	Rb
Unidades	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l
ZONA EL PILAR	8873	114.163	643.622	29.467	1.769	2.683	8.993	50.291	522.74	4.714	43.36	0.159	4.940	7.658	1328.78	7.372
ZONA BETA SANTA MÓNICA	9358	627.113	2159.709	308.361	2.175	17.328	8.124	289.055	1600.16	79.720	161.37	0.583	68.223	42.228	13293.63	69.259
ZONA CUATRO CIÉNEGAS, MANANTIALES	14153	86.704	263.831	21.606	3.999	1.933	3.472	15.852	407.25	1.383	19.70	0.301	10.580	2.341	583.16	13.284
ZONA CUATRO CIÉNEGAS, POZOS	10495	28.920	125.165	19.110	2.950	2.400	3.145	28.398	501.21	1.770	69.39	0.098	2.057	2.907	492.86	4.432
	Sr	Y	Zr	Мо	Cd	Sb	I	Cs	Ва	La	Ce	Pr	Nd	Re	U	
Unidades	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	-
ZONA EL PILAR	8504.12	0.092	0.089	37.678	41.357	0.124	302.586	0.216	64.268	0.049	0.095	0.013	0.044	0.427	10.151	-
ZONA BETA SANTA MÓNICA	11647.70	0.529	0.425	415.619	340.358	0.171	1883.606	8.441	147.510	0.360	0.795	0.093	0.389	3.229	14.193	
ZONA CUATRO CIÉNEGAS, MANANTIALES	8963.39	0.066	0.025	38.370	26.968	0.082	308.189	4.007	64.968	0.033	0.044	0.010	0.040	0.114	7.174	
ZONA CUATRO CIÉNEGAS, POZOS	4002.50	0.039	0.047	8.773	40.089	0.057	78.470	0.913	53.299	0.020	0.042	0.005	0.019	0.075	3.383	

El potencial redox y los valores de oxígeno disuelto sugieren en general condiciones aeróbicas y oxidantes para ambos Valles de El Hundido y Cuatrociénegas, los menores valores se identificaron en la zona de El Hundido, donde puntualmente se detectaron condiciones redox que sugieren reducción. Con relación a los aniones (Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>) y cationes (Na, K, Ca, Mg) mayores y menores, las concentraciones relativas entre las cuatro zonas identificas (Tabla 5.8) establece condiciones similares a las identificadas a partir de la salinidad; las menores concentraciones se identificaron en los pozos del Valle de Cuatrociénegas, posteriormente las concentraciones promedio se incrementan para los manantiales, luego para los pozos de la zona de El Pilar y finalmente los valores máximos se detectaron en la zona de Beta Santa Mónica.

En el caso de los elementos traza, las concentraciones identificadas resultan interesantes en el sentido de que se detectaron valores relativamente elevadas de algunos de estos elementos como fueron Sr, B, Br, I, Li. En lo relacionado con las concentraciones relativas entre ellos, el comportamiento es muy similar al detectado para los elementos mayores y menores; los menores valores de los elementos traza corresponden con las muestras de agua subterránea tomadas en los pozos, las concentraciones se incrementan para los manantiales de la misma zona, luego aparecen los aprovechamientos de la zona de El Pilar y finalmente las mayores concentraciones se determinaron en general para la zona de Beta Santa Mónica.

### 6.6.1.4 Familias de agua por ión dominante

Los diagramas de Piper consisten de dos triángulos (en uno de ellos se representan los cationes y el otro los aniones), complementados con un rombo ubicado entre la porción superior de los triángulos. Los tres ejes del triángulo de los cationes se utilizan para las concentraciones de Ca, Mg y Na+K, representando las concentraciones como porcentajes del total de estos iones en miliequivalentes por litro. El triángulo de los aniones se construye en forma similar, con ejes para Cl,  $SO_4$  y  $HCO_3+CO_3$ . De este modo, finalmente se tiene que cada análisis de agua subterránea disponible, se representa como un punto en cada uno de los triángulos. En el diagrama de Piper de la figura 6.36 se presenta la composición química del agua subterránea de la zona de estudio. Con simbologías diversas se representan las zonas geográficas establecidas; adicionalmente en el rombo central el tamaño del símbolo es proporcional a la concentración de litio.

Varios aspectos resaltan en dicho diagrama, en términos generales en el triángulo de cationes predomina el Ca lo que sin duda se relaciona con la gran abundancia de minerales de origen calcáreo que existen en la región. Únicamente para algunas muestras tomadas en la zona clasificada como Beta Santa Mónica (específicamente aquellas tomadas en los aprovechamientos inactivos a diferentes profundidades) presentan mayores concentraciones de sodio. La disolución de materiales calcáreos generalmente condiciona que el anión que destaca en la composición del agua subterránea sea el HCO<sub>3</sub>, sin embargo en triángulo de los aniones se identifica como anión principal únicamente en algunas de las muestras, específicamente en aquellas clasificadas dentro de la zona Cuatrociénegas (manantiales y pozos). Es notorio que la mayoría de las muestras de agua subterránea presentan concentraciones elevadas de sulfato, lo que sugiere que el agua subterránea circula además de zonas donde existen minerales carbonatados que abundan en la región, en regiones donde existen minerales adicionales a los carbonatos como serían el sulfato.



Figura 6.36 Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea de la zona de interés

Adicionalmente, las muestras de la zona El Hundido que presentan mayor salinidad, también manifiestan incremento de cloruro.

Una clasificación que se basa en las concentraciones de elementos mayores es la denominada por ión dominante, agrupación que en muchas ocasiones se establece a partir de los mencionados diagramas triangulares. La definición de la familia de agua por ión dominante establece que cada muestra de agua es clasificada de acuerdo con la ubicación de los puntos que la representan, dentro de cada uno de los campos que se manifiestan de acuerdo con las concentraciones en los triángulos de aniones y cationes. La clasificación de familias de agua por ión dominante divide cada uno de los triángulos de cationes y aniones en 4 campos, tres de ellos incluyen la región con más del 50% de concentración de un ión determinado, el cuarto campo es la región central del triángulo, región en la que la concentración de todos los iones es menor a 50%.

Considerando esta clasificación, con base en la composición de las muestras de agua subterránea se identificaron 4 familias de agua principales (HCO<sub>3</sub>-Ca, SO<sub>4</sub>-Ca, SO<sub>4</sub>-Mixta y SO<sub>4</sub>-Na), en la figura 6.37 se presenta la distribución porcentual de cada una de ellas. Otras familias de agua que también se identificaron pero en mucho menor proporción que las mencionadas previamente son la Mixta-Ca, Mixta-Na, y la SO<sub>4</sub>-Mg.



Figura 6.37 Distribución porcentual de las principales familias de agua identificadas en la zona de estudio

Con base en la determinación de las familias de agua, en la figura 6.38 se presenta la distribución geográfica de cada una de las muestras de acuerdo con ellas. Es notorio que la familia HCO<sub>3</sub>-Ca predomina en el Valle de Cuatrociénegas, específicamente en las inmediaciones de las partes topográficamente elevadas de la zona oriental y norte. En el Valle de El Hundido, únicamente una muestra de agua subterránea colectada en una noria ubicada en la falda de la sierra fue clasificada como HCO<sub>3</sub>-Ca.

Desde el punto de vista de abundancia en la zona de interés, la familia SO<sub>4</sub>-Ca es la más importante ya que incluye a prácticamente la mitad de las muestras colectadas. Es común especialmente en las zonas de Cuatrociénegas y en Beta Santa Mónica, para la primera se identifica en el agua de la mayor parte de los manantiales (pozas) y en Beta Santa Mónica en el agua extraída de pozos que captan las rocas calcáreas en la parte norte de la sierra Alamitos. La familia SO<sub>4</sub>-Mixta sigue en orden de importancia a la SO<sub>4</sub>-Ca, como se presenta en la Figura 6.38 abunda en la zona de El Pilar, en algunos cuantos pozos de la zona Beta Santa Mónica y en algunos de los manantiales (pozas) de la zona de Cuatrociénegas. Finalmente la familia SO<sub>4</sub>-Na fue identificada únicamente en los pozos inactivos de la zona de Beta Santa Mónica, en las muestras de agua colectadas a diferentes profundidades, representa el agua subterránea de mayor salinidad en la zona de interés (valores mayores a 25,000 mg/l SDT).



Figura 6.38 Distribución geográfica de las principales familias de agua identificadas en la zona de estudio

Así como es posible diferenciar las aguas subterráneas desde el punto de vista de zonas geográficas, las familias de agua identificadas también permites establecer una diferenciación del agua subterránea con base en sus concentraciones. Efectivamente, en la tabla 6.14 se presentan los valores promedio de características físicas y químicas de cada una de las principales familias de agua subterránea. En general para el caso de las concentraciones químicas, los menores valores se asocian con el agua subterránea de la familia HCO<sub>3</sub>-Ca, el incremento en la salinidad (de 500 mg/l a aproximadamente 1500 mg/l de SDT) condiciona una evolución del agua subterránea dando paso a la familia SO<sub>4</sub>-Ca, posteriormente, el subsiguiente incremento en la salinidad (valor promedio de 3000 mg/l) condiciona la aparición de la familia SO<sub>4</sub>-Mixta y finalmente aparece la familia SO<sub>4</sub>-Na en el agua subterránea de mayor salinidad (más de 30,000 mg/l de SDT).

### Tabla 6.14Valores promedio de parámetros de campo y laboratorio de<br/>las muestras de agua subterránea de acuerdo con la familia<br/>de agua identificada

FAMILIA DE AGUA	TEMP. °C	рН	Eh (mV)	STD (mg/l)	Ox (mg/l)	COND. ELECT. µmhos/cm	Dureza Total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	CI (mg/I)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	N-NO <sub>3</sub> (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)
HCO <sub>3</sub> -Ca	26.6	7.25	386	441	9.1	631	314.0	264.4	12.3	77	1.8	11.2	1.4	95.5	18.2
SO <sub>4</sub> -Ca	29.9	7.28	299	1526	4.1	2180	1188.1	227.9	83.2	1024	4.9	120.8	5.9	324.5	91.5
SO <sub>4</sub> -Mixta	29.2	7.57	299	2905	4.1	4150	2180.2	172.9	248.3	2294	10.2	413.5	14.2	539.0	202.0
SO <sub>4</sub> -Na	27.3	7.84	163	32005	3.9	45721	8583.6	381.6	6832.4	15194	45.1	8778.8	433.2	656.8	1679.9
FAMILIA DE AGUA	Si (ppb)	Li (ppb)	B (ppb)	Al (ppb)	Ti (ppb)	V (ppb)	Mn (ppb)	Fe (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	Ge (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Br (ppb)	Rb (ppb)
HCO <sub>3</sub> -Ca	7760	5.0	37.5	7.1	1.4	3.7	4.8	135.3	1.2	11.8	0.0	0.8	0.8	68.9	0.75
SO <sub>4</sub> -Ca	10449	60.0	219.3	26.9	2.4	4.1	24.4	423.2	1.7	44.8	0.2	9.1	6.4	481.7	7.82
SO <sub>4</sub> -Mixta	14802	133.4	593.9	31.9	2.9	6.8	46.3	599.5	3.4	35.2	0.3	9.2	6.5	1461.8	13.76
SO <sub>4</sub> -Na	6698	1290.8	4608.1	544.1	27.5	11.7	558.0	2584.4	153.5	294.2	0.9	90.1	83.3	28123.0	110.07
FAMILIA DE AGUA	Sr (ppb)	Y (ppb)	Zr (ppb)	Mo (ppb)	Cd (ppb)	Sb (ppb)	l (ppb)	Cs (ppb)	Ba (ppb)	La (ppb)	Hg (ppb)	TI (ppb)	Pb (ppb)	Th (ppb)	U (ppb)
HCO <sub>3</sub> -Ca	759.3	0.02	0.012	1.5	11.7	0.036	20.3	0.08	77.1	0.01	-	0.04	0.3	-	1.231
SO <sub>4</sub> -Ca	9629.0	0.09	0.045	63.4	16.07	0.084	139.4	2.9	61.1	0.04	0.07	1.7	1.99	0.008	7.013
SO <sub>4</sub> -Mixta	11127.0	0.09	0.040	52.3	56.45	0.096	428.8	2.7	54.7	0.04	-0.01	0.8	5.38	0.005	9.961
SO <sub>4</sub> -Na	11984.3	0.85	0.635	842.5	809.93	0.273	3951.2	8.2	264.5	0.66	6.62	0.6	22.40	0.053	19.765

Estas diferencias en salinidad y en porcentajes relativos de los diferentes aniones y cationes mayores son claramente identificables en diversos diagramas, por ejemplo en la figura 6.39 se presenta la relación entre la concentración de cloruro y la salinidad global del agua representada en este caso por la conductividad eléctrica. Con la finalidad de que la explicación sea más clara, los símbolos con los que se representan las familias de agua identificadas se reportan en varios colores, con lo que se establece la zona geográfica a la que pertenecen. Efectivamente, los símbolos sin rellenar y de color negro establecen los sitios de la zona de El Pilar; los símbolos de color azul representan agua subterránea de la zona Beta Santa Mónica, los de color rojo manantiales de la zona de Cuatrociénegas y los verdes pozos de la zona de Cuatrociénegas. En este diagrama la composición del agua de mar promedio se presenta como referencia adicional. Es muy clara la diferenciación de la composición del agua subterránea con relación a las familias identificadas, la HCO<sub>3</sub>-Ca de menor salinidad que evoluciona conforme se incrementan las concentraciones a SO<sub>4</sub>-Ca y luego a la  $SO_4$ -Mixta y finalmente a la  $SO_4$ -Na para las muestras con mayor salinidad.

### 6.6.1.5 Diagramas binarios y definición de grupos de agua subterránea

Las diferencias identificadas en la composición global también se reflejan cuando se consideran elementos menores (como el potasio en la figura 6.40) y elementos traza (como el bromuro, figura 6.41 y el litio figura 6.42) con respecto a un elemento conservativo como el cloruro. Considerando los resultados químicos presentados previamente, es muy claro que el agua subterránea ha interaccionado en forma importante con los principales minerales (carbonatos, sulfatos y probablemente arcillas) contenidos en las rocas sedimentarias de origen marino por las cuales ha circulado.



Figura 6.39 Relación entre la concentración de cloruro y la conductividad eléctrica



Figura 6.40 Relación entre las concentraciones de cloruro y potasio



Figura 6.41 Relación entre las concentraciones de cloruro y bromuro



Figura 6.42 Relación entre las concentraciones de cloruro y litio

Las reacciones pueden analizarse relacionando las tendencias en las concentraciones con relación a la concentración de cloruro, ya que tomando en cuenta los valores que presenta, su comportamiento conservativo condiciona que no presente controles de solubilidad, además de que tampoco es afectado por reacciones de adsorción y oxidación-reducción.

En muchas ocasiones el potasio se comporta como un elemento no conservativo que se intercambia en la porción arcillosa de los materiales geológicos, en este caso al parecer se comporta de manera diferente ya que se identifica una relación directa con otro elemento conservativo como es el caso del cloruro. En las figuras 6.38, 6.39 y 6.40 es claro que la familia de agua con mayor salinidad corresponde con la SO4-Na y que las muestras que la representan fueron colectadas en el Valle de El Hundido, específicamente en la zona de Beta Santa Mónica. En el Valle de Cuatrociénegas las concentraciones máximas identificadas en algunas de las pozas del centro del valle, son mucho menores que las correspondientes a las más salinas del Valle de El Hundido. Esta relación que se describe para la conductividad eléctrica, potasio y cloruro en las figuras mencionadas, es válida prácticamente para todos los elementos restantes que se mencionan a continuación.

Con relación a los elementos traza bromuro y litio, su comportamiento conservativo en el agua subterránea se comprueba al identificar la relación directa que presentan con el cloruro, lo que se refleja en que presentan una tendencia claramente lineal. En todas estas gráficas, las diferentes familias de agua subterránea reconocidas presentan una distribución similar en la gráfica, por lo que establecen grupos químicos homogéneos de agua subterránea. La familia  $HCO_3$ -Ca se relaciona con las muestras de menor concentración (Valle de Cuatrociénegas principalmente) y la SO<sub>4</sub>-Na con aquellas de mayores valores (Valle de El Hundido); las familias SO<sub>4</sub>-Ca y SO<sub>4</sub>-Mixta presentan concentraciones intermedias entre estos extremos (se detectan en ambos valles).

Para tratar de entender el incremento de las concentraciones que se identifica en las gráficas previas, podría posible suponer la disolución de sales de origen evaporítico como la halita. Este proceso incrementaría en forma paralela las concentraciones de cloruro y sodio, ya que adicionarían estos constituyentes al agua en concentraciones relativamente similares. En la figura 6.45 se presenta la relación del cloruro con el sodio, al igual que en las Figuras previas se detecta una tendencia lineal muy clara; con fines comparativos se presenta la línea que representa la disolución de halita. Considerando los valores de cloruro, la gran mayoría de las muestras tienen una concentración de sodio mayor que la resultante de la disolución de halita.

Adicionalmente, si la disolución de halita fuera la responsable del incremento en la salinidad, la relación Br/CI reflejaría esta interacción, ya que la halita tiene una relación Br/CI (molar) relativamente pequeña (del orden de 9x10<sup>-5</sup>). La relación Br/CI (molar) de la precipitación local en la zona de los Valles de Cuatrociénegas y El Hundido, no está disponible, pero se espera que sea ligeramente mayor a la

relación definida para el agua marina (1.57x10<sup>-3</sup>) debido al enriquecimiento que se presenta en bromuro durante el movimiento de la humedad tierra adentro. Por ejemplo, la relación para la lluvia en los continentes puede ser del orden de 9x10<sup>-3</sup> como sucede para la zona centro-norte de los Estados Unidos de América (Davies et al. 1999). Este enriquecimiento de bromuro con relación al cloruro que se observa en los aerosoles marinos, probablemente es resultado de materia orgánica que contiene lípidos que se enriquecen en la superficie del mar (Duce y Hoffman, 1976).



Figura 6.43 Relación entre las concentraciones de cloruro y sodio

En la figura 6.44 se presenta la relación Br/Cl para el agua subterránea de la zona de estudio, la franja señalada indica la relación Br/Cl (probable de acuerdo con las condiciones de la zona) en la precipitación; una buena parte de las muestras de la familia HCO<sub>3</sub>-Ca se ubican en la región correspondiente con el agua de precipitación, lo que es congruente con el hecho que representan agua de reciente infiltración, con poco recorrido en el subsuelo.

En la medida de que se incrementa la concentración de cloruro la relación (molar) Br/Cl disminuye un poco pero tiende a mantenerse relativamente constante, especialmente para las muestras más concentradas, de hecho el valor que se identifica para las muestras de la familia SO<sub>4</sub>-Na es muy similar al agua marina y muy diferente al que resultaría si la disolución de halita fuera constituyera la razón del incremento observado en la salinidad. La similitud entre la relación Br/Cl del agua SO<sub>4</sub>-Na con el agua marina, tampoco sugiere una mezcla entre el agua subterránea con agua marina, en las figuras 6.39, 6.40, 6.42, 6.43 y 6.45 (y en otras no presentadas) donde se relaciona el cloruro con otros constituyentes, se presenta la composición del agua marina y en todos los casos se identifica una notable diferencia.



Figura 6.44 Distribución de la concentración de cloruro con respecto a la relación molar Br/CI en el agua subterránea

En las figuras 6.40, 6.41, 6.42, 6.43 y 6.45 se identifica que las concentraciones de diversos constituyentes químicos (potasio, bromuro, litio, sodio y yoduro, entre otros) presentan una tendencia de incremento con el cloruro. Esta condición sugiere que además de la disolución de minerales que existen en el medio geológico por donde circula el agua subterránea, existen procesos que acrecientan la salinidad del agua en forma proporcional para los diversos iones. En las figuras mencionadas se presenta una línea que representa un proceso de evaporación. De acuerdo con esta tendencia es claro que la evolución de los constituyentes químicos señalados, es sensiblemente paralela a la línea que marca la evolución de la concentración afectada por procesos de evaporación, lo que sugiere una posible influencia de este proceso en la composición química del agua subterránea.



Figura 6.45 Relación entre las concentraciones de cloruro y yoduro

### 6.6.2 Isotopía

### 6.6.2.1 Isótopos estables y tritio ambiental

### Perfiles en pozos

Los resultados de temperatura y conductividad eléctrica obtenidos en los pozos a lo largo de toda la columna, indican que existe estratificación del agua que se encuentra en el interior de la columna de pozo (figura 6.9).

Los perfiles de conductividad eléctrica y temperatura se realizaron en pozos cuyos equipos de bobeo habían sido desmantelados por los usuarios debido a la alta concentración de sales disueltas en el agua y por no ser apta para el riego agrícola.

Debido a la inactividad del aprovechamiento y a la alta concentración de SDT los perfiles no muestran el perfil de composición existente en el acuífero. En la columna del pozo, el agua con mayor concentración de sales disueltas tiende a desplazarse hacia la parte inferior y el agua con menor contenido de sales flota en la parte más superficial del pozo. Este comportamiento se observa en los diferentes parámetros fisicoquímicos e isotópicos medidos en campo y laboratorio.

A continuación se hace una descripción de las deltas de oxígeno-18 y contenido de tritio ambiental de los pozos en los cuales se realizaron mediciones en varios niveles de estos dos parámetros (figuras 6.46 y 6.49).

En el pozo 115, la  $\delta^{18}$ O en los primeros tres niveles medidos desde la superficie a 25, 39 y 64 m de profundidad, resultó de -7.39, -7.48 y -7.42 ‰ respectivamente. En el nivel más profundo medido a 95 m de profundidad, la  $\delta^{18}$ O es de -3.14 ‰ indicando que es el agua más evaporada o enriquecida isotópicamente. El exceso de deuterio de este punto es de -7.2 ‰. Este efecto también se observa en los valores de conductividad eléctrica del agua; los cuales, se incrementan con la profundidad, variando de 3750 a 4110 µS/cm. El agua no contiene tritio en ninguno de los niveles muestreados (figura 6.9a).

En el pozo 37, se muestrearon cuatro niveles de profundidad a 10, 13,19,21 y 27 m medidos desde la superficie del terreno. La  $\delta^{18}$ O muestra la misma tendencia que en el pozo 115; es decir, por densidad el agua más evaporada con mayor concentración de sales, se desplaza hacia la parte más profunda y consecuentemente las aguas más pesadas isotópicamente se encuentran en el fondo del pozo. La  $\delta^{18}$ O varía de -5.12 ‰ en la superficie del agua a -2.07 ‰ en el fondo. La conductividad eléctrica se incrementa con la profundidad, desde 49,410 µS/cm hasta alcanzar el valor de 142,920 µS/cm en el fondo (Fig. 6.9d). Los contenidos de tritio medidos en los niveles de 19, 21 y 27 m fueron de 0.73, 0.22 y -0.33 TU respectivamente.

En el pozo 139, se muestrearon seis niveles a las profundidades de 21, 26, 36, 50, 66 y 69 m medidas desde la superficie del terreno. Los datos isotópicos muestran la misma tendencia que en los dos casos precedentes; es decir el agua más enriquecida en isótopos pesados se encuentra en la parte más profunda del pozo. Pero presenta una diferencia muy importante que lo distingue de los demás pozos analizados, el agua de los niveles superficiales, especialmente el más somero (21 m), recibe agua cuya isotopía presenta los valores  $\delta^{18}$ O= -11.4 ‰ y  $\delta^{2}$ H= -80.9 ‰, los cuales corresponden a las deltas de oxígeno-18 y deuterio más empobrecidos de la zona estudiada (Figuras 6.46 y 6.47). El contenido de tritio ambiental en este nivel es de 3.5 TU y decrece con la profundidad hasta 0.0 TU. Asimismo, el exceso de deuterio indica que el agua de este primer nivel no ha sufrido evaporación (ED= 8.9 ‰).

El perfil de temperatura y conductividad eléctrica del pozo 139 indica que los primeros niveles reciben agua de recarga con bajo contenido de sólidos disueltos que diluyen la salinidad del pozo en la parte superior. En la parte inferior la conductividad eléctrica alcanza valores cercanos a 49,000 µS/cm (figura 6.9c).

Este hecho muestra que por un conducto de flujo preferencial (fisura o grieta) le llega agua a la parte más somera del pozo 139 proveniente de la sierra la Fragua (figura 6.9c). Esta agua esta caracterizada por tener los deltas de deuterio y oxigeno-18 más empobrecidos de la zona estudiada y que identifican la isotopía de la lluvia que se infiltra en dicha sierra. Este tipo o sello isotópico no se observa

en ningún otro pozo de los existentes en Beta Sta. Mónica, Sta. Teresa de Sofía, o de Florentino Rivera que son los más cercanos a la sierra La Fragua. Este resultado indica que la lluvia que se infiltra en la Fragua no recarga a El Hundido.

En el pozo 129, se muestrearon siete niveles a 24, 30, 40, 60, 70, y 100 m de profundidad, medidos desde la superficie del terreno. El agua presenta deltas de deuterio y oxígeno-18 muy enriquecidas por efecto de evaporación intensa que varían de -3.14 ‰ a -2.45 ‰, y exceso de deuterio que varía de -6.6 a -23.5 ‰. Ninguno de los niveles contiene tritio ambiental. Los resultados observados indican que el pozo capta agua de los materiales detríticos del valle (figura 6.9b).

En la poza Anteojo, se muestrearon dos niveles a 10 y 17 m de profundidad. La composición isotópica estable es la misma en ambos niveles y corresponde a una recarga proveniente de la sierra Madera en su vertiente hacia el valle de Cuatrociénegas (elevación promedio de 1585 msnm). Los valores de exceso de deuterio de 10.2 ‰ y 11.2 ‰ y de tritio de 1.5 en el primer nivel y 0.2 TU en el segundo nivel indican que la recarga se efectúa por infiltración de agua de lluvia de circulación relativamente rápida. Este sello característico se observa en los pozos y pozas que se localizan en el valle de Cuatrociénegas cercanos a la sierra Madera (figura 6.9e).

En el pozo 170B del valle de Calaveras, se obtuvieron dos muestras a 50 y 80 metros de profundidad medidos desde la superficie. Las deltas de deuterio y oxígeno-18 son prácticamente las mismas para ambos niveles e indican que la recarga proviene de la sierra Madera en su vertiente hacia el valle de Calaveras, a 1750 metros de altitud promedio sobre el nivel del mar. Los contenidos de tritio resultaron de 0.1 y 0.32 TU, indicando que el flujo de recarga es de aguas modernas de circulación relativamente lenta del orden de 30 años (figura 6.9f).

### Pozas y pozos

Los resultados de la composición isotópica de deuterio, oxígeno-18 y tritio ambiental de los aprovechamientos incluidos en la red de monitoreo de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido aparecen en el Anexo 7.

La localización de cada aprovechamiento muestreado, se ilustra en la figura 6.2. En esta figura aparecen también los pozos y pozas incluidos en la interpretación de los resultados isotópicos, así como, los sitios en los cuales se tomaron muestras a diferentes profundidades. Estos últimos fueron los pozos 115, 37, 139, 129, 170B, y la poza Anteojo.

La clasificación por familia química y los resultados de la composición isotópica de cada sitio muestreado, expresados como  $\delta^{18}$ O (‰) Vs. VSMOW,  $\delta^{2}$ H (‰) Vs. SMOW, Exceso de Deuterio (‰) y tritio ambiental (TU), aparecen, según corresponda, en las figuras 6.46, 6.47, 6.48 y 6.49. Los valores isotópicos de cada pozo donde se obtuvieron muestras de agua a diferentes niveles, están anotados

en forma creciente con la profundidad cerca de la notación gráfica del sitio aludido.

El efecto de altitud causado en la isotopía estable de los sitios muestreados, debido a las características orográficas de la zona, especialmente por la presencia de la sierra aledañas a los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, permite identificar el origen de la recarga de las aguas subterráneas presentes en ambos valles, tal como se mencionó en el apartado 6.5.1.

Para establecer las altitudes representativas de las sierras existentes, se realizó una interpolación de las curvas de elevación para determinar las altitudes promedio y los parteaguas de cada una de ellas. Los resultados permitieron caracterizar las elevaciones promedio de cada estructura: La sierra Alamitos presenta una elevación promedio de 1458 msnm, la sierra La Fragua en su vertiente hacia El Hundido tiene la elevación de 1538 msnm y en su vertiente hacia Cuatrociénegas de 1488 msnm. La sierra Madera presenta 1585 msnm en su vertiente hacia Cuatrociénegas y 1750 msnm en su vertiente hacia Calaveras, la sierra San Marcos presenta tres altitudes promedio en sus correspondientes vertientes de 1530, 1604 y 1618 msnm, la sierra Purísima presenta dos altitudes promedio de 1477 y 1388 msnm (figura 6.50).

Los datos isotópicos representados en un diagrama binario de  $\delta^{18}$ O (‰) contra  $\delta^{2}$ H (‰) (ver figura 6.54), se agrupan a lo largo de la línea meteórica mundial (LMM), incluidos los valores isotópicos de una muestra de lluvia colectada en la población de Cuatrociénegas (750 msnm). Este ajuste de los datos indica que el origen de las muestras es agua de precipitación pluvial, infiltrada a diferentes altitudes y que la línea meteórica mundial es válida como línea de referencia para determinar la evolución isotópica de los diferentes grupos de agua existentes. La isotopía del agua de mar estaría representada por la intersección de los ejes de la gráfica; por tanto, no existe ningún tipo de agua con características de origen marino.

Es importante notar en este mismo diagrama que los valores de deuterio y oxígeno-18 de las pozas y pozos del valle de Cuatrociénegas se agrupan a lo largo de una línea de evaporación definida por la ecuación:

$$\delta^2 H(\%) = 5.15^* \delta^{18} O(\%) - 14.2$$
 R<sup>2</sup> = 0.99

Este resultado indica que la isotopía de la recarga efectiva de las pozas está definida por la intersección de la línea de evaporación con la LMM. La línea de evaporación se produce por la evolución isotópica del agua original que alimenta a las pozas, debido a la evaporación intensa a la que está sometida. Este fenómeno se manifiesta por el aumento proporcionalmente mayor de la  $\delta^{18}$ O sobre la  $\delta^{2}$ H cuando hay evaporación intensa.

La misma representación binaria de  $\delta^{18}O$  (‰) Vs.  $\delta^{2}H$  (‰) en escala amplificada, permite diferenciar en detalle los grupos de agua característicos; así como, las

zonas correspondientes donde se origina su recarga efectiva. El diagrama de la figura 6.51 muestra que existen seis zonas principales de recarga que alimentan a los pozos y pozas de los valles, dependiendo de su localización geográfica.

Los pozos del valle de Calaveras (162, 119B y 170B) se recargan en la sierra Madera a 1750 msnm, los pozos y pozas próximos a la vertiente sur de la sierra Madera (178, 191, 199, 186, 199, 161 y las pozas el Anteojo y P-10) se recargan en dicha sierra a 1585 msnm, los pozos de El Hundido de los sistemas de riego de Beta Sta. Mónica, Sta. Teresa de Sofía y Florentino Rivera en la sierra Alamitos a 1458 msnm, los pozos del sistema de riego de El Pilar están captando los rellenos de la parte centro occidental de el Hundido y su recarga proviene de la sierra El Venado a 1473 msnm, otro grupo de manantiales y pozos localizados en el extremo oriental de Cuatrociénegas reciben su recarga en la sierra Purísima a 1388 msnm (manantial El Venado, 243, 229, 227 y 252), y, por último, Las pozas de cuatro ciénegas que se localizan alrededor del extremo norte de la sierra San Marcos se recargan de manera efectiva en la sierra la Fragua por arriba de los 1600 msnm.

El sistema de pozas de Cuatrociénegas se sustenta por la recarga de agua de lluvia que se infiltra en las dos vertientes de la sierra la Fragua, tal como muestran los resultados isotópicos observados en los niveles del pozo 139, los cuales indican que existe agua con deltas de deuterio y oxígeno-18 muy empobrecidas características de las partes altas de ambas vertientes de la Sierra La Fragua ( $\delta^{18}$ O= -11.1 % y  $\delta^{2}$ H= - 80.9 %) que no recargan al valle de El Hundido (figura 6.9c).

La variación en la composición isotópica del agua de recarga debida al efecto de altitud causado por la orografía del terreno, indica que para los grupos isotópicos identificados en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, la  $\delta^{18}$ O decrece -0.48 ‰ por cada 100 m de variación en la altitud. Este resultado implica que la recarga de las pozas se origina en cotas cercanas a los 1600 msnm en La Fragua con aportaciones menores de la sierra san Marcos (figura 6.53).

Los esquemas de flujo provenientes de las zonas de recarga de los aprovechamientos y de las pozas de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, se muestran de manera simplificada en las figuras 6.54 y 6.55.



Figura 6.46 Contenido de oxigeno-18 expresado como  $\delta^{18}$ O vs. VSMOW (‰)



Figura 6.47 Contenido de deuterio expresado como  $\delta^2$ H vs. VSMOW (‰)



Figura 6.48 Exceso de deuterio (ED) expresado en (‰)



Figura 6.49 Contenido de tritio ambiental (TU)



Figura 6.50 Elevación promedio de las sierras aledañas a los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. El promedio de elevaciones fue estimado mediante interpolación de curvas de nivel y la construcción de una malla con celdas de 50X50m



Figura 6.51 Composición isotópica de deuterio y oxígeno-18 de las aguas subterráneas de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. El agua de lluvia recolectada en la población de Cuatrociénegas, Coahuila; a 750 msnm, presenta una composición isotópica que coincide con la línea GMWL.



Figura 6.52 Composición isotópica característica de las zonas de recarga efectiva de los pozos y pozas de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido



Figura 6.53 Efecto de altitud en la composición isotópica de la lluvia causado por la orografía del terreno en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido. La δ<sup>18</sup>O decrece -0.48 ‰ por cada 100 m de altitud


Figura 6.54 Composición isotópica de los grupos de agua



Figura 6.55 sistemas de flujo que semejan a los pozos y pozas de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido

#### 6.6.2.2 Carbono 14

Con el fin de medir el tiempo de circulación del agua subterránea en los acuíferos de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, mediante la técnica del carbono 14, se tomaron 33 muestras durante las campañas realizadas del 21 de abril al 10 de mayo y del 28 de julio al 10 de agosto del presente año respectivamente (figura 6.56).

Durante las campañas mencionadas se realizaron los precipitados de campo inherentes a la preparación de las muestras en la técnica de la síntesis del benceno.

En la tabla 6.15 se presentan los valores del porcentaje de carbono moderno (pcm), los valores de C-13, edades respectivas y edades corregidas.

No.	Clave	Aprov.	Sitio	Municipio	% cm	δC-13	Edad (años)	Edad corrg.
19	CNA 133	Pozo	Florentino Rivero	El Hundido	5.91 ±1.71		23 385	
10	CNA 82	Pozo	El Pilar	El Hundido	6.87 ± 2.33	-2.90	22 134	7 665
11	CNA 84	Pozo	El Pilar	El Hundido	7.25 ± 3.06		21 694	
13	CNA 87	Pozo	El Pilar	El Hundido	8.08 ± 4.16		20 801	
1	CNA 100	Pozo	Beta Santa Mónica 1	El Hundido	8.24 ± 1.48	-4.50	20 639	9 802
2	CNA 104	Pozo	Beta Santa Mónica 6	El Hundido	10.17 ± 2.05		18 896	
21	CNA 43	Pozo	El Campizal	El Hundido	12.86 ± 7.82	-7.21	16 955	10 015
18	CNA 125	Pozo	Florentino Rivero	El Hundido	14.58 ± 1.90	-6.50	15 921	8 123
9	CNA 81	Pozo	El Pilar	El Hundido	15.60 ± 4.82		15 359	
8	CNA 108	Pozo	Beta Santa Mónica 10	El Hundido	18.33 ± 5.99	-4.00	14 024	2 213
16	CNA 12	Pozo	Buenavista	El Hundido	28.65 ± 5.44		10 334	
17	CNA 23	Pozo	Santa Teresa de Sofía	El Hundido				
15	CNA 44	Pozo	Las Morenas	El Hundido				
12	CNA 86	Pozo	El Pilar	El Hundido				
14	CNA 90	Pozo	Tanque Nuevo	El Hundido				
20	CNA 143	Pozo	Florentino Rivero	El Hundido				
22	CNA 233	Pozo	A.P. Nueva Atalaya	Cuatrociénegas	4.05 ± 1.58	-5.50	26 499	17 320
28	P-3	Poza	Escobedo	Cuatrociénegas	6.06 ± 2.41		23 179	
26	P-2	Poza	La Becerra	Cuatrociénegas	7.57 ± 2.45		21 339	
	Travertino	Caliza	Nueva Atalaya	Cuatrociénegas	12,26 ± 1.51		17 352	
25	P-7	Poza	Poza Azul	Cuatrociénegas	11.05 ± 1.15	-4.70	18 221	7 733
27	P-1	Poza	Churince	Cuatrociénegas	14.60 ± 15.60		15 905	
31	P-4	Poza	Poza Azul 1	Cuatrociénegas	16.53 ± 2,56		14 883	
3	CNA 216	Pozo	Antiguos Mineros	Cuatrociénegas	19.28 ± 1.51		13 609	
4	CNA 186	Pozo	El Álamo	Cuatrociénegas	48.11 ± 1.29	-8.30	6 048	272
5	CNA 199	Pozo	El Jonuco	Cuatrociénegas	50.15 ± 5.68		5 706	
24	CNA 178	Pozo	El Nogalito	Cuatrociénegas	64.76 ± 2.45		3 592	
6	CNA 227	Pozo	Las Carpas	Cuatrociénegas	74.35 ± 2.44		2 410	
23	CNA 191	Pozo	ETA 8	Cuatrociénegas	80.34 ± 1.52		1 810	
7	CNA 252	Manantial	La Vega	Cuatrociénegas	82.32 ± 2.12	-11.00	1 609	0
30	P-13	Poza	Los Hundidos	Cuatrociénegas	86.41 ± 2.21		1 208	
33	P-11	Poza	Las Playitas	Cuatrociénegas	119.77 ± 7.42		0	
29	P-6	Poza	Orozco	Cuatrociénegas				
32	P-21	Poza	San Jose del Anteoio	Cuatrociénegas				

|--|

Los rangos de variación del porcentaje de carbono moderno varían entre 5.91 – 28.65% para el Valle de El Hundido y 4.05 – 119.77% para el Valle de Cuatrociénegas. Lo anterior significa que las aguas subterráneas de

Cuatrociénegas son más modernas que las aguas subterráneas del Hundido. Calculando en tiempo de circulación de las aguas subterráneas con el modelo más simplista, que es el de decaimiento radiactivo, encontramos que los rangos de variación en el valle de El Hundido están entre 10 300 y 23 400 años. De igual manera los rangos de variación en el valle de Cuatrociénegas están entre 0 y 26 500 años. Exceptuando el tiempo de residencia del pozo de agua potable (CNA 233, 26 500 años) de Nueva Atalaya, nuevamente las aguas subterráneas del Valle de Cuatrociénegas son de infiltración más reciente que las aguas subterráneas del Valle de El Hundido. Es decir utilizando este modelo bien se puede establecer la diferencia relativa en los tiempos de circulación de estas aguas subterráneas.

Los porcentajes de carbono mayores, es decir, de recarga moderna, se presentan en los sitios aledaños a las sierras y los porcentajes menores, de manera general, en las zonas que corresponden al paquete aluvial, lo cual indica un modelo conceptual con circulación concéntrica a los valles.

Es de mencionar que el travertino localizado en el poblado de Nueva Atalaya presenta el 12.26 % de carbono moderno con una edad radiométrica de 17 352 años, esto indica que en este lugar existían manantiales que contribuyeron a la formación de este mineral. Esto significa que las calizas karstificadas de las sierras aledañas a Cuatrociénegas sirven como conductos del agua subterránea.

El parámetro  $\delta^{13}$ C ‰ sirve de corrección de la edad del agua subterránea propuesto por O. Salem, (1980) y R. Gonfiantini (1988).

$$Ao = 1.016 * \frac{\delta^{13}C(HCO3^{-}) - \delta^{13}C(CaCO3)}{\delta^{13}C(CO2) - \delta^{13}C(CaCO3) + \Sigma}$$

en donde,

 $\delta^{13}C(HCO3^{-})$  es el valor de  $\delta^{13}C$  en la muestra,  $\delta^{13}C(CaCO3)$  es el valor de  $\delta^{13}C$ en la caliza y que se supone que es igual a 0 ‰.  $\delta^{13}C(CO2)$  en el suelo que se considera igual a -25 ‰ y  $\Sigma$  igual al factor de fraccionamiento de valor 8. Por lo tanto se puede calcular la edad corregida según la siguiente ecuación:

$$t = 8267 \ln Ao * 100 / pcm$$

donde *Ao* es la actividad inicial de  $\delta^{14}C$  y *pmc* es el valor del porcentaje de carbono moderno de la muestra.

El parámetro  $\delta^{13}$ C también fue muestreado en 33 sitios

Sin embargo los porcentajes altos de carbono moderno son útiles ya que corresponden a los sitios localizados en la vecindad de los manantiales y al pie de

las sierras, los cuales presentan también valores altos de tritio ambiental y representan los lugares de recarga moderna con una edad apenas de algunas décadas.

En esta región, la recarga de agua subterránea es seguida por la disolución de carbonatos en una reacción en la cual está involucrado el CO<sub>2</sub> del suelo y la calcita. Sin embargo la modelación geoquímica sugiere que la saturación de la calcita es alcanzada rápidamente ya que cierta cantidad de calcio también es añadida al agua subterránea a través de la disolución del yeso. La calcita podría entonces precipitarse como mineral secundario y podría jalar carbono del sistema acuoso. Sin embargo la dolomita está aún sin saturar y puede continuar disolviéndose y así añadir magnesio al agua subterránea. La cantidad de carbonato al agua ya que la dilución de dolomita es un proceso incongruente en el cual el calcio es reprecipitado como calcita.

El resultado de estos procesos es una "dilución" del carbono radiactivo original que a su vez sugeriría edades mayores. Así las correcciones son aplicadas sobre la base de los contenidos de <sup>13</sup>C carbono inorgánico disuelto, la roca carbonatada y el CO<sub>2</sub> del suelo. Tales correcciones reducen las "edades" no corregidas, por ejemplo de 20 000 años a menos de 10 000 años.

En la región del Hundido se sabe que existen intrusiones de basalto jóvenes y el gradiente geotérmico en toda la región parece ser bastante mayor como lo sugiere la mayoría de las temperaturas subterráneas, las cuales están cercanas a los 26-28 °C (la temperatura media anual es cercana a los 16 °C). Por esto uno podría asumir que existen actividades magmáticas subsuperficiales mayores y que el dióxido de carbono magmático está emigrando hacia el agua subterránea. La modelación geoquímica soporta esta suposición ya que la presión parcial del CO<sub>2</sub> en aguas vecinas a la intrusión es bastante mayor (No. 67: pCO<sub>2</sub> =  $1.4^* 10^{-1}$ ) y es difícil de explicar en términos de la presión parcial del suelo o los procesos químicos. Este problema debería ser enfatizado en estudios posteriores especialmente si las edades corregidas, por datación de aguas subterráneas con CO<sub>2</sub>, debieran ser mucho más jóvenes.

En sitios donde las actividades antropogénicas contaminan el agua subterránea también es posible que el carbón orgánico sea introducido y pueda añadir dióxido de carbono a través de procesos de descomposición y oxidación. Su importancia no puede ser estimada ya que el origen del carbono determina su contenido radiactivo y composición isotópica.

Estos razonamientos sirven para mostrar que es muy difícil transformar un contenido de carbono radiactivo en edad del agua. Por lo tanto es importante notar, que en general la diferencia relativa entre edades corregidas y no corregidas son conservadas especialmente en sistemas como el encontrado aquí, ya que la evolución geoquímica es bastante uniforme en todas las muestras.

Por esto los bajos contenidos de carbono radiactivo reflejan valores mayores de edad del agua que altos contenidos de carbono radiactivo. Con esto la diferencia entre El Hundido y Cuatrociénegas es significante, ya que la mayoría de las aguas en El Hundido muestran menor contenido de carbono radiactivo que en Cuatrociénegas, por lo tanto el agua subterránea en El Hundido es potencialmente más vieja que en Cuatrociénegas. Siendo posible edades que exceden los 1 000 años.

Suponiendo que hubiera una comunicación hidráulica del Valle de El Hundido hacia el Valle de Cuatrociénegas las aguas subterráneas de este valle deberían ser más viejas que las de El Hundido, debido al tiempo de recorrido del agua subterránea de un valle a otro. Lo anteriormente expuesto no cumple con la hipótesis propuesta lo cual indicaría que no existe una comunicación hidráulica entre ambos valles.



Figura 6.56 Localización de sitios muestreados y analizados (+) de Carbono 14 en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, durante la primera y segunda campaña.

6.6.2.3 Azufre 34

Con el fin de determinar el origen de las aguas subterráneas de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido se analizó el contenido isotópico de  $\delta S^{34}$ % en 97 muestras de agua subterránea (figura 6.57), las cuales fueron analizadas en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Arizona.



Nota: Círculos vacíos corresponden a las muestras analizadas

Figura 6.57 Localización de sitios muestreados y analizados (o) de δS<sup>34</sup> ‰ en los valles de Cuatrociénegas y El Hundido, durante la primera y segunda campaña.

Se utilizó este isótopo como índice para identificar aguas de origen marino, dado que algunos investigadores de esta zona han indicado un origen marino del agua de las pozas localizadas en Cuatrociénegas.

El sulfato es el mayor constituyente químico del agua subterránea en los valles de El Hundido y Cuatrociénegas y por ello su origen refleja las trayectorias de flujo en el subsuelo.

El sulfato no refleja una entrada atmosférica pero puede indicar contribuciones antropogénicas. Su máxima concentración está normalmente controlada a través del equilibrio con el yeso y/o otros minerales sulfatados los cuales pueden precipitar una vez que la saturación es alcanzada. Además su concentración en el

agua subterránea puede estar influenciada a través de procesos de reducción y oxidación. A menudo estos procesos están controlados biológicamente.

El origen y la historia del subsuelo también están reflejados en la composición isotópica del sulfato. Es importante notar que la molécula del sulfato, isotópicamente, es extremadamente estable y normalmente a bajas temperaturas el agua subterránea no intercambia su contenido isotópico de oxígeno con el agua que lo rodea. Ello refleja el origen del sulfato.

Sin embargo tal intercambio de oxígeno es posible: a muy bajos valores de pH donde el HSO<sup>-</sup><sub>4</sub> se convierte en la especie sulfatada dominante, en ambientes hidrotermales y sistemas geotérmicos con elevadas temperaturas, y en procesos de reducción biológicamente controlados.

Tales procesos de intercambio no ocurren en los isótopos de azufre debido a que no hay otros componentes de azufre disponibles en agua subterránea normal. En esos sistemas sólo el intercambio biológicamente controlado juega un papel importante.

La reducción biológica de sulfatos en aguas subterráneas es un proceso muy común en ambientes reductores. En este proceso tanto el azufre isotópicamente ligero como el oxígeno serán preferencialmente removidos del sulfato disuelto, causando un enriquecimiento isotópico en ambos isótopos. Para el azufre este enriquecimiento puede ser muy alto, siguiendo un proceso de destilación Rayleigh y son fácilmente reconocidos por los altos valores  $\delta S^{34}$  del sulfato.

Como se indicó anteriormente, la situación es algo más complicada para la composición isotópica del oxígeno ya que puede ocurrir un intercambio isotópico. En los procesos de reducción controlados biológicamente las componentes intermedias de azufre parecen ser capaces de intercambiar isótopos de oxígeno y por lo tanto más procesos de reducción son asociados con reoxidación parcial y el sulfato residual puede ser afectado. Este proceso nos llevará a un valor isotópico constante, el cual posiblemente es controlado por el valor isotópico del oxígeno en el sistema agua-sulfato.

En la mayoría de las aguas subterráneas de la región del valle de Cuatrociénegas y El Hundido la composición isotópica del azufre ha sido determinada y los valores de  $\delta S^{34}$  varían entre 13.2 y 17.5 %, los cuales se aprecian en la tabla 6.16 Los datos muestran una distribución normal con un rango de amplitud angosto y concuerda con un origen del sulfato a partir de secuencias carbonatos/evaporitas del Cretácico Inferior, figuras 6.58 y 6.59.

## Tabla 6.16Resultados de S 34/S 32 ‰

Pozo	Localidad	δ34S ‰	Pozo	Localidad	δ34S ‰	Pozo	Localidad	δ34S ‰
CNA100	Beta Sta Mónica 1	15,50	CNA 121	Las Canoas	8,00	CNA 112	Beta Santa Mónica	15,50
CNA 3	Beta Sta Mónica 2	16,20	P-1	Churince	14,80	CNA 119 B	Rancho La Ximena	4,00
CNA 101	Beta Sta Mónica 3	16,10	CNA 233	AP Nueva Atalaya	14,80	CNA 115-1	El Pilar	16,70
CNA 104	Beta Sta Mónica 6	16,10	CNA 241	Papalote Nueva Atalaya	15,10	CNA 115-2	El Pilar	15,40
CNA 105	Beta Sta Mónica 7	16,20	P-2	La Becerra	14,70	CNA 115-3	El Pilar	14,70
CNA 106	Beta Sta Mónica 8	16,30	CNA 216	Antiguos Mineros	15,00	CNA 115-4	El Pilar	14,70
CNA 24	Sta Teresa de Sofía	16,00	P-3	Escobedo	14,80	CNA 129-1	Florentino Rivero	15,00
CNA 25	Sta Teresa de Sofía	16,00	P-4	Poza Azul 1	14,80	CNA 129-2	Florentino Rivero	13,20
CNA 27	Sta Teresa de Sofía	16,00	CNA 178	El Nogalito	15,20	CNA 129-3	Florentino Rivero	13,20
CNA 133	Florentino Rivero	15,40	P-5	Santa Tecla	14,60	CNA 129-4	Florentino Rivero	13,80
CNA 142	Florentino Rivero	14,80	P6	Rancho Orozco	14,70	CNA 129-5	Florentino Rivero	13,60
CNA 143	Florentino Rivero	15,30	P-7	Poza Azul	14,80	CNA 129-7	Florentino Rivero	13,40
CNA 144	Florentino Rivero	15,40	P-8	Las Tortugas	14,60	P-21	Santa Teclita	14,50
CNA 83	El Pilar	15,30	CNA 186	El Alamo	15,80	CNA 227	Las Carpas	12,50
CNA 85	El Pilar	15,60	CNA 199	El Jonuco	16,50	CNA 229	San Vicente	13,70
CNA 87	El Pilar	15,40	CNA 250	Papalote San Lorenzo	15,20	P-23	La Cueva del Venado	12,30
CNA 82	El Pilar	15,30	CNA 227	Las Carpas	14,40	CNA 37-1	El Hundido	17,40
CNA 103	Beta Sta Mónica 5	16,30	CNA 252	La Vega	15,10	CNA 37-2	El Hundido	14,20
CNA 84	El Pilar	15,30	CNA 243	El Venado	14,60	CNA 37-3	El Hundido	13,20
CNA 102	Beta Sta Mónica 4	16,00	P-9	Mezquites	14,60	CNA 37-4	El Hundido	14,10
CNA 81	El Pilar	14,30	CNA 191	ETA 8	15,00	CNA 37-5	El Hundido	14,10
CNA 86	El Pilar	14,30	P-10	San José del Anteojo	17,50	CNA 139-1	Florentino Rivero	13,50
CNA 108	Beta Sta Mónica 10	15,30	P-11	Las Playitas	14,80	CNA 139-2	Florentino Rivero	13,40
CNA 44	Las Morenas	14,30	P-12	Poza Ramon Manriquez	14,70	CNA 139-3	Florentino Rivero	13,60
CNA 12	Buenavista	14,20	P-13	Poza Los Hundidos	14,90	CNA 139-4	Florentino Rivero	14,20
CNA 90	Tanque Nuevo	15,60	P-14	Poza Azul 11	14,90	CNA 139-5	Florentino Rivero	14,00
CNA 107	Beta Sta Mónica 9	15,70	P-15	Los Riachuelos	14,80	CNA 139-6	Florentino Rivero	13,90
CNA 23	Sta Teresa de Sofía	15,10	P-16	Tierra Blanca	14,80	Pozo SJA-1	San José del Anteojo	17,30
CNA 124	Florentino Rivero	15,10	P-17	El Mojarral	14,80	Pozo SJA-2	San José del Anteojo	16,70
CNA 125	Florentino Rivero	13,80	P-18	Poza XYZ	15,20	CNA 170 B-1	Rancho la Ximena	10,60
CNA 39	El Campizal	14,60	CNA 161	Ampuero	13,10	CNA 170 B-2	Rancho la Ximena	9,80
CNA 41	El Campizal	14,70	P-19	Poza Los Güeros	14,90			
CNA 43	El Campizal	14,40	P-20	Laguna Churince	14,90			



Figura 6.58 Histograma de los valores  $\delta 5^{34}$  de los valles de Cuatrociénegas y El Hundido.



Figura 6.59 Composición isotópica S<sup>34</sup> y O<sup>18</sup> del sulfato marino a través del tiempo geológico.

Es de mencionar que posiblemente la composición de la poza de San José del Anteojo, la cual está en el sistema de Cuatrociénegas tiene el valor de sulfato más alto. Ya que contiene oxígeno libre es improbable que una reducción de sulfato se lleve a cabo y el valor pueda reflejar una fuente adicional de origen desconocido o reducción en una fase temprana de su evolución geoquímica.

Los sitios CNA 121 (Las Canoas), CNA 119 B (La Ximena), CNA 170 B-1 (La Ximena) y su nivel CNA 170 B-2, que se encuentran fuera de los valles de El Hundido y Cuatrociénegas, contienen valores isotópicos de  $\delta S^{34}$  menores: 8, 4, 10.6 y 9.8‰ respectivamente. Estos sitios tienen una contribución isotópica cuantitativamente de muy pequeña importancia.

Los datos isotópicos de azufre, las condiciones rédox del agua subterránea y la presencia de oxígeno libre muestran que la reducción de sulfatos no puede ser un proceso de importancia. Sin embargo los datos isotópicos de oxígeno sugieren la presencia de procesos locales de reducción-reoxidación. En este caso el sulfato es reducido y después totalmente reoxidado. Por esto la composición isotópicos de azufre se conserva, pero los datos de oxígeno reflejan los procesos isotópicos de intercambio.

De acuerdo con S. Mandel y Z.L. Shiftan (1981) el azufre corresponde a un origen de sulfatos que se depositaron en un ambiente lagunar marino (-8 a +32 ‰,

evaporitas marinas). Estos resultados están respaldados por el hecho que la formación Acatita contiene gran cantidad de yesos (sulfatos de calcio). Por lo anterior, se concluye que el agua de las pozas es de precipitación, que a través de su recorrido en el acuífero ha disuelto las sales de las rocas marinas que conforman el terreno de esta zona, y no corresponden a aguas fósiles de un mar que haya sido atrapado en el subsuelo.

#### 6.7. Determinación del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico e isotópico

## 6.7.1 Índices de saturación con relación a especies minerales seleccionadas

El modelo geoquímico PHREEQC se utilizó para calcular las actividades de las especies disueltas y los índices de saturación con respecto a varias fases minerales. Esta decisión se tomó con base en los siguientes aspectos: *i*) su base de datos contiene información de tipo termodinámico necesaria para incluir elementos traza y sólidos estables, y *ii*) a nivel mundial, se considera de los más documentados. Los datos que se requieren para alimentar el programa son la temperatura, el pH, el potencial de óxido-reducción y la concentración de las especies disueltas.

La especiación (cálculo de todas las especies disueltas incluyendo complejos), se realiza por un proceso iterativo, utilizando constantes de equilibrio basadas en la energía libre de Gibbs para la reacción involucrada. Para la obtención de coeficientes de actividad se utilizan las ecuaciones de Davies o la extendida de Debye-Hückel. La variación de la constante de equilibrio con la temperatura se calcula utilizando una ecuación de tipo empírica o la relación de Van't Hoff.

La determinación de índices de saturación con respecto a varios minerales, se realiza comparando los productos de actividad iónica PAI (calculados a partir de las actividades de los iones involucrados y de relaciones establecidas a partir de la disolución de un mineral), con los productos de solubilidad o constante de equilibrio K. Posteriormente, los índices de desequilibrio o de saturación (log PAI/K), se utilizan para verificar si el agua está en equilibrio (log PAI/K  $\approx$ 0), sobresaturada (log PAI/K>0), o subsaturada (log PAI/K<0), con respecto a determinada fase sólida.

Jenne *et al.* (1980) observaron que la varianza en los índices de saturación alrededor del valor cero (en equilibrio) con determinado mineral, se incrementa con el valor de la constante de solubilidad para ese sólido. Ellos determinaron que un valor del 5% del logaritmo del producto de solubilidad de un mineral ( $\pm$ 5% X Log K), representa una banda de error, en la que el agua está en equilibrio con dicho mineral. Por ejemplo, el logaritmo de la constante de solubilidad para la fluorita a 25° C es -10.57. Por lo tanto, la zona en la que determinada agua se

puede considerar en equilibrio con la fluorita, es cuando el índice de saturación calculado es  $0.0 \pm 0.53$ . Con base en este criterio, las gráficas que se relacionen con índices de saturación, indicarán este rango de equilibrio (para efectos prácticos), con una línea punteada arriba y abajo del valor de log PAI/K=0. Adicionalmente, en las gráficas que se presentan a continuación se relaciona el índice de saturación con relación a diferentes minerales con la conductividad eléctrica de la muestra, lo que permite establecer como evoluciona el primero con relación a un indicador indirecto de tiempo de residencia relativo del agua en el subsuelo.

#### 6.7.1.1 Geoquímica de carbonatos.

Los resultados de la determinación de los índices de saturación para las muestras de agua subterránea, señalan que para el caso de carbonatos calcita y dolomita (figuras 6.60 y 6.61) presentan valores que indican equilibrio para todo el rango de salinidades registrado en las familias de aguas subterráneas, esto significa que en ambos Valles (Cuatrociénegas y Hundido) predomina la saturación con relación a carbonatos. En algunos casos como el agua subterránea de la mayoría de los manantiales del Valle de Cuatrociénegas y en algunos pozos, se identificaron condiciones de sobresaturación; esto probablemente se relaciona con el hecho de disminución de la presión de  $CO_2$  en el agua subterránea (escape) por contacto directo con la atmósfera, fenómeno que se produce cuando el agua subterránea descarga en forma natural a la superficie del terreno.

Otros carbonatos como la magnesita, estroncianita (figuras 6.62 y 6.63) manifiestan condiciones de subsaturación en las aguas de menor salinidad, aunque para el caso de la estroncianita las condiciones de subsaturación se mantienen para algunas de las muestras de mayor salinidad. Para el caso de la estroncianita, las muestras de la zona de Beta Santa Mónica manifiestan preferentemente condiciones de saturación; en contraste la mayoría de los pozos de la región de Cuatrociénegas se encuentran subsaturados con relación a este mineral.



Figura 6.60 Índice de saturación con relación a la calcita



Figura 6.61 Índice de saturación con relación a la dolomita



Figura 6.62 Índice de saturación con relación a la magnesita



Figura 6.63 Índice de saturación con relación a la estroncianita

#### 6.7.1.2 Geoquímica de sulfatos

Con relación a sulfatos como el yeso (CaSO<sub>4</sub>) y la celestita (SrSO<sub>4</sub>), los valores de índice de saturación determinados indican que para las aguas HCO<sub>3</sub>-Ca se presentan condiciones de subsaturación, así como para algunas muestras de la familia SO<sub>4</sub>-Ca. Para el caso de la celestita las condiciones de equilibrio con el agua subterránea se identifican a partir de 1300-1500 µmhos/cm de conductividad eléctrica; para el yeso aproximadamente a partir de 3000 µmhos/cm. La mayoría de las muestras de agua pertenecientes a la familia SO<sub>4</sub>-Mixta (que principalmente se identificaron en el Valle de El Hundido) se encuentran en equilibrio con el yeso, así como las asociadas con la SO<sub>4</sub>-Na; al parecer al alcanzar las condiciones de saturación con el yeso, se condiciona la evolución de la familia SO<sub>4</sub>-Ca a la SO<sub>4</sub>-Mixta.

El incremento paulatino de los valores de índice de saturación con relación a la salinidad que se determinó para las muestras de agua subterránea (figura 6.64), es congruente con la incorporación de sulfato al agua subterránea a partir de disolución de yeso de origen marino. En la figura 6.65 se presenta la relación entre las concentraciones de calcio y sulfato en el agua subterránea, como referencia adicional se presenta la línea que representa la disolución del yeso.



Figura 6.64 Índice de saturación con relación al yeso



Figura 6.65 Índice de saturación con relación a la celestita

La deficiencia en la concentración de calcio que se establece a partir de la disolución del yeso, se relaciona con precipitación de calcita y/o por intercambio iónico con sodio.

En la figura 6.66 se presenta la evolución que sigue la composición química del agua subterránea cuando un agua subterránea en equilibrio con la calcita, disuelve yeso precipitando calcita, es claro que la composición química de las muestras de agua es un poco diferente, con un menor contenido de calcio, lo que probablemente se relacione con procesos de intercambio catiónico, en donde sodio (y probablemente potasio) de la matriz arcillosa se intercambia con calcio (y magnesio) del agua subterránea.



Figura 6.66 Relación entre las concentraciones de calcio y sulfato

#### 6.7.1.3 Procesos de dolomitización

De acuerdo con las condiciones geológicas que se presentan en los Valles de Cuatrociénegas y El Hundido, las evidencias hidrogeoquímicas hasta ahora analizadas parecen sugerir que el agua subterránea ha estado en contacto con materiales geológicos que contienen minerales como la calcita, dolomita y yeso (o anhidrita). En estas condiciones, el agua subterránea funciona como un agente geológico que produce un fenómeno conocido como dedolomitización, que en conjunto da como resultado de que debido a la disolución de yeso (o anhidrita) la dolomita se disuelve y la calcita precipita; el proceso de dedolomitización ha sido reportado en diversas partes de los Estados Unidos de América (por ejemplo Plummer et al. 1990) y que hasta ahora no había sido reportado en nuestro país.

Debido a que el agua subterránea de la zona de estudio está en equilibrio con la calcita y dolomita (figuras 6.60 y 6.61) entonces aplica la siguiente reacción:

$$Ca^{+2} + CaMg(CO_3)_2 \leftrightarrow 2CaCO_3 + Mg^{+2}$$

Por lo que considerando la constante de equilibrio de esta reacción química, la relación  $[Mg^{+2}]/[Ca^{+2}]$  permanece constante, de acuerdo con la siguiente expresión (considerando 25° C):

$$K_{eq} = \frac{\left[Mg^{+2}\right]}{\left[Ca^{+2}\right]} = \frac{K_{dol}}{\left(K_{cal}\right)^2} = \frac{10^{-17.09}}{\left(10^{-8.48}\right)^2} = 0.8$$

La disolución de anhidrita o yeso se desarrolla en términos generales de la siguiente manera, liberando calcio y sulfato al agua subterránea

$$CaSO_4 \rightarrow Ca^{+2} + SO_4^{-2}$$

El incremento de la concentración de calcio debido a la disolución de yeso ocasiona la precipitación de calcita. A medida de que la calcita precipita, la concentración de carbonato disminuye, produciendo que se disuelva la dolomita y el consiguiente incremento de magnesio. Cuando el magnesio se incrementa el calcio se incrementa también (o sea que no todo el calcio que se genera de la disolución del yeso precipita), de tal modo que la disolución del yeso en estas condiciones induce la transformación de dolomita a calcita en la roca calcárea y produce agua subterránea en la que a medida de que se desarrolla la interacción agua/material geológico, se incrementan las concentraciones de magnesio, calcio y sulfato, produciendo además una disminución de la alcalinidad y en el pH.

Analizando el desarrollo de estas reacciones para la zona de estudio se tiene lo siguiente. El agua subterránea está en equilibrio o ligeramente sobresaturada con relación a la calcita y dolomita (figuras 6.60 y 6.61), sin importar la salinidad que presente. Para el caso del yeso, el agua pasa desde muy subsaturada hasta el equilibrio con este mineral (figura 6.64). Cuando el agua está en equilibrio con calcita y dolomita, de acuerdo con las condiciones descritas previamente, la relación  $[Mg^{+2}]/[Ca^{+2}]$  debe ser del orden de 0.8; sin embargo, el cálculo de esta relación para las muestras de agua resultó en un valor promedio ligeramente menor de 0.5. De este modo, la transferencia de masa está dada por la reacción siguiente.

$$1.5CaSO_4 + 0.5CaMg(CO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + Ca^{+2} + 0.5Mg^{+2} + 1.5SO_4^{-2}$$

De acuerdo por cada dos moles de calcita que precipitan, se disuelve un mol de dolomita. Esta reacción predice que la concentración de sulfato debe de incrementarse tanto con relación al calcio como al magnesio. En las Figuras 6.67 y 6.68 se presentan los datos resultantes para las muestras de agua subterránea de la zona de estudio y tomando en cuenta las familias HCO<sub>3</sub>-Ca, SO<sub>4</sub>-Ca y SO<sub>4</sub>-Mixta, ya que por los resultados obtenidos, se deduce que este proceso no aplica para las muestras de la familia SO<sub>4</sub>-Na. En ambos casos la tendencia de las muestras es bastante similar a la teórica deducida por medio de las reacciones. Las desviaciones que se detectan pueden estar relacionadas con la sobresaturación con relación a la calcita y dolomita, que presentan algunas de las muestras de agua subterránea, además de reacciones de intercambio catiónico.

De acuerdo con esto, el proceso de dolomitización se desarrolla tanto en el Valle de El Hundido como en la zona de Cuatrociénegas, ya que de acuerdo con las figuras 6.67 y 6.68 las tendencias que manifiestan las concentraciones de las muestras de agua subterránea de ambas regiones así lo sugieren. Adicionalmente, desde el punto de vista geológico, se ha determinado que en ambas regiones el agua subterránea circula por medios geológicos de litología y composición química relativamente similar.

Controles de solubilidad para elementos traza.- Considerando elementos traza como el estroncio y el bario, los sulfatos celestita y barita presentan un comportamiento contrastante. Para el caso de la celestita (figura 6.65), que presenta un comportamiento relativamente similar al identificado para el caso del yeso. Por otro lado, la barita presenta condiciones de saturación prácticamente para la totalidad del intervalo de salinidad del agua subterránea (figura 6.69); esto es debido a que la constante de equilibrio de la reacción de disolución de barita es bastante menor que la correspondiente a la disolución de celestita, por lo que la primera es mucho más insoluble que la segunda. En muchas de las muestras se identifican condiciones de sobresaturación con relación a este mineral, lo que puede estar relacionado con el hecho de que la adición de sulfato a partir del yeso es una reacción más rápida que la precipitación de barita.



Figura 6.67 Comparación entre las concentraciones de sulfato y calcio



Figura 6.68 Comparación entre las concentraciones de sulfato y magnesio



Figura 6.69 Índice de saturación con relación a la barita

## 6.7.2 Condiciones redox

De acuerdo con las mediciones realizadas en campo durante la toma de muestras de agua subterránea, se establece que en general, en los Valles de Cuatrociénegas y El Hundido se detectaron concentraciones de oxígeno mayores a 1.0 mg/l (aeróbicas) y condiciones redox oxidantes. En la zona geográfica de Beta Santa Mónica, los valores del potencial redox fueron un poco menores que los detectados por ejemplo en la zona de Cuatrociénegas, las aguas de mayor salinidad fueron las que presentaron los menores valores de potencial redox.

En la figura 6.70 se presenta la distribución espacial de los valores de oxígeno disuelto en el agua subterránea de la zona de estudio. Aunque es factible en el algunos casos los valores de oxígeno disuelto detectados puedan estar afectados por las condiciones de extracción en los pozos o descarga en los manantiales, el hecho de que en general concuerden con los valores de potencial redox y las concentraciones de algunos elementos traza de alguna manera establece que las modificaciones que pudieran presentarse son relativamente menores.



Figura 6.70 Distribución de oxígeno disuelto en el agua subterránea

En las condiciones oxidantes que predominan en la zona de estudio, la especie de hierro que predomina en el agua subterránea es el hierro férrico (Fe<sup>+3</sup>) que en general tiende a formar fases insolubles en agua. En la Figura 6.71 se presenta el índice de saturación (calculado con el programa PHREEQC y tomando en cuenta los valores de potencial redox medidos en campo con el electrodo de platino) de la fase Fe(OH)<sub>3</sub> (amorfa) con relación a la salinidad del agua subterránea. Esta fase es una de las principales que se forman en condiciones oxidantes y existe hierro férrico presente.

De acuerdo con dicha diagrama para el amplio intervalo de salinidades detectadas en el agua subterránea, la totalidad de las muestras están en general ligeramente sobresaturadas con relación al  $Fe(OH)_3$  (amorfa) también conocida como ferrihidrita. Esta situación es congruente con lo establecido por Drever (1997) quien establece que para los valores de potencial redox identificados en la zona de estudio (entre 0.3-0.1 volts) los niveles de potencial redox a menudo están controlados por reacciones que involucran a  $Fe^{+2}$ - $Fe(OH)_3$ .



Figura 6.71 Índice de saturación con relación a la ferrihidrita

Otro indicador importante de las condiciones redox que prevalecen en el agua subterránea se tiene en compuestos de nitrógeno como el nitrato. La atmósfera constituye un almacén de nitrógeno en forma de gas nitrógeno (79% del contenido total de gases). Sin embargo, antes de estar en posibilidades de ser asimilado por las plantas, el nitrógeno atmosférico debe combinarse con el oxígeno o hidrógeno. Debido a que puede presentarse en diversos estados de oxidación, el nitrógeno puede formar una gran variedad de compuestos (amonia, ion amonio, gas nitrógeno, nitrito, nitrato). La transformación de los compuestos de nitrógeno puede llevarse a cabo a través de diferentes mecanismos: i) fijación, ii)

amonificación, iii) síntesis, iv) nitrificación, y v) denitrificación., reacciones en las que microorganismos específicos juegan un papel importante. La fijación se refiere a la incorporación de nitrógeno gaseoso inerte en un compuesto químico tal que pueda ser asimilado por plantas y animales. La amonificación se refiere a cambio de nitrógeno orgánico a amonio, por lo que se presenta durante la descomposición de tejido animal y de las plantas. La síntesis se refiere a los mecanismos bioquímicos que utilizan amonio o nitrato para formar proteínas y otros compuestos con nitrógeno.

La nitrificación consiste en la oxidación biológica del ion amonio, lo que se presenta en dos pasos, primero a nitrito y posteriormente a nitrato, reacciones que requieren de cierto tipo bacterias quimioautotróficas para que se lleven a cabo (nitrosomonas para el paso de  $NH_4^+$  a  $NO_2^-$ ; nitrobacterias para el paso de  $NO_2^-$ ; a  $NO_3^-$ ;), por lo que incluyen reacciones biológicas de bioasimilación.

Entre los compuestos manufacturados por el hombre que se aplican se incluyen compuestos diversos que contienen nitrógeno, fósforo y potasio (Figuras 6.72 y 6.73). Adicionalmente, es muy común utilizar los desechos orgánicos del ganado para mejorar el suelo de los cultivos, producto que también genera una importante fuente de nitrógeno, aunque de acuerdo con la información que se obtuvo en campo, para los Valles de El Hundido y Cuatrociénegas no constituye una práctica muy desarrollada.



Figura 6.72 Fertilizantes utilizados para los cultivos de alfalfa en el Valle de El Hundido

Debido a la baja solubilidad de los compuestos que forman tanto el fósforo como el potasio, generalmente no causan mayores problemas al agua subterránea a causa de estas prácticas; adicionalmente no existen efectos dañinos comprobados en la salud humana asociados con estos elementos. En contraste, el nitrógeno produce efectos muy conocidos en la salud humana: *i*) metahemoglobina, un desorden en la sangre que ocasiona problemas en la oxigenación, sobre todo en los infantes o en fetos y *ii*) la posibilidad de formar compuestos cancerígenos (por ejemplo, nitrosamidas) para el humando al tomar agua contaminada con exceso de nitrógeno. Afortunadamente, en el caso de la zona de estudio el agua subterránea no se utiliza para consumo humano.



#### Figura 6.73 Fertilizantes utilizados para los cultivos de alfalfa en el Valle de El Hundido

Los nitratos constituyen uno de los contaminantes más problemáticos y distribuidos en el mundo. Para comprender los aspectos fundamentales de los nitratos en el agua subterránea, es necesario entender el ciclo del nitrógeno desde una perspectiva química y microbiológica, reconocer la relación del ciclo del nitrógeno con el suelo y agua subterránea, delimitar las fuentes naturales y antropogénicas del nitrato al agua subterránea e identificar los efectos en la salud de concentraciones excesivas de nitrato en el agua subterránea.

Entre los fertilizantes utilizados en el Valle de El Hundido, algunos incluyen amonio (sulfato de amonio, fosfato monoamónico, urea, amoniaco, abono), por lo que mediante el proceso de nitrificación se oxidan a compuestos con nitrato que puede disolverse en los retornos de riego para movilizarse hacia el subsuelo. La oxidación del amonio a nitrato puede describirse dela siguiente manera:

$$NH_4^{+} + 2O_2 \rightarrow NO_3^{-} + 2H^{+} + H_2O$$

Entre los factores ambientales que tienen influencia en la velocidad de nitrificación se tienen: i) temperatura, ii) pH, iii) alcalinidad del agua, iv) fuente de carbono inorgánico, v) población de bacterias, vi) concentración de amonio.

La aplicación de fertilizantes en el Valle de El Hundido, ha impactado en forma importante la calidad del agua subterránea en esta región. En la Figura 6.74 se presenta la relación de la concentración de nitrato con respecto al cloruro, además de que se propone el valor correspondiente al fondo geoquímico (concentración de origen natural). Tomando en cuenta la distribución espacial de las concentraciones (Figura 6.75), se identifica claramente que, como resultado de las actividades agrícolas intensivas que se desarrollan en el Valle de El Hundido, en esa región se detectan las mayores concentraciones de nitrato.

En el Valle de Cuatrociénegas las concentraciones de nitrato son mucho menores que las identificadas en el Valle de El Hundido, el único valor relativamente elevado de esa región se relaciona seguramente con efectos de infiltración de aguas residuales. Sin embargo, es importante mencionar que si bien actualmente los manantiales y pozas de la zona de Cuatrociénegas en general no evidencian impacto antropogénico por contaminación difusa relacionada con actividades agrícolas, algunos de los pozos de esta región si presentan evidencias de impacto en la calidad del agua.



Figura 6.74 Relación entre las concentraciones de cloruro y nitrato



Figura 6.75 Distribución del nitrato en el agua subterránea

La denitrificación se refiere a la reducción biológica del nitrato a nitrógeno gas, reducción que se desarrolla en varios pasos y que también requiere de un cierto tipo de bacterias (*Pseudomonas, Acinetobacter, Bacillus, Micrococcus, Gluconobacter, Alcaligenes, Halobacteriums, Thiobacillus*, entre otras). La reacción general es la siguiente:

 $NO_3$  + Carbono Orgánico  $\rightarrow$   $NO_2$  + Carbono Orgánico  $\rightarrow$   $N_2$  +  $CO_2$  +  $H_2O$ 

Cuando en el medio coexisten oxígeno y nitrato, las bacterias generalmente preferirán utilizar el oxígeno para la oxidación de la materia orgánica, ya que rinde más energía. Por lo tanto, la denitrificación se presenta preferentemente en condiciones anóxicas, (aunque no es el caso para todas las bacterias, ya que algunas de ellas pueden reducir nitratos con valores de oxígeno disuelto entre 0.0 y 2.0 mg/l) que se desarrollan preferentemente en el subsuelo. Para que las reacciones de denitrificación se desarrollen en el subsuelo, se requiere además de un compuesto que done electrones y de bacterias que catalizen las reacciones, de condiciones anaeróbicas que potencialmente se generan en el subsuelo (Freeze y Cherry, 1979).

La información disponible no permite establecer en forma definitiva si las reacciones de denitrificación se llevan a cabo en la zona de estudio. Sin embargo, una evidencia que sugiere que las reacciones de denitrificación se desarrollan en el subsuelo de la zona de estudio, se tiene cuando se relaciona la concentración de nitrógeno de nitrato con la de cloruro. El movimiento del nitrato y cloruro en el subsuelo es muy similar; pero debido a que el cloruro no es afectado por procesos redox y biológicos, la relación N-NO<sub>3</sub>-Cl indicará el mecanismo que atenúa la concentración de nitrato en el subsuelo. Desde esta perspectiva, cuando la relación nitrato: cloruro se mantiene relativamente constante, es un indicador de ausencia de reacciones de atenuación. En contraste una disminución en la relación nitrato: cloruro sugiere el desarrollo de reacciones de denitrificación. En la figura 6.76 se presenta la relación nitrato:cloruro con respecto de la salinidad del aqua subterránea, es muy claro que conforme se incrementa la salinidad de las muestras el valor de la relación disminuye marcadamente, lo que sugiere la presencia de reacciones de denitrificación que atenúan la concentración de nitrato que tienen los retornos de riego en la superficie del terreno.



Figura 6.76 Relación entre la salinidad y N-NO<sub>3</sub>/CI

De acuerdo con las condiciones redox oxidantes que prevalecen en el agua subterránea, el comportamiento geoquímico de algunos elementos traza les permite ser relativamente estables en la solución, aunque factores como su disponibilidad en los materiales geológicos también es importante. Por ejemplo el cromo que generalmente forma oxianiones relativamente estables en condiciones oxidantes, debido a que los valores que presenta en las rocas calcáreas y presenta valores muy bajos, prácticamente todos por abajo del límite de detección del método analítico utilizado.

	ESQUEMA CONCEPTUAL QUE RELACIONA LA DIRECCIÓN DEL FLUJO CON LA EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA						
	Valle de Cuatrociénegas						
	Flujo subterráneo						
	REACCIONES Y PROCESOS PREDOMINANTES: Interacción con carbonatos y sulfatos, intercambio catiónico, disolución de minerales arcillosos y concentración por evaporación $HCO_3$ - $Ca \longrightarrow SO_4$ - $Ca \longrightarrow SO_4$ - $Mixta \longrightarrow SO_4$ - $Na$ Incremento de la salinidad						
	500-8000 mg/l SDT1000-2000 mg/l SDT2000-4000 mg/l SDTMás de 30,000 mg/l SDTNotorio impacto antropogénico por retornos de riego (valle del Hundido), identificado por la presencia de nitrato por arriba del valor de fondo geoquímicoMás de 30,000 mg/l SDT						
-	Valle de El Hundido Flujo subterráneo						

# Figura 6.77 Esquema conceptual que relaciona dirección del flujo con la evolución de la composición del agua subterránea

#### 6.7.3 Modelo conceptual de funcionamiento isotópico

Los resultados permitieron establecer un modelo conceptual de funcionamiento isotópico e hidroquímico a lo largo del flujo, desde las zonas donde se origina la recarga hasta los sitios de descarga en las partes bajas de los valles.

Para ilustrar la evolución isotópica e hidroquímica del agua subterránea a lo largo del flujo, se han elaborado dos secciones transversales representativas del subsuelo. Estas secciones son la A - A' que va de de la sierra Alamitos atraviesa la sierra La Fragua y termina en la sierra Madera en dirección S - N y la B – B' que va de la sierra El Venado, atraviesa las sierras La Fragua y San Marcos y termina en la porción oriental del valle de Cuatrociénegas, en dirección SW - NE (figura 6.78).

La sección A – A' muestra que la recarga se lleva acabo por infiltración de la precipitación pluvial en la sierra Alamitos, a una cota promedio de 1458 msnm, produce un flujo subterránea a través de la estructura caliza que alimenta al sistema de pozos Beta Sta. Mónica, Sta. Teresa de Sofía y Florentino Rivera

(figura 6.79). El agua que captan los pozos, perforados en roca caliza, es del tipo  $SO_4$ -Ca y tiene una composición isotópica característica de haberse originado en la sierra Alamitos. Asimismo, el flujo subterráneo recarga al acuífero de materiales detríticos del centro de El Hundido y es captado por pozos de Sta. Teresa de Sofía y Florentino Rivera. Por interacción del agua subterránea con los materiales granulares evoluciona a  $SO_4$ -Mix y a  $SO_4$ -Na en el centro del valle.

Los resultados de carbono-14 indican que el flujo subterráneo tiene un tiempo de residencia, desde que se infiltra el agua de lluvia hasta el momento de su captación por los aprovechamientos existentes, superior a 1000 años.

En la parte alta de la vertiente sur de la sierra la Fragua hay pequeñas contribuciones que circulan por conducto de flujo preferencial hacia El Hundido que no contribuyen en forma efectiva en la recarga del acuífero subyacente.

La lluvia infiltrada en la sierra en ambas vertientes de la sierra La Fragua origina un flujo subterráneo que recarga al valle de Cuatrociénegas. Por evaporación intensa se forman precipitados de CaSO<sub>4</sub> que se depositan en la superficie del terreno formando dunas de yeso. Asimismo, la lluvia infiltrada en la vertiente sur de la sierra Madera a 1585 msnm alimenta a los pozos y pozas que se localizan en sus proximidades, hacia el extremo norte de Cuatrociénegas (P-10, poza Anteojo).

La sección B – B' muestra que la recarga se lleva acabo por infiltración de la precipitación pluvial en la sierra La Fragua, y produce un flujo que recarga el valle de Cuatrociénegas y alimenta al sistema de pozas que se localizan en las proximidades del extremo norte de la sierra San Marcos (figura 6.80). La sierra San Marcos también contribuye a la recarga de las pozas.

La sección comprendida en el valle de El Hundido muestra la evolución hidroquímica del flujo, que va de SO<sub>4</sub>-Ca (pozos 44, 81, 86 de El Pilar) pasando a SO<sub>4</sub>-Mix (pozos 39, 41, 82, 83, 84, 85, 115 de El Pilar) y posteriormente a SO<sub>4</sub>-Na (pozos 37 y 139) en el centro del valle.

La evolución hidroquímica del agua subterránea en Cuatrociénegas va de  $HCO_3$ -Ca (pozos cercanos a la sierra Purísima) a  $SO_4$ -Ca en la pozas que no sufren evaporación intensa (pozas más cercanas a la sierra San Marcos) a  $SO_4$ -Mix en las pozas que se localizan en el centro de la parte oriental de Cuatrociénegas (P-11, P-12, P-13, P-15).

Los resultados de carbono-14 indican que el tiempo de residencia del flujo que alimenta al sistema de pozas y, en general del agua subterránea del valle, es de menos de 1000 años.



Figura 6.78 Secciones transversales utilizadas para mostrar la evolución isotópica e hidroquímica del agua subterránea en dirección del flujo



Figura 6.79 Modelo conceptual de funcionamiento isotópico e hidroquímico del agua subterránea en dirección S-N de la sierra Alamitos hasta la sierra Madera



Figura 6.80 Modelo conceptual de funcionamiento isotópico e hidroquímico del agua subterránea en dirección SW-NE desde el Valle El Hundido hasta el Valle de Cuatrociénegas

## 7. MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO

## 7.1. Introducción

Un modelo conceptual se puede definir como una representación gráfica de los sistemas de flujo subterráneo dentro de la zona de estudio analizada, construida con la finalidad de simplificar y organizar la información hidrogeológica recopilada y generada (Anderson y Woessner, 1992). Debido a que una incorporación íntegra de la totalidad de la complejidad del sistema analizado no es posible, en su desarrollo se deben de incluir simplificaciones válidas de las condiciones hidrogeológicas detectadas en el área de estudio, condición que es de fundamental interés en la modelación numérica. Lo anterior es de vital importancia porque es bien conocido que muchos de los errores asociados con la modelación numérica de sistemas de flujo subterráneo, a menudo se relacionan con deficiencias o limitaciones en el modelo conceptual.

Con la intención de lograr que el modelo conceptual fuera consistente en la totalidad de los aspectos investigados, durante el desarrollo del modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico de los Acuíferos de Cuatrociénegas y El Hundido, Coahuila se integró la información geológica, hidrogeológica, geofísica e hidrogeoquímica disponible, dentro del marco de referencia que proponen los sistemas de flujo de agua subterránea.

#### 7.2. Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico

La geometría de los sistemas acuíferos se definió en base a la interpretación geológica, geofísica e hidrogeológica principalmente. La interpretación hidrogeológica, representado mediante las secciones geológicas permitió definir las zonas con material de menor permeabilidad (basamento hidrogeológico). La profundidad del basamento hidrogeológico varía de los –300 a los 500 msnm (figura 7.1). Una característica importante es la menor elevación (500 msnm) que se encuentra en la porción SW de la Sierra La Fragua, la cual favorece la formación de un parteaguas hidrodinámico entre los acuíferos de El Hundido y de Cuatrociénegas.



#### Figura 7.1 Configuración del basamento hidrogeológico de la zona de Cuatrociénegas-El Hundido, Coahuila.

Por otro lado, los sondeos geofísicos permitieron definir las zonas saturadas con agua en la partes centrales de ambos valles.

Otra herramienta que se aplicó para definir la dirección de flujo del agua subterránea fue la información geoquímica (figura 6.79). Con este fin se elaboró una sección hidrogeoquímica, la cual nos indica la evolución de las aguas subterráneas desde las zonas de recarga hasta las zonas de descarga, incrementándose la concentración de SDT en la dirección de flujo del agua subterránea. Asimismo, desde la zona de recarga hacia las zonas de descarga, ya que al incrementarse los tiempos de residencia en el sentido del flujo, el agua se mantiene en contacto mayor tiempo con la matriz del material que conforma el acuífero.

Finalmente se propuso el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico de ambos valles. Las zonas de recarga están representadas por las sierras que circundan a ambos valles; siendo la Sierra de Alamitos la principal fuente de recarga del Acuífero de El Hundido y La Fragua para la zona de Cuatrociénegas.

Por lo que respecta al Valle de El Hundido, se identificaron dos acuíferos que funcionan como libres, el primer de carácter granular alojado en los sedimentos producto de la erosión de las sierras circundantes con espesores del orden de los 130 m en sus porción central; y el más profundo alojado en el material calcáreo de la Formación Aurora/Treviño con espesores de hasta 300 m.



Figura 7.2 Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico de los valles El Hundido y Cuatrociénegas.

#### 7.3. Sistemas de flujo regional

Los sistemas de flujo regionales son los más importantes para ambos valles. Los sistemas de flujo regionales proporcionan la principal recarga a los acuíferos, lo cual fue confirmado por los tiempos de residencia (> 1000 años) de las aguas subterráneas de ambos valles. La recarga principal se da en las partes más altas que circundan a los valles, producto del agua de precipitación y su posterior infiltración en el medio fracturado y karstificado. Posteriormente, esta agua, en promedio, se mueve muy lentamente para recorrer varias decenas de kilómetros a través de las calizas y llegar hasta las zonas de descarga en las porciones centrales de ambos valles. Los mecanismos de descarga se llevan a cabo mediante procesos de evapotranspiración en ambos valles; mientras que sólo en el valle de Cuatrociénegas se tienen de manera adicional los manantiales (pozas) como zonas de descarga del agua subterránea.

## 7.4. Sistemas de flujo intermedio

Los sistemas de flujo intermedio corresponden a aguas de infiltración en las partes relativamente cercanas a los valles, las cuales tienen tiempos de residencia de varias decenas a centenas de años. Dados los resultados isotópicos, estos sistemas de flujo no son los más importantes en la recarga de los acuíferos, no obstante si contribuyen a los volúmenes que se presentan en la descarga de los sistemas.

#### 7.5. Sistemas de flujo local

El sistema de flujo local esta representado por las zonas de riego intensivo tanto en El Hundido como en Cuatrociénegas donde los excesos de riego permiten la infiltración del agua al acuífero, evidenciado por la presencia de nitratos y tritio. También se identifico la recarga local por infiltración en los canales de distribución del agua de las pozas en la zona de Cuatrociénegas.

## 8. MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Uno de los métodos disponibles más importantes que actualmente existen para procurar comprender el comportamiento cuantitativo del flujo de agua subterránea, es por medio de la utilización de un modelo matemático. Asimismo, la simulación matemática es un medio que permite validar el modelo conceptual propuesto.

#### Ecuaciones de flujo del agua subterránea

El movimiento del agua subterránea en tres dimensiones a través de un medio poroso rígido saturado, considerando un dominio heterogéneo y anisotrópico, está descrito por la ecuación diferencial parcial (McDonald y Harbaugh, 1988) siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(Kxx\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(Kyy\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(Kzz\frac{\partial h}{\partial z}\right) = Ss\frac{\partial h}{\partial t} - W^* \qquad \text{Ecuación 8.1}$$

donde:

x, y, z	Coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de los ejes
	principales de la conductividad nidradiica [L].
Kxx, Kyy, Kzz	Valores del tensor de la conductividad hidráulica [LT <sup>-</sup> ]
Н	Carga hidráulica [L].
W*	Flujo volumétrico por unidad de volumen, representa fuentes y/o
	sumideros de agua [T <sup>-1</sup> ].
Ss	Coeficiente de almacenamiento del medio poroso [L <sup>-1</sup> ].
Т	Tiempo [T].

La ecuación de flujo 9.1 deben satisfacer las condiciones iniciales y de frontera dadas por:

- h (xi, 0) = ho(xi)
- h (xi, t)| Γ1 = ho (xi, t)
- Vi ni | Γ 2 = -Vn (xi, t)

donde:

- ho carga inicial
- h carga preestablecida en la frontera de tipo Dirichlet  $\Gamma$ 1.
- N (n1,n2, n3) vector unitario normal de una frontera tipo Neumann  $\Gamma$ 2.
- Vn flujo lateral preestablecido por unidad de área en una frontera  $\Gamma$ . Si Vn es positivo, entonces el flujo que entra al dominio, y si es negativo el flujo que sale del dominio.
Cuando  $\Gamma$ 2 es una frontera impermeable, el flujo que entra o sale a través de ella es nula, esto es Vn=0, por lo tanto Vi ni |  $\Gamma$ 2 = 0, lo que equivale a decir que en una frontera impermeable se utiliza frontera tipo Neumman.

# Código numérico

La ecuación 8.1, combinada con las condiciones iniciales y de frontera adecuadas, representa una expresión matemática del sistema de flujo de agua subterránea. La simulación numérica de los acuíferos El Hundido y Cuatrociénegas, se realizó mediante el código numérico VISUAL MODFLOW versión 3.1, distribuido por Waterloo Inc. Este código presenta una interfase gráfica del programa MODFLOW desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. El programa VISUAL MODFLOW resuelve numéricamente la ecuación diferencial parcial mediante el método de las diferencias finitas. El sistema de ecuaciones resultante es resuelto mediante alguno de los cuatro algoritmos disponibles: el SIP (Procedimiento altamente implícito), SOR (Relajaciones sucesivas transversales), PCG (Gradiente conjugado precondicionado) y el WHS (gradiente biconjugado).

Las capas (o Acuíferos) se pueden simular como libres, confinadas, o una combinación de ambas. La flexibilidad del programa hace posible la incorporación de diferentes esfuerzos hidrogeológicos externos al sistema tales como pozos, recarga areal, evapotranspiración, ríos y drenes.

En la especificación del problema particular de simular el flujo subterráneo en el los acuíferos El Hundido y Cuatrociénegas, y para estar en condiciones de resolver la ecuación diferencial que describe el flujo de agua en el acuífero, se requiere generar un modelo de sitio específico. Para lograr este fin es necesario: *i*) definir la geometría tridimensional del medio geológico que contiene el agua subterránea, *ii*) identificar las propiedades hidráulicas de los materiales en donde se desarrolla el flujo subterráneo. *iii*) especificar condiciones de frontera congruentes con el modelo conceptual de funcionamiento, *iv*) establecer condiciones iniciales de flujo de agua subterránea y de cargas hidráulicas y *v*) realizar evaluaciones del término "flujo volumétrico de agua" que en este caso representa las extracciones por bombeo principalmente.

## 8.1. Diseño

## 8.1.1 Discretización Espacial

## Discretización horizontal

La aplicación del código numérico empleado para resolver el modelo matemático, con base en la información hidrogeológica de la zona, requirió de su adecuación a las condiciones locales. Por lo tanto, el medio por donde se desplaza el agua subterránea se dividió en bloques, sobreponiendo una malla de diferencias finitas sobre un mapa geológico escala 1:50,000 del área de estudio. Con la finalidad de

que la mayoría de los bloques coincidieran con la zona en donde se tiene mayor cantidad de información.

La malla propuesta, tiene 93 kilómetros de largo y 70 kilómetros en sentido perpendicular y se encuentra alineada con la dirección principal de flujo subterráneo.



Figura 8.1. Malla de diferencias finitas.

La solución del modelo de simulación es dependiente de las condiciones establecidas para las celdas incluidas en la malla de diferencias finitas, por lo que de acuerdo con las condiciones que rigen la discretización del dominio de flujo subterráneo, se consideran: *i*) activas, *ii*) inactivas. El primer caso incluye a las celdas en los materiales geológicos en los que existe desplazamiento de agua subterránea, mientras que el segundo abarca las celdas en las que el flujo de agua subterránea no tiene lugar, y por lo tanto representan zonas impermeables.

## **Discretización Vertical**

Durante la etapa de implementación del modelo se realizaron revisiones de la información relativa a la geometría de los materiales geológicos del subsuelo. De acuerdo con las condiciones hidrogeológicas definidas y para los fines de simulación del flujo de agua subterránea en el acuífero de El Hundido-Cuatrociénegas el medio en donde se transmite el agua subterránea fue subdividido verticalmente en dos unidades hidrogeológicas principales, las cuales a su vez tienen variaciones litológicas importantes que producen un cambio en el comportamiento hidráulico. Así, se propuso una capa para la unidad hidrogeológica correspondiente al material aluvial y una capa para el material calcáreo.



Figura 8.2. Discretización vertical

# 8.1.2 Discretización temporal

Con el análisis de los datos disponibles y a partir de la facultad de discretización del tiempo de simulación que tiene el código numérico utilizado, se propusieron los siguientes períodos de esfuerzo: *i*) condiciones iniciales que representan las condiciones naturales previas a la explotación por pozos y que por requerimientos del código numérico, se simuló en primera instancia como estado estacionario sin bombeo, *ii*) a partir de las condiciones piezométricas y de recarga y descarga establecidas previamente, comienza un período transitorio, en donde se aplicó la extracción de agua subterránea promedio registrada para 40 años, con lo que se reproducen las condiciones de bombeo hasta noviembre del 2004, *iii*) la investigación de la eventual respuesta futura del sistema de flujo de agua subterránea, ante diferentes escenarios de hasta por 500 años explotación, que se considerarán también en estado transitorio.

## 8.2. Condiciones iniciales y de frontera

#### **Condiciones iniciales**

La correcta definición de las condiciones iniciales y de frontera del modelo numérico permite obtener una solución congruente con el modelo conceptual propuesto para la dinámica de las aguas subterráneas.

Dado que la información disponible desde que se inició la explotación del acuífero no permite establecer la evolución de la dinámica de las aguas subterráneas, se propuso realizar la corrida inicial para obtener las condiciones naturales.



Figura 8.3. Configuración de las condiciones iniciales.

#### Condiciones de frontera

Matemáticamente, las condiciones de frontera incluyen la geometría del dominio y los valores de la variable dependiente (carga hidráulica) o sus derivadas normales a la frontera (Bear, 1972). En términos físicos, en aplicaciones de aguas subterráneas, las condiciones de frontera son generalmente de tres tipos: 1) carga constante (Tipo Dirichlet), 2) flujo constante (Tipo Neumman), y 3) carga dependiente (Tipo Cauchy). Las condiciones de frontera son determinadas de lo observado e interpretado tanto en el modelo conceptual de flujo del agua subterránea y de las consideraciones en la implementación del modelo conceptual al modelo numérico.

En cuanto a las condiciones de frontera que se aplicaron para la simulación en estado transitorio, fueron de flujo constante vertical (recarga areal), que representa la recarga por precipitación en las serranías.

## 8.3. Parámetros hidráulicos

#### Conductividad hidráulica horizontal

La distribución de la conductividad hidráulica horizontal utilizada en el modelo, se dedujo en primera instancia a partir de la interpretación (Theis, Neuman y recuperación de Theis) de 10 pruebas de bombeo realizadas en igual número de pozos ubicados dentro de la zona de estudio. Un análisis detallado de los valores de conductividad hidráulica calculados, se realizó en el capítulo correspondiente.

Las profundidades de los pozos con respecto a la posición de las capas del modelo, señalan que los valores de conductividad hidráulica obtenidos de la interpretación de los ensayos de bombeo corresponden aproximadamente a aquellos materiales contenidos en las dos capas. Considerando la profundidad y diseño de los pozos existentes, no fue posible realizar pruebas para obtener determinaciones de conductividad hidráulica horizontal del material geológico que corresponde a las zonas más profundas, por lo que con base a sus características litológicas, se propusieron valores teóricos adaptados de la bibliografía (Freeze y Cherry, 1979).

#### Conductividad hidráulica vertical

De acuerdo con las características del código numérico MODFLOW, el flujo entre las capas del modelo fue simulado como flujo vertical a través de una capa confinante. La facilidad de la capa confinante para transmitir el flujo vertical se expresa como un "factor de goteo" (unidades en 1/día) que consiste de la relación entre la conductividad hidráulica vertical y el espesor de la capa confinante. En este caso particular no existe una unidad confinante, por lo que el espesor considerado incluye la distancia entre los nodos de capas adyacentes verticalmente. La conductividad hidráulica vertical utilizada, es el promedio de las conductividades hidráulicas verticales de los materiales geológicos incluidos en dichas capas.

Por haberse realizado mediciones únicamente en el pozo de bombeo, las pruebas de bombeo no proporcionaron valores relativos a la magnitud de la conductividad hidráulica vertical del acuífero. Sin embargo, considerando la naturaleza

sedimentaria de las formaciones geológicas que constituyen el medio en donde se desplaza el agua subterránea, se infiere que la conductividad hidráulica vertical es cuando menos entre 50-100 veces menor que la horizontal (Freeze y Cherry, 1979; Domenico y Schwartz, 1998).

#### Rendimiento específico y almacenamiento específico

A partir de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas durante el presente trabajo y estudios anteriores, no es posible realizar estimaciones relacionadas con las magnitudes del coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico del material poroso, que compone el medio por donde se desplaza el agua subterránea en la zona de estudio.

Sin embargo, valores aproximados para el rendimiento específico del material poroso que compone el acuífero, fueron estimados con base en la litología señalada por los cortes litológicos disponibles relacionándolos con valores teóricos establecidos por Domenico y Schwartz (1998) y Freeze y Cherry (1979) para diferentes materiales geológicos. Los valores de rendimiento específico de materiales granulares están en función de su distribución granulométrica, pues fluctúan entre 0.2 para arenas limpias a valores menores de 0.05 en depósitos compactos compuestos por limos y arcillas.

## 8.4. Fuentes y/o sumideros.

Las fuentes y/o sumideros corresponden a componentes hidrológicos tales como los pozos de extracción, recarga, evapotranspiración, que se incorporan al dominio (acuífero) añadiendo o extrayendo un cierto volumen.

## Pozos (Volúmenes de extracción)

El volumen extraído a través de pozos es simulado como una fuente o sumidero en la ecuación del movimiento del agua subterránea.

Para la asignación de volúmenes de extracción para cada uno de los pozos se utilizó la información generada durante este estudio. La información incluida corresponde a las coordenadas, nivel del brocal y extracción anual. Y corresponde a los valores manejados en el capítulo correspondiente.

Finalmente se procedió a asignar los volúmenes de extracción por aprovechamiento por capa modelada de manera automática, ya que el programa Visual Modflow utiliza el intervalo ranurado y las elevaciones de las capas para calcular el volumen de extracción de un pozo a través de las capas que corta.



Figura 8.4. Pozos de extracción. Los pozos en rojo son activos, los pozos en azul son inactivos

## Recarga (retornos de riego)

El volumen de retorno de riego juega un papel muy importante en la solución de la configuración del nivel estático donde se encuentra la zona agrícola, ya que al representar una fuente de agua en aquellas celdas, la configuración del nivel estático resultante del proceso de modelación puede ser de gran importancia.

Mediante el análisis de los volúmenes de recarga areal hacia el sistema, se obtuvo que los componentes que tiene una importancia son la infiltración por lluvia y los retornos de riego.

## 8.5. Calibración

El proceso de calibración consiste en ajustar los valores de cargas hidráulicas calculadas por el modelo con aquellas observadas en campo para diferentes periodos de esfuerzo, de tal manera que la dinámica del agua subterránea cumpla lo definido en el modelo conceptual.

La comparación de cargas calibradas y modificadas se realizó mediante dos métodos, 1) el error absoluto medio y 2) la desviación estándar. Los algoritmos empleados se señalan a continuación:

#### Error Absoluto Medio (EAM)

La ecuación que define el EAM está dada por (Anderson y Woessner, 1992):

donde:  $EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |(\overline{hi} - hi)|$ 

Ecuación 8.2

*EAM* es el error absoluto medio

*n* es el número de observaciones

*hi* es la carga calculada por el modelo

*hi* es la carga calculada con el parámetro modificado

#### Desviación estándar

El análisis se realizó mediante la siguiente ecuación (Anderson y Woessner, 1992):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[ (\hbar i - hi) \right]^2}$$
 Ecuación 8.3

donde:

 $\delta$  es la desviación estándar de las cargas hidráulicas

n es el número de observaciones

*h* i es la carga calculada por el modelo

*hi* es la carga calculada con el parámetro modificado

Estos estadísticos se obtienen de manera automática mediante el programa Visual Modflow.



Figura 8.5. Curva de calibración del periodo 2004

## 8.6. Presentación de resultados (predicciones)

Una vez calibrado el modelo para las condiciones del 2004, se procedió a hacer predicciones de los posibles efectos de la extracción del Hundido en Cuatrociénegas. La primera opción que se ensayo fue mantener la extracción actual en ambos valles para un periodo de 500 años. Los resultados se presentan en las figuras 8.6 a 8.9, donde se puede apreciar que los efectos en los niveles de agua son mínimos en Cuatrociénegas.

La segunda opción de la simulación correspondió a suponer que la extracción en el Valle de El Hundido se multiplicaba por un factor de 10 (figuras 8.9 a 8.11). En

este caso, los niveles de agua en el Valle de Cuatrociénegas sufrieron efectos menores, no así en el Valle de El Hundido donde los abatimientos son considerables.



Figura 8.6. Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2004 (conservando la extracción actual).



Figura 8.7. Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2104 (conservando la extracción actual).



Figura 8.8. Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2204 (conservando la extracción actual).



Figura 8.9. Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2004 (multiplicando por 10 la extracción actual del Valle de El Hundido).



Figura 8.10. Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2104 (multiplicando por 10 la extracción actual del Valle de El Hundido).



#### Figura 8.11. Configuración de la elevación del nivel estático (msnm), capa 1, 2204 (multiplicando por 10 la extracción actual del Valle de El Hundido).

## 8.7. Análisis de sensibilidad

El análisis sensitivo determina que tan bien y en que grado afecta cada una de las variables de entrada en la solución del modelo. En los parámetros distribuidos en el área modelada, tales como la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y la recarga, entre otros; las variables de entrada deben especificarse para cada celda, aunque resulta imposible conocer dichos parámetros a ese nivel; por lo tanto, existe cierta incertidumbre de los resultados del modelo. El análisis de sensibilidad determina que parámetros tienen una mayor influencia en los resultados obtenidos y en consecuencia aquellos que producen mayores errores. Es importante señalar que el análisis de sensibilidad de cada parámetro es verificado de manera individual y que no analiza el efecto de dos o más parámetros a la vez.

El análisis de sensibilidad consiste en variar el valor del parámetro de interés en un porcentaje (incrementarlo o disminuirlo) con respecto del valor obtenido de la calibración del modelo. La variación de los valores deberá realizarse dentro de un rango aceptable, es decir, valores válidos de acuerdo a las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas. El procedimiento de análisis consiste en obtener la desviación estándar de las cargas hidráulicas, utilizando la misma ecuación que para la calibración, sólo que en este caso se compara la carga hidráulica calibrada con aquella resultante con el parámetro modificado.

Los parámetros que se analizaron son: conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y recarga. A continuación se presentará una discusión de los resultados:

# 8.7.1 Conductividad hidráulica

Para efectuar el análisis sensitivo de la conductividad hidráulica con respecto a los valores obtenidos durante el proceso de calibración se procedió a incrementar y disminuir en 10, 20 y 50 % los valores calibrados de las conductividades hidráulicas. Posteriormente se hizo un análisis de las cargas hidráulicas calibradas contra las obtenidas de cada una de las modificaciones indicadas anteriormente, mediante las ecuaciones del error absoluto medio (EAM) y la desviación estándar.

Los resultados de dicho análisis, nos indican que existe una influencia importante de la conductividad hidráulica con respecto a los valores obtenidos durante la calibración. Por ejemplo, cuando se incremento en un 50% el coeficiente de almacenamiento se obtuvo un EAM de 2.2 m y una desviación estándar de 3.3 m, mientras que para una variación en el parámetro del 10% sólo se observó un EAM de 0.5 m y una desviación estándar de 0.8 m. El comportamiento del análisis fue simétrico con respecto a los aumentos y disminuciones (figura 8.12).

## 8.7.2 Coeficiente de almacenamiento

El análisis de sensibilidad del coeficiente de almacenamiento obtenido durante la calibración del modelo matemático se efectuó aplicando el mismo procedimiento que para la conductividad hidráulica. Así, se observó que el coeficiente de almacenamiento tiene la influencia mayor de los tres parámetros analizados, registrándose valores de 2.8 m y 6 m, para el EAM y la desviación estándar, respectivamente (figura 8.12), cuando se disminuyó en un 50% el valor del parámetro original (calibrado). Este parámetro también presentó un comportamiento simétrico en cuanto al incremento y disminución de los valores.

# 8.7.3 Retorno de riego

De los tres parámetros analizados se identificó que el factor de la recarga vertical producto de la precipitación, retorno de riego y fugas es el menos importante de manera global para la zona de estudio. Se obtuvieron variaciones máximas de 1.6 m y 1.9 m para el EAM y la desviación estándar, respectivamente (figura 8.12).



A) ERROR ABSOLUTO MEDIO



En ambas figuras: K= Conductividad hidráulica, S= Coeficiente de almacenamiento y Rec= Recarga vertical.

Figura 8.12. Análisis de sensibilidad

# 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La evolución geológica de ambos valles es similar. Los estratos superficiales están constituidos por rellenos aluviales, y rocas calizas permeables depositadas en un ambiente marino. Dichos estratos están subyacidos por areniscas y rocas metamórficas que constituyen el basamento impermeable. Existe un cabalgamiento en la sierra La Fragua, intermedia a los valles.

Los perfiles de resistividad obtenidos con las mediciones de TEM, evidencian cambios importantes en las características físicas de las rocas, de tal manera, que se efectuó una zonificación geoeléctrica mediante 3 Unidades, para que en base al comportamiento espacial de los estratos más conductores poder asociarles permeabilidad y saturación.

De esta manera, se identificaron zonas potenciales para contener agua, a través de las Unidades Geoeléctricas denominadas U2b y U3a. Estas zonas con posibilidades de contener agua, se encuentran alojadas en materiales granulares y calizas de la formación Cupido.

El estrato más conductor denominado U2a, representa los materiales granulares poco permeables a impermeables.

En la zona se aprecia una amplia distribución de la unidad 3b, la cual representa zonas con potencial acuífero en rocas calizas, y se distribuye de manera irregular, ya que lateralmente se presentan una serie cambios litológicos poco permeables asociadas con la unidad U2c, que se asocia con una caliza arcillosa y que modifican el flujo del agua subterránea.

La zona que corresponde a lo que fue la Cuenca de Sabinas presenta un estilo estructural característicamente diferente a la zona que correspondió a la península de Coahuila. Mientras que para la cuenca de sabinas los plegamientos son más cerrados, para la zona de la Isla de Coahuila los plegamientos son más amplios. El estilo de deformación en la zona de La Península de Coahuila no incluye al basamento, mientras que para la zona de la Cuenca de sabinas se observa un estilo de decollemont (deslizamiento). El hecho de que la península de Coahuila presentara una mayor resistencia a los esfuerzos de deformación de la Orogenia Laramide nos lo indica el hecho que de manera general los buzamientos de las rocas emplazadas en esa región (Sierra Cuates de Australia, Sierra de la Fragua) son muy suaves, a excepción de las zonas de cabalgadura en la Fragua y la Madera.

Los niveles piezométricos medidos en la red de observación muestran que es imposible que haya flujo subterráneo de Cuatrociénegas a El Hundido

El modelo hidrodinámico propuesto representa de manera congruente al modelo conceptual, obteniéndose las zonas de recarga en las zonas de las serranías que circundan ambos valles.

La simulación numérica permitió integrar la información cualitativa y cuantitativa en un modelo hidrodinámico que permite simular las variaciones espacio-temporales de las cargas hidráulicas del sistema, así como los esfuerzos hidrogeológicos impuestos al sistema.

Se recomienda que se realicen más pruebas de bombeo para poder reducir la incertidumbre de los parámetros hidráulicos. Por otro lado, se deberá dar un seguimiento a las campañas piezométricas mediante la red de monitoreo que se propone en el capítulo correspondiente, a fin de auditar este modelo, y de ser necesario ajustar los parámetros con la información que se vaya generando.

La salinidad del agua subterránea en ambos valles se debe a la disolución de rocas de origen marino y no a la aportación de componentes de agua marina provenientes de un mar fósil. La composición isotópica de las aguas de ambos valles confirma lo anterior.

El contenido de sales disueltas en El Hundido es significativamente mayor que en Cuatrociénegas. Por tanto, las aguas de Cuatrociénegas no pueden ser recargadas por El Hundido.

El agua subterránea de Cuatrociénegas es isotópicamente diferente a la de El Hundido. En particular, las pruebas de carbono-14 demuestran que las aguas de El Hundido son mucho más antiguas que las de Cuatrociénegas. Debido a que no existen fuentes subterráneas de radiocarbono, es imposible que haya flujo subterráneo de El Hundido a Cuatrociénegas, ya que esto implicaría un rejuvenecimiento de las aguas.

La geoquímica y la isotopía permitieron concluir que el agua subterránea de ambos valles es de origen pluvial.

La isotopía permitió identificar las zonas de recarga. En particular, el agua de las pozas de Cuatrociénegas proviene mayormente de la precipitación sobre la Sierra de La Fragua y, en menor medida, sobre la sierra San Marcos.

El agua subterránea que alimenta a las pozas tiene tiempos de residencia de por lo menos mil años.

Se recomienda incluir las zonas de recarga efectiva de las pozas en la zona natural protegida de Cuatrociénegas, especialmente la Sierra de La Fragua.

También establecer un sistema de monitoreo de la contaminación antropogénica e investigar los ciclos del carbono, azufre y nitrógeno en el medio subterráneo de los dos valles.

La instalación de un sistema de medición de la precipitación pluvial con especial atención en las sierras donde se origina la recarga de los acuíferos de ambos valles. Al igual que instalar un sistema permanente de aforo de los caudales de descarga de las pozas.

Y desarrollar un sistema de monitoreo de los niveles y de la calidad del agua subterránea de ambos valles.

La estructura de cabalgamiento de la sierra La Fragua favorece la conformación de un parteaguas hidrodinámico subterráneo (domo) entre los valles de El Hundido y Cuatrociénegas, que constituye una barrera hidráulica al flujo entre ambos acuíferos, debido a que el agua subterránea no puede fluir de niveles piezométricos bajos a niveles piezométricos altos.

Aun multiplicando la extracción en El Hundido por diez, no habría efecto significativo sobre Cuatrociénegas durante 500 años. Por supuesto, los efectos en El Hundido serían tanto significativos como inmediatos.

#### **10. REFERENCIAS**

- Alessio Robles, V. (1938). *Coahuila y Texas en la época Colonial*. Editorial Cultura, México, D. F.
- Appelo, C. A. J., and D. Postma (1996). Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Anderson T.H. and V.A. Schmidt. (1983). The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean region during Mesozoic time. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 94, pp. 941-966.
- Anderson, M. P. and W. W. Woessner (1992). Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. 381 pp.
- Badino, Giovanni; Bernabei Tullio; De Vivo, Antonio; Giulivo, Italo; Savino, Giuseppe (2004). *Bajo el desierto, El misterio de las aguas de Cuatro Ciénegas, Italia, Editorial Grafiche Tintoretto (TV).* 1a. ed. 285 pp.
- Badino, Giovanni (2004). Condensaciones ocultas. Del libro de Badino, Giovanni; Bernabei Tullio; De Vivo, Antonio; Giulivo, Italo; Savino, Giuseppe, Bajo el desierto, El misterio de las aguas de Cuatro Ciénegas, Italia, Editorial Grafiche Tintoretto (TV). 1a. ed. pp 202-205.
- Baker, C. L. (1970). Geologic reconnaissance in the Eastern Cordilleran of Mexico. Geological Society of America, Special Paper 131.
- Barakat, F. and A. Handoufe (1998). Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheress.*, Vol. IX, 3, pp. 201-208.
- Bernabei, Tullio; De Vivo, Antonio; Giulivo, Italo (2004). El misterio de las aguas del desierto: una hipótesis para pasado y futuro, Del libro de Badino, Giovanni; Bernabei Tullio; De Vivo, Antonio; Giulivo, Italo; Savino, Giuseppe, Bajo el desierto, El misterio de las aguas de Cuatro Ciénegas, Italia, Editorial Grafiche Tintoretto (TV). 1a. ed. pp 266-274.
- Bouwer, H. (1989). The Bouwer and Rice Slug Test An Update, GroundWater, vol. 27, no. 3, pp. 304-309.
- Bouwer, H. and R.C. Rice (1976). A slug test method for determining hidraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.
- Calegari, Valerie (1997). Environmental Perceptions and Local Conservation Efforts in Cuatro Cienegas, Coahuila, México. Masters of Arts Thesis. Department of Geography. The University of Texas at Austin

Austin, Texas. Copyright By Valerie Rose Calegari. Página web: http://www.deserfishes.org/cuatroc/lit/calegari/thesis.html

- Campos, A.D.F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí, S.L.P., México, 1998.
- Castorena, G., M. Sánchez, M.E. Florescano, R.G. Padilla y U.L. Rodríguez (1980). Análisis histórico de las sequías en México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 137 pp.
- Caran, S. C., Winsborough, B. M. (1986). Depositional environments of the Cuatro Ciénegas basin, northeastern Mexico-Inland 'Sabkhas' and stromatolitic lakes. Geological Society of America Abstracts with Programs, 557 pp.
- CEISS (Centro de Investigación Sobre la Sequía) 2004, extraído de la página Web http://www.sequia.edu.mx/sequia/def.html
- Clark I.D. and Fritz P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers. 328 pp.
- Claasen H.C. (1982), Guidelines and technologies for obtaining water samples that accurately represent the water chemistry of an aquifer. U.S. Geol. Surv. Open-file Report 82-1024. 49 pp.
- CNA (2001). Estudio de evaluación hidrogeológica e isotópica en el Valle del Hundido. Coahuila.
- CNA (1998). Metodologías para la estimación de la disponibilidad del agua. Gerencia de Planeación Hidráulica. México D.F.
- Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento de Coahuila (2002). Estudio geohidrológico en Cuatrociénegas, Coah. Dirección de Proyectos Especiales.
- Contreras-Arquieta, A. (1998). New records of the snail *Melanoides tuberculata* (Müller, 1774) (Gastropoda: Thiaridae) in the Cuatro Ciénegas basin, and its distribution in the state of Coahuila, Mexico. The Southwestern Naturalist 43, pp. 283-286.
- Contreras-Balderas, Salvador (1984). Environmental impacts in Cuatro Ciénegas, Coahuila, México: A commentary. See Marsh, ed.

\_\_\_\_\_(1994). History of the movement for conservation of Cuatro Ciénegas. Proceedings of the Desert Fishes Council (1993)25:39 (abstr.).

- Consejo de Recursos Minerales. Cartas Geológico Mineras: Monclova G14-4; Ocampo G13-3; Nueva Rosita G14-1 y Tlahualilo G13-6.
- Cooper, H.H., J.D. Bredehoeft and I.S. Papadopulos (1967). Response of a finitediameter well to an instantaneous charge of water. Water Resources Research, vol. 3, pp. 263-269.
- Cortés, A., Durazo, J. (2001). Tendencia del Oxígeno -18 en la precipitación del centro de México. Revista Ingeniería Hidráulica en México 26, pp. 93-102.
- Craig, H. (1961). "Standard for reporting concentration of deuteirum and oxygen in natural waters", *Science* 133, 917 pp.
- Custodio, E. y M. R., Llamas (1976). "Hidrología Subterránea", Ediciones Omega, Barcelona.
- Diario Oficial (2003). Estudios técnicos del acuífero El Hundido en la zona de Cuatrociénegas, en el estado de Coahuila. Lunes 3 de noviembre de 2003.

Driscoll, G.F. (1986). "Groundwater and Wells. Johnson Division, St. Paul, Minn.

- Domenici, Davide (2004). *Gente del desierto, Del libro de* Badino, Giovanni; Bernabei Tullio; De Vivo, Antonio; Giulivo, Italo; Savino, Giuseppe, *Bajo el desierto, El misterio de las aguas de Cuatro Ciénegas, Italia, Editorial Grafiche Tintoretto (TV). 1a. ed. Pp. 52-59.*
- Domenico, P. A. y F.W. Schwartz (1998). Physical and chemical hydrogeology. Wiley and Sons.
- ERIC II (*Extractor rápido de información climatológica v.2.0*) (1999), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, versión disco compacto.
- Freeze, R. A., y J.A. Cherry (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
- Fritz P. and Fontes J.-Ch. (Eds.) (1980), Handbook of Environmental Isotopes Geochemistry, Vol. 1, The Terrestrial Environment., A. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 545 pp.
- Forti, Paolo; Giulivo, Italo; Mecchia, Marco; Piccini, Leonardo (2004). Las aguas de Cuatro Ciénegas. Del libro de Badino, Giovanni; Bernabei Tullio; De Vivo, Antonio; Giulivo, Italo; Savino, Giuseppe, Bajo el desierto. El misterio de las aguas de Cuatro Ciénegas. Italia. Editorial Grafiche Tintoretto (TV). 1a. ed. pp 76-86.
- Forti, Paolo (2004). Fosfatos y ambiente cárstico. Del libro de Badino, Giovanni; Bernabei Tullio; De Vivo, Antonio; Giulivo, Italo; Savino, Giuseppe, Bajo el

desierto, El misterio de las aguas de Cuatro Ciénegas, Italia, Editorial Grafiche Tintoretto (TV). 1a. ed. Pp 96-97.

- Forti, Paolo; Giulivo, Italo; Piccini, Leonardo; Tedeschi, Roberta (2003). "The Karst aquifer feending the Cuatro Ciénegas pools (Coahuila, México): Its vulnerability and safeguard", *Aquifer Vulnerability and Risk, First International Workshop*, may 2003.
- Garcia, E., Vidal, R., Tamayo, L. M., Reyna, T., Sanchez, R., Soto, M., Soto, E. (1975). Precipitación y probabilidad de la Lluvia en la República Mexicana y su evaluación. Comisión de Estudios de Territorio Nacional, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Goldhammer, R.K., P.J. Lehmann, R.G. Todd, J.L. Wilson, W.C. Ward and C.R. Johnson (1991). Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico, A field guidebook. SEPM, Gulf Coast Section, 85 pp.
- González-Hita, L. y Sánchez, L.F. (1992). Las técnicas isotópicas, una herramienta eficaz para el diagnóstico y evaluación de las aguas subterráneas, Ingeniería Hidráulica en México 64-85.
- Gutiérrez, Guadalupe (2004). Ciencia y Desarrollo, *Cuatro Ciénegas: Oasis en el desierto de Coahuila. Escenario de una gran diversidad biológica.* Revista, nueva época volumen 30, número 176, México, mayo-junio 2004.
- Grall, George (1995). *Cuatro Ciénegas: México's desert aquarium*. National Geographic, 188(October). pp. 85-97.
- Heath, R.C (1982). Basic Ground-Water Hydrology. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220.
- Hernández Cerda, M.E., L.A., Torres Tapia y G., Váldez Madero, Sequía meteorológica, Instituto de Geografía y la Facultad de Ciencias de la UNAM. Extraído de la página Web. <u>http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/cambio/libro/SEQUIA.pdf</u>
- Hvorslev, M.J. (1951). Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, bul. No. 26, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vickburgs, Mississippi.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2004), extraído de la página web <u>http://www.inegi.gob.mx</u>
- Instituto Nacional de Ecología (1999). Programa de manejo del área de protección de la flora y la fauna de Cuatrocienegas, SEMARNAT, 166 pp, 1999.

- Johannesson, Karen H.; Cortés, Alejandra; Kilroy, Kathryn C. (2004). Reconnaissance isotopic and hydrochemichal study of Cuatro Ciénegas groundwater, Coahuila, México. *Journal of South American Earth Sciences*, USA. pp. 1-10.
- Johnson, James E. (1984). Special symposium on the biota of Cuatro Ciénegas: A summary. See Marsh, ed.
- Kruseman, G.P. and N.A. de Ridder (1990). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data Second Edition (Completely Revised) ILRI publication 47. Intern. Inst. For Land Reclamation and Improvements, Wageningen, Netherlands, 377 p.
- Lehmann C., D.A. Osleger and I. Montañez. (2000). Sequence stratigraphy of Lower Cretaceous (Barremian-Albian) carbonate platforms of Northeastern Mexico: Regional and global correlations. *Journal of Sedimentary Research*. Vol. 70, No. 2, pp. 373-391.
- Lehmann C., D.A. Osleger, I. Montañez, W. Sliter, A. Arnaud-Vanneau and J. Banner (1999). Evolution of Cupido and Coahuila carbonate platform, Early Cretaceous, northeastern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 111, No 7, pp. 1010-1029.
- Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (2001). Estudio de evaluación hidrogeológica e isotópica en el Valle del Hundido, Coahuila, Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua, contrato GAS-006-PRO 01, diciembre 2001.
- Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (2002) *Estudio Geohidrológico en Cuatrocienegas, Coahuila*, Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento de Coahuila, Contrato CEAS IAI-18-02-AP, Noviembre 2002.
- Lesser Jones, H. (1965). Confined fresh water aquifers in limestone, exploited in the north of Mexico with deep wells below sea level. In: Proceedings Dubrovnik Symposium, 1965. *Hydrology of Fractured Rocks*. Vol. 2. International Association of Scientific Hydrology, pp. 526-539.
- Lloyd, J.W., Heathcote, J.A. (1986). Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater: An Introduction, Clarendon Pr.
- McKee, J.W., N.W. Jones and L.E. Long (1990). Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, México. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 102, pp. 593-614.
- Minckley, W. L. (1969). Three decades near Ciénegas, México: photographic documentation and a plea for area conservation. Proceedings of the Arizona-Nevada Academy of Science, vol. 26, issue 2, pp. 89-119.

- Minckley, W. L. (1969a). Environments of the Bolsón of Cuatro Ciénegas, Coahuila, México, with special reference to the aquatic biota. University of Texas El Paso Science Series. Texas Western Press, El Paso.
- Minckley, W. L. (1984) Cuatro Ciénegas fishes: research review of a local test of diversity versus habitat size. *Journal of Arizona-Nevada Academy of Science* 19, pp. 13-21.
- Minckley, W. L. and Gerald A. C. (1968). Preliminary limnologic information on water of the Cuatro Cienegas Basin, Coahuila, Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 13(4). pp. 421-431.
- Minckley, W. L. and Gerald A. C. (1969). Emvironments of the Bolson of Cuatro Cienegas Basin, Coahuila, Mexico, University of Texas at El Paso. *Science series number two.*
- Minckley, W. L., Cole, G.A. (1968). Preliminary limnologic information on waters of the Cuatro Cienegas Basin, Coahuila, Mexico. The Southwest Naturalist 13, 421-431.
- Murray, G. E. (1961). Geology of the Atlantic and Gulf Coastal Providence of North America. Harper and Brothers, New York.
- Neuman S.P. (1975). Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, Vol. 11, No 2, pp. 329-342.
- NOOA (2004). Información tomada de la página web: http://www.drought.noaa.gov
- Padilla y Sánchez, R. (1978). Geología y estratigrafía (Cretácico Superior) del límite suroeste del estado de Nuevo León. Revista del Instituto de Geología de la UNAM. Vol. 2, No. 1, pp. 37-44.
- Padilla y Sánchez, R. (1985). Las estructuras de la curvatura de Monterrey, estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. Revista del Instituto de Geología de la UNAM. Vol. 6, No. 1, pp. 1-20.
- PEMEX (1970). Informe Geológico del Área Villa Ocampo, Coahuila. Superintendencia de Exploración. Ciudad Reynosa, Tamaulipas.
- PEMEX (1970). Prospecto Lamadrid. Geológico de Lamadrid, Coahuila. Superintendencia de Exploración. Ciudad Reynosa, Tamaulipas.
- Pronatura (1998). Programa de acción emergente para el Valle de Cuatrociénegas, World Wildlife Fund Publication, Saltillo, Mexico.

- Rodríguez-Almaraz, G., Gonzales-Aquilar, J.A., Mendoza-Alfaro, R. (1997). Biological and ecological notes of *Palaemonetes suttkusi* (Crustacea: Palaemonidae) from Cuatro Ciénegas basin, Coahuila, Mexico. The Southwestern Naturalist 42, 501-503.
- Sancho y Cervera, J., Z.F. Zavala, V.M. Sánchez y V.V., Martínez (1980).. Monitoreo de sequías y heladas, México. Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Dirección de inventarios de agua y suelo, Proyecto IA 800/. pp. 14-16.
- SARH (1980). Estudio geohidrológico preliminar en la zona Cuatrocienegas-Ocampo, Coahuila, Elaborado por la compañía ININSA, S.A. para la Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas.
- SEDUE (1983a). Proyecto ejecutivo de ordenamiento ecologica para la conservación y aprovechamiento del area recreativa y cultural Poza la Becerra, Cuatro Ciénegas, Coahuila. México City: SEDUE.
- Souza, Saldívar Valeria (2004). Análisis de las comunidades bacterianas de Cuatro Ciénegas y su relación con el Valle de El Hundido, Coahuila.
- Souza, Valeria, Ana Escalante, Laura Espinoza, Aldo Valera, Antonio Cruz, Luis E. Eguiarte, Ferrán García Pichel y Jim Elser. Revista de difusión de la facultad de ciencias de la UNAM. Núm. 75.Cuatro Ciénegas un laboratorio natural de astrobiología. pp. 4-12. Julio-Septiembre 2004.
- Souza, Saldívar Valeria (2004). Reporte del análisis de las comunidades bacterianas de Cuatro Ciénegas y su posible relación con el Valle de El Hundido, Informe B, Coahuila. Instituto de Ecología, UNAM.
- Suzanne, Pierce (2002). The formation and water resource management of the Cuatro Ciénegas de Carranza Valley, Coahuila, México. University of Texas at Austin, EUA. webspace.utexas.edu/sawp33/www/index.html.
- Taylor, Dwight W. and W. L. Minckley (1966). New world for biologists. Pacific Discovery 19(September/October):18-22.
- Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Am. Geofhys. Union Trans., vol. 16, pp. 519-524.

Waterloo Hydrogeologic. Aquifer Test Vers 3.0. Waterloo, Canadá. 2003.

Wilson, J.L., W.C. Ward and J. Finneran (1984). A field guide to Upper Jurassic and Lower Cretaceous carbonate platform and basin systems, Monterrey-Saltillo area, northeast Mexico. Gulf Coast Section, *Society of Economic Paleontologist and Mineralogists,* 76 pp.

- Wilson, J. L. and W.C., Ward (1993). Early Cretaceous carbonate platformas of northeastern and east-central Mexico. *American Association of Petroleum Geologist* Memoria 56, pp. 35-50.
- Winsborough, B.M. (1993). Ecological aspects of stromatolites and related biogenic structures in lakes and streams of the Cuatro Ciénegas basin, Coahuila, México. Papers from the 1993 symposium in Monterrey, Nuevo León. Página web:http://www.desertfishes.org
- World Wild Life Fud, (WWLF), *Diagnóstico consultado sobre el uso del agua subterránea en el Valle de Cuatro Cienegas, anexo 4*, Protección de la Fauna Mexicana, A.C., Saltillo, Coahuila, México, 2000.